

ISSN 2435-7766 (Print)
ISSN 2435-7774 (Online)

岐阜県産業技術総合センター研究報告

第1号 令和元年度

Report of Gifu Prefectural Industrial Technology Center

No.1 2019

岐阜県産業技術総合センター

Gifu Prefectural Industrial Technology Center

目次

○機械

プレス金型の故障診断手法の確立（第5報）	1
次世代自動車・航空機部品の製造に必要な異種材料接合技術の開発（第8報）－異種金属接合技術の開発－	5
軽量部材加工技術に関する研究（第2報）	9

○金属

鋳物の高品質化、品質管理技術に関する研究－鋳型内ガス圧の測定と影響－	11
アルミダイカスト部品の高品質・低コスト化を実現する製造技術の開発（第4報）	13
鋳造分野におけるデジタルものづくり	17
刃物切れ味試験機の試験精度向上に関する開発研究（第3報）	21
レーザーによる顔料を使用しない金属製品への着色技術および、ぎふブランド製品の開発（第5報）	25
金属材料への表面処理技術に関する研究（第1報）－低温窒化－	27
金属材料への表面処理技術に関する研究（第2報）－表面開始重合によるステンレス上への有機皮膜の形成－	29
ゾルゲルコーティングによるTi系硬質膜の作製	31

○化学

石灰水洗ケーキの用途開発に関する研究（第2報）	33
プラスチック材料の品質向上技術の開発（第2報）－リサイクルPE-PP材料の定量化手法の開発－	37
セルロースナノファイバーを用いたマルチマテリアル化（第1報）	41

○繊維・紙

GIFUブランド繊維製品の開発（第1報）	45
軽量・高保温性繊維素材の開発（第5報）	49
AIを活用した検反技術に関する研究	53
紙の高機能化と品質評価に関する研究（第3報）－段ボールの湿度環境変化を伴う静的圧縮試験－	57
美濃産楮の高品質化のための栽培・管理技術の開発（第1報）－楮の品質評価－	61

○複合材料

次世代自動車・航空機部品の製造に必要な異種材料接合技術の開発（第7報）－FRP-金属接合技術の開発－	65
軽量材料／情報技術を活用した福祉機器の開発（第1報）	69
FRP サンドイッチ材の成形技術に関する研究（第2報）	73
熱可塑性FRPの疲労評価・推定・診断に関する研究（第2報）	75
射出成形による炭素繊維入り複合材ボルトの開発	79

○情報

AI 技術を活用した検査工程の省力化・効率化（第1報）－深層学習を用いた欠陥画像分類モデルの改良－	81
品質見える化のための画像センシング技術に関する研究開発－両手検出技術を用いた作業時間計測システムの開発－	85
スマート金型の応用展開に関する研究	87
穴あけ加工のドリル破損予兆の検出	91
モータ状態計測システムとエミュレータの開発	95
壁面撮影装置を用いた画像統合技術と点検支援システムの研究開発（第2報）	99
温湿度センシングに関する技術開発	103
目視検査員のための目のセルフケア支援技術の研究開発（第1報）	105
AI 技術を活用した検査工程の省力化・効率化（第2報）－深層学習を用いた画像検査システムの開発－	107
AI 技術を活用した検査工程の省力化・効率化（第3報）－製造現場への深層学習技術の導入に向けた検証－	108
モータ振動の遠隔監視システムの構築	109
EMC 試験設備の活用－医療機器の開発事例－	110

機械

プレス金型の故障診断手法の確立（第5報）

横山貴広*、塚原誠也*

Establishment of failure diagnosis system for press die (V)

YOKOYAMA Takahiro* and TSUKAHARA Seiya*

金属のプレス加工によって発生した金型の摩耗による損傷をあらかじめ予測することは、人が目視でその状態を確認できないため難しい問題と考えられている。当センターでは、県内の機械・金属業界の支援を目的に、金型の損傷を予測して早期に発見するシステムの研究開発を継続している。本年度は金型摩耗の進行の可視化を目的に、プレス加工製品を製造する県内企業の協力を得て、実際に生産機として使用しているトランスファプレス機の金型に長期間 AE (Acoustic Emission) センサを取付け、プレス回数と AE 電圧波形の変化を検証した。その結果、プレス回数の増加に伴い、主加工直前の微小電圧が徐々に増加する傾向があることを確認した。

1. はじめに

金属製品の製造には大量生産に適したプレス機が使用されている。プレス機は短時間・低コストで効率良く生産できる反面、金型に損傷が生じると不良品が大量に発生する問題を抱えている。プレス金型はプレス回数の増加に伴い、徐々に摩耗が進行する。この摩耗を原因とする損傷が生じる前に金型の交換を実施するのが理想的だが、現時点では目視で金型摩耗の進行が確認できないのが現状である。

このような背景のもと、昨年度までは深絞り試験機と擬似的に摩耗させた金型を使用して、プレス条件と AE 電圧波形の基本的な関係を把握した^{1,2)}。

本年度はプレス加工製品を生産している県内企業のトランスファプレス機の金型に AE センサを取付けて、プレス加工時の AE 電圧波形を測定した。さらに、金型摩耗の進行を可視化するために、プレス回数の増加に伴う AE 電圧波形の変化を分析し、その結果の考察を行った。

2. 試験内容

2.1 試験装置の概要

図1に本試験に利用したシステムの概略図、表1にプレス試験の概要を示す。試験の対象物はプレス加工製品や金型である。そのため、共振周波数 150kHz（金属の弾性波）で最大の増幅特性がある AE センサを使用した。また、金型状態の変化の影響が 150kHz 以外の AE 電圧に現れることも考慮して、共振周波数 150kHz を含む 1MHz までのフラットな特性を有する広帯域型の AE センサも併用した。プレス加工製品の製造工程は5工程で構成され、その3工程目で製品に打痕キズが発生しやすいことが経験上わかっている。そのため、2つの AE センサを3工程目の下側の金型に装着した。1プレスあた



図1 システムの概略図

表1 プレス試験の概要

プレスの種類	トランスファプレス (5工程)
対象製品	金属製品
金型材料	SKD11, S50C
センサ設置箇所	3工程目の金型 (トリム・深絞り工程)
AEセンサ	フィジカルアコースティック株式会社 型式: PK151 共振周波数150kHz 型式: PKWDI 広帯域型
アンプゲイン (コントローラ)	10dB
試験回数	第1回目: 約77,000プレス 第2回目: 約62,000プレス
サンプリング周波数	200kHz
備考	・試験金型は既製品を使用 ・試験1回目と2回目は同じ金型を使用 ・プレス1,000回毎に製品を取り出すため プレス機を停止 ・夜間・土日はプレス機を停止

りの製品の加工時間は 2.3~2.5sec 程度だが、主加工時間は 220~250msec である。データ保存容量の節約と1プレスごとの波形の特徴を比較するために、被成形材が移動するタイミングに合わせて信号を発生させる同期用センサを1つ設置した。主加工工程で取得した AE 電圧信号はアンプ (コントローラ) で増幅され、200kHz の周波数でデータロガーに取り込んでいる。

企業の生産計画に合わせて、1回目約 77,000 プレス、2回目約 62,000 プレスの合計 2回約 139,000 プレスの加工を実施し、その測定結果をデータ分析の対象にしてい

* 機械部

る（トライプレスを除去）。また、2回の試験は同じ金型を使用したため、2回目の試験は必然的に1回目の試験よりも摩耗した金型を使用している。なお、広帯域型の AE センサによって取得した AE 電圧は、共振周波数 150kHz の AE 電圧よりもかなり小さく、特徴的な傾向が確認されなかった。よって、本報告は共振周波数 150kHz の AE センサで取得したデータを取扱い、その結果について述べる。

2.2 データの分析手法

AE 電圧波形のデータ分析には、データ分析の対象範囲と分析手法の2つを決定する必要がある。

共同研究先の岐阜大学が、万能試験機を用いて打抜き時のパンチの破壊現象を AE 電圧パルス波形から解明する試験を実施し、主加工直前のパルス波形は被成形材の亀裂によって生じたと報告している³⁾。また、理論的には主加工前の被成形材に亀裂が生じる前の段階で、パンチと被成形材が接触した際、パンチの摩耗が進行すればするほど、両者間の真実接触面積が減少して、接触面の荷重が増加する。さらに、その状態でさらにパンチに力を加えると発生する弾性波が大きくなると推測される。

図2は本試験のプレス加工製品を生産する際に発生した、1プレスの典型的な AE 電圧波形の一例である。図2の主加工領域直前の AE 電圧パルス波形は、前記により金型摩耗が原因による発生というより、被成形材の微小亀裂の影響と考えられる。そのため、本試験の目的であるパンチを含む金型摩耗の進行の特徴を捉えるには、材料の微小亀裂が発生する前の領域の AE 電圧波形の特徴を把握する必要がある。このように、主加工波形直前のパルス発生よりさらに前のパンチと被成形材が接触する領域内の 50msec の AE 電圧をデータ分析の対象範囲とした。なお、図2のデータ分析対象範囲よりさらに前のパルス波形は、プレス下降時に動作するエアシリンダの影響が現れている。よって、データ分析対象範囲から除外した。

図2より、データ分析対象範囲内の AE 電圧は、パンチを含む金型に大きな亀裂や損傷が生じない限り、極めて小さな電圧になる。また、微小な電圧は信号に対するノイズの比率（S/N 比）が相対的に高いため、微小電圧値を直接分析すると、データの特徴が見えにくくなる。そのため、あらかじめ対象範囲内の微小電圧値を4つに分割し、各区分における電圧の割合（電圧の存在分布（%）と定義）を算出し、その変化の特徴を把握する分析手法を選択した。図3は図2のデータ分析対象範囲である 50msec の AE 電圧波形を拡大した図である。図3の場合、データ分析対象範囲内で 5mV 以下は 51.8%、5～10mV は 34.6%、10～20mV は 12.1%、20mV 以上は 1.5% の AE 電圧の存在分布を示す。

そこで、この AE 電圧の存在分布の推移から、プレス回数の増加に伴う金型摩耗の進行の可視化を試みた。

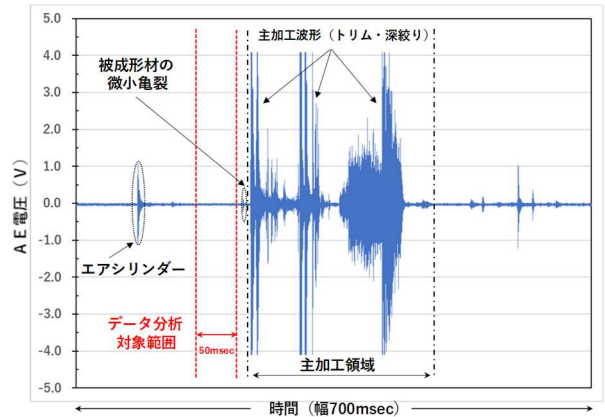


図2 AE電圧波形

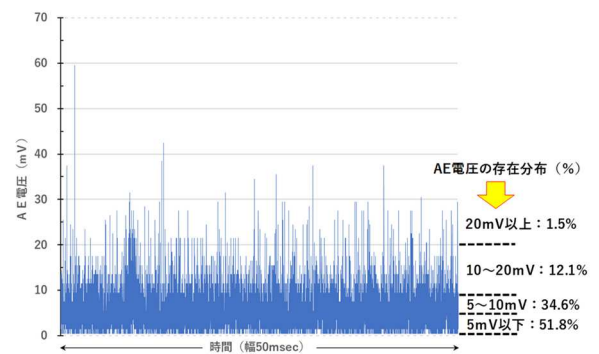


図3 データ分析対象範囲のAE電圧波形の拡大図

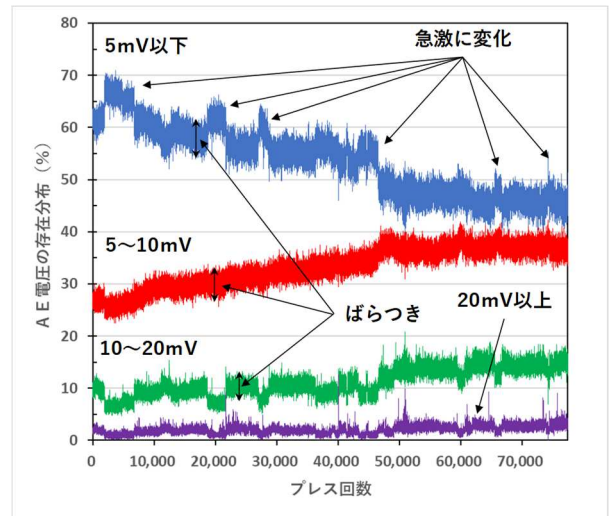


図4 AE電圧の存在分布（試験1回目）

3. 試験結果及び考察

プレス加工の試験1回目（約 77,000 プレス）の AE 電圧の存在分布とプレス回数の関係を図4に示す。図より、20mV 以上の電圧区分を除き、各電圧区分で約 3～5%のばらつきが確認できる。これは1プレス毎の加工のばらつきの影響とともに、微小電圧を取り扱っているためノイズの影響も考えられる。さらに、図4の存在分布の推移を概観すると、AE 電圧が急激に変化しているところの確認できる。これは生産の運用上、製品 1,000 個ごとの袋詰めや夜間・休日にはプレス機を停止してい

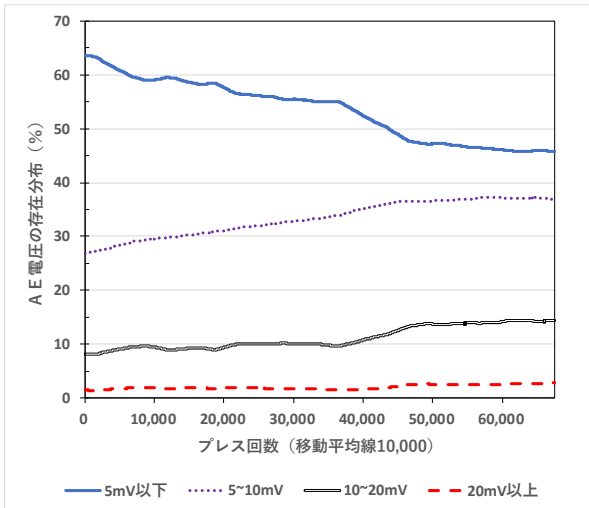


図5 AE電圧の存在分布（移動平均線：1回目）

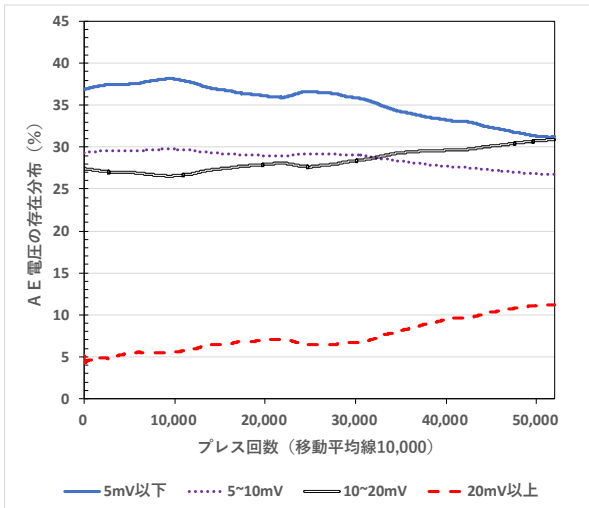
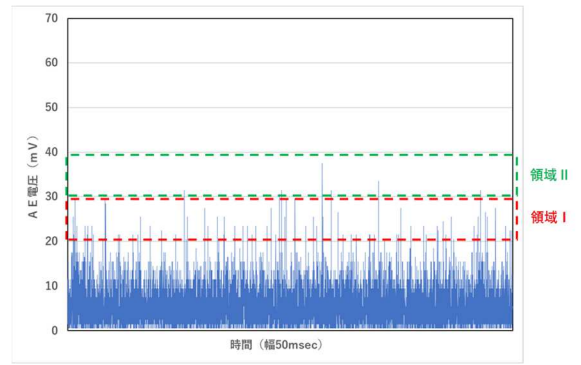


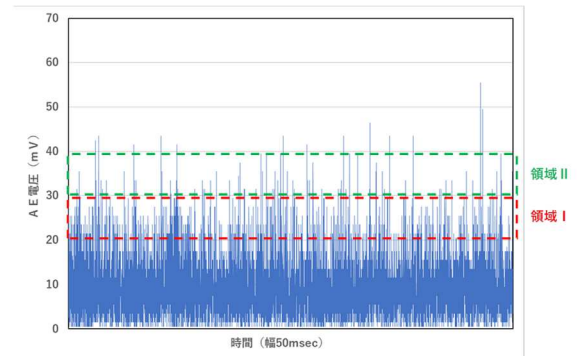
図6 AE電圧の存在分布（移動平均線：2回目）

るため、停止後の生産開始時には、金型の温度、被成形材に塗布する潤滑油の粘性、室温の違いによる被成形材の状態などが停止前とは異なるため、AE電圧の急激な変化として現れていると考えられる。

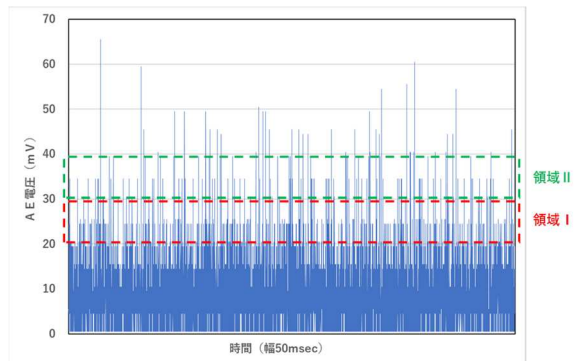
1 プレスによって生じる金型摩耗の進行は非常に小さい。よって、1 プレスごとの短期的な視点で存在分布を考察すると、加工のばらつきや環境の変化の方がAE電圧に与える影響に大きく寄与するため、長期間のプレス動作によって徐々に進行する金型の摩耗によるAE電圧の変化を見逃す恐れがある。よって、加工ごとのばらつきや環境の変化によるAE電圧に与える影響を極力排除し、プレス回数の増加によって徐々に進行する金型の摩耗の影響をAE電圧値に反映させるため、移動平均線（プレス回数10,000回）を採用した。図5、図6は試験1、2回目における移動平均線を用いたAE電圧の存在分布とプレス回数の関係を示す（図5の横軸であるプレス回数の10,000は10,000~19,999回、20,000は20,000~29,999回の10,000回のプレス回数を意味する）。図5と図6より、移動平均線を採用すると、プレスごとに生



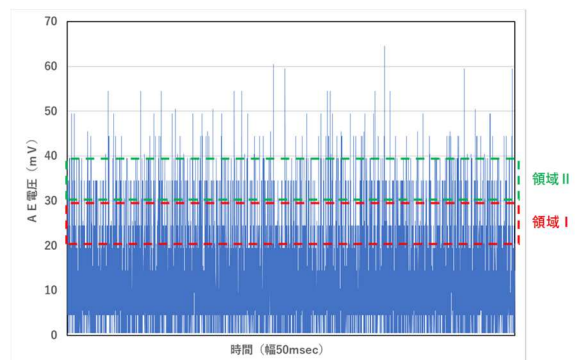
(a) 試験開始後 5,000 回（試験 1 回目）



(b) 試験開始後 65,000 回（試験 1 回目）



(c) 試験開始後 22,000 回（試験 2 回目）



(d) 試験開始後 61,000 回（試験 2 回目）

図7 試験回数の増加に伴うAE電圧波形

じる加工ばらつきや、生産の運用から生じる環境の影響によるAE電圧の振幅を抑えたなめらかな曲線になっていることがわかる。

まず、図5、図6の全体を概観すると、1回目はプレス回数の増加に伴って電圧5mV以下の存在分布が減少し、それ以上が増加しているが、2回目は10mV以下が減少し、それ以上が増加している。このことから、2回の試験ともに、プレス回数の増加に伴って全体的にAE電圧が徐々に大きくなっていることがわかる。

次に、試験1回目と2回目の結果を比較すると、試験2回目の方が10mV以上の領域でAE電圧の存在分布が高い。本試験は試験1回目と2回目で同じ金型を使用しているため、2回目は1回目より摩耗が進行した金型を使用していることになる。よって、この現象は、主加工前のパンチと被成形材の接触時に、金型の摩耗が進行すればするほど、金型・被成形材から発生する弾性波も増加する影響でAE電圧が高くなったと予想される。

実際に測定した典型的なAE電圧波形を図7(a)～(d)に示す。特に、前記の状態が確認しやすいである領域I(20～30mV)と領域II(30～40mV)に着目すると、プレス回数が多くなるほどAE電圧の存在密度が高くなっている。図5～図7で示したAE電圧の上昇傾向を精確に捉えるために、1プレスごとのAE電圧波形の積分値を求め、さらにその移動平均線を示したものが図8(a)(b)である。図より、プレス回数の増加に伴いAE電圧の積分値が徐々に高くなり、その傾きも大きくなっていく様子が顕著にわかる。

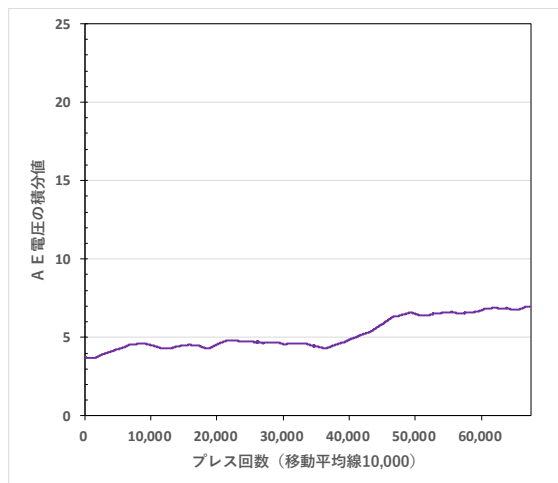
なお、1回目と2回目の間のAE電圧の積分値には大きな差があることが確認できる。この差は、両者間に約2週間程度の期間があるため、前記の環境変化の影響のみならず、途中の生産品種変更に伴う金型交換やAEセンサの取付位置のずれの影響などが重ね合わさった結果であると考えられる。

これら一連の結果によって示された、プレス加工によるAE電圧の増加の原因の1つには、プレス加工によって発生する金型摩耗の進行の影響が含まれている。従って、主加工波形直前のパルス発生時期よりさらに前のAE電圧の存在分布や積分値を監視することによって、金型摩耗の進行の可視化は可能であると思われる。

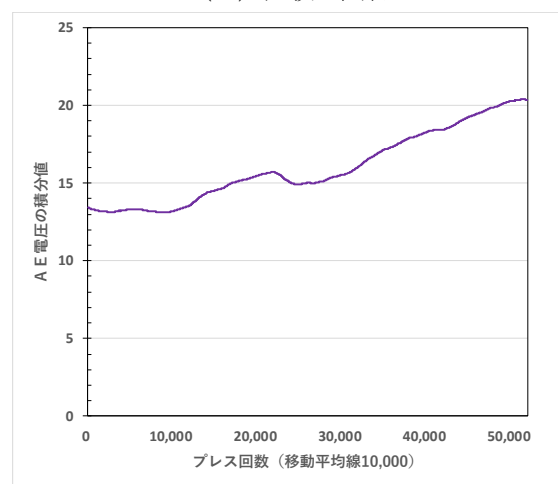
しかし、(A)金型は明らかに破損するか、製造している製品が品質規格から外れるまで使用し続けるため、実際に生産途中の金型の摩耗量(重量)の測定は不可能である、(B)プレス回数の増加によるAE電圧の増加は、環境や金型の摩耗の進行以外(例:プレス機本体のクランク機構部品の摩耗など)にも原因が考えられる、などの難しい問題を抱えている。今後、このような課題についても検証していきたいと考えている。

4. まとめ

県内企業が実際に生産機として使用しているトランスファプレス機の金型に長期間AEセンサを取付け、AE電圧の特徴について分析した。その結果、現時点で上記(A)(B)のような様々な問題点があるものの金



(a) 試験1回目



(b) 試験2回目

図8 AE電圧の積分値(移動平均線)

型摩耗の進行はAE電圧のトレンド監視から可視化できる可能性が確認できた。今後、本報告に述べた現象が繰り返し発生することを確認し、実際に金型を交換するまで試験を実施することで、金型の損傷を予測し、交換時期の適正化を探索していく予定である。

【謝 辞】

本研究の遂行にあたり、共同研究の実施機関である株式会社ツカダ並びに岐阜大学の山下教授に深く感謝いたします。

【参考文献】

- 1) 横山ら, 岐阜県工業技術研究所研究報告第6号, pp5-7, 2018
- 2) 横山ら, 岐阜県工業技術研究所研究報告第7号, pp5-9, 2019
- 3) 村瀬・山下ら, [No.19-332]日本機械学会第27回機械材料・材料加工技術講演会(M&P2019)論文集 [2019.11.20-22,福井]

次世代自動車・航空機部品の製造に必要な異種材料接合技術の開発（第8報）

— 異種金属接合技術の開発 —

加賀忠士*、丹羽孝晴*、塚原誠也*

Development of joining dissimilar materials for production of next generation vehicle parts and aircraft parts (VIII)

- Development of joining technology dissimilar metal materials -

KAGA Tadashi*, NIWA Takaharu* and TSUKAHARA Seiya*

本研究では、同種金属材料及び異種金属材料における超音波接合について、接合強度の向上、及び本接合方法を用いたアプリケーションの開発を目指している。今年度は、ローレット加工の無いホーンでの接合性能の評価、アプリケーションとして、ハット部材への接合、板材への六角ナット接合を検討した。その結果、接合強度を上げるにはローレット加工の無い2山形状の2-R25ホーンが有効であった。超音波接合したハット部材の曲げ試験評価を行った結果、超音波接合部材の曲げ変形に要するエネルギーは、接着剤接合部材の70%程度であった。また、板材と六角ナットの超音波接合強度は、JIS B 1196のM4溶接ナットの押込みはく離強さ参考値の15%程度であった。

1. はじめに

次世代自動車、航空機等の輸送機器の燃費向上に向けた軽量化への取組みとして、各部に様々な素材を適材適所に使うマルチマテリアル化の検討が行われている。このマルチマテリアル化を実現させるためには、異種材料接合技術が重要となり、金属材料の接合においては、リベット等による機械的接合、溶接、圧接等による冶金的接合が一般的に用いられている。しかし、リベット接合ではリベット自身が重量増加の要因となり、溶接では異種材料の組合せによって脆弱な金属間化合物が形成され必要な強度が得られないといった課題が残されている。

そこで、岐阜県産業技術総合センターでは、溶融を伴わない固相接合法に着目し、超音波接合法を用いた異種金属材料接合の技術開発に平成28年度から取り組んでいる。この接合法は、超音波接合用工具（ホーン）による接合面への加圧と、振動の印加により界面での摩擦、塑性流動を発生させ、金属表面の吸着分子や酸化層を破壊することで新生面同士の原子間結合により接合が実現できている。現在は、自動車内部の電気配線の端子やLSI内部配線の端子の接合（ワイヤーボンディング）など、各種電気端子の接合に多く用いられている¹⁾。

これまでに当センターでは基礎的な調査を中心に実施してきた。具体的には、異種金属材料の組合せにおける加振時間と接合強度の関係、加振振幅と接合強度の関係、ホーン加圧力と接合強度の関係を把握した。また、ホーン及びアンビルのローレット目ピッチの違いによる接合性能評価、更には、ローレット加工の無いホーンによる接合性能評価を行った。これら以外にも、接合面の粗さが接合強度へ及ぼす影響調査、接合面の温度調査等を行ってきた^{2,4)}。

今年度は、ローレット加工の無いホーンでの接合性能の評価、超音波接合を使ったアプリケーションの提案として、ハット部材への接合、板材への六角ナット接合を実施し、これらの性能評価を行ったので報告する。

2. 実験

2.1 実験装置

接合には超音波金属接合機（日本アビオニクス（株）、SW-3500-20/SH-H3K7）を用い、ホーンはローレット加工無しの曲率半径R25を2山連結した形状のホーン（加圧面10mm角）、ローレット加工有り1mmピッチホーン（加圧面10mm角）の2種類を準備した。なお、アンビルについてはローレット加工有1mmピッチの1種類を使用した。

2.2 接合実験方法

2.2.1 ローレット加工無しホーンの接合実験

昨年度に引き続き、ローレット加工の無いホーンの接合性能評価を行った。昨年度は、R200の曲率半径を有したかまぼこ型形状のホーン（以下、R200ホーン）を使用した。今年度は図1に示すように、曲率半径R25を2山連結した形状のホーン（以下、2-R25ホーン）を準備した。接合試料には板厚1mmの純銅C1100及びアルミニウム合金A5052を長さ100mm、幅15mmに切断した試料を用い、ホーン側をC1100、アンビル側をA5052とし2枚の試料を15mm重ね合わせるシングルラップ接合を行った。接合後の試料を図2に示す。接合条件は2-R25ホーンを使用する以外は昨年度と同様の条件で、ホーンの全振幅64 μ m（100%）に対し50%、70%、90%の振幅、加振時間0.3sec、0.5sec、0.7secとし、ホーンの加圧力1500Nの条件で接合実験を行った。

2.2.2 ハット部材への接合実験

ハット部材は、厚さ0.5mmアルミニウム合金A5052を所定の寸法に切断し、プレス加工によってハット形状

*機械部

に成形した部材と平板を重ね合わせ、超音波接合機を用いて作製した。ハット部材の形状及び超音波接合位置を図3、作製したハット部材を図4に示す。接合条件としては、ローレット加工有り 1mm ピッチホーン(加圧面 10mm 角)を用い、振幅 70%、加振時間 0.7sec、ホーンの加圧力 1500N とし、25mm (接合数 18 点)、50mm (接合数 10 点)、66mm (接合数 8 点) の 3 種類の間隔のスポット接合によりハット部材の接合を行った。また、比較として、接着剤(スリーエム社製、EPX 接着剤(二液混合型) DP-460)を用いて作製したハット部材も準備した。

2. 2. 3 板材への六角ナット接合実験

六角ナットはスチール製三価クロメート仕上げ M4 を使用した。また、その接合相手となる板材は板厚 1mm、長さ 50mm、幅 15mm に切断した A5052 を用いた。六角ナット接合体の様子を図5に示す。接合条件として、

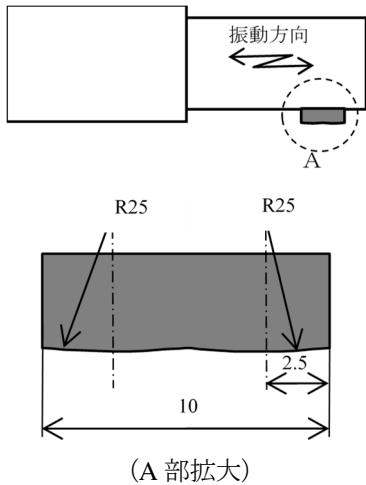


図1 ローレット無し 2-R25 ホーン形状

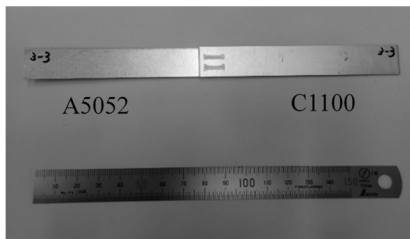


図2 2-R25 ホーンによる接合体

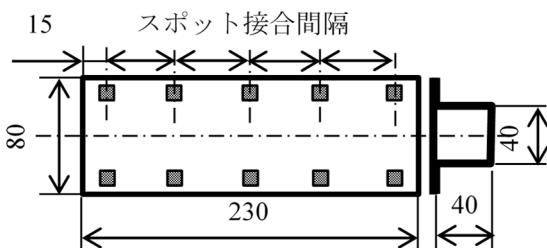


図3 ハット部材形状の詳細

ローレット加工有り 1mm ピッチホーン(加圧面 10mm 角)を用い、50%、70%、90%の振幅、加振時間 0.5sec、0.7sec、1.0sec と変え、ホーンの加圧力 1500N で接合実験を行った。

3. 結果及び考察

3. 1 ローレット加工無しホーンの接合性能

接合状態の評価は、万能材料試験機(インストロン 5985 型)を用いて、試験速度 2mm/min にて引張せん断試験を行い、最大引張せん断荷重を測定し、この値を接合試料の接合強度とした。加振時間 0.5sec における振幅変化による接合強度の関係を図6に示す。試験結果には昨年度までに実施したローレット加工有り 1mm ピッチホーン(加圧面 10mm 角)、ローレット加工無し R200 ホーン(加圧面 10mm 角)も含めて示す。この図から、振幅の増加に伴い、接合強度が増加していることがわかる。また、振幅 90%の条件における接合強度平均値は、1mm ピッチホーンは 2.12kN、R200 ホーンは 1.83kN、2-R25 ホーンは 2.44kN となった。このことからホーン形状に関係なく振幅が大きくなるほど接合強度は高くなる傾向にあるが、2-R25 ホーンが最も接合強度が高くなることがわかった。続いて振幅 70%における加振時間変化における接合強度の関係を図7に示す。この図から、加振時間の増加に伴い、接合強度が増加していることがわかる。また、加振時間 0.7s の条件における接合強度平均値は、1mm ピッチホーンは 1.85kN、R200 ホーンは 2.09kN、2-R25 ホーンは 2.11kN となった。このことから接合時間を長くすることで接合強度を上げるには、2-R25 ホーンが一番有効であることがわかった。

3. 2 ハット材への接合性能

ハット部材の接合評価は、万能材料試験機(東京衝機製)を用い 3 点曲げ試験(3 点曲げ圧子径 25mm、スパン 150mm、試験速度約 100mm/min)による曲げ変形に要したエネルギー値を採用した。

3 点曲げ試験の様子を図8に示す。また、一例としてこの時に得られた、接合数 18 点における曲げ変位と荷

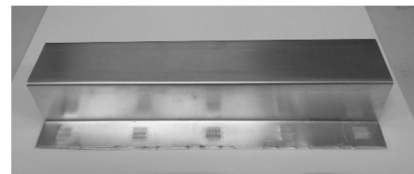


図4 ハット部材



図5 六角ナット接合体

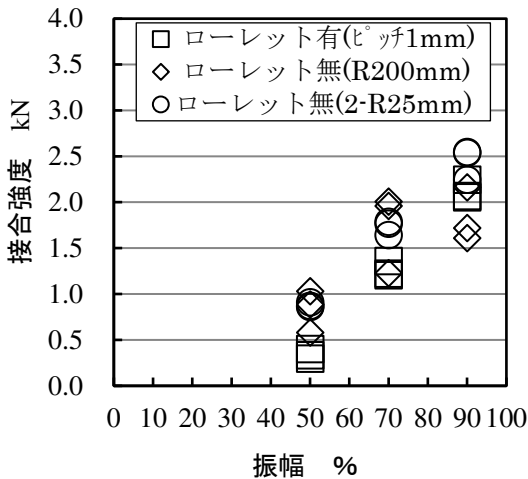


図6 振幅と接合強度の関係
(加振時間 0.5sec)

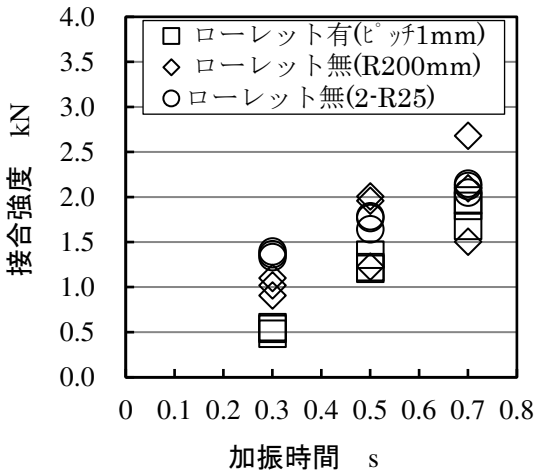


図7 加振時間と接合強度の関係
(振幅 70%)

重の関係を図9に示す。3点曲げ試験の評価は、この図の曲げ変形(変位 0~50mm)に要したエネルギー値(変位と荷重曲線に囲まれた面積)で行った。超音波接合の各接合間隔で作製したハット部材及び接着剤で作製したハット部材の曲げ変形(変位 0~50mm)に要したエネルギー値を図10に示す。この結果から、超音波接合において接合間隔の違いによるエネルギー値の違いは見られなかった。また、超音波接合と接着剤接合を比較すると超音波接合は接着剤接合の約70%程度になっていることがわかった。超音波接合において、接合箇所を決められた間隔で順番に行っていく際、既に接合された接合部が次の接合における材料同士の振動を阻害し、これによって接合強度が弱くなり、接合間隔の違いによるエネルギー値の違いが現れなかったと考えられる。

3.3 板材への六角ナット接合性能評価

ナットの接合評価は、万能材料試験機(インストロン

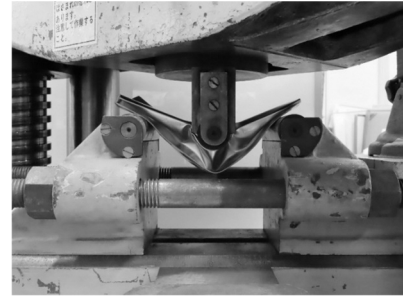


図8 ハット材3点曲げ試験の様子

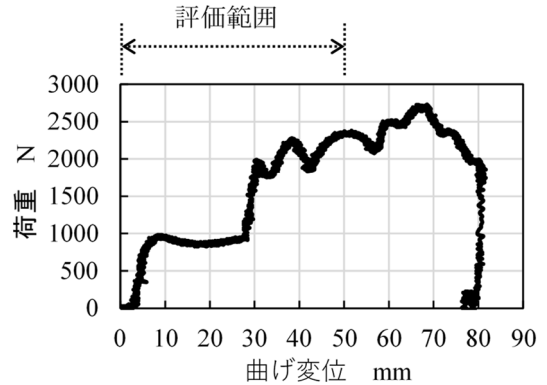


図9 曲げ変位と荷重の関係(接合数18点)

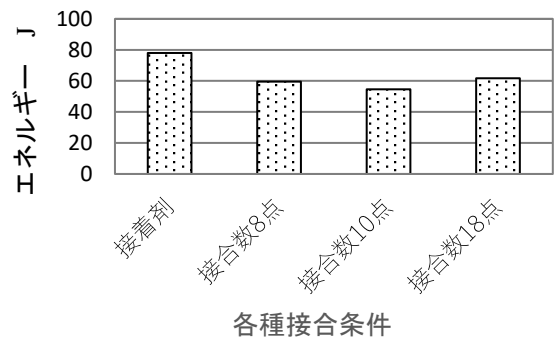


図10 曲げ変形に要したエネルギー値

5985型)を用いて、試験速度 1mm/minにて接合面に対し垂直方向に引張したときの最大荷重を測定し、この値を接合試料の接合強度とした。

加振時間 0.7secにおける振幅変化による接合強度の関係を図11に示す。この図から、振幅の増加に伴い、接合強度が増加していることがわかる。続いて振幅70%における加振時間変化における接合強度の関係を図12に示す。この図から、加振時間 0.7secのとき最も接合強度が高く、その後加振時間を延ばすと逆に接合強度が下がることがわかった。なお、本接合実験で最も接合強度の高い条件の振幅90%、接合時間0.7secでは平均で約480Nであったが、この値をJIS B 1196のM4溶接ナットの押込みはく離強さの参考値3240Nと比較すると15%程度にとどまっていることもわかった。今後接合強度向上を課題として検討をしていく。

4. まとめ

超音波金属接合について、ローレット加工の無いホーンでの接合性能評価、ハット部材への接合、板材への六角ナット接合を行いこれらの性能評価を行った結果、以下の結果を得た。

- 1) ローレット加工有り 1mm ピッチホーン、ローレット加工無し R200 ホーン、ローレット加工無し 2-R25 ホーンの 3 種類を比較した場合、接合強度を上げるには、2-R25 ホーンが最も有効である。
- 2) ハット部材において、超音波接合部材の曲げ変形に要したエネルギー値は、接着剤接合部材の約 70%程度になっている。
- 3) 板材への六角ナット接合において、強度は JIS B 1196 の M4 溶接ナットの押込みはく離強さ参考値の 15%程度である。

【謝 辞】

本研究の遂行にあたり、共同研究先の岐阜大学工学部山下実教授に、ご指導・ご助言をいただきましたことに深く感謝いたします。

【参考文献】

- 1) 神,精密工学会誌 Vol.82,No.5, pp403-406,2016
- 2) 加賀ら,岐阜県工業技術研究所研究報告 No.5, pp48-51,2017
- 3) 柘植ら,岐阜県工業技術研究所研究報告 No.6, pp49-52,2018
- 4) 柘植ら,岐阜県工業技術研究所研究報告 No.7, pp47-50,2019

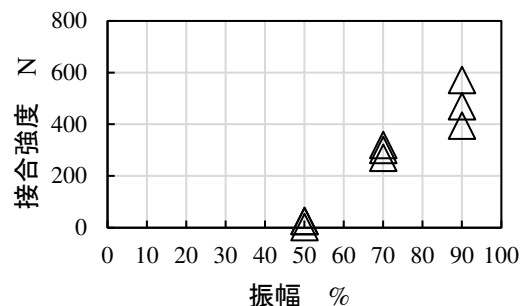


図 1.1 振幅と接合強度の関係
(加振時間 0.7sec)

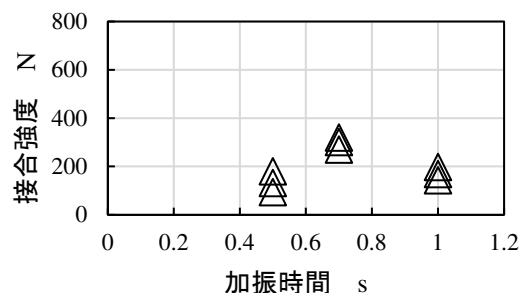


図 1.2 加振時間と接合強度の関係
(振幅 70%)

軽量部材加工技術に関する研究（第2報）

小川大介*、加賀忠士**

Study on lightweight material machining technology (II)

OGAWA Daisuke* and KAGA Tadashi**

軽量部材として注目されている炭素繊維強化プラスチック（以下、CFRP）の切削加工では、加工条件だけでなく、工具の形状や材種、被削材の繊維配向が、工具摩耗や加工品質に影響することが知られている。一般的に、CFRPの加工にはダイヤモンドコーティング工具が用いられているが、工具摩耗・加工面品質・トータルコストのバランスを考慮した加工法が求められている。そこで、超硬およびダイヤモンドコーティング工具によるCFRP切削加工実験を行い、ダイヤモンドコーティング工具の加工特性を把握し、優位性を確認できた。

1. はじめに

近年、環境や省エネルギー問題の観点から、航空機や自動車部品等に、軽量かつ機械的強度の高いCFRPの適用が増えている¹⁾。このCFRPを部品として使用するためには、成形加工した後、切削や穴あけなどの二次加工が必要となることから、高品位で高効率な切削加工に関する研究が盛んに行われている²⁻⁵⁾。このCFRPは、金属材料などの等方材と異なり、繊維配向によって切削特性に異方性が生じることから、ケバやデラミネーション（層間剥離）が発生して仕上げ面性状の品質が低下するため、難削材といわれている。また、摩耗により工具寿命が短く、製造コストが高くなる課題がある。そこで、加工条件だけでなく、工具形状やコーティング種類、CFRPの繊維配向などによって加工品質や工具摩耗などの加工特性に係るデータを収集・整理することが望まれている。

昨年度は、超硬エンドミル工具を用いて、CFRPの切削加工について検討を行い、送りおよび主軸回転数が加工面品質に与える影響について示した⁶⁾。今年度は、超硬エンドミル工具とダイヤモンドコーティングを施したエンドミル工具の2種類について、切削加工条件と加工面品質の関係を比較調査した。

2. 実験

2.1 実験装置および被削材料

実験には、5軸NC加工機（ヤマザキマザック（株）、VARIAXIS630-5X）を用いた。被削材に熱硬化性CFRPを用いた。この材料は、一方向材を配向積層[90/0/±45]_sとして疑似等方板としたもので、板厚は8mmである。この材料を板幅110mm（表面90°方向）に切断した。

2.2 実験方法

NC加工機のテーブル上に切削動力計（日本キスラー

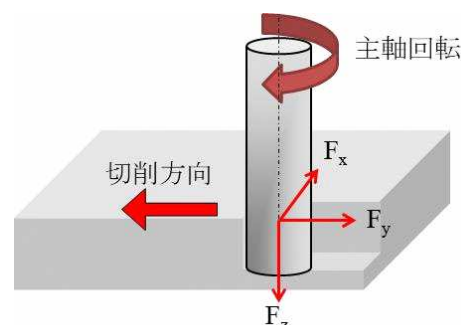


図1 切削加工モデル

表1 実験装置・材料

加工機	5軸マシニングセンター VARIAXIS630-5X
被削材	熱硬化性CFRP
工具	超硬工具 ダイヤモンドコーティング工具
加工雰囲気	乾式

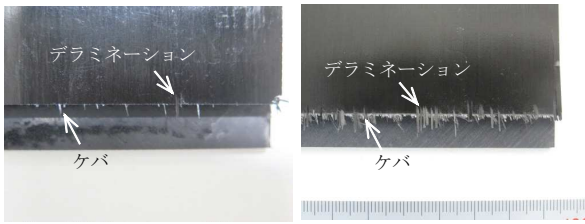
表2 加工条件

	条件A	条件B	条件C
主軸回転数 min^{-1}	7000	5000	9000
1刃送り mm/tooth	0.2	0.1	0.1

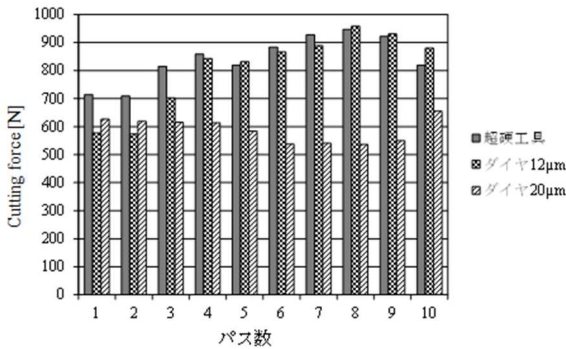
（株）、JZ90012A）を配置し、その上に治具を介して被削材を固定して切削実験を行った。切削抵抗の計測方向は図1に示すとおり、 F_x 、 F_y 、 F_z の3分力を計測し、それらの合力を求めて解析した。実験装置および材料を表1に示す。切削工具は、直径20mmのノンコート超硬工具および厚さ $12\mu\text{m} \times 20\mu\text{m}$ のダイヤモンドコーティング工具を用い、段付加工を行った。加工条件は、昨年度の実験結果から3条件を抽出したものを表2に示す。また、工具の耐摩耗性を検討するため、板幅110mmに切断したCFRPを1回切削加工したときを1パスとして、10パスまで加工実験を行った。

* 金属部

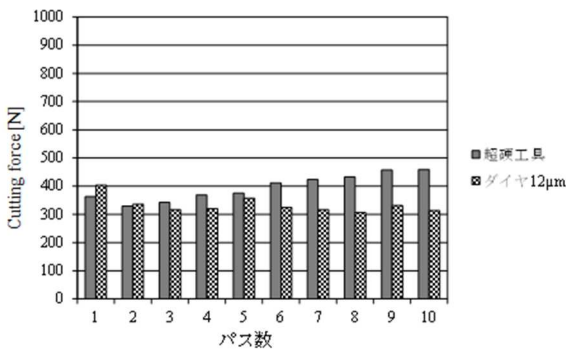
** 機械部



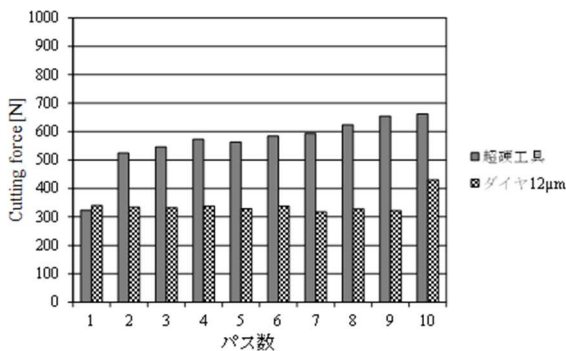
(a) 超硬工具 (b) ダイヤ 20 μm
図2 加工面の状態



(a) 条件 A (7000min⁻¹, 0.2mm/tooth)



(b) 条件 B (5000min⁻¹, 0.1mm/tooth)



(c) 条件 C (9000min⁻¹, 0.1mm/tooth)

図3 切削抵抗

3. 結果及び考察

図2に、超硬工具とダイヤモンドコーティング工具による加工面の状態を示す。ダイヤモンドコーティング工具の方が、ケバやデラミネーションが多く発生していることが確認でき、コーティングが厚いほど多くなる傾向であった。原因として、工具刃先エッジ部分がコーティングを施すことによって 10~20 μm 程度の丸みを生じ、

刃先の切れ味に影響したと考えられる。一方、超硬工具は、加工パス数が増加するに従い、加工面品質が悪化した。工具を観察したところ、刃先エッジ部分にアブレシブ摩耗が生じていた。図3に切削抵抗のパス数毎の変化を示す。超硬工具の場合、いずれの加工条件においても、切削抵抗が徐々に大きくなることが確認できた。厚さ 12 μm のダイヤモンドコーティング工具は、条件 A の 5 パス目以降および条件 C の 10 パス目の切削抵抗が大きくなっている。これは、工具にチッピングが発生していたことが原因である。一方、条件 A の厚さ 20 μm および条件 B の厚さ 12 μm のダイヤモンドコーティング工具は、切削抵抗が一定の値で推移した。このことと、ダイヤモンドコーティング工具にチッピングや摩耗が観察されなかったことから、刃先の耐摩耗性が高いことを確認できた。

4. まとめ

超硬およびダイヤモンドコーティング工具による CFRP の切削加工実験を行い、次の結果を得た。

- 1) エッジの丸みが、デラミネーションなどの加工面品質に影響するため、工具刃先にはシャープエッジが必要である。
- 2) 切削加工条件によって切削抵抗の増加を抑制し、工具の耐摩耗性を向上させることが可能となる。
- 3) ダイヤモンドコーティングの耐摩耗性が高いことを確認できた。

【謝 辞】

本研究にあたり、ご協力いただきましたミズノテクニクス株式会社様、株式会社エムテック様に深く感謝申し上げます。

【参考文献】

- 1) J.Takahashi,, Development in Composites Technology for Reduction of Environmental Load, Journal of the Society of Materials Science , Japan, Vol.57, No.8, pp. 852-855, Aug.2008
- 2) 酒井ら, 炭素繊維強化熱可塑性樹脂のトリミング加工に関する研究, 日本機械学会第9回生産加工・国策機械部門講演会論文集, pp.85-86,2012
- 3) 坂本ら, CFRP 板のエンドミル加工に関する研究, 精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集, pp.311-312, 2013
- 4) 加賀,岐阜県工業技術研究所研究報告 No.2, pp.47-49,2014
- 5) 加藤, 鳥取県産業技術センター研究報告 No.19, pp.39-43,2016
- 6) 小川ら,岐阜県工業技術研究所研究報告 No.7, pp.51-54,2019

金属

鋳物の高品質化、品質管理技術に関する研究

— 鋳型内ガス圧の測定と影響 —

関範雄*、三原利之*、水谷予志生**、久富茂樹***

Study on casting for quality improvement and quality control technique
- Measurement and effect of gas pressure in mold during injecting molten metal -
SEKI Norio*, MIHARA Toshiyuki*, MIZUTANI Yoshiki** and KUDOMI Shigeki***

青銅鋳物鋳造の1000℃超の溶湯を扱う注湯過程において鋳型内ガス圧及び温度を計測し、これらの時間変化から鋳物への品質影響を検討した。今回の銅合金鋳造では、注湯後、溶湯は数秒間で固液共存状態になり、その後数十秒で凝固した。固液共存状態ではガス欠陥が生じやすいことから凝固までの鋳型内ガス圧の把握、及び溶湯の凝固形式を推測するための鋳型内温度モニタリングは、ガス欠陥防止に有効な手段といえた。

1. はじめに

鋳物の品質や精度は日々高くなっている中、鋳物産業の抱える品質に関わる重要な課題の一つが高い欠陥発生率である。現場では欠陥検出など品質管理に膨大な時間と労力が費やされており、鋳造欠陥対策が鋳物の高品質化、品質管理、生産性向上に極めて重要となっている。

鋳造欠陥対策としては、方案最適化が検討されているが、現場の経験的手法や知見に頼るところが多い。例えば、鋳物のガス欠陥防止対策としては、鋳砂の粒度指数を低くし、鋳型や中子のガス排気性を高めたり、中子の樹脂量を減らしたり、その他に鋳込み温度、ガス抜き、鋳込み速度などの調整が知られている。このような対策は鋳型内ガス圧を下げ、ガス残留時間を短くすることにあるから、内部圧力変化を捉えることが求められる。しかし、1000℃超の高温下でのガス圧測定は容易に行えず、方案ごとに圧力変化を把握することは難しい。

そこで本報では注湯過程での鋳型内ガス圧変化を把握するため、鋳型内ガス圧を測定し、その欠陥発生影響について検討した。

2. 実験

2.1 鋳造実験

青銅鋳物系鋳物材（CAC401）を用い渦巻型流動試験を応用した鋳造実験を行った。

鋳物砂には専用人工砂、フラン樹脂系バインダ（砂に対して2wt%）を用いた砂型積層造型装置（シーメット株式会社、SCM-10）にて鋳型を造型した。鋳造には、上型、下型から構成される鋳型（図1）を使用した。下型に流動部となる溝を渦巻状に設計し、上型にはガス圧センサ等を挿入する穴を予め造型した。

鋳型の注湯口に設置したスリーブ（内径65mm）内に溶湯（炉内温度1200℃、1.65kg）を上型の上面から

55mmの高さまで注ぎ入れ、スリーブ内に設置した温度計（最高到達温度1140℃）が上昇した時を注湯開始とした。

2.2 鋳型内部のガス圧及び温度測定

上型鋳型に注湯口から溶湯の流動経路上にAからIの順9か所に、図2に示すガス圧センサ（ガス圧測定装置：株式会社仲井製作所、Castio I）及び温度センサ（JIS規格 K 熱電対）を配置し、注湯時の鋳型内ガス圧（0.2秒間隔）及び温度（0.1秒間隔）を測定した。

2.3 鋳型の細孔特性及び気体透過係数測定

砂型積層造型装置にて直径25mm、各種厚さ5～10mmの円盤試料（鋳型試料）を作製し、貫通細孔分布測定装置（PMI社、CFP-1200AXL）にて細孔特性及び気体透過係数を測定した。

3. 結果及び考察

3.1 鋳型の細孔特性及び気体透過特性

ガス圧測定用鋳型に用いた鋳物砂は人工砂で球状である。積層造型された鋳型の平均細孔径は、積層面に対する積層方向及びそれに直行する水平方向ともに15.5μmであり、ガス透過の異方性は認められなかった。

鋳型の気体透過性について、透気流量（図3）は圧力上昇に比例して増大し、その気体透過係数は17.4（ml・cm/kPa/s/cm²）であった。これを砂鋳型特性の指標である通気度に換算すると102.7（ml・cm/cmH₂O/min/cm²）になり、生型の一般的な管理通気度¹⁾の範囲内にあった。

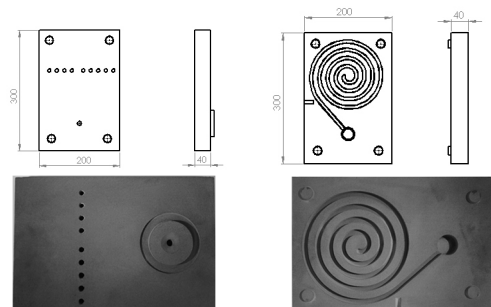


図1 鋳型（上型（左）、下型（右））

* 技術支援部

** 金属部

*** 情報技術部

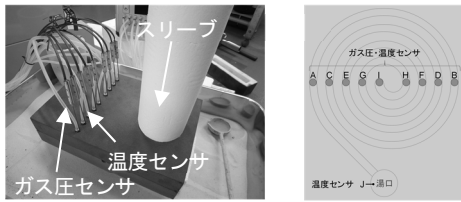


図2 湯口のスリーブ、ガス圧及び温度センサを配置した鋳型

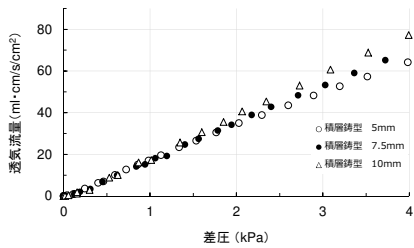


図3 砂型積層造型鋳型の気体透過特性

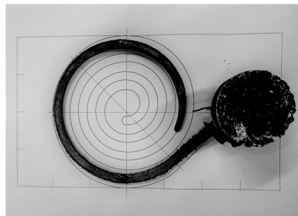


図4 鋳造実験によって作製された鋳物

3. 2 鋳型内部のガス圧及び温度変化

図4に鋳造実験によって得られた鋳物を示す。流動長は556mmであった。

鋳型内部温度(図5)の注湯開始からの時間変化を示す。A点の温度は注湯開始1秒後に急上昇し、その0.4秒後にB点の温度も急上昇した。A点では注湯開始6.3秒後に820°C、B点では開始2.9秒後に1000°Cの到達最高温度に達した。このときの湯口温度は約1130°Cで溶湯は熔融状態であった。

注湯開始から1~2秒間にA点からB点を流動して、溶湯凝固は、流動直後のA点で鋳型壁近くの温度が820°Cと低いことから表皮形成とかゆ状型が並行して進行、B点では固液共存状態のかゆ状型凝固が優勢で進行したと推測した。

また注湯直後からA点、B点でのガス圧は急上昇した(図6)。これは湯先が到達したA点、B点のみ計測でき、それ以外の測定点では計測できていない。A点では注湯開始9秒後に1.3kPa、B点では17.5秒後に3kPaの最高ガス圧に達し、その後注湯40秒後に圧力はなくなった。最高ガス圧に達したときの実測温度(810°C程度)から溶湯は固相へと相変態したと考えられた。

鋳型の気体透過係数とガス圧及び温度の時間変化の結果から、注湯による鋳型内での膨張・発生ガスによる容量増加分は、開始1.3秒間までは鋳型を透過して外部に放出される。その後開始約40秒まではその間のガス増加容量のうち5.3%~9.3%が鋳型内に残留したと考えら

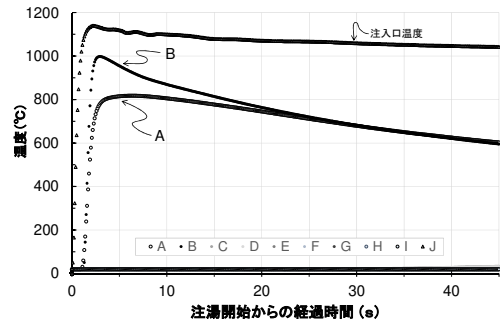


図5 鋳型内部温度の経時変化

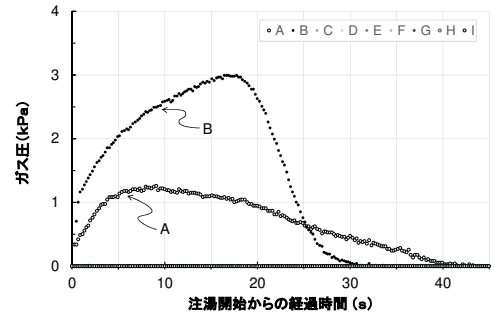


図6 鋳型内部ガス圧の経時変化

れる。

4. まとめ

青銅鋳物鋳造のような1000°C超の溶湯を扱う注湯過程において鋳型内ガス圧及び温度を0.2秒及び0.1秒間隔で簡易に測定し、これらの時間変化を把握した。

銅及びその合金の鋳型内凝固進行は、表皮形成型とかゆ状型の2つの形式に大別される²⁾。今回の青銅の鋳造実験では、かゆ状型凝固が優勢に進行し、鋳型の温度状況から注湯口に近い側の一部で表皮形成型も推測された。固液共存状態のかゆ状型凝固では残留ガスが、湯先部、最終凝固部に気泡として存在し、微細に分散するガス欠陥発生に大きな影響を与える。実験で示されたように銅合金の鋳造では注湯後、溶湯は数秒間で固液共存状態になり、遅くとも1分間で凝固する。

以上のことから、注湯直後1分間の鋳型内ガス量の指標となるガス圧の把握、また溶湯の凝固形式を推測するための温度モニタリングがガス欠陥防止に有効な手段であるといえる。

【謝 辞】

本研究の一部は、一般財団法人越山科学技術振興財団の研究補助金により実施しました。ここに深く感謝いたします。また、実験にご協力いただいた岐阜大学工学部新川真人准教授、株式会社水生活製作所様に深く感謝いたします。

【参考文献】

- 1) 日本鋳造工学会編, 鋳造工学便覧, p73, 丸善, 2002
- 2) 岡根利光, 鋳造工学, Vol.85, 9, pp605-612, 2013

アルミダイキャスト部品の高品質・低コスト化を実現する製造技術の開発（第4報）

水谷予志生*、小寺将也*、新川真人†

Development of manufacturing technique for aluminum die-casting due to high quality and cost reduction (IV)

MIZUTANI Yoshiki*, KODERA Masaya* and NIIKAWA Makoto†

ガス窒化とショットピーニングを複合させた表面処理を施したダイス鋼（SKD61）について、アルミニウム合金（ADC12）溶湯への浸漬による加熱と水溶性離型剤のスプレーによる冷却を繰り返す熱疲労試験を行った。繰り返し回数が少ないことから熱疲労によるヒートクラックの発生までは確認できなかったが、ショットピーニングーガス窒化ーショットピーニングと複合処理をした場合に、表面に酸化皮膜の形成が確認された。今回の繰り返し試験回数内では、熱影響による硬さの低下はほとんど起こらなかった。アルミと接触する面に酸化皮膜が形成されることで、耐溶損性や熱伝達特性にも影響が出ると考えられる。ただし、実際のダイキャストでの使用時にも形成されるかどうかは不明であり、今後ダイキャスト実験での評価が必要である。

1. はじめに

地球温暖化等の環境問題への関心が高まるにつれ、世界的に様々な規制が強化されてきている。自動車においては、欧米・中国等の国々で排ガス規制が年々厳しくなり、燃費向上のため車体の軽量化に関する研究開発が盛んに行われている¹⁻⁴⁾。これまでは、鉄鋼材料の高強度化（ハイテン化）による薄肉化が大きく寄与したが、もはや限界に近いところまできていると言われている。さらなる軽量化を行うため、部材の軽量素材への転換が注目され、アルミ化あるいは樹脂化するための研究開発が行われ、実用化もされつつある。しかし、これら軽量部材は素材自体のコストが鉄鋼材料よりも遙かに高いため、製造技術の向上によるコスト削減が普及に向けての課題となっている。

このうち、アルミニウム製部品を安価で大量生産するのに適しているダイキャストでは、大型化による複数部品の一体化、高真空ダイキャストによる高品質化といった技術開発により鉄鋼材料からの代替に成功した例⁵⁻⁷⁾があり、自動車の軽量化対策に有効であると考えられる。ダイキャストとは、高温の金属溶湯を金型キャビティに高速・高圧で充填させ、急速に冷却・凝固させることで製品を短時間で製造するプロセスである。ダイキャストに用いられる金型は、高温の溶融金属との接触および高速高圧流体の流れによる溶損、高圧の負荷、加熱と冷却の繰り返しによる熱疲労等様々な過酷な負荷にさらされるため、定期的に補修等のメンテナンスが必要となる。生産性の向上・低コスト化には金型メンテナンス頻度を下げる事が重要であり、金型の長寿命化対策として窒化やコーティング等の表面処理技術が研究されている⁸⁻¹⁶⁾。しかし、これらの手法は処理費用が高額であるものが多く、費用

対効果の高いプロセスが望まれている。

ダイキャスト金型の表面処理として、窒化による窒化物層の生成は焼き付きの抑制や耐溶損性に効果があるとされるが、熱衝撃・熱疲労によるヒートクラックが起りやすい¹¹⁻¹⁶⁾。一方、ショットピーニング等による圧縮応力の付与は、クラックの発生を抑えることが知られている¹⁷⁻¹⁸⁾。これまでに、ショットピーニングとガス窒化をそれぞれ、あるいは組み合わせた複合表面処理を金型材（SKD61）に適用し、テストピースでの性能の評価や、アルミニウム合金溶湯との反応性を評価するための浸漬試験を行った¹⁹⁾。この結果、複合処理を施した試験片において、耐摩耗性、耐溶損性の向上が確認された。本研究では、これらの複合処理を施した金型材に、実際のダイキャスト工程を模擬した熱疲労試験を行い、表面処理の違いによる金型材表面や内部への影響を調査した。

2. 実験方法

φ10×長さ 120mm の円柱状で表面を鏡面加工したダイス鋼（SKD61）試験片に、ショットピーニング（以降 SP と略す）後ガス窒化（以降単に窒化と略す）を施したものの（以降 SP+窒化と表記）と、その後さらに SP 処理を追加した SP+窒化+SP の2種類の複合処理を施した試験片を作成した。比較のために未処理の試験片を加えた3種類について、ダイキャスト工程で金型に加わる熱履歴を模擬した繰り返し浸漬試験を行った。

図1に示す熱疲労試験装置を用いて、黒鉛るつぼで溶解させたアルミニウムダイキャスト合金（ADC12）溶湯に所定時間浸漬させ、上方に取り出した後、横に移動させて水溶性離型剤をスプレーし、エアブローで乾燥させた後、再び溶湯に浸漬させることを繰り返した。黒鉛るつぼ中のアルミ溶湯は電気炉で約 650°C に保持し、試験片を浸漬させる時間は 2s とした。この時、試験片の先端約 20mm 程度が浸漬された。溶湯から取り出した

* 金属部

† 岐阜大学 工学部・機械工学科 准教授

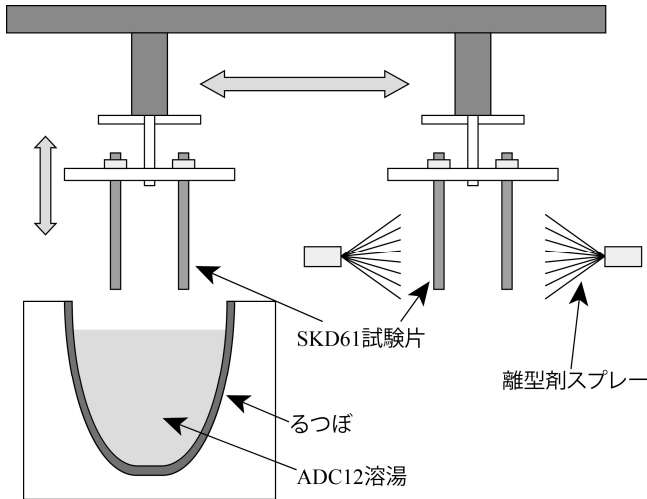


図1 熱疲労試験装置概略図

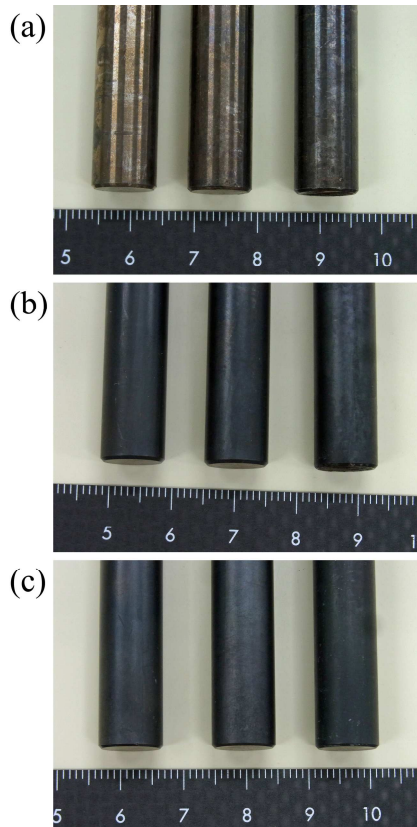


図2 水酸化ナトリウム洗浄後の各試験片外観
(a) 未処理、(b) SP+窒化、(c) SP+窒化+SP
(いずれも左から50回、200回、500回浸漬)

直後の試験片の温度を熱電対で測定すると、360~410°C程度であった。その後、水溶性離型剤のスプレーとエアブローによる乾燥後には260~280°C程度に低下した。この一連の操作を繰り返した回数を50, 200, 500回と変化させて各試験片を採取した。なお、アルミ溶湯から試験片を取り出すと、アルミ合金の凝固被膜が付着してし

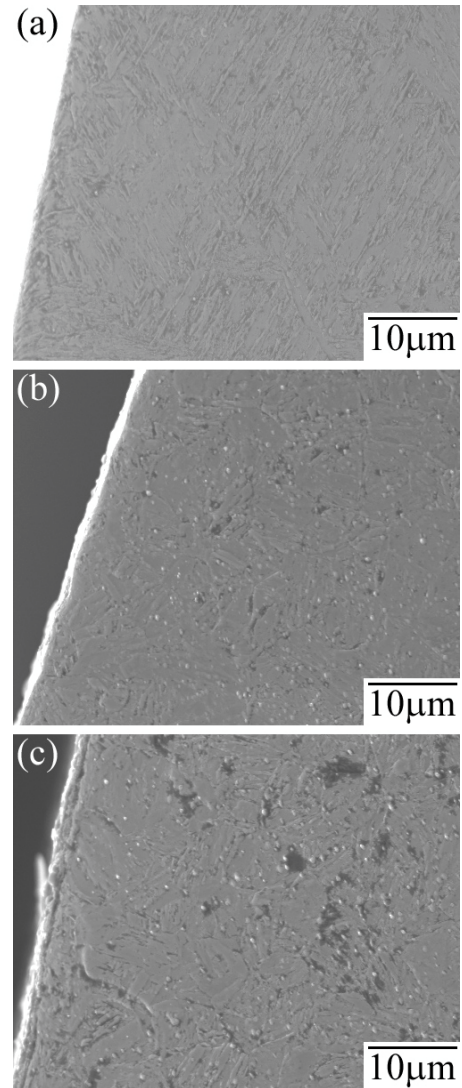


図3 500回浸漬させた試験片断面のSEM画像
(a) 未処理、(b) SP+窒化、(c) SP+窒化+SP

まうが、試験片とアルミ溶湯とを接触させる必要があるため、数回に1回の頻度でアルミ合金被膜を除去して実験を継続した。

得られた試験片は、表面に付着したアルミ合金を完全に除去するため、約80°Cに加熱した30%水酸化ナトリウム水溶液に反応がなくなるまで浸漬させた(図2)。その後、浸漬部分の中央となる、端から10mm程度の位置で切断し、断面の観察・分析、硬さ分布測定に用いた。また、円柱状の試験片表面の構造解析は、X線回折装置(株)リガク製、SmartLab)を用いて、Cu管球、管電圧40kV、管電流30mAの条件で行った。試験片断面については、表面側から内部に向けてのビッカース硬さ分布を、自動硬さ測定機(丸本ストラス(株)製、デュラスキャン-70)を用いて0.05kgfの荷重で測定した。さらに、走査型電子顕微鏡(SEM)による断面観察とエネルギー分散型X線分析(EDS)による元素マッピングを行った。

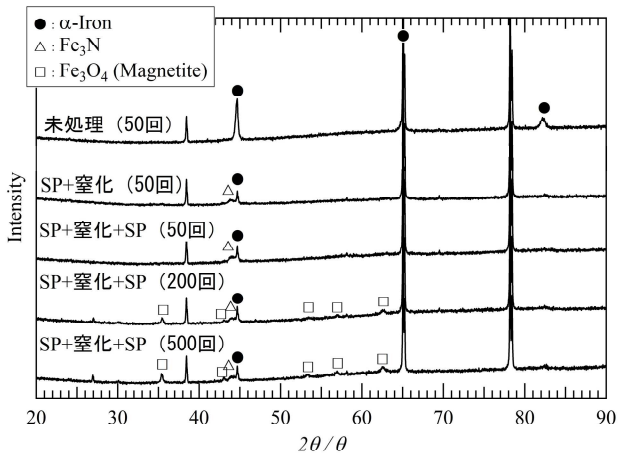


図4 各試験片表面のXRD図

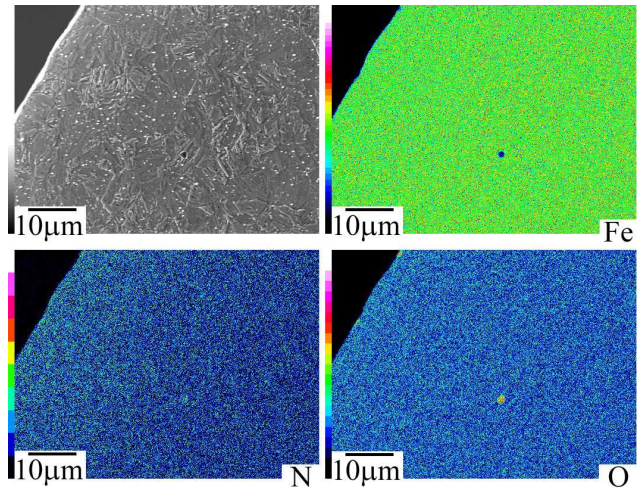


図5 50回浸漬したSP+窒化試験片断面のEDS元素マッピング

3. 結果及び考察

図3に500回繰り返し浸漬させたSKD61試験片の断面のSEM画像を示す。今回、500回の熱疲労を加えたが、試料のどこにもヒートクラック（ヒートチェック）のようなものは観察されなかった。いずれの試験片でも500回程度の繰り返し浸漬に対しては、耐ヒートクラック性があるものと考えられる。表面処理の影響を評価するには浸漬回数を増やす必要があるが、試験片にアルミ被膜が付着・堆積してしまう問題のため装置の自動化が難しく、実施することはできなかった。図3(c)のSP+窒化+SPの複合処理を施した試験片では、最表面に1~2μm程度の母材と異なる層が存在していた。

各試験片の表面構造をX線回折図(XRD図)により解析した。図4に熱疲労試験初期の50回浸漬した各試験片と、SP+窒化+SPの複合処理を施したものについては50, 200, 500回と各段階での試験片表面のXRD図を示す。未処理およびSP+窒化の試験片では、50~500回の繰り返し浸漬ではXRDパターンに変化はなく、未処理ではα鉄が、SP+窒化ではα鉄と窒化鉄(Fe₃N)が検出された。SP+窒化+SPの試験片では、50回の浸漬ではSP+窒化と同様にα鉄と窒化鉄(Fe₃N)が検出されたただけだが、200回の浸漬から酸化鉄(Fe₃O₄)のピークも検出されるようになった。しかし、200回浸漬した試験片のSEM観察では、500回浸漬した図3(c)のような明確な層は観察されなかった。このことから、SP+窒化+SPの試験片では、アルミ溶湯への浸漬を繰り返すことで表面が酸化し、さらに繰り返すことで酸化皮膜が徐々に成長してきていることが分かった。

図5に50回浸漬したSP+窒化試験片の断面のEDSによる元素マッピング結果を示す。窒化が施されていることから、最表面側でNが多く検出されており、20~30μm程度の拡散層が存在しているのが分かった。

図6には500回浸漬したSP+窒化+SP試験片の断面のEDSによる元素マッピング結果を示す。図3(c)で見られた最表面の層には、FeとOのほか、N、Al、Si

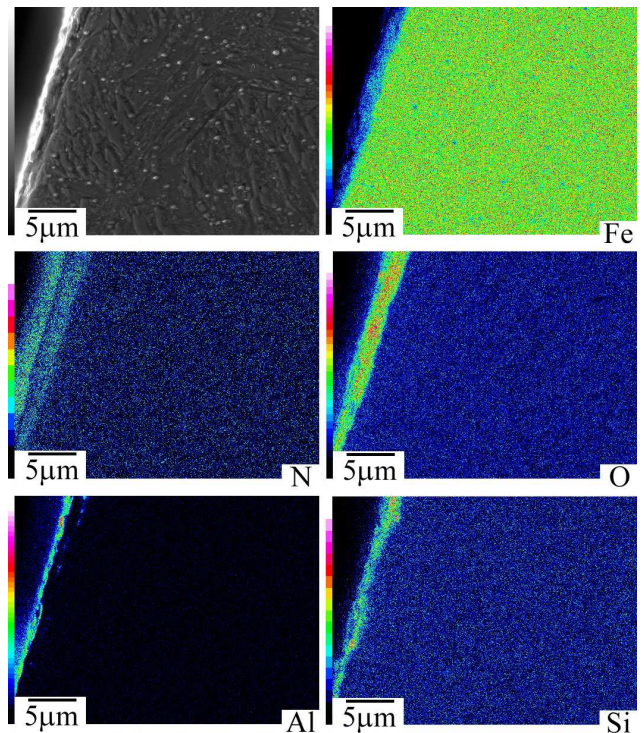


図6 500回浸漬したSP+窒化+SP試験片断面のEDS元素マッピング

も検出された。高温のADC12溶湯と接触したことで反応したものと思われる。窒化処理後に酸化処理を施すことで最表面に酸化物層を形成させると、耐溶損性や耐食性・摩擦摩耗特性が向上するとの報告がある²⁰⁾。また、一般に酸化物は熱伝導率が低いため、表面に酸化物層が形成されると熱伝達が悪くなると考えられる。これを実際のダイカストに適用した場合、冷却が遅くなることから湯周り性が向上することが期待できるが、凝固が遅れることでサイクルタイムの増加を招いてしまう可能性がある。ただし、今回の繰り返し浸漬による熱疲労試験と実際のダイカストでは条件が異なることから、この酸化

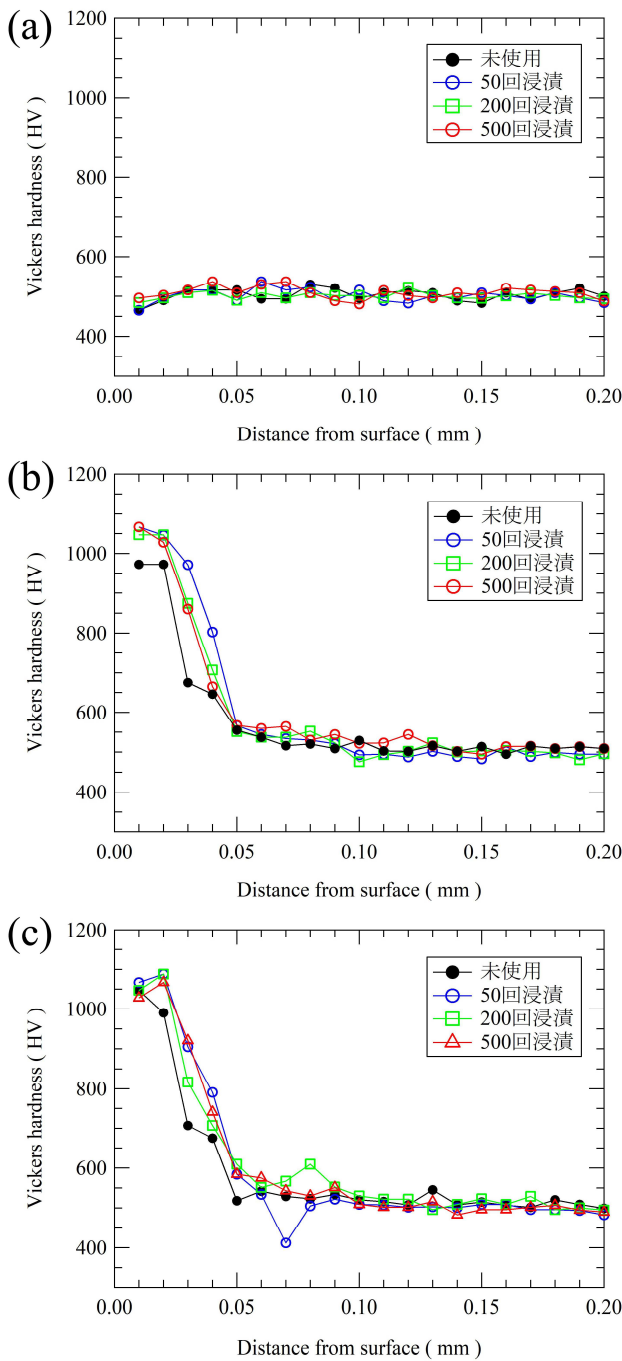


図7 各試験片の硬さ分布

(a) 未処理、(b) SP+窒化、(c) SP+窒化+SP

皮膜が同様に形成されるかどうかは不明である。今後、実際にダイカスト実験を行うことで明らかにしたい。

高温のアルミ溶湯に繰り返し浸漬させたことで、この熱によりSKD61試験片がなまされ、表面近傍の硬さが低下してしまう可能性があるのではないかと考えられた。そこで、各SKD61試験片の断面について、表面側から10 μ mごとの硬さをマイクロビッカースにより測定した。図7にその結果を示す。図7(a)の未処理材では、表面側から内部まで500HVとほぼ均一な硬さであった。

図7(b)のSP+窒化処理材および図7(c)のSP+窒化+SP処理材では、窒化により表面の硬さが硬くなっており、1000HVを越える値となっていた。また、いずれも硬化深さは40 μ m程度までであり、図5のNの分布にほぼ対応していた。また、繰り返し浸漬の熱による影響はいずれの試験片でも見られず、窒化による硬化層内でもほぼ同様の硬さ分布を示していた。本研究で行った500回程度の浸漬では、窒化による硬化層内においても硬さに影響がほとんどないことが分かった。

4. まとめ

ショットピーニングと窒化を組み合わせた複合表面処理を施したダイス鋼(SKD61)試験片について、実際のダイカスト工程を模擬した熱疲労試験を最大500回行ったところ、以下のことが分かった。

- ・SP+窒化+SPと複合させた表面処理を施した試験片では表面に酸化皮膜が形成された。また、浸漬回数が増えるにつれ、酸化皮膜層が成長していた。
- ・窒化による硬化深さは40 μ m程度あり、今回の500回程度の熱疲労試験では硬化層内においても硬さの低下は見られなかった。
- ・酸化物層の存在は、耐溶損性や耐食性・摩擦摩耗特性・湯周りが向上する可能性があるが、実際のダイカストでの使用時にも形成されるかどうかは不明である。今後、実際にダイカスト実験を行うことで明らかにしたい。

【参考文献】

- 1) 神戸, 素形材, Vol.50 No.9, pp2-7, 2009
- 2) 神戸, 素形材, Vol.53 No.3, pp34-38, 2012
- 3) 千葉, 素形材, Vol.56 No.7, pp31-35, 2015
- 4) 神戸, 素形材, Vol.57 No.3, pp2-7, 2016
- 5) 青山, 鑄造工学, Vol.76 No.12, pp985-990, 2004
- 6) 浅井ら, 鑄造工学, Vol.82 No.12, pp819-826, 2010
- 7) 村上ら, 日本ダイカスト会議論文集, pp217-221, 2006
- 8) 藤木, 表面技術, Vol.52 No.8, pp535-539, 2001
- 9) 北川ら, 電気製鋼, Vol.78 No.4, pp341-346, 2007
- 10) 西, 精密工学会誌, Vol.77 No.7, pp648-651, 2011
- 11) 川久保, 電気製鋼, Vol.49 No.1, pp50-56, 1978
- 12) 西村, 精密機械, Vol.46 No.10, pp37-43, 1980
- 13) 佐野ら, 電気加工学会誌, Vol.31 No.68, pp1-10, 1997
- 14) 日原, 電気加工学会誌, Vol.35 No.78, pp1-11, 2001
- 15) 八代, 塑性と加工, Vol.50 No.582, pp605-609, 2009
- 16) 加藤ら, 表面技術, Vol.52 No.8, pp544-547, 2001
- 17) 飯田ら, 精密工学会誌, Vol.54 No.1, pp107-111, 1988
- 18) 原田ら, 砥粒加工学会誌, Vol.51 No.3, pp161-166, 201
- 19) 水谷ら, 岐阜県工業技術研究所研究報告 No.6, pp19-22, 2017
- 20) 石塚ら, 日本ダイカスト会議論文集, pp1-6, 2016

鑄造分野におけるデジタルものづくり

久富茂樹*、藤井勝敏*、水谷予志生**

Digital manufacturing in the casting field

KUDOMI Shigeki*, FUJII Katsutoshi* and MIZUTANI Yoshiki**

近年、製造業において、3DプリンタやCAEなどのデジタル技術を活用したものづくりに対する関心が高まりつつある。本研究では、これらの技術を鑄造分野のものづくりに適用して、鑄物製品の多品種小ロット生産への対応、製品の品質向上を図る。本年度は、砂型3Dプリンタの造形物評価と、鑄造用模型への適用を目的とした樹脂3Dプリンタの造形物評価を実施した。砂型3Dプリンタでは、造形時の積層方向によって造形物の形状が異なることがわかった。また、樹脂3Dプリンタでは、使用する装置、造形方式、造形条件によって、寸法精度や積層時に生じる段差が異なることがわかった。

1. はじめに

鑄造は、溶解した金属を鑄型に流し込み、冷却して凝固させる金属加工技術である。複雑な形状の製品を製造することができ、中子（なかご）を組み合わせて中空形状の製品も製造することができる。その反面、切削加工などの加工法より寸法精度が悪く、品質の安定度が低いため、不良率が高いという課題がある¹⁾。また、鑄造工程は、技術・技能の一般化、標準化が難しく、暗黙知に依存するところが多分にあると言われている。一方、2014年以降3Dプリンタが一般にも注目を集め、使用する材料も樹脂や石膏、金属など多様な材料に対応したものが製品化されている。鑄造の砂型製作用の砂型3DプリンタもTRAFAM（技術研究組合次世代3D積層造形技術総合開発機構）による産学官連携で開発されている²⁾。また、実際の型製作前に鑄造欠陥を予測し、最適な鑄造方案を構築するために、CAEを活用した取り組みもなされている³⁾。

このような背景から、当センターでは、鑄造分野におけるデジタル技術に関わる情報共有や交流の場として、「鑄造分野におけるデジタルものづくり研究会」を設立し、現在10機関が参画している。本研究では、(1)砂型3Dプリンタの利活用、(2)樹脂3Dプリンタの利活用、(3)鑄造シミュレーションの利活用などの技術開発を実施するとともに、技術講演会、機器講習会を開催し、鑄造分野における多品種小ロット生産への対応、製品品質の向上を図る。本年度は、砂型3Dプリンタの造形物評価と、鑄造用模型に適用するための樹脂3Dプリンタの造形物評価を実施したので報告する。

2. 砂型3Dプリンタの造形物評価

砂型3Dプリンタは、結合剤を吐出して、鑄物砂を硬

化させるか、もしくは樹脂がコーティングされた鑄物砂にレーザを照射して熱溶着させることによって、1層分の形状を製作し、層を重ねることで三次元形状を製作していく装置である。砂型を直接製作するため、従来工法では不可欠であった鑄造用模型が不要で、試作や小ロットの製品へ迅速に対応できる。また、従来工法では砂型から鑄造用模型を取り外すため、鑄造用模型に抜け勾配を考慮する必要があるが、砂型3Dプリンタでは抜け勾配を考慮する必要がなく、形状によっては主型・中子を一括して造形することも可能で、設計の自由度が大きくなるなどの利点が期待されている。

2. 1 形状評価用試料の造形

今回は三重県工業研究所金属研究室にある砂型3Dプリンタを使用して造形物を製作し、形状評価を実施した。使用した装置の仕様を表1に示す。造形方式は結合剤噴射方式で、平均粒径が約0.12mmの専用の人工砂にフラン系結合剤を選択的に吐出して造形する。形状評価用試料として、直径50mm、高さ50mmの円筒状の試料を、円筒の軸が造形エリアのX軸、Y軸、Z軸に平行になるように造形方向を変えて、各造形方向で18個ずつ造形した。

2. 2 造形物の形状評価

造形した試料を非接触三次元形状測定機（gom製、ATOS Compact Scan）で測定した。形状評価ソフトウェア（gom製、ATOS Professional）を使用して、測定デー

表1 砂型3Dプリンタの仕様

型番	SCM-10（シーメット社製）
最大造形サイズ	800(X) x 400(Y) x 400(Z) mm
積層ピッチ	0.28mm
XY解像度	0.15mm
高さ(Z)方向の造形速度	約17mm / 時間

* 情報技術部

** 金属部

タと設計データをベストフィットにて位置合わせを行い、偏差のグラデーションマップ評価と円筒度評価を行った。

図1に偏差のグラデーションマップ評価の一例を示す。各図の左上の座標軸は、造形エリアの座標を示しており、(a)は円筒軸が造形エリアのX軸に平行になるように造形した場合で、(b)はY軸に平行、(c)はZ軸に平行になるように造形した場合の結果である。測定データが設計データより大きいほど白色に近く、測定データが設計データより小さいほど黒色に近い。図2に示すように、インクジェットヘッドはY軸方向に結合剤を噴射しながら移動するため、Y軸と平行に濃淡の筋が観察できる。また、積層方向(Z軸方向)には積層時にできる段差による筋が観察される。

図3に造形方向ごとの円筒度の平均を示す。円筒度は、「円筒形体の幾何学的に正しい円筒からの狂いの大きさ」と定義されており⁴⁾、数値が小さいほど円筒曲面が正しく形成されていることを示す。造形方向をZ軸に平行になるように造形した試料の円筒度が小さくなっており、より正確に円筒が形成されている。装置のZ方向の分解能である積層ピッチ(0.28mm)よりXYの分解能(0.15mm)が高いことが起因していると推察される。

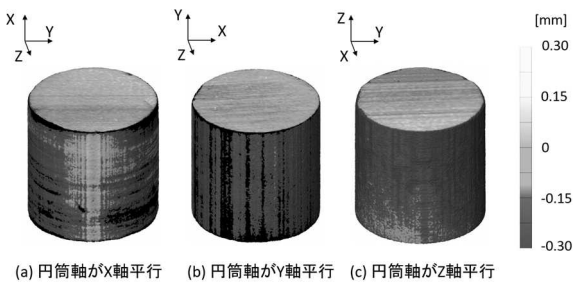


図1 偏差のグラデーションマップ評価

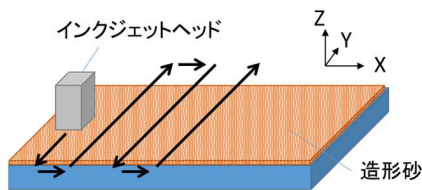


図2 インクジェットヘッドの動き

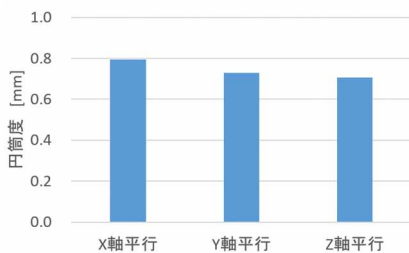


図3 造形物の円筒度

3. 樹脂3Dプリンタの造形物評価

砂型3Dプリンタを使用しない従来の鋳造工程では、製品形状をした鋳造用模型を使用して砂型(鋳型)を製作する。鋳造用模型はマスター型とも呼ばれ、木型で製作されることが多いが、木型職人の数が減少してきており、また、職人の高齢化も進んでいる。そこで、木型代替技術として、樹脂3Dプリンタを利用した鋳造用模型製作について検討することにした。樹脂3Dプリンタは、三次元データを準備すれば、容易に三次元形状の造形が可能であり、鋳造用模型製作に関しても有望な技術の一つである。しかしながら、樹脂3Dプリンタで鋳造用模型を製作した場合、積層時に生じる段差が砂型に転写されるため、意匠的な面での課題や、砂型から鋳造用模型を抜き取る際に、段差によって砂がこぼれ落ちる課題がある。樹脂3Dプリンタ造形物の鋳造用模型への適用については既に報告があるが⁵⁾、本研究においても、造形物の形状や段差の状態を把握するための評価を実施した。

3.1 評価用試料の造形

図4に造形した評価用試料の形状を示す。傾斜角度が、10°、20°、30°、45°の斜面と半径が10mmの半球形状を同時に評価できる形状とした。また、表2に造形条件を示す。材料吐出堆積方式(以下、FDM方式とする)の2機種と材料噴射堆積方式(以下、インクジェット方式とする)の1機種の装置を使用して造形を行った。FDMの1機種については、積層ピッチが0.254mmの試料と0.127mmの試料の2種類を造形した。図5に造形物の外観を示す。1試料を造形するために要した時間は、FDM0254, FDM0127, FDM0125のそれぞれで、24分、1時間31分、2時間17分であった。INK0016については8時間13分であった。使用した装置は、造形エリア内に、最大高さが変わらずに配置できれば、数量が増えても造形時間はほぼ変わらない。

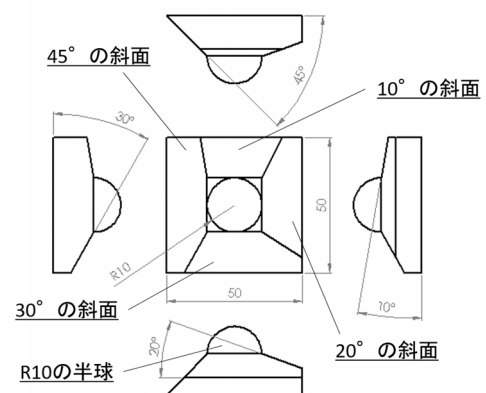


図4 評価用試料の形状

3. 2 造形物の形状評価

造形物を前述の非接触三次元形状測定機で測定した。造形物の表面が光を反射する性状であったため、白色塗料を塗布して測定を実施した。測定データと設計データをベストフィットにて位置合わせを行い、偏差のグラデーションマップ評価を行った。評価結果を図6に示す。FDM方式の造形物は、積層ピッチが0.254mmの場合には30°以下、積層ピッチが0.127mmと0.125mmの場合には20°以下の斜面において、設計データとの偏差による濃淡が筋状になって現れた。半球部分の形状についても、積層面との角度が小さくなる天頂付近に同心円状に濃淡差が現れており、積層時の段差が顕著になっている。積層ピッチが0.254mmの場合には、半球部分の偏差が大きいところで約0.1mmとなっており、設計データに対して小さく造形される結果となった。FDM方式の別機種で造形したFDM0125は、斜面の端部分で偏差が大きくなっている部分があり、半球部分についても、偏差がマイナス方向に大きくなっている部分とプラス方向に大きくなっている部分が混在して、形状が崩れている部分が確認された。インクジェット方式のINK0016では、傾

斜角度が10°の場合においても濃淡の筋は確認されないことから、積層時に生じる段差は小さかった。しかしながら、全体的に偏差が大きくなっている部分が多く見られ、特に斜面の角の部分で大きく歪んでいることを確認できる。今回使用したインクジェット方式の3Dプリンタでは、モデル材の周囲がサポート材(ワックス)で固められた状態で造形され、造形後に約60°Cの油でサポート材を除去する作業が必要なため、熱による変形が生じたのではないかと推察される。

次に、触針式表面粗さ計を使用して、測定長さを10mm、測定速度を0.5mm/secとした条件で斜面の部分測定した。測定結果から求めた算術平均粗さRaを図7に示す。FDM方式の造形物は、斜面の傾斜角が20~30°のときにRaが最も大きくなった。積層ピッチが粗いFDM0254のRaが大きく、積層ピッチが同程度のFDM0127とFDM0125は同程度のRaとなった。斜面の傾斜角度が小さい部分では、段差の平面部分の間隔が広がるため、算術的に平均粗さを求めると数値が小さくなったと推察される。インクジェット方式のINK0016は、FDM方式の造形物に比べてRaが小さくなってお

表2 造形条件

試料名	造形方式	積層ピッチ mm	モデル材
FDM0254	材料吐出堆積 (FDM)	0.254	ABS
FDM0127	材料吐出堆積 (FDM)	0.127	ABS
FDM0125	材料吐出堆積 (FDM)	0.125	Onyx (*)
INK0016	材料噴射堆積(インクジェット)	0.016	ABS ライク (アクリル系)

(*)ナイロンに短繊維カーボンを混練した材料

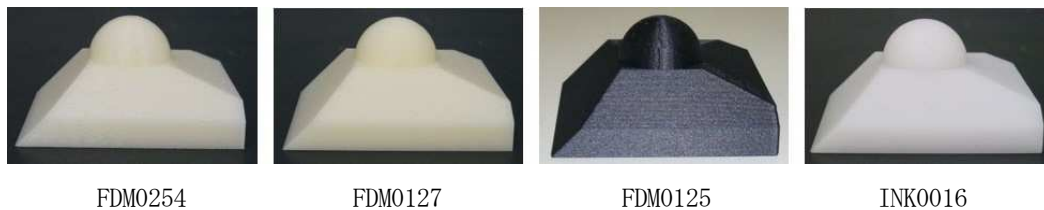


図5 造形物の外観

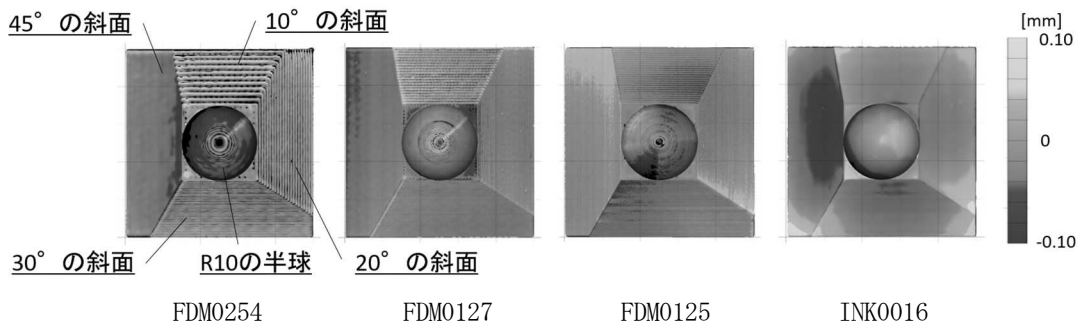


図6 偏差のグラデーションマップ評価

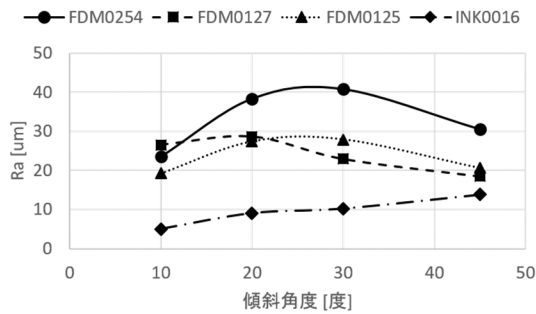


図7 算術平均粗さ

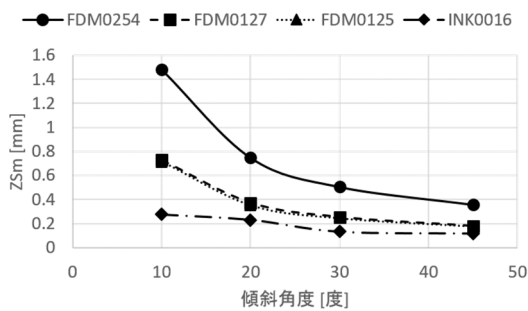


図8 輪郭曲線要素の平均長さ

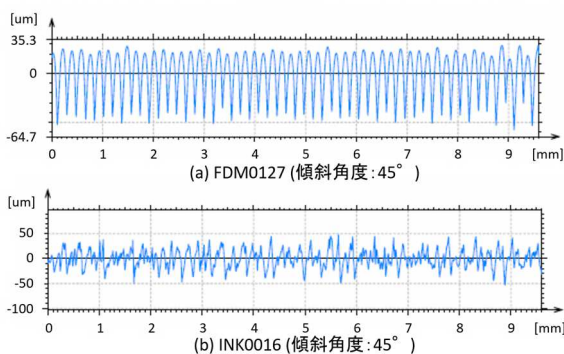


図9 粗さ曲線

り、滑らかな面が形成されていることがわかる。また、斜面の傾斜角度が大きくなるにつれてRaが大きくなっており、FDM方式の造形物の場合と傾向が異なっている。今回使用したインクジェット方式の3Dプリンタの場合、X,Y方向の解像度はともに600dpi、積層ピッチである0.016mmは約1600dpiに相当する。従って、造形面内(XY方向)の分解能より高さ方向(Z方向)の分解能の方が高いため、このような結果になったものと考えられる。

段差の状態を定量的に評価するために、輪郭曲線要素の平均長さZSm(Zは算出に使用する曲線によってR,W,Pの記号が入る)を求めた⁶⁾。積層時の段差が大きいFDM0254の10°と20°の斜面およびFDM0127とFDM0125の10°の斜面では、うねり曲線要素の平均長

さWSmを、その他の場合は、粗さ曲線要素の平均長さRSmを採用して求めた。図8に求めた輪郭曲線要素の平均長さを示す。すべての試料において、傾斜角度が大きくなるにつれZSmは小さくなった。積層ピッチがほぼ等しいFDM0127とFDM0125を比較すると、造形に使用した装置は異なるが、ZSmはほぼ等しくなった。また、FDM0127と積層ピッチが2倍であるFDM0254を比較すると、すべての傾斜角度においてZSmも約2倍になっており、ZSmは積層ピッチと関連の深いパラメータであると推察される。ただし、インクジェット方式のINK0016では、積層ピッチとZSmの関係が上述のようにはなっていない。FDM0127とINK0016の粗さ曲線を図9に示す。FDM方式のFDM0127の場合は明確な周期性が確認できるのに対し、インクジェット方式のINK0016の場合は、はっきりした周期性が確認できないため、このような結果になったと推察される。

4. まとめ

砂型3Dプリンタで造形した試料の形状評価を実施した。造形時の積層方向によって造形物の形状が異なることがわかった。また、鋳造用模型への適用を目的として、樹脂3Dプリンタの造形物評価を実施した。使用する3Dプリンタの装置、造形方式、造形条件によって、寸法精度や積層時に生じる段差が異なることがわかった。今後、樹脂3Dプリンタで造形した鋳造用模型を使用して砂型を製作したときの寸法精度などについて検討する予定である。

【謝 辞】

本研究で製作した試料の一部は、公益財団法人JKAの補助事業で導入した三次元造形機(3Dプリンタ)で製作しました。

本研究を遂行するにあたり、砂型3Dプリンタの造形指導及びアドバイスをいただきました三重県工業研究所金属研究室の皆様に深く感謝いたします。

【参考文献】

- 1) 木村, 精密工学会誌, Vol.76, No.4, pp373-377, 2010
- 2) 産業構造審議会産業技術環境分科会 研究開発・イノベーション小委員会評価ワーキンググループ, 三次元造形技術を核としたものづくり革命プログラム(次世代型産業用3Dプリンタ等技術開発)技術評価結果報告書(中間評価), 2016
- 3) 井田ら, 鋳造工学, No.92, No.2, pp.95-99, 2020
- 4) JIS B 0621「幾何偏差の定義及び表示」
- 5) 金森ら, 三重県工業研究所研究報告, No.40, pp61-66, 2016
- 6) JIS B 0601「製品の幾何特性仕様(GPS)―表面性状: 輪郭曲線方式―用語、定義及び表面性状パラメータ」

刃物切れ味試験機の試験精度向上に関する開発研究（第3報）

田中泰斗*、小川大介*

Studies about improvement of test accuracy for cutlery tester (III)

TANAKA Taito* and OGAWA Daisuke*

切れ味試験に用いる被削材は試験方法により異なる。これまで我々はパルプを主成分とする被削材により切れ味試験を行ってきたが、耐摩耗性の高い刃物の耐久試験においては、試験に多大な時間を要するとともに多数の被削材が必要となり非効率であった。そこで無機填料を多く含む市販の用紙を使用した加速試験について検討を行った。この被削材を使用することで金属製の Cutter 刃では通常の約 16 倍の速さで切れ味が劣化したものの、刃物には顕著な摩耗痕が認められたことから、過大な負荷が加わったものと予想された。セラミックス製の Cutter 刃では通常の約 5 倍の速さで切れ味が劣化したが、刃物に大きな欠陥は認められず、耐摩耗性の高い刃物の切れ味試験においては、無機填料を含む被削材を使用することが有効と考えられる。

1. はじめに

刃物の切れ味試験は、紙束で製作された被削材と試験刃物を一定条件で押し当て、引き切りしたときの被削材の切断量を切れ味として数値化するものであり、試験方法として、ISO8442-5:2004（以下、ISO 試験）や本多式切れ味試験機による方法が知られている。国内では、長年にわたり本多式切れ味試験機が用いられてきたが、自動化の遅れや試験精度などの問題が指摘されていた。この解決を目指し、我々は本多式切れ味試験に替わる新たな切れ味試験機（以下、岐阜式切れ味試験）を開発し、その普及を進めている¹⁻³⁾。

刃物の切れ味を比較するうえで、試験方法を統一し安定した試験結果を得ることの重要性は言うまでも無い。これまでに我々は、試験刃物の固定方法及び温湿度環境の違いが岐阜式切れ味試験の結果に及ぼす影響について調査を行った⁴⁻⁵⁾が、被削材に使用する用紙の違いが切

れ味試験に及ぼす影響については検討を行っていない。

切れ味試験に使用する被削材の性質は、ISO 試験と岐阜式切れ味試験で大きく異なり、ISO 試験ではシリカ微粉末を含有する専用被削材を使用することで、短時間で刃物を摩耗させる方法を採用している。これに対し、岐阜式切れ味試験では、研磨材を含まない被削材を使用することで切れ味の細かな変化をとらえることを可能としている。このため、岐阜式切れ味試験によって、セラミックスや超硬などで製作された耐摩耗性の高い刃物の耐久性を評価する場合、試験に長時間を要するとともに多数の被削材が必要となる問題があった。

そこで本年度は、無機填料を多く含む用紙によって作製した被削材を用いた切れ味試験を実施し、岐阜式切れ味試験における耐久試験の効率化と被削材が刃物に与える影響について検討を行った。

2. 実験

2.1 試験紙と被削材

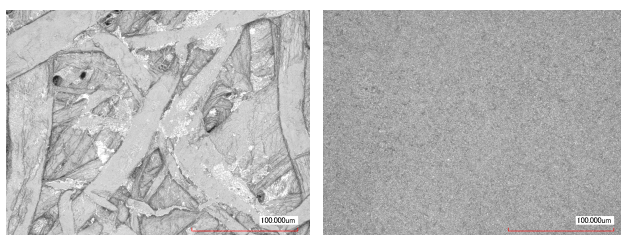
被削材に使用したマットコート紙（以下、マット紙）と従来から岐阜式切れ味試験で使用している試験紙（以下、通常試験紙）の基本データを表1に示す。通常試験紙の主成分は、晒クラフトパルプである。マット紙の灰分は、様々な紙種の中でも多い部類であり、填料の主成分は天然の石灰石（炭酸カルシウム）と推定された。ここで灰分とは、紙の中に含まれる無機成分の割合であり JIS P8251:2003 により測定した値である。

図1に通常試験紙とマット紙の表面性状を示す。通常試験紙においては、パルプ繊維が明瞭に観察できる。マット紙の表面は、填料とその他の添加剤により完全に被覆されており、通常試験紙のようなパルプ繊維は認められない。

被削材の外形寸法は幅 8mm 長さ 100mm 積層厚約 16mm に統一した。マット紙と通常試験紙では紙厚が異

表1 試験紙の基本データ

	通常試験紙	マットコート紙
坪量 g/m ²	30	81.4
紙厚 μm	40	79
灰分%	0.4	39.6
主要填料	—	炭酸カルシウム



(a)通常試験紙

(b)マット紙

図1 試験紙の表面性状

* 金属部

なるため、被削材の積層厚は積層枚数で調整した。

2. 2 切れ味試験

2. 2. 1 試験条件

試験には半自動の岐阜式切れ味試験機を用いた。被削材の切断動作は台形速度制御による位置決めにより行い、移動距離 10mm、平均移動速度 20mm/sec、移動時間 0.5sec、加減速時間 0.1sec とした。また、切断荷重の設定値を 8.34N、被削材固定荷重を約 64N とした。また、試験は、23°C50%RH の恒温恒湿環境で行った。

2. 2. 2 被削材の違いによる切れ味劣化の評価

試験には、市販の金属製とセラミックス製のカッターの替刃（以下、金属刃、セラミックス刃）を使用し、切れ味試験前後の刃先の摩耗状態をレーザ顕微鏡（株）キーエンス製、VK-9700）により観察した。

切断動作 1 回で切断される被削材の量は、被削材毎に異なるため、本研究では、通常被削材に対する切断量を切れ味として扱うこととし、マット被削材を 5mm から 10mm 程度切断する度に切れ味を測定した。

あらかじめ通常被削材に対する 1000 回の切れ味試験を行いblankテストとし、被削材の違いが切れ味試験に及ぼす影響の評価は、blankテスト終了時の切れ味を基準として行うこととした。試験刃物の切れ味は、通常被削材の切断によっても低下するが、マット被削材による切れ味の低下と比べて軽微であるため、本研究では影響を無視することとした。

3. 結果及び考察

3. 1 金属刃の切れ味劣化

被削材の累計切断距離と切れ味の関係を図 2 に示す。金属刃におけるblankテスト終了時の累計切断距離は 770mm であり、切れ味は約 0.15mm であった。マット被削材を使用した試験においては、約 46mm の累計切断距離でblankと同じ切れ味に到達しており、約 16 倍の速さで切れ味が劣化したこととなる。

図 3 に金属刃の刃先形状と断面形状を示す。各写真の

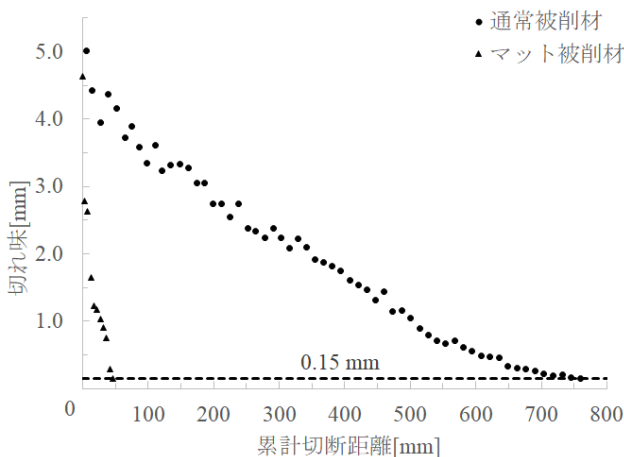


図 2 累計切断距離と切れ味の関係（金属刃）

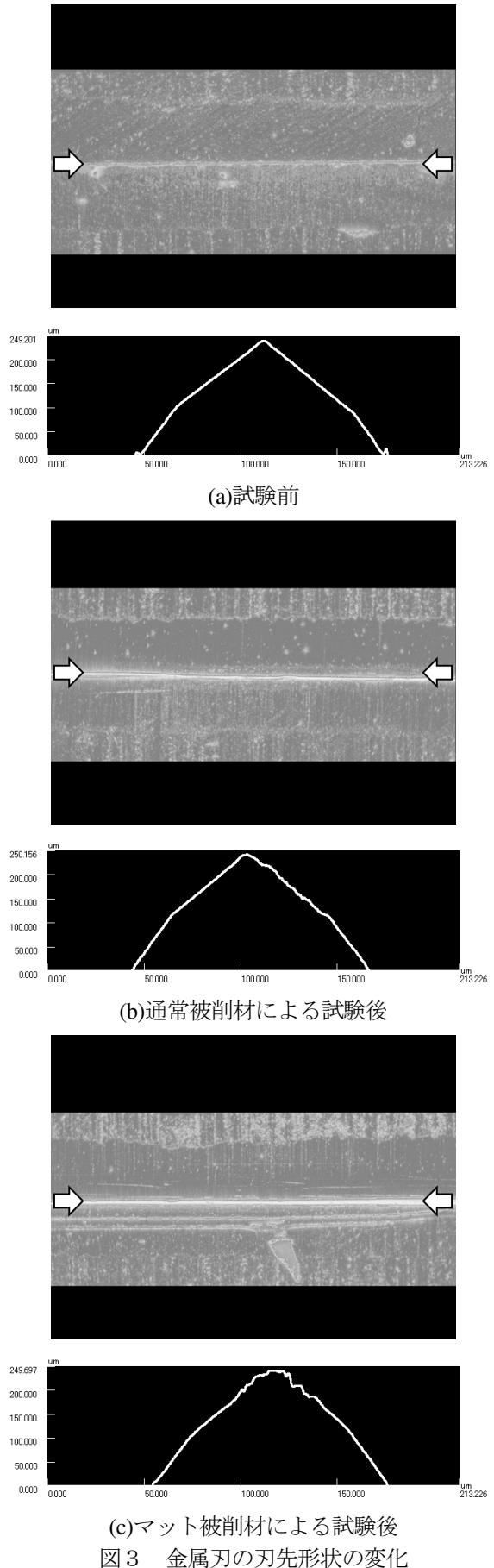


図 3 金属刃の刃先形状の変化

中央に認められる一本の横方向の線が試験刃物の刃先である。試験後の刃物では刃先の線状の様子が太く明瞭になっており、被削材の切断により刃先が摩耗したことが判る。特にマット被削材を切断した後の刃物では、刃先と平行に金属組織が削り取られたような摩耗痕が認められ、断面形状からも刃先に大きな摩耗が発生したことが予想された。

マット被削材を使用することで、短時間で刃物の切れ味を低下させることが可能であったが、このように大きな損傷を刃物に与えるとともに急激に切れ味を変化させる試験によって、実用的な切れ味を評価することが可能か、さらなる検討が必要であると考えられる。

3.2 セラミックス刃の切れ味劣化

被削材の累計切断距離と切れ味の関係を図4に示す。セラミックス刃におけるブランクテスト終了時の累計切断距離は、約1070mmであり、切れ味は約0.96mmであった。マット被削材を使用した試験においては、約220mmの累計切断距離でブランクと同じ切れ味に到達しており、通常被削材の約5倍の速さで切れ味が劣化した。切れ味の劣化速さが、金属刃より遅くなった原因は、刃物材料の耐摩耗性の違いにあると考えられる。なお、初期切れ味に関しては金属刃の方がセラミックス刃より優れており、初期切れ味と耐久性で優劣が逆転する結果となった。

図5に被削材切断前後のセラミックス刃の刃先とその断面形状を示す。通常被削材による試験では、試験前後で顕著な違いは認められないが、刃先の両脇にあった刃付け時の研磨痕が不明瞭になっており、刃先近傍で摩耗が発生したと考えられる。マット被削材による試験後の刃物では、刃先を示す線状の様子が太く明瞭に認められることから、通常被削材より大きな摩耗が生じたものと考えられる。セラミックスのような脆性材料においては、チッピングのような欠陥が発生しやすいが、観察した部位において大きな欠陥は認められず、刃先に設計耐荷重以上の過大な負荷はかからなかったものと予想された。

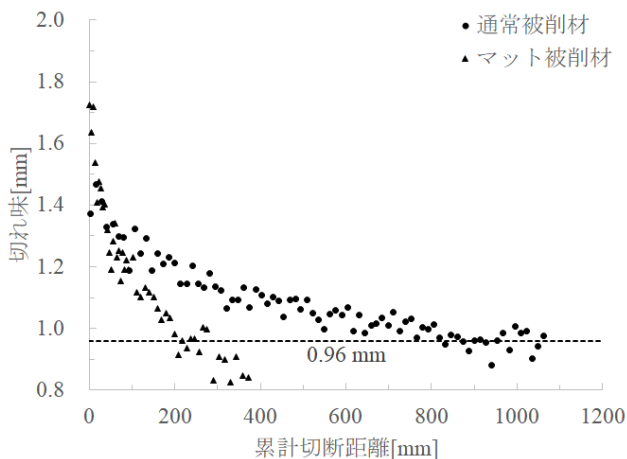


図4 累計切断距離と切れ味の関係 (セラミックス刃)

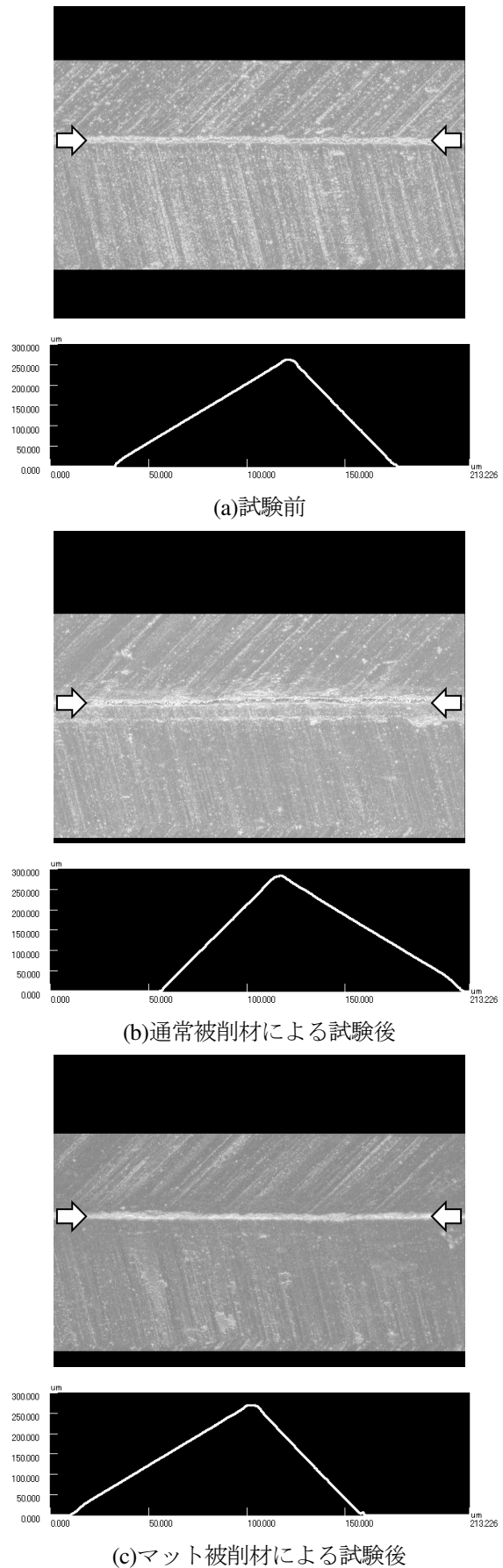


図5 セラミックス刃の刃先形状の変化

3. 3 刃物の特性と被削材の選定

通常被削材による金属刃の切れ味は、ブランクテストにより初期切れ味の3%程度まで低下した。ブランクテスト後のセラミックス刃の切れ味は、初期切れ味の約65%となり、金属刃とセラミックス刃で切れ味の低下割合が大きく異なる結果となった。金属刃、セラミックス刃いずれにおいてもブランクテスト終了間近における切れ味の変化は緩やかであることから、これ以上通常被削材による試験を継続しても大きな変化は生じないと予想される。マット被削材を使用することで、セラミックス刃の切れ味は通常被削材以下のレベルまで低下しており、刃物に求められる試験の程度によっては、マット被削材のように刃先摩耗を発生させ易い被削材を利用することが有用と考えられる。

刃物には靱性と耐摩耗性という相反する性能が求められ、用途に応じたバランスが重要となる。図3、図5より、同程度まで切れ味を劣化させた刃物においても刃物材料や被削材の違いにより、刃先に生じる損傷の程度が大きく異なることから、被削材の選定においては、適切なダメージを刃物に与えることができる材料を選定することが重要と考えられる。また、刃物の性能比較を行うためには、用紙に添加されている無機添加物の材質、粒子形状、粒度分布とその配合量や紙力増強のための各種バインダ類の添加量などの組成が正確に制御された被削材を使用することも重要と考えられる。

なお、金属刃に大きな摩耗が生じた原因の一つとしてマット紙に多量の無機填料が含まれていたことが挙げられる。填料の添加量が異なる用紙を用いることで、金属刃の切れ味耐久試験を効率化できる可能性もあるが、今後の課題としたい。

4. まとめ

岐阜式切れ味試験における切れ味耐久試験の効率化を図るため、無機填料を多量に含む市販のマットコート紙から作製した被削材を用いた試験を実施し、その有効性を検討した。

金属製カッター刃では、マット被削材を使用することで通常被削材の約16倍の速さで切れ味が劣化した。また、試験後の刃物には大きな摩耗痕が認められ、過大な負荷が加わったものと考えられた。

同様にセラミックス製カッター刃では、マット被削材を使用することで、通常被削材の約5倍の速さで切れ味が劣化した。試験終了後の刃物には、通常被削材を超える摩耗が発生したと予想されたが、チッピングなどの明らかな欠陥は認められず、耐久試験の時間短縮や被削材節約といった効率化を図るための一手法として有効であると考えられた。

これまでに実施した一連の研究を通じ、岐阜式切れ味試験によって刃物の性能を評価するために必要となる基本的な試験条件を明らかにした。岐阜式切れ味試験の特

徴は、切れ味の細かな変化をとらえることが可能であることと考えられるが、今後、試験の普及を図るためには、ISO試験と岐阜式切れ味試験機による試験結果の比較を行い、それぞれの試験方法の特徴を明確化することが重要と考えられる。

【謝 辞】

本研究の遂行にあたり、各種治具の設計製作並びに試験機の製作・自動化にご協力いただきました(株)丸富精工様に深く感謝いたします。

【参考文献】

- 1) 田中ら, 岐阜県工業技術研究所研究報告 第3号, pp1-pp4, 2015
- 2) 田中ら, 岐阜県工業技術研究所研究報告 第4号, pp3-pp8, 2016
- 3) 田中ら, 岐阜県工業技術研究所研究報告 第5号, pp5-pp8, 2017
- 4) 田中ら, 岐阜県工業技術研究所研究報告 第6号, pp11-pp14, 2018
- 5) 田中ら, 岐阜県工業技術研究所研究報告 第7号, pp 15- pp 17, 2019

レーザーによる顔料を使用しない金属製品への着色技術および、 ぎふブランド製品の開発（第5報）

田中等幸*、松原早苗**、西村太志***、堀部喜学†、大竹嘉幸††

Development of color marking techniques on the metal surface by laser marking and unique products in Gifu (V) .

TANAKA Tomoyuki*, MATSUBARA Sanae**, NISHIMURA Futoshi***,
HORIBE Yoshitaka† and OTAKE Yoshiyuki††

本研究では、金属製品の高付加価値化を目的とし、レーザーによる加飾技術を確立する。これまでに、ステンレス鋼やチタン合金への発色特性を明らかにし、また金属表面に画像データを加飾するシステムを開発した。本年度は、加工技術の金属製品への適用可能性を検討するため、酸化膜の微細構造化による色分解能の向上を試みた。その結果、本技術は従来手法に比べ色分解能が4倍に向上することを確認し、精細な装飾技術として適用できることを実証した。

1. はじめに

レーザーを利用した加飾加工は、レーザーエネルギーを高精度に制御することで、金属表面に酸化膜を形成する技術である。酸化膜に表面で反射した光と、酸化膜を透過し金属表面で反射した各々の光が干渉することで、我々は色として認識することができる。

本加工技術は、金属表面を物理的に変化させるため、スタンプ、ラベリングまたはプリント印刷などの加工技術と比べて、剥がれや消失がない。また、インクや塗料、または電気化学的処理と比べて、処理後に発生する廃棄物などが発生しないため環境負荷はなく、ランニングコストを必要としない優位性がある。しかし、多彩な色を発色するためには、酸化膜の厚みを高精度に形成する必要があるため、実用上は数色に限られていた。その対策として従来研究では、レーザーを繰り返し走査することで膜厚を制御する手法や、雰囲気ガスによって膜厚を制御する等の試みが行われているが、加工時間や安全性等、実用上の課題があった。

そこで本稿では、レーザー加飾技術が金属製品へ装飾技術として適用可能性について検討する。具体的には、複数の酸化膜から構成される微細な皮膜構造を形成することで、色分解能の向上を図る。また、金属製品に本提案技術を適用した試作品開発事例について報告する。

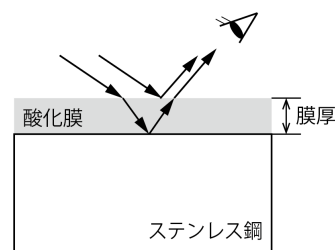


図1 薄膜干渉モデル

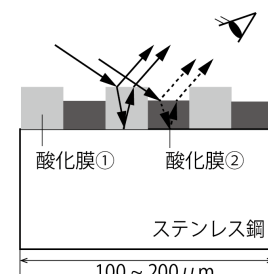


図2 提案する薄膜微細構造

2. レーザーによる金属表面の発色機構

2.1 従来手法と課題

図1に、レーザー照射によって形成された酸化膜による薄膜干渉モデルを示す。ステンレス鋼の発色は、表層に形成された酸化膜の厚さと光の入射角度が関係する干渉によるものである。レーザーによって強制的にステンレス鋼を酸化させると、その表層にCr酸化物またはFe酸化物から成る薄膜が形成される。このとき、薄膜による反射光とステンレス鋼による反射光の二つの光の光路差によって強められた波長が色調として認識される。しかし、意図する色調を発色するためには、酸化膜の厚みを0.1nm単位で制御する必要があるため、パルスレーザーの加工条件（出力、周波

* 金属部

** 情報技術部

*** 産学連携部

† 有限会社志津刃物製作所

†† 株式会社シズテック

数等)によって色調を精密に制御することは困難である。

2. 2 提案手法

本研究では、ステンレス鋼の表層に複数の酸化膜から構成される微細な皮膜構造を形成することで、色分解能の向上を試みる。図2に提案する薄膜の微細構造を示す。肉眼での識別が困難な微小領域内に、特定の波長を強める複数の酸化膜を形成し、各々の面積比率を変えることで、混合色を再現する。

3. 実験

加飾実験は、2.2節に記述した提案手法によって、色分解能が向上することを検証する。6つの加工条件(表1)の中から2つの加工条件を組み合わせ、それぞれの面積比率を変化させることで中間色の再現を試みる。なお、レーザー走査速度は100mm/s、走査間隔は5 μ mとする。

実験に使用する加工機は、ファイバーレーザー(OMRON社製、MX-Z2000G)である。材料は、ステンレス鋼 SUS304 #400 研磨(100mm \times 100mm、t=1mm)を使用する。可視域色の測定には、分光測色計(コニカミノルタ社製、CM-2600d)を使用する。

表1 加工条件

加工条件	出力 [W]	周波数 [kHz]	パルス幅 [ns]
1	5.4	200	105
2	4.4	100	15
3	4.8	300	30
4	5.6	450	15
5	5.0	500	15
6	8.6	425	105

4. 結果と考察

図3に加飾結果を示す。6色(赤色、緑色、青色、マゼンダ色、シアン色、黄色)を基軸とした24階調の色相環を示している。隣り合う色相間で連続的に変化している様子が確認できる。例えば、レーザーを出力4.8W、パルス幅30ns、繰り返し周波数300kHzの条件で金属表面に照射すると、およそ厚さ365nmの酸化膜が形成され緑色に発色した。一方、レーザーを出力4.4W、パルス幅15ns、繰り返し周波数100kHzの条件で金属表面に照射すると、およそ厚さ174nmの酸化膜が形成され黄色に発色した。図4は、緑色と黄色に発色する2つの加工条件を使用し、それぞれの面積比率を100%:0%、75%:25%、50%:50%、25%:75%、0%:100%としたときの正反射スペクトルである。スペクトルが緑色から黄色へと変化している様子が分かる。この現象は、光の三原色の原理と同様の効果であると説明でき、面積比率に応じて緑色と黄色の混色が認識できたと考えられる。本実験

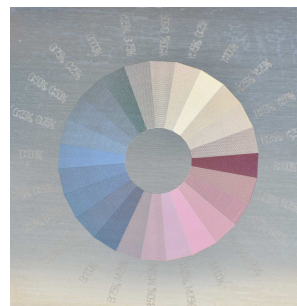


図3 加飾実験結果

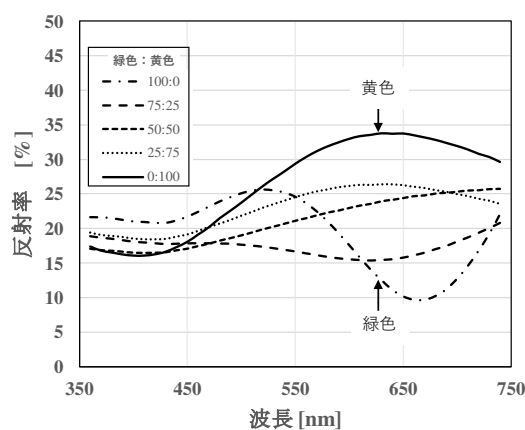


図4 分光測色結果



図5 爪切り製品の試作

では、6つの加工条件で24色を可能としたが、面積比をさらに微細化することで、精細なグラデーションの再現が可能である。また、加工条件の組み合わせによっては、従来手法では困難であった発色が期待できる。

5. 加飾技術を適用した試作品開発

図5に本技術を適用した試作品(爪切りの意匠開発)を示す。花柄模様が緑色から黄色に精彩に変化し、鮮やかな装飾技術として適用できることを実証した。

【謝辞】

本研究成果の一部は、科学技術振興機構事業研究成果最適展開支援プログラム A-STEP 機能検証フェーズの支援を受けて実施した。

【参考文献】

- 1) 田中ら,岐阜県工業技術研究所報告 No.7 pp1-4,2019

金属材料への表面処理技術に関する研究（第1報）

— 低温窒化 —
小寺将也*、大川香織**

Study on surface treatment for metal (I) - Low temperature nitriding - KODERA Masaya*, OKAWA Kaori**

金属製品の機能向上のためには熱処理が広く用いられているが、高温により製品にひずみが発生するという課題があり、より低温で行う熱処理が求められている。本研究では、低温による熱処理の効果について検討するため、試験片に通常用いられる温度よりも低温で窒素拡散処理を行い、外観、表面の残留応力、硬度等について評価した。また、製品に窒素拡散処理を低温にて施し耐久試験を行った。そして、焼付きの進行について確認し製品寿命が延びるか検討した。

1. はじめに

金属材料を高機能化させるためには、表面処理が非常に有効な手法である。例えば鉄鋼材料の表面を硬化させる方法として挙げられる浸炭は、鉄鋼の表面に炭素を拡散浸透させ表面層のみを硬化させる処理である。しかし、900～950℃に加熱する必要があるためひずみが大きくなる短所がある。これに対し窒化とは窒素を拡散浸透させる方法であり、処理温度も通常 450～600℃¹⁾ であるため浸炭と比較して処理品のひずみが少ない。

金型用治具にはクロムモリブデン鋼等の合金鋼が使用されることがあり、より低ひずみで長寿命化できる処理が求められている。そこで本研究では、通常の窒化に用いられる温度より低温で窒素拡散処理²⁾を試験片に施す可能性について評価を行った。そして、実際に使用している金型用治具製品（以下、実製品）に窒素拡散処理を施して耐久試験を行い、実製品の長寿命化について検討した。

2. 実験

20mm 角×6mm の SCM440 調質材の試験片に表 1 に示す 2 つの条件で表面処理を行った。また、実製品に条件 2 を施し、耐久試験を行った。試験片は調質のみであり、実製品は試験片と同材質で高周波焼入れされている。条件 1 の温度、時間は窒化で広く利用される条件であり、条件 2 との比較のために処理をした。条件 2 の温度は、通常使用されている温度より 100℃以上低温でも窒素拡散により硬化するかを確認するために 350℃と設定した。実製品に焼付きが発生したときの焼付き深さ以上の窒化深さにするため、窒素拡散の狙い深さを約 80μm とし、処理時間を 20 時間と設定した。

残留応力は微小部 X 線応力測定装置（株）リガク

製、AutoMATEII）を用いて測定した。X 線源は Cr であり、管電圧 40kV、管電流 40mA とした。

硬さ分布については、深さ 0.01～0.40mm までをマイクロビッカース硬度計（Struers 製、DuraScan）を用いて HV0.01（加重 0.098N）で測定した。測定の不確かさを考慮するため、3 回測定し平均値をとった。試験片の断面作成は、試験片を樹脂包埋した後 #2400 までの湿式研磨を行い、さらに粒径 3μm および 0.1 μm のアルミナでバフ研磨を行った。

耐久試験は、実製品をシリンダ型部品と接触させ、負荷をかけ繰り返し摺動させた。試験の動作回数 10 万回ごとに実製品の外観を評価し、100 万回繰り返し試験した。実製品に生じる焼付きは窪みを生じ、表面から窪みの底までの深さを最大焼付き深さとして測定した。そして窒素拡散深さが最大焼付き深さより深くなっているかどうか確認した。最大焼付き深さの測定には表面形状・粗さ測定機（Taylor Hobson 製、フォームタリサーフ@PGI NOVUS）を用いた。

表1 処理条件

	処理方法	温度[℃]	時間[h]
条件1	イオン窒化	480	6
条件2	窒素拡散処理	350	20

3. 結果及び考察

図 1 にそれぞれ (a) 未処理、(b) イオン窒化、(c) 窒素拡散処理の試験片を示す。イオン窒化は、エッジ効果により放電が角の部分に集中するために生じる窒化ムラが観察された。これに対し窒素拡散処理を施した試験片には見られなかった。また、試験片 (a)、(b)、および (c) について残留応力を測定した結果を図 2 に示す。未処理材は -259 MPa、イオン窒化は -363 MPa、窒素拡散処理は -372 MPa の圧縮残留応力が生じており、いずれの処理条件も未処理材に比べ約 1.4 倍の増加が認

* 金属部

** 技術支援部

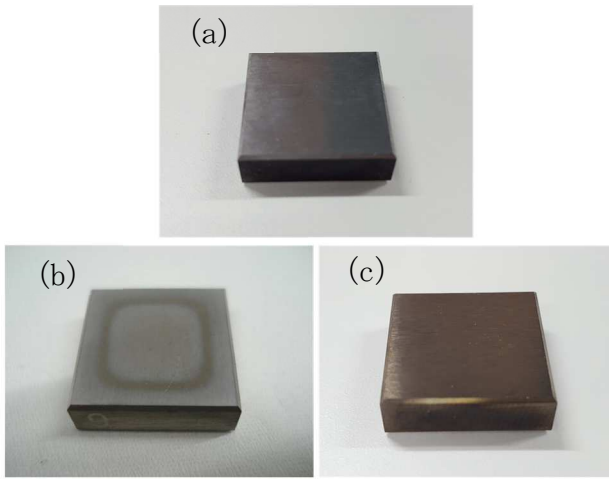


図1 処理前後の外観図

(a) 未処理、(b) イオン窒化、(c) 窒素拡散処

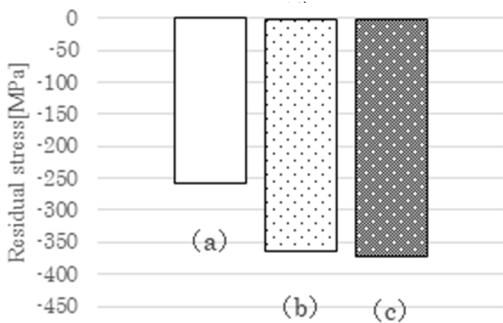


図2 処理による残留応力

(a) 未処理、(b) イオン窒化、(c) 窒素拡散処

められた。圧縮の残留応力は疲労強度を向上させることが知られており³⁾、イオン窒化、窒素拡散処理のいずれも疲労強度は向上していることが分かった。

図3に試験片の硬さ分布の結果を示す。(b)では表面から約100 μm 、(c)では約80 μm の硬化が認められ、(c)の実用窒化層深さ⁴⁾は約80 μm であった。(a)、(b)、および(c)の断面深さ0.2~0.4mmまでの平均硬度はそれぞれ308、309、301であった。(a)に対する(b)、(c)の平均硬度の変化量はそれぞれ0.3%と-2.3%であるため、処理による母材の硬度変化はないと考えられる。

実製品に窒素拡散処理を施し、耐久試験をした結果を図4に示す。実製品は高周波焼入れのみ場合、試験回数60万回時点で焼付きを確認したが、窒素拡散処理を施した場合は90万回時点で焼付きが確認され、耐久性は1.5倍向上したことが分かった。また、試験後の最大焼付き深さを測定したところ、現行品は約30 μm であったのに対し、窒素拡散処理を施した実製品は約15 μm であった。窒素拡散処理により、表層が窒素拡散層により硬化され、焼付き深さが低減し、耐久性が向上したと考えられる。

4. まとめ

(1) 試験片に2種類の処理を施したところ、イオン窒化ではエッジ効果による外観の変化が生じたが、窒素拡

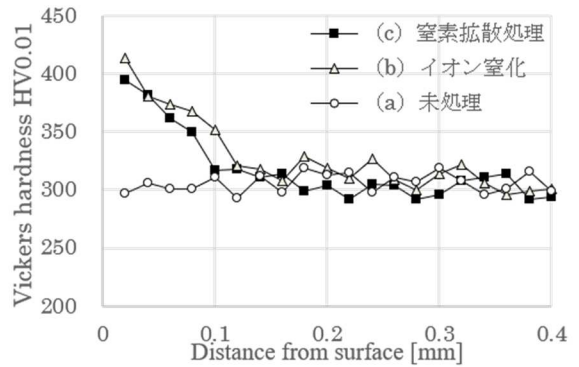


図3 硬さ分布

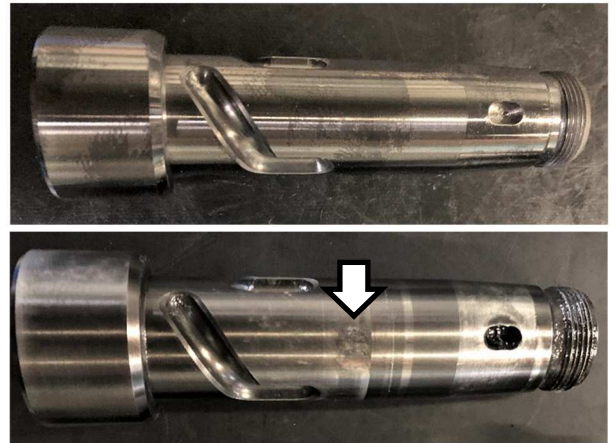


図4 耐久試験結果(窒素拡散処理)

(上: 試験前 下: 試験後(焼付き発生))

散処理では見られなかった。

(2) 圧縮残留応力がイオン窒化、窒素拡散処理ともに未処理材の約1.4倍に増加し、疲労強度が向上していることが分かった。

(3) イオン窒化と同様に窒素拡散処理においても硬化層の増加が認められ、窒素拡散処理の実用窒化層深さは約80 μm であった。また、処理による母材の硬度低下は確認されなかった。

(4) 実製品に窒素拡散処理を施したところ、焼付きで生じる窪みの深さが低減し、現行品と比較して1.5倍の耐久性向上が認められた。

【謝 辞】

本研究を遂行するに当たり、株式会社岡本様にご協力頂きました。深く感謝の意を表します。

【参考文献】

- 1) 河田一喜, 本当によくわかる窒化・浸炭・プラズマCVD, 日刊工業新聞社
- 2) 細野ら, 岐阜県工業技術研究所研究報告第7号, pp27-31, 2019
- 3) 田中啓介ら, 残留応力のX線評価, 養賢堂
- 4) JIS 0562-1993: 鉄鋼の窒化層深さ測定方法

金属材料への表面処理技術に関する研究（第2報）

—表面開始重合によるステンレス上への有機皮膜の形成—

大川香織*、小寺将也**

Study on surface treatment for metal (II)

—Synthesis of polymer thin film on stainless steel by surface-initiated polymerization—

OKAWA Kaori* and KODERA Masaya**

金属素材の高機能化には表面処理は非常に有効な手法であり、技術開発が盛んに行われている。本研究では、ステンレス製刃物表面への強固で均一な有機皮膜形成を目指し、表面開始重合法によるステンレス上への化学結合による有機皮膜の形成について検討した。

1. はじめに

カミソリやメスの表面には、防汚や切削抵抗を低減するために、ポリテトラフルオロエチレン (PTFE) を中心としたフッ素系ポリマーがコーティングされている。フッ素系ポリマー粒子懸濁液を表面に塗布した後、焼き付けて皮膜化しているため、密着性が弱く、被削物との抵抗が大きい製品、例えば刃物では皮膜がはがれやすい問題がある。また、膜厚を薄くすることができないため、形状が変わると性能に影響を及ぼす製品への処理には向かない。さらに、県内刃物業界は、低価格な外国製品の台頭により差別化に迫られており、刃物表面への機能性有機皮膜を形成するために、さまざまな表面処理法の開発が強く望まれている。これまでに、刃物に多く用いられているマルテンサイト系ステンレスである SUS420J2 表面へ化学結合による撥水・撥油性を有する自己組織化単分子膜 (SAM 膜) の形成を試み、カミソリ刃の切削抵抗を最大 20% 低減させることに成功した¹⁾。SAM 膜の膜厚は用いる有機化合物の鎖長で決まるため、この方法では厚さ数 nm 程度の皮膜しか得られない。そこで、数 nm から数百 nm の有機皮膜の形成を目指し、電子移動により活性化剤が再生する原子移動ラジカル重合 (Activators ReGenerated by Electron Transfer Atom Transfer Polymerization, ARGET ATRP)^{2,3)} を応用した表面開始重合 (Surface-initiated Polymerization, SIP)⁴⁾ に着目した。ARGET ATRP は従来の重合法よりも反応条件等を厳密にする必要がないため、製造現場への適用が期待できる。本研究では、表面開始重合法を用い、SUS420J2 表面へのポリメタクリル酸メチル (PMMA) の薄膜形成を試みた。

2. 実験

2. 1 基板および試薬

基板として、10mm×10mm の SUS420J2 を使用した。試験片表面は #400、#800 および #1200 の SiC 研磨紙で湿式研磨した。表面の有機汚染層を除去するために、メ

タノールで 30 分間超音波洗浄し、さらに Milli-Q 水で 10 分間洗浄した。送風乾燥器で乾燥後、実験に供した。テトラヒドロフラン (THF) (富士フィルム和光純薬株式会社)、11-(2-Bromoisobutyrate)-undecyl-1-phosphonic acid (11-BUPA) (Sigma-Aldrich)、メタクリル酸メチル (MMA) (Sigma-Aldrich)、メタノール (Sigma-Aldrich)、二臭化銅 (CuBr₂) (Sigma-Aldrich)、2,2'-ジピリジル (bpy) (Sigma-Aldrich) およびアスコルビン酸 (東京化成工業株式会社) はそのまま使用した。

2. 2 実験

2. 2. 1 SUS 表面への開始基の固定化

1.0mM 11-BUPA THF 溶液を調整し、基板を所定の時間、大気雰囲気下で浸漬した。反応はすべて室温 (25°C) で行った。反応後、100°C で 1 時間加熱処理をした後、THF で洗浄して未反応の 11-BUPA を除去し、風乾して実験に供した。処理した基板は以下 11-BUPA 基板とする。

2. 2. 2 ARGET ATRP 法による SUS420J2 への表面開始重合

メタノール (16ml)、Milli-Q 水 (4ml) および MMA (20ml) を容器に入れ、10 から 15 分窒素バブリングを行った。上記の容器に CuBr₂ (7.4mg)、bpy (51.5mg) およびアスコルビン酸 (58.1mg) を加え、攪拌した。SUS420J2 を入れた反応容器に調整した溶液を注ぎ、70°C で 48 時間重合した。基板を取り出し、メタノール、Milli-Q 水で洗浄し、未反応のモノマー等を除去した。処理した SUS 基板を以下 SIP 基板とする。

2. 3. 1 X 線光電子分光分析 (X-ray Photoelectron Spectroscopy, XPS) による表面分析

X 線光電子分光分析装置 (アルバック・ファイ株式会社製、PHI 5000 Versa Probe II) を使用し、処理基板および未処理基板の表面に存在する元素の同定および化学状態分析を行った。励起 X 線源は AlK α (hv=1486.6eV) を使用した。

2. 3. 2 高感度反射測定法 (IRRAS 法) による表面分析

* 技術支援部、**金属部

フーリエ変換赤外分光光度計（日本分光株式会社製、FT/IR-6700）および高感度反射測定装置（RAS PRO 410）を使用し、未処理および SIP 基板の IR 測定を行った。条件は分解能 4cm^{-1} 、積算回数 1000 回とした。

3. 結果及び考察

未処理基板および 11-BUPA 処理基板のワイドスペクトルを図 1 に示す。図 1 (a)より、未処理基板の表面からは、530 eV に酸素の 1s 電子(O1s)、724 eV および 712 eV に鉄の 2p 電子(Fe2p)、さらに 576eV にクロムの 2p 電子 (Cr2p) の結合エネルギーを示すピークがそれぞれ確認され、これらはステンレスの構成成分に由来するものである。また、284eV 付近に見られる炭素の 1s 電子(C1s)に由来するピークは表面汚染層に由来するものである。一方、図 1 (b)より、11-BUPA 処理基板からは、0 から 250eV の間に、11-BUPA の臭素に由来する 180eV および 68eV 付近に Br3p3 および Br3d に加え、190 eV および 133 eV 付近に 11-BUPA のリンの P2s と P2p の結合エネルギーを示すピークが明確に認められた。このことから、SUS 基板上に重合開始基が固定されたものと考えられる。

重合開始基が固定化された SUS 基板を用い、ARGET ATRP 法による表面開始重合を行い、SUS の表面への PMMA の表面開始重合を試みた。基板の表面の PMMA を確認するために、未処理基板および SIP 処理基板の IRRAS 法により FT-IR 測定を行った結果を図 2 に示す。図 2 (a) (b) を比較すると、SIP 処理基板には 1700cm^{-1} 付近に PMMA の C=O に由来するピークが認められ、未処理基板には認められなかった。顕微正反射法による測定ではスペクトルが得られないことから、SUS 表面に PMMA の薄膜が形成されていることが示唆された。

さらに図 3 に XPS による SIP 基板表面の炭素のナローキャンスペクトルを示す。PMMA の炭化水素 (C-C および C-H) に由来する結合エネルギーである 285.0 eV、カルボニル基 (C-O) に由来する 286eV およびエステル基 (O-C=O) に由来する 289 eV 付近のピークが認められたことから、SUS 表面に PMMA が重合していることが明らかとなった。

4. まとめ

ARGET ATRP を応用した表面開始重合法による、SUS420J2 表面への PMMA の形成を検討した結果、SUS 上へ化学結合により PMMA を重合することができた。今後は、膜厚の制御やポリマー種の検討を行い、カミソリ刃やメスに処理を施し、切れ味試験などの評価も行う予定である。

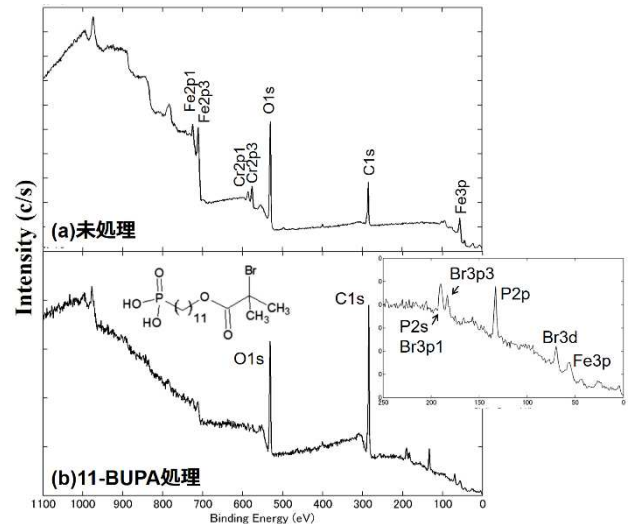


図 1 基板表面の XPS ワイドキャンスペクトル (a)未処理、(b)11-BUPA 処理

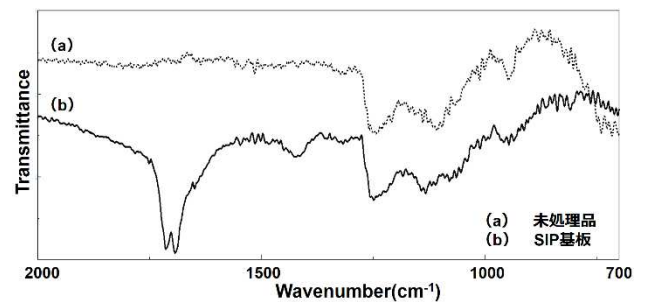


図 2 IRRAS 法による基板表面の IR スペクトル

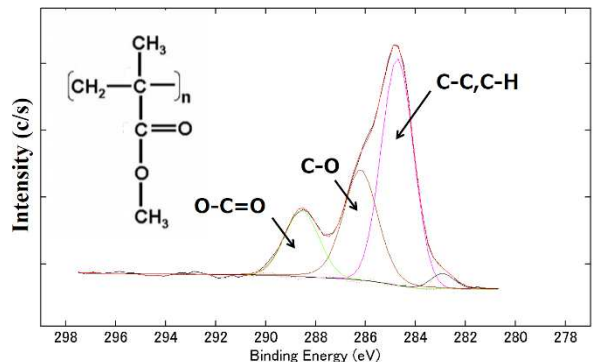


図 3 SIP 基板表面の C のナローキャンスペクトル

【参考文献】

- 1) 大川ら, 工業技術研究所研究報告 No.4, pp31-34, 2016
- 2) Matyjaszewski, K.ら, Proc. Natl. Acad. Sci., vol.103, pp15309-15314, 2006
- 3) Jakubowski, W.ら, Angewandte Chemie, vol.45, pp4482-4486, 2006
- 4) Controlled Radical Polymerization Guide, ALDRICH, pp12-16, 2012

ゾルゲルコーティングによる Ti 系硬質膜の作製

茨木靖浩*、倉知一正*

Preparation of Ti system hard films by sol-gel method

IBARAKI Yasuhiro* and KURACHI Kazumasa*

ゾルゲル法を用いて、ガラス基板上に酸化チタン膜、アルミニウム添加酸化チタン膜をコーティングした。これらのコーティング膜と鏡面研磨を施した SKD61 基板を種々の条件で還元窒化処理を行い、それぞれの結晶構造と表面粗さを調べた。ガラス基板上の膜は還元窒化処理後においても平滑であったが、SKD61 基板は表面粗さが増加した。NH₃ と H₂ を混合したガスを用いて還元窒化処理を行うことで、SKD61 基板の表面の荒れを抑制した TiN、TiAlN 膜の生成が期待できる。

1. はじめに

アルミダイカストは寸法精度と生産性が高いことから、輸送機器部品の製造に広く利用されている。しかしながら、鋳造数の増加に伴う金型の溶損や変形によってカジリが生じると、寸法精度や離型性の悪化を招き、不良品の増加要因となる¹⁾。この課題に対して、TiN や TiAlN などの硬質膜をコーティングし、金型の耐久性を向上させることが行われている²⁾。

金型のコーティング手法としては PVD 法が広く利用されているが、膜の付き回りに課題があり、複雑形状の金型には適さない。これに対し、ゾルゲル法は装置が安価で操作が簡便、膜の付き回りが良好という長所を有している³⁾ことから、我々はゾルゲル法を用いた硬質膜の作製を検討してきた。昨年度までに、ゾルゲル法を用いて SKD61 基板上に酸化チタン膜、アルミニウム添加酸化チタン膜を形成し、還元窒化処理を行うことで TiN、TiAlN 膜が得られることを確認した⁴⁾。金型部材表面の平滑性はダイカストにおいて離型性に寄与する重要な項目であることから、本研究では、窒化処理に用いる混合ガスを変化させたときの膜単体、SKD61 基板単体の結晶構造、表面粗さについて調べることで、平滑な TiN、TiAlN 膜の作製条件を検討した。

2. 実験

2. 1 酸化チタン膜の作製

2-プロパノールとジエタノールアミンを混合後 3h 攪拌し、そこに TTIP (チタンテトライソプロポキシド) をジエタノールアミンと TTIP のモル比が 1:1 となるように加えた。TTIP のモル濃度は 0.4M とした。これを 24h 攪拌したものを酸化チタンゾルとした。また、1 回あたりのコーティング膜厚を増加させるために PVP (ポリビニルピロリドン) を Ti と PVP の比が 1:3 となるように添加した。

基板にはガラス基板 (コーニング#1737) を用いた。これは SKD61 基板を用いると、X 線回折装置による膜の結晶構造の評価において、膜と SKD61 に関係する回折ピークが重なり、解析が難しくなるためである。SKD61 基板は、窒化処理前後の表面粗さの変化を測定するために鏡面研磨を施した。

酸化チタンゾルに基板を 30 秒浸し、引き上げ速度を 6cm/min としてディップコートした。コーティング後、110°C で 10 分乾燥させ、600°C で 30 分加熱した。PVD 法で作製されている TiN 膜は約 1μm であることから、これと同程度の膜厚を得るため、コーティング、乾燥、加熱の工程を繰り返した。

得られた膜および SKD61 基板の還元窒化処理は電気炉に NH₃、CO、N₂、H₂ が所定の比の混合ガスとなるよう各々のガスを流量調整し、混合ガスの流量が 100ml/min となるように導入して 600°C で 12h 行った。

2. 2 アルミニウム添加酸化チタン膜の作製

2. 1 と同様の手順でモル濃度 0.4M の酸化チタンゾルを作製した。Al の原料としてアルミニウムブトキシドを用い、Ti:Al=2:1 となるようにゾルに外割で添加した。PVP は Ti:PVP のモル比が 2:3 となるように添加した。コーティング、乾燥、加熱、還元窒化処理の方法は 2. 1 と同様である。

2. 3 結晶構造、表面粗さの評価

得られた膜の結晶構造については X 線回折装置 (株式会社リガク製、SmartLab) で評価した。基板、膜の表面粗さ Ra の測定には表面形状・粗さ測定機 (Taylor-hobson 製、フォームタリサーフ PGI NOVUS) を用いた。

3. 結果及び考察

図 1 に、ガラス基板上にコーティングした酸化チタン膜、アルミニウム添加酸化チタン膜を種々の混合ガスで還元窒化処理した時の XRD パターンを示す。酸化チタン膜を NH₃-CO の混合ガスで処理した場合、アナターゼ型結晶とルチル型結晶の TiO₂ に起因するピークが現

* 化学部

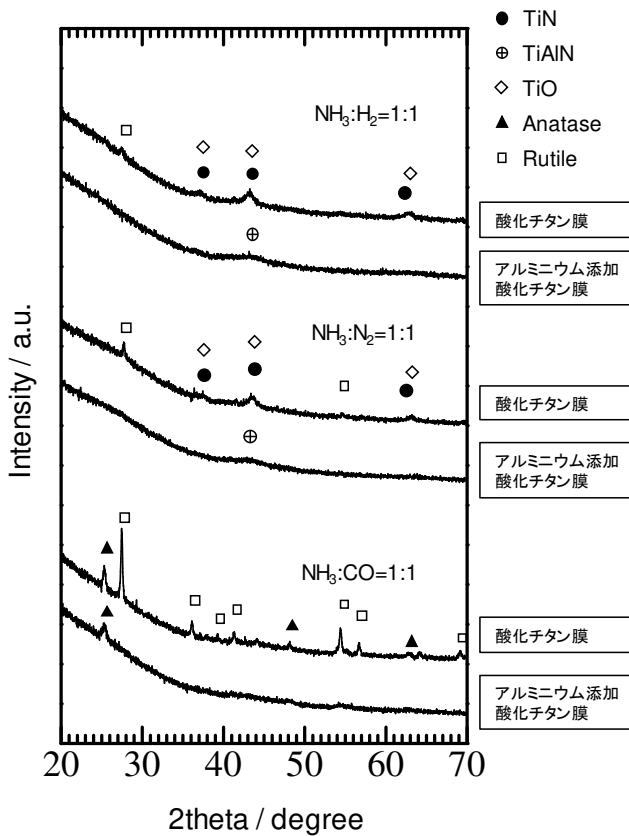


図1 還元窒化処理した膜のXRDパターン

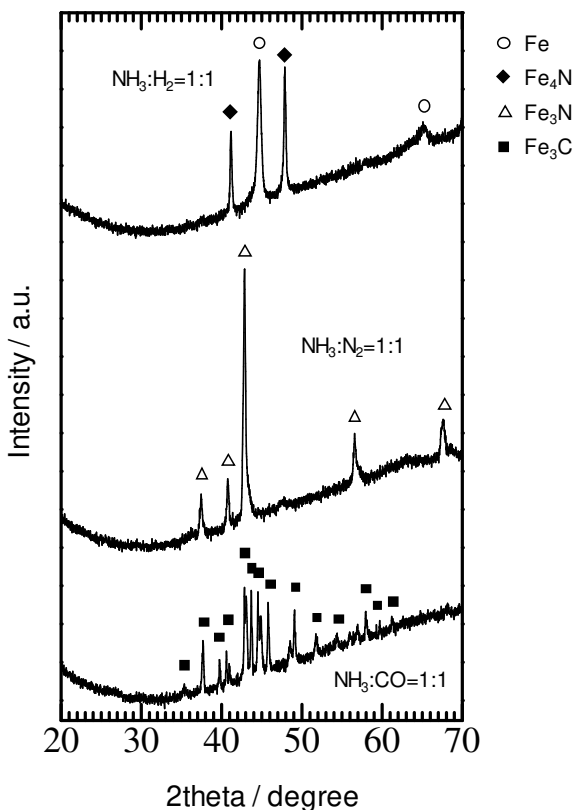


図2 各混合ガス中で加熱処理したSKD基板のXRDパターン

れた。アルミニウム添加酸化チタン膜を処理した場合はアナターゼ型結晶の弱いピークが現れた。NH₃-CO の場合は、還元性が弱く、Ti と O の結合が切れないことから、TiN、TiAlN が生成しなかったと考えられる。

NH₃-N₂、NH₃-H₂ の混合ガスで処理した結果、酸化チタン膜からは TiN、TiO、TiO₂ (ルチル型結晶構造) に、アルミニウム添加酸化チタン膜からは TiAlN に起因する弱くてブロードなピークが観測された。NH₃-H₂ の条件で作製した酸化チタン膜についてオージェ電子分光測定を行ったところ、窒素と酸素が検出されたことから、この膜は TiN、TiO、TiO₂ からなる混合物であると推察できる。単相の窒化物を得るため、今後は混合ガスの比を検討していく必要がある。NH₃-CO、NH₃-N₂、NH₃-H₂ ともに、窒化処理後の膜は光沢があり、表面粗さ Ra は 10nm 以下を示す平滑な膜であった。

図2に、鏡面研磨した SKD61 基板を各混合ガス中で加熱処理したときの XRD パターンを示す。NH₃-CO、NH₃-N₂ では、それぞれ Fe₃C、Fe₃N に起因するピークのみが観測され、侵炭と窒化による効果と考えられる。NH₃-H₂ では、Fe、Fe₄N のピークが観測された。Fe₃C、Fe₃N、Fe₄N は硬くて脆い特性を有していることから、これらの生成を抑えることが望ましい。NH₃-CO、NH₃-N₂ では、SKD61 の主成分である Fe が観測されないことから、硬くて脆い層は NH₃-H₂ の場合よりも厚いと推察できる。また、加熱処理前の SKD61 鏡面基板の表面粗さ Ra は 4.7nm であったが、NH₃-CO、NH₃-N₂、NH₃-H₂ で加熱処理した後の基板のそれはそれぞれ 222、181、139nm を示し、NH₃-H₂ の場合が最も表面の荒れが小さかった。加熱処理後の表面粗さの増加は、炭化物や窒化物の生成に伴う体積変化によるものと考えられる。

以上の結果から、酸化チタン膜、アルミニウム添加酸化チタン膜を還元窒化処理することによって TiN、TiAlN 膜を SKD61 基板上に生成させる場合、NH₃-H₂ の混合ガスを用いることで表面の荒れを抑制できると考えられる。

4. まとめ

ゾルゲル法を用いて、ガラス基板に酸化チタン膜、アルミニウム添加酸化チタン膜をコーティングした。得られたコーティング膜、SKD61 鏡面基板のみを種々の還元窒化条件で処理した。この結果、NH₃-H₂ の混合ガスを窒化処理のガスに用いることで、表面の荒れが小さい TiN 膜、TiAlN 膜が得られると期待できる。

【参考文献】

- 1) 若月健ら,電気製鋼 No.85 pp13-20 2014
- 2) 河田一喜,素形材 No.2 pp11-17 2008
- 3) 作花濟夫,ゾルゲル法の科学
- 4) 茨木靖浩ら,岐阜県セラミックス研究所研究報告、2019

化学

石灰水洗ケーキの用途開発に関する研究（第2報）

藤田和朋*、茨木靖浩*

Application development of Raw-lime Washing Sludge (II)

FUJITA Kazutomo*, IBARAKI Yasuhiro*

本年度は、石灰水洗ケーキスラリー中のCaイオンを制御することによって、重金属吸着性能の向上を検討した。また重金属吸着後の安定性を評価するため、重金属固定処理土壌の環境への暴露を想定した、酸・アルカリによる溶出性を評価した。その結果、Caイオン制御のうち、酸添加による水洗ケーキの溶解で発生するCaイオン制御方法（内部発生法）では大きな改善はなかったが、Ca源（消石灰）を添加してCaイオンを制御する方法（外部添加法）では、B、Cr、Asで大きな改善が確認できた。安定性は昨年度の結果から、水洗ケーキへの吸着が高かったPb、Cd、Hg、As、Seを評価¹⁾したが、特にPb、Cdの溶出が少なく、安定性が高いことが判った。

1. はじめに

本研究は、石灰業界の永年の問題である、石灰製造時に大量に副生する石灰水洗ケーキ（不純物の混ざった微粒子炭酸カルシウム）の用途開発に関する研究である。この研究では、水洗ケーキの大量消費が見込める、天然系重金属を含む土壌の開発残土（トンネルや造成等）や、浚渫土壌等の含有重金属処理に利用される重金属溶出抑制剤（不溶化剤）への活用を目指すものである。

昨年度は水洗ケーキが、土壌汚染対策法で規定する多くの重金属に対し吸着性が高いことを確認したが、水洗ケーキの重金属の吸着メカニズムは、重金属類において異なった挙動を示し、不明な点が多い²⁾。今年度は水洗ケーキの主成分であるCaに着目し、Caイオン制御による重金属吸着性能の向上と、処理土壌の屋外暴露を想定した安定性（重金属の溶出性）を検討した。

2. 実験

2.1 カルシウムイオン制御による高活性化

石灰業界への技術移転を考慮し、低コストで簡便な制御方法として、内部発生法と外部添加法の2つを提案し検討した。

2.1.1 内部発生法

酸（塩酸）添加で水洗ケーキスラリー中のCa成分を部分的に溶解することで、内部から発生するCaイオンを制御する方法で、重金属の吸着性向上を検討する。

2.1.1.1 溶液挙動の解明

内部発生法で重金属の吸着性を評価する前に、塩酸を水洗ケーキスラリーに添加した際に生じる溶液挙動を解明することは、大変重要である。このため基本的な溶液挙動である、pH、電気伝導度、及び溶液上澄みのCa濃度を測定した。

実験方法は、水洗ケーキ100gと蒸留水1000gをビー

カーに入れ、十分攪拌して均一なスラリーとしたものと、比較として蒸留水1000gのみをビーカーに入れたものを用意した。これに塩酸（1N 試薬特級）を0、0.01、0.1、1、10、100g添加した際の、pH、電気伝導度、Ca濃度を測定した。

2.1.1.2 重金属類の吸着性

昨年度と同様に、環境基準の10、100、1000倍の模擬汚染水を作製し、水洗ケーキの重金属吸着量を測定した。吸着性を評価する重金属類は、土壌汚染対策法で規定する重金属類の中で、Cr、As、Pb、Cd、Bとした。

試験方法は、昨年と同様に、水洗ケーキ10gと模擬汚染水100gと、塩酸（添加量は0、0.1、10gの3種）を250mlのPPボトルに入れ、振とう攪拌（6時間、毎分約200回）し、溶液を遠心沈降分離（毎分約3000回転、20分間）し、上澄み液の重金属濃度を測定した。

2.1.2 外部添加法

Ca源（消石灰 Ca(OH)_2 ）を水洗ケーキスラリーに添加し、消石灰の溶解乖離によって、Caイオンを制御する方法で、重金属の吸着性向上を目指す。

2.1.2.1 溶液挙動の解明

(2.1.1)と同様に、水洗ケーキスラリーに消石灰（試薬特級）を0、0.001、0.01、0.1、1、10g添加した際の溶液挙動を測定した。

2.1.2.2 重金属類の吸着性

(2.1.1.2)同様に、重金属吸着性を評価した。

2.2 重金属吸着安定性評価

水洗ケーキを重金属溶出抑制剤へ展開する上で、重金属吸着性は重要な特性であるが、重金属を吸着した水洗ケーキの、屋外暴露環境における安定性（溶出性）も重要な特性である。この評価は、財団法人土壌環境センター（GEPC）において、「重金属等不溶化処理土壌のpH変化に対する安定性の相対的評価方法」³⁾で示され、屋外暴露を下記のように規定している、
1-1)酸添加溶出試験I（硫酸）

* 化学部

- ・ 100年間の酸性雨相当 (硫酸: pH 2.8)
- 1-2) 酸添加溶出試験Ⅱ (硫酸)
 - ・ 500年間の酸性雨相当 (硫酸: pH 2.1)
- 2-1) アルカリ添加溶出試験Ⅰ (消石灰)
 - ・ 地中にコンクリート構造物がある場合、弱アルカリ暴露を想定 (pH 11.9)
- 2-2) アルカリ添加溶出試験Ⅱ (消石灰)
 - ・ 地中にコンクリート構造物が構築され、土壌が消石灰に接触し高アルカリ暴露を想定 (pH 12.7)

2. 2. 1 実験方法

一般的に長期間の安定性を評価する試験Ⅱよりも、検証が多い試験Ⅰの方法を参考に、下記方法で実施した。

試験方法は(2.1.1.2)と同様に、環境基準の10、1000倍の模擬汚染水を作製し、石灰水洗ケーキの重金属吸着量を測定した後、重金属を吸着した水洗ケーキをろ過し、酸安定性評価の場合は、約pH 2.8の硫酸水溶液を100ml加えた。またアルカリ安定性の場合は、約pH 11.9の消石灰水溶液を100ml加えた。この溶液を振とう攪拌(6時間、毎分約200回)した後、遠心沈降分離(毎分約3000回転、20分間)し、上澄み液の重金属濃度を測定して溶出量を求めた。なお評価した重金属は、吸着性が高いPb、Cd、Hg、As、Seで行った。

3. 結果及び考察

3. 1 カルシウムイオン制御による高活性化

3. 1. 1 内部発生法

3. 1. 1. 1 溶液挙動の解明

塩酸を添加した際の、pH、電気伝導度の挙動、及びCa濃度変化を、それぞれ図1、図2、表1に示す。pHは全添加量を通じ、水洗ケーキスラリーでは強力な緩衝効果で、pHが蒸留水のみと比べ、4程高い値を示した。電気伝導率は、1g添加以上では、蒸留水と比べ、値が大きくなった。これは塩酸添加によって水洗ケーキが溶解し、発生する各種イオンが多くなったためと考えられる。また溶液のCa濃度を計測したが、塩酸添加量に伴ってCa濃度が大きく増加した。これらの結果から、塩酸添加で水洗ケーキを溶解することで、Caイオンを増加させることが確認できた。

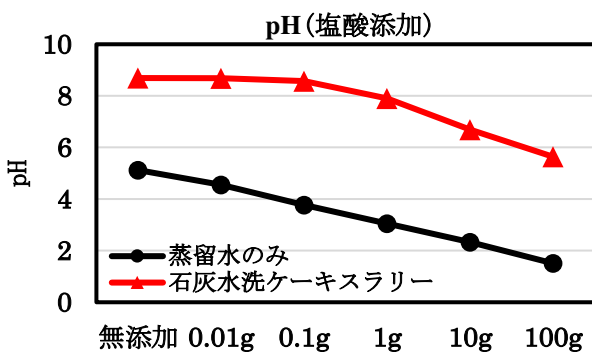


図1 pHの挙動 (内部発生法)

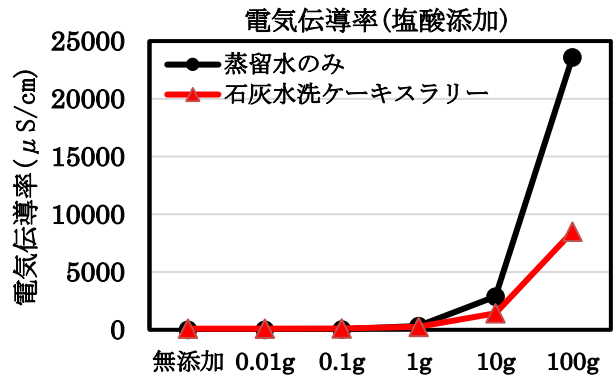


図2 電気伝導度の挙動 (内部発生法)

表1 Ca濃度変化 (内部発生法)

塩酸添加量 g	0	1	100
Ca濃度 (ppm)	0.9	3.4	167.5

3. 1. 1. 2 重金属類の吸着性

内部発生法による重金属の吸着性変化を図3-1～3-5に示す。塩酸添加量が無添加と0.1gでは概ね吸着傾向はどの重金属もほぼ同じであった。また、環境基準の10倍、100倍の低・中濃度では、CrとBは塩酸添加10gでやや吸着量が向上することが判った。

一方環境基準の1000倍(Bのみ標準試料の制約から10倍)の濃度領域での吸着率が、塩酸添加量に関わらず、同程度の値を示すことから、重金属の高濃度条件下では水洗ケーキ自体が有する素材の重金属吸着能力に依存していると考えられる。特にPbとCdは、塩酸添加量に関係なく、重金属の低濃度から高濃度まで、高い吸着率を示し、素材自体の吸着性能が高いと推察される。

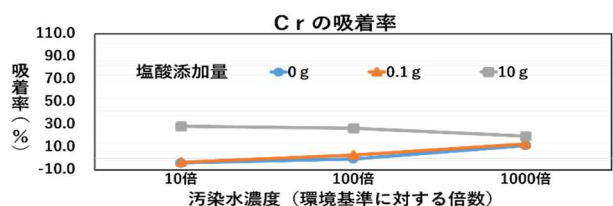


図3-1 Crの吸着性 (内部発生法)

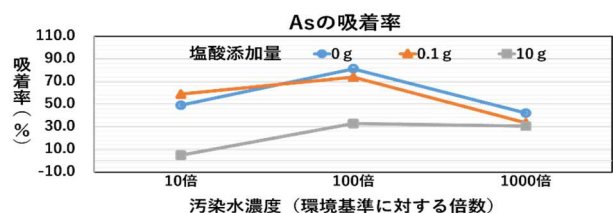


図3-2 Asの吸着性 (内部発生法)

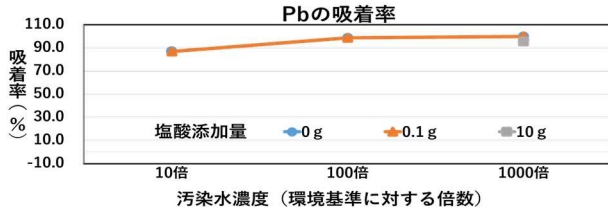


図3-3 Pbの吸着性 (内部発生法)

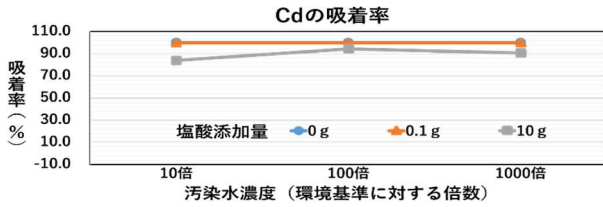


図3-4 Cdの吸着性 (内部発生法)

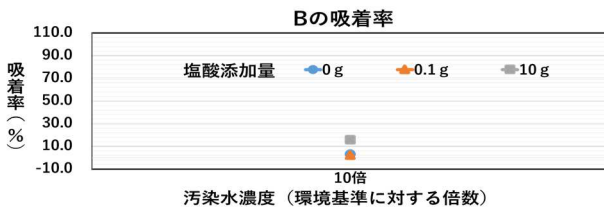


図3-5 Bの吸着性 (内部発生法)

3. 1. 2 外部添加法

3. 1. 2. 1 溶液挙動の解明

消石灰を添加した際の、pH、電気伝導度の挙動、及びCa濃度変化を、表2、図4、図5に示す。同スラリーは弱アルカリ性を示すため、添加量が0.001g 迄は蒸留水よりも高いpHを示すが、それ以降は蒸留水と同様な挙動を示す。また電気伝導度は同スラリーと蒸留水共に、同様な挙動を示す。この結果から消石灰の添加によって発生するイオンは同ケーキに吸着固定されず、遊離した状態であることが判った。また、消石灰添加量に伴ってCa濃度が増加し、表中10gで大きくCa濃度が増加することが確認できた。これらの結果から、消石灰の添加量とともにCa濃度が増加することが確認できた。

表2 Ca濃度変化 (外部添加法)

消石灰添加量 g	0	0.1	10
Ca濃度(ppm)	0.9	1.8	75.7

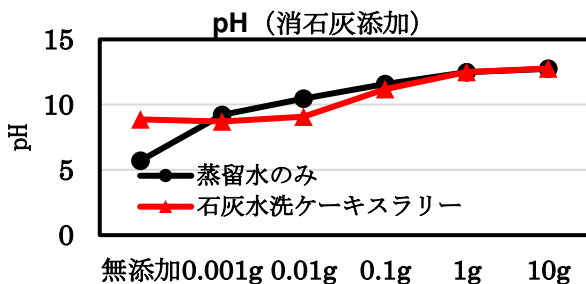


図4 pHの挙動 (外部添加法)

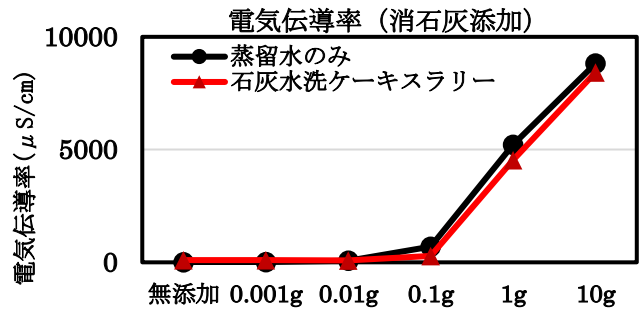


図5 電気伝導度の挙動 (外部添加法)

3. 1. 2. 2 重金属類の吸着性

外部添加法による重金属の吸着性変化を図6-1~6-5に示す。消石灰を添加すると、CrとBで大きく吸着量が向上し、Asでも向上(特に1g添加)が見られた。またPbとCdは、消石灰添加量に関係なく、重金属の低濃度から高濃度まで、高い吸着率を示しており、素材自体の吸着性能が高いと推察される。

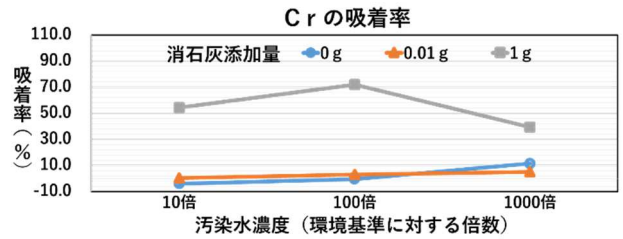


図6-1 Crの吸着性 (外部添加法)

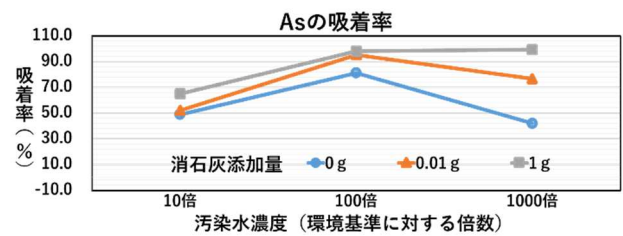


図6-2 Asの吸着性 (外部添加法)

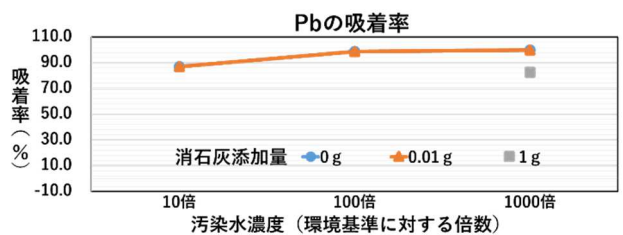


図6-3 Pbの吸着性 (外部添加法)

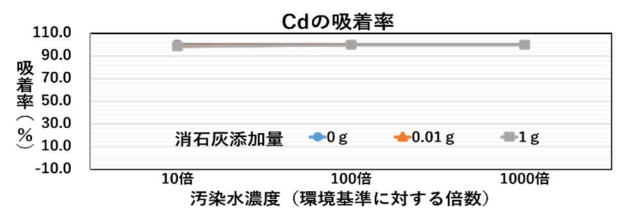


図6-4 Cdの吸着性 (外部添加法)

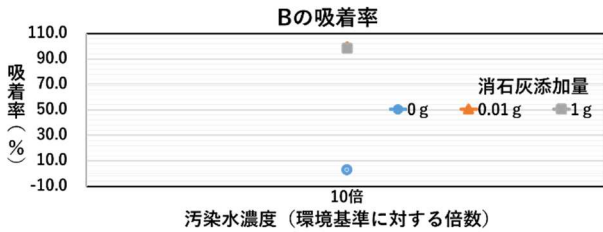


図6-5 Bの吸着性（外部添加法）

3. 2 重金属吸着安定性評価

重金属処理土壌の屋外暴露環境における安定性（溶出性）の評価として、pHに対する溶出性を評価した。その結果を表3に示す。PbとCdは、各濃度とも水洗ケーキへの吸着性が高く、酸・アルカリ共に溶出が少なかった。Hgでは、低濃度では高い吸着性を示し、酸・アルカリ共に溶出性が少ないことが判った。高濃度では、酸には強いが、アルカリで半分程度溶出することが判明した。AsとSeでは、共に低濃度での吸着性が高く、酸・アルカリ共に溶出性は低い。高濃度は共に吸着性は中程度であるが、酸アルカリの溶出性はSeの消石灰による溶出が半分程度となる以外は、比較的溶出性は低い結果となった。

また(2.1)で、塩酸による内部発生法と消石灰による外部添加法を検討した。この試験では内部発生法で最も低いpHは1.51（蒸留水への添加時）、外部添加法で最も高いpHは12.74（同）であり、より高い安定性を求める溶出試験Ⅱを超えたpHレベルでの試験である。この結果を加味すると、特にPb、Cdは、強力な酸性やアルカリ性においても、吸着性と安定性が極めて高いと考えられる。

表3 重金属吸着安定性（溶出性）

重金属類	酸・アルカリ	低濃度（環境基準の10倍）				高濃度（環境基準の1000倍）			
		重金属固定		酸・アルカリ溶出		重金属固定		酸・アルカリ溶出	
		汚染水濃度 (mg/L)	吸着率 (%)	溶出濃度 (mg/L)	保持率 (%)	汚染水濃度 (mg/L)	吸着率 (%)	溶出濃度 (mg/L)	保持率 (%)
Pb	硫酸	0.1	>99	<0.001	99.0	10	99.9	<0.001	100.0
	消石灰	0.1	>99	0.006	93.9	10	99.9	0.003	100.0
Cd	硫酸	0.1	>99	<0.001	99.0	10	100.0	0.002	100.0
	消石灰	0.1	>99	<0.001	99.0	10	100.0	0.001	100.0
Hg	硫酸	0.005	>90	<0.0005	88.9	0.5	86.2	0.019	95.6
	消石灰	0.005	>90	<0.0005	88.9	0.5	86.2	0.22	49.0
As	硫酸	0.1	96.0	0.002	97.9	10	45.0	1	77.8
	消石灰	0.1	96.0	0.001	99.0	10	45.0	0.2	95.6
Se	硫酸	0.1	79.0	0.005	93.7	10	62.0	1.5	75.8
	消石灰	0.1	79.0	0.030	62.0	10	62.0	3.2	48.4

*表中<と>は装置の最小分析限界で算出した。

4. まとめ

石灰業界において大量に副生する石灰水洗ケーキの用途開発のため、大量使用が可能な重金属溶出抑制剤（不溶化剤）への用途開発を目指した。本年度は、Caイオン制御による重金属吸着の向上と、重金属吸着後の安定性（溶出性）を評価した。その結果を下記に示す。

1) Caイオン制御

1-1) 内部発生法

酸（塩酸）添加で石灰水洗ケーキスラリーを一部溶解し、内部から発生するCaイオンを制御することで、重金属の吸着性向上を目指したが、水洗ケーキ自体の重金属吸着能力が高く、大きな効果はなかった。ただ強い酸性状態でも、特にPb、Cdについては、水洗ケーキ自体の重金属吸着能力が極めて高いことが判った。

1-2) 外部添加法

Ca源（消石灰）を石灰水洗ケーキスラリーに添加し、消石灰の溶解乖離によって、Caイオンを制御することで、重金属の吸着性向上を目指したが、B、Cr、Asで大きな向上が確認できた。一方Pb、Cdでは、向上はなかったが、元々水洗ケーキ自体の重金属吸着能力が高く、しかも高アルカリ状態でも水洗ケーキ自体の重金属吸着能力が極めて高いことが判った。

2) 重金属吸着安定性

吸着性が高かったPb、Cd、Hg、As、Seについて、酸・アルカリによる安定性（溶出性）を評価した。特にPb、Cd、で吸着性が高く、強い酸やアルカリにおいても溶出が少なく安定性が高いことが判明した。

【参考文献】

- 1) 藤田ら, 岐阜県産業技術センター報告 No. 13, pp4-7, 2019
- 2) 和田信一郎, 土壤環境ニュース, Vol. 60, 特別寄稿 不溶化にもっと科学を, 2009
- 3) GEPC 技術標準 : 硫酸添加溶出試験法・消石灰添加溶出試験法

プラスチック材料の品質向上技術の開発(第2報)

—リサイクルPE-PP材料の定量化手法の開発—

足立隆浩*、栗田貴明*、浅倉秀一**

Development of technology for improving the quality of plastic materials (II)
- Development of quantification method of recycled PE and PP blending material -
ADACHI Takahiro*, KURITA Takaaki* and ASAKURA Shuichi**

リサイクル材料の品質向上に寄与するために、昨年度に引き続きポリエチレン(PE)とポリプロピレン(PP)の含有率を簡便に定量化する測定手法の開発を行った。本報ではPPと直鎖状低密度ポリエチレン(LLDPE)および低密度ポリエチレン(LDPE)をそれぞれ混合した2成分または3成分からなるサンプルを作製し、示差走査熱量計(DSC)およびフーリエ変換赤外分光光度計(FT-IR)による混合物中のPE含有率の定量化を行った。その結果、これらのPE種の場合にも昨年度の高密度ポリエチレン(HDPE)と同様にDSCやIRによる簡便な定量手法が適用できることを示した。一方で、実際のリサイクル材は3種のPEが混合したさらに複雑な成分からなり、これらの定量化のためにはこれまでの成果を応用した手法が必要である。

1. はじめに

プラスチックをリサイクルするにあたり、多種多様なプラスチックを分別することや、分別できなかったプラスチック中の各成分の比率を定量化することは、リサイクル材の品質を評価する点において重要である。身の回りのプラスチックのうち多くの用途に使用されるポリエチレン(PE)およびポリプロピレン(PP)に関しては、比重がどちらも1以下であるが、他の大部分のプラスチックは比重が1以上であるため容易に分別できる。一方、PEとPPを分別することは困難であるが、これらが同じオレフィン系高分子であることから、PEとPPの混合材料をリサイクル材として用いる場合も多い。したがって、PE-PP混合材中の各成分の比率を定量化できれば、材料としての物性を推定でき、バージン材をどの程度加えるべきかの指標となる。この定量のための測定手法としては、現状は核磁気共鳴分光法(NMR)を用いているが、この手法は、混合材の凍結粉碎や溶解、分析後の高度な解析などが必要であり、コストもかかる。そこで、代替となる簡便で安価な手法が求められてきた。

当所では昨年度より、PE-PPの成分比率が既知である標準試料を作製し、示差走査熱量測定装置(DSC)およびフーリエ変換赤外分光光度計(FT-IR)を用いて、検量線を作成し、簡便な定量化手法の検討を始めた。昨年度は高密度ポリエチレン(HDPE)とPPの混合サンプルについて検討を行った。しかし、一般家庭から発生するポリエチレンごみはHDPE(シャンプー容器等)に限らず、低密度ポリエチレン(LDPE、ラップ類等)や直鎖状低密度ポリエチレン(LLDPE、レジ袋等)も存在するため、実際のリサイクル材中のPEはこれら3種のPEが混ざった状態で存在すると考えられる。そ

こで、本報ではLLDPEとLDPEや、これらの混合材についても同様の定量化手法が適用できるか検討を行った。また、株式会社岐阜リサイクルセンターより実際のリサイクル材を提供してもらい、これについても本手法により測定を行い、従来のNMR法で求めた値との比較を行った。

2. 実験

2.1 試料の作製

各測定で使用した成分比率既知のサンプルは、PEとPPのバージン材料を所定の割合に乾式で混合したものを、バッチ式混練機(Brabender製、PL2000)で190℃、30rpmにおいて30分間熔融混練して作製した。バージン材としては、HDPEにノバテック製HJ580を、LLDPEにノバテック製UJ580を、LDPEにノバテック製LJ803を、PPにサンアロマー製PM900Aを用いた。

2.1.1 NMRによる作製サンプルの測定

2.1で作製した混合サンプルを、従来のNMR法にて測定した。測定は、LLDPE:PP=50:50、LDPE:PP=20:80、LLDPE:HDPE:PP=10:40:50の割合で熔融混練し作製したサンプルに対し実施した。

2.2 DSCによる検量線の作成

DSC(TA Instruments製、DSC2500)を用い、サンプルの測定を行った。測定は熱履歴を一定とするために、最初に10℃/minで40℃から200℃まで昇温して熔融させた後、5℃/minで40℃まで冷却し、最後に5℃/minで再び200℃まで昇温した。得られたDSCチャートについてTA Instruments製のTRIOSソフトウェアを用いて解析を行い、2回目の昇温時に各サンプルのPEの融解に要した吸熱量(J/g)を測定した。

2.2.1 PE-PP 2成分混合試料の測定

前報で測定したHDPE-PP混合サンプルと同様に、LLDPE-PP、LDPE-PP混合サンプルについてもDSCによる測定を行った。混合サンプルの各PEとPPの重量

* 化学部

** 次世代技術部

比については、それぞれ PE:PP=10:90、20:80、30:70、40:60、50:50 の5種類とした。各サンプルについて5点測定を行い、各測定の吸熱量の平均値より得られた値を基に近似直線を引き、精度について調べた。

2. 2. 2 PE-PP 3成分混合試料の測定

HDPE-LLDPE-PP 混合サンプルについて DSC による測定を行った。サンプルの各成分の重量比は、それぞれ HDPE:LLDPE:PP=10:40:50、20:30:50、30:20:50、40:10:50 とした。各サンプルについて5点測定を行い、各測定の吸熱量の平均値より得られた値を基に近似直線を引き、精度について調べた。

2. 2. 3 リサイクル材の測定

岐阜リサイクルセンターより提供を受けた、廃棄物から再生されたリサイクル材3サンプルについて測定を行った。また、得られた吸熱量と、2.2.1により得られた LLDPE-PP および LDPE-PP に関する検量線と、前報において算出した HDPE-PP に関する下の (1) で表される検量線から、各サンプルにおいて PE が単一成分であったと仮定した場合の含有率を求めた。

$$\text{HDPE 含有率(\%)} \div 0.5278 \times \text{HDPE 吸熱量(J/g)} \cdots (1)$$

そして、NMR により別途測定した同一サンプルから得られた値と各式から概算された値を比較した。

2. 3 IR による検量線の作成

2.1 で作製したサンプルについて、FT-IR (日本分光製、FT/IR-6200) を用いて分析を行った。測定手法は、透過法を用いた。透過法においては赤外線がサンプル中を透過する必要があるため、角度可変スライサー (日本分光製、HW-1) を用いて、厚み約 10 μm の薄片状サンプルを作製した。サンプルはそれぞれの条件で5点作製し、測定を行った。

得られたスペクトルについて、PE 由来のピーク強度 (719 cm^{-1}) と PP 由来のピーク強度 (841 cm^{-1}) の強度比を算出し、検量線を作成した。

2. 3. 1 リサイクル材の PE 含有率の算出

リサイクル材 10 サンプル (岐阜リサイクルセンター提供) について、FT-IR を用いて透過測定を行った。提供されたサンプルは、主成分が PE、PP の粉末状サンプルであるため、170 $^{\circ}\text{C}$ で加熱し、ブロック状に成型した。その後、角度可変スライサーを用いて薄片状に加工し、測定サンプルとした。PE と PP の強度比を算出し、2.3 で作成した検量線をもとにリサイクル材の PE 含有率を算出した。測定は提供サンプル1つにつき5点測定し、解析にはその平均値を用いた。

3. 結果及び考察

3. 1 試料の作製

3. 1. 1 NMR 法による作製サンプルの測定

成分既知として混練により作製したサンプルを NMR 法により測定した。結果を表1に示す。

いずれのサンプルも誤差 2% 以内となった。また、PE 種による著しい測定の誤差はなかった。

表1 NMR 測定結果

測定サンプル	PE の含有量(%)	
	実際の混合量	NMR 測定結果
LLDPE-PP	50	48
LDPE-PP	20	19
LLDPE-HDPE-PP	50	50

3. 2 DSC による検量線の作成

3. 2. 1 PE-PP 2成分混合試料の測定

LLDPE-PP および LDPE-PP の2成分混合試料の DSC 測定結果を図1および図2に示す。ここで、図中の各点に添えられた数字は、(各 PE の吸熱量, 各 PE の含有率) を表す。なお、LLDPE の吸熱量については 110 $^{\circ}\text{C}$ から 128 $^{\circ}\text{C}$ の範囲を、LDPE の吸熱量については 100 $^{\circ}\text{C}$ から 111 $^{\circ}\text{C}$ の範囲を積分した値を用いた。どの場合も PE 量と PE の融解吸熱量の間に正の相関がみられた。

図1より、LLDPE-PP 混合サンプルについては

$$\text{LLDPE 含有率 (\%)} \div 2.5721 \times \text{LLDPE 吸熱量 (J/g)}$$

という検量線の式が得られた。この式の R 二乗値は 0.9915 であり、簡便な定量手法としては比較的精度が良いと思われる。

また図2より、LDPE-PP 混合サンプルの検量線は

$$\text{LDPE 含有率 (\%)} \div 3.403 \times \text{LDPE 吸熱量 (J/g)}$$

となり、R 二乗値は 0.9533 とやや精度が悪いものとなった。

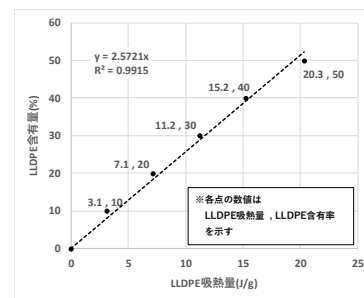


図1 LLDPE-PP 混合サンプルから得た検量線

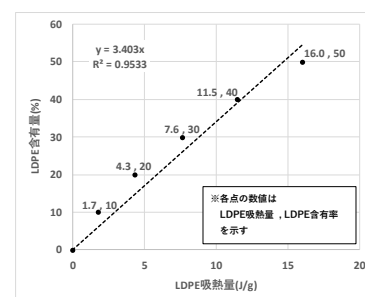


図2 LDPE-PP 混合サンプルから得た検量線

3. 2. 2 PE-PP 3成分混合試料の測定

HDPE-LLDPE-PP の3成分混合試料の DSC 測定した結果を図3に示す。ここでは、PE の融解ピークに関し100℃から138℃の範囲で積分した値を吸熱量とした。また図中の各点に PE の総吸熱量, HDPE の含有率(%)を表す。ここで LLDPE の含有率は50-HDPE の含有率(%)である。ここで得られる関係式からは、R 二乗値は0.9983 と比較的良好な相関となった。

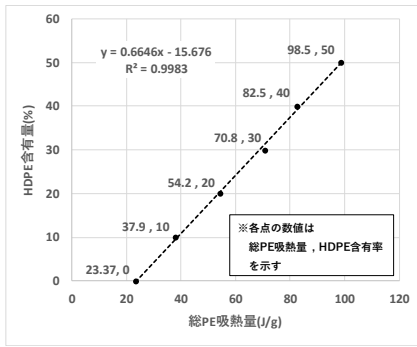


図3 3成分混合試料の吸熱量

3. 2. 3 リサイクル材の測定

岐阜リサイクルセンター提供の廃棄物から再生したリサイクル材を DSC 測定した結果を表2に示す。この表で「検量線による概算値」は、3.2.1において LLDPE-PP と LDPE-PP のそれぞれのサンプルに関して得られた検量線および前報で得られた HDPE-PP に関する(1)式を本測定の吸熱量に適用し、各サンプルがそれぞれのPE種のみ含むと仮定した場合に算出される概算値である。どれも NMR で別途測定された PE 含有率の値と大きく異なることから、いずれのリサイクル材中に含まれる PE も単一の種類ではなく、HDPE、LDPE や LLDPE が様々な割合で混合していると考えられる。これらはそれぞれ異なる自治体にて廃棄物として収集されたものからリサイクルされているため、地域により廃棄 PE 種には偏りがあることが推測される。

3. 3 IR による検量線の作成

3. 3. 1 LDPE-PP

2.1 で作製した LDPE と PP の混合サンプルについて、IR 測定結果を表3および図4に示す。図4より、検量線の R 二乗値が0.9897 となった。前報で報告したが、HDPE-PP の混練サンプルの検量線においては R 二乗値が0.9989 となっており、それに比べると検量線の精度は落ちている。これは、LDPE の枝分かれ構造が PP の構造と似ているため、PP のピーク強度に影響を及ぼしているためと考えられる。

表2 リサイクル材の測定結果

サンプル	PE 吸熱量 (J/g)	検量線による概算値 (%)	HDPE 式	NMR 結果 (%)
			LLDPE 式	
1	43.9		23.2	50
			113.0	
			149.5	
2	33.1		17.5	51
			85.2	
			112.7	
3	34.3		18.1	45
			88.3	
			116.9	

表3 混練サンプル (LDPE-PP) の透過法測定での PE 含有率依存性結果

PE 含有量 (wt%)	PE/PP
10	0.48387
20	0.784725
30	1.117037
40	1.494646
50	1.942954

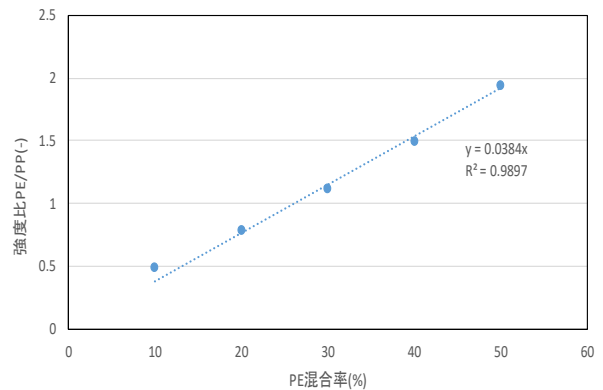


図4 PE/PP と PP 含有率の関係 (LDPE-PP)

3. 3. 2 LLDPE-PP

2.1 で作製した LLDPE と PP の混合サンプルについて、IR 測定結果を表4および図5に示す。図5より、検量線の R 二乗値が0.9574 となり、他の検量線に比べて精度が極端に落ちることが判明した。これは、LDPE の時と同様、LLDPE の枝分かれ構造が PP のピーク強度に大きく影響したためと考えられる。

表4 混練サンプル (LLDPE-PP) の透過法測定での PE 含有率依存性結果

PE 含有量 (wt%)	PE/PP
10	0.4222
20	0.874614
30	1.166875
40	1.520126
50	1.710857

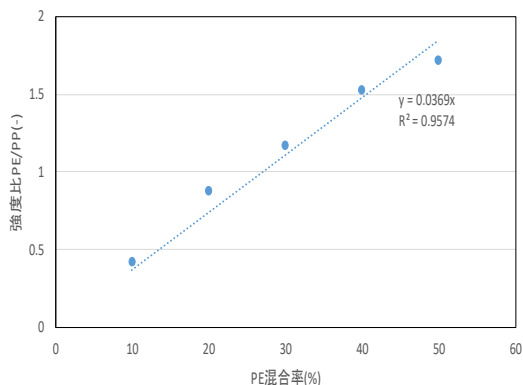


図5 PE/PP と PP 含有率の関係 (LLDPE-PP)

3. 3. 3 IR によるリサイクル材の PE 含有量算出

リサイクル材の 10 サンプルについて、PE/PP 値を算出した。HDPE-PP の系で作成した検量線を用いて PE 含有率をそれぞれ算出した結果を表 5 に示す。リサイクル材を別途 NMR で測定して求めた PE の含有率も示している。表 5 より、最小誤差 0.3%、最大誤差が 6.3% という結果が得られた。この誤差の違いの原因であるが、提供されたリサイクル材により HDPE や LLDPE、LDPE の含有率が違うことが結果に影響している可能性が高い。具体的には、LDPE と LLDPE に含まれる枝分かれ構造が、PE と PP のピーク強度に影響し、含有率のずれを引き起こしたと考えられる。本来、LDPE が多く含まれるリサイクル材では、LDPE の系で作成した検量線を用いるのが望ましいが、リサイクル材中の PE の種類について、割合を判別することは難しいため、検量線を使い分けるのは困難である。本研究では、一番精度の良かった検量線を用いて PE 含有率を算出しているが、今回の結果を踏まえ、今後、汎用的な検量線を作成する必要があると考える。

表5 リサイクル材の PE 含有率算出結果

	PE/PP 平均値	PE 含有率 (%)	NMR 結果 (%)	誤差 (%)
A	1.984	44.7	50	-5.3
B	2.082	46.9	51	-4.1
C	1.923	43.3	45	-1.7
D	2.199	49.5	47	2.5
E	2.269	51.1	57	-5.9
F	2.232	50.3	44	6.3
G	2.121	47.8	45	2.8
H	2.121	47.8	45	2.8
I	2.024	45.6	46	-0.4
J	1.94	43.7	44	-0.3

4. まとめ

LLDPE-PP および LDPE-PP 混合サンプル中 PE の含有量を簡便に定量化するための手法を DSC および IR により検討した。また、得られた結果を実際のリサイクル材の測定結果に適用し、従来法である NMR 法との比較を行った。

DSC 測定においては、LLDPE-PP 混合サンプルから得られた検量線は比較的精度がよく、LDPE-PP 混合サンプルから得られた検量線はやや精度が悪いものとなった。また、複数の PE 種が混合された PE-PP サンプルにおいても、PE の吸熱量については直線的な関係式が得られた。しかし、実際のリサイクル材の DSC による簡便な定量のためには単一 PE 種から求めた検量線のみでは不十分であることが確認された。今後は複数の PE 種混合サンプルに関して測定を進めていく予定である。

IR 測定においては、リサイクル材の PE 含有率を算出した結果、NMR 値と比較して最小誤差 0.3%、最大誤差が 6.3% という結果を得た。10%以上の誤差が現れたサンプルはなく、 $\pm 5\%$ での参考値としては、優位性のある結果が得られた。しかし、リサイクル材の組成に関しては地域性もあることから、どのリサイクル材にも適用できるような手法を開発することは今後の課題である。

【謝 辞】

本研究を実施するにあたり、リサイクル材料を提供いただきました株式会社岐阜リサイクルセンター様に心より御礼申し上げます。また本研究の一部は、公益財団法人遠藤斎治朗記念科学技術振興財団の研究助成金により実施しました。心より御礼申し上げます。

【参考文献】

- 1) 足立, 栗田, 浅倉, 岐阜県産業技術センター研究報告 No.13, pp10-13, 2019

セルロースナノファイバーを用いたマルチマテリアル化 (第1報)

浅倉秀一*

Multi-materialization using cellulose nanofiber (I)

ASAKURA Shuichi*

ポリプロピレン (PP) シート表面にアルミナを低温プロセスで成膜して、プラスチックとセラミックスのマルチマテリアル化を行った。PP 表面は表面自由エネルギーが低く、高い疎水性を示すため、水系のアルミナスラリーとは親和性が低く、コーティングすることは困難であった。しかしながら、PP シート表面に真空紫外 (VUV) 光を照射して親水化し、さらにセルロースナノファイバー (CNF) の水分散液をアルミナに加えた混合スラリーをコーティングした結果、CNF が形成するネットワークによってアルミナが捕捉され、CNF の親水基が PP シート表面の親水基と吸着することで、成膜が可能となった。また、アルミナ/CNF 混合スラリーをコーティングした後に、膜表面に再び VUV 光を照射すると密着性が大幅に向上し、PP を折り曲げても膜にクラックが起きない柔軟性も示した。摩擦試験を行った後に、摩擦痕を電子顕微鏡で観察したところ、コーティング後に VUV 光を照射していない膜は、剥離が起きており、所々PP が表面に現れている箇所があった。一方、VUV 光を膜に照射したものは、摩擦痕が明確に観察されたが、摩擦痕の底面には PP ではなくアルミナ/CNF 複合膜が存在していた。以上より、PP シートへの VUV 光照射は複合膜と PP 界面との密着性に寄与しており、成膜後の VUV 光照射は、さらに密着性が付与される他に膜の粘り強さが減り、硬くなっていると考えられる。

1. はじめに

マルチマテリアル化は、プラスチックとセラミックス、またはプラスチックと金属のような異なる材料を接合または複合化することで、材料物性の改善や、高強度化、軽量化などの実現を目指すものである。以前、プラスチックシートのポリイミドと銅箔の密着性向上に関する報告を行った¹⁾。その中では、銅箔表面に微細凹凸を作製することと、ポリイミドと親和性のある官能基を末端に持つシランカップリング剤で銅箔表面を化学修飾することで、物理的アンカーおよび化学的吸着によって、銅箔とポリイミドシートの高密着性を実現した。一方、ポリプロピレン(PP)は、容器包装から工業製品等様々な分野で使われているが、表面自由エネルギーが低く、表面の水滴接触角の値が大きい²⁾ため、コーティングや接着が困難な材料である。さらに、PP の融点は 100 ~ 200°C であるため、100°C以下の低温プロセスでの成膜技術と、強度、密着性、摩擦性等の膜特性を付与できなければ、マルチマテリアル化とは言えない。

これまで、セルロースナノファイバー(CNF)とセラミックスとの複合化について、報告してきた^{2,3)}。CNF は鋼鉄の 5 分の 1 の軽さで、5 倍以上の強度を持つ材料であるが、他の無機フィラーや炭素繊維等とは異なり、水に分散した状態で安定な材料である。従って、一般的に疎水性である石油からできたプラスチックと混ぜることは困難であるが、水スラリーを原料とするセラミックスとは容易に混ぜることができ、複合体や複合シートの形

成が可能であった。CNF は 200°Cを超えると熱分解されるため、100°C以下の低温で作製したところ、CNF が形成する 3 次元ネットワークによって焼結をしなくとも強度と靱性を持つセラミックスが作製できた。

金属へは、熱やプラズマによる CVD (化学気相蒸着) 法や、スパッタリングやイオンプレーティング等の PVD (物理気相蒸着) 法などの高温プロセスで、工具や部品等へ耐摩擦性のあるセラミックスが成膜されている。一方、PP では 100°C以下の低温プロセスで成膜しなければならず、そこではシートのような基板上でもクラックや剥離が起きず、折り曲げにも追従する柔軟性のある膜である必要がある。

本研究では、セラミックスとして、電子デバイスやバイオセラミックス用途など幅広い分野で使われているアルミナを用い、CNF とアルミナの混合スラリーを原料として、簡便な浸漬法と 100°C以下の乾燥プロセスによって成膜を行った。PP シート上に形成されたアルミナ/CNF 複合膜の緻密性や PP との密着性、耐摩擦性を評価した。

2. 実験

2.1 コーティング方法

CNF 水分散液は、CNF の固形分が約 1 wt%のもの (中越パルプ工業製、針葉樹林由来の超高解繊タイプ) を用いた。アルミナは (アドマテックス製アドマファイ) の平均粒径 600 nm のものを用いた。秤量したアルミナに対して、5 wt%の固形分になるように CNF 溶液を少しずつアルミナが入った容器に加えていき、薬さじ

* 次世代技術部

で攪拌しながらスラリーを調製した。PP シートは、約 15 mm×40 mm にカットしたのち、表面をエタノールでワイプした。続いて、真空紫外光露光装置（エヌ工房製、図 1）を用いて真空紫外（VUV、波長 $\lambda=172$ nm）光を 10^3 Pa 下で 30 分照射して PP 表面を親水化した。調製したスラリー溶液に親水化した PP シートを液面に垂直に 5 秒間浸漬させ、そのまま垂直に引き上げた。その後、40°Cの乾燥機中で図 2 のように乾燥させた。

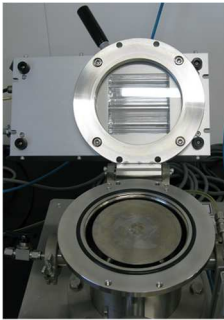


図 1 真空紫外光露光装置



図 2 コーティングした PP シートの乾燥方

2. 2 評価方法

親水化前後の PP シート表面の水滴接触角は、接触角計（協和界面科学製）を用いて、4 μ l の蒸留水を滴下させて測定した。成膜した PP シート上のアルミナ/CNF 複合膜は、走査型電子顕微鏡（SEM、日本電子製 JSM-IT100）を用いて、Pt/Pd をコーティングした後に観察した。複合膜の PP シートに対する密着性は、JIS K5600 のクロスカット法に準拠し、ガイド付きのスペーサーで格子パターンの各方向に 1 mm 間隔で切り込みを入れ、接着力が 10.7 N/25mm のテープを指でこすって接着させたのち、約 60° の角度で引きはがした。密着試験後の複合膜の状態は光学顕微鏡で写真撮影した。さらに耐摩耗性の評価は、まず複合膜を成膜した PP シートを、表面摩擦試験機（新東科学製トライボギア TYPE38 型）の走査台に両面テープで固定した。摩耗させる治具には 10 Φ の SUS304 ボールを用いて垂直荷重を 100 g、走査速度 100 mm/min、走査距離 15 mm とし、3600 秒間（215 往復）させて、摩擦抵抗力の変化を観察した。摩擦試験後の摩耗痕の様子は、SEM で観察した。

3. 結果及び考察

3. 1 アルミナ/CNF 複合膜の作製

PP シートの、親水化処理前後の水滴接触角を測定した結果を図 3 に示す。図 3(a)のように処理前の PP シートは疎水性であり、接触角は 104° を示した。続いて、VUV 光を 10^3 Pa 下で 30 分照射した結果、図 3(b)のように接触角は 60° まで低下した。これは、VUV 光の光子エネルギーが 697 kJ/mol に対して、PP や表面のコンタ

ミを構成する C-C（324 kJ/mol）や C-H（410 kJ/mol）などの結合エネルギーが小さいため、結合が弱められ、VUV 光によって発生した活性酸素と分子内の C や H が結合して H₂O や CO₂ の形で排出される。その結果、PP シート表面には、OH や COOH 等の親水基が形成されたために、接触角が低下したと考えられる⁴⁾。

次に、親水化した PP シートに、アルミナと CNF の混合スラリーをコーティングした。その結果、VUV 光が照射されない PP シートの裏面には図 4(a)のようにスラリーが弾いてコーティングされなかった。一方、CNF を含んでいないアルミナのみをスラリーを VUV 光照射

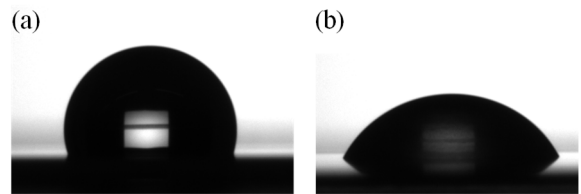


図 3 PP シート表面への VUV 光照射前後の水滴接触角 (a : 照射前、b : 照射後)

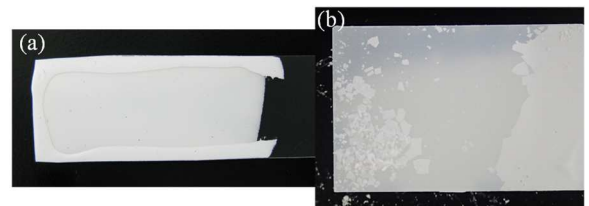


図 4 親水化無し(a)および CNF 無し(b)の場合の膜の観察結果

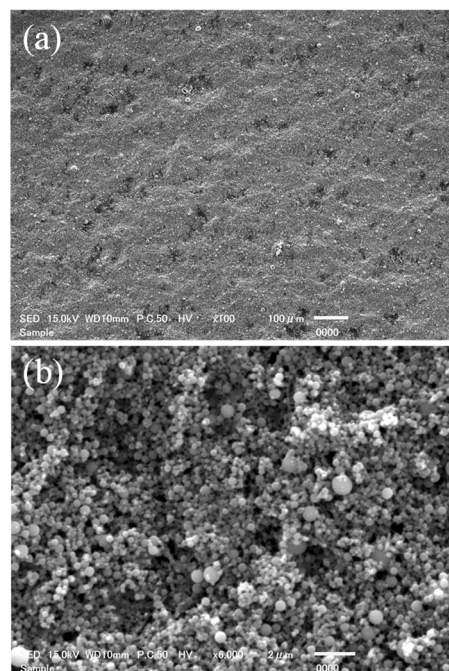


図 5 PP シートにコーティングした複合膜の SEM 画像 ; (a)100 倍、(b)6000 倍

後にコーティングして乾燥した結果、図 4(b)のように膜が剥がれ落ちた。以上のことより、PP 表面を親水化処理していない疎水性のままでは、アルミナと CNF の両方とも親和性がないため化学的吸着が起きていないことが言える。また、アルミナのみをスラリーを 40℃で乾燥しただけでは、アルミナ同士の結合もなく、PP の親水基とアルミナ粒子単独の接着となるため、接着力が弱く、簡単に剥がれ落ちたと思われる。一方スラリー中に CNF がある場合の複合膜は、乾燥後も剥がれない膜が形成された。この表面を SEM で観察した結果を図 5 に示す。これより複合膜にアルミナの凝集体もほとんどなく、均一で緻密な膜が形成されており、下地の PP が表面に現れている箇所はなかった。また、図 5(b)の拡大像より、アルミナが均一に分散し、その表面に CNF が絡みつくように網目構造のネットワークを形成しているのが確認できた。

3. 2 複合膜の密着性の評価

次に PP シート上の複合膜の密着性を評価した。アルミナ/CNF 複合膜をコーティングし乾燥したサンプルの、カッターによる切り込み後とテープによる引き剥がし試験後の写真を図 6 に示す。図 6(b)のように膜の 50%以上が剥がれており、密着性は良くなかった。そこで、本研究では、PP シートにスラリーをコーティングした後で、再び VUV 光を照射することで密着性を向上できるかど

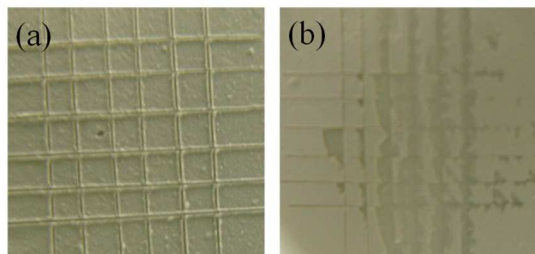


図 6 切り込み後(a)と、引き剥がし後(b)の写真

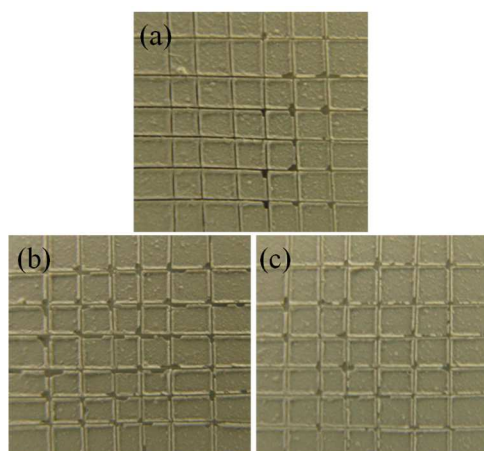


図 7 コーティング後、30 分後(a)、90 分後(b)、4 時間後(c)に大気圧下で VUV 光を照射した後に密着性試験を行った結果の写真

うか試した。コーティング後、40℃の乾燥機に 30 分間入れ、膜の半分以上がまだ濡れて乾燥していない状態で、VUV 光を照射した。VUV 光は空気中の酸素に吸収されるため、先述したように表面を親水化するためには、 10^3 Pa 程度の真空下で照射した方が、光と活性酸素の両方の効果で効率よく改質できる。しかしながら、真空引きをすると膜中に残存している水分が気化し、非常に荒れた表面になったため、大気圧雰囲気下で、VUV ランプとサンプルの距離を 5 mm 以下に近づけて照射した。またこの他、コーティング後 90 分乾燥し、濡れた部分がない状態になったものを同様に大気圧雰囲気以下で VUV 光を 30 分照射した。さらに比較として、コーティング後、40℃で 4 時間乾燥させたものにも同様に VUV 光を照射した。それぞれのサンプルについて密着性試験を行った結果を図 7(a) ~ (c)に示す。この結果、コーティング後に VUV 光を照射することで密着性が向上していた。特に図 7(a)のように、まだ表面が乾いていない状態で VUV 光を照射し、照射後もまだ濡れていたために、再び 40℃で乾燥させた後に密着性試験を行ったサンプルが、格子状の交差点が 15 か所程度剥がれているのみで、最も剥がれが少なかった。次に、図 6(b)と図 7(a)の膜が剥がれている箇所を SEM で観察した結果をそれぞれ図 8 および図 9 に示す。興味深いことに、どちらのサンプルも剥がれた箇所の底面には複合膜が大部分残っていた。このことは、PP 界面と複合膜の間で剥離が起きているのではなく、複合膜間で剥がれているものがほとんどであることを示している。従って、PP 界面と複合膜との密着性には、事前の PP シートへの VUV 光による親水化が効いていることは明らかだが、コーティング後の VUV 光照射は、膜自体が凝集破壊しにくくなるこ

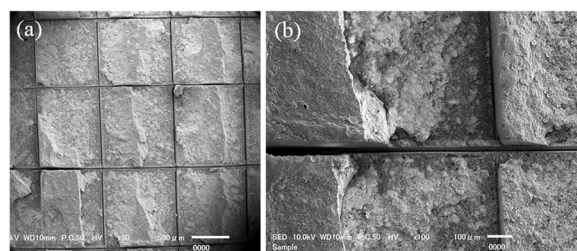


図 8 図 6(b)のサンプルの SEM 写真および剥離箇所の拡大像

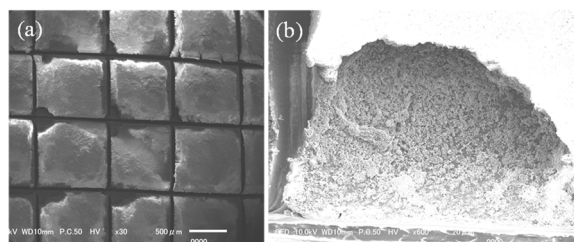


図 9 図 7(a)のサンプルの SEM 写真および剥離箇所の拡大像

とに貢献していると言える。ポリマー膜ならば VUV 光の照射によって架橋が起き、膜が硬化することはあったが⁵⁾、本研究での複合膜は、アルミナと CNF しか存在しない。VUV 光によってアルミナおよび CNF 表面へ親水基が付与され、化学吸着点が増加することによる膜の補強は考えられるが、それ以外に CNF へ及ぼす VUV 光の効果については、今後調べる必要がある。また、既報の CNF によって靱性のある曲がるセラミックスが作製されたように⁶⁾、本研究でも膜中に形成されている CNF のネットワークによって、PP シートを折り曲げても複合膜にクラックが入らない柔軟性が実現できた。

3. 3 複合膜の耐摩耗性の評価

次に、複合膜の耐摩耗性を評価した。コーティング後乾燥のみのサンプルと、コーティング後 30 分乾燥させた後に VUV 光を照射したサンプルを測定した。図 10(a)と(b)の摩擦力の経時変化を見ると、どちらも大きく増加することはなかったが、図 10(a)の、VUV 光を再照射しなかったサンプルの方がわずかに摩擦力の幅が小さい結果となった。どちらも膜表面には摩耗痕が見られたため、SEM で摩擦試験後のサンプルを観察した。図 11(a)より、VUV 光を再照射していないサンプルでは剥離した膜が表面に残っており、図 11(b)のコーティング後に VUV 光を照射したサンプルでは、膜が摩耗され完全に除去されているように見える。しかしながら、それぞれのサンプルの摩耗痕の領域の中で、膜が除去されていると思われる箇所を拡大したところ、図 11(c)では、アルミナ粒子が無く下地の PP が見えている箇所があったのに対し、図 11(d)では底面部にはアルミナが存在し、下地の PP が見えている箇所はなかった。これも、VUV 光による密着性向上が起因していると言える。また、図 11(a)と(b)の摩耗痕の形状の違いは、膜の強度・硬度が異なることが原因と考えられる。VUV 光は、膜を透過して PP 表面にも照射されていると思われるため、PP に

も硬化が起きている可能性がある。膜や PP に硬化が起きますと、摩擦する際に発生するせん断応力が大きくなるため摩耗しやすく、逆に VUV 光を再照射していない柔らかい膜の方がせん断応力が小さく、変形しやすいためになかなか剥がれなかったと考えると結果と一致する。

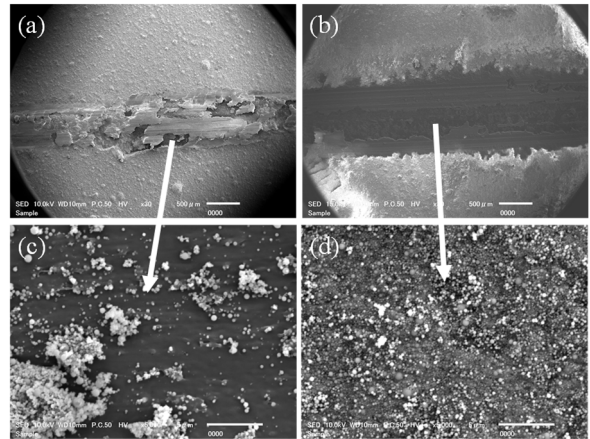


図 1 1 コーティング後の VUV 光照射無し(a)と(c)、再照射有り(b)と(d)の摩擦試験後の SEM 画像

4. まとめ

PP シート表面にアルミナを成膜することでマルチマテリアル化を試みた。PP 表面を VUV 光で親水化処理し、アルミナと CNF 水分散液から成る混合スラリーをコーティングした後、再び VUV 光を複合膜表面へ照射した。その結果、CNF の親水性とネットワークによって高い密着性と柔軟性のある複合膜が得られた。また、摩擦試験後の摩耗痕を観察した結果、コーティング後に VUV 光を再照射した膜の方が、摩耗量が大きく、摩耗粉として除去されていた。これは、VUV 光の照射によって複合膜や PP が硬化し、膜に働くせん断応力が大きくなったことが原因と考えられる。しかしながら、摩耗痕の底面部には複合膜が残っており、VUV 光照射による界面部の密着性の向上は確認できた。今後は、CNF の種類や配合を変え、さらに VUV 光の照射が CNF および膜に与える影響を解明することで、密着性や柔軟性以外に耐摩耗性も付与することが課題である。

【参考文献】

- 1) 浅倉秀一, 岐阜県産業技術センター研究報告 No.4, pp1-4, 2010
- 2) 浅倉秀一, 岐阜県産業技術センター研究報告 No.12, pp1-5, 2018
- 3) 浅倉秀一, 成形加工 Vol.30, No.6, pp243-245, 2018
- 4) 杉村博之, 表面技術 Vol.63, No.12, pp751-758, 2012
- 5) Shuichi Asakura *et al*, Thin Solid Films Vol.500, pp237240, 2006
- 6) 浅倉秀一, 成形加工(年次大会) Vol.29th, pp67-68, 2018

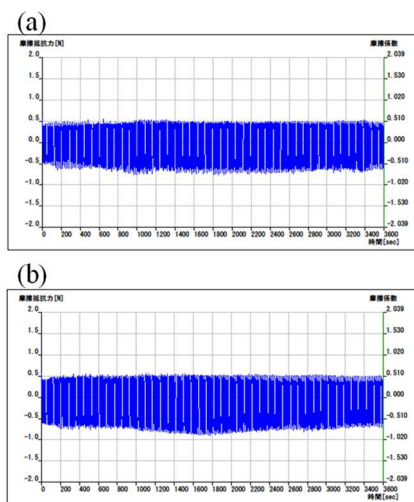


図 1 0 コーティング後の VUV 光照射無し(a)および照射有り(b)の摩擦試験結果

纖維・紙

GIFU ブランド繊維製品の開発（第1報）

林浩司*、山内寿美*、佐藤幸泰*、立川英治*、亀山遼一*、山口穂高†

Development of GIFU Brand Textiles (I)

HAYASHI Koji*, YAMANOUCI Hisami*, SATO Yukiyasu*, TACHIKAWA Eiji*, KAMEYAMA Ryoichi* and YAMAGUCHI Hodaka†

起毛工程で生地から脱落し廃棄されている繊維（ウール）に着目し、マニラ麻にウールを配合したスラリーの抄紙性、紙の特性を評価した。ウールの混率が増加するとともに、紙の強度は低下したが、かさ高な紙が得られ、透気性は向上し、柔らかくなることが分かった。さらに、紙糸は引張伸度が極めて低く編成性に課題があるため、紙糸に伸度を付与する検討を行った。その結果、伸縮性の複合繊維を紙糸に撚糸することで、紙糸の伸度 3.3% に対し、伸度 14.7%の糸が得られることが分かった。

1. はじめに

紙糸は、平成 26 年に本美濃紙の技術がユネスコ無形文化遺産に登録されたのを機に、繊維関連企業や国内外の消費者に注目されている¹⁾。紙糸は、主にマニラ麻を原料とした紙糸用原紙を細幅にスリット後、撚糸することで作製され、サスティナブルな素材として注目されている。高い吸水性・吸湿性を有し、毛羽が少なく、軽量感があり、清涼感がある素材として関心を集めている²⁾。岐阜県でも、「美濃機械すき和紙」を使用した紙糸繊維製品の製造販売に取り組んでいる企業は多い。

一方、羽島市を中心とした県南部地域は、愛知県北西部地域とともに日本有数の毛織物の産地を形成している。毛織物の製造工程では、生地表面の毛羽をかき出し、毛羽立たせる「起毛加工」が多く行われており、この加工は生地の外観、風合い、保温性などの生地特性を決定する重要な工程となっている。この加工では、短繊維が生地から脱落するが、現状、有料で廃棄されている。本研究ではこの素材に着目し、紙糸原紙を抄紙する際に脱落繊維をマニラ麻にブレンドすることで、脱落繊維の特性を付与した紙糸繊維製品の開発を検討した。本年度は、脱落繊維をマニラ麻に混抄する条件の検討と作製した紙の特性について調査を行った。

また、紙糸は上述のとおり優れた特性を持つ繊維であるが、一方で、紡績糸のように繊維間に滑りが無いため伸度が低いという課題を持つ。ほぼ同じ番手の綿糸と比較した場合半分程度しか伸度が無い。そのため、編地作製時に糸が編針の動きに追従しきれず糸が切れたり、編成速度を上げられず生地の生産性が低いといった課題がある。そこで、紙糸に伸度を付与する検討を行った。一般に糸に伸度を付与する手法として、ポリウレタン弾性繊維（以下 PU 繊維と略記）と撚糸する方法や、ポリエ

ステル仮撚り加工糸などの伸縮性加工糸と撚糸する方法がある³⁾。PU 繊維を利用する方法は、高伸度の糸が得られやすい反面、染色性、染色堅ろう度の面で課題がある。一方、伸縮性加工糸を用いる方法は、得られる伸度は低いものの染色可能で染色堅ろう度も優れている。本検討では、伸縮性加工糸と撚糸する方法について、一般の仮撚り加工糸に加え、高伸度の物性が期待される複合繊維との撚糸を試みた。

2. 実験

2. 1 マニラ麻／ウール混抄実験と評価

2. 1. 1 抄紙原料

マニラ麻は、ナイアガラビーター（熊谷理機工業（株））を用いて、パルプを叩解し CSF420ml とした。起毛時に生地から脱落した繊維は、企業から色別に提供された 2 種（黒、茶）をそのまま使用した。この脱落繊維は、企業からの情報提供、及び JIS L 1030-2 による繊維混用率試験（顕微鏡法、及び溶解法）の結果、いずれもほぼウールであった（以下ウール黒、及びウール茶と略記）。

2. 1. 2 マニラ麻／ウール紙の作製

マニラ麻、ウール混合スラリーに製紙薬剤を添加し、タッピスタンダードシートマシン (200mm×250mm) により目標坪量 20g/m² で抄紙した。脱水した後、115℃でプレス乾燥を行い成紙とした（以下タッピ紙と略記）。この結果をもとに、企業の協力で、紙糸用のマニラ麻／ウール混抄連続紙を機械抄紙（円網 1 層抄き）し成紙とした（以下機械連続紙と略記）。

2. 1. 3 物性評価

ウールの繊維長は、光学顕微鏡を使用し 140 本以上について評価した。引張強伸度は JIS P 8113、厚さは JIS P 8118、透気抵抗度は JIS P 8117 に準拠して評価した。曲げ特性は、純曲げ試験機（カトーテック（株）、KES-FB2）により評価した。

* 繊維・紙業部

† 岐阜県生活技術研究所

2. 2 伸縮性加工糸との撚糸による紙糸への伸縮性付与と評価

2. 2. 1 原糸

紙糸は、マニラ麻を 100%原料とした坪量 13.5g/m²の紙糸用原紙を、スリット幅 2mm、より方向 S、より数 500/m で撚糸されたものを使用した。この紙糸用原紙は、美濃和紙ブランド協同組合の基準をクリアした、「美濃機械すき和紙」である。図 1 に紙糸の断面写真を示す。糸中央部は空洞になっている様子が確認できる。伸縮性加工糸は、56T-24F のポリエステル仮撚り加工糸（以下ポリエステル加工糸と略記）、56T-17F のナイロン仮撚り加工糸（以下ナイロン加工糸と略記）、及び 56T-24F の複合繊維（以下複合繊維と略記）を使用した。

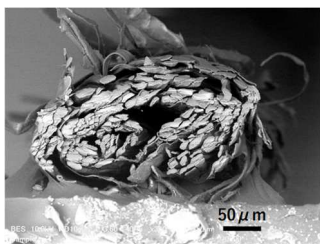


図 1 紙糸の断面写真

2. 2. 2 撚糸試験

撚糸条件を求めるため、リング式卓上撚糸機（圓井繊維機械（株）、AMT-25）を使用し、紙糸と伸縮性加工糸を糸送り速度 3m/min、スピンドル回転数 1,200～3,000rpm で撚糸した。卓上撚糸機で得られた結果をもとに、ダブルツイスター式撚糸機を使用し紙糸と伸縮性加工糸を撚糸した。撚糸後 90℃で撚り止めを行い、必要に応じ乾熱処理を行った。

2. 2. 3 物性評価

引張強伸度は JIS L 1096 に準拠して評価した。伸縮性（伸縮伸長率、伸縮弾性率）は JIS L 1013 に準拠して評価した。ただし、伸長時の荷重は 1N とした。伸縮伸長率は大きいほど伸びやすいことを示し、伸縮弾性率が大きいほど、伸長した繊維が元の長さに戻りやすいことを表す。

3. 結果及び考察

3. 1 マニラ麻／ウール混抄

3. 1. 1 抄紙原料

ウール黒の繊維長分布を図 2 に示す。平均繊維長は 3.2mm で、最大 29.0mm、最小 0.18mm であり、99%以上が繊維長 7mm 以下であった。抄紙原料として適したマニラ麻の繊維長は 3～10mm である。ウール黒の繊維長はマニラ麻と近く、抄紙に適した繊維長を有していた。また、ウール黒の繊維表面を電子顕微鏡で観察すると、繊維表面にはスケールが観察された。提供された繊維は防縮加工は行われていないようであった。ウール茶も同様の傾向を示していた。

3. 1. 2 マニラ麻／ウールタッピ紙の作製

マニラ麻にウール黒を 10～50%ブレンドしてタッピ紙を作製した。その結果、ウールの混率増加とともに、ウールの分散不良が認められるようになった。図 3 に引張強度を示す。混率増加とともに強度は低下した。これは分散不良に起因する他、紙の強度は主にフィブリル化したマニラ麻パルプ間の水素結合により発現するが、ウールはマニラ麻との水素結合が期待できないためと考えられる。ウールを脱スケール処理などして親水化することで、分散性が向上し強度低下も抑えられると思われる。一方、混率増加とともにタッピ紙は厚くなり、その結果密度は低下した。結果を図 4 に示す。ウールは捲縮（クリンプ）を有するため、かさ高な紙が得られたと考えられる。図 5 に透気抵抗度を示す。透気抵抗度は混率増加とともに大きく減少した。図 6 に曲げ剛性を示す。混率増加とともに柔らかくなることが分かった。これらの結果は、主にかさ高性向上に起因すると考えられる。ウール茶を混抄した場合も同様の傾向が認められた。

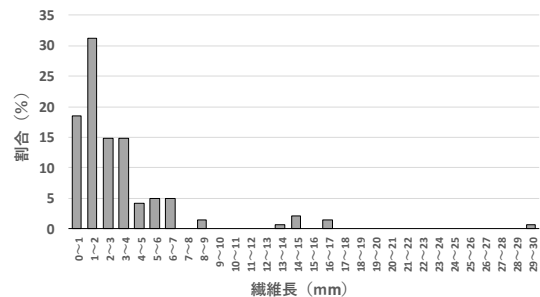


図 2 ウール黒の繊維長分布

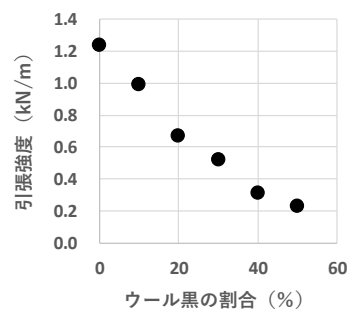


図 3 タッピ紙の引張強度

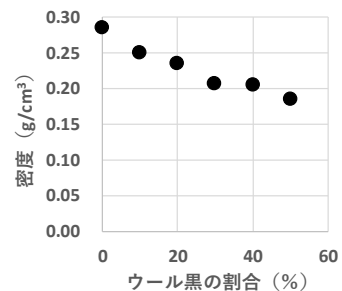


図 4 タッピ紙の密度

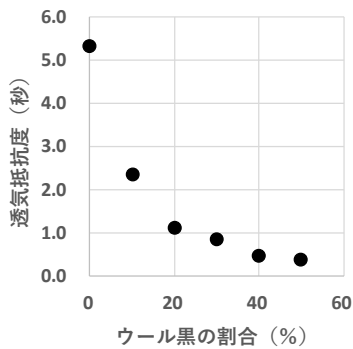


図5 タッピ紙の透気抵抗度

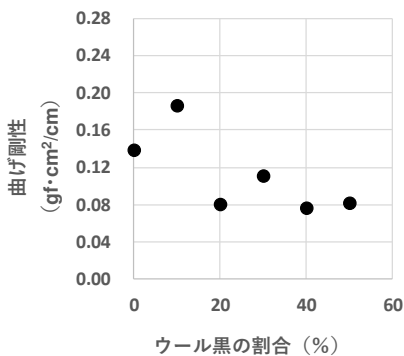


図6 タッピ紙の曲げ剛性

3. 1. 3 マニラ麻/ウール機械連続紙の作製

紙糸用原紙の引張強度は、切断可能なスリット幅、糸の番手に影響する。引張強度が大きいほど細幅のスリットが可能であり、その結果細番手の紙糸が得られる。現在、市販されている紙糸は 2mm 幅スリットが多い。撚糸して糸にすると毛番手でおおよそ 35 番程度となり、糸としての汎用性が高い。そこで、マニラ麻/ウールについても 2mm スリットを目標とし、図 3 を参考に機械連続紙におけるウールの混率を決定した。つまり、現状マニラ麻 100%の紙で 1mm スリットが可能であることから、マニラ麻/ウールで 2mm スリットを達成するには、おおよそ、マニラ麻 100%の半分程度の強度が必要と考えられる。その結果、ウールの混率は最大 20%が妥当と考えられた。

本年度は、まずはマニラ麻/ウール混抄の機械連続紙を得ることを第一に考え、企業の協力により、ウール黒を 10%の混率でマニラ麻にブレンドし機械抄紙を行った。その結果、タッピ紙では問題にならなかったが、抄紙初期に、起毛工程で混入したと思われる非繊維の異物が散見された。これはスラリーの攪拌時間を延長することで減少する傾向が認められた。機械抄紙はタッピ抄紙ほど繊維、非繊維の分散が行われなかった。機械連続紙の引張強度、密度を図 7、8 に示す。機械連続紙は繊維が縦方向に配向しているため、縦方向の強度は横方向よ

り強い。縦方向の強度はウールを 10%混抄することで、2.64kN/m から 2.21kN/m へと 84%に低下した。この程度の強度減少であれば 2mm 幅スリットも可能と考えられる。一方、横方向の強度はほとんど低下は認められなかった。密度に関しては、既存の紙糸用原紙の密度 0.525g/cm³ に対し 0.422g/cm³ と低下し、かさ高な紙が得られた。軽量感のある紙糸が得られると期待される。来年度、スリット幅、撚糸条件を精査し、生地作製後、強伸度、軽量感、通気性など特性を評価し、ウール素材混抄による効果を明らかにしていく。

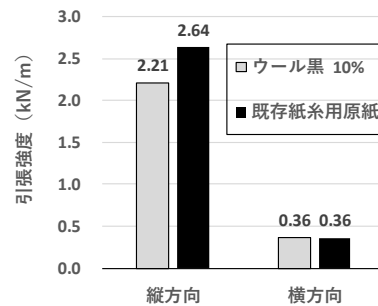


図7 機械連続紙の引張強度

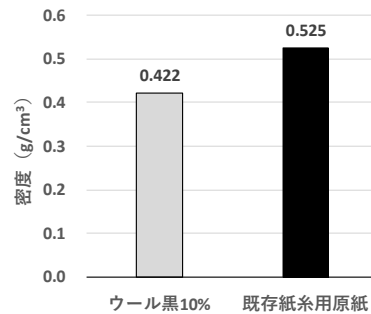


図8 機械連続紙の密度

3. 2 撚糸による紙糸への伸縮性付与

始めに、撚糸条件を求めるため、卓上撚糸機を使用し、紙糸とポリエステル加工糸をより方向、より数を変化させて撚糸した。図 9 に引張強度を示す。2.2.1 に記載のとおり紙糸は S 撚り（下撚り）である。ポリエステル加工糸との撚り（上撚り）において、より方向 Z でより数を増やしていくと糸の強度は向上した。一方、より方向 S でより数を増やした場合は、紙糸は追撚方向となり、過度な撚りが加えられたために強度が低下したと考えられる。強度及び糸の外観から、Z750/m が適した撚糸条件と考えられ以下検討を行った。

表 1 に、紙糸とポリエステル加工糸、ナイロン加工糸、複合繊維を Z750/m で撚糸した糸、及び紙糸原糸の強伸度を示す。複合繊維と撚糸した糸については、撚糸後、複合繊維の熱収縮応力が最大となる温度で熱処理を行った結果も示す。紙糸/複合繊維の混用率は 84/16 であった。その結果、紙糸が伸度 3.3%であったのに対し、ポ

ポリエステル加工糸、ナイロン加工糸、複合繊維と撚糸することで伸度 10%程度の糸が得られ、複合繊維と撚糸しその後熱処理することで 14.7%の高伸度の糸が得られることが分かった。図 10 に強度-伸び曲線を示す。複合糸と撚糸し熱処理を行うことで、ヤング率が低くなっており、低張力で伸びが大きい糸が得られることが明らかとなった。図 11、12 に伸縮伸長率、伸縮弾性率を示す。熱処理を行うことで、伸長しやすく元に戻りやすい糸が得られることが分かった（ポリエステル加工糸と撚糸したものは、ナイロン加工糸を用いたものと同様の結果が得られると予想されたため、評価は行わなかった）。今後は、糸の編成性、作製した生地ストレッチ性について評価を行う。

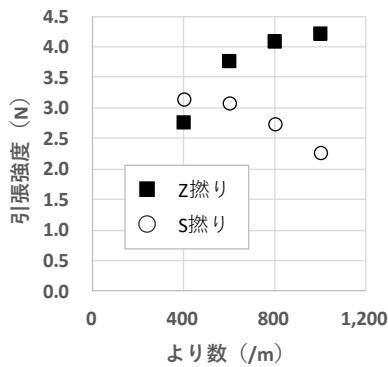


図9 撚糸条件と引張強度

表1 撚糸した糸の強伸度

伸縮性加工糸の種類	織度 (dtex)	強度 (N)	伸度 (%)
1 ポリエステル加工糸	367	4.2	9.1
2 ナイロン加工糸	386	3.7	10.5
3 複合繊維	372	3.8	9.4
4 複合繊維 (熱処理)	372	3.8	14.7
5 (比較対照) 紙糸	294	2.7	3.3

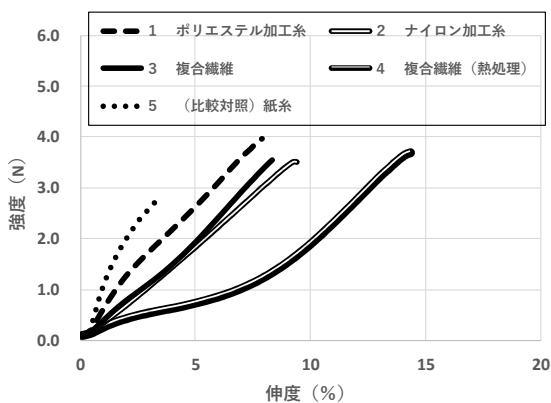


図10 撚糸した糸の強度-伸び曲線

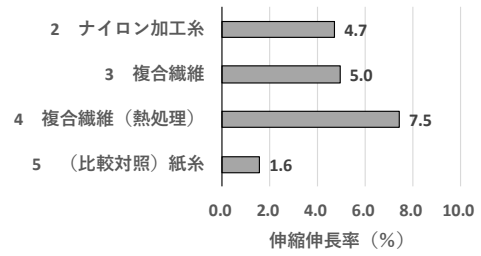


図11 撚糸した糸の伸縮伸長率

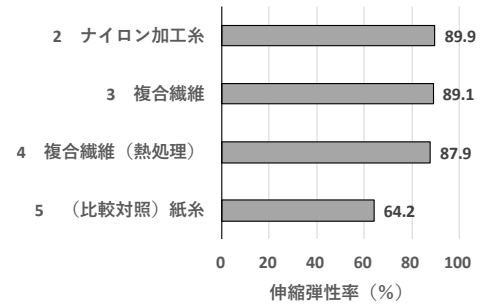


図12 撚糸した糸の伸縮弾性率

4. まとめ

本研究では次の2点について検討した。
起毛工程で生地から脱落し廃棄されているウール素材に着目し、マニラ麻にウールをブレンドした場合の抄紙性、紙の特性を評価した。その結果、ウールの混率が增加するとともに、紙の強度は低下したが、かさ高な紙が得られ、透気性は向上し、柔らかくなることが分かった。これらはウールの捲縮（クリンプ）に起因するものと考えられた。今後、機械連続紙をスリット、撚糸して糸、生地を作製し、ウール素材の特性を生かした紙糸繊維製品の開発を進める。

紙糸は引張伸度が極めて低く、編成性に課題があるため、紙糸に伸度を付与する検討を行った。その結果、伸縮性の複合繊維を紙糸に撚糸することで、紙糸の伸度 3.3%に対し、伸度 14.7%と高伸度の糸が得られることが分かった。今後、編成性向上と、生地ストレッチ性他について評価を進める。

【謝 辞】

起毛脱落繊維を提供していただきました、羽島起毛(有)様、機械連続抄紙についてご協力いただきました、大福製紙(株)様に感謝申し上げます。

【参考文献】

- 1) 辻本, 紙パテ技協誌, Vol.69, No.8, P.871, 2015
- 2) 山田, 繊維製品消費科学, Vol.43, No.6, P.344, 2002
- 3) 杉山, 繊維と工業, Vol.60, No.6, P.327, 2004

軽量・高保温性繊維素材の開発（第5報）

中島孝康*、立川英治*、林浩司*

Development of fiber material having lightweight and excellent heat-retaining property (V)

NAKASHIMA Takayasu*, TACHIKAWA Eiji* and HAYASHI Koji*

中わた用途として羽毛の代替となるような軽量・高保温性素材の開発を目指して、短繊維の絡まった構造体（わた）を試作した。これまでの試作でかさ高性、保温性、分離性についてある程度良好なわたができたことを報告してきたが、さらに改良を試みた。その結果、かさ高性や「圧縮に対する抵抗性」が向上し、分離性は悪化の方向にあるが水準によってはある程度保持でき、製品形態にした時の保温性については水準によっては向上した。総合的に見て、試行した改良方法は性能向上に有効な方法であることが分かった。

1. はじめに

軽量・かさ高な高保温性素材として代表的なものに羽毛がある。羽毛は天然の防寒素材として非常に優れており、衣類・寝具の「中わた」としてよく利用されている。しかし、近年、供給不足で価格が高騰することがあり、代替品ニーズが強い。そこで当所でも羽毛の代替となるような軽量で保温性の高い素材の開発を目指すこととし、開発を始めた。

布団や衣類の中わたの構造は、連続か、独立かという点で大きく2種類に分かれる。羽毛のような独立構造体のほうが連続体に比べて一般的に人体の形状に馴染みがよく、保温の点でメリットがある。こうしたことから当所では、羽毛代替として短繊維群を絡ませて独立構造体とする方法で開発を進めてきた。

これまでに第1報¹⁾で、原料の短繊維タイプの違いで球状やひも状の独立構造体を作製できることや、それらについてかさ高性や保温性がある程度あること、第2報²⁾で、特定の方法でさらに保温性向上が可能であることを報告してきた。

ただ、試作したわたは独立構造とはいうものの、わた同士がお互いに離れにくいものであった。わた同士の分離性が悪いと、ジャケットや布団などの製品を製造する際に、生地上にわたを広げたり、または袋状にした部分にわたを吹き込むといった作業がうまくいかない場合がある。これが生産効率の低下につながり、実用化にあたってはネックとなる。この点について第3報³⁾で分離性が改善できたことを報告した。ただ、かさ高性が低くなってしまったためさらに改善を検討し、第4報⁴⁾ではかさ高性と分離性がある程度両立するわたを作製できたことを報告した。これについてさらにかさ高性等の性能を向上させるべく検討を行った。また、これまで実施してこなかったわたの圧縮性や、製品として利用する場合を

想定して側生地に包んだ形態にした場合の評価を行ったので報告する。

2. 実験

2.1 わたの試作

第4報までと同様に短繊維群を相互に絡ませる方法でわたを作製した。第4報にて報告したひも状の試作わたについて、企業の評価では第4報中「D-2」と記載したものの評価が最も高く、これについて改良を検討することとした。同様の方法で水準を変えて3水準について検討し、本報告中では条件「D-2_改良品 1~3」と示した。

2.2 評価

2.2.1 評価試料

D-2とその改良品3種のほか、比較のため下記の試料について評価を行った。

- ・ 試作球状わた
これまで試作してきたわたの中で、分離性に難があるもののかさ高性が良好な球状のわた。
- ・ 羽毛
市販羽毛布団（ダウン混率 50%）から採取した。ただし、「分離性」については、ダック羽毛・ダウン混率 90%のものを利用した。
- ・ 市販合繊布団わた

合成繊維わたが入った市販布団から採取した。羽毛代替を意識していると思われる市販品であるが、中わたは羽毛のような独立構造ではなく大きな塊状であった。各種評価には塊状のものをほぐしたものをを用いた。また独立構造でないため分離性については対象外とした。

2.2.2 わた自体の評価

2.2.2.1 かさ高性

第4報までと同じく「JIS L 1903:2011 羽毛試験方法」の荷重用円盤B（直径 285 mm、総重量 94.3 g）を用いる方法を準用した。スチーム処理は実施せずに試験に供した。

* 繊維・紙業部

2.2.2.2 分離性

第3、4報と同様、樹脂製の容器中でわたを落下させ、落下先のメッシュ（フィラメントで構成）を通過する割合で評価した。第4報までは、容器にわたを入れてそのまま実施していたが、入れ方が結果に影響することが懸念されたので、試作わたについては容器に入れた後、容器中で5回反転させた後に試験を実施した。

2.2.2.3 圧縮性

わたを圧縮した時の回復性等の挙動を評価するため、万能試験機（（株）島津製作所製、オートグラフ AGS-J）を用いて、わたの圧縮と回復を繰り返した。わた1gを内径80mmの樹脂製円柱容器中に入れ、直径75mmの円形加圧盤で圧縮した。圧縮・回復速度1mm/秒、最大圧力10.5g/cm²に設定して11サイクル実施した。

2.2.3 座布団形状での評価

2.2.3.1 評価用試料

わたをダウンジャケットなどに使用することを想定して、それに近い形態として2枚の側生地間にわたが挟まれた約40cm四方の座布団形状の試料を作製した。10cm四方ごとにキルティングし、経緯4マス、計16マスできるようにした。各マスにわたを1gずつ入れ、試料全体で合計16gのわたを使用した。

2.2.3.2 厚さ

万能試験機（（株）島津製作所製、オートグラフ AGS-J）を用いた。直径200mmの円形加圧盤を用い、速度1mm/秒で圧縮し、圧力0.5g/cm²の時の厚さを測定した。

2.2.3.3 保温性

「JIS L 1096:2010 織物及び編物の生地試験方法」の保温性A法（恒温法）を準用した。保温性試験機（恒温法）（（株）大栄科学精器製作所製、ASTM-100B）を用いた。

3. 結果及び考察

3.1 わた自体の評価

3.1.1 かさ高性

かさ高性の結果を図1に示した。改良品は3種類とも非常に高いかさ高性を示した。開発開始以降これまでに試作してきた中でも最も高いレベルで、今回試した改良方法はかさ高性の向上に有効であることが分かった。

3.1.2 分離性

分離性の結果を図2に示した。全体的に改良品は悪化傾向で、改良品のうち「2」、「3」はかなり分離性が悪かった。「1」は従来のD-2と同程度の結果で、分離性の面からは「1」が有望と思われた。

3.1.3 圧縮性

圧縮運動時の圧力0.5g/cm²での試料厚さを図3に、最大圧力（約10.5g/cm²）での厚さを図4に示した。低圧力（0.5g/cm²）時、厚さについて1サイクル目と2サイクル目の違いは大きいですがそれから徐々に安定した。2

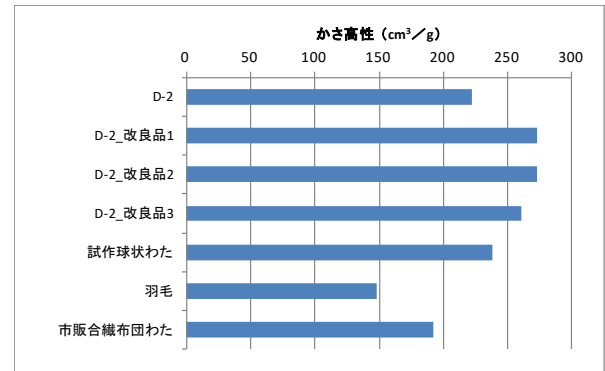


図1 かさ高性

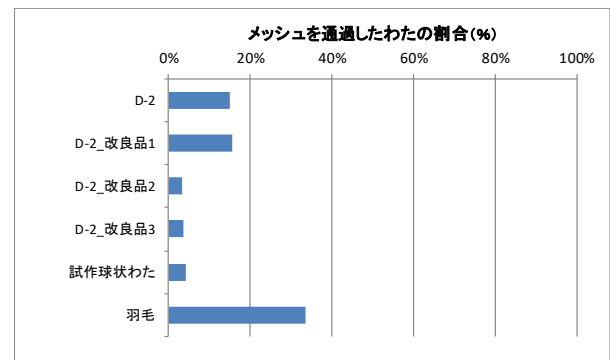


図2 分離性

サイクル目以降、従来品のD-2や羽毛、市販合繊布団わたはかさ高性が小さいが、改良品においてはこれらよりかさ高く良好な結果となった。ただ、最も良い結果なのは球状わたであった。最大圧力時の厚さでは1サイクル目から変化は少なかった。最大圧力時にもかさ高の序列は「(D-2、羽毛、市販合繊布団わた) < 改良品 < 球状わた」と、低圧力時と同様の傾向が見られた。

圧縮作用に対する回復性として、圧力0.5g/cm²の時の厚さの変化割合で回復率を算出し評価することとした。圧縮運動時の厚さを基準に、同サイクル内で回復運動時厚さの割合で計算した結果を図5に、一旦圧力が0になった後の次サイクルの圧縮運動時の厚さの割合で計算、つまりサイクル間で計算した結果を図6に示した。同サイクル内での回復率では試料間で差があるが、サイクル間での計算では2サイクル目以降90%以上と高くほとんど差がなかった。わたの回復が加圧盤の回復運動に追従するスピードに差があるものの、時間の経過により各試料同様に回復し、次サイクル時の厚さで計算する場合には差が小さくなったものと解釈できる。同サイクルでの結果の序列は厚さと同様「(D-2、羽毛、市販合繊布団わた) < 改良品 < 球状わた」であり、この順に反発性が高くなっているものと考えられた。

圧縮率を「 $[1 - (\text{最大圧力時の厚さ}) / (\text{圧力} 0.5 \text{ g/cm}^2 \text{ の時の厚さ})] \times 100$ 」として算出し、図7に示した。この値が大きいくほど圧縮されやすいということ

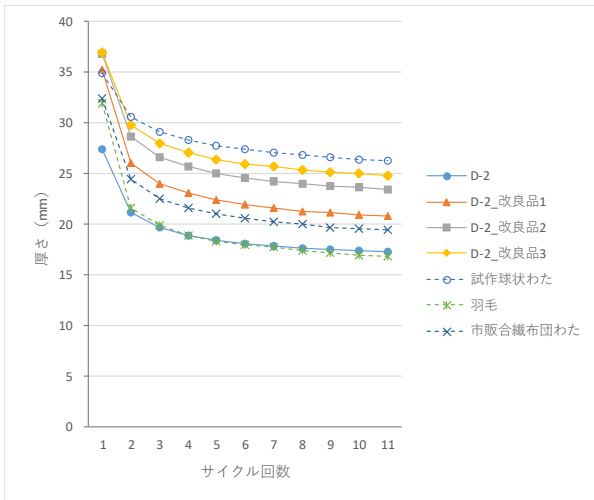


図3 圧力 0.5 g/cm² の時の厚さ

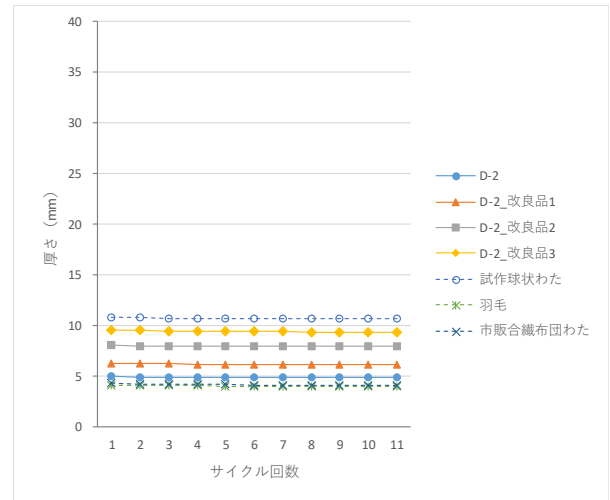


図4 最大圧力 (約 10.5 g/cm²) 時の厚さ

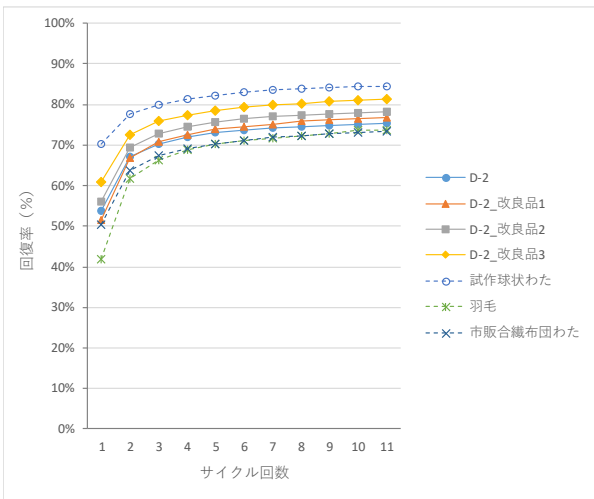


図5 回復率
(圧力 0.5 g/cm² 時の厚さで算出：サイクル内)

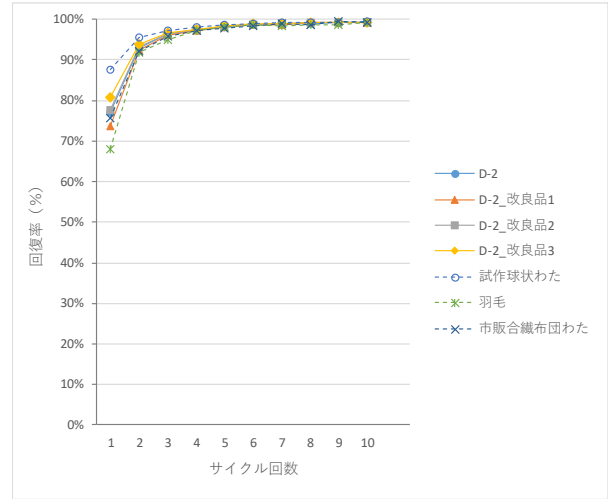


図6 回復率
(圧力 0.5 g/cm² 時の厚さで算出：サイクル間)

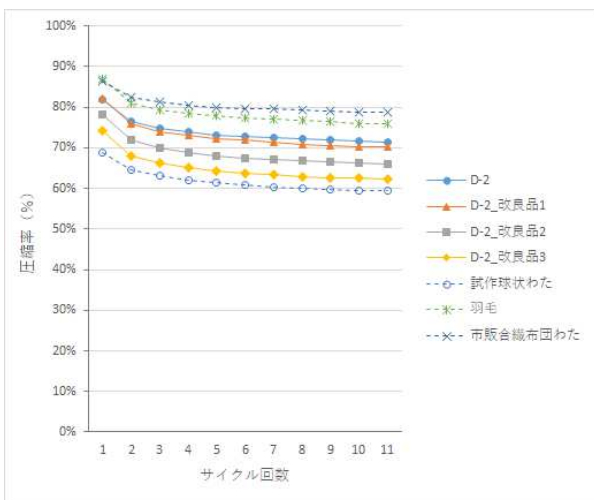


図7 圧縮率

ある。D-2、羽毛、市販合織布団わたは圧縮されやすく、改良品や球状わたは圧縮されにくいという結果であった。

羽毛はジャケットなどの製品中で圧縮されて一旦へたった状態になっても、側生地の上からたたいて広げることによってかさが回復するといわれている。今回の試験は単純に圧縮・回復を繰り返したので、羽毛のこういった性質は反映されていない。その点を考慮する必要はあるものの、少なくとも今回のような単純な圧縮・回復系の場合、改良品は従来品 D-2 や羽毛、市販合織布団わたより圧縮に対する抵抗性が高く、へたりにくいと考えられた。

3. 2 座布団形状での評価

3. 2. 1 厚さ

座布団形状にした時の厚さを図8に示した。単純には厚いほど保温性の点で有利なはずであるが、試料を作製

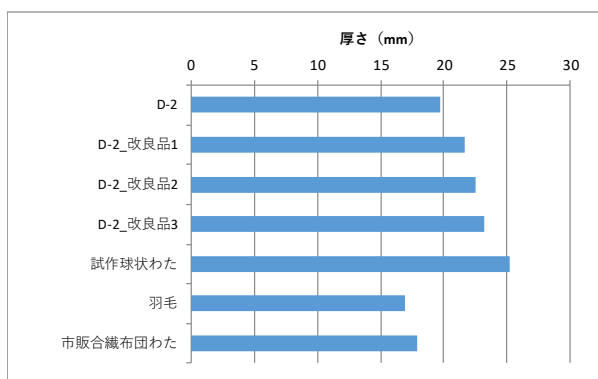


図8 座布団形状での厚さ

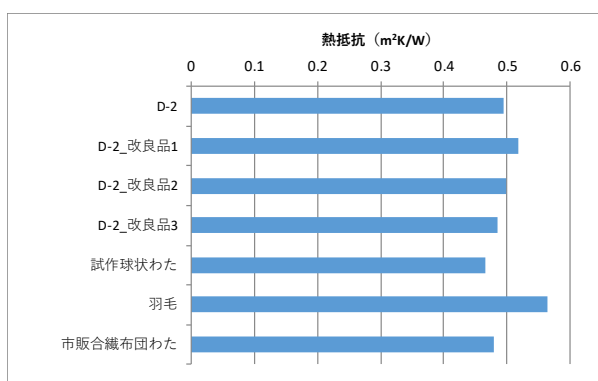


図9 座布団形状での保温性

したところマス内でわたの広がりやすさに差があり、単純に性能の良し悪しの比較はできないと考えられた。球状わたが最も厚くなったが側生地のマスの中に均一に広がりにくく隙間のある状態であり、厚くなったのはその影響もあると思われた。逆に羽毛は最も薄い、マスの中の隙間が少ない状態であった。

3. 2. 2 保温性

座布団形状にした時の保温性測定の結果を図9に示した。熱抵抗が高いほど保温性が高いということであり、羽毛は薄いものの保温性が最も高く、製品形状にした時の優位性があるものと思われた。球状わたについては厚さはあるものの保温性は低く、側生地の中で隙間が多いことがこの一因と考えられた。改良品の中では「1」が従来品D-2よりも保温性が高くなった一方、「2」は同程度、「3」は低下と結果が分かれた。水準によるが、今回実施した改良方法で保温性の向上も見込めることが分かった。「1」は羽毛には及ばなかったものの市販の合繊布団わたよりも保温性が高く、少なくとも保温性の観点からは製品化に向けて有望と思われた。

4. まとめ

改良のために試作したわたは3種ともかさ高性や圧縮に対する抵抗性が従来品よりも良くなり、今回実施した

改良方法がこれらの性質の向上に有効であることが分かった。分離性については悪化の方向にあるが、1種類(D-2_改良品1)だけはほどほどの分離性を保った。水準を調整することにより、分離性の悪化もある程度防げるものと考えられた。製品使用を見据えて実施した座布団形状での保温性試験では、改良品の中で向上(D-2_改良品1)と悪化に傾向は分かれ、水準によっては保温性の向上が見込めることが分かった。今回試したのものの中ではD-2_改良品1が総合的に優れていた。結論として、今回実施した改良方法はその水準を調整することにより総合的な性能向上に有効であると考えられた。

【参考文献】

- 1) 中島孝康ら,岐阜県産業技術センター研究報告 No.10, pp28-30, 2016
- 2) 中島孝康ら,岐阜県産業技術センター研究報告 No.11, pp19-20, 2017
- 3) 中島孝康ら,岐阜県産業技術センター研究報告 No.12, pp18-21, 2018
- 4) 中島孝康ら,岐阜県産業技術センター研究報告 No.13, pp14-15, 2019

AI を活用した検反技術に関する研究

遠藤善道*、立川英治*、亀山遼一*

Study on inspection technology using AI

ENDOY Yoshimichi*, TACHIKAWA Eiji*, KAMEYAMA Ryoichi*

織物の製造において検反は品質を確保するために重要な工程であり、現在は目視検査に頼っている。製造工程の省力化のため、多くの研究者が画像処理を用いて検反を行う研究を重ねてきたが、現在まで実用化されていない。

人工知能(AI)を用いた画像処理技術が進歩をとげており、従来の画像処理技術ではできなかったことができるようになってきている。本研究ではオートエンコーダと呼ばれる人工知能を検反に利用できないか検討した。

今回の研究では、画像に意図的につけた傷を抽出することはできたが、検反作業で検査したい傷を抽出することはできず、人工知能を検反に用いる技術を確認することはできなかった。

1. はじめに

織物の製造において検反は品質を確保するために重要な工程であり、現在も多くの人員を割いて目視検査が行われている。多くの工業製品では画像処理を用いた検査が行われていて成果を上げているので、これまでも画像処理を用いた検反技術が研究されてきた。図1に今回検査したい無地の織物の「傷」の例を、図2に傷を横切る水平線上の輝度分布を示す。傷の長さは約1mmである。図1に示すように、傷は見にくいものであり、画像の輝度を利用して検出しようとしても、図2に示すように地の目の輝度変化と区別をつけることができないことから、製造工程で利用できる検反装置は開発されていない。検反に関しては他にも、(1)微小な力で変形するので、位置決めが正確にできず、パターンマッチングによる手法が利用できない、(2)柄物では、「汚れ」と「柄」の目が区別できないなど難しい要因がある。

一方、2012年に深層学習が提唱されてから、人工知能を用いた画像処理技術が長足の進歩をとげており、現在では人よりも画像認識率が高くなっている。

本研究では、人工知能を利用して検反を行う技術について検討したので報告する。

2. 実験

人工知能は、目的に応じて様々なニューラルネットワークが研究、提案されている。本研究では、「オートエンコーダ」と呼ばれるネットワークを利用した。

2.1 オートエンコーダを利用した検査

オートエンコーダの概念を図3に示す。図の丸印が「ニューロン」(重み付け演算器)、線がニューロンの結合状態を表す。

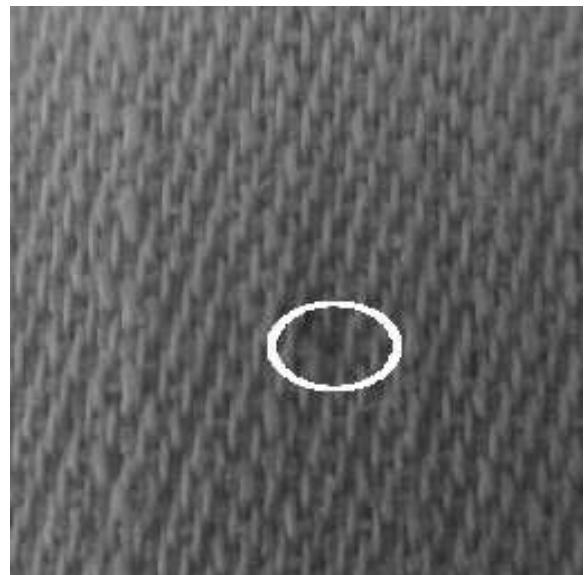


図1 検査したい反物上の「傷」
丸印の中に傷がある

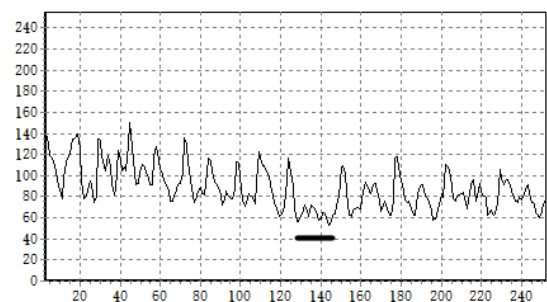


図2 傷を含む水平線上の輝度分布
アンダーラインの場所が傷

* 繊維・紙業部

オートエンコーダでは、入力した画像を集約し、ボトルネック特徴量を求め、求められた特徴量から入力と同じ

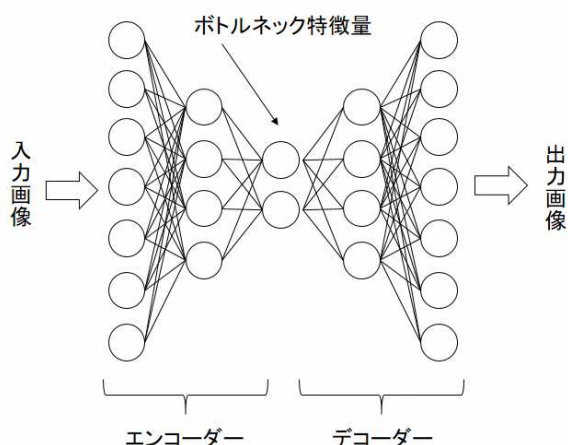


図3 オートエンコーダ

出力画像を得るように、ニューロンの重み付けを調節する。図の左半分をエンコーダ、右半分をデコーダという。オートエンコーダは、画像復元やノイズ除去を目的として開発されてきた。

オートエンコーダは入力画像からノイズを除去することができるので、入力画像と出力画像の差分画像をとればノイズを検出できる。織物の傷は、織物の周期的な地の目を乱すものであることから、ノイズとみなしてよく、オートエンコーダから得られる差分画像から傷を検出することができる。

画像検査でよく用いられている畳み込みニューラルネットワークは、学習に良品画像と同じ数の不良品画像を必要とするが、オートエンコーダの学習では良品の画像だけですむ。一方、畳み込みニューラルネットワークでは不良の分類ができるが、オートエンコーダではできない。

本研究が課題とする検反では、傷を分類する必要はないこと、傷が極めて少ないことから、提案されているニューラルネットワークのうち、オートエンコーダを用いる。

2.2 実験に利用するオートエンコーダ

実験に利用するオートエンコーダを表1に示す。表1はView2017で報告されたオートエンコーダ¹⁾を、本研究に合うようにパラメータを調整したものである。表1のエンコーダ部では、256x256ピクセル、モノクロ画像を畳み込みフィルタを用い徐々に小さくし、32x32x32のボトルネック特徴量を作成する。デコーダ部では、ボトルネック特徴量を逆畳み込みフィルタを用いて徐々に大きくし256x256ピクセル、モノクロ画像をとって出力する。

2.3 実験方法

実験に用いる画像は、図1のような無地の織物をデジタルカメラで撮影したものを用いる。市販されている織物は柄物が多いが、本研究では人工知能を用いた検反技術の可能性を探りたいので、柄物より検査が簡単と考え

表1 オートエンコーダのパラメータ

エンコーダ部				
	Kernel	Stride	Output shape	Activation
Input			256,256,1	
Convolution	3,3	1,1	256,256,16	LReLU
Convolution	3,3	1,1	128,128,16	LReLU
Convolution	3,3	1,1	128,128,32	LReLU
Convolution	3,3	1,1	64,64,32	LReLU
Convolution	3,3	1,1	64,64,64	LReLU
Convolution	3,3	1,1	32,32,64	LReLU
デコーダ部				
Deconvolution	2,2	1,1	64,64,64	LReLU
Deconvolution	3,3	1,1	64,64,32	LReLU
Deconvolution	2,2	1,1	128,128,32	LReLU
Deconvolution	2,2	1,1	128,128,16	LReLU
Deconvolution	2,2	1,1	256,256,16	LReLU
Deconvolution	2,2	1,1	256,256,1	Tanh

られる無地物を対象とした。画像の大きさは256x256ピクセル、モノクロ画像とする。解像度は0.17mm/Pixelである。表1のオートエンコーダに良品画像200枚を入力して学習させる。学習が完了したオートエンコーダに、傷がある画像を入力し出力画像を作る。入出力画像の差分を取り、傷の部分が検出されるかどうか検討する。また、布は精密な位置決めが困難であることから、良品画像を変形した画像を入力画像とし処理の堅牢性を評価する。GPUにはGeForce GTX660 RAM 2GB 980MHz CUDAセル 960個を、処理系にはNeural Network Console(ソニーネットワークコミュニケーションズ株式会社製)を用いる。

3. 結果及び考察

図4にオートエンコーダの学習曲線を示す。

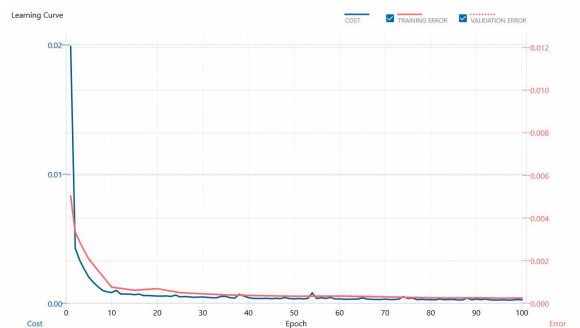


図4 実験で用いたオートエンコーダの学習曲線

図4の横軸が学習回数、縦軸が誤差である。学習にかかった時間は10分程度であり、早期に学習が終了している。CPU (PentiumG4560 3.5GHz)のみで学習させた場

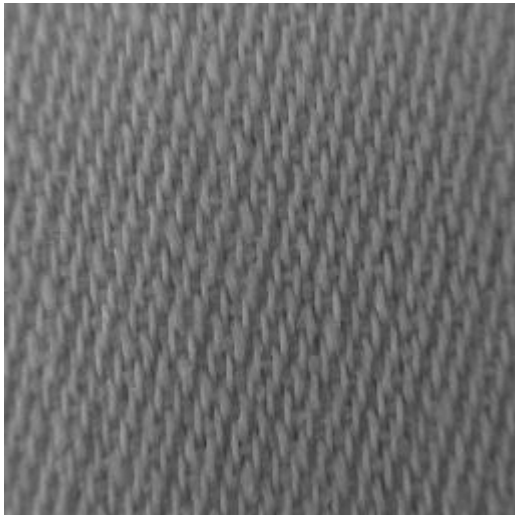


図5 傷のない織物画像（入力画像）

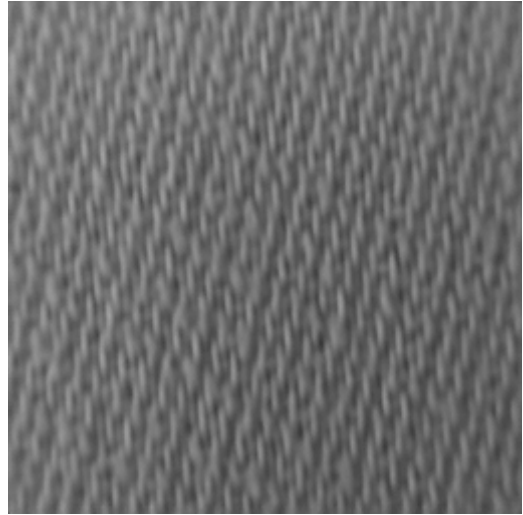


図7 傷のない織物画像（出力画像）

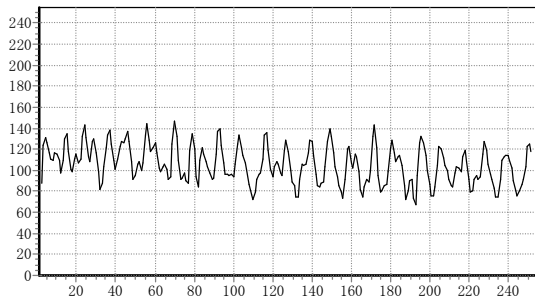


図6 入力画像の輝度分布

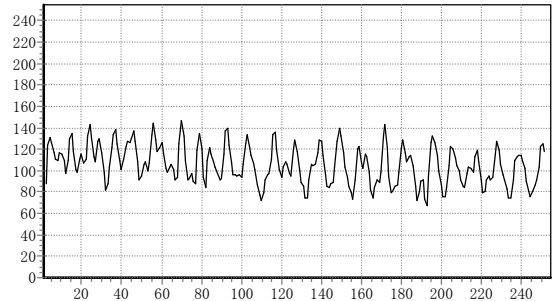


図8 出力画像の輝度分布

合は1時間経っても学習が終わらなかった。図5に傷のない織物の画像、図6に同画像の中央部を水平方向に左から右へスキャンしたときの輝度分布、図7にオートエンコーダを通して得られた出力画像、図8に同輝度分布を示す。図5、7に示すように、画像はよく復元できている。また、入力画像にあったノイズが消されている。これらのことから実験で用いたオートエンコーダはうまく動作している。図9に45度傾けた画像の入出力画像

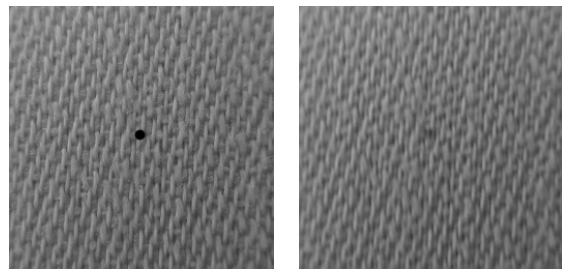


図10 傷をつけた画像（左）と出力画像（右）
画像中央に黒点をつけた

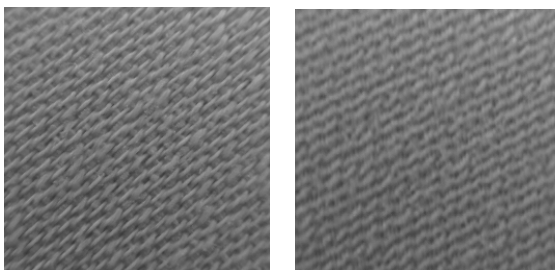


図9 45度傾けた画像の入出力画像
左：入力画像 右：出力画像

を示す。図に示すように画像を大きく傾けても、よく復元できている。他にも拡大、縮小した画像を処理したが、いずれもよく復元できた。



図11 入出力の差分画像
出力画像から入力画像を引いた

図10に、傷のない画像にペイントソフトで「傷」を

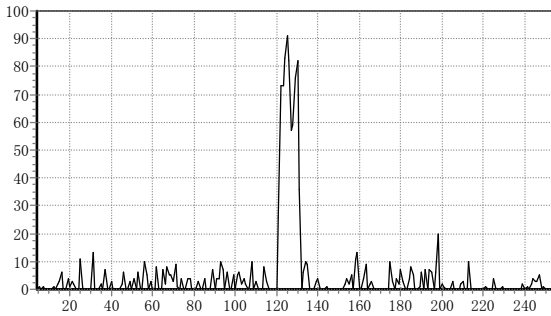


図1-2 傷を横切る部分の輝度分布

つけた画像とその処理結果を示す。また、図1-1に出力画像と入力画像の差分画像を示す。図に見るように傷の部分がかよく抽出されている。図1-2に、図1-1で検出された部分を横切る水平方向輝度分布を示す。図1-2の輝度分布ならば、閾値処理で用意に傷を判定することができる。

図1-3、図1-4に、検出したい傷の画像と出力画像の例を示す。図に示すように傷の部分まで復元しており、用いたオートエンコーダでは傷を抽出することができなかった。図1-4、1-5以外にも傷の画像を処理したが、結果は同様であった。

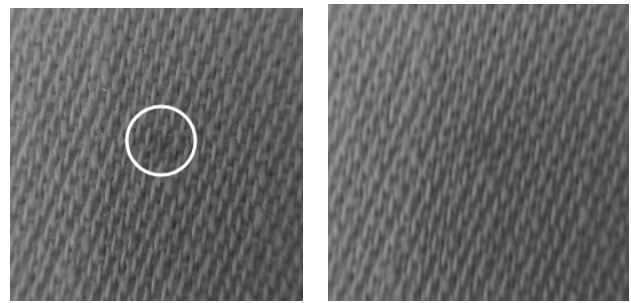
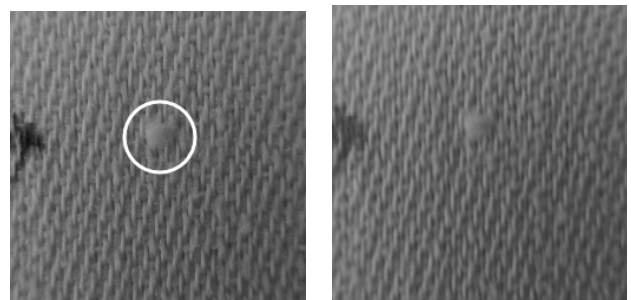
本研究では、表1のニューラルネットワークの他、ボトルネック特徴量の次元や中間層を増減させたネットワーク、提案されている他のオートエンコーダ十数種類²⁾、入力画像にホワイトノイズを加えて復元力を強化する学習方法など検討したが、傷の検出結果は表1のオートエンコーダと大差なかった。図1-0に比べて、図1-3、1-4は傷と地の目のコントラストが少ないことが原因と思われる。

4. まとめ

画像処理を用いて織物を検査する技術は研究されているが、実用化された技術はない。人工知能を用いた製品検査技術が進歩しているので、本研究ではオートエンコーダと呼ばれる人工知能を検反に利用できないか検討した。

本研究では、入力画像のノイズを消すことはできたが、検査したい傷をそのまま出力してしまい、検反に用いる技術を確立することはできなかった。また、オートエンコーダによる処理は、回転、拡大、縮小に対して堅牢であることが示された。

人工知能の研究は日進月歩であり、様々なニューラルネットワークが提案されている。画像処理を用いた検反が繊維業界から求められていることから、今後も人工知能の研究に注目し、検反に適すると思われる技術が提案されたら試みてゆきたい。

図1-3 検査したい傷画像(左)と復元画像(右)
丸印の中に傷がある図1-4 検査したい傷画像(左)と復元画像(右)
丸印の中が傷、左の黒色部分はマーカ

【参考文献】

- 1) 中塚ら、「少数不良サンプル下における Adversarial AutoEncoder による正常モデルの生成と不良判別」,View2017 ビジョン技術のワークショップ
- 2) 栗本ら、「Denoising AutoEncoder Generative Adversarial Networks を用いた欠損検出の検討」,View2017 ビジョン技術のワークショップ、その他インターネット上に公開されているオートエンコーダ

紙の高機能化と品質評価に関する研究（第3報）

— 段ボールの湿度環境変化を伴う静的圧縮試験 —
大平武俊*、佐藤幸泰*、亀山遼一*

Research on high function and quality evaluation of paper (III)

- Static loading test with a humidity environment change of the corrugated fiberboard -
OHIRA Taketoshi*, SATO Yukiyasu* and KAMEYAMA Ryoichi*

段ボールは、標準状態（23℃、相対湿度 50%r.h）で評価された圧縮強度をもとに耐荷重を設定している。しかし、湿度の高い環境では破損が生じて問題となっており、高湿度環境でも利用できる指標の開発が求められている。そこで本研究では、湿度を上昇させる環境下で静的圧縮試験を行う手法について検討した。その結果、段ボールの高湿度環境下での座屈の危険性を推測する手法として利用できると考えられた。

1. はじめに

段ボール箱などは積み重ねて利用することが多いため、荷重によって座屈・破損しないよう強度管理が重要である。このための試験として JIS 規格では、標準状態（23℃、相対湿度 50%r.h）において試料に圧縮荷重をかけていき、試料が座屈する時の荷重を測定する方法が定められている。段ボールの実際の使用時には、安全率を見込んでこの荷重の 1/3～1/5 を耐荷重として設定することが多い。ただ、このように3倍から5倍の安全率（最大荷重の 1/x とするとき安全率 x 倍という。以下同じ。）を見込んで、段ボールの使用環境が標準状態に近いとは限らず、特に湿度の高い状況においては破損を生じて問題となることがある。これは段ボールなどの紙類がセルロースなど吸湿性の高い素材で主に構成されているため、湿度が高くなることによって水分を多く含むようになることが強度に影響を及ぼしていると考えられる。このため、従来の標準状態下の試験による耐荷重だけでは強度管理上不十分で、紙業界からは高湿度の環境でも利用できる指標の開発が求められている。そこで、本研究では新たな試験方法の開発を目指した。標準状態下における耐荷重試験として JIS 規格の代表的な方法にエンドクラッシュ法がある。本研究ではエンドクラッシュ法を準用し、湿度を変化させて耐荷重との関係を調査し、新指標の可能性を検討したので報告する。

2. 実験

2.1 供試品

最も一般的に使用されている段ボール（A フルート、厚み：5mm、表裏面：K5 ライナー、中芯：120g/m²）を用い、紙試験のための標準状態（JIS P 8111、23℃、50%r.h）で24時間以上調湿した後、試験に供した。

2.2 従来法による圧縮試験

標準状態（23℃、相対湿度 50%r.h）において、エンドクラッシュ法（JIS Z 0403-2: 1999）に従い試験片を圧

縮し、座屈するまでの最大荷重を測定した。

2.3 湿度上昇環境下における静的圧縮試験

2.3.1 湿度上昇環境下における静的圧縮試験方法

エンドクラッシュ法を準用し、一定荷重のもと湿度を上昇させながら圧縮試験を行った。

装置の概略を図1に示す。エンドクラッシュ治具に取り付けた試験片を、恒温恒湿器（日立製作所製、EC-86MHHPE）庫内に設置した静加重圧縮試験機に配置し、開扉することなく恒温恒湿器の庫内で圧縮試験機の上部圧縮盤におもりを載せ、試験を行った。同時に上部圧縮盤の高さ変位量（株）ミットヨ製、ID-C125X）を計

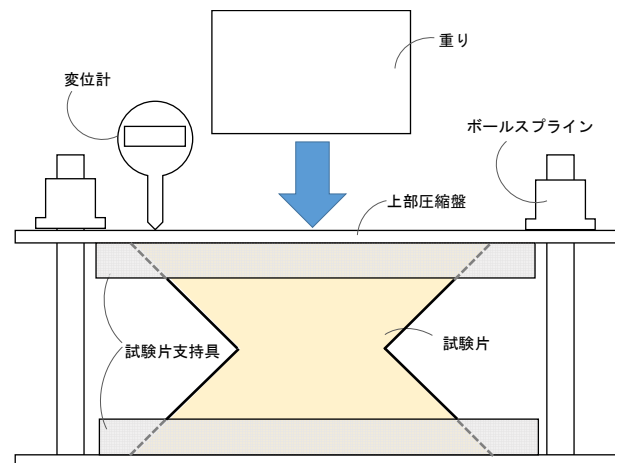


図1 装置の概略

表1 湿度上昇環境下における静的圧縮試験の条件

温度条件	23℃
湿度条件	50%r.h.→0.4%r.h./min→98%r.h.30分保持

* 繊維・紙業部

測した。温湿度の条件は表1のとおりとした。段ボールの耐荷重は、一般に圧縮試験の最大荷重値から安全率3~5倍程度を見込んで設定されることが多いことから、本試験のおもりは2.2項で求めた最大値の1/3と1/5とした(以下、1/3、1/5)。このほか比較のため、おもりをのせない試験も行った(以下、無荷重)。

また、強度には含水率の影響が大きいと考えられることから、圧縮試験とは別に恒温恒湿器の中に試料を置いて重量変化を測定し、含水率を求めた。

2. 3. 2 平衡含水率測定

2.3.1項で測定した含水率は、湿度が変化していくときの含水率である。「湿度が変化していく時の湿度」と含水率の関係は、「湿度が一定の時の湿度」と含水率との関係とは必ずしも一致しない。管理指標としては、湿度一定条件のもとでの予測が必要なので、2.3.1項で求められる含水率を「湿度が一定の時の湿度」と関連づけるため、表2の条件で平衡含水率を求めた。

表2 平衡含水率を求めるときの条件

温度 (°C)	23
湿度 (%r.h.)	50、60、70、80、90、95
調湿時間 (h)	24

3. 結果及び考察

3. 1 従来法による圧縮試験結果

JISのエンドクラッシュ試験の結果、最大荷重は218Nとなった。耐荷重は1/3(安全率3倍)の場合72.7N、1/5(安全率5倍)の場合43.6Nとなる。

3. 2 湿度上昇環境下における静的圧縮試験

湿度上昇環境下における静的圧縮試験(含水率と高さ変位の経時変化)の結果を図3に示す。段ボールは湿度の上昇に伴い吸湿し、その含水率は上昇していった。

一般的に含水率が強度に影響を与えていると考えられている^りことから、図3の結果を含水率と高さ変位の関係にプロットし直すと図4のようになった。無荷重の試験では含水率の上昇に伴い伸長した。一方荷重をかけた試験では、含水率の上昇に伴い、初期は若干伸長するものの、その後変位が下がり始め、最終的に座屈が生じた。図4において、伸長が止まる点を①、①'、屈曲初期点を②、②'、急速屈曲点を③、③'とする。標準状態から伸長している間(図4の標準状態~①、標準状態~①')の含水率では、荷重に耐えることができおり、座屈の危険性はないと考えられる。屈曲初期点(同②、②')でグラフが下降し始めており、荷重に耐えることができなくなり、座屈の危険が生じていると考えられる。急速屈曲点(同③、③')の含水率では完全に座屈してしまうと考えられる。

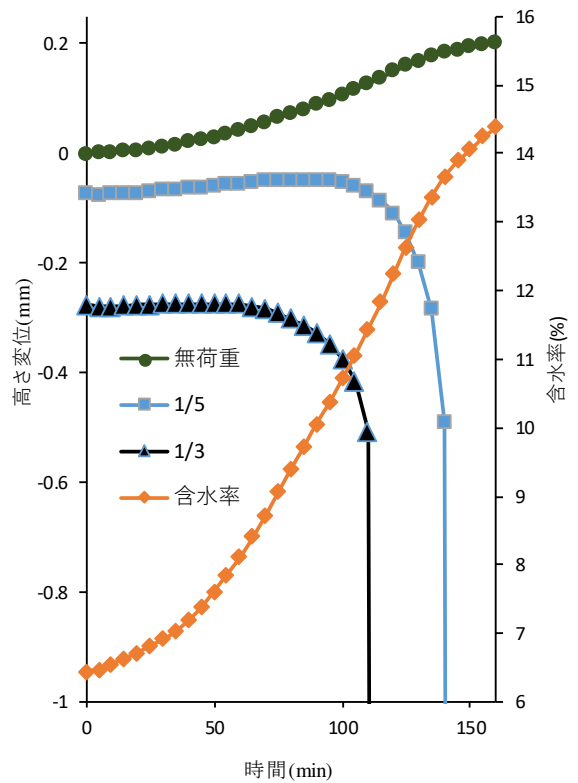


図3 湿度上昇環境下における静的圧縮試験(含水率と高さ変位の経時変化)

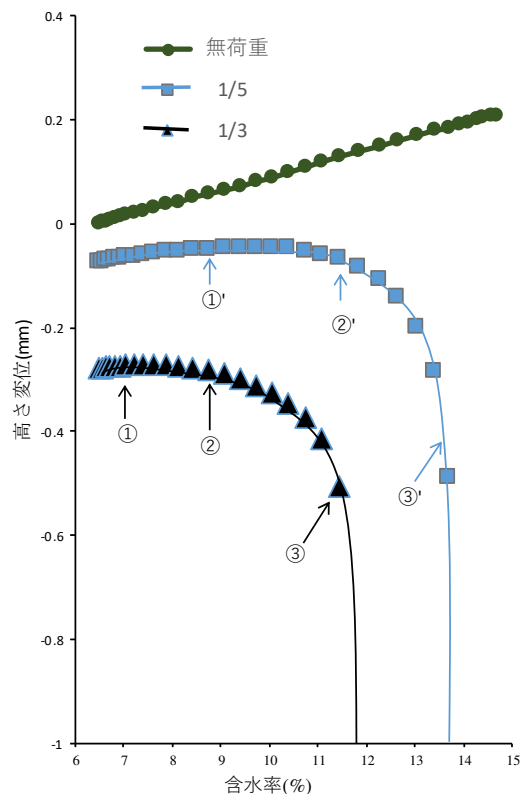


図4 湿度上昇環境下における静的圧縮試験(含水率と高さ変位の関係)

こうした考え方にに基づき、各安全率における3つの特徴点の含水率をプロットすることで、図5のような含水率に応じた「座屈危険性予測図」を作成できると考えられる。この図5において、例えば、安全率3倍で設計された段ボールは、使用環境の影響で含水率が約7%（図5①）までは座屈の危険性がなく、約8.5%（図5②）を超える時、段ボールの座屈の危険性が高まり始め、さらに約11.5%（図5③）を超えると座屈が生じる。

ただ、実際の段ボール使用現場において、いちいち段ボールの含水率を測定して管理することは現実的ではなく、環境湿度で管理できることが望ましい。使用現場では段ボールが長時間一定の環境湿度にさらされた結果としてある含水率になっていると考えられることから、湿度と平衡含水率の関係に基づき含水率を湿度に変換すれば良いと考えられる。今回使用した段ボールについて実験して求めた「湿度と平衡含水率」の関係を図6に示す。この図から各安全率における3つの特徴点の含水率を湿度に変換した結果を表3に、この値を基に図5の含水率を湿度に変換したものを図7に示す。これにより、使用現場での相対湿度に対する座屈の危険性を推測することが可能になると考えられる。

なお、今回、湿度と平衡含水率の関係を実験により求めたが、これには非常に時間を要するので、使用する段ボールごとに実施するのは現実的ではない。ただ、段ボールは主素材がパルプということで構造に違いはあって

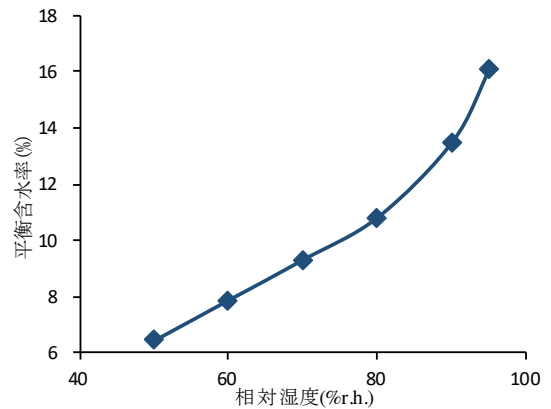


図6 湿度環境と平衡含水率の関係

表3 含水率と湿度の対応

荷重条件		含水率	相対湿度
1/3	①	7.2%	54%r.h.
	②	8.7%	66%r.h.
	③	11.4%	82%r.h.
1/5	①'	8.7%	66%r.h.
	②'	11.4%	82%r.h.
	③'	13.5%	90%r.h.

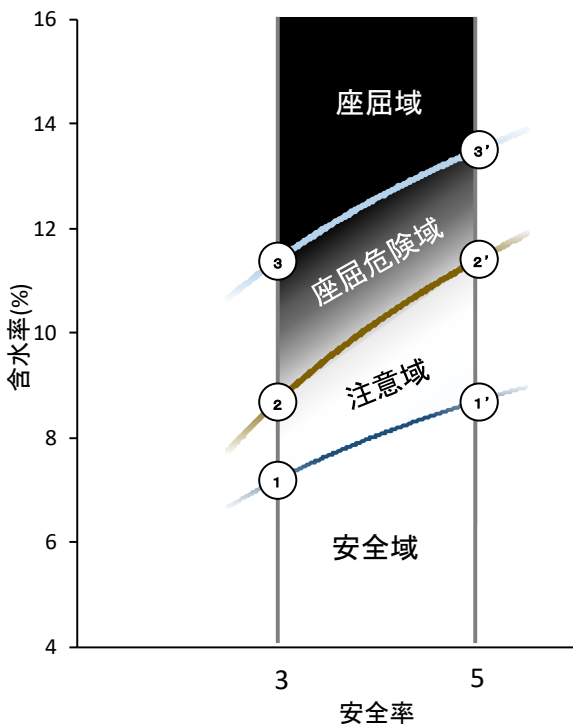


図5 座屈の危険性の予測図（含水率）

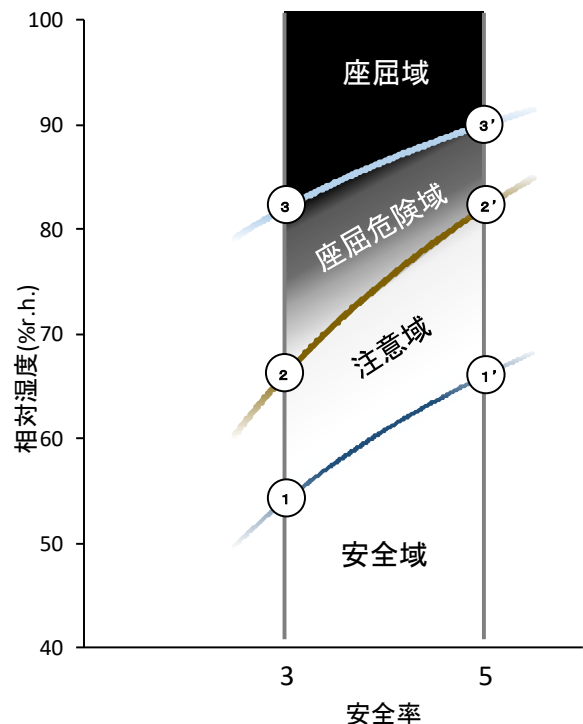


図7 座屈の危険性の予測図（相対湿度）

も素材としては大きな違いはなく、どの段ボールも湿度と平衡含水率の関係はほぼ同じである¹⁾²⁾。よって、湿度と平衡含水率の関係のデータを一度測定しておけば、違う段ボールにおいてもそのデータを利用できると思われる。また、今回は 23℃で試験を実施したが、他の温度で段ボールの使用が予想される場合も同様で、その温度で湿度と平衡含水率の関係を一度測定しておけば、そのデータを利用できると思われる。

以上のことから、今回検討した「湿度上昇環境下における静的圧縮試験」は、段ボールの高湿度環境下での座屈の危険性を簡易に推測する手法として利用できると考えられる。

4. まとめ

段ボールは、安全率を3倍、5倍などとして耐荷重を設定しているが、高湿度環境においては耐荷重であっても座屈することがわかった。このことは段ボールを使用する場所の湿度環境管理が重要であることを示している。今回検討した「湿度上昇環境下における静的圧縮試験」により、段ボールの高湿度環境下での座屈の危険性を推測することが可能になると考えられ、段ボールの品質管理、使用時の湿度管理や積み段数の調整に活用が期待される。

【参考文献】

- 1) 五十嵐清一,段ボール包装技術入門,日報出版,2008
- 2) 大平ら,岐阜県産業技術センター研究報告 No.12, pp51-52,2018

美濃産楮の高品質化のための栽培・管理技術の開発（第1報）

—楮の品質評価—
浅野良直*、佐藤幸泰*

Development of cultivation and control technology for becoming it a high quality of Mino kozo (I)

—Quality evaluation of kozo—
ASANO Yoshinao* and SATO Yukiyasu*

美濃産楮の品質を把握するため、楮（こうぞ）の繊維幅及び繊維長の測定、手すき和紙職人による原料加工及び抄紙のアンケート調査、抄紙した和紙の引張試験、楮繊維の引張強さ試験を本美濃紙の原料である大子（だいが）那須楮と比較して実施した。平成29年度と平成30年度の繊維長測定の結果を合算して美濃産楮と大子那須楮の繊維長分布を比較したところ類似している結果となった。美濃産楮の繊維引張強さは生産年度による差が2%以下、大子那須楮との差は1%以下となり、繊維の引張強さは生産年度や産地による影響が小さい結果となった。手すき和紙職人へのアンケート調査では、美濃産楮は原料の質や異物・スジの混入は低い評価となったが、漉きやすさや和紙の外観は高い評価を得られた。

1. はじめに

美濃手すき和紙の原料である楮は、美濃市においても生産されているものの、大部分は国内外から購入している。しかし、原料生産者の高齢化や廃業などから、将来の安定供給に問題を抱えているため、伝統ある手すき和紙製造を継続するには、原料供給の体制整備や品質向上が不可欠となっている。

美濃市内の楮生産における質と量を充実するため、岐阜県森林研究所（以下、森林研）と共同研究に取り組むこととした¹⁾。森林研は楮栽培の立地条件の解明や栽培技術を研究し、当センターは美濃産楮の高品質化に向けた品質評価を実施した。本美濃紙の原料であり、高品質な楮として扱われている茨城県の大子那須楮の品質を比較対象とし、楮の繊維幅や繊維長の測定、抄紙作業における原料加工および抄紙に関する手すき和紙職人へのアンケート調査、抄紙した和紙の引張試験、楮の繊維強さ試験を実施した。現在、美濃市の圃場では那須楮と土佐楮の苗を移植した2系統の育種が混在しているため、本研究では森林研が選別した那須楮を美濃産楮として評価した。また、森林研が4年前に茨城県的那須楮、高知県の土佐楮及び飛騨市で生産されている山中和紙の楮（以下、山中和紙楮）を美濃市の圃場に移植（以下、森林研移植楮）しており、これらについても繊維幅、繊維長を測定した。

2. 実験

2.1 繊維の取り出し

白皮（しろかわ）処理された美濃産楮と大子那須楮、森林研移植楮を対象として繊維の取り出しを行った。なお、森林研移植楮は根本直径が20mm程度で胸高位置（100～120cm）の幹を切り出し、2時間程度蒸して、表

皮を剥ぎ取り、表皮の黒皮をヘラや包丁で削って白皮とした。各楮の白皮は24時間程度水中に浸漬し、NaOH 15%（対原料）、液比60で1時間程度煮熟し、水洗いして繊維の取り出しを行った。

2.1.1 平均繊維幅測定

楮繊維を約2mmに切断し、約0.3gを水に分散させ、繊維長分布測定器（Lorentzen&Wettré製、FiberTester）で約20,000本測定した平均値を繊維幅とした。

2.1.2 繊維長測定

楮繊維の端部以外（約0.03～0.05g）を水に分散させて、黒色ろ紙上で吸引ろ過し、乾燥機（105℃）で15時間程度乾燥して、デジタル顕微鏡（オリンパス製、DSX500）で黒色ろ紙上の楮繊維を撮影し、画像解析ソフト（オリンパス製、Stream 2.4）で繊維長測定を行った。測定は両端部が確認できる繊維を目視による多点連結で直線近似した長さを繊維長とし、1試料あたり200本程度を測定した。

2.2 抄紙アンケート調査

美濃手すき和紙協同組合の手すき和紙職人に、平成30年度産の美濃産楮及び大子那須楮を原料とした抄紙を委託してアンケート調査を行った。なお、原料は産地による先入観を排除するため、産地名を伏せて提供した。

【原料加工、手すき条件】

- ・原料処理：ソーダ灰を用い2時間以上平釜で煮熟を行い、洗浄、除塵作業を行う。
- ・抄紙：二三判（約600mm×900mm）で35g/m²（約5匁）の紙を抄く。
- ・以上の作業を5名以上の職人で行う。

【アンケート項目】

- ・原料の質、異物スジの混入、漉きやすさ、漉きあげた和紙の外観の各項目を5段階で評価
- ・各原料に対する自由意見

* 繊維・紙業部

2. 3 和紙の引張強さ試験

抄紙した和紙の物性試験として引張強さ試験（「紙及び紙板—引張特性の試験方法—第2部：定速伸張法」JIS P8113：2006）を実施（島津製作所製、オートグラフ AG20-KNI）し、測定値を坪量〔g/m²〕で除算した比引張強さで評価した。

2. 4 楮繊維の引張強さ試験

紙の原料となる繊維の引張強さ測定はゼロスパン引張強さ試験（「ゼロスパン引張強さの試験方法」JIS P8227:2008）で行われる。試験は試験片をクランプした際のつかみ具間の距離を近接させて繊維集合体に水平方向荷重を加えて破断した際の荷重を試験片の繊維の引張強さとしている（図1 パルマック製、トラブルシューター No.1023、所有：静岡県工業技術研究所富士工業技術センター）。美濃産楮和紙と大子那須楮和紙のゼロスパン引張強さ試験を実施し、楮繊維の引張強さを評価する。

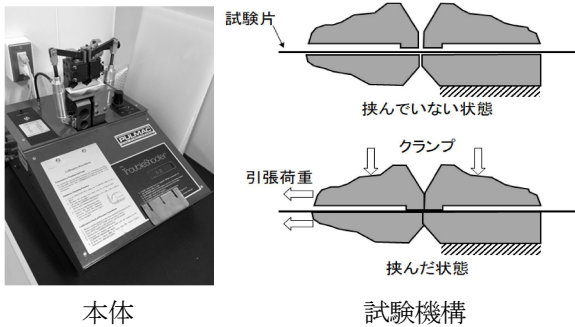


図1 ゼロスパン引張強さ試験機

3. 結果及び考察

3. 1 平均繊維幅測定、繊維長測定

繊維幅測定及び繊維長測定に使用した楮繊維は微量であり、植物である楮は画一的に評価できないため、測定結果は参考値として考察を行った。

3. 1. 1 平均繊維幅測定

表1に平均繊維幅の結果を示す。平成30年度の美濃産楮と大子那須楮は同程度であり、前年度と比較して細い結果を示す結果となった。また、森林研移植楮は美濃産楮、大子那須楮に比べて若干太い傾向を示した。

表1 平均繊維幅 (単位：μm)

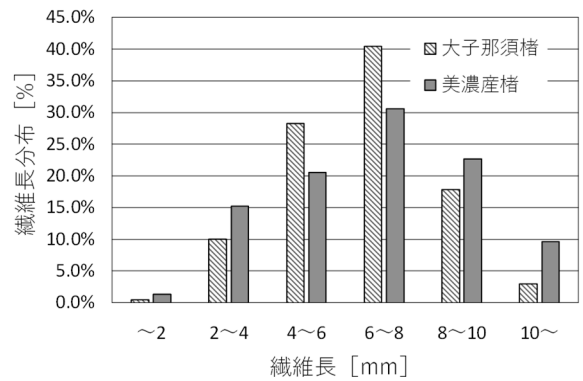
		H29	H30
大子那須楮		24.4	21.6
美濃産楮		24.1	21.5
森林研移植楮	那須楮		22.6
	土佐楮		24.6
	山中和紙楮		22.0

平成30年度は台風による強風で成長中の楮の枝先が折られたり、曲げられたりすることが影響して生育不良が生じていたため、前年に比べて幹が細い楮が多く、繊維も細くなったと考えられる。森林研移植楮も同様の影響を受けたと思われるが、美濃産楮に比べて楮株の栽培年数が若くて、成長力が強いために、繊維幅が太い楮になったと考えられる。

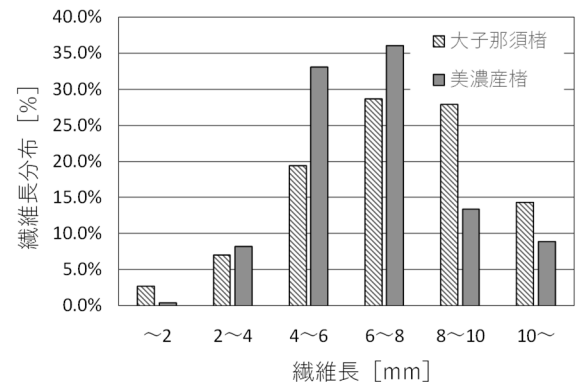
3. 1. 2 繊維長測定

図2に美濃産楮と大子那須楮の繊維長分布を示す。

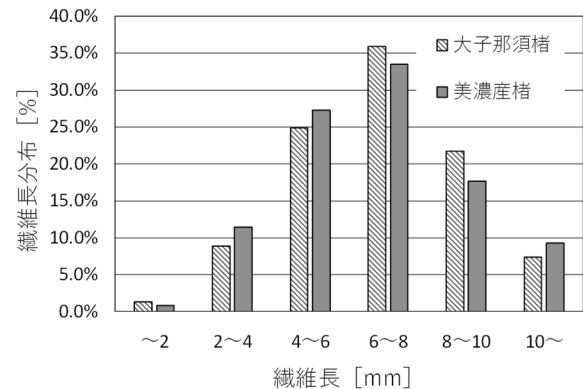
美濃産楮と大子那須楮は生産年度（図2(a)、図2(b)）が異なっても6~8mmの割合は多いが、全体では生産年度によって異なる分布状態を示す結果となった。



a) 平成29年度



b) 平成30年度



c) 平成29年度+平成30年度

図2 繊維長分布 (年度別)

しかし、繊維長の割合が多い4~10mmの範囲で比較すると、平成29年度の大子那須楮は約87%、美濃産楮は約74%を占め、12%の差を有したが、平成30年度は大子那須楮が約83%、美濃産楮は約79%を占め、4%の差となった。各生産年度の繊維長データを合算した繊維長分布(図2(c))では、類似した分布状態を示す結果となった。単年度では気候等の栽培条件が楮の生育に影響を与えるが、複数年のデータを合わせて比較すると大子那須楮と同じ苗の美濃産楮は大子那須楮に類似した繊維長分布を示した。

図3に森林研移植楮の繊維長分布を示す。那須楮は6~10mmの分布が約65%を占め、6mm以上の割合は80%以上を占めた。土佐楮は6~10mmの分布が約75%を占め、8~10mmの割合は45%を占めた。山中和紙楮は4~10mmの差が5%以下であり、平均的に分布している傾向となった。楮はヒメコウゾとカジノキの雑種であり、産地によって異なる特徴を有すると考えられる。そのため、楮によって異なる分布を示したと考えられる。

表2に平均繊維長を示す。美濃産楮は約6.7mm、大子那須楮は約6.9mmとなり、大子那須楮の方が若干長めの傾向を示したが、差は0.2mm程度のため同等程度の長さと考えられる。森林研栽培の那須楮と土佐楮は8mm以上、山中和紙楮は7mm以上となり、美濃産楮や大子那須楮と比較して長い結果となった。森林研移植楮は美濃産楮や大子那須楮に比べて若い楮株であることが影響していると考えられる。

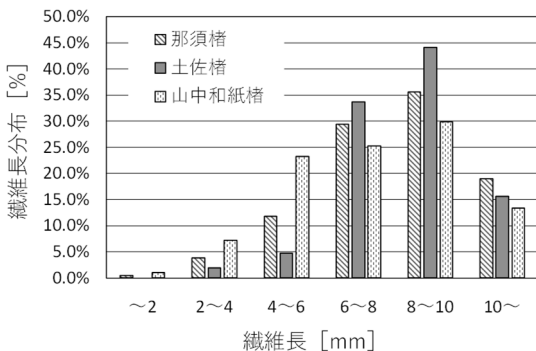


図3 繊維長分布(森林研移植楮)

表2 平均繊維長(単位:mm)

		H29	H30
大子那須楮		6.51	7.38
美濃産楮		6.74	6.64
森林研移植楮	那須楮		8.20
	土佐楮		8.41
	山中和紙楮		7.38

3.2 抄紙アンケート調査

図4に抄紙アンケート調査の結果を示す。なお、100%に近いほど高評価とする。

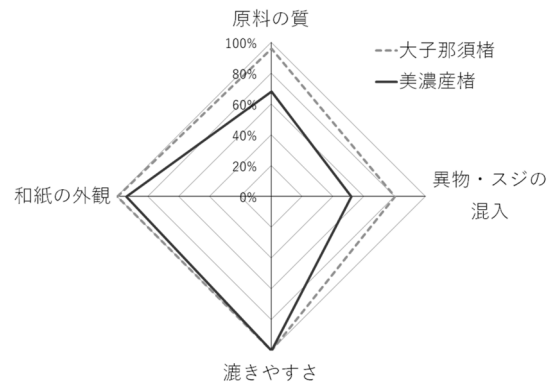


図4 抄紙アンケート結果

表3 異物・スジ含有率

産地・年度	大子那須楮		美濃産楮	
	H29年度	H30年度	H29年度	H30年度
異物・スジ含有率	7.2%	15.1%	11.7%	11.7%

原料の質及び異物・スジの混入の項目では、美濃産楮は従来と同様に大子那須楮に比べて低い評価となった。そこで、各楮の異物・スジの含有率を調査(表3)したところ、美濃産楮は前年度と同程度の含有率であったが、大子那須楮は2倍以上の含有率となり、美濃産楮よりも多い結果となった。原料加工を担当した職人の意見を以下に示す。

○大子那須楮

- ・細かな異物はあるが、全体的にきれい。
- ・取りやすかった。

○美濃産楮

- ・異物は少ない。
- ・赤スジが全体に入っているものが多い。
- ・かたい(煮え切らない)

原料加工の評価は作業性も影響すると考えられるため、異物・スジの含有率が多くても、作業性が良ければ原料の質や異物・スジの混入の評価は高くなると考えられる。

漉きやすさ、和紙の外観の項目では、美濃産楮は大子那須楮と同程度の高い評価を得られた。抄紙加工を担当した職人の意見を以下に示す。

○大子那須楮

- ・きれいな紙になった。上品さがある。つやがある。
- ・漉き上がりはきれい。

○美濃産楮

- ・漉いた時はスジが無く、とてもきれいに仕上がった。
- ・ゴワゴワとしている。

漉きやすさは、前年度の結果から抄紙時の繊維の分散状態が影響すると考えられ、本年度は分散状態が良好であったことが、高評価になったと考えられる。

従来から、大子那須楮の和紙は「つやがある。」など

の意見があり、美濃産楮の和紙は「ゴワゴワしている。」などの意見がある。大子那須楮の圃場では定期的に楮株を更新しているが、美濃産楮の圃場では古株の楮も利用されている。古株になると赤スジが多くなり、繊維も硬くなるとされているため、楮株の定期的な更新を図ることが重要と考えられる。

3.3 和紙の引張強さ試験

抄紙した和紙の引張試験の結果を図5に示す。平成29年度は大子那須楮和紙が美濃産楮和紙よりも10%程度強い結果となったが、平成30年度では数%程度の差となった。差が少なくなった要因の1つとして、3.1.2で示したように、繊維長の割合が多い4~10mmの範囲の平成30年度の大子那須楮と美濃産楮の差が4%となり、前年度と比べて繊維長分布の差が小さくなったことで、抄紙した美濃産楮和紙と大子那須楮和紙の繊維の結合強度が同程度になったと考えられる。

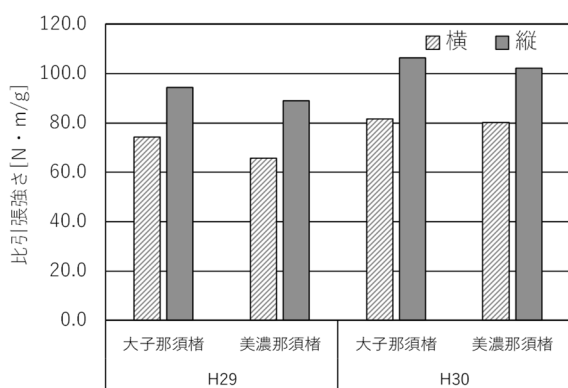


図5 和紙の引張強さ試験

3.4 楮繊維の引張強さ試験

図6に繊維引張強さ試験の結果を示す。美濃産楮における生産年度による差は2%以下となり、美濃産楮と大子那須楮との差は1%以下の結果となった。生産年度や産地によって気候や土壌などの栽培条件は変わるが、楮の繊維強さへの影響は低いと考えられる。

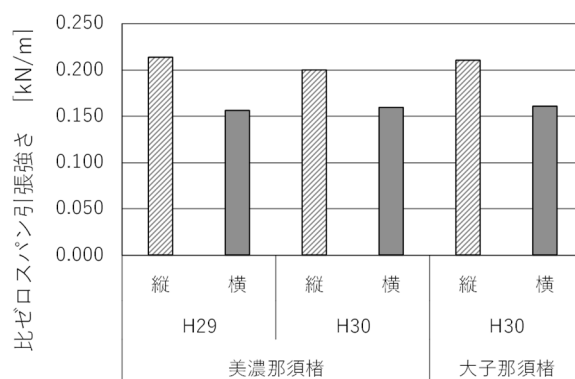


図6 楮繊維の引張強さ試験

4. まとめ

美濃産楮の品質を把握するため、大子那須楮と比較した評価を実施した。美濃産楮と大子那須楮の繊維幅は生産年度が異なっても同程度の繊維幅を示した。美濃産楮の繊維長分布は複数年の繊維長データを合わせて比較すると大子那須楮と類似した繊維長分布となった。手すき抄紙における異物・スジの除去などの原料加工において美濃産楮の評価は低かった。抄紙の漉きやすさや和紙の外観は高い評価を得られたが、従来からのゴワゴワした質感に変化はなかった。楮の繊維引張強さは産地及び生産年度が異なっても差が小さい結果となった。

次年度は森林研が移植した若い楮株の楮を抄紙原料とした評価も実施する予定である。

【謝 辞】

本研究を実施するにあたり、ご協力頂いた大子那須楮保存会、美濃市こうぞ生産組合、美濃手すき和紙協同組合の皆様、静岡県工業技術研究所富士工業技術試験センターの深沢博之上席研究員に感謝いたします。

【参考文献】

- 1) 浅野ら、岐阜県産業技術センター報告 No10,PP61-60, 2016
- 2) 浅野ら、岐阜県産業技術センター報告 No11,PP53-55, 2017
- 3) 浅野ら、岐阜県産業技術センター報告 No12,PP53-56, 2018
- 4) 浅野ら、岐阜県産業技術センター報告 No13,PP53-56, 2019

複合材料

次世代自動車・航空機部品の製造に必要な異種材料接合技術の開発（第7報）

－ FRP-金属接合技術の開発 －

西垣康広*、仙石倫章*、鈴木貴行*、山田孝弘*

Development of joining dissimilar materials for production of next generation vehicle parts and aircraft parts (VII)
- Development of joining technology of FRP and metal -

NISHIGAKI Yasuhiro*, SENGOKU Tomoaki*, SUZUKI Takayuki* and YAMADA Takahiro*

温室効果ガス削減に向けて自動車・航空機産業においては世界的に軽量化に取り組み、軽量かつ高強度の特性を有する炭素繊維複合材料（CFRP）の利用が拡大している。しかし、コスト面からCFRPと金属を組み合わせたマルチマテリアル化が進行しており、これに対応するための異種材料接合が必要とされている。本研究ではFRPを効率良く、強固に接合する技術開発を目的とし、FRPに適した接合技術を確立する。

これまでに短時間で接合できる超音波接合技術を利用して熱可塑性CFRP（CFRTP）を用いて同種材接合及び異種材接合を行い、接合条件を検討し、接合強度を評価してきた。本年度はマルチマテリアル化に向けた基礎研究として、表面改質・表面処理を行っていないCFRTPとアルミニウム合金(A5052)を用いて、超音波縦振動により異種材接合を行い、接合条件を検討し、引張せん断試験により接合強度を評価した。

1. はじめに

近年、温室効果ガス削減に向けた世界的な取り組みにおいて軽量化は必須条件であり、軽量かつ高強度という優れた特性を有するCFRPは、次世代自動車・航空機産業を中心に利用拡大に向けた製品開発が進められている。しかし、コスト面から全てをFRP化するには至らず、マルチマテリアル化が進行しており、FRPと金属を接合する様々な技術開発^{1,2)}が行われている。FRPと金属の接合には、表面処理による物理的な結合や表面改質による化学的な結合が利用されている。

これまで当センターでは、CFRTPの製品化に向けた支援を目的として、CFRTPの成形加工技術を確立してきた³⁾。CFRTPの製品化においては、次の段階として成形部品を他の部品（部材）と接合する技術が必要となっている。現在、FRP部品と他の部品（例えば金属部品）の接合は、穴をあけてボルトで固定する機械的締結と接着剤による接着が中心である。しかし、機械的締結では、穴あけ加工時にFRP部品の繊維が破損する危険性や工程数の増加、接着では所定の強度を発現させるための接着剤の養生に時間がかかる等の課題がある。そこで、FRPの製品化に向けて、FRPに適した接合技術の確立が必要不可欠となっている^{4,5)}。

本研究では、FRPを効率良く強固に接合する技術を開発することを目的とし、超音波接合を活用してFRPに適した接合技術を確立する。

これまでに超音波接合技術により、CFRTPを用いて同種材接合と異種材接合の接合条件を検討し、引張せん断試験による接合強度を評価してきた⁶⁻⁸⁾。本年度は、マルチマテリアル化に向けた取り組みの基礎研究として

超音波縦振動によりCFRTPとA5052を用いて異種材料接合を行い、その接合条件を検討し、引張せん断試験による接合強度を評価して知見を得たので報告する。

2. 実験

2.1 試験片

試験片は、マトリックス樹脂がナイロン6のCFRTP（Bond-Laminates製、TEPEX 202、CF/PA6）とA5052を用い、どちらの試験片も厚さ2mmの板材から100mm×25mmに切り出した。ただし、表面処理や表面改質を行わない試験片を使用した。

2.2 超音波接合

CF/PA6とA5052の異種材接合は、A5052を下側にし、その上側にCF/PA6を端部から12.5mm重ねて治具にセットし、超音波溶着機（精電舎電子工業（株）製、DSG2210）を用いて所定の接合条件において超音波接合を行った。ここで接合条件は、振幅は28 μ m、30 μ m、32 μ m、ホーンの設定圧力（加圧力）は0.15MPaとし、加振時間は3秒から6秒まで変え、加振終了後のホルド時間は10秒とした。なお、加振時間は超音波を加振した時間、接合エネルギーは接合中に試験片に与えたエネルギー、沈込量は加振時間中にCF/PA6が沈み込んだ量とした。

2.3 温度履歴

超音波接合における基礎的な実験条件を検討するために温度履歴測定を行った。温度履歴測定は、CF/PA6とA5052の重なり部分の中心付近に ϕ 0.1mmの熱電対を埋め込み、データロガーを用いて各接合条件における試験片の温度変化を測定した。

2.4 引張せん断強度

超音波接合によるCF/PA6とA5052の接合強度を把

* 次世代技術部

握するために、シングルラップ継手試験による引張せん断試験を万能材料試験機（(株)島津製作所製、AG-IS 100kN）により行い、接合部が破壊する最大荷重を接合強度とした。また、引張試験後の試験片の界面を走査型電子顕微鏡（日本電子(株)製、JSM IT-100）とマイクロスコープ（(株)キーエンス製、VHX-1000）により観察し、マトリックス樹脂の熔融状態も併せて評価した。

3. 結果及び考察

3. 1 温度履歴

加圧力を 0.15MPa、振幅を 28 μ m、30 μ m、32 μ m、加振時間を 5 秒とし、CF/PA6 と A5052 を超音波接合（CF/PA6-A5052）した時の温度履歴の一例と前報⁸⁾で報告した CF/PA6 同種材同士を超音波接合（CF/PA6-CF/PA6）した温度履歴の一例（加圧力 0.1MPa、振幅 30 μ m、加振時間 3 秒）を比較用に合わせて図 1 に示す。図 1 より、CF/PA6-A5052 の温度履歴から、すべての振幅において、超音波加振直後から界面温度はピーク温度（それぞれ約 240 $^{\circ}$ C、約 270 $^{\circ}$ C、約 330 $^{\circ}$ C）まで上昇し、加振終了後は徐々に低下することが分かった。また、界面のピーク温度は振幅が大きい程高くなった。一方、CF/PA6-CF/PA6 の温度履歴は、加振開始直後に急激に界面温度が上昇し、約 1 秒でピーク温度（約 400 $^{\circ}$ C）になり、その後は徐々に低下し、加振終了後は徐々に低下した。

CF/PA6-A5052 と CF/PA6-CF/PA6 の温度履歴を比較すると、加振開始直後からピーク温度までの到達時間（温度上昇率）とピーク温度に顕著な違いがあることが分かった。これは材料の比熱、熱伝導率の違いが影響していると考えられる。

3. 2 接合強度評価

CF/PA6-A5052 の加振時間と接合強度の関係を図 2 に示す。図 2 より、振幅が 28 μ m では、加振時間が 4 秒以下では接合ができず、5 秒では接合強度のバラつきが大きく、6 秒の時の接合強度は 5 秒の時の接合強度より低下する傾向が見られた。振幅が 30 μ m では、加振時間が 3 秒以下では接合ができず、4 秒では接合強度が低く、バラつきが大きかった。5 秒の時に接合強度は最大となり、6 秒では低下する傾向が見られた。振幅が 32 μ m では、加振時間が 3 秒では接合強度は非常に低く、4 秒と 5 秒の時の接合強度は同程度であったが、5 秒の時の接合強度はバラつきが大きくなる傾向が見られた。

これらの結果から、加振時間と接合強度には明確な相関関係は見られなかったが、振幅により接合強度が最大になる加振時間が存在することが分かった。

それぞれの振幅において接合強度が最大となる加振時間では、界面のマトリックス樹脂は十分に熔融していると考えられる。また、接合強度のバラつきは、マトリックス樹脂の界面での熔融量と界面での存在量、アルミニウム合金の表面状態が関係していると考えられる。加振

時間が短い場合はマトリックス樹脂の界面での熔融量が少ない又は安定しないため、界面での熔融量が異なり接合強度に影響したと考えられる。一方、加振時間が長い場合は、炭素繊維がはみ出し、炭素繊維上のマトリックス樹脂の界面での存在量が減少することが接合強度に影響したと考えられる。また、アルミニウム合金の表面酸化膜の厚さにより接合強度が異なることから、アルミニウム合金の表面状態が接合強度に影響したと考えられる。

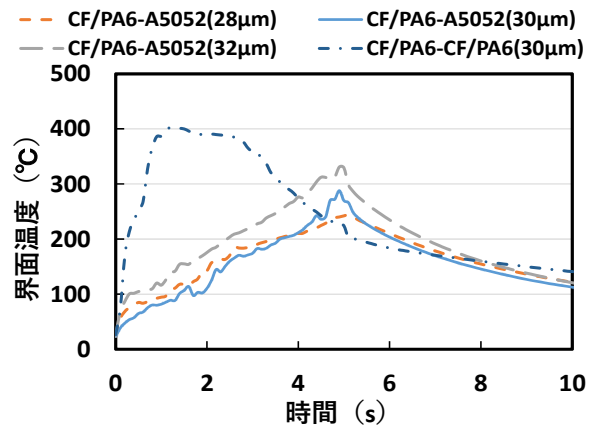


図 1 CF/PA6-A5052 と CF/PA6-CF/PA6 の温度履歴 (CF/PA6-A5052 : 加圧力 0.15MPa, CF/PA6-CF/PA6 : 加圧力 0.1MPa)

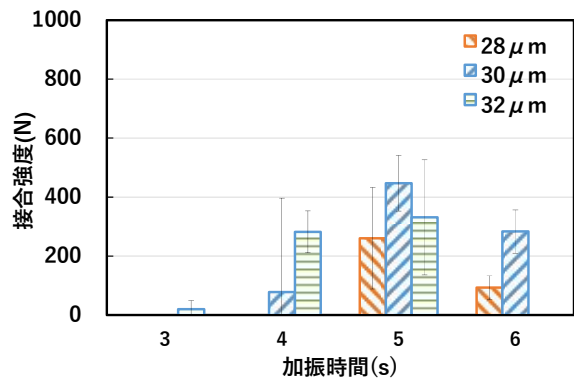


図 2 CF/PA6-A5052 の加振時間と接合強度の関係 (加圧力 0.15MPa)

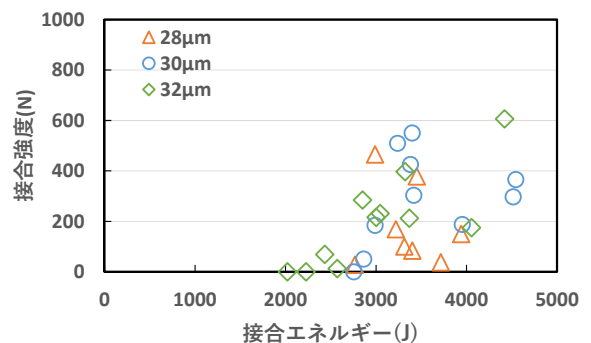


図 3 CF/PA6-A5052 の接合エネルギーと接合強度の関係 (加圧力 0.15MPa)

次に CF/PA6-A5052 の接合エネルギーと接合強度の関係を図3に示す。図3より、CF/PA6 と A5052 を接合するためには、振幅が 28 μm 、30 μm では接合エネルギーが 2800J 以上必要であることが分かった。また、振幅が 32 μm では接合エネルギーが 2400J 以上で接合が可能であったが、接合エネルギーが 2600J 未満では接合強度が低かった。

いずれの振幅においても接合エネルギーと接合強度は密接な関係があり、CF/PA6 と A5052 を約 200N 以上の接合強度で接合する場合は、接合エネルギーが 2800J 以上必要であると考えられる。

次に CF/PA6-A5052 の沈込量と接合強度の関係を図4に示す。図4より、振幅が 28 μm では沈込量が 0.65mm 未満では接合できなかった。また、振幅が 30 μm では沈込量が 0.50mm 未満、振幅が 32 μm では沈込量が 0.70mm 未満では接合することができなかった。

いずれの振幅においても沈込量と接合強度は密接な関係があり、沈込量が多い場合は接合強度が高くなる傾向が見られた。約 200N 以上の接合強度で接合する場合は、0.90mm 以上の沈込量が必要であると考えられる。

次に CF/PA6-A5052 の接合エネルギーと沈込量の関係を図5に示す。図5より、接合エネルギーと沈込量はいずれの振幅においても比例関係であることが分かった。接合エネルギーが低い場合は、CF/PA6 のマトリックス樹脂が十分溶融していないため沈込量が少ないが、接合エネルギーが高い場合は、マトリックス樹脂が十分に溶融しているため、沈込量が多くなったと考えられる。

3. 3 接合界面評価

振幅 30 μm 、加振時間 4 秒（接合強度 0N、接合エネルギー2755J、沈込量 0.476mm）と振幅 30 μm 、加振時間 5 秒（接合強度 423N、接合エネルギー3381J、沈込量 0.998mm）で接合した CF/PA6-A5052 の引張試験後の界面写真、二次電子像（SEM 像）及びマイクロスコプの 3D イメージを図6(a),(c),(e)と(b),(d),(f)にそれぞれ示す。図6(a),(b)の界面写真より、どちらの CF/PA6 も沈み込むだけでなく、炭素繊維とマトリックス樹脂がはみ出していた。また、引張試験後の CF/PA6 界面はいずれも平坦であった。これはマトリックス樹脂が溶融した状態で A5052 と接するため、A5052 の表面形状が転写され、平坦になったと考えられる。

接合強度が 0N であった CF/PA6-A5052（加振時間 4 秒）の CF/PA6 界面は、図6(c)の SEM 像より平坦な部分、小さな気泡と炭素繊維上のマトリックス樹脂が少なくなった部分が観察され、図6(e)の 3D イメージよりマトリックス樹脂が存在しない部分（炭素繊維）は観察されなかった。これらの結果と接合エネルギー、沈込量から、マトリックス樹脂は溶融していたが溶融量が不十分であったと考えられる。

一方、接合強度が 423N であった CF/PA6-A5052（加振時間 5 秒）の CF/PA6 界面は、図6(d)の SEM 像より

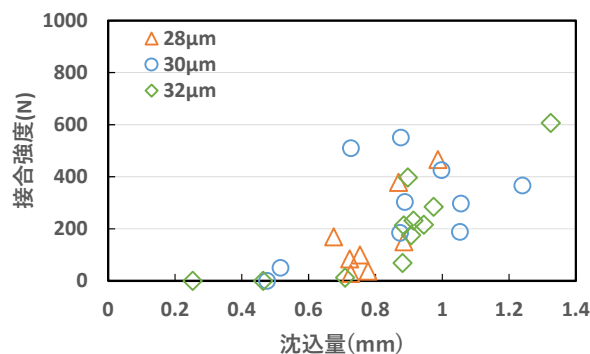


図4 CF/PA6-A5052 の沈込量と接合強度の関係 (加圧力 0.15MPa)

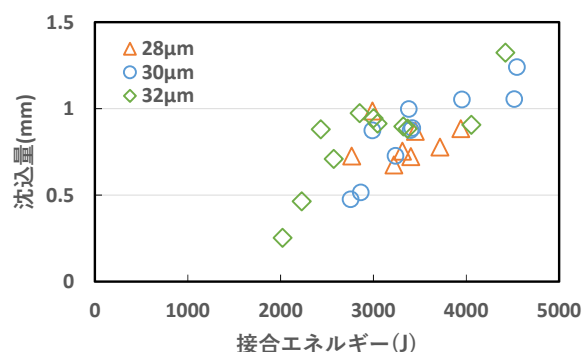


図5 CF/PA6-A5052 の接合エネルギーと沈込量の関係 (加圧力 0.15MPa)

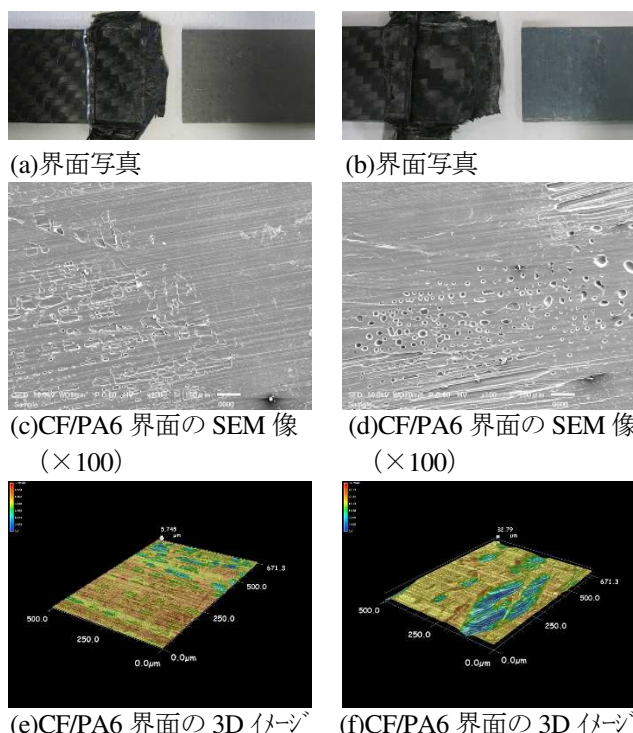


図6 CF/PA6-A5052 の界面観察

(a),(c),(e)加圧力:0.15MPa, 振幅:30 μm , 加振時間:4 秒

(b),(d),(f)加圧力:0.15MPa, 振幅:30 μm , 加振時間:5 秒

平坦な部分、気泡部分と炭素繊維上にマトリックス樹脂が存在しない部分（A5052側にCF/PA6が固着）が観察され、図6(f)の3Dイメージより炭素繊維上のマトリックス樹脂が存在しない部分が観察された。これらの結果から、マトリックス樹脂は十分に溶解していたと考えられる。

4. まとめ

CF/PA6-A5052の接合条件を検討し、接合強度を評価して次の結果を得た。

- 1) CF/PA6-A5052の界面の温度履歴は、すべての振幅において超音波の加振直後からピーク温度まで徐々に界面温度が上昇し、加振終了後は徐々に低下することが分かった。また、CF/PA6-CF/PA6の界面の温度履歴とは異なる傾向を示すことが分かった。
- 2) 振幅、加振時間によりCF/PA6-A5052の接合強度は異なるが、超音波縦振動によりCF/PA6とA5052を接合することができた。また、振幅により接合強度が最大になる加振時間には違いがあることが分かった。
- 3) CF/PA6-A5052の接合エネルギーと接合強度には密接な関係があることが分かり、CF/PA6とA5052を約200N以上の接合強度で接合する場合は、2800J以上の接合エネルギーが必要であると考えられる。
- 4) CF/PA6-A5052の沈込量と接合強度は密接な関係があり、いずれの振幅においても沈込量が大きい場合は、接合強度が高くなることが分かった。また、約200N以上の接合強度で接合する場合は、0.90mm以上の沈込量が必要であると考えられる。
- 5) CF/PA6-A5052の接合界面の観察から、接合強度が430NであったCF/PA6界面のマトリックス樹脂は十分溶解していたが、接合できなかったCF/PA6界面のマトリックス樹脂は、溶解量が不十分であったと考えられる。

【謝 辞】

本研究の遂行にあたり、共同研究先の岐阜大学工学部仲井教授と名合特任教授に、ご指導・ご助言をいただきましたことに深く感謝いたします。

【参考文献】

- 1) 三瓶和久ら、レーザー加工学会誌, Vol.22, No.3, 2015
- 2) 永塚公彬ら、溶接学会全国大会講演概要集, No.95, pp54-55, 2014
- 3) 道家ら、岐阜県工業技術研究所研究報告 No.4, pp45-48, 2016
- 4) 原賀康介・佐藤千明、自動車軽量化のための接着接合入門, 日刊工業新聞社, 2015
- 5) 中田一博、異種材料接合, pp95-120, 日経BP社, 2014
- 6) 道家ら、岐阜県工業技術研究所研究報告 No.5, pp44-

47, 2017

- 7) 西垣ら、岐阜県工業技術研究所研究報告 No.6, pp45-48, 2018
- 8) 西垣ら、岐阜県工業技術研究所研究報告 No.7, pp43-46, 2019

軽量材料／情報技術を活用した福祉機器の開発（第1報）

千原健司*、仙石倫章*、鈴木貴行*、西垣康広*

Development of assistive products utilizing innovative lightweight material and information technology (I)

CHIHARA Kenji*, SENGOKU Tomoaki*, SUZUKI Takayuki* and NISHIGAKI Yasuhiro*

平成26～30年度に取り組んだヘルスケア機器開発プロジェクトでは、軽量、高強度、高剛性の特長をもつ熱可塑性炭素繊維複合材料（以降、「CFRTP」）を用いて、3DスキャナーやCAE等の情報技術により設計・評価を行い、CFRTP製下肢装具を開発した^{1,2)}。今回、これらの開発要素技術を活用し、県内企業を支援した2件の研究開発事例について報告する。

1. はじめに

県は、成長・雇用戦略の中で医療福祉機器分野を成長産業の一つに位置付けており、当センターでは同戦略に沿って平成26～30年度にヘルスケア機器開発プロジェクトに取り組み、脳卒中リハビリ用CFRTP製下肢装具等を実用化した^{1,2)}。

本年度からは、本産業の持続的な成長を支援するため、プロジェクト研究で蓄積したCFRTPの成形加工技術、3Dスキャナーや3D-CAD/CAE、足圧分布測定システム等の情報技術を活用し、新たに県内企業を支援する形で研究開発に取り組んでいる。今回、これらの開発要素技術を活用し、CFRTP製インソール及びCFRTP製体幹装具の開発に取り組んだ結果について報告する。

2. 企業ニーズと開発内容

2.1 CFRTP製インソール

インソール（中敷）とは、通常、靴の内側底に装着して、足裏への衝撃を緩和することを目的としたパーツであり、発泡樹脂に布や皮を積層して作られているものが多い。一般の靴に用いられる他に、扁平足や外反母趾等、足の不自由な方の歩行支援や症状進行防止等の医療用具、スキーやランニング等での身体機能を向上させるスポーツ用品に用いられている。

特に、医療やスポーツ用途においてインソールを用いる場合は、オーダーメイド品であること³⁾、また、軽量で高剛性であることが望ましい。そこで、インソールを製造販売している県内企業からの開発ニーズを受けて、上記特性を満たすCFRTP製オーダーメイドインソール2種類を開発した。

2.2 CFRTP製体幹装具

体幹装具とは、圧迫骨折や椎間板ヘルニア等の患者に処方され、体幹の動きを制限し、身体への負担を軽減する目的で使用されるものである。

県内の義肢装具会社では、病院からの依頼を受けて、

ステンレス板材を用いて体幹装具を製作しているが、「板金や溶接作業に手間がかかるためこれを省力化した」、「一層軽量化した体幹装具がほしい。」とのニーズがあるため、CFRTP製体幹装具を開発した。

3. 開発結果

3.1 CFRTP製インソール

3.1.1 オーダーメイドインソール

CFRTPを用いたインソールは、既に数種類の商品が市販されているが、既定サイズ品が多く、オーダーメイド品はスキー等のスポーツ用途に限られており少ない。また、オーダーメイド品は、凹型の足型を用いて、これに石膏を流し込んで凸型を製作し、この凸型上に、CFRTPを含む複数の材料を積層し、熱と圧力をかけてプレスして製作するので、手間がかかる。

今回、我々は各個人の足型を採取し（図1(a)）、これから3Dスキャナー（Creaform社製、Go!SCAN50）を用いて形状データを取得し（図1(b)）、スキャナー付属のソフトウェアで不要なデータを取り除くトリミング処理等を行い（図2(a)）、3D-CAD（SolidWorks社製、SOLIDWORKS Premium）に転送してサーフェスデ

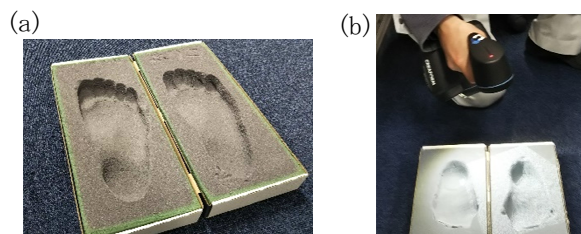


図1 (a)足型採取 (b)形状測定

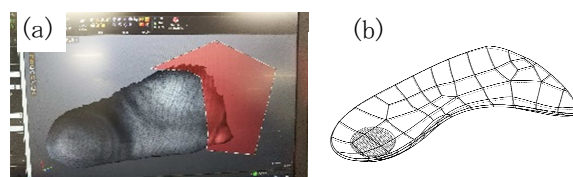


図2 (a)トリミング処理 (b)3D形状データ

* 次世代技術部

ータに変換、厚み付け処理でソリッドデータとし、滑り止めとして、かかとと下部分のデータを加えて、インソールの3D形状データを作成した(図2(b))。本データをSTLファイルに変換し、これを用いて炭素繊維複合材料が立体造形できる3Dプリンター(Markforged社製、Mark Two)によりインソールを試作した(図3、以降、試作インソール)。本3Dプリンターは、様々な材料を選択して造形できるが、今回は、ナイロン樹脂(PA6)に短い炭素繊維を練り込んだフィラメント材料(Markforged社製、ONYX)を使用した。機械的な物性値を得るため、クーポン試験片(100mm×15mm×2mm(t))を造形し、万能試験機(Instron製、5985型)により3点曲げ試験⁴⁾を行った。この結果、最大曲げ応力は25.9MPa(n=3、σ=3.7)、曲げ弾性率は2.0GPa(n=3、σ=0.1)であった。本製作方法は、従来のオーダーメイド品の製作方法と比較して工程が簡略化され、3Dデータとして工程を残すことが可能であるため、再製作や履歴の管理が容易である。



図3 試作したCFRTP製インソール

次に、インソールを装着した靴をはいて30秒間、通常の速さで歩行した時の、足裏に掛かる圧力を、足圧分布測定システム(T&T medilogic社製、medilogic WLAN Measuring Insole)により測定した。装着するインソールは、試作インソールの他に、元々靴に付帯しているインソール(以降、インソールA)、及び市販されている既定サイズのCFRTP製インソール3種(以降、インソールB、C、D)の計5種類について評価した。

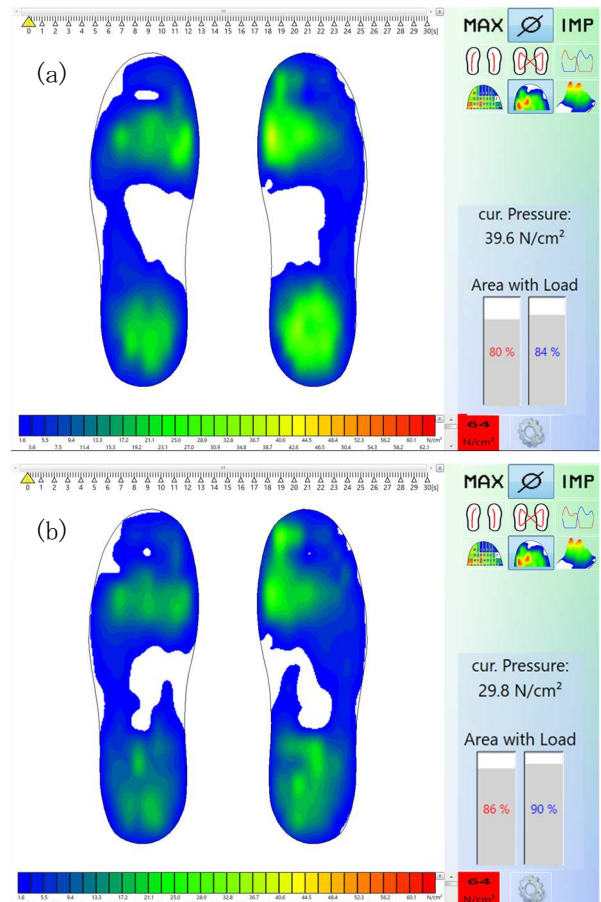


図4 歩行時の足裏圧力分布

(a)インソールA装着時 (b)試作インソール装着時

図4に、試作インソール及びインソールAでの足裏圧力分布の測定結果を示す。図4の(a)より、インソールAでは、左足裏80%/右足裏84%の部分で体重を支えており、足裏に掛かる最大圧力は39.6N/cm²であった。一方、試作インソールでは、図4の(b)より、左足裏86%/右足裏90%の部分で体重を支えており、足裏に掛かる最大圧力は29.8N/cm²であった。試作インソールは、インソールAと比較して、足裏全体に荷重が掛かっており、足裏に掛かる最大圧力を軽減していることが分かった。同様に、試験した全てのインソールの被荷重足裏面積の割合と足裏最大圧力を表1に示す。試作インソールは、既製品のCFRTP製インソールと比べ、体重を支える足裏割合は最も多く、また足裏への最大圧力は最も小さいことが分かった。本試作インソールを装着した靴を試作以来、外出時におおよそ3か月間履き続けているが、インソールは消耗することなく、靴は良好な履き心地を維持している。

表1 足裏最大圧力と被荷重足裏面積の割合

	試作インソール	インソールA	インソールB	インソールC	インソールD
左足裏の面積割合[%]	86	80	85	82	81
右足裏の面積割合[%]	90	84	88	88	86
最大圧力[N/cm ²]	29.8	39.6	37.7	29.8	35.7

3. 1. 2 RQと連結可能なインソール

今回、共同研究を行った企業とはこれまでに、一般の靴を下肢装具として使用可能にするパーツを共同開発¹⁾し、市販している(図5(a)、商品名「RQ:アルク」)。これは、足を支えるカフ部分を備えたCFRTP製L字型支柱と、靴底のアウトソール部分に内蔵して、前記支柱を抜き差し可能なソケットで構成される⁵⁾(図5(b))。

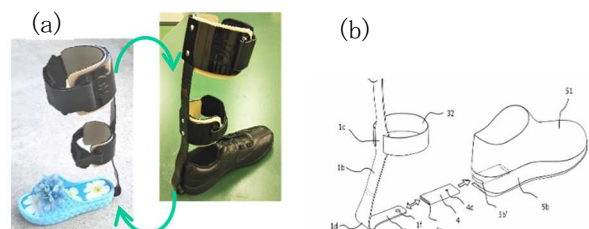


図5 一般の靴を下肢装具にするパーツ「RQ」
(a)靴への装着例 (b)原理(特許の代表図面)

様々な靴のアウトソール部分にソケットを内蔵することにより、支柱の着脱のみで、様々な靴を下肢装具として利用することができる。しかし、本パーツは、靴底が薄かったり柔らか過ぎたりする場合には不適であった。

そこで今回、CFRTP 製支柱を差し込むことが可能な CFRTP 製インソールを新たに開発した（特許出願中）。これにより、大半の靴を下肢装具として利用することが可能になった。図6に使用イメージを示す。靴のアップア後方部分に横方向のスリットを入れて、ここを通してインソールに支柱を差し込むため、靴のアウトソールの材質等に関係なく靴を下肢装具として利用することができる。また、オーダーメイドインソールにより立位・歩行をサポートできるため、下肢装具全体の歩行支援機能向上も期待できる。

当初は、樹脂 3D プリンターによりインソールを試作したため、挿入口付近に亀裂が生じ、すぐに破損した

(図7)。これは、かかと後方の挿入口周辺部分の強度不足と推定される。そこで、炭素繊維複合材料を立体造形できる 3D プリンターにより新たなインソールを試作した。特に今回は、挿入口周辺の体積が小さい部分で剛性と強度を確保する必要があるため、前出の短い炭素繊維を練り込んだフィラメント材料 (ONYX) と、連続炭素繊維を束ねてナイロン樹脂 (PA6) を含浸させたフィラメント材料 (Markforged 社製、Carbon Fiber CFF) を混合して積層する条件により造形した。連続繊維の方向は、材料が疑似等方材となるように 0°/45°/90°/45° の繰り返しとし、挿入口周辺を重点的に補強するために、下方から 72 層までの部分に Carbon Fiber CFF を混合した。

本材料の機械的な物性値を得るため、クーポン試験片 (100mm × 15mm × 2mm(t)) を造形し、万能試験機 (Instron 製、5985 型) により 3 点曲げ試験⁴⁾を行った。この結果、最大曲げ応力は 295.3MPa (n=3、σ=16.5)、曲げ弾性率は 31.0GPa (n=3、σ=4.0) であった。本物性値を基に CAE 解析 (SolidWorks 社製、SOLIDWORKS Simulation) を行った。境界条件は、インソールかかと底の φ25mm 円内部を固定し、インソールと支柱は剛体ピンで結合し、互いに接触するものとした。また、人が歩行する際に足先が下方に変位する足関節の最大角度が 15°となる⁶⁾ように CFRTP 支柱上部 250mm の部分に荷重 38N を与えた。図8に上記条件におけるミーゼス応力の分布結果を示す。図8(a)、(b)より、インソール外周部と内部のミーゼス応力の最大値はそれぞれ、98MPa、167.7MPa であった。これらは曲げ試験による最大曲げ応力値 295.3MPa と比較して十分小さいため、インソールは破壊しないと推定できる。

設計した CFRTP 製インソールを 3D プリンターで造形し、RQ と連結させた試作を図9(a)に示す。これを靴に装着 (図9(b)) し歩行したところ、破壊は起こらず、また尖足防止等の下肢装具としての機能も果たしていることを確認した。

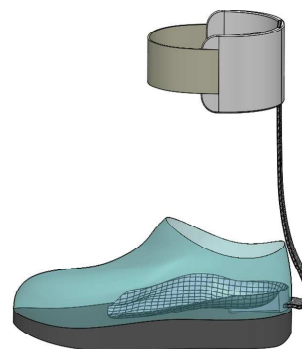


図6 「RQ」と連結可能な CFRTP 製インソール



図7 「RQ」と連結可能なインソールの初号試作

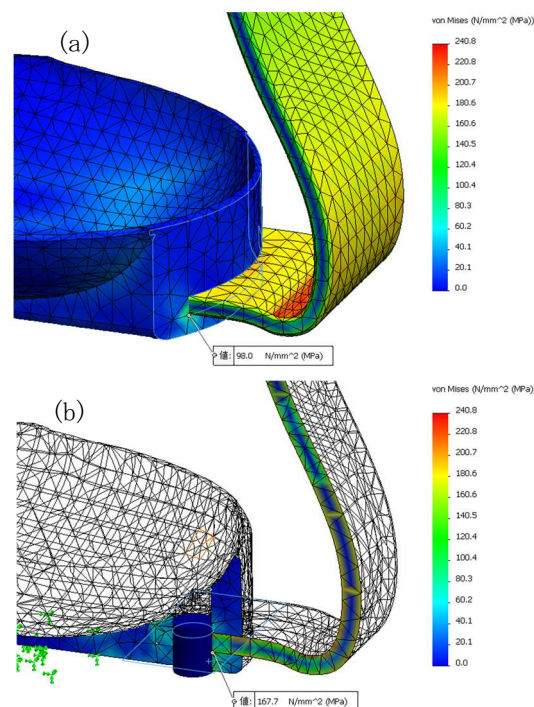


図8 CFRTP 製インソールの強度解析結果
(a)インソール外周部 (b)インソール内部

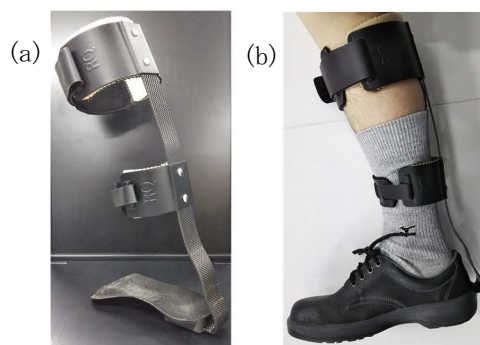


図9 「RQ」と連結可能な CFRTP 製インソール
(a)RQ と連結させたインソール (b)靴に装着

3. 2 CFRTP 製体幹装具

共同研究を行った義肢装具会社では、医師から指示された石膏モデル上の配置を参考に、厚み1mm幅15mmのステンレス板を板金で曲げ、溶接で連結して体幹装具のフレームを製作しているが(図10)、作業工程が多いため削減したい、また、体幹装具自体の軽量化も図りたいとの要望がある。

そこで、ステンレス板の代わりにCFRTPを用いることにより軽量化を図り、また、情報技術を活用することで作業工程の簡略化を図った。提案する作業工程を次に、また、提案する作業工程による試作例を図11に示す。

- ① 石膏モデル上のフレームの配置を3Dスキャナーで取得する。
- ② 3D-CAD (SolidWorks社製、SOLIDWORKS Premium)でトリミング処理した後に、CAD付属の機能により、曲面データを平面データに展開する。
- ③ 平面データを基に、加工用2次元データ(DXFデータ)を作成し、CFRTP板材をウォータージェット加工機(Flow International社製、FlowMach3 1313b-XD型)で切断する。
- ④ 切断したCFRTP材を1mm厚のシリコンゴム2枚で挟み、オープンにて270°Cで8分間加熱する。
- ⑤ シリコンゴムで挟んだCFRTP材を取り出して、そのまま石膏モデルに体重をかけて押し当て、1分程押さえた後に、シリコンゴムを外す。(完了)

なお、CFRTP材は、表層が綾織CFクロス、内層がCF-UD材を0°と90°の交互に積層して板材としたもの(日鉄ケミカル&マテリアル社製、NS-TEPreg)を用いた。CFRTPの厚みは、弾性率が200GPa程度である1mm厚のステンレス材を曲げた時に同等となる厚みをCAEにより計算(CFRTP材の弾性率は40GPa)すると1.5mm厚程度であるが、成形時に強度が低下する恐れがあるため、今回は2mm厚とした。

CFRTP材により作製した体幹装具のフレームの重量は約183gであり、ステンレス材による従来品476gと比較して、大幅に軽量化できることを確認した。しかし、表面に若干のシワが発生したため、装具としての臨床評価までは実施できず、今後、シワの発生しない成形方法を引き続き検討していく予定である。

4. まとめ

軽量材料及び情報技術を活用して、県内企業のニーズを支援する形で、新たに取り組んだ開発事例を紹介した。本事例を参考に、改めて当センターにニーズをお教えいただき、ご支援させていただければ幸いです。

【謝 辞】

CFRTP製インソールは、ヒューマニック株式会社とまた、CFRTP製体幹装具は、株式会社名光ブレースと共同して開発しています。皆様に深く感謝いたします。

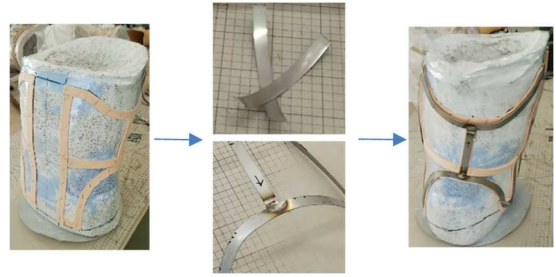
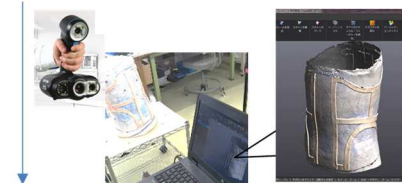


図10 体幹装具の従来の製作方法

①手本を3Dスキャン



②CAD上でトリミングして、平面データに展開



③平面データを基に板材をWJ加工機で加工



④シリコンゴムで挟んでオープンで加熱



⑤石膏型に押し当てて、1分程押さえた後に、シリコンゴムを外せば完成



図11 提案する作業工程による試作例

【参考文献】

- 1) 千原ら, 岐阜県工業技術研究所研究報告 No.6, pp43-44, 2018
- 2) 千原ら, 岐阜県工業技術研究所研究報告 No.7, pp41-42, 2019
- 3) 西村剛史, 足と靴の科学, 日刊工業新聞社, 2013
- 4) JIS K 7074:1988 の試験条件
- 5) 特許第 6307728 号
- 6) 月城慶一ら, 観察による歩行分析, 医学書院, 2005

FRP サンドイッチ材の成形技術に関する研究 (第2報)

仙石倫章*、西垣康広*、山田孝弘*

Study of the forming technique of Fiber Reinforced Plastic sandwich panels (II)

SENGOKU Tomoaki*, NISHIGAKI Yasuhiro* and YAMADA Takahiro*

炭素繊維複合材料(以下、「CFRP」と表記)は軽量化部材として、様々な業界で製品に多用されるようになってきた。しかし、材料コストの高さが普及の壁となっており、CFRPが採用されている製品は、高付加価値が求められる一部のものに限定されている。そこで本研究では、CFRPの一部をコア材と呼ばれる中間材料に置き換えるCFRPサンドイッチ材に着目した。材料コストが比較的安価なポリエチレンテレフタレート(以下、「PET」と表記)発泡体とCFRPを用いたCFRPサンドイッチ材の成形品について、3点曲げ試験と落錘衝撃試験を実施した。その結果、比剛性についてCFRP板と同等、衝撃後の損傷幅はCFRP板より半減することを確認した。

1. はじめに

CFRPは、金属材料の代替材料として様々な分野で開発が行われている。県内のプラスチック業界からは安価なCFRP製品を作りたいという要望が多いが、実際の製品に応用するには材料コストが高い等の課題がある。そのため、製品すべてをCFRPで作るのではなく、CFRPの一部をコア材と呼ばれる中間材料に置き換えるCFRPサンドイッチ材に着目した。CFRPサンドイッチ材は、引張りや圧縮に強いスキン材で、せん断性のある軽量のコア材をはさんで一体化構造としたもので、大きな曲げ剛性が得られる。

本研究ではCFRPサンドイッチ材の材料コスト削減のため、コア材に比較的安価なPET発泡体を採用した。コア材にPET発泡体を用いた、CFRPサンドイッチ材成形技術の基礎研究として、これまでに温風ヒーター加熱を使用した手曲げ成形、サーボプレス成形、ダイヤフラム成形及び、オートクレーブ成形について、成形条件を検討し、結果について報告した¹⁾。

本年度は、CFRPサンドイッチ材の評価技術の確立とデータの蓄積を目的とし、3点曲げ試験と落錘衝撃試験を実施したので、その結果について報告する。

2. 実験

2.1 材料

本研究で使用した材料を図1に示す。CFRPサンドイッチ材のスキン材には、炭素繊維クロスとエポキシ樹脂の複合材料である熱硬化性CFRPプリプレグ(三菱ケミカル製、TR3523 381GMX)を用い、コア材にはPET発泡体(3A Composites製、Airex T92.80、Airex T92.100)を用いた。Airex T92.80とAirex T92.100の密度はそれぞれ85kg/m³と100kg/m³である。CFRP板はCFRPプリプレグを10Ply(2mm)積層し、CFRPサンドイッチ材は、

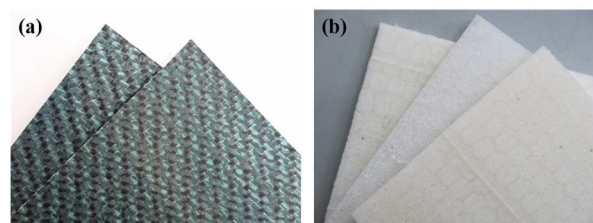


図1 材料:(a)CFRPプリプレグ、(b)PET発泡体

5mm厚のコア材(Airex T92.80またはAirex T92.100)の上下面にCFRPプリプレグを3Ply(0.6mm)ずつ積層しオートクレーブにて成形した(以下それぞれ「CFRP/T92.80」、「CFRP/T92.100」と表記)。CFRP板、CFRP/T92.80、CFRP/T92.100の切断はダイヤモンドソー(ラクソー製、ME-400)を使用して所定のサイズに切断した。

2.2 3点曲げ試験

成形したCFRP板とCFRPサンドイッチ材をそれぞれ100×15mm、260×25mmに切り出して、万能試験機(Instron製、5985型)により3点曲げ試験を行った。圧子の半径は5mm、支点の半径は5mm、支点間距離は80mm(CFRP板)、240mm(CFRPサンドイッチ材)、試験速度は2mm/min(CFRP板)、5mm/min(CFRPサンドイッチ材)とし、試験片が破壊するまでの荷重と変位を測定した。

2.3 落錘衝撃試験

成形したCFRP板とCFRPサンドイッチ材を150×100mmに切り出して、落錘衝撃試験機(Instron製、CEAST 9350型)により衝撃を加えた。φ16mmのインサートを使用し、与えたエネルギーは16.6Jとした。

2.4 超音波探傷試験

衝撃試験後の試験片について、超音波検査装置(日本クラウトクレマー製、SDS-Win6600R AM)により損傷幅を測定した。また、投影画像より、損傷の直径が最大となる所を損傷幅とした。

* 次世代技術部

3. 結果及び考察

3.1 比強度および比弾性率

3点曲げ試験結果から算出したそれぞれの材料の比強度を図2に、比弾性率を図3に示す。CFRP/T92.80、CFRP/T92.100の比強度は、CFRP板と比較すると、それぞれ1/4、1/3程度であった。比弾性率に関してはCFRP板とほぼ同等であることがわかった。

3.2 曲げ試験後の破壊様式

曲げ試験後の試験片の側面写真を図4に示す。CFRP/T92.80とCFRP/T92.100は共にコア材の座屈により破壊しており、スキン材とコア材の界面も破壊していることがわかった。コア材の座屈については、局所荷重が負荷されたことにより圧縮破壊が起こったと考えられる。また、スキン材とコア材の界面の破壊については、界面の層間強度が弱いことが原因と考えられる。これらの理由により、CFRP板よりも、CFRP/T92.80、CFRP/T92.100の比強度は低くなったと考えられる。

本研究によりコア材の圧縮強度と、スキン材とコア材の層間強度に課題がある事が判明したので、今後、コア材の圧縮強度、層間強度向上のための取り組みを実施していく予定である。

3.3 衝撃試験後の損傷幅

落錘衝撃試験後の損傷幅は、CFRP板が45mm、CFRP/T92.80が27mm、CFRP/T92.100が24mmであり、CFRPサンドイッチ材の損傷幅は、CFRP板の約半分程度であった。また、コア材の密度が大きいCFRP/T92.100の方が、コア材の密度の小さいCFRP/T92.80よりも損傷幅が小さくなることがわかった。

3.4 衝撃試験後の破壊様式

落錘衝撃試験後の試験片の表面写真を図5に示す。CFRP板は衝撃が材料の裏側まで到達しており、穴が貫通していたが、CFRP/T92.80は裏側まで損傷は到達していなかった。CFRP/T92.100もCFRP/T92.80と同様の表面状態であり、CFRPサンドイッチ材は高い耐衝撃性を有していることがわかった。

4. まとめ

PET発泡体をコア材に用いたCFRPサンドイッチ材について物性試験を行い、次の結果を得た。

1) 3点曲げ試験を行った結果、CFRP/T92.80とCFRP/T92.100の比強度は、CFRP板と比較するとそれぞれ、1/4と1/3程度であり、比弾性率はCFRP板と同等であることが分かった。また破壊様式により、今後の課題が判明した。

2) CFRP/T92.80とCFRP/T92.100の落錘衝撃試験後の損傷幅は、CFRP板の約半分程度であり、CFRP板単体より高い耐衝撃性を有していることがわかった。

今後はコア材の圧縮強度の向上、界面接合力の向上に取組み、成形品の評価を引続き実施し、技術移転を実施する予定である。

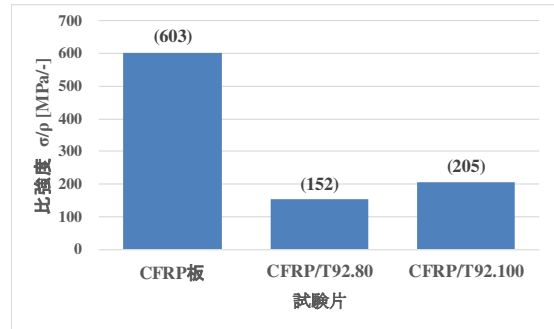


図2 各試験片の比強度

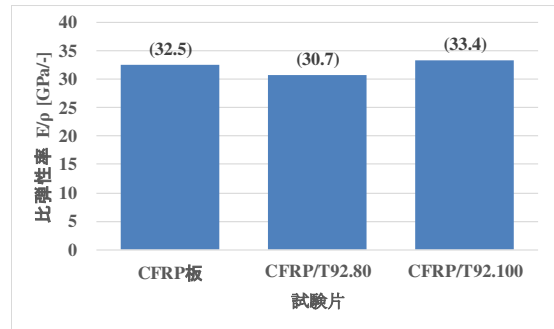


図3 各試験片の比弾性率

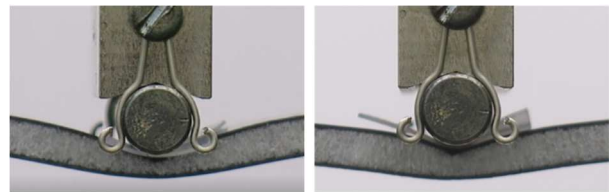


図4 曲げ試験後の側面写真
(a) : CFRP/T92.80, (b) : CFRP/T92.100

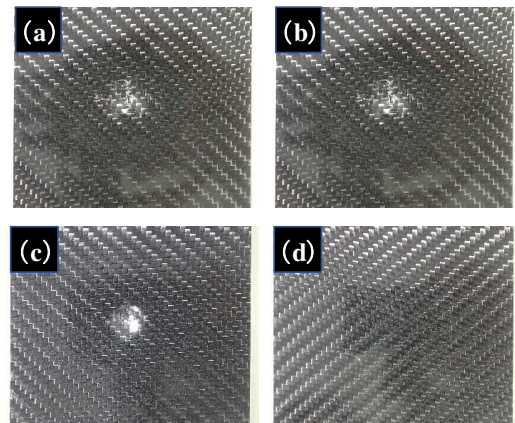


図5 衝撃試験後の試験片の表面写真
(a) : CFRP板表面, (b) : CFRP板裏面
(c) : CFRP/T92.80表面, (d) : CFRP/T92.80裏面

【謝 辞】

本研究の遂行にあたり、岐阜大学工学部仲井教授に、ご指導・ご助言いただきましたことに深く感謝いたします。

【参考文献】

- 1) 仙石ら,岐阜県工業技術研究所研究報告 No.7, pp55-58,2019

熱可塑性 FRP の疲労評価・推定・診断に関する研究（第2報）

鈴木貴行*、千原健司*、山田孝弘*

Study on long-term durability in fatigue of fiber reinforced thermoplastics (II)

SUZUKI Takayuki*, CHIHARA Kenji* and YAMADA Takahiro*

熱可塑性 FRP は、マトリックス樹脂の物性が環境要因に応じて変化するため、疲労特性のデータベース化が困難である。第1報¹⁾では、熱可塑性 CFRP の基本的な疲労特性の評価方法を確認するために、PA6 と連続炭素繊維の織物からなる熱可塑性 FRP の引張疲労試験、及び両振り平面曲げ疲労試験を行い、引張疲労試験における課題、及び両振り平面曲げ疲労試験における結果のバラツキの改善方法について報告した。本報では、引き続き、引張疲労試験における試験片形状、及び両振り平面曲げ疲労試験における試験片の切断面の影響を検討した結果を報告する。

1. はじめに

樹脂に繊維を複合させた繊維強化プラスチック (FRP : Fiber Reinforced Plastics) は、軽量かつ高強度なため、航空宇宙や自動車産業、スポーツ用途など様々な製品で活用されている。特に熱可塑性 FRP は加熱・冷却による短時間成形が可能のため、自動車部品などの生産性が重視される分野で、利用技術の研究開発が盛んに行われている。しかし、熱可塑性 FRP の利用にあたり重要となる疲労特性を把握することは困難であり、効率的な評価方法も確立されていない。これは、環境要因 (温度、湿度、成形条件、試験条件など) に応じて熱可塑性 FRP の物性が変化するためである。このことを踏まえ、熱可塑性 FRP の効率的な疲労評価方法を確立することを目的に本研究を開始した。第1報¹⁾では、熱可塑性 FRP の基本的な評価方法を確認するために、PA6 と連続炭素繊維の織物からなる熱可塑性 FRP の引張疲労試験、及び両振り平面曲げ疲労試験を行った。その結果、引張疲労試験では、固定するチャック付近で試験片が破断する課題 (図1) が判明した。また、両振り平面曲げ疲労試験では、ダイヤフラム成形機を使用して試験片を加圧成形することで、疲労耐久性が改善することがわかった。本報では、引張疲労試験においてダンベル形状の試験片を用いることによるチャック付近での破断防止効果の検討、及び両振り平面曲げ疲労試験において試験片作製時に発生する細かな傷の疲労耐久性への影響を検討した。

2. 実験

2.1 試験材料の加工方法

試験材料は、炭素繊維の 3K 綾織クロス材とマトリックス樹脂 PA6 を複合化した厚み 2mm の熱可塑性 CFRP (Bond-Laminate 製、TEPEX 202-C200(9)/50%) を用いた。試験寸法への切断は、ウォータージェット加工機 (Flow International Corporation 製、FlowMach3 1313b-

XD) を使用し、#80 のガーネットを用いたアプレシブウォータージェット加工で全長方向が 0° 方向となるように切断した。また、両振り平面曲げ疲労試験で使用する試験片においては、傷の有無による試験結果への影響を確認するため、ウォータージェット加工機で切り出したままの状態の試験片と、研磨紙を用いて切断面を研磨した試験片を作製した。なお、研磨で使用した研磨紙は #320 から順に使用し、#2400 を仕上げとして用いた。また、研磨前後の断面をデジタルマイクロスコープ (キーエンス社製、VHX-1000) を用いて、撮影倍率 100 倍で撮影した。作製した試験片は十分に乾燥させた後、試験前に標準状態 (温度 23°C、湿度 50%) で 48 時間以上静置した。

2.2 引張試験

引張試験は、JIS K 7164²⁾を基に行った。試験機は油圧チャック式の疲労試験機 (Instron Corporation 製、8802 型、図2) を使用し、試験片寸法はタイプ 1B 系 A 型試験片 (図3) とした。また、試験条件は、試験速度 10mm/min で n=3 の試験とし、標準状態 (温度 23°C、湿度 50%) で試験を行った。

(a)



(b)



図1 チャック部付近での破断

(a) タブ無しでの試験時

(b) タブ有りでの試験時



図2 8802 型疲労試験機

*次世代技術部

2.3 引張疲労試験

JIS K 7083³⁾を基に、引張疲労試験を行った。ただし、JIS K 7083 では、短冊状の試験片 II-A 形試験片を推奨しているが、本報ではチャック割れを防ぐために JIS K 7164 のタイプ 1B 系 A 型試験片 (図3) を用いた。試験機は、疲労試験機 (図2) を使用し、標準状態 (温度 23℃、湿度 50%) で n=1 の試験を行った。引張疲労試験は荷重制御で行い、試験荷重は 6.4kN、7kN、7.5kN、8kN とした。また、応力比は 0.1 とし、周波数 10Hz の正弦波で試験機を制御した。

2.4 両振り平面曲げ疲労試験

JIS K 7082⁴⁾を基に、両振り平面曲げ疲労試験を行った。試験は疲労試験機 (図2) を使用し、標準状態 (温度 23℃、湿度 50%) で n=1 の試験を行った。試験片の形状は図4に示す寸法とした。制御は試験機のロードセル容量が大きく、繊細な荷重制御が困難であったため、位置制御の正弦波で行い、周波数は 0.9Hz とした。疲労試験後にロードセルで測定された繰り返し最大荷重を下記の式に代入することで応力振幅を計算した。

$$\sigma = \frac{3 \cdot P \cdot l}{b \cdot h^2}$$

- σ : 応力振幅(MPa)
- P : 荷重(N)
- b : 試験片の破断幅(mm)
- h : 試験片の厚み(mm)
- l : つかみ部の支持点間長さ(mm)

位置制御で試験を行っており、試験荷重 (P) が変動するため、応力振幅の計算で用いる荷重は、繰り返し数が 1 サイクルから 10 サイクルまでの最大荷重の平均とした。計算により得られた応力振幅と破断までの繰り返し数をプロットし、グラフ (S-N 図) を作成した。S-N 図の X 軸は繰り返し数を対数で表記し、Y 軸は応力振幅とした。

2.5 超音波探傷試験

超音波探傷装置 (日本クラウトクレーマー製、SDS-Win6600R AM、図5) を使用し、両振り平面曲げ疲労試験前後の試験片を評価した。試験片は、応力振幅が 800MPa で繰り返し数が 223 回の時に破断したものと、最小幅での応力振幅が 636MPa で繰り返し回数が 1.7×10^6 回経過後に破断していないものを用いた。測定で使用した探触子は、径 0.25inch、周波数 10MHz、焦点距離 1.5inch とし、走査条件は 0.1mm ピッチで、走査速度は 100mm/sec とした。また、測定方法は水浸式内部監視法を用いた。評価ゲートは表面反射と底面反射の影響を避けるため、表面から 0.45mm から 1.75mm の範囲に設定した。結果は、反射の深さを表示する B スコープ図と反射の範囲を表示する C スコープ図で表示した。図中の色が濃いほど超音波の反射が強いことを表す。

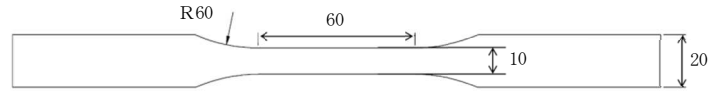


図3 タイプ 1B 系 A 型試験片

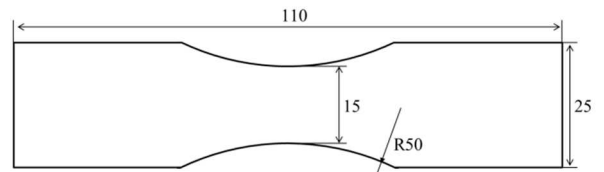


図4 両振り平面曲げ疲労試験の試験寸法



図5 超音波探傷装置

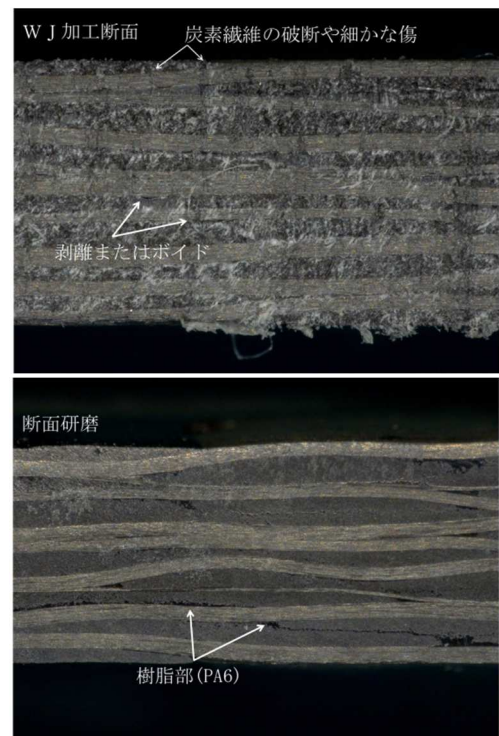


図6 上: WJ加工機で切り出した試験片の切断面
下: 研磨後の試験片の切断面

3. 結果及び考察

3.1 切断面観察

図6に WJ 加工機で切断した試験片の切断面写真と研磨後の切断面写真を示す。研磨前の試験片では、切断時に生じる細かな傷や炭素繊維の破断が生じているが、研磨品ではそれらが取り除かれていることがわかる。

3.2 引張試験

引張試験の結果を表1に示す。応力は、試験荷重を試験前の断面積で除して計算した。引張破断応力は n=3 の平均値で 432MPa となり、標準偏差は 21.6 であった。また、図7に示す様に試験片の破断位置は、R部と平行部の境目で起こっていた。これは、試験時にR部と平行部の境目で応力が集中することによると推察できる。

3.3 引張疲労試験

試験結果を表2に示す。応力は、繰り返し最大荷重を試験前の断面積で除して計算し、これを用いて S-N 図を作成した(図8)。矢印が表記された試験に関しては、その繰り返し数で破断が起らなかったことを示す。繰り返し最大荷重を 8kN に設定した試験では試験荷重が 8kN に達する直前(7.8kN)に試験片が破断した(図9)ため、繰り返し数を1回として図中に記載した。また、繰り返し最大荷重が 7.5kN の試験では繰り返し数が 5.7×10^4 回の時に試験片の破断が起こった。繰り返し最大荷重が 6.4kN、及び 7kN の試験では、繰り返し回数が時間の都合上で設定した回数に達しても破断が起らなかった。破断した試験片の破断位置は、引張試験と同様で、試験片の R 部と平行部の境目であり、チャック割れを起こすことはなかった。ダンベル形状の試験片を用いることで、チャック割れを起こすことなく引張疲労試験が行えることがわかった。

3.4 両振り平面曲げ疲労試験

切断面を研磨した試験片での試験結果を図10に示す。なお、図10には第1報¹⁾で報告したウォータージェット加工機で切り出したままの状態の試験片(WJ切り出し品)の試験結果とダイヤモンド成形機を用いて加圧成形を行った試験片(ダイヤモンド成形品)の試験結果を加えて記載している。切断面を研磨した試験片では、加圧成形を加えていないにも関わらず、応力振幅に対する繰り返し数が最も多くなっていることがわかる。つまり、試験片の切断面に存在する細かな傷が疲労耐久性に大きく影響していることがわかった。

表1 引張試験結果

	破断荷重(kN)	応力(MPa)
試験片1	8.38	441.4
試験片2	8.55	447.5
試験片3	7.81	407.5
平均	8.25	432.1
標準偏差	0.39	21.6



図7 引張試験後の写真

表2 引張疲労試験の結果

設定荷重(kN)	8	7.5	7	6.4
最大荷重(kN)	7.8	7.5	7.0	6.4
繰り返し回数	1	5.7×10^4	3.2×10^6 (破断せず)	1.0×10^7 (破断せず)
応力(MPa)	413	375	350	336

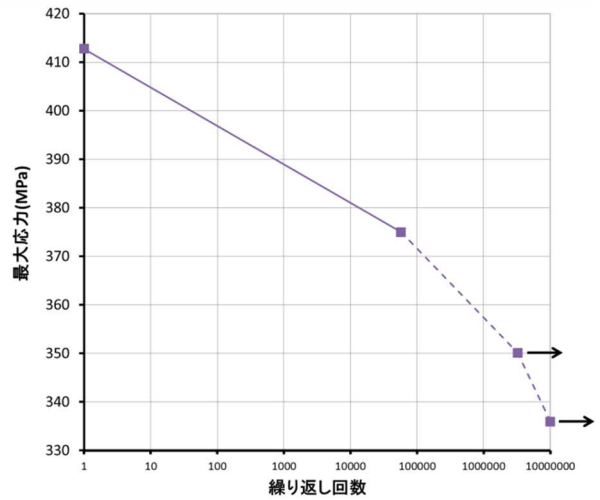


図8 引張疲労試験の S-N 図

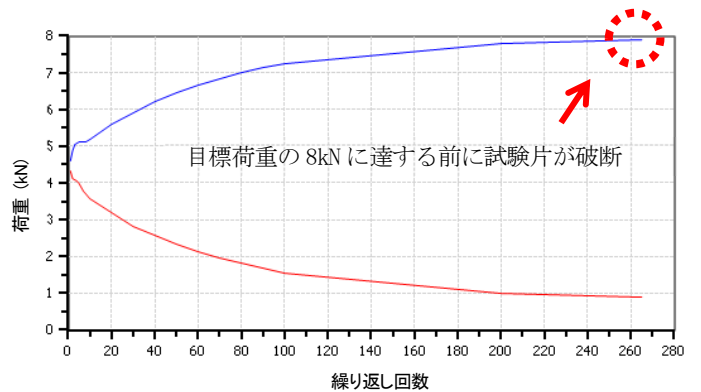


図9 最大荷重を 8kN に設定した際の荷重変化

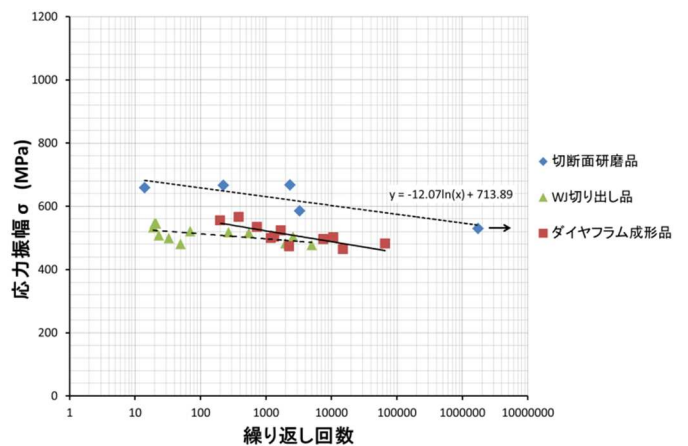


図10 両振り平面曲げ疲労試験の S-N 図

3. 5 超音波探傷試験

超音波探傷試験の結果を図11に示す。Cスコープ図に注目すると、両振り平面曲げ疲労試験前の試験片(図11(a))では、試験片内部にある炭素繊維層の界面による弱い反射が確認できる。また、応力振幅が高い条件で試験を行い、繰り返し数が223回で破断した試験片(図11(b))においても、強い反射は確認できず、疲労試験前の試験片と同様に試験片の内部にある炭素繊維層の界面による弱い反射のみを確認した。一方、応力振幅が低い条件で試験を行い、繰り返し数が 1.7×10^6 回でも破断が起こらなかった試験片(図11(c))では、試験片の中央部で強い反射が確認された。これは、層間剥離による反射と考えられる。この層間剥離は広範囲かつ局所的に発生しており、疲労試験時に曲げ荷重が掛かる範囲と一致している。曲げ荷重は、試験片中央部に均一に掛かり続けているが、試験片内部のボイドや炭素繊維の織目などの欠陥部分が局所的に存在するため(図12)、これを起点として層間剥離が進展し、局所的かつ広範囲で層間剥離が起こったと考えられる。また、応力振幅が800MPaと大きい条件では破断のみが起こり、応力振幅が636MPaと小さい条件では剥離のみが進展している。このことから、破断や亀裂が進展しないほどの小

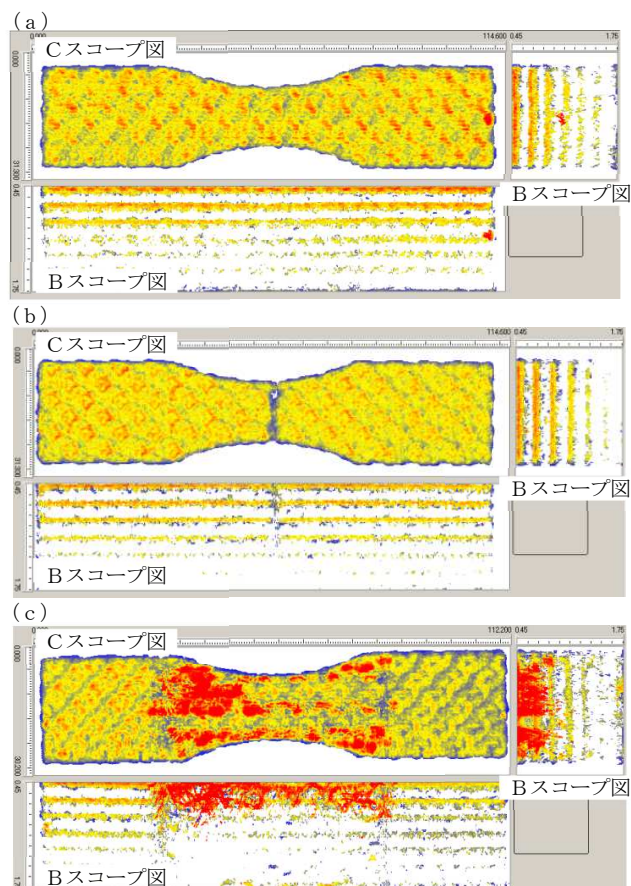


図11 超音波探傷によるBスコープ図とCスコープ図

- (a) : 疲労試験前の試験片
 (b) : 800MPa-223回の疲労試験後の試験片
 (c) : 636MPa- 1.7×10^6 回の疲労試験後の試験片

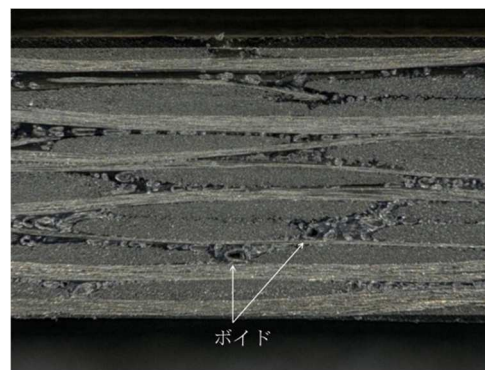


図12 ボイドが多くある試験片の断面図

さい応力振幅で疲労試験を行ったときに層間剥離が進展すると推察できる。一方、図11(c)のBスコープ図に注目すると応力の集中する表層付近に剥離が集中していることがわかる。表層に近い程、繰り返し時の引張、及び圧縮応力は大きくなるため、表層付近で層間剥離が多く発生したと考えられる。

4. まとめ

熱可塑性CFRPの引張疲労試験では、引張試験の規格JIS K 7083に記載のダンベル形状のタイプ1B系A型試験片を用いることで、チャック部付近の影響がない引張疲労試験を行うことができた。今後、試験片のR部や試験片寸法などの調整を行うことで試験片平行部の中央付近で破断が起こる試験条件を検討していく予定である。

熱可塑性CFRPの両振り平面曲げ疲労試験に関しては、以下のことがわかった。

1. 切断面の細かな傷が疲労耐久性に大きく影響する。
2. 応力振幅が大きい条件では、破断が起こる。
3. 応力振幅が小さい条件では、内部で層間剥離が進展する。

今後は、内部に存在するボイドの影響や様々な温度等による環境要因の違いによる疲労耐久性の比較等を行っていく予定である。

【参考文献】

- 1) 鈴木ら,岐阜県工業技術研究所研究報告 No.7, pp59-62,2019
- 2) JIS K 7164 「プラスチック - 引張特性の試験方法 - 第4部: 等方性及び異方性繊維強化プラスチックの試験条件」
- 3) JIS K 7083 「炭素繊維強化プラスチックの定荷重引張-引張疲れ試験」
- 4) JIS K 7082 「炭素繊維強化プラスチックの両振り平面曲げ疲れ試験方法」

射出成形による炭素繊維入り複合材ボルトの開発

企業連携

千原健司*、鈴木貴行*、浅倉秀一*、古田伸享†

当センターでは、平成24年度から炭素繊維強化熱可塑性プラスチックの成形加工等の技術開発に取り組んでおり、これまで本材料を使用した部品の設計、成形、加工、評価技術等を蓄積している¹⁻²⁾。今回、県内企業からこれらの技術を活用し、今後成長が期待されている次世代自動車や航空機産業等への利用が見込まれる炭素繊維入り複合材ボルトを開発したいとの要望を受け、共同研究を実施した。この結果、本開発前と比較して2倍以上の強度を有するボルトを開発した。

1. 企業ニーズ

これまで有限会社古田化成（以下、共同企業）では、射出成形によるプラスチック部品の受注生産を生業としてきたが、売り上げが発注元の景気に左右されるため、将来有望な自社製品として炭素繊維入り複合材ボルトに着目し、近年、開発に着手した。

しかし、同材料の使用経験がなく、十分な開発/評価技術を有していないため、同材料の開発要素技術を蓄積している当センターとの共同開発を希望した。

2. 連携

2.1 体制

共同企業と当センターの2者で共同研究契約を締結し開発を進めた。その他、共同企業独自の関係として、材料供給元、成形金型外注先の協力を得ている。

2.2 分担

主に共同企業は、材料の選定、金型の設計/製作、ボルトの試作成形を担当し、当センターでは、金型や成形条件を検討するための樹脂流動解析、成形品の評価手法の確立及び評価を担当した。

3. 開発の結果

樹脂流動解析システム（Autodesk社、Moldflow Insight Premium 2018）により、成形品の樹脂流動解析を行った。また、マイクロX線CT（東芝ITコントロールシステム株式会社、TOSCANER-32300μFD）により、内部観察を行った。図1に本開発前の金型による成形品（径はM12、樹脂はPEEK。以下、旧成形品という。）の解析結果、図2に観察結果を示す。体積収縮率（図1左）が、成形された製品内部の空洞（図2）と相関があることが分かりこれを減らすように、また、繊維配向テンソル（図1右）が強度を必要とする部分に沿って配向するように金型のスプール、ランナー、ゲート形状および型温度や保持圧等の成形条件を検討した（なお、本開発による結果は企業秘密のため公表しない）。

ボルト強度をセンター内設備で測定するため、規格³⁾

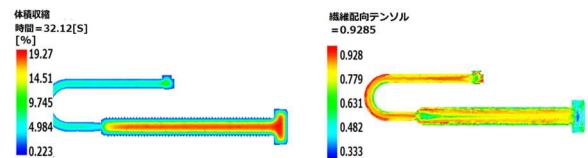


図1

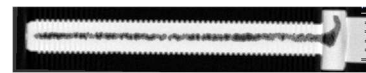


図2



図3

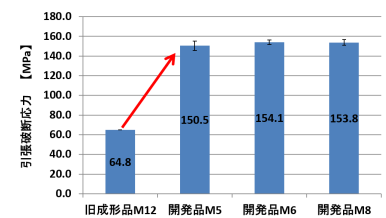


図4

に準拠した治具を設計/製作した（図3）。これにより旧成形品と、新たに成形したネジ（径はM5 M6 M8の3種、樹脂はPEEK。以下、開発品という。）を試験した結果を図4に示す。旧成形品と比較し、開発品は2倍以上の強度を有することを確認した。

4. 今後の展望

市販されているPEEK製ボルトの強度は100MPa程度であり、開発品はこの1.5倍程度の強度である。しかし依然としてボルト内の空洞がみられ、改良の余地がある。更に高強度なボルトとするため開発を継続する予定である。

【謝辞】

本研究開発は、公益財団法人岐阜県産業経済振興センターの令和元年度産学官共同研究助成事業による助成を受けて実施しました。ここに謝意を表します。

【参考文献】

- 1) 千原ら、岐阜県工業技術研究所研究報告 No.4, pp41-44,2017
- 2) 鈴木ら、岐阜県工業技術研究所研究報告 No.7, pp59-62,2019
- 3) JIS B1051:2014 の9.2項に記載の「おねじ部品の引張強さを求めるための引張試験」

* 次世代技術部

† 有限会社古田化成

情報

AI 技術を活用した検査工程の省力化・効率化（第1報）

— 深層学習を用いた欠陥画像分類モデルの改良 —

渡辺博己*、生駒晃大*、松原早苗*、伊藤司†、安田敏†、山下泰司†

A study on artificial intelligence for labor savings and efficiency improvements of inspection process (I)

— Improvements of defect classification networks using deep learning —

WATANABE Hiroki*, IKOMA Akihiro*, MATSUBARA Sanae*,

ITO Tsukasa†, YASUDA Satoshi† and YAMASHITA Hiroshi†

本研究では、省力化・効率化を図ることによる生産性向上の支援を目的として、品質保証に絡む重要な作業である検査作業について、AI 技術を利用した画像検査技術を開発している。本稿では、欠陥画像に対する認識性能の向上を目指して、昨年度開発した欠陥画像分類モデルについて、4 つの改良を試みた。実験では、各改良において上位の評価結果となったモデルを順に改良し、最も認識性能の高いモデルを選定した。また、従来モデルと比較する実験を行い、欠陥・正常分類で平均再現率 1.19%、平均適合率 1.28% の認識性能の向上を確認した。

1. はじめに

近年、人口減少による人手不足が懸念されている。1990 年代前半には 8,700 万人だった国内生産年齢人口は、2056 年には 5,000 万人を割り込むことが予想され¹⁾、製造業においては労働力確保が課題となっている。特に人手を要する検査作業は、品質保証に絡む重要な作業であり、検査員の確保が重要な課題となっている。

人による目視検査は、曖昧な違いがあっても経験により検査が可能であったり、検査項目や条件が変わったとしても柔軟に対応が可能であったりするなど、導入のしやすさから広く普及してきた。しかし、労働力確保とともに、熟練検査員のノウハウ継承や、人は体調や環境により判断基準にバラツキが生じるため、安定した検査品質の確保が課題であった。

一方、機械による画像検査は、客観的な評価基準による一定の検査品質が保証されるだけでなく、導入により人手を削減でき、検査速度を含めて経済的な効率化が期待できる。しかし、従来技術では、数値で定義できないものは検査が困難であり、微妙な光の加減で誤判定が起きるなど、自動化できない対象があり、できたとしても精度が低い場合があるなど、解決すべき課題が幾つか存在した。

こうした中、人の持つ柔軟性と機械の持つ効率性を組み合わせ、人工知能（以下、AI）による外観検査技術が注目されている。しかし、データが少量であったり、偏りがあったりすると、性能の確保が困難となるだけでなく、多様な検査項目に応じたアルゴリズムの選定が必要となるなど、技術の導入は容易ではない。

そこで本研究では、AI 技術を適用した画像検査技術を開発し、検査工程の省力化・効率化を図ることにより、生産性向上を支援する。本稿では、欠陥画像に対する認

識性能の向上を目的として、昨年度開発した畳み込みニューラルネットワーク²⁾（以下、CNN）による欠陥画像分類モデル³⁾（以下、モデル）を改良し、欠陥画像に対する分類実験を行ったので、その結果について報告する。

2. 欠陥画像分類技術の概要

2.1 欠陥画像分類モデル

モデルは、既存検査装置の検出・分析機能に課題があり、AI 技術の利用による装置の改善を要望する企業ニーズにより開発した、CNN に基づいた深層学習モデルである。図 1 に開発したモデル（以下、従来モデル）の構成を示す。従来モデルは、2 個の入力（Input）層と 3 個の出力（Output）層を持ち、13 個の畳み込み（Convolution）層と 1 個の全結合（Fully Connected）層を持つ 2 つのネットワークを統合した構成となっている。各ネットワークで処理されたデータは、最後のプーリング（Max Pooling）層を通過後に分岐され、各ネットワークから分岐された 2 つのデータは、統合（Concatenate）層で連結された後、各 1 個の畳み込み層と全結合層を経て、画像種別に対する確率として出力される。欠陥画像を分類する際には、統合後の出力をモデルの出力結果として使用し、各ネットワークの出力結果は学習時のネットワークの検証用としてのみ使用する。

2.2 欠陥画像データセット

欠陥画像データは、企業の実際の検査対象物を既存検査装置で検査することにより取得されたデータである。検査対象物は円筒部品であり、検査では、部品を回転させた状態で、回転機構と同期の取れたラインスキャンカメラにより、部品全周の画像が取得される。この時、部品は 4 回転し、各回転において、異なる方向から照明光が照射された状態で画像が取得される。取得された画像については、欠陥の有無が分析され、欠陥があれば、欠陥部分が画像中心となるよう、256×256 の解像度で、

* 情報技術部

† 株式会社前田精工

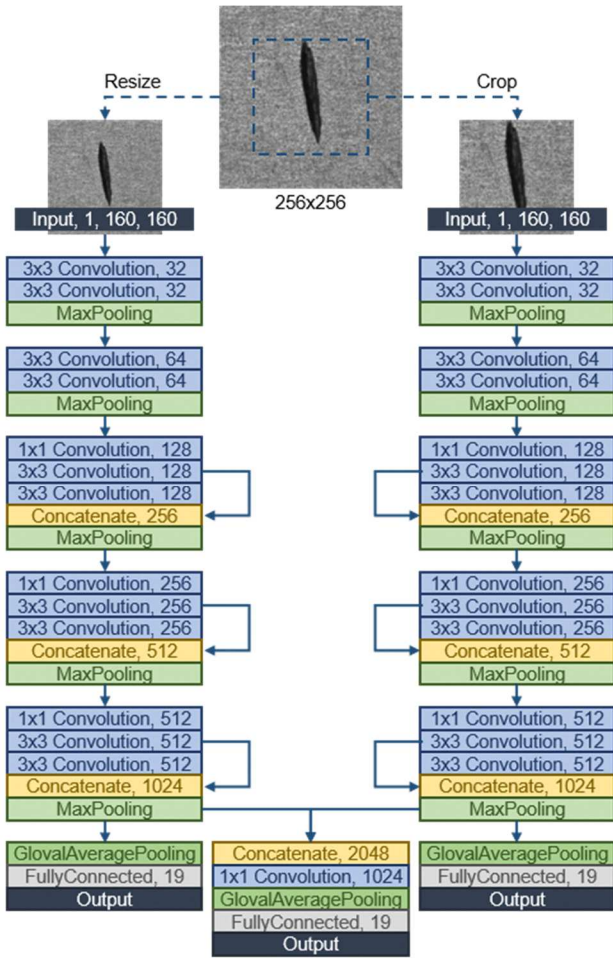


図1 欠陥画像分類モデルの構成

ビットマップ形式の画像ファイルとして保存される。欠陥の種類によっては、全ての照明方向において検出される欠陥もあれば、そうでない欠陥もある。また、欠陥の分布・大きさによっては、複数の画像で同一の欠陥が記録されることもある。そのため、欠陥の状態により取得される画像数が異なり、1つの検査対象物について、複数の欠陥画像ファイルが保存される。図2に保存された欠陥15種類、正常4種類の画像例を、表1に種別毎のデータ数を示す。なお、データセットは昨年度と比較すると、欠陥C、H、O、正常(キズ)の4種類が増加し、分類の難易度が高くなっている。

3. 欠陥画像分類モデルの改良

3.1 畳み込みブロックの構成

モデルを構成する1つのネットワークに着目すると、ネットワークはプーリング層を区切りとして、 3×3 の畳み込み層のみから構成されるブロックと、 1×1 と 3×3 の畳み込み層、及びスキップコネクションによる統合層から構成されるブロックに分けることができる。前者を畳み込みブロックCB1、後者を畳み込みブロックCB2とすると、ネットワークは $(CB1_{ij}, CB2_{kl})$ と一般化することができる。ただし、 i, k はブロックの繰り返

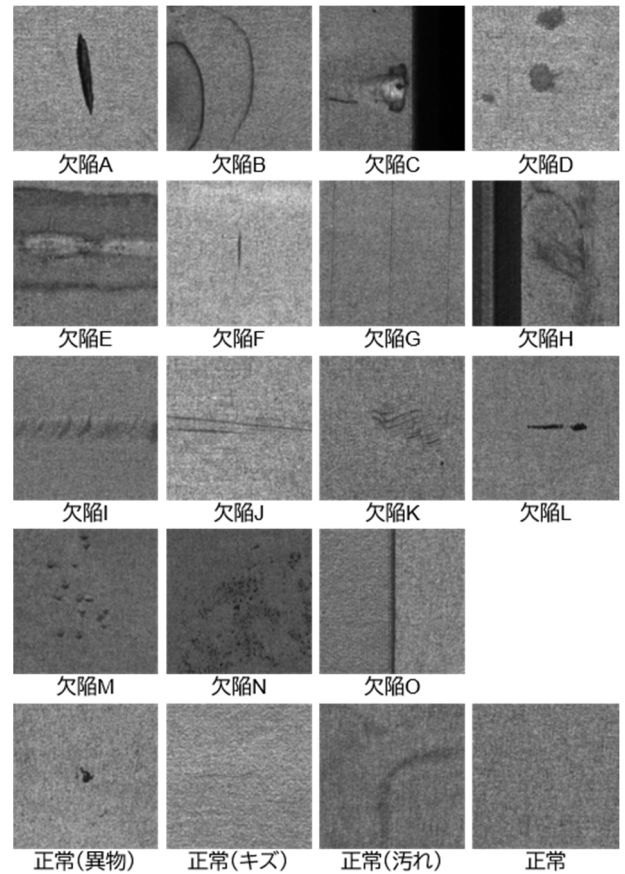


図2 欠陥画像データセットの画像例

表1 欠陥画像データセットのデータ数

種別	データ数	種別	データ数	種別	データ数	種別	データ数
欠陥A	794	欠陥B	1,076	欠陥C	325	欠陥D	795
欠陥E	939	欠陥F	797	欠陥G	923	欠陥H	290
欠陥I	1,461	欠陥J	902	欠陥K	978	欠陥L	728
欠陥M	743	欠陥N	883	欠陥O	362		
正常(異物)	916	正常(キズ)	649	正常(汚れ)	994	正常	762

し数、 j, l はブロック内の畳み込み層数を表しており、 $j \geq 1, l \geq 3$ とする。図3に $j=1, 2, l=3, 4$ の時の各ブロックの構成例を示す。CB1は、単純に 3×3 の畳み込み層を重ねる構成であるが、CB2は、 3×3 の畳み込み層を重ねると同時に、スキップコネクションにより2層目以降の畳み込み層を統合する構成としている。一般化することにより、様々な組み合わせでネットワークを構成することが容易となるが、本稿では $4 \leq i+k \leq 5$ ($i \leq k$)、 $1 \leq j \leq 2, 3 \leq l \leq 4$ として畳み込みブロックを構成し、モデルの認識性能を検証した。なお、従来モデルのネットワークは $(CB1_{2,2}, CB2_{3,3})$ となる。

3.2 Squeeze-and-Excitation ブロックの追加

Squeeze-and-Excitation ブロック⁴⁾ (以下、SEブロック)は、大規模画像認識のコンテストであるImageNet Large Scale Visual Recognition Challenge 2017の画像分類タスクで1位を記録したネットワークを構成する手法で、チャンネル毎の特徴マップを適応的に重み付けするブロックである。SEブロックは、ネットワーク中の1つのコ

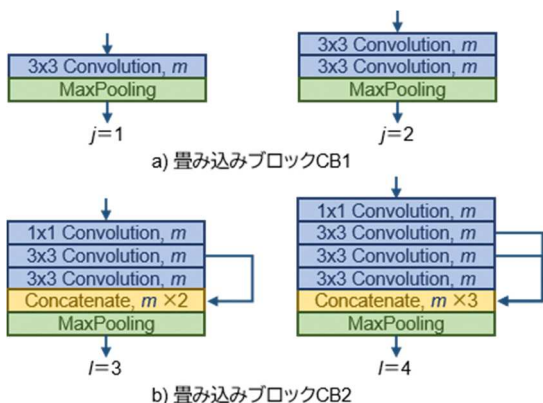


図3 畳み込みブロックの構成例 (m はチャンネル数)

ンポーネントとして振る舞うことが可能であるため、様々なネットワークに適用することが可能という特徴を持つ。本稿では、図4に示すように、各畳み込み層の後にSEブロックを組み込み、SEブロックの有無によるモデルの認識性能を検証した。

3.3 Dropoutの追加

Dropout⁹⁾は、ネットワークの学習時に一定割合のノードを不活性化させながら学習を行うことで、未知のデータに対して汎化性が低い状態である過学習を緩和する効果があると同時に、複数の機械学習結果を利用して判定を行うことで学習性能を上げるアンサンブル学習に近似した効果がある手法である。本稿では、図5に示すように、各プーリング層の後にDropoutを組み込み、Dropoutの有無によるモデルの認識性能を検証した。

3.4 統合後の畳み込み層の構成

本モデルは、異なる画像をそれぞれのネットワークで畳み込んでいくため、各ネットワークにおいては異なる意味を持つ特徴マップが形成されていると考えられる。そのため、統合後の畳み込み層は不要であると考えられるが、仮に畳み込み処理に効果があるのであれば、さらに畳み込み層を繰り返した場合の効果についても検証する必要がある。そこで本稿では、図6に示すように、統合後の畳み込み層数を0から3(以下、L0~L3)の間で変化させ、モデルの認識性能を検証した。なお、従来モデルの畳み込み層数はL1である。

4. 実験と結果

4.1 改良効果の検証

前章の4つの改良に対する効果を検証するために、2.2節のデータセットからランダムにデータを抽出し、学習・分類を試行する実験を行った。モデルの評価にあたっては、正解であるデータのうち実際に正解したデータの割合を示す再現率(recall)と、正解として予測したデータのうち実際に正解したデータの割合を示す適合率(precision)を求め、再現率と適合率との調和平均であるF値(F-measure)により評価した。

実験は、各改良に対して5回試行し、集計した分類結



図4 SEブロックの組込例 図5 Dropoutの組込例 (n はフィルタサイズ)

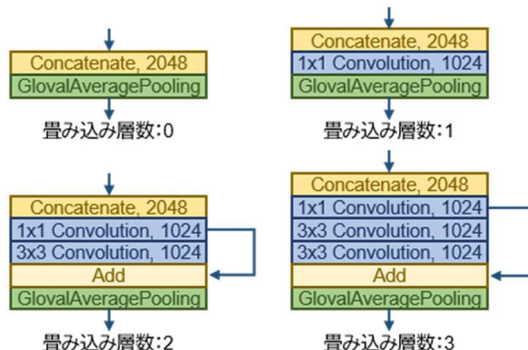


図6 統合後の畳み込み層の構成

果について、画像種別19カテゴリ、欠陥・正常2カテゴリに対するF値を、学習時に使用した検証データ、テスト用の評価データから求めた。また、実験は、3.1から3.4節の改良の順に行い、3.2節の改良については、3.1節の改良による上位5つのモデルを、3.3、3.4節の改良については、3.2、3.3節の改良による上位3つのモデルについて評価した。なお、モデルの優位性については、各F値の調和平均により判定した。各改良に関する実験結果を順に表2から5に示す。

畳み込みブロックの構成に関する実験については、(CB1_{1,2}, CB2_{3,4})、(CB1_{2,2}, CB2_{2,4})、(CB1_{1,1}, CB2_{3,4})、(CB1_{2,1}, CB2_{2,4})、(CB1_{2,2}, CB2_{3,4})の順に上位となり、CB2における畳み込み層数が4のモデルが有効であった(表2)。SEブロックの有無に関する実験については、SEブロックを使用したモデルが上位となり(表3)、SEブロックの有効性が明確となった。Dropoutについては、モデルによっては必ずしも効果があるとは言えないが(表4)、認識性能を向上させる傾向が見られた。統合後の畳み込み層の構成については、(CB1_{2,1}, CB2_{2,4})の2つのモデルでL3 > L0 > (L1 or L2)となったが、(CB1_{2,2}, CB2_{2,4})のモデルではL1が上位となった(表5)。そのため、統合後の畳み込み層数については、モデルの構成により、幾つに設定することが望ましいかを、その都度検証する必要がある。なお、これらの実験結果より、本稿では、表5において最も調和平均の高かったモデルを優位性の高いモデルとして選定した。

4.2 従来モデルとの比較

前節で選定したモデル(以下、選定モデル)について、従来モデルとの認識性能を比較する実験を行った。選定モデルと従来モデルとの構成の違いを表6に示す。

実験は、前節と同様に学習・分類を各モデルについて行い、10回の試行から検証データに対する比較結果を求めた。表7に画像種別に分類した場合、表8に欠陥・

表 2 畳み込みブロックの構成に関する実験結果

畳み込み ブロック	検証データ		評価データ		調和 平均
	画像種別	欠陥・正常	画像種別	欠陥・正常	
(CB1 _{1,1} , CB2 _{3,3})	0.8966	0.9531	0.8825	0.9468	0.9187
(CB1 _{1,1} , CB2 _{3,4})	0.9088	0.9582	0.8919	0.9547	0.9275
(CB1 _{1,1} , CB2 _{4,3})	0.9000	0.9530	0.8919	0.9476	0.9223
(CB1 _{1,1} , CB2 _{4,4})	0.9017	0.9516	0.8902	0.9471	0.9219
(CB1 _{1,2} , CB2 _{3,3})	0.9015	0.9549	0.8870	0.9524	0.9230
(CB1 _{1,2} , CB2 _{3,4})	0.9108	0.9601	0.8937	0.9534	0.9287
(CB1 _{1,2} , CB2 _{4,3})	0.9043	0.9541	0.8862	0.9440	0.9213
(CB1 _{1,2} , CB2 _{4,4})	0.9046	0.9558	0.8872	0.9488	0.9232
(CB1 _{2,1} , CB2 _{2,3})	0.9029	0.9541	0.8788	0.9434	0.9188
(CB1 _{2,1} , CB2 _{2,4})	0.9091	0.9581	0.8876	0.9513	0.9256
(CB1 _{2,1} , CB2 _{3,3})	0.9008	0.9522	0.8829	0.9430	0.9188
(CB1 _{2,1} , CB2 _{3,4})	0.9030	0.9531	0.8813	0.9418	0.9189
(CB1 _{2,2} , CB2 _{2,3})	0.9023	0.9558	0.8853	0.9478	0.9218
(CB1 _{2,2} , CB2 _{2,4})	0.9098	0.9606	0.8957	0.9508	0.9284
(CB1 _{2,2} , CB2 _{3,3})	0.9010	0.9542	0.8923	0.9501	0.9235
(CB1 _{2,2} , CB2 _{3,4})	0.9065	0.9562	0.8926	0.9483	0.9251

表 3 SE ブロックの有無に関する実験結果

畳み込み ブロック	SE ブロック	検証データ		評価データ		調和 平均
		画像種別	欠陥・正常	画像種別	欠陥・正常	
(CB1 _{1,1} , CB2 _{3,4})	無	0.9039	0.9538	0.8738	0.9406	0.9169
	有	0.9123	0.9602	0.8831	0.9477	0.9248
(CB1 _{1,2} , CB2 _{3,4})	無	0.9044	0.9543	0.8793	0.9402	0.9186
	有	0.9140	0.9635	0.8907	0.9466	0.9278
(CB1 _{2,1} , CB2 _{2,4})	無	0.9050	0.9532	0.8744	0.9373	0.9165
	有	0.9153	0.9629	0.8827	0.9462	0.9257
(CB1 _{2,2} , CB2 _{2,4})	無	0.9070	0.9572	0.8817	0.9434	0.9214
	有	0.9170	0.9652	0.8898	0.9501	0.9296
(CB1 _{2,2} , CB2 _{3,4})	無	0.9048	0.9550	0.8700	0.9373	0.9156
	有	0.9100	0.9559	0.8847	0.9473	0.9236

表 4 Dropout の有無に関する実験結果

畳み込み ブロック	SE ブロック	Dropout	検証データ		評価データ		調和 平均
			画像種別	欠陥・正常	画像種別	欠陥・正常	
(CB1 _{1,2} , CB2 _{3,4})	有	無	0.9149	0.9650	0.8925	0.9519	0.9302
		有	0.9161	0.9592	0.8948	0.9458	0.9283
(CB1 _{2,1} , CB2 _{2,4})	有	無	0.9158	0.9638	0.8989	0.9531	0.9322
		有	0.9199	0.9642	0.9041	0.9530	0.9347
(CB1 _{2,2} , CB2 _{2,4})	有	無	0.9148	0.9632	0.9002	0.9518	0.9318
		有	0.9276	0.9689	0.9089	0.9553	0.9396

表 5 統合後の畳み込み層の構成に関する実験結果

畳み込み ブロック	SE ブロック	Dropout	畳み込 み層数	検証データ		評価データ		調和 平均
				画像種別	欠陥・正常	画像種別	欠陥・正常	
(CB1 _{2,1} , CB2 _{2,4})	有	無	L0	0.9176	0.9641	0.8939	0.9539	0.9315
			L1	0.9157	0.9640	0.8925	0.9548	0.9308
			L2	0.9156	0.9650	0.8927	0.9516	0.9303
			L3	0.9150	0.9642	0.8953	0.9570	0.9320
			L0	0.9197	0.9645	0.8976	0.9554	0.9335
			L1	0.9191	0.9620	0.8930	0.9481	0.9298
(CB1 _{2,2} , CB2 _{2,4})	有	有	L2	0.9218	0.9659	0.8934	0.9499	0.9319
			L3	0.9203	0.9644	0.8975	0.9561	0.9338
			L0	0.9227	0.9641	0.9056	0.9570	0.9367
			L1	0.9275	0.9692	0.9075	0.9593	0.9402
			L2	0.9244	0.9644	0.8973	0.9510	0.9336
			L3	0.9226	0.9648	0.8966	0.9538	0.9337

正常に分類した場合の平均再現率、平均適合率を示す。

実験より、選定モデルでは従来モデルと比較して、画像種別、欠陥・正常別の順に、平均再現率が 1.97%、1.19%、平均適合率が 2.53%、1.28%向上した。

表 6 選定モデルと従来モデルとの構成の違い

モデル	畳み込みブロック	SE ブロック	Dropout	畳み込み層数
選定モデル	(CB1 _{2,2} , CB2 _{2,4})	有	有	L1
従来モデル	(CB1 _{2,2} , CB2 _{3,3})	無	無	L1

表 7 画像種別に対する認識性能の比較結果

種別	学習 データ数	検証 データ数	選定モデル		従来モデル	
			平均再現率	平均適合率	平均再現率	平均適合率
欠陥 A	600	150	0.8793	0.8627	0.8433	0.8496
欠陥 B	800	200	0.9440	0.9787	0.9395	0.9376
欠陥 C	200	50	0.9040	0.9113	0.9320	0.8457
欠陥 D	600	150	0.9633	0.9438	0.9453	0.9160
欠陥 E	700	175	0.9394	0.9821	0.9309	0.9605
欠陥 F	600	150	0.9520	0.9389	0.9293	0.9312
欠陥 G	700	175	0.9966	0.9892	0.9954	0.9886
欠陥 H	200	50	0.9760	0.9859	0.9600	0.9339
欠陥 I	1,000	250	0.9460	0.9556	0.9104	0.9539
欠陥 J	700	175	0.8920	0.8168	0.8651	0.8053
欠陥 K	800	200	0.8270	0.8926	0.8015	0.8464
欠陥 L	500	125	0.9776	0.9393	0.9664	0.9243
欠陥 M	600	150	0.8747	0.9143	0.8340	0.8730
欠陥 N	700	175	0.9446	0.8974	0.9023	0.8876
欠陥 O	200	50	1.0000	1.0000	0.9960	1.0000
正常(異物)	700	175	0.9017	0.9371	0.9017	0.8895
正常(キズ)	500	125	0.8072	0.8624	0.7544	0.8243
正常(汚れ)	800	200	0.9470	0.9284	0.8880	0.9193
正常	600	150	0.9580	0.8976	0.9600	0.8664
全体	11,500	2,875	0.9279	0.9281	0.9082	0.9028

表 8 欠陥・正常に対する認識性能の比較結果

種別	学習 データ数	検証 データ数	選定モデル		従来モデル	
			平均再現率	平均適合率	平均再現率	平均適合率
欠陥	8,900	2,225	0.9863	0.9861	0.9803	0.9808
正常	2,600	650	0.9523	0.9530	0.9345	0.9327
全体	11,500	2,875	0.9693	0.9696	0.9574	0.9568

5. まとめ

本研究では、認識性能の向上を目的として、従来の欠陥画像分類モデルに対し、畳み込みブロックの構成、SE ブロックや Dropout の追加、ネットワーク統合後の畳み込み層の構成について改良を行った。その結果、従来モデルと比較して、欠陥・正常に分類する認識性能が平均再現率で 1.19%、平均適合率で 1.28%向上した。

今後は、モデルの改良は元より、データセットの構成や学習方法等についても見直しを行い、さらなる認識性能の向上を目指して、深層学習に関する研究開発を実施する予定である。

【参考文献】

- 1) 国立社会保障・人口問題研究所, 人口問題研究資料 第 336 号, 2017
- 2) Y. LeCun, et al., Proc. of the IEEE, vol.86, no.11, pp.2278-2324, 1998
- 3) 渡辺ら, 岐阜県情報技術研究所研究報告第 20 号, pp.1-6, 2019
- 4) J. Hu, et al., arXiv:1709.01507, 2017
- 5) N. Srivastava, et al., The Journal of Machine Learning Research, 15(1), pp.1929-1958, 2014

品質見える化のための画像センシング技術に関する研究開発

—両手検出技術を用いた作業時間計測システムの開発—

松原早苗*、渡辺博己*、生駒晃大*

Research of image sensing technology for visualization of quality
- Development of working motion analysis system using hands detector -
MATSUBARA Sanae*, WATANABE Hiroki* and IKOMA Akihiro*

本研究では、製造業における作業の生産性、品質の向上を目的として、作業者の動作を分析することで、自動で作業時間の計測や作業ミスの検知を行う技術の実現を目指し、研究を進めている。これまでに組立セルにおける両手作業のカイゼン活動を支援するため、距離画像カメラやマーカを用いて両手を検出し、作業を解析するシステムを開発してきた。今年度は、これまでのシステムの汎用性、利便性向上のため、汎用的なカラー画像カメラを用い、マーカなしで両手を検出し、その位置情報を基に作業時間を計測するシステムの試作を行った。

1. はじめに

製造業の生産現場においては、労働者の高齢化や定着率の低下、多品種少量生産の増加に伴い、人による作業の品質、生産性の維持、向上が大きな課題となっている。

この課題の解決のために、製造現場では、作業カイゼンの取り組みが行われている。作業カイゼンの手法の一つとして、インダストリアル・エンジニアリング (IE) と呼ばれる作業者の動作を分析する工学的手法が広く用いられている¹⁾。しかし、最も基礎的で重要なデータである作業者の動作時間の計測は、ストップウォッチやビデオ映像を用いた手作業で行っており、この動作時間データの取得に膨大な時間と手間を要することが、カイゼン活動の普及の妨げとなっている²⁾。

また、「部品を取り付け忘れる」、「締め付け忘れる」といった作業抜け等のミスにより不良品が生産されることで、品質低下や手戻り作業により生産性が低下する課題がある。このようなミスを、可能な限り直近で検知するためには、すべての作業の後に検査工程や検査員を増やす必要があり、その負担は大きく現実的でない。

そこで、本研究では、製造現場における作業映像を解析することで、作業者の動作を分析し、自動で作業時間の計測、作業ミスの検知を行う技術の開発を目指す。今年度は、これまでに開発してきた距離画像カメラやマーカを用いた作業解析システム^{3,4)}の汎用性、利便性向上のため、汎用的なカラー画像カメラを用い、マーカなしで両手位置を検出し、その位置情報を基に作業の動作時間を計測するシステムの試作を行った。

具体的には、組立セルにおける両手作業を対象とし、カラー画像カメラにて取得した画像から両手の位置を検出する。そして、右手、左手それぞれに対して、画像中の特定の領域の通過を判定するエリアを設定し、前エリアの通過時刻から現エリアを通過する時刻までの時間を作業の動作時間として計測するシステムを開発した。

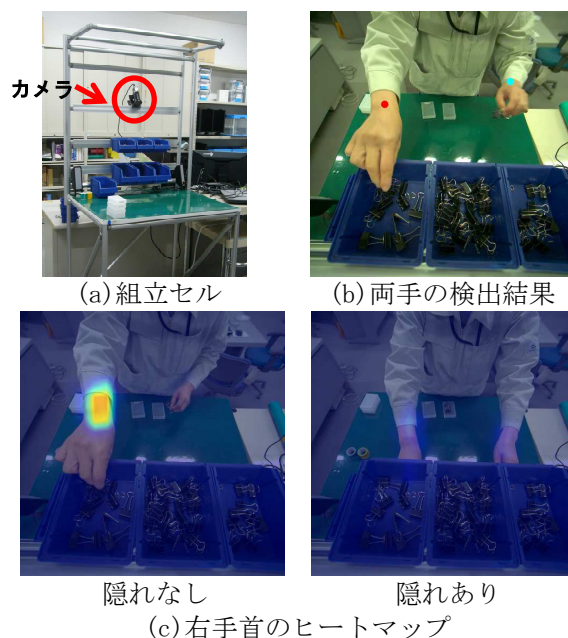


図1 作業環境と両手の検出結果

2. 両手の位置検出

本報告では、作業時の両手の位置を検出するために、姿勢推定手法である PoseNet⁵⁾を用いた。PoseNet とは、人物のカラー画像を入力すると、17 点の骨格座標と、それに付随する信頼度を算出する機械学習の手法である。ここでは、17 点の中の 2 点、右手首、左手首の座標を右手、左手の位置として用いることとした。

実験に用いた組立セルの作業環境を図 1 (a) に示す。カメラは、作業者の動きを妨げないように、作業者から見て正面上部に、作業台上面と作業者の両手動作が入る位置、角度に設置した。取得した画像に対して両手を検出した結果を図 1 (b) に示す。右手を赤、左手を水色の丸で示す。両手の位置が検出できていることがわかる。また、両手首の信頼度をヒートマップで表示したものを図 1 (c) に示す。部品箱や他部位との重なりにより、手が隠れる場合は信頼度が低くなるため、隠れの判断等

* 情報技術部

に用いることができる。

3. 作業動作時間計測システムの開発

製造現場においては、作業の動作の内容と順序が、作業手順書により定められている。治具から部品箱へ「手を延ばす」動作の場合、手は、始点である治具の位置から終点となる部品箱の位置までを移動する。治具や部品箱が固定されている組立セルにおいては、作業手順書により手の移動するルートが決まる。そこで、本研究では、作業手順書に従い、あらかじめ計測したい動作の始点と終点の位置とその通過順序を設定し、2章により得られる手の位置がその設定位置を通過した時刻から、次の設定位置を通過する時刻までの時間を動作時間として計測する。

具体的には、まず、手が通過すべき点、つまり、作業を構成する動作の始点と終点の位置を、作業の開始から終了までに対して決定する。次に通過する順序、そして、各点に対して通過の判定を行う通過判定エリアを設定する。この通過判定エリアは、部品箱の大きさや組立品の大きさにより異なるため、通過判定エリアのサイズや形を個々に設定する。右手、左手それぞれに対して、通過判定エリアを設定する。

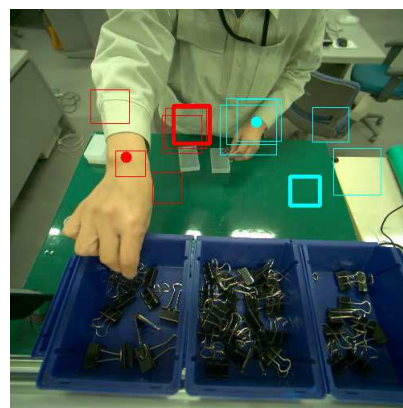
取得される手の位置が1番の通過判定エリアを通過した時点、作業の開始とし時刻の計測を開始する。次に、手の位置が、2番目の通過判定エリアを通過するまで通過の判定を行い、通過時に時刻を取得し、前エリアの通過時刻からの時間を動作時間として出力する。最後 n 番目の通過判定エリアまで通過の判定を繰り返す。この処理を右手、左手に対して行う。

図2に試作した作業時間計測システムの表示画面を示す。図2(a)に示す矩形枠が通過判定エリアである。また、図2(b)は、右手、左手それぞれの動きの軌跡の表示結果を示す。図3に、計測した動作時間のグラフ画面を示す。これは、右手、左手それぞれに、通過判定エリア6つを配置し、5つの動作に対して時間計測を行った例である。右手、左手それぞれに動作時間が計測できていることがわかる。

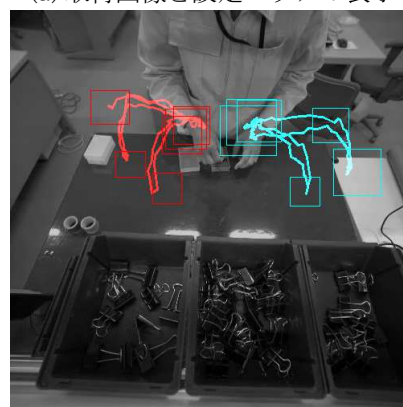
4. まとめ

本報告では、製造現場の組立セルにおける両手作業のカイゼン活動を支援するため、汎用的なカラー画像カメラを用いて両手の位置を検出し、作業の動作時間を計測するシステムを構築した。まず、姿勢推定手法である PoseNet を用いて両手の位置を検出した。そして、右手、左手それぞれに対して、通過を判定するエリアを設定し、前エリアの通過時刻から現エリアを通過するまでの時間を、作業の動作時間として計測する技術を開発した。

今後は、製造現場での作業映像に対してシステムの実験を行い、その有効性を検証する。また、長時間の動作データの分析と、リアルタイムに作業ミスを検知するポカヨケへの展開を検討する。



(a) 取得画像と設定エリアの表示



(b) 軌跡の表示

図2 試作した作業時間計測システムの表示画面

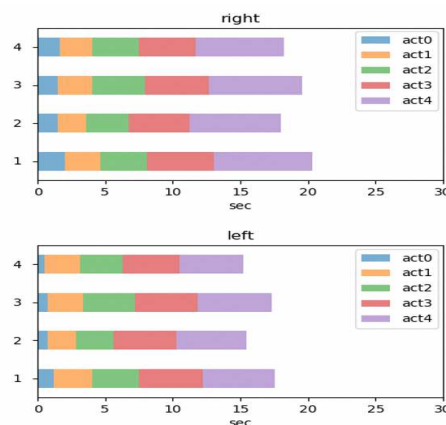


図3 作業時間グラフ画面 (上:右手、下:左手)

【参考文献】

- 1) 藤田彰久, IE の基礎, 建帛社, 1997
- 2) 平野裕之, 新作業研究, 日刊工業新聞社, 2001
- 3) 松原ら, 岐阜県情報技術研究所研究報告 Vol.18, pp.24-29, 2017
- 4) 渡辺ら, 岐阜県情報技術研究所研究報告 Vol.19, pp.41-46, 2018
- 5) Papandreou et al., "PersonLab: Person Pose Estimation and Instance Segmentation with a Bottom-Up, Part-Based, Geometric Embedding Model", ECCV, 2018

スマート金型の応用展開に関する研究

山田俊郎*、窪田直樹*、松原早苗**、多田憲生†

Application development of smart mold system

YAMADA Toshio*, KUBOTA Naoki*, MATSUBARA Sanae** and TADA Norio†

金型によるものづくりの高品質化・効率化を支援する技術として、スマート金型の開発を進めている。スマート金型は、金型にセンサを組み込み、成形時の型内状態を監視・記録するとともに、成形の良否を判断する機能を搭載した金型である。本年度の研究開発では、スマート金型の機能拡張として改良型ガスベントセンサとひずみゲージ式圧力センサの対応を実装するとともに、大型製品の試験型にスマート金型システムを取付け、システムの有効性を検証した。

1. はじめに

ものづくり産業の現場では、機械装置から得られる各種データを分析して、生産の効率化や製品の設計に活かす取り組みが進められている。NC加工機等の制御装置が組み込まれた工作機械では、すでに機械制御で使われているデータを取り出すだけであるため、データ収集や分析にコストはかかるものの、技術的には容易に実現が可能である。しかし、金型や手動の加工機など、デジタル制御装置を持たない生産設備からのデータ収集は困難であり、特に金型では収集する物理量の多様さや使用環境の過酷さから、技術的な困難を伴う。

一方で、金型による部品加工は年々高度化しており、プラスチック射出成形の分野では、自動車産業における金属部品の置き換えによる耐熱性樹脂の成形や、電子産業における部品の微細化など、高度な樹脂成形が求められている。また、プレス加工の分野においても、切削加工の置き換えによる高精度化、鋳物部品の置き換えによる複雑形状化など、高度な加工が求められている。

このような背景のもと、プラスチック射出成形の生産立ち上げの効率化や成形不良の発見を目的に、成形中の金型内の圧力や温度を監視するスマート金型の開発を進めている^{1,2)}。昨年までの研究において、金型に搭載して圧力・温度・振動を記録する小型測定モジュールを開発し、そのデータ解析からスマート金型の有用性を示すことができた。本年度は、新たなセンサに対応するモジュールを開発し、プレス金型にも対応できるシステムに拡張するとともに、大型成形品の金型にシステムを取付け、成形状態のデータ取得を行った。

2. 試験型の製作と新規センサの検証

2.1 CHC試験型の製作

本研究開発の実証のため、共同研究企業によって製作

した大型射出成形品の試作型にスマート金型システムを実装した。試作型は、自動車エンジンのシリンダヘッドカバー（CHC）を模擬した形状（図1）であり、そのサイズは565×257×45(mm)、成形品重量は650gほどである。樹脂材料はガラスフィラーを含んだナイロン樹脂（PA66-GF30）を用いた。現在、多くのCHCはアルミダイキャストで製造されているが、高級車では軽量化のため同材料で生産されているものもある。しかし、同材料製CHCは成形品の反りが大きく、歩留まりが悪いことが課題となっている。

成形品の外形とセンサ等の配置を図1に示す。大型の成形品であるため、成形は4点のゲートを用い、ゲートを開くタイミングを制御するリレー成形で成形した。図1のG1～G4（▲）がゲートの位置である。型内圧力センサはゲートの近傍および末端の可動側に6点取り付けた（P1～P6：■）。型表面温度センサは、固定側4点（T1～T4）および、可動側5点（T5～T9）の9点（●）に取り付け、T2とT5は製品を挟んでほぼ対象の位置に設置した。型開きセンサは可動側入れ子型のすぐ外側の側板に取り付け、ガスベントは成形末端に近いP5、T9の外側のベント溝から取った。なお、図1において表側（見えている側）が固定型側であり、裏側が可動型側である。

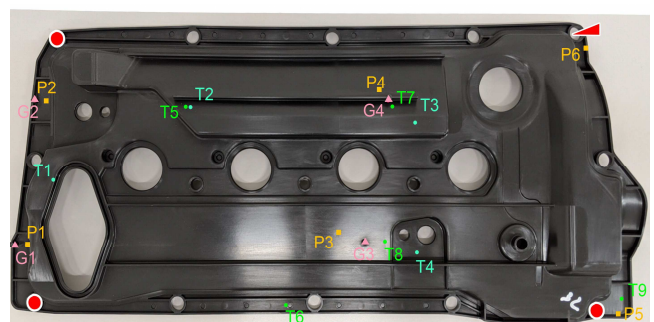


図1 CHC形状試作品とセンサ位置

* 技術支援部、** 情報技術部

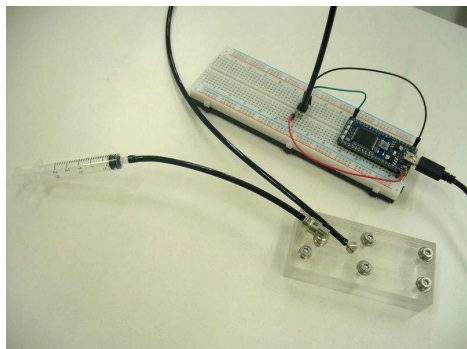
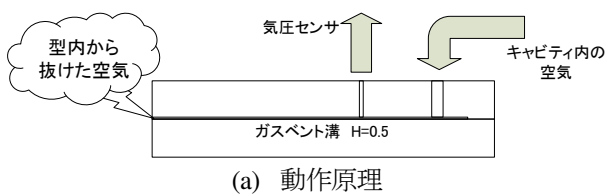
† 株式会社岐阜多田精機

2. 2 ガスベントセンサの改良

一昨年度の研究において、極細熱電対を用いてその温度変化から金型内の空気の抜け状態を検出するガスベントセンサを提案し、昨年度の試験型において効果を検証した。このセンサによってガスの抜け状態を検出することができたが、センサの感度が低いこと、極細熱電対が金型のメンテナンス時に切れやすいことが課題となっていた。ガスの抜けの状態は、ベント溝に圧力センサを設置して空気圧の変化で検出することが考えられるが、金型内に設置できる小型の圧力センサでは金型の温度に耐えられない。そのため、ベント溝から空圧パイプを通して金型外の圧力センサに空気を導き、ベント圧の検出が可能か検証を行った。

ガスベント検出の原理は、図2(a)に示のようにガスベント溝を通して外に抜ける空気を型外の圧力センサまで導出して圧力を測定する。ただし、ベント溝内の圧力がどの程度であるか、ベント溝の体積に対して大きな体積を持つ空圧パイプで圧力が伝搬するか、という不明点があったため、図2(b)の検証モデルを作成して検出状況の確認を行った。検証モデルによって十分な反応が得られることが確認できたため、試験型に組み込んだ。

試験型は、CHC形状のキャビティを取り囲むように周囲にベント溝が切られており、型外に空気を抜けやすくしている。複数あるベント溝のうち、最終末端部に近いベント溝から圧力を導出することとし、図3のように空圧パイプを接続する型の改修を行った。空圧パイプは金型の上に設置されたスマート金型の記録モジュールに接続され、記録モジュール内の気圧センサによって圧力変化が測定される。この圧力センサは、型表面温度セン



(b) 機能検証モデル
図2 外部導出型ガスベントセンサ

サと電氣的に互換性のある設計とし、温度センサと入れ替えて利用することができるようにした。

成形試験によって得られたガスベント検出例を図4(a)に示す。縦軸はA/Dコンバータ(12bit)による検出値であり、物理的な単位には変換できないが、ガスの抜けに対してデジタル量で1200の変化が見て取れる。図4(b)の一番下の線は前年度に検証した極細熱電対型ガスベントセンサの反応（熱電対であるため他の温度センサと同じ扱いとしている）であるが、デジタル量の変化は10程度である。検証に用いた金型のキャビティ形状が異なっているが、改良したガスベントセンサの感度が良いことが確認できた。また、金型内に電氣的な機構が無いため、耐久性も高いと考えられる。

2. 3 ひずみゲージ式型内圧力センサへの対応

型内圧力センサには、圧電素子を用いたセンサと、ひずみゲージを用いたセンサがあり、これまでスマート金型システムでは圧電式のセンサを採用していた。採用理由は、電氣的な調整を行わなくても比較的精度の高い結果が得られ、製造現場での扱いが容易になるためである。その反面、価格が高いため共同研究先企業の川下企業から、ひずみゲージ式センサへの対応を求められた。圧力センサの形状は図5に示すものであり、ひずみゲージ式のセンサは成形品の押し出しピンと一体となっている。

また、ひずみゲージは圧力のみでなく力の計測にも広く用いられているセンサであり、スマート金型システム

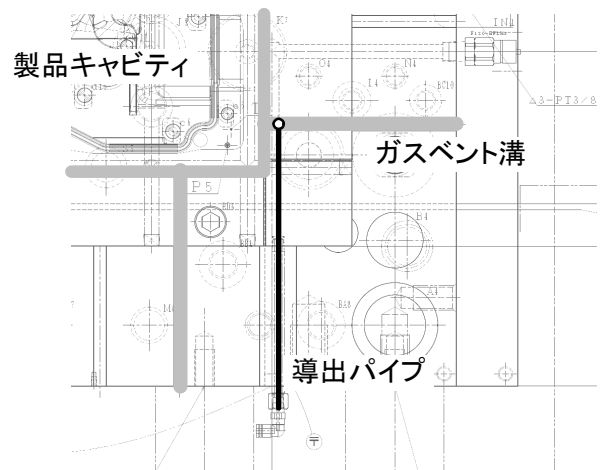
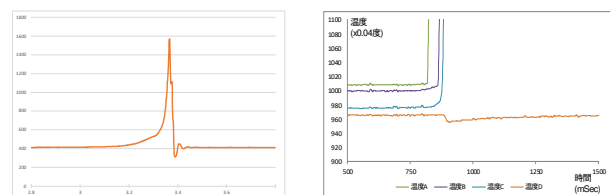


図3 外部導出型ガスベントセンサに対応する型の改修(成型品の右下部分)



(a) 外部導出型 (b) 極細熱電対型
図4 ガスベントセンサの反応例

をプレス金型に適用するためにも対応が求められた。プレス金型では、振動、温度、潤滑油など、射出成形金型以上に使用条件が過酷であり、センシングには構造が簡単で堅牢なひずみゲージが適していると考えられる。

ひずみゲージ式の圧力センサは、個体差が大きいこと、温度で値が変化することなどから、電気的な調整が必要であり、これに対応した入力回路を設計・製作した。試作した回路基板を図6(a)に示す。この基板1枚で4点のセンサが接続でき、基板からの出力は圧電式の圧力センサと互換性のあるものとしている。そのため、図6(b)に示すように、スマート金型システム内で基板を入れ替えて使用することが可能である。

スマート金型システムでは、これまでも多様なセンサに対応したモジュール基板を開発してきており、図7に示すセンサの利用が可能である。例えば、図6(b)のモジュールの例では、手前からメイン基板、ひずみゲージ式型内圧力センサ基板、型表面温度センサ基板、圧電式型内圧力センサ基板、型開きセンサ基板の5枚が収められており、基板とは別にガスベントを検出する気圧センサも実装されている。スマート金型システムはメイン

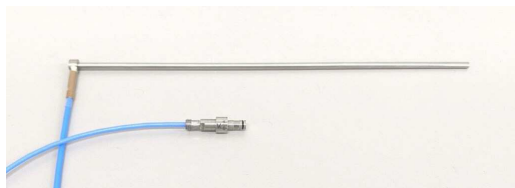
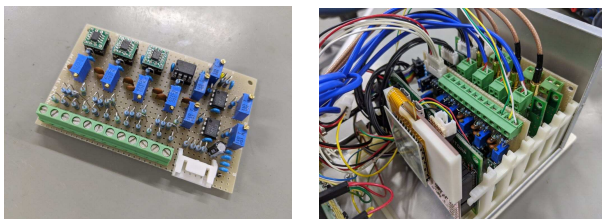


図5 型内圧力センサ
上：ひずみゲージ式(押し出しピン形状)、
下：圧電式



(a) ひずみゲージ式 圧力センサ基板
(b) スマート金型 システムへの実装

図6 センサ基板モジュール

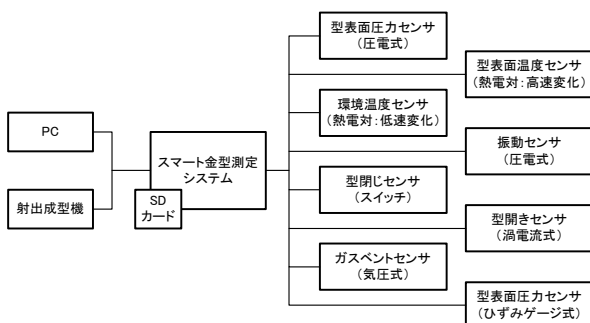
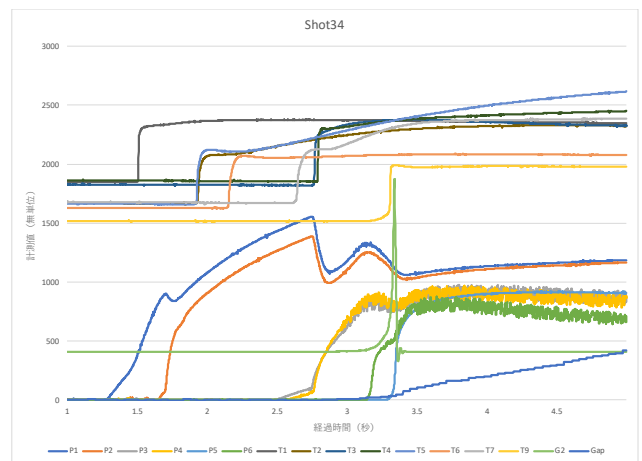


図7 スマート金型システムの構成

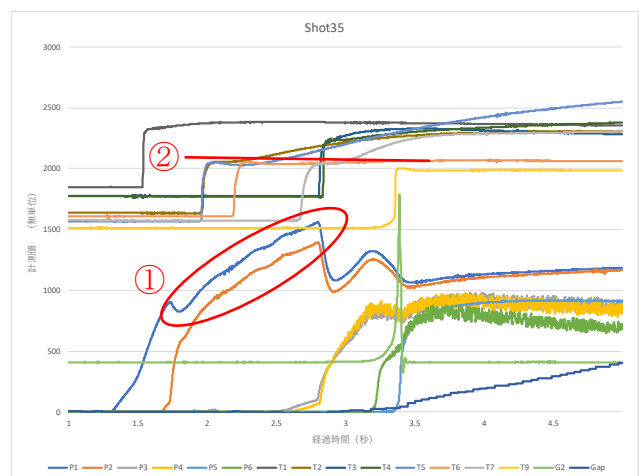
基板の入力点数(アナログ 20 点、デジタルの点数はサンプリングレートによる、合計 32 点)の範囲内でセンサモジュールを差し替えて使うことができる設計であるため、射出成形金型、プレス金型に必要な種類のセンサおよび点数に対応が可能である。柔軟性とコストパフォーマンスを両立させたシステムとなっている。

3. CHC 試験型における測定データの検証

大型成形品の成形におけるスマート金型システムの検証を目的に、CHC 型でデータ取得の成形実験を行った。図1で示す点の型内圧力および型表面温度、ガスベントセンサ、型開きセンサのデータを 20 ショット分取得してシステムの検証を行ったところ、今年度に提案したガスベントセンサの有効性が確認できたが、一部の型表面圧力センサ(P3,4,6)のデータに発振が見られた。センサの取り付け方や接続に問題がある可能性があり、対策が必要である。取得したデータの時系列波形の一例(ショット番号 34,35)を図8に示す。横軸は型が閉じてからの時間経過であり、型閉じ1秒後から5秒後までの4



(a) ショット番号 34



(b) ショット番号 35

図8 測定波形の例

秒間(射出開始から、充填、保圧の途中まで)の変化を表示している(成形サイクルは約45秒)。縦軸は測定値であり、複数の種類のセンサを同一グラフで示しているため、センサデータのデジタル値(無単位)としている。グラフの各ラインは、圧力(P1~6:測定値0から立ち上がる6本のライン)、温度(T1~9,T8は欠番:測定値1500よりも上から立ち上がる8本のライン)、ガスベント(G2:測定値450あたりから立ち上がるライン)、型開き(Gap:3秒過ぎから緩やかに立ち上がるライン)であり、物理量への変換は、圧力が×0.05MPa、温度が×0.04°Cである。

ショット番号31から38の8ショット分の成形品に対して、成形品の反り量と成形データの比較検討を行った。反り量は図1の丸印の個所(下側両端の2点と左上)を平面に固定し、固定した平面と三角の点(右上)の隙間を測定した。その結果を図9に示す。ショット31はチョコ停後の最初のショットであったため反り量が多くなったと考えられ、図10に示す圧力センサP1の波形の重ね合わせからも他のショットとは型内状態が異なっていたことが分かる。しかし、これまでに行ってきた特徴量分析(波形のピーク値やピーク到達時間、立ち上がり時間などを特徴量とする分析)では、他の7ショット間の差異をこの圧力波形から説明することが困難であり、他の型内圧力センサ波形や型表面温度センサ波形についても明らかな違いは見られなかった。今回の成形が大型成型品のリレー成形であったため、圧力の変化が単調で

はなくゲートの開きに伴って変動していること、型表面温度が樹脂フローの先端が到達した立ち上がりした後でさらに上昇することなど、これまで実証試験を行ってきた単一ゲートの射出成形とは型内の状況が異なっており、従来の特徴量では分析できなかったものと考えられる。

センサ波形全体を見て、反り量が最も少なかったショット35と他の波形を比較検討したところ、ショット35には、圧力の上昇中にぶれが見られる(図8(b)①)、温度センサT2,5,6,7の立ち上がりピーク値がほぼ同じ(図8(b)②)、といった特徴が見られた。サンプル数が少ないため、これらの特徴が反り量に関係していると確定はできないが、これまで特徴量としていた量以外の部分で成形の判断が必要であることが示唆された。

4. まとめ

スマート金型システムを大型成型型に搭載し、改良したガスベントセンサを含むシステムの機能の有効性を検証した。改良したガスベントセンサは、従来のガスベントセンサよりも感度が高く、耐久性も優れていることが確認できた。また、スマート金型システムをひずみゲージ式の圧力センサにも対応させ、同形式のセンサを使用している川下企業のニーズに応えるとともに、プレス型への展開を視野に入れた機能拡張を行った。

テスト成形から得られたデータ分析においては、大型品の成形であることによる波形の違いから、従来の特徴量分析が有効に機能しなかった。今後はAIを活用して波形全体を見た分析の導入が必要であると考えられる。

【参考文献】

- 1) 山田ら, "生産性向上に資する射出成形スマート金型の開発(第5報)", 岐阜県情報技術研究所研究報告 第17号, pp. 16-19, 2016
- 2) 山田ら, "インサート成形の生産性向上のための高機能金型に関する研究(第5報)", 岐阜県情報技術研究所研究報告 第20号, pp. 11-14, 2019

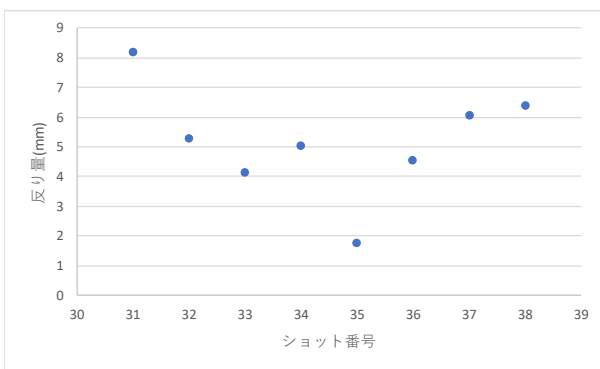


図9 ショットごとの反り量

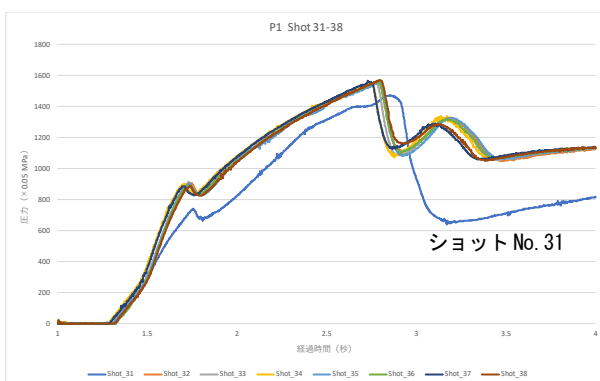


図10 ショットごとの型内圧力センサP1の波形

穴あけ加工のドリル破損予兆の検出

横山哲也*、田畑克彦*、山田俊郎**、小川公輔†

Predictive detection of drill breakage in drilling

YOKOYAMA Tetsuya*, TABATA Katsuhiko*, YAMADA Toshio** and OGAWA Kousuke†

穴あけ加工では、設定した加工数や加工時間に達したときにドリルを交換することで、ドリルや加工物の破損を未然に防いでいる。この設定値は安全率を反映した値となっており、現実にはまだ使用できるドリルを交換することになる。そのため、ドリルの破損を予知できる仕組みが構築できれば、ドリルを有効に使い切ることが可能となり、コストの削減につながる。そこで本研究では、穴あけ加工時の加工機の電流データから特徴量を算出し、外れ値検知手法を用いてドリルの破損予兆を検出できる仕組みを試作した。

1. はじめに

加工中にドリル破損が生じるとドリルの一部が被削材に食い込み、加工物が不良品となるため、ドリル破損を未然に防ぐ必要がある。その対策として、設定した加工時間や加工数に達したときにドリルを交換している。しかし、この設定値は安全率を反映した値となっており、現実にはまだ使用できるドリルを交換することになる。そのため、ドリル破損の予兆を検出できれば、ドリルが破損する直前まで使い切ることが可能となり、コストが削減できる。

ドリル破損を予知するには、異常を示す変化を見つける必要がある。IoT 技術を用いて加工機の計測データを継続的に収集することで、定常時のデータを得ることができる。定常時のデータから外れたデータが測定された場合は、何らかの状態変化が生じたと考えられる。異常データの取得が困難な加工では、定常時に得られたデータを正常データとみなし、正常データの分布から外れたデータを検知することで、ドリル破損の予兆検出ができるようになる。

本研究では穴あけ加工時の加工機のモータ電流を計測し、計測データから算出した特徴量の統計データをもとに外れ値を検知することで、ドリルの破損予兆を検出できる仕組みを構築する。

2. 特徴量の算出

本研究ではドリル破損の数穴前に破損予兆を検出することを想定している。そこで、1穴の加工ごとに、計測データからドリル破損を示唆する特徴量を計算する。

2.1 対象加工

対象とする加工は穴あけのノンステップ加工で、多数の穴の連続加工である。被削材は超硬で、ダイヤモンド

コーティング処理を施した超硬ドリルで穴あけを行う。加工時の主軸回転数は一定で、刃先が被削材に食いつく前と後で、送り速度を変更している。

2.2 データ計測

本研究では過去の破損データから推測される以下の破損要因に対して、破損予兆の検出を行う。

- ・ドリル径方向の切削抵抗の増加によるねじれ破損
- ・ドリルの食いつき不良に伴う座屈現象による破損
(以下、座屈破損)

上記のいずれもドリルに働く切削抵抗が大きくなり破損に至ることから、切削動力計を用いて切削抵抗を計測することで、破損の予兆を検出する方法がある。また、切削抵抗を計測せずに被削材の変形・破壊時に生じる振動を、アコースティックエミッションセンサを用いて周波数解析し、破損予知を試みる方法もある¹⁾。しかし、いずれも専用の計測装置が必要であり、導入費用がかかる。本研究では企業で導入可能な安価なシステムを目指すため、汎用装置を用いてモータ電流を計測する。

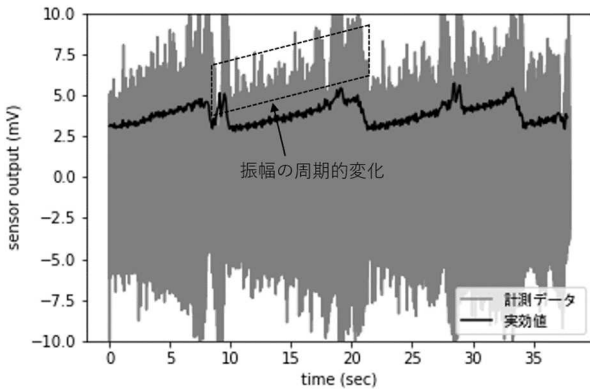
切削抵抗は加工機モータのトルクに比例し、その大きさはモータに流れる電流によって変化することから、電流を計測することで切削抵抗の変化を検出できる。本研究ではねじれ破損の予兆を検出するために主軸モータ電流を、座屈破損の予兆を検出するためにZ軸モータの電流を計測する。各々の電流は、サーボアンプとモータ間のケーブルにクランプ電流センサを取付けて計測した。

図1にモータ電流の計測データと、計測データから算出した実効値の時系列グラフ(1穴分)を示す。グラフ縦軸は電流センサの出力電圧であり、その大きさは電流の大きさに比例する。グラフ横軸は加工開始からの経過時間である。図より主軸モータの計測データは周期的に振幅(破線部)が変化し、Z軸モータにはインパルス状波形(破線部)が定期的に観察される。この2つはいずれも破損予兆を示す現象とは異なるため、ノイズとみなす。なお、主軸モータとZ軸モータでは異なる電流センサを使用したため、両者の絶対値比較はできない。

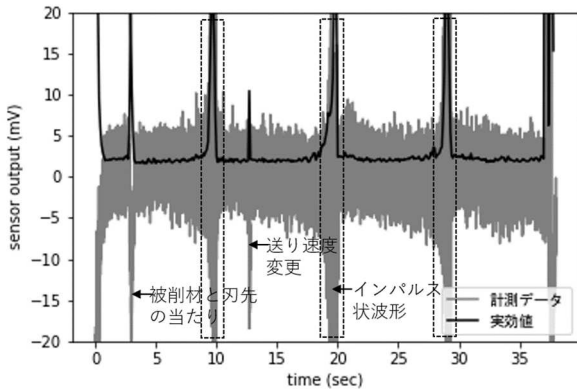
* 情報技術部

** 技術支援部

† イビデンエンジニアリング株式会社



(a) 主軸モータ電流



(b) Z軸モータ電流

図1 計測データと実効値(加工1穴分)

2. 3 電流データの特徴量算出

本研究では解析コストを考慮して、計測データから算出した実効値をもとに1穴ごとの特徴量を計算する。計測データには前述のとおりノイズが混入していることから、図2、3に示すように、実効値の時系列データに対して特徴量を算出する時間帯(以下、特徴量算出時間帯)を設けて、以下に記載する方法によりノイズの影響が小さい特徴量を算出する。

2. 3. 1 ねじれ破損の特徴量算出

ドリル径方向の切削抵抗は主軸回転周りに働くトルクであり、ブリネル硬さ、1回転当たりの送り量、ドリル径によって実験式から求めることができる²⁾。その実験式において加工中に変動する要素は送り量であることから、刃先が被削材に食いつき、送り速度が一定となった条件下で特徴量を計算する。

図1(a)に示す電流の周期的な振幅変化は、電流センサとデータロガーの計測回路がモータ電流の高調波成分を計測できないことが要因と考えられる。ただし、切削抵抗が大きくなると、電流の全周波数成分の振幅も増加することから、図2に示す実効値の波形の谷(最小値)の値も大きくなる。そこで刃先が被削材に食いつき、送り速度が一定となる加工後半に特徴量算出時間帯を設け、その時間帯で実効値の波形の谷が出現した際の特徴

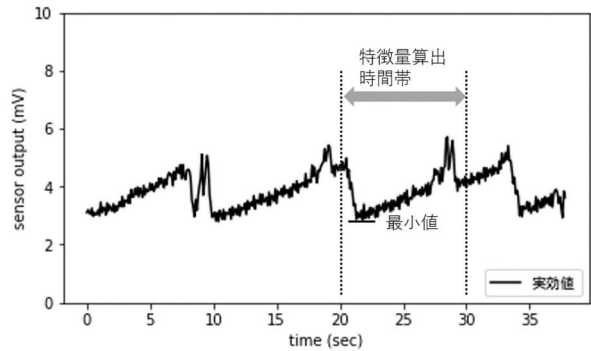


図2 主軸モータ電流の特徴量算出

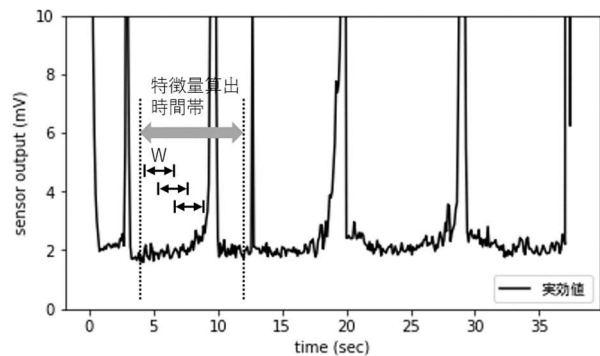


図3 Z軸モータ電流の特徴量算出

量とする。

2. 3. 2 座屈破損の特徴量算出

座屈破損は、ドリル刃先が摩耗し被削材に食いつきできない状態で軸方向の力が増加することで発生する。そのため、図1(b)に示す被削材と刃先の当たりから送り速度が変更するまでの間に特徴量算出時間帯を設け(図3)、その時間帯で特徴量を算出する。ただし、Z軸モータには一定間隔でノイズが混入し、その発生時間は加工時間と同期していないため、一定間隔より小さい時間窓Wで実効値を切り取り、特徴量を算出する。具体的には、図3に示す特徴量算出時間帯の中において時間窓Wをずらしながら実効値の平均を計算する。計算から求めた複数の実効値平均値の中から最小値を選択することで、ノイズの影響が小さい特徴量を求める。

3. 外れ値検知手法を用いた破損予兆の検出

3. 1 異常度計算

外れ値検知は正常データの分布から外れた値を検出する方法であり、異常データの取得が困難なときに用いる。ここでは特徴量の分布が正規分布に従うという仮定のもと、ホテリング T^2 法³⁾を用いた外れ値検知を行い、ドリルの破損予兆を検出する。

本研究では特徴量の分布を正規分布と仮定しているが、実際にはドリルの加工穴数が増えるに伴い、切れ刃のコーティング剥がれが進展し、その結果、特徴量が時間的に変化する。そこで外れ値検知を行う加工穴に対して、

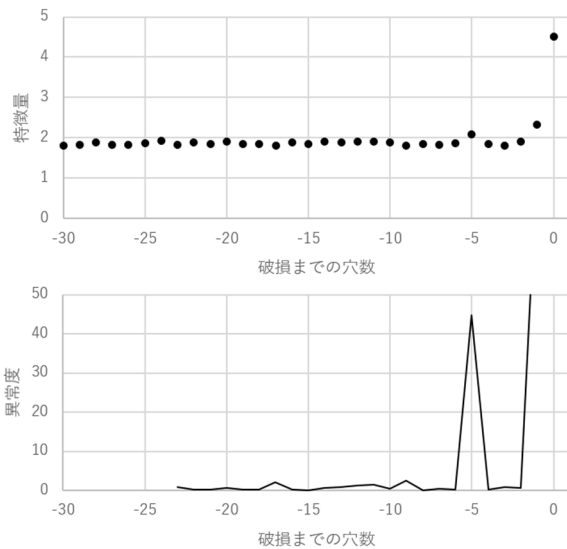


図4 ドリル破損時の特微量と異常度(Z軸モータ)

直前に加工した穴の特微量を統計量として用いることにより、時間的変化の影響を小さくし、正規分布の仮定を維持する。

i 番目の穴を加工しているときの、直前に加工した穴の特微量 N 個を用いた標本平均 $\hat{\mu}$ 、標本分散 $\hat{\sigma}^2$ を以下に表す。ここで $x^{(n)}$ は特微量を示す。

$$\hat{\mu} = \frac{1}{N} \sum_{n=i-N+1}^{i-1} x^{(n)} \quad (1)$$

$$\hat{\sigma}^2 = \frac{1}{N} \sum_{n=i-N+1}^{i-1} (x^{(n)} - \hat{\mu})^2 \quad (2)$$

ただし、主軸モータに関しては 2.3.1 項の記述のとおり、特微量算出時間帯内に実効値の波形の谷が出現しなかった場合は特微量が求まらない。その際は特微量を欠損値とし、標本平均 $\hat{\mu}$ 、標本分散 $\hat{\sigma}^2$ の計算から除外する。

ホテリング T^2 法は、正常データの分布に対して観測値がどの程度離れているかを異常度 a として定義する。異常度 $a^{(i)}$ は i 番目加工穴の計測データの特微量 $x^{(i)}$ に対して、以下のとおり計算する。

$$a^{(i)} = \left(\frac{x^{(i)} - \hat{\mu}}{\hat{\sigma}} \right)^2 \quad (3)$$

異常度 a は N が大きい場合、自由度 1 スケール因子 1 のカイ 2 乗分布に従うことがわかっている。

ドリルが破損するまで加工し続けたときの計測データをもとに、オフラインで求めた Z 軸モータの特微量とその異常度を図 4 に示す。なお横軸は 0 を破損穴としたときの破損までの穴数である。図より破損数穴前に特微量が大きくなり、それに従い異常度も大きく変化していることがわかる。

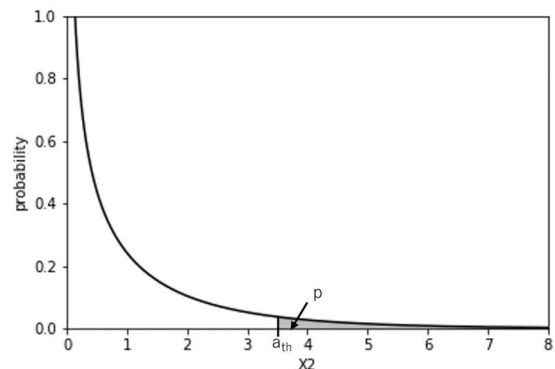


図5 カイ 2 乗分布

3.2 閾値設定

先に求めた異常度 a に対して閾値判定を行うことで外れ値を検知する。そのためには予め閾値を決めておく必要がある。実際にドリルが破損するまで加工を行い、そのときの特微量をもとに異常度を計算し、閾値を決める方法もある。しかし、異なる径と長さのドリルに対して各々破損させる必要があり現実的ではない。そのため、異常度がカイ 2 乗分布に従う性質を利用して、外れ値が出現する確率をもとに閾値を決める。

加工実績をもとに決めたドリル寿命穴数の逆数を確率 p としたとき、図 5 のカイ 2 乗分布の上側面積(図中のグレー領域)が p となる横軸を探し出す。このときの横軸の値を閾値 a_{th} とする。

3.3 適用例

図 6、7 に、主軸モータと Z 軸モータの計測データをもとにオフラインで算出した異常度の計算結果の一例を示す。図(a)は特微量を、図(b)は特微量から算出した異常度 a と閾値を示す。異常度を計算する際の統計量は直前の 30 穴のデータを用いて算出し、閾値は寿命穴数 250 穴の確率をもとに計算した。ねじれ破損と座屈破損は破損原因が異なるため、主軸モータと Z 軸モータの特微量には相関がないと判断し、異常度は主軸モータと Z 軸モータの個々で計算した。加工開始直後は標本平均、標本分散を計算するデータ数が乏しいため、異常度計算はしていない。そのため、加工初期のドリル破損を見落とす危険がある。しかし、実業務では穴加工を行う前にドリル刃先を馴染ませるための試し加工を行っており、初期破損の可能性は低いことから問題ないと考えている。なお、主軸モータの特微量が求まらない加工穴の異常度は 0 とした。

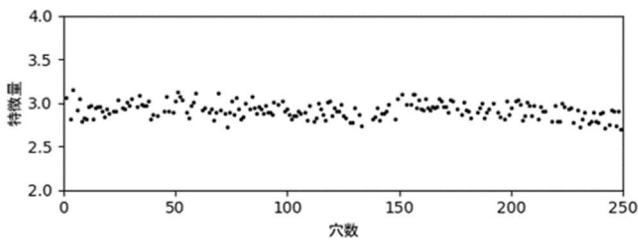
図 6、7 の加工で使用したドリルは、閾値設定で用いた寿命穴数 250 穴以下での破損が少ないことが実績からわかっている。それは主軸モータと Z 軸モータの異常度が閾値を下回ることを指しており、図の計算結果も同様な結果となっている。

計算で求めた特微量にはノイズの影響が少なからずあ

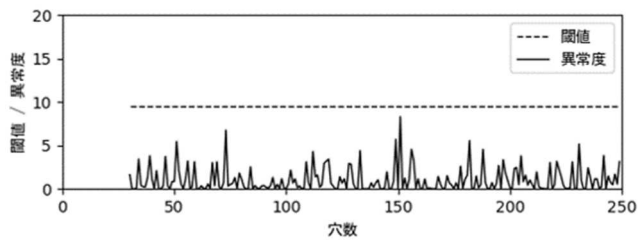
その影響により、閾値判定において誤判定となることが考えられる。そのため、センサなどの見直しを図りノイズの影響を低減する必要がある。

【参考文献】

- 1) 長谷川蘭, アコースティックエミッション法を用いた微小径ドリルの折損予知に関する研究, 埼玉工業大学工学部紀要, 第28号, pp.3-7, 2018
- 2) 例えば, M.C.Shaw, and C.J.Oxford Jr, On the Drilling of Metals 2-The Torque and Thrust in Drilling, Trans. of ASME, Vol.79, pp.139-148, 1957
- 3) 井手剛, 入門機械学習による異常検知, コロナ社, 2015

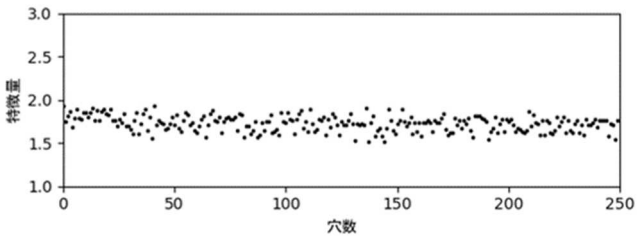


(a) 特徴量

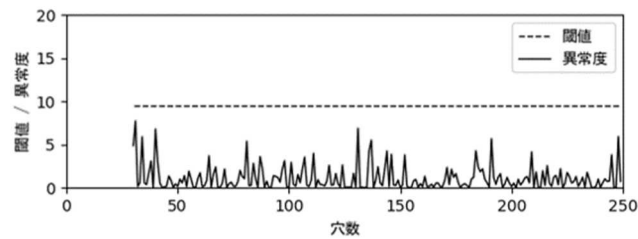


(b) 異常度

図6 主軸モータの異常度計算結果



(a) 特徴量



(b) 異常度

図7 Z軸モータの異常度計算結果

り、その結果、異常度が単発的に大きくなることがある。現状の仕組みはロバストでないため、実際の加工業務を通じて対策を施す必要がある。

4. まとめ

本研究では、穴あけ加工時の主軸モータと Z 軸モータの電流から特徴量を求め、外れ値検知手法を用いてドリル破損を予兆する仕組みを構築した。加工時の計測データから算出した特徴量の統計量をもとに異常度を計算したところ、破損の数穴前に異常度が変化することがわかり、ドリルの破損予兆が検出できる示唆を得た。今後は実際の加工業務を通じて、仕組みの評価、閾値が適切であるか検討する予定である。

今回計測した電流データにはノイズが含まれており、

モータ状態計測システムとエミュレータの開発

田畑克彦*、横山哲也*、大橋勉*、馬場公弘†、杉本圭三†

Development of motor monitoring system and a motor emulator

TABATA Katsuhiko*, YOKOYAMA Tetsuya*, OHASHI Tsuyoshi*, BABA Kimihiro† and SUGIMOTO Keizo†

IoT 技術の進展により多様なデータが収集できるようになり、収集したデータの活用方法が重要となっている。製造業においては、製造設備等から収集したデータを活用して、異常検知や機器の故障予測などのニーズが高まっている。しかしながら、これらの実現のためには、収集した大量のデータを分析する方法の確立が不可欠であり、このことが導入の際の大きな課題となっている。本研究では、この課題解決のモデルケースとして、製造工程で多く使用されているモータの状態を計測し、計測データから異常や故障予測を行うためのデータ分析技術の開発を行う。本年度はモータ状態を把握する計測システムと、モータ異常の再現や故障予測に資するためのエミュレータを開発したので報告する。

1. はじめに

近年の IoT 技術、クラウド技術、AI 技術の進展を背景に、データが生み出す価値への期待が高まり、製造現場の見える化が普及し始めた。2019 年版ものづくり白書¹⁾は、中小企業の 30%がラインや製造工程の見える化を実施あるいは計画しており、データを活用したプロセス改善を目指していることに触れている。実際の製造現場においても、効率化やコストダウンにつなげるために、収集したデータを分析し、機械の故障予測、異常検知、制御の効率化などの機能を付加することに大きな期待が寄せられている。このため、製造分野においてもデータ分析を支援する動きが見られる。ハード面の支援では、ハードウェアに依存しない FA と IT システムのシームレスな連携を可能とする、エッジコンピューティング領域のソフトウェアプラットフォームなどの普及が始まっている。また、ソフト面では統計解析や AI による解析が比較的容易な Python や R といったデータサイエンスのためのプログラミング言語の普及が進んでいる。

しかしながら、製造設備・機器等のデータから得られる情報は企業毎に異なるため、情報の収集・分析方法や、実現したい機能について、それぞれの要望に合わせて開発する必要がある。また、収集したデータから故障等の可能性を分析するためには、どのデータをどのように解析するかが課題であるとともに、長期間に渡りデータを収集する必要がある。このような状況では、対象を明らかにしていないと、本来の目的から逸脱してしまい、課題が解決しない、もしくは解決に時間を要することとなる。そこで本研究では、モデルケースとして、監視対象を生産設備内で広く利用されているモータに着目してデータ収集を行い、異常の検知と予測を行う。

2. 現状におけるモータ状態の監視

従来のモータの異常検査の一例について記す。工場の生産設備を保守している県内企業では、検査者が 1 月に 1 度の頻度で、携帯端末と振動加速度センサからなる専用の検査システムを使用し、数百台規模のモータ一つ一つに対してモータ軸受近くに振動加速度センサを取り付け、その振動を測定する。そして、測定したデータを解析することによってモータの軸受交換などの修繕の要否を判定する。図 1 は、ブロワモータ検査の模式図である。モータの負荷側と反負荷側に 1 軸の振動加速度センサをとりつけ、振動データを計測しつつ、手元の携帯端末で収集する。

実際の修繕の要否の判定は専用の検査システムの判定のほか、検査者が異音やがたつきなどがないか、耳や触診、計測データなどから総合的に判断しており、熟練を要することから、検査者が異常を見落とす可能性がある。このような見落としがあると、モータの軸受損傷などにより製造ラインに不具合をきたし、大きな損害が発生する。この企業では 2016 年度以降にブロワモータ故障による製造ラインの不具合が数件発生している。このことから、検査品質の安定化と異常の予兆の見落としを抑制し、検査作業の効率化を図ったシステムの開発が喫緊の課題となっている。

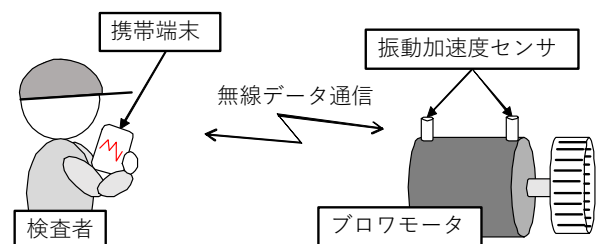


図1 モータ検査の一例

* 情報技術部

† イビデンエンジニアリング株式会社

3. モータ状態計測システムとエミュレータの開発

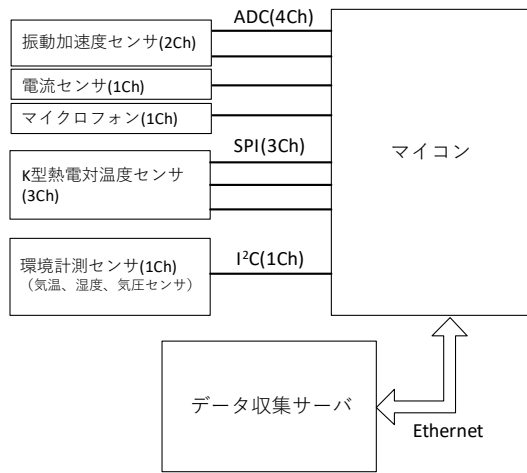
モータの状態監視は検査システムによる振動データの判定だけでなく熟練者の五感による判断も加わっていることから、振動以外の様々な物理量の計測が必要と考えられる。また、前述の製造ライン不具合の場合、故障する1カ月前のモータ検査の記録ではいずれも正常であったため、状態が急激に悪化する可能性がある。このため、状態を定常的に観測することが望ましい。これらを実現するために、モータの様々な物理量を計測するマイコンと計測したデータを収集するサーバからなるモータ状態計測システムを製作した。

また、モータの状態異常については、現状では軸受損傷などの致命的な損傷が何時発生するのか不明であり、製造現場で発生させることもできない。このため、実験環境下でモータの軸受損傷などを故意に発生させ、異常時の計測データの特徴を把握する必要がある。さらには、軸受が損傷してモータの異常停止に至る計測データの変動を分析することで、故障までの時間を予測する技術を開発することができると考えた。そこで、この2つの用途で使用するためのエミュレータを開発した。

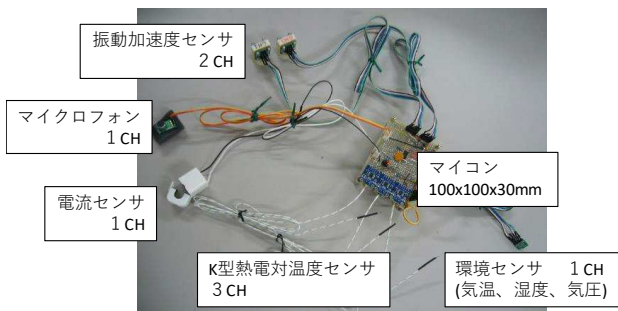
以降にそれぞれの概要について記述する。

3. 1 モータ状態計測システム

モータ状態計測システムのブロック図を図2(a)に示す。計測対象から様々な種類の物理量を計測するためのセン



(a)ブロック図



(b)製作したマイコンモジュール

図2 モータ状態計測システム

サ、計測データを取得するマイコン、さらにマイコンで計測したデータを集積するデータ収集サーバから構成される。

計測するセンサの種類は、現状で計測可能な物理量として、以下を選定した。

- ・振動加速度センサ(2Ch) :
従来のモータ監視で使用されている異常振動などを検出する。モータの負荷側と反負荷側の2箇所を設置する。
- ・電流センサ(1Ch) :
モータの負荷電流をモニタし、異常による負荷変動を検出する。
- ・マイクロフォン(1Ch) :
検査者の耳に代わるものとして、可聴域の異常音を検出する。
- ・温度センサ(3Ch) :
軸受部やモータ本体の異常による発熱を検出する。
- ・環境センサ(1Ch) :
気温、湿度、気圧の周囲環境をモニタする。
図2(b)は製作したマイコンモジュールである。

3. 2 モータエミュレータ

製造現場におけるモータの動作異常はいつどこで発生するのかが現状では予測できないため、モータの異常状態を再現するための用途と、軸受寿命に至るまでの計測データの変動を把握するための用途としてエミュレータを開発した。本エミュレータはこの2つの機能を兼ねており、その内容について記述する。

3. 2. 1 モータ異常の再現機能

開発するシステムの機能としては、モータの動作異常を検出する必要があるが、モータとその周辺を含む動作異常は表1のとおり多岐にわたり、異常の種類によって発生頻度も異なる。このため、故意に異常を再現させるシステムを開発し、異常時の計測データの特徴を事前に把握しておくことは有効である。図3が開発したモータ

表1 異常内容と代表的な周波数帯

周波数帯	異常内容
DC ~ 1000 Hz	<ul style="list-style-type: none"> ・ 構造物の緩やかな振動 ・ 軸の触れ回り振動 ・ 回転機器のアンバランス ・ 軸継手のずれ (ミスアライメント) ・ ゆるみ ・ ベースゆれ ・ 歯車の噛み合い不良 ・ 軸受部摩耗 ・ 電磁振動 ・ 溝高調波 ・ キンリ など
1000 Hz ~	<ul style="list-style-type: none"> ・ 転がり軸受の傷 ・ 転がり軸受の潤滑不良 ・ 転がり軸受や歯車損傷の衝撃 ・ 冷却ファンこすれ ・ ローターこすれ ・ 嵌め合いこすれ ・ 転がり軸受け内部構造のうねり など

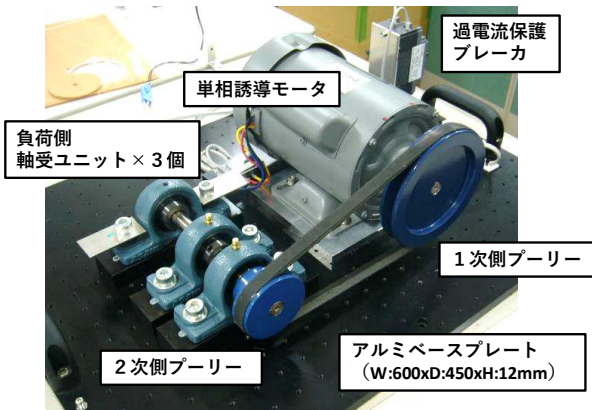


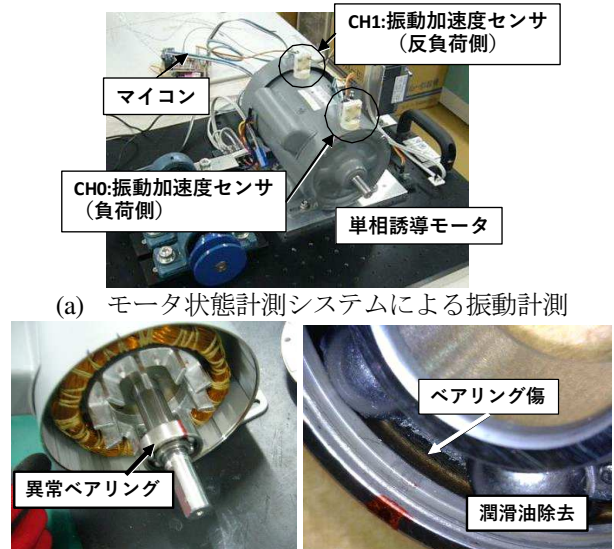
図3 モータエミュレータ試作機

表2 モータエミュレータの主な仕様

構成部品名	項目および仕様	備考	
モータ	方式	単相誘導モータ	全閉外扇型
	出力	200W	
	電源	単相100V	
	定格電流	4.7A	
	全負荷回転速度	1730rpm	
	軸受構造	深溝玉軸受 (NSK 6202ZZ)	負荷側、反負荷側ともに
プーリー	1次側ピッチ径	114.5mm	
	2次側ピッチ径	51.0mm	
負荷側軸受ユニット	メーカー型番	旭精工株式会社 UCP202	3個使用
	軸受構造	深溝玉軸受	基本動ラジアル 定格荷重Cr = 12.8kN
軸受ユニット荷重用皿ばね	材質	ばね用鋼	
	最大ばね力	1.52kN	

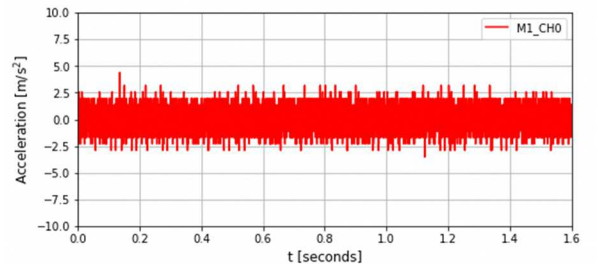
エミュレータである。エミュレータの構成部品は比較的一般に入手しやすいものを選定した。モータエミュレータの主な仕様を表2に示す。

また、モータ状態計測システムの動作を確認するための予備実験として、正常なモータ (M1 モータ) と、負荷側の軸受部のベアリング (NSK 6202ZZ) の潤滑グリスを除去して潤滑不良とし、さらにベアリング外輪部に金属やすりで傷をつけたモータ (M2 モータ) をそれぞれ回転させ、モータ状態計測システムにより観測した。図4のとおり振動加速度センサは2つ使用しており、CH0が負荷側ベアリング、CH1が反負荷側ベアリングの真上にマグネットで固定して計測した。正常モータ、異常モータそれぞれの負荷側に取り付けられた CH0 の振動加速度センサで計測した振動加速度の時系列データを図5 (a) (b)の上段に示す。また、このデータに対するフーリエ変換後に得られた周波数分布を図5(a)(b)下段に示す。図5の振動加速度の時系列データの振幅値は異常モータ (M2 モータ)の方が大きく、周波数分布でも異常モータの1kHz以上の周波数帯に振動成分が発生していることが確認できる。これは表1に記載されているように、転がり軸受 (ベアリング) 異常時に現れる周波数帯である³⁾。このため、M2モータのベアリング外周傷や潤滑不良に起因するものであり、妥当な結果と考えられる。今

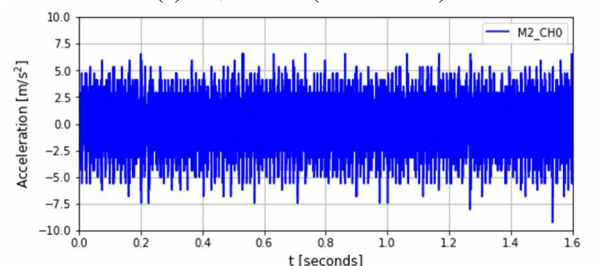
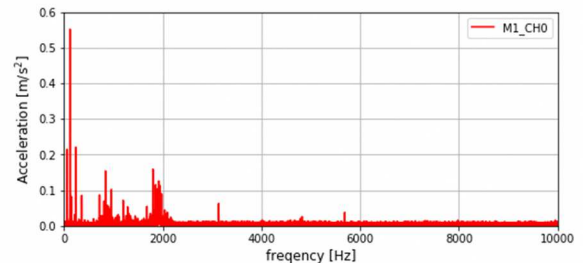


(b)異常ベアリングの取付け(M2 モータ)

図4 計測システムの動作確認実験



(a)正常モータ(M1 モータ)



(b)異常モータ(M2 モータ)

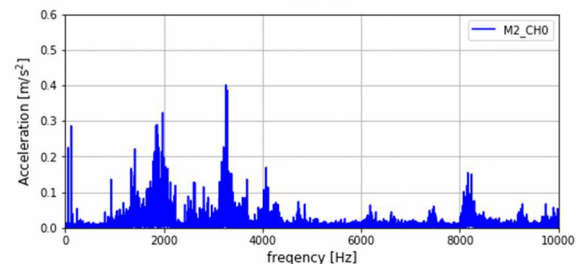


図5 振動加速度のデータ計測例

後は、取得した振動加速度の時系列データに対して振動加速度の包絡線処理や振動速度への変換などに加え、その他の物理量の計測データに関する分析も進める予定である。

3. 2. 2 軸受寿命加速試験機能

軸受設計時の転がり軸受(ベアリング)の定格寿命は日本工業規格 JIS B 1518 では、以下のように定義されている²⁾。

$$L_{10} = \left(\frac{C_r}{P_r}\right)^p \quad (1)$$

ここで L_{10} は基本定格寿命と呼ばれ、通常使用条件において信頼度が 90% の寿命として定義されており、一群の同じ軸受を同じ条件で運転したとき、90% の軸受が剥離を起こさずに回転できる総回転数である。この値は、通常は 100 万(10^6)回転に設定される。また C_r は基本動ラジアル定格荷重[kN]であり、基本定格寿命に理論上耐えうるような定格荷重であり軸受の材質や寸法によって設定される。さらに P_r は動等価ラジアル荷重[kN]であり、実際の荷重条件下で所望の軸受寿命が得られるような軸受にかかる一定の静止荷重[kN]である。最後に、 p は軸受の転動体の形状によって決まる定数であり、玉軸受では $p=3$ である。

ブロワモータのように一定回転数の軸受に使用する場合は時間で表すことが多く、(1)式をもとに基本定格寿命時間 L_{10h} [h]は以下の式で表すことができる。

$$L_{10h} = \left(\frac{10^6}{60 \cdot n}\right) \times \left(\frac{C_r}{P_r}\right)^p \quad (2)$$

ここで n は軸受部の軸回転数(min^{-1})である。

本エミュレータでは図3に示すようにモータ負荷軸に1次側プーリーを取り付け、ベルトを介して径が約半分

の2次側プーリーを回転させる。図6(a)は負荷側の拡大写真であるが、プーリーには $\phi 15\text{mm}$ の SUJ2 製の出力軸が3つの軸受ユニット(UCP202)により保持されている構造である。このうち、図6(a)の左端の軸受は他の2つの軸受に対して下方に 0.5mm オフセットさせて設置されている。このため、図6(b)のように皿ばねを取り付けることで、皿ばねの復元力によりベアリング上端のラジアル方向に対して荷重をかけることができる。例えば、図6のように2箇所5直列2並列の皿ばねを最大に圧縮して取り付けられた場合、動等価ラジアル荷重 P_r は表2の最大ばね力 1.52kN より $P_r=1.52\text{kN} \times 2 \times 2=6.08\text{kN}$ となる。また、メーカー型番の仕様から基本動ラジアル定格荷重 C_r は 12.8 kN である。さらに、無負荷時に実測したモータ軸回転数の 1800min^{-1} と、プーリーのピッチ径の比から負荷側軸の回転数 $n=4050\text{min}^{-1}$ が求められる。以上の数値を(2)式に代入すると基本定格寿命は $L_{10h}=38.4\text{h}$ となり、軸受部の 90% 信頼度の寿命を短縮することができる。皿ばねの直列数、並列数によりラジアル荷重を調整することにより、時間軸を変化させ軸受部のベアリングが異常に至る過程の観察が期待できる。

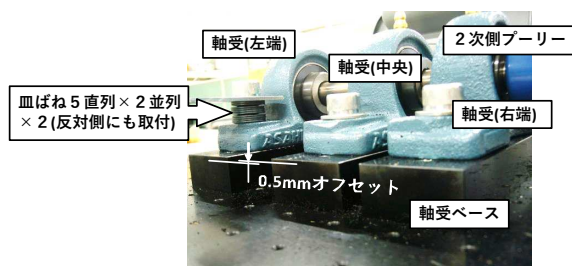
4. まとめ

製造現場で広く使用されるモータに対して精度良く異常検知と故障予測を行うため、振動データだけでなく、電流や音、温度、環境などの様々な物理量を計測し、計測データを蓄積するためのモータ状態計測システムを試作した。また、製造現場ではモータ異常を適当なタイミングで発生させることが事実上困難である。このため、異常状態を再現し計測データの特徴を捉えること、軸受に対して人工的な負荷をかけて寿命加速させることにより短期間で異常に至る計測データを収集することを目的としたエミュレータを試作した。このエミュレータは皿ばねにより軸受荷重を生成することによりコンパクトなシステムとすることができた。さらに開発したシステムにより、正常モータと異常モータの振動加速度データを計測し、時系列データや周波数分布を得ることで潤滑油不足などの異常を捉えることができ、モータ状態計測システムの基本的な動作を確認した。

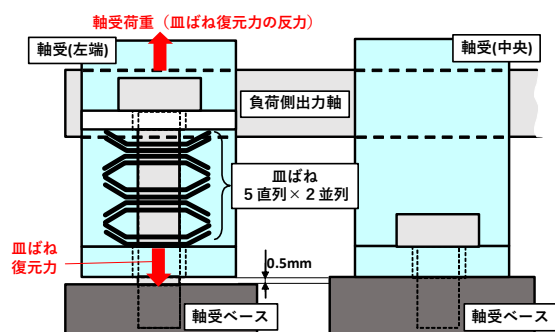
今後は本計測システムを使用し軸受が異常に至るまでの計測データを収集し、解析することにより、モータの異常予測を試みる。また、本計測システムを製造現場のブロワモータに適用することで、製造現場での計測データの変動からも分析を行う予定である。

【参考文献】

- 1) 経済産業省, 2019年版ものづくり白書, 2019
- 2) 日本規格協会, 転がり軸受-動定格荷重および定格寿命 JIS B 1518, 2013
- 3) 野田伸一, モータの騒音・振動と対策設計法, 科学情報出版株式会社, 2014



(a) 負荷側拡大写真



(b) 荷重生成模式図

図6 皿ばねによる負荷側軸受への荷重生成

壁面撮影装置を用いた画像統合技術と点検支援システムの研究開発（第2報）

生駒晃大*、渡辺博己*、松原早苗*、加藤光章†、鈴木真宏†、林忍†、原田宣男†、江口真澄†、斉藤富士夫†

Development of inspection support system and image stitching techniques using wall surface image capturing device (II)

IKOMA Akihiro*, WATANABE Hiroki*, MATSUBARA Sanae*, KATO Mitsuaki†, SUZUMURA Masahiro†, HAYASHI Shinobu†, HARATA Nobuo†, EGUCHI Masumi† and SAITO Fujio†

本研究では、橋梁などの社会インフラ構造物の点検作業の省力化や点検記録の信頼性向上を目的とし、画像処理技術を活用した点検支援システムの開発を行っている。今年度は昨年度開発した撮影装置や画像統合技術を改良することで、システム全体の使用性や画像統合精度の向上を図った。また、統合画像から壁面のひび割れを抽出し、ひび割れ幅の区分を推定する処理を新たに実装した。本稿では、点検支援システムに実装した画像処理技術の詳細について述べるとともに、統合やひび割れ計測の精度に関する検証結果について報告する。

1. はじめに

全国の約72万橋の橋梁のうち、建設後50年を経過する橋梁の割合が2029年には50%を超えるなど、社会インフラ構造物の多くで老朽化が進行している¹⁾。そのため、これらの構造物の維持管理を継続的かつ効率的に行うための仕組みが必要不可欠であるが、メンテナンスにかかるコストの増加や人材の不足などが社会的な問題となっている。特に、構造物の点検業務では、近接目視による5年ごとの定期点検が義務付けられており、作業の多くは点検作業員による手作業で行われるため負担が大きい。また、作業員ごとの判断基準のバラツキや、作業環境によっては安全性の確保なども課題となっている。

このような状況から、国土交通省は、定期点検の質を確保しつつ実施内容を合理化するため、具体的な点検方法等を定めた定期点検要領を2019年3月に改定し²⁾、近接目視を補完・代替・充実するためのドローンなどを用いた点検支援技術の活用を先行的に進めている。また、人工知能(AI)を活用した点検や計測、モニタリングに関する技術開発も進められており、近接目視によらない点検手法のベストミックスにも取り組んでいる。

そこで本研究でも、県内土木建築業の企業と共同で、橋梁などのコンクリート構造物を対象に、点検業務の省力化や効率化のための画像処理技術を活用した点検支援システムの開発に取り組んでいる³⁾。昨年度は、構造物の壁面を撮影するための撮影装置の開発や、撮影した壁面画像から統合画像を生成するための画像処理技術の開発を行った。また、開発した画像処理技術をコアエンジンとし、Web上でデータの管理や統合画像の生成、編集などを行うことが可能なWebアプリケーションのプロトタイプも製作した。

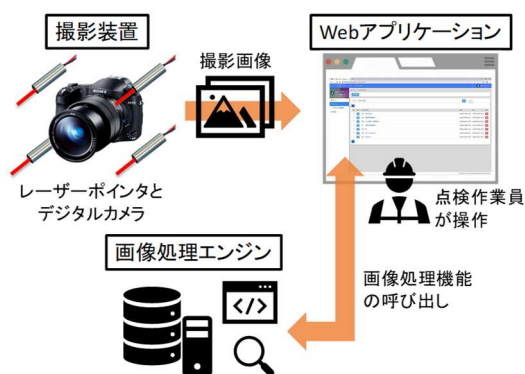


図1 点検支援システムの構成

今年度は、昨年度までに開発した撮影装置や画像処理技術、Webアプリケーションをさらに改良し、点検支援システム全体の汎用性や使用性を向上させるとともに、壁面に生じるひび割れの自動抽出や、ひび割れ幅の計測に関する処理を実装したので報告する。また、実際の点検現場で撮影された画像を用いて、壁面画像の統合精度やひび割れ計測精度について検証した結果についても合わせて報告する。

2. 点検支援システムの開発

本研究で開発を行っている点検支援システムは、図1に示すように、構造物壁面の画像を撮影するための撮影装置、撮影された画像を処理する画像処理エンジン、処理された画像を用いて点検作業を行うためのWebアプリケーションで構成されている。本章では点検支援システムの各構成の概要について説明する。

2.1 壁面撮影装置

図2に本研究で用いる撮影装置の外観を示す。デジタルカメラと4つのレーザーポインタを一体的に組み合わせた装置となっており、このレーザーポインタの輝点位置を画像から検出することで、壁面との距離や、壁面に対するカメラ姿勢を推定可能な構造となっている。

* 情報技術部

† 株式会社市川工務店

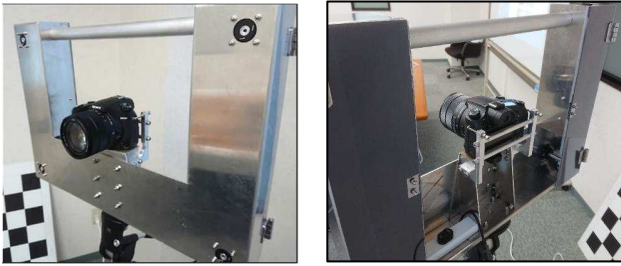


図2 撮影装置の外観

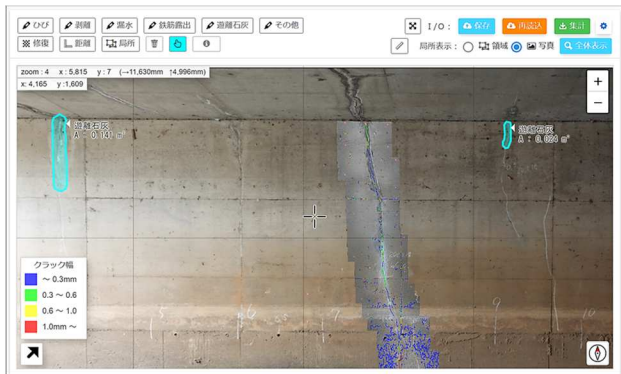


図3 Webアプリケーションのエディタ機能

カメラ位置姿勢の推定手法の原理上、撮影中にカメラとレーザーポインタの位置関係が変化すると推定が正しく行われず。そのため、カメラ背面に新たに固定具を追加することで、装置を移動させた際のカメラの振動やズレを抑える改良を加えた。

2.2 画像処理エンジン

開発した画像処理エンジンは、現場における点検作業の工程に合わせ、基準パラメータの抽出処理、大域画像の統合処理、局所画像の統合処理、ひび割れ抽出処理の4つの処理で構成されており、Webアプリケーション側からの呼び出しに応じて処理が実行される。各処理の詳細は3章で説明するが、各処理の実行に必要な画像はそれぞれ撮影方法が異なるため、現場の作業者は撮影装置を用いて各処理に適した画像を収集する必要がある。

2.3 Webアプリケーション

画像等のデジタルデータを活用した点検作業を行うためのツールとして、本研究ではWebブラウザ上で操作可能なWebアプリケーションの開発も行っている。点検作業員はPCやタブレット等のインターネットに接続された端末を用いることで、アプリケーションの各種機能や、サーバに保存されたデータを現場や事務所などから利用することができる。

また、アプリケーションに搭載されているエディタ機能を用いることで、統合画像に対して、図3に示すような画面でスケッチ作業を行うことができる。この機能により、従来の紙図面への手書きスケッチと比較してより正確な損傷の記録が可能であり、昨年度からの改良により追加された計測ツールや、損傷の記録と集計機能などにより、操作性や使用性が大きく向上した。

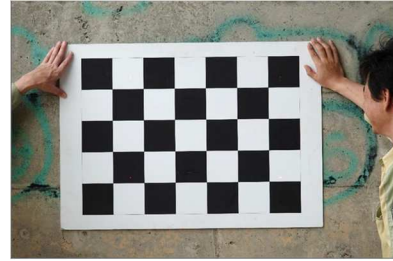


図4 基準画像の撮影の様子

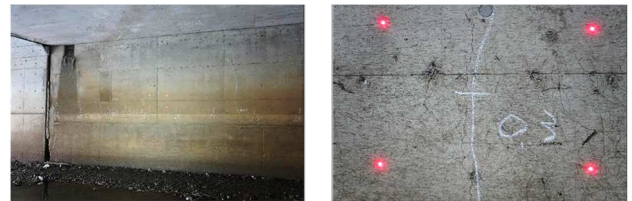


図5 大域画像と局所画像



図6 大域統合画像

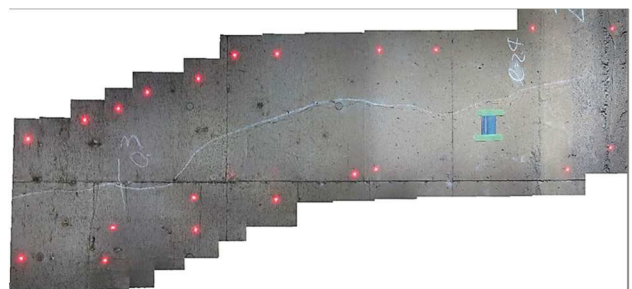


図7 局所統合画像（縦方向の画像を横向きで表示）

3. 画像処理エンジンの処理

3.1 基準パラメータの抽出処理

基準パラメータの抽出処理では、図4に示すようなキャリブレーションボードを写した基準画像を用いて、撮影画像からカメラの位置姿勢を推定するために必要なパラメータを抽出する。基準画像は点検開始時に1枚だけ撮影するが、撮影の際にはできるだけキャリブレーションボードに対して正対し、カメラ本体の光学中心のズレを考慮して、ズームする際の倍率は実際の壁面を撮影する倍率と近い値で撮影することが望ましい。

3.2 大域画像と局所画像の統合処理

統合処理では、壁面の広範囲を一度に撮影した大域画像（図5左）と、損傷箇所付近のみを撮影した局所画像（図5右）を使用し、大域と局所で異なる統合画像を生成する。大域同士の統合結果（図6）は壁面全体の状態や特徴の把握に使用し、局所同士の統合結果（図7）はひび割れなどの損傷形状の抽出や計測処理に使用する。

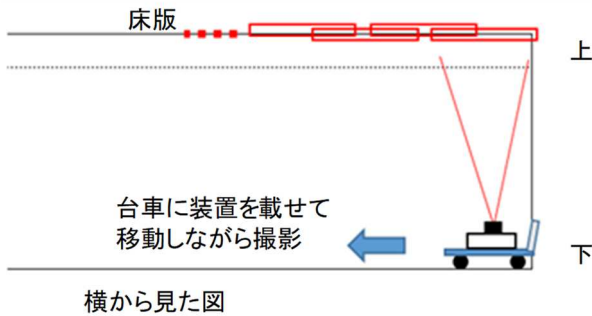


図8 床版部分の撮影イメージ



図9 床版部分の大域統合画像

統合処理では、壁面や損傷箇所を正面から捉えたような歪みのない画像を生成することが目標であり、各画像から抽出した局所特徴量をもとに画像間の対応付けや画像変換を行う。しかし、壁面の汚れなどの影響で特徴抽出箇所に偏りが生じると正しく位置合わせできない問題があった。そこで、特徴抽出の際に画像を分割して各領域で一定数の特徴を抽出するよう改良することで統合画像に生じる歪みを軽減した。

3.3 床版部分の統合処理

大域や局所の統合で使用する画像を撮影する場合、対象となる壁面や損傷箇所のおおよそ正面に撮影装置を設置し、装置の雲台でカメラ角度を変えながら撮影を行う。しかし、橋梁等の床版を撮影する場合、撮影装置を真上に向けて撮影する必要があるため、雲台での首振り撮影ではなく、図8のように装置を上向きに固定して台車等に乗せて移動しながら撮影する方法を採用した。図9に実際の床版を撮影した画像の統合結果を示す。

従来の装置位置を固定して回転のみで撮影された画像同士の統合と、新たな装置向きを固定して平行移動のみで撮影された画像同士の統合とでは、統合の際のカメラパラメータの算出手法が異なる。そのため、それぞれに適した統合処理を実行できるよう、Webアプリケーション上でどちらの方法で撮影したのかを選択できる仕組みを追加し、処理を切り替えられるよう改良した。

3.4 ひび割れの抽出と計測処理

ひび割れ抽出処理では、統合処理で生成した局所統合画像から図10に示す流れでひび割れ候補の抽出を行う。

最初のひび割れ強調処理では、ヘッセ行列を用いた多重スケール線強調処理と確率的弛緩法⁴⁾を用いて、ひび割れである確率の高い部分を自動的に抽出する。次に、Hilditchの細線化処理⁵⁾によりひび割れを線分へと変換

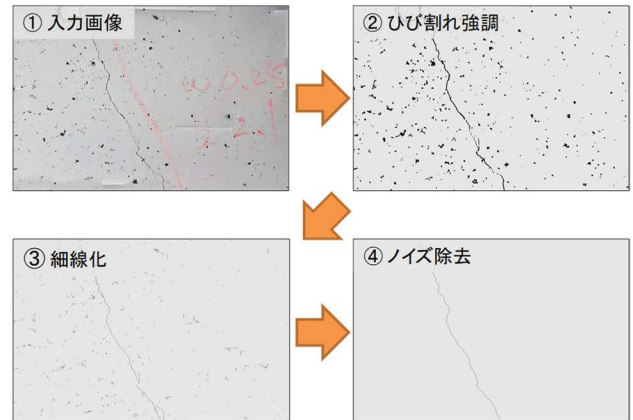


図10 ひび割れ抽出処理の流れ

する。最後に、細線化した結果からひび割れ以外のノイズを除去するため、線分同士の連結箇所ですらに線分を分割する。分割された線分の長さや方向の情報から、線分の除去や連結によりひび割れ候補の絞り込みを繰り返すことにより、最終的なひび割れ位置を確定する。

ひび割れ抽出に使用する局所統合画像は、レーザーポインタを用いることで位置や姿勢が推定された画像から生成されている。そのため、統合画像のスケールは既知であり、ひび割れ抽出処理により検出されたひび割れの幅や長さを画像から計測することができる。

ひび割れ幅の計測では、ひび割れ抽出の際の多重スケール線強調処理で行った、標準偏差の異なる複数のガウシアン関数の2階微分との畳み込みの結果を利用して幅を推定する。ガウシアン関数の標準偏差を変えることで、畳み込んだ際に強調される線幅のスケールも変化するため、強調度合が最大となったスケールを記録しておくことで、最終的に確定したひび割れ位置と合わせて幅を決定する。ただし、標準偏差の値や畳み込んだ回数によって判別できる幅のスケールが異なるため、本手法では具体的なひび割れ幅の数値を算出するのではなく、0.3mmから0.6mmの間などと幅の大きさを区分で推定する。

ひび割れ長さの計測については、抽出したひび割れを直線近似した線分ごとに長さを足し合わせることで容易に算出可能である。

また、本手法により、画像中のひび割れの自動抽出が可能となったが、ひび割れのみを正確にすべて抽出することは困難である。そのため、画像処理で抽出した結果をもとに、Webアプリケーションのエディタ機能を用いて、残ったノイズの除去や抽出できなかったひび割れの追加を手動で行い、より正確な損傷記録を作成する。

4. 実験と結果

4.1 壁面画像の統合精度の検証

図11、12は実際の点検現場で撮影した大域と局所それぞれの統合処理の結果であり、壁面から約6.5m離れた位置に装置を設置し、装置の回転のみで撮影した画像

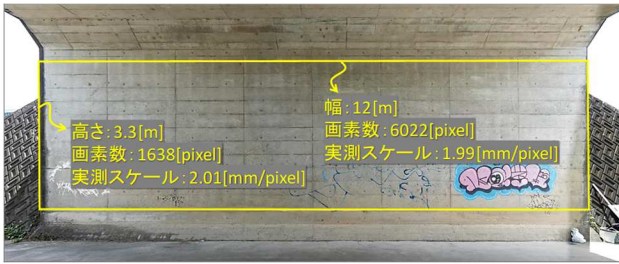


図1-1 大域統合画像の精度検証結果

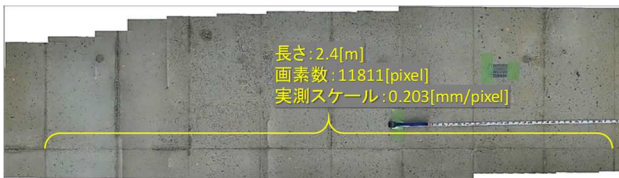


図1-2 局所統合画像の精度検証結果
(縦方向の画像を横向きで表示)

を大域は6枚、局所は13枚使用している。なお、撮影に使用したカメラの解像度は5472×3648である。

本研究では、大域統合画像は2.0mm/pixel、局所統合画像は0.2mm/pixelのスケールでそれぞれ統合を行うよう設定しており、図11、12の寸法が既知な部分と生成画像の画素数を用いて実測スケールを算出したところ、設定スケールとほぼ等しい値となった。よって、開発した画像処理エンジンにより正確に統合処理が行えていることが確認できた。

4.2 ひび割れ計測精度の検証

図13は、精度検証のために0.2mm/pixelのスケールで生成された局所統合画像から一部切出したひび割れを含む画像と、ひび割れ抽出と幅の計測を自動で行った結果である。本研究では、ひび割れ抽出処理により検出されたひび割れの幅を0.3mm、0.6mm、1.0mmの3つの値を閾値として4つの区分へと分類を行っており、図13の結果画像では、幅の小さな区分から順に濃淡値を濃くしながらひび割れ箇所には線分を描画している。

図13の各画像中には目視点検により計測されたひび割れ幅を壁面にチョークで記録した箇所が写り込んでおり、この実測値と画像処理により推定された幅の区分とを比較すると、実測値を含む区分に分類されていることから、幅の計測が正しく行えていることが確認できた。

5. まとめ

画像処理技術を活用したインフラ点検支援システムの開発に向け、撮影装置や画像処理エンジン、Webアプリケーションの改良を行った。画像からの損傷計測技術として、ひび割れ抽出処理を新たに実装することで、統合画像からのひび割れ候補の抽出やひび割れ幅の推定を自動で行うことが可能となった。

また、画像の統合やひび割れ計測に関する精度検証を行い、実用上問題のない精度で処理が行えていることを確認した。ただし、撮影条件や壁面の状態によっては、

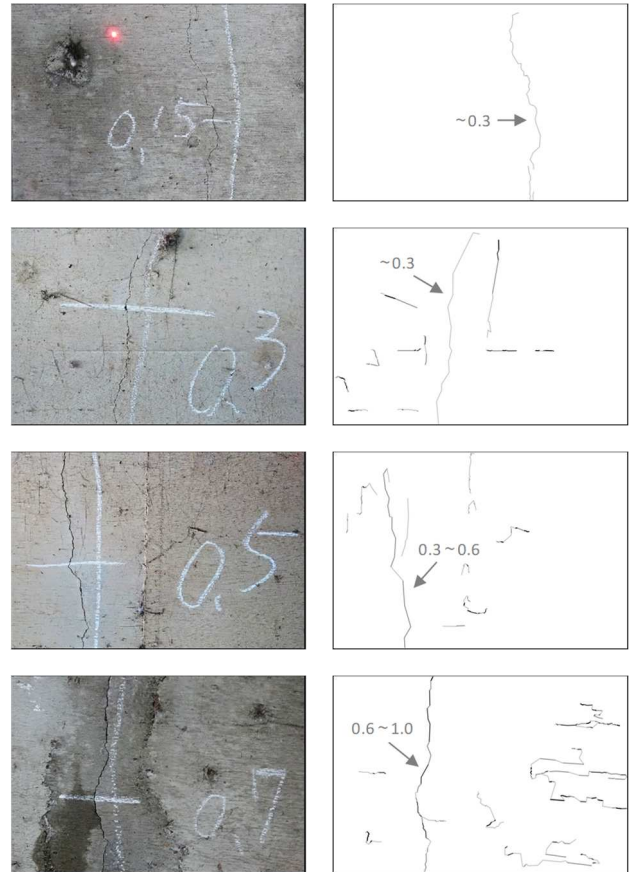


図1-3 ひび割れ抽出と幅区分の分類結果
(左：入力画像、右：結果画像)

統合画像に歪みが生じることや、設定したスケール通りに統合できず、ひび割れ抽出や計測精度が悪化することがある。そのため、今後も様々な点検現場での検証を重ねながらシステムの改良を行い、点検支援システムの実用化に向けた研究開発を実施する。

【謝辞】

本研究の遂行にあたり、Webアプリケーションの開発にご協力頂きました株式会社ライトスピードソリューションズの皆様に深く感謝致します。

本研究の一部は、公益財団法人岐阜県産業経済振興センターの令和元年度産学官共同研究助成事業の補助を受けたものである。

【参考文献】

- 1) 国土交通省, 道路メンテナンス年報, 2019
- 2) 国土交通省, 道路橋定期点検要領, 2019
- 3) 生駒ら, 岐阜県情報技術研究所研究報告第20号, pp.52-57, 2019
- 4) 藤田ら, 土木学会論文集 F, vol.66, no.3, pp.459-470, 2010
- 5) C. J. Hilditch, Machine Intelligence, vol.6, pp.403-420, 1969

温湿度センシングに関する技術開発

久富茂樹*、田畑克彦*

Development for temperature and humidity sensing

KUDOMI Shigeki* and TABATA Katsuhiko*

高湿度域での正確な湿度測定を目的として、ペルチェ素子を使用した冷却式露点計を試作した。本試作露点計は、環境光の影響を低減するために、赤外 LED をパルス駆動させ、フォトダイオードで検出した光の強度によって結露状態を検出する方式とした。人工気象器を使用した動作試験によって、概ね正しく動作していることを確認した。

1. はじめに

農作物の病害の発生には、環境の温度、湿度が大きく影響することが多い。特に高湿度域で病害の発生が伸展するため、高湿度域での正確な湿度測定が重要である。湿度センサは、様々な方式のものが市販されているが、静電容量式は、高湿度環境での耐久性、精度、応答性に課題がある。また、乾湿計式は、蒸留水の補給、ガーゼ（ウィック）の交換が定期的に必要で手間がかかるという問題がある。

本研究では、高湿度域での正確な湿度測定を目的として、ペルチェ素子を使用した冷却式露点計を試作し、人工気象器での露点測定を行ったので報告する。

2. 冷却式露点計の原理

露点を正確に測定できれば精度の良い湿度測定が可能である。露点を検出する方法として、大気の一部を冷却し結露させた時の温度を測定して露点を検出する方法が知られている²⁾。図1に冷却式露点計の原理図を示す。鏡面状の反射板に LED などの発光素子から光を照射し、その反射光をフォトダイオードなどの光検出素子で検出できるようにしておく。冷却装置で反射板を徐々に冷却していくと、反射板表面付近の気体も冷却されて、気体に含まれる水分が徐々に飽和状態に近づいていく。そし

て、飽和状態に達すると、反射板表面に結露する。このとき、発光素子から照射された光は、反射板表面に付いた露によって拡散されたり、吸収されたりして、光検出器で検出される光量が減少する。この時の反射板表面の温度を測定すると、その温度が露点として求まる。

3. 冷却式露点計の試作

3.1 ペルチェ素子の温度制御

本研究では、冷却装置としてペルチェ素子を用いた。ペルチェ素子は、異なる2種類の金属または半導体（n型、p型）を2つの点で接合したもので、これに電流を流すと、片方の接点は冷やされ、もう一方は温められる。小型、軽量、温度応答性が良く、取り扱いが簡単であるという長所がある。

実験では、ペルチェ素子（4.6Aタイプ、サイズ：30x30mm）の吸熱面に熱電対を貼付して、マイコン（LPC1768）によりPWM駆動した。図2にデューティ比を0.3, 0.5, 0.8, 1.0にした時のペルチェ素子吸熱面の温度変化を示す。時間0sの時点で通電を開始した。デューティ比が大きいほど急速に温度が低下していき最低温度も低くなり、かつ、最低温度に達する時間も早かった。開発する露点計は高湿度域での使用を考慮しており、20℃前後の環境では、露点との差が5℃あれば、湿度75%以上の状態を検出できるため、デューティ比は0.5としてペルチェ素子を駆動することにした。

3.2 赤外光素子を使用した結露検出

開発する露点計は、農作物のハウスなどの屋外での使用も想定しているため、太陽光スペクトルを考慮し、できるだけ太陽光の影響を受けないように、赤外域の光素子を使用して結露検出を試みた。発光素子には、ピーク波長が1.45μmの赤外LEDを用い、光検出素子には感度波長範囲が0.9~1.7μmのフォトダイオードを用いた。ペルチェ素子の表面にアルミテープを貼って鏡面とし、発光素子の光を光検出素子で受光できるように、素子の位置と角度を調整して取り付けした。図3にLEDを直流駆動した場合のフォトダイオードの出力を示す。時間

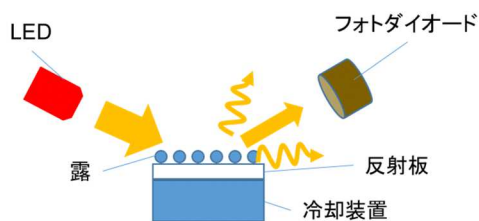


図1 冷却式露点計の原理

* 情報技術部

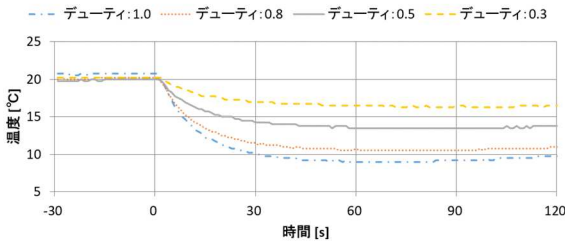


図2 ペルチェ素子の温度変化

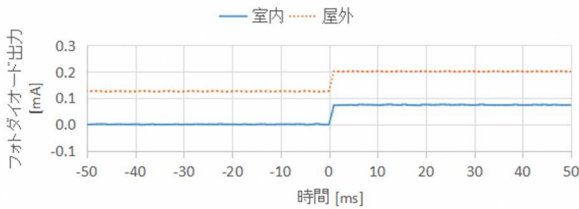


図3 フォトダイオード出力 (LED 直流駆動)

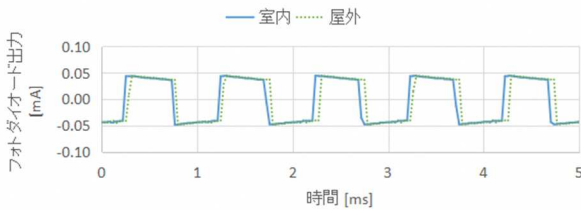


図4 フォトダイオード出力 (LED パルス駆動)

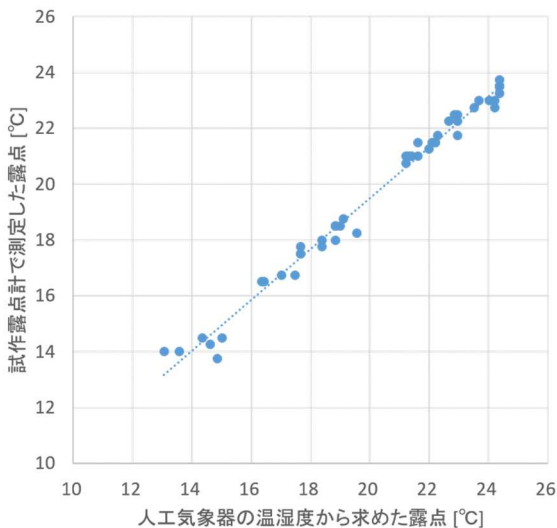


図5 人工気象器を使用した動作試験

0sの時点でLEDを駆動している。室内ではLEDを駆動する前のフォトダイオード出力はほぼ0であるが、屋外で測定した場合は、LEDを駆動する前から、太陽光によりフォトトランジスタからは約0.125mA出力され

ており、屋内でLEDを駆動した場合の出力である約0.075mAを上回っていた。赤外光を使用しても、太陽光による外乱の影響を完全には避けられなかった。そこで、太陽光の強度変化に比べて十分に速くなるように、周波数が1kHz、デューティ比が50%のパルスでLEDを駆動した。出力端には、直流成分を除去するために、1μFのコンデンサを入れた。パルス駆動したときのフォトダイオードの出力を図4に示す。室内で測定したときも屋外で測定したときも出力波形はほぼ等しく、太陽光による外乱の影響を低減することができた。

3.3 露点計の試作

ペルチェ素子のPWM制御、LEDのパルス制御、結露状態の検出、反射板表面の温度計測は、マイコン(LPC1768)で行った。ペルチェ素子をPWM制御により徐々に冷却しながら、0.1s毎にLEDのパルス駆動とフォトダイオードでの光検出を行い、マイコンでフォトダイオードの出力波形の振幅を求め、前回の振幅との差分を求めた。温度が低下していき、反射板表面に結露が生じると、差分値が大きく変動するため、閾値を設定し、閾値を超えた場合に結露が生じたと判定した。この時の温度を熱電対で測定し露点とした。

3.4 人工気象器を使用した動作確認

人工気象器(日本医化器械製作所製、LPH-411SP)に試作した露点計を入れ、人工気象器の温度設定を15°C、20°C、25°Cの3段階、湿度設定を70%~90%の間で変えて制御し、その時の露点を試作露点計で測定した。人工気象器には露点表示の機能がないため、人工気象器で計測された温度、湿度から計算により露点を求めた。

図5に、人工気象器の温湿度から求めた露点と試作した露点計で測定した露点の関係をプロットした。相関係数Rは0.9931(決定係数R²:0.9862)となり、両者の間には高い相関が見られ、試作した露点計が想定していたように動作していることを確認できた。

4. まとめ

高湿度環境で、精度よく露点を測定するために、冷却式の露点計を試作した。環境光の影響を低減するために、赤外LEDをパルス駆動させて、フォトダイオードで検出した光の強度によって結露状態を検出する方式とした。人工気象器を使用した動作試験によって、概ね正しく動作していることを確認した。今後はハウス環境など屋外での実験を行い、粉塵や土埃などの影響を確認する予定である。

【参考文献】

- 1) 久富ら,岐阜県情報技術研究所研究報告 第19号, pp33-35,2018
- 2) 内藤ら,工業計測法ハンドブック,朝倉書店, pp297-298,1976

目視検査員のための目のセルフケア支援技術の研究開発（第1報）

藤井勝敏*

Proposal of a method to support eye health management of sorting workers (I)

FUJII Katsutoshi*

工業製品等の不良品を鑑別する目視検査を適正に行うためには、検査員の目が健康であることと、目の能力を維持する不断の努力が求められる。具体的には、日常生活での目の使い方を節制することと、業務上では適切な作業環境と休息の確保に努めることであるが、その動機付けには、作業員自身の自覚症状に基づく対応だけではなく、客観的に観測された目の健全性を示す指標が必要であると考え。本研究では、近年入手が容易になった情報機器やセンサデバイス等を応用し、普段から自分自身の目の状態を観測、記録、提示する支援技術を検討し、目視検査に従事する人を筆頭に、県民の目の健康に役立つ技術開発を目指す。

1. はじめに

近年、スマートフォンに代表される携帯型情報機器や通信型ゲーム機が普及し、SNS やゲームに多くの時間を費やす生活習慣が問題になっている。その悪影響については様々な提言があるが、本研究では特に目に及ぼす健康面への影響¹⁾に着目する。文化的かつ安全な生活を送る上で、若年期から生涯にわたって目を健康に保つことが望まれるのは当然であるが、一部の職種においては目の健康が仕事の質に直結することがある。特に、製品の不良を鑑別する目視検査業務においては、対象物に関する専門知識や安定した判別基準を維持する経験もさることながら、そもそも対象物を明瞭に目視できていなければ意味を成さない業務である。

本研究では、現役の目視検査員が目の健康を維持し、長く安心して働ける環境を目指す一方で、若年期から目を酷使する生活様式²⁾が、将来の製造業を担う人材の目を悪化させ、目視検査精度の低下により製品品質を悪化させる遠因となる可能性を憂慮している。そこで、目視検査員による目の自己管理支援とともに、県民一人ひとりが目の健康状態に関心を持ち、節度ある目の使い方を意識することを目的に、特に情報技術を活用した目のセルフケア支援技術の実現可能性について検討し提案する。

2. 目のセルフケア支援とは

医療関係者ではない一般の生活者が日常生活の中で手軽に行える健康管理とは、例えば体重計や体温計のように、自分の体を自分で計測、数値化し、生活改善に反映することである。体重計に乗る行為自体には健康増進の効果はないが、そこに事実として表された数値に人は影響され、食事の節制や運動などを動機付けされることに意味がある。目のセルフケアについてもこれに倣い、目の健康状態を自分自身で手軽に観測し、自己点検に使う

る技術的手段をいくつか検討した。

2. 1 異物鑑別模擬テスト

前述のとおり、目視検査員の仕事は大多数の良品の中に不規則に現れる欠陥品、不良品を見分け、漏れなく除去することである。目が健全に見えるだけでなく、心理状態や集中力を含めてセルフチェックし、万全でなければ休息や業務内容の変更など、健康回復と検査漏れを防ぐ対策を講ずることが望ましい。そのためには異物鑑別が適正にできているかを調べる模擬テストが現場に即していると考えられる。そこで、短時間に手軽にテストできるように、図1のような間違い探しをするプログラムを開発した。

このプログラムは、同じ文字が大量に表示されている中に、外見が似ている文字を混在させて表示し、マウスまたはタッチパネル操作で選別できるようにしたPC用ソフトウェアである。画面下部には摘出用の領域が区切っており、ここに指定以外の文字等（異物）をすべて摘出して確認ボタンを押せば、鑑別漏れの有無および作業に要した時間が示される。出題内容については、向きを揃えて整然と並べた状態のほか、乱雑に散布されたものも現れる。文字のコントラストが一律設定または不揃いの設問も出題できる。

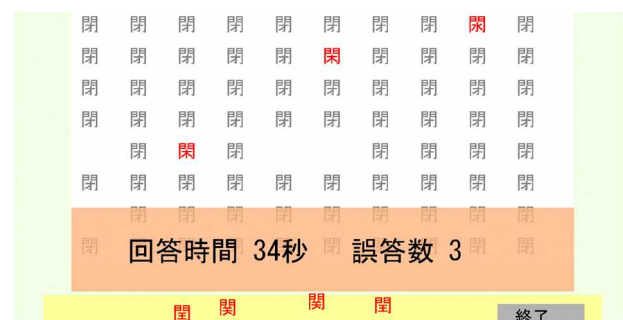


図1 異物鑑別模擬テスト画面の例

*情報技術部

目視検査員がこのテストを始業前に実施することで、その日の調子を自己管理し、適正に検査できる状態であることを確認できるのではないかと期待される。

2. 2 遅延鏡像表示

日常生活で目に痛みなど違和感に気付いたとき、一般的にできるセルフケアの一つに、手鏡や洗面台の鏡などで自分の目を映す行為がある。しかしこの方法は、目を閉じている間の様子が見えず、自分のまばたきの様子、特に目が疲れたときに無意識に力を込めてまばたきしたときに現れる特徴的な仕草は、他者が疲労感を推察する手がかりになるが、自分自身で観察することができない。

そこで、その瞬間をいつでも見られるための工夫として、小型カメラで撮影した映像を若干の時間差(約0.5s)を置いて表示するソフトウェア「遅延鏡」を試作した。小型カメラはPCやスマートフォンに内蔵されているものや、ビデオチャット用のUSBカメラを利用し、卓上鏡のように作業スペース脇に設置すれば、いつでも自分自身の表情やまばたきの様子を観察できる(図2)。

試作プログラムはWindows10搭載PC用に開発し、市販のUSBカメラとの組み合わせで使用するソフトウェアであるが、スマートフォン向けには「時間差カメラ」等の名称で同等機能を有するアプリが公開されており、これらも目のセルフケアにも応用できるのではないかと考えられる。



図2 USBカメラと遅延鏡表示

2. 3 自覚症状と生活要因の記録

セルフケアで重要なことは、上記のセルフチェックの結果が望ましくないものであったとき、その原因究明と回復のための生活改善に結び付けることであると考えられる。例えば「前日、いつもより夜更かしした」など直接的な原因がわかっているならば、改善策は自明であるが、視力の長期的な変化の原因が、生活習慣や季節性の環境変動と関連する疑いがある場合には、継続的に健康状態を記録し、分析する必要があると考えられる。そのような情報蓄積と解析には、PCやスマートフォン等の情報

機器が最適である。

上述の異物鑑別模擬テストで見落としがあった場合、自覚症状を申告できる仕組みを実現するために図3に示す入力画面を開発した。選択、記述した内容は、その入力日時およびカメラ画像とともにPC内に蓄積保存しており、日々記録することを習慣化し、長期間継続することで、目の使い方と休め方に関する生活習慣を見直す手がかりが得られるのではないかと期待している。

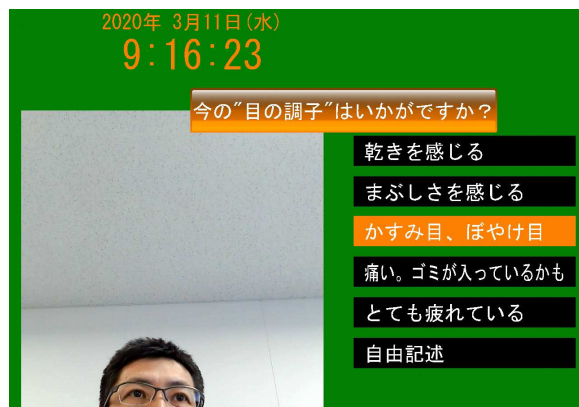


図3 自覚症状等申告画面

3. まとめ

本報告では、専門的な医療機器ではなく、一般に入手可能な情報機器を活用して、自分自身の目の健康を自分で点検、観察、記録する方法をいくつか提案した。併せて、これらの方法を容易に導入できるようにしたPC用ソフトウェアを開発し、目視検査に係る製造業の現場などに導入することで、今まで以上に目の健康を守る意識の向上に役立てられることが期待される。

また、本報告で述べた以外にも目の状態を測る市販機器やセンサデバイスの試用も実施しており、利便性やデータの有用性について検討の上で、システムに組み入れる予定である。さらには、目のリラクゼーションや視力回復に関する提案や習慣についても調査し、目の健康意識向上につながるものを取り入れていくことを今後計画している。

【参考文献】

- 1) 日本眼科医会, 園医のための眼科健診マニュアル, pp9,43-44,2019
- 2) 岐阜県教育委員会, 平成30年度情報モラル調査結果(確定版), Q3,Q12 および Q24,2019

AI 技術を活用した検査工程の省力化・効率化（第2報）

企業連携

— 深層学習を用いた画像検査システムの開発 —

渡辺博己*、生駒晃大*、松原早苗*、伊藤司†、安田敏†、山下泰司†

AI 技術により既存検査装置の検査性能を改善したいとの企業からの要望により、企業と共同で深層学習を用いた画像検査システムを開発した。システムは、既存検査装置に後付けする構成とするとともに、既存検査装置と連動して動作するよう試作した。試作システムを現場の検査工程で検証した結果、正常であるにも関わらず異常と判定される検査対象物の割合を約 13%削減することができた。

1. はじめに

本共同研究は、既存検査装置（以下、検査機）の検査性能に課題があるため、AI により検査性能を改善したいという企業からの要望により実施した。なお、AI による欠陥画像分類技術¹⁾を搭載した検査システム（以下、AI システム）の開発条件は、検査機の機能を保持したまま AI システムを後付けすること、検査機の稼働状況に併せて AI システムを連動させることであった。

2. 画像検査システムの構成（企業担当）

検査機の検査機能を活用するため、検査機と AI システムとを LAN で接続し、検査機の欠陥画像保存フォルダを共有化することで、AI システムがフォルダを常時監視し、保存される画像データを分類する構成とした。また、検査機の稼働状態に関するデジタル信号を AI システムで取得するため、DIO デバイスを検査装置と接続し、検査機の電源 ON/OFF、検査開始/終了、検査状態（正常/異常）、及び検査結果（OK/NG/多発）に関する信号を取得するとともに、AI システムによる検査結果（OK/NG）を出力できるよう構成した。

3. 画像検査システムの開発（センター担当）

図 1 に試作した AI システムの処理フローを示す。AI システムのメイン処理は Visual C#を用いて開発し、画像分類処理は Python を用いて開発した。

AI システムは、検査機の電源投入後に起動すると、画像分類処理を起動し、欠陥画像分類モデルを読み込む。読み込みが終了すると、スタンバイ状態に移行し、検査ボタン押下信号の待ち状態となる。検査ボタンが押下されると、検査機により新たに作成された欠陥画像保存フォルダを探索し、監視対象フォルダに設定する。検査対象物（以下、ワーク）が検査機に投入されると、画像データのファイル名を蓄積し、ワーク回収と同時に画像分類処理により判定を開始する。この時、画像分類処理の対象画像は、検査機で NG 判定となったワークの欠陥画像のみであり、画像分類処理では欠陥画像毎に種別を判定する。ワークの OK/NG の判定については、全ての

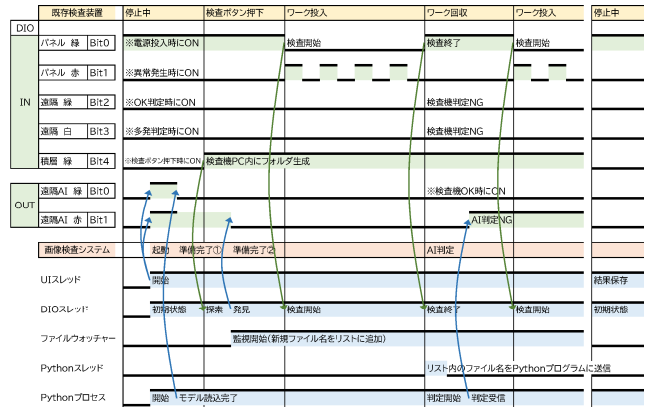


図 1 画像検査システムの処理フロー

項目	画像機	AI	Total
総数	10	9	10
OK	0	5	5
NG	9	4	4
多発	1	—	1

検査機の検査結果	AIシステムの検査結果	統合した検査結果
10	9	9
9	4	4
8	5	5
7	—	—
6	—	—
5	—	—
4	—	—
3	—	—
2	—	—

図 2 画像検査システムによる検査結果の表示例

画像が正常の場合のみであり、1 つでも欠陥と判定された画像が含まれる場合は NG となる。図 2 に AI システムによる検査結果の表示例を示す。

4. おわりに

AI システムによる検査性能を現場の検査工程で検証した結果、正常であるにも関わらず異常と判定されるワークの割合（過剰率）を約 13%削減することができた。

今後は、検査工程での検証を繰り返し、さらなる改善効果が得られるよう AI システムの検査性能の向上を図っていく予定である。

【参考文献】

- 1) 渡辺ら, 岐阜県情報技術研究所研究報告第 20 号, pp.1-6, 2019

* 情報技術部

† 株式会社前田精工

AI 技術を活用した検査工程の省力化・効率化（第3報）

企業連携

—製造現場への深層学習技術の導入に向けた検証— 生駒晃大*、渡辺博己*、冨田紀良†

人工知能（AI）技術を活用し、製造現場における作業工程の省力化や効率化を図りたいという企業からの要望を受け、企業と連携して深層学習を用いたシステム開発を実施した。本研究では、製造ライン等への導入を行う前段階として、開発や検証が比較的容易な環境下において AI 技術開発のモデルケースとなるようなシステムの開発に取り組み、AI 活用に向けたノウハウの共有や現場導入における課題の検証を行った。

1. はじめに

AI 技術を活用した作業の省力化や効率化のための手法を実際の製造現場に導入する場合、その特性を理解した上で、目的に合わせたデータの収集やシステムの構築を行っていく必要がある。そのため、まずは小規模な範囲でモデルケースとなる対象を設定し、AI 導入の効果や性能について検証を進めるのが望ましい。

そこで本研究では、このような製造現場への AI 導入を検討している企業と連携し、AI 活用に向けたモデルケースとなるようなシステムとして、食堂の食器返却口のベルトコンベア上を流れる食器を対象とした監視システムを開発した。

2. 連携体制

本研究は連携企業と当センターとの共同で実施し、2者間で共同研究契約を締結して開発を進めた。企業は、AI の学習に必要なデータ収集や現場でのシステム構築とその評価を担当し、当センターは、深層学習を用いた AI モデルの構築と収集データを使用した学習処理を担当した。

3. システム開発と検証結果

本システムでは、箸やスプーン、フォークなどベルトコンベアでそのまま流れてしまうと食器洗浄機の故障の原因となるものを監視対象として定義し、誤って食器と一緒に流れてきた場合に食堂の従業員に通知することで回収を促すシステムとなっている。

図1が実際に構築した監視システムの機器構成である。USB カメラで取得した画像をエッジデバイス上（Raspberry Pi）で識別し、監視対象が検知されると警告音を鳴らす仕組みとなっている。青色のスティックは、AI チップを搭載した Neural Compute Stick と呼ばれる Intel 製の USB 型ハードウェアで、エッジデバイスに取り付けることで推論処理の高速化が可能となる。

学習用のデータには、図2のようなベルトコンベア上を流れる食器を真上から撮影した画像を使用し、監視対象が写っていない OK 画像と、写り込んだ NG 画像の 2



図1 監視システムの機器構成



図2 学習に使用した画像の例

クラスに分けてデータを収集した。また、深層学習を用いた 2 クラス分類用の識別モデルとして、ResNet をベースとした CNN モデルを構築して学習を行った。

学習したモデルを用いて食堂での検証を行った結果、カメラで捉えられる位置に監視対象である箸やスプーンが流れてきた場合には、見逃しなく警告音を発することができた。また、食べ残しなどの影響により、OK 画像を誤って NG と判定する過剰検出への対策として、判定を誤った画像を用いて学習処理を繰り返しながらモデルのバージョンアップを重ねることで、より高精度なモデルを作成した。しかし、過剰検出を完全にゼロにすることは困難なため、検出漏れのない状態は維持したまま、どこまで過剰を抑制できるかは今後の課題である。

4. 今後の展望

AI 技術の現場導入に向けた取り組みとして、食堂での監視システムを開発することで、人手での監視作業を省力化するとともに、AI 技術を活用するための知見獲得や、現場適用の際に生じる課題把握などに役立つことができた。今後も現場での検証を繰り返し、さらなる精度向上を目指す。また、本システムをベースに、実際の製造ライン等への拡張も検討していく予定である。

* 情報技術部

† 岐阜車体工業株式会社（IoT推進担当）

モータ振動の遠隔監視システムの構築

企業連携

横山哲也*、田畑克彦*、山田俊郎**、馬場公弘†、杉本圭三†

当センターではIoT技術を活用した研究開発や技術支援に取り組んでいる。その取り組みの中で、県内企業からモータの異常を検出するために作業者が定期的に行っているモータ振動計測の自動化に関する相談を受け、技術支援を実施した。その結果、自動でモータ振動を計測し遠隔監視できるシステムを構築した。

1. 企業ニーズ

県内企業では工場設備に組み込まれたモータの故障による生産ラインの停止を防ぐため、定期的にモータ振動を計測することで異常を検出し、故障前に部品を交換している。モータ振動は市販の計測器を用いて、振動センサをモータ軸受け近くに取付けて計測する。そのため、モータが設備内に入り込んでいる場合には振動センサを取り付けるために設備のカバーを取り外す必要があり、計測台数の増加に伴い多くの工数を要することになる。

県内企業では上記問題の解決策として、振動センサを常時据え付け、自動でモータ振動を計測し、インターネット上のサーバで遠隔監視できるシステムの構築を検討していた。

2. 連携

2.1 体制

工場の設備保全を業務としているイビデンエンジニアリング株式会社の企業ニーズのもと、当センターがシステムの基本設計を担当し、イビデンエンジニアリング株式会社がシステムの実装を行った。

2.2 当センターの分担

当センターでは、以下の機能について基本設計を担当した。

- ① マイコンと振動センサを用いた振動計測
- ② インターネット上のサーバに計測データを送信するデータ通信
- ③ ブラウザで振動状況を把握できるビューア

3. 開発の結果

図1に構築したシステム上での計測データの流れを示す。マイコンと振動センサを用いて、自動で一定時間毎に数秒間の振動を計測する。コストを考慮して振動センサには半導体加速度センサを採用した。計測データは、工場内に設置したゲートウェイを経由してインターネット上にあるクラウドサーバに送信される。

クラウドサーバでは最新の計測データをもとに、加速度の実効値、計測データの時系列グラフと計測データに

* 情報技術部

** 技術支援部

† イビデンエンジニアリング株式会社

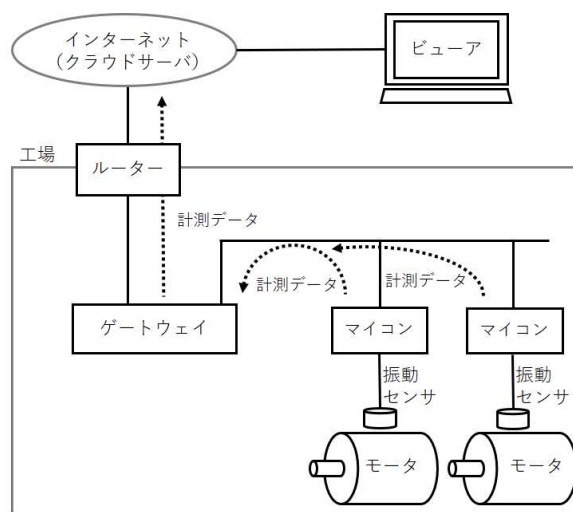


図1 計測データの流れ

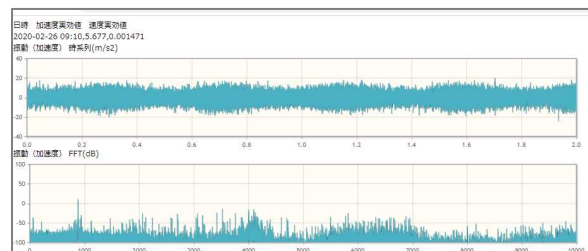


図2 ビューアによる振動の状態表示例
(上グラフ：加速度時系列、
下グラフ：加速度周波数スペクトル)

フーリエ変換を施した周波数スペクトルを可視化した(図2)。また、加速度データから速度を求め、速度の実効値、時系列データとその周波数スペクトルも可視化できるようにした。

実装した遠隔監視システムを用いて、工場内の4台のモータ振動を計測し、ブラウザ上から数時間毎の振動状況を現地に出向くことなく把握できることを確認した。

4. 今後の展望

現状は工場内で4台のモータの振動計測を行い、振動データの推移を観察しているところである。今後は問題点の抽出とその対策を行い、計測台数を拡大していく予定である。

EMC 試験設備の活用 —医療機器の開発事例—

企業連携

山田俊郎*、西嶋隆*、千原健司**、鳥井勝彦†

当センターでは、電波暗室、シールドルームおよび EMC 試験設備を新規に整備し、令和元年度より依頼試験・開放試験室利用のサービスを開始した。整備した試験機器は、家電製品のような民生品の電子機器の規格試験のみでなく、医療機器・福祉機器の試験規格にも対応している。今回、県内企業が開発する医療用計測機器、電動車いすの開発において EMC 試験を行ったので、その事例を紹介する。

1. 企業ニーズ

これまで岐阜県の公設試験研究機関(以下、公設試)では EMC 試験の設備を有しておらず、試験を必要とする県内企業は他県の公設試や民間の試験場を利用しており、設備の整備が望まれていた。また、県が成長産業として振興している、医療・福祉・自動車の産業分野(以下成長産業という)では、製品に高い安全性が求められるため試験レベルも高く、多くの公設試ではこれらの試験に対応できなかった。当センターでは、高度化する企業ニーズに対応するため、成長産業の試験規格にも対応した EMC 試験設備を整備した(自動車の電装品は、次年度より運用)。

本稿はその活用事例として、医療・福祉機器のメーカーである株式会社今仙技術研究所の製品開発における EMC 試験の事例を紹介する。

2. 連携

2.1 体制

医療用計測機器の開発においては、企業がぎふ技術革新センターの助成事業を活用して開発を進め、センターが技術支援を行った。電動車いすの開発は企業独自の製品開発である。

2.2 当センターの分担

製品の設計・試作は企業が行い、当センターでは主に電氣的・機械的な評価を支援した。医療用計測機器開発においては、EMC 試験以外にも機械強度や耐久性試験も支援している。

3. EMC 試験の実施

国内における医療機器の EMC 試験は JIS T 0601-1-2 で規定されており、電動車いすの試験は JIS T 9206 で規定されている。これらの規格からは、EMC 試験の国際規格である CISPR と IEC61000-4 シリーズが参照されており、ほとんどの試験項目においては一般民生用の電子機器と同様の試験方法・限度値となっている。しかし、電磁波に暴露した機器が誤動作を起こさないことを確認する放射免疫試験においては、一般民生用の電



図1 電動車いすの放射免疫試験

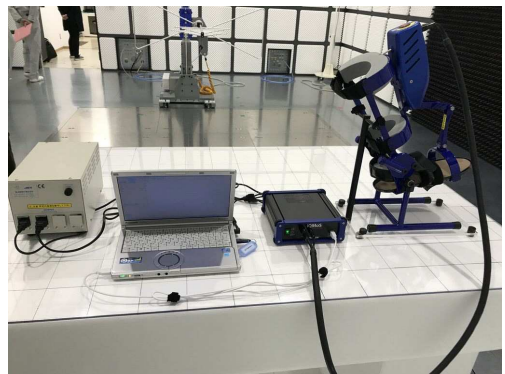


図2 医療用計測機器の放射エミッション試験

子機器よりも高い試験レベルが規定されている。

当センターでは、高出力のパワーアンプとハイゲインアンテナを用いて、80MHz~3GHz において 30V/m の電界強度の妨害波を照射が可能である。試験の実施にあたっては、医療機器・電動車いすの試験規格に準拠した試験レベルで行い、機器に誤動作が無いことを確認した。

4. 今後の展望

次年度からは車載機器の規格に対応した試験設備の運用開始も予定しており、成長産業分野に対応した EMC 試験を通して電子機器応用製品の開発支援を進める予定である。

EMC 試験設備は、平成 30・31 年度公益財団法人 JKA 機械振興補助事業による助成を受けて整備した。

KEIRIN 00

* 技術支援部、**次世代技術部

† 株式会社今仙技術研究所

令和2年6月 発行

岐阜県産業技術総合センター研究報告
第1号 令和元年度

編集発行 岐阜県産業技術総合センター

所在地 〒501-3265 岐阜県関市小瀬 1288

電話 (0575)22-0147

FAX (0575)24-6976

E-mail info@gitec.rd.pref.gifu.jp

ホームページ <http://www.gitec.rd.pref.gifu.jp/>