

# 安全性を考慮した高齢者用電動ビークルの開発(第11報)

## ーセンサシステムの改良と溝検出システムの提案ー

久富 茂樹      藤井 勝敏      窪田 直樹

### Development of Sensors for a Safety Driving System of Electric Senior Vehicles (11<sup>th</sup> Report)

#### - Improvement of Sensor Systems and Proposal of Groove Detection System -

Shigeki KUDOMI      Katsutoshi FUJII      Naoki KUBOTA

**あらまし** 高齢者の生活を支えるツールの一つである電動車いすに対して、事故の危険を検知する安全装置を開発している。これまでに、障害物を検出する超音波フェーズドアレイソナー、車線逸脱を検出するイメージセンサ、車の接近を検出する音センサをそれぞれ開発してきた。本年度は、これら3つのセンサシステムの改良と、新たに、距離センサを使用して溝のように凹んだ段差を検出する手法を検討した。超音波フェーズドアレイソナーでは、送受信分離型の構造とすることで、障害物に対して斜め方向から接近するときの角度が、従来よりも広い範囲で障害物検出が可能になった。イメージセンサでは、時系列断面画像から得られる特徴点の位置を追跡し、その変化から危険度を判定する方法を試みた。電動ビークルに実装し動作確認を行ったところ、路肩等との距離の変化に反応して警報が鳴ることを確認した。音センサでは、速度の切り替え状態によって、車検出の閾値が変更するように改良した。交通量が少なく、静かな環境であれば、後方からの車の接近を約90%の率で検出できることを確認した。また、溝のように凹んだ段差を検出する手法を提案し、電動ビークル後進時の脱輪防止制御を行い基本動作の確認をした。

**キーワード** 超音波フェーズドアレイソナー、イメージセンサ、音センサ、距離センサ、溝検出

## 1. はじめに

高齢者の生活を支えるツールとして電動車いすは広く利用されつつあるが、認知機能低下による操作ミスが原因で、障害物との衝突、歩行者や車との接触などの事故が問題となっている。当研究所では、電動車いすを安全に運転するため、障害物や危険箇所をセンサで検知し、安全な走行を実現する安全装置を開発している。この安全装置は、将来的に、共同研究先である県内企業で開発された電動車いすへ、オプション装備として搭載することを目指している。なお、本研究では、開発する安全装置付きの電動車いすを“電動ビークル”と記述する。

電動ビークルの安全装置としては、既報のとおり、超音波フェーズドアレイソナー（以降、超音波PAソナーと記述）、イメージセンサ、音センサの3種類のセンサシステムを開発している<sup>[1][4]</sup>。本年度は、3つのセンサシステムの改良と、新たに距離センサを使用して溝のように凹んだ段差を検出して電動ビークルを制御するシステムを検討したので報告する。

## 2. 超音波PAソナー

### 2.1 素子の取り付け位置、角度の検討

障害物検出の実験において、障害物の面に対して垂直に電動ビークルが接近したときは障害物を検出できても、障害物の面に対して斜め方向から接近したときは障害物を検出できない課題があることがわかってきた。従来のソナーは図1に示すように送信素子のすぐ下側に受信素子を取り付けた送受信一体型であった。今回は、送信素子と受信素子とを分離することも含めて取り付け位置の検討を行った。

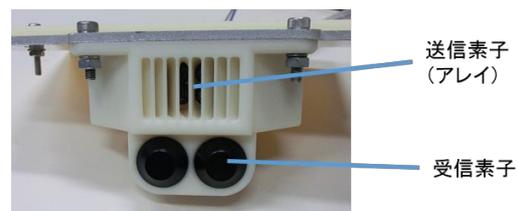


図1 従来の超音波PAソナー

台車の支柱に送信素子と受信素子を取り付け、210mm×130mm×60mmの段ボール箱を検出できるかの確認を行った。既報で述べたように、二値振幅偏移変調されたBarker符号を送信し、送信信号と受信信号との相関処理を行い、その大きさに障害物の有無を判定した<sup>[3]</sup>。

はじめに、段ボール箱は台車の正面に正対するように床に配置し、台車との距離は2mとした。送信素子は台車の左右の支柱の中央になるように取り付け、送信素子の向き、高さ、受信素子の位置、高さを表1に示すように、16通りに変えて実験を行った。本実験では、実験系を簡略化するため受信素子を1個のみ使用した。また、台車は静止した状態で実験を行った。実験の結果、障害物の有無を判定できた条件は、No.2, No.4, No.9, No.10, No.13, No.15 の6条件であった。

表1 素子の取り付け位置、角度

No.	送信素子向き	送信素子高さ	受信素子位置	受信素子高さ
1	水平	30cm	中央	70cm
2	水平	30cm	中央	30cm
3	水平	30cm	左端	70cm
4	水平	30cm	左端	30cm
5	水平	70cm	中央	70cm
6	水平	70cm	中央	30cm
7	水平	70cm	左端	70cm
8	水平	70cm	左端	30cm
9	下向き20度	30cm	中央	70cm
10	下向き20度	30cm	中央	30cm
11	下向き20度	30cm	左端	70cm
12	下向き20度	30cm	左端	30cm
13	下向き20度	70cm	中央	70cm
14	下向き20度	70cm	中央	30cm
15	下向き20度	70cm	左端	70cm
16	下向き20度	70cm	左端	30cm

(左端：中央より25cm左にある支柱に取り付け)

次に、障害物の有無を判定できた6条件について、検出可能な障害物の角度を調べた。図2に示すように、障害物が台車の正面に正対している状態から障害物を置く向きを徐々に変えていき、検出できなくなる角度を求めた。

表2に実験結果を示す。受信素子を左右の中央に配置した条件の場合は、障害物が台車に正対している0度を中心として正の方向と負の方向にそれぞれ約3度までしか検出できなかった。一方、受信素子を左端に配置した条件では、 $\theta$ が負の方向、すなわち障害物の面が受信素子とは反対の方向に向いている時は全く検出できなかったが、 $\theta$ が正の方向、すなわち障害物の面が受信素子の方向に向いている時は11度まで検出可能で、受信素子を中央部に配置した場合に比べ、約2倍の検出可能角度範囲を得られた。本実験では受信素子を左側に1個配置しての実験であったが、右側にも同様に配置して、合計2個の受信素子を使用すれば、障害物の面の傾き $\theta$ が負の場合であって

も検出可能となり、検出可能角度範囲もさらに広がると推測できる。

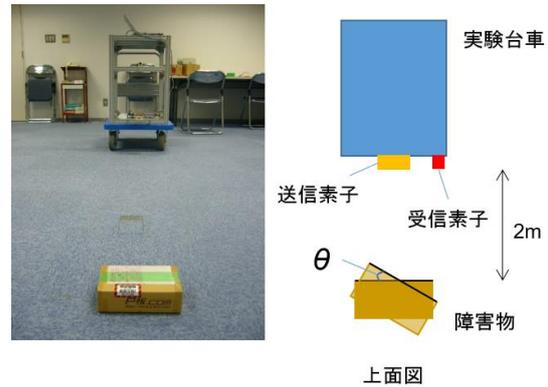


図2 実験台車と障害物の位置関係

表2 検出可能な障害物角度

No.	検出可能な障害物角度 [deg]
2	-3 ~ +3
4	0 ~ 11
9	-3 ~ 3
10	-3 ~ 2
13	-4 ~ 2
15	0 ~ 11

## 2. 2 送受信分離型超音波PAソナー

前節での実験で検出可能な障害物角度範囲が大きかったNo.4とNo.15の違いは、送信素子、受信素子を設置する高さの違いとそれに起因している送信素子の向きの違いである。電動車いすへの設置のしやすさを考慮して、No.15に近い条件でのセンサの搭載を行った。図3に送受信分離型超音波PAソナーを搭載した電動ビークルを示す。テーブルを利用して、左右の中央部に送信素子を、床面から70cmの高さに、水平から20度下向きの角度で設置した。受信素子は、床面から70cmの高さに、送信素子の中心から左右にそれぞれ20cm離れた位置に1個ずつ設置した。



図3 送受信分離型超音波PAソナーの搭載

### 2. 3 障害物検出による電動ビークル制御

今回使用した電動ビークルは、CAN (Controller Area Network) 通信によって、センサシステム側から電動ビークルを制御できる仕様になっている。超音波PAソナーで障害物を検出したときに、電動ビークルを緊急停止する「停止モード」と、電動ビークルを減速する「減速モード」の2種類のプログラムを作成した。試作した電動ビークルを6人の評価者に屋内外で運転してもらい評価してもらった。停止モード、減速モードともに、障害物がある場所では、十分に停止あるいは減速の制御ができていたとの評価結果であったが、同時に、評価者は障害物ではないと認識している場所や障害物までまだ距離があると感じている状態で停止、減速の制御が働くことがあるとの評価であった。また、停止モードであると、道路横断中などのように逆に危険な場面も考えられるため、減速モードをベースにするべきであるといった意見があった。本システムの実用化にあたり、これらの評価結果を反映した、障害物の検出距離、検出感度の調整機能や、走行スピード、操作レバーの状態と連動した電動車いす制御が必要となってくる。

### 3. イメージセンサ

既報<sup>[1][2]</sup>の通り、車体前方に配置したカメラで撮影した画像の時間的変化から、脱線、脱輪などにつながる漫然運転状態を検知し、事故が起こる前に運転者に警報音で知らせることを目標としている。この状態検知アルゴリズムは、画像中で路面を捉える特定水平ラインに着目、時系列で並べると、歩道等に沿って安全に走行している状況ならば路肩や白線などの境界が一定の水平位置に留まる性質に基づき、それが運転者の意図によらずに動き続けていけば、脱輪の恐れがあると判定する。そこで本章では、この境界などの路面特徴を時間的に追跡する方法と、その追跡状況から運転状況を推察する方法について検討した。

#### 3. 1 路面特徴の追跡方法

電動ビークル前方に設置したカメラで走行中の路面を撮影した。撮影した画像の1フレームを図4(a)に、撮影した画像から求めた時系列断面画像を図4(b)にそれぞれ示す。当初、路面の時系列断面画像を解析し、路肩の境界を追跡する方法を試みた。1ライン分の画像を輝度と2つの色差に分解し、小領域ごとに最新時刻と直前の画像との間で擦り合わせながら画素値を比較し、差が最小となる位置を蓄積する方法である。この方法は、道路の白線やアスファルト舗装と畦道の境目の追跡には有効であったが、特徴的なエッジを含まない路面が続く場合や、模様複雑なタイル舗装面では発散してしまい、望ましい結果が得られなかった。

そこで、本年度は画素値同士の比較ではなく、画素の水平系列から得られる折れ線グラフの特徴点(山と谷の

位置を追跡する方法を試みた。この方法ではまず、カメラから得られた水平ライン上の画素の輝度 (Y)、色差 (Cb,Cr) について、それぞれグラフにし(図5(a))、それを山と谷が数点程度になるまで平滑化する(図5(b))。こうして得られた特徴点の位置と画素値を記録し、次の時刻から得られる特徴点との間で、位置が最も近い山同士または谷同士をグループ化する計算を繰り返す。対応する点がない場合、新しい特徴点として追加するか、しばらく対応しない状態が続いた場合は比較先から抹消する。

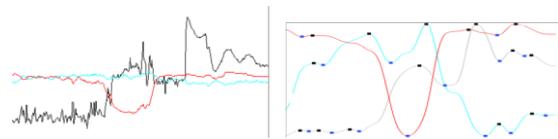
この手順の特徴は、路面の些細な変化や模様に対応して発散することを防ぐために十分な平滑化を行うことで、山谷の数が一定数に保たれるように平滑化パラメータを適応的に微調整している点である。また、後述の危険度判定の際には、各特徴点に隣接する山谷との落差を、その特徴点の有効性として参照する。

グループ化した特徴点を時間軸方向に並べると、図6(a)に示すように、水平位置変化のグラフが得られる。この水平位置は路肩や白線など道路の境界の位置に由来するため、この動き方から車線に沿った安定走行なのか、路肩に近づきつつあるのかを判定する。カメラから得られる特徴点の水平位置には、車体が走行する際のピッチ方向の振動に由来する小刻みな振動が含まれるが、時間方向の平滑化処理で取り除くことで、車体と車路の相対



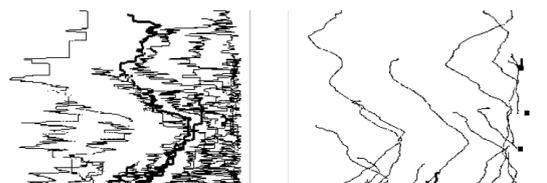
(a) カメラ画像例 (b) 時系列断面画像

図4 路面画像例とその時系列断面画像



(a) 画素値グラフ (b) 平滑化と山谷検出

図5 時系列断面画像における特徴点検出



(a) 山谷追跡結果 (b) 時間方向平滑化

図6 特徴点追跡

的な位置情報を残すことができる(図6(b)).

### 3. 2 危険度判定

直近の水平位置の変化から、現状の運転が続くと仮定したときの未来予測ができる。つまり図7に示すように、

- (1) 動きが少ない場合、歩道に沿って安定した走行中または停止中。安全上支障なし。
- (2) 周辺部へ発散する場合、境目から離れつつある。安全上支障なし。
- (3) 中心付近に近寄る場合、車両が境界を超える可能性あり。要注意。

特に(3)の場合、直近の変化量から越境予定時間を見積もることも可能で、その猶予時間と、特徴点ごとの有効性の高さを加味して危険度を判定する。

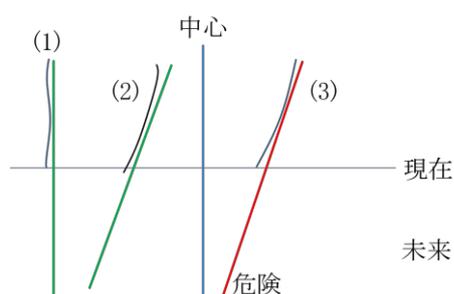


図7 特徴点の動き方と危険度

### 3. 3 イメージセンサ試作機

以上の画像処理を、ボード型コンピュータRaspberry Piと専用カメラモジュールから成るシステムに実装し、動作確認を行った。判定した総合的な危険度の高さに応じ、3段階で間欠を変えたブザー音により報知する。図8に試作したイメージセンサを示す。危険度判定のしきい値や予測時間等のパラメータ調整のためのスイッチ類を備えているが、運転者が日常的に操作するものではない。

電動車いすの前方テーブルに本試作機を搭載した電動ビークルを運転したところ、路肩等との距離の変化に反応して警報が鳴ることが確認できた。しかし、停止中に前方を人が横切ったときや、意図的な旋回を行う際にも同様に反応するため、警報に非常性が感じられなくなる



図8 イメージセンサ試作機

という課題を残す結果となった。この問題は、カメラの被写体に条件を付けず、信号処理に帰結させたことに起因すると考えている。対策としては運転者の入力内容や他センサとの連携を視野に入れているが、本プロジェクトでは具体化できなかったため、今後の課題としたい。

## 4. 音センサ

センサを搭載するために使用した電動車いすは、スイッチにより、最高速度が2.5km/h、4.5km/h、6.0km/hの3段階に切り替えができるようになっている。これまでに開発した音センサを取り付けた電動ビークルを運転し、車の接近を検出できるか評価した。その結果、6.0km/hの速度で運転した場合には、電動ビークル自体のモータ駆動音、走行音が大きくなり、常に車の接近と間違えて検出してしまう課題が明らかになった。

その対策として、最高速度の切り替えスイッチの状態により、車の接近判定の閾値を変更することを検討した。電動車いす側からスイッチの状態が常時出力されているため、CAN通信によりその状態を取得し、閾値を変更するようにした。そして、再度、車の接近の評価実験を行った。評価実験の様子を図9に示す。実験した道路は、片側1車線の道路で、脇にある歩道を電動ビークルで走行した。実験した時は、1時間に100台程度の車が行き交う少ない交通量で、車の通行がない時の騒音は40~50dB(A)程度の静かな環境であった。電動ビークルを30分間走行している間に、後方から接近してきた車を、検出できた数と検出できなかった数、車の接近がないにもかかわらずセンサが反応してしまった誤検出の数をそれぞれ調べた。前方から車が接近する場合も音センサが反応する場合もあるが、この場合は、センサの反応の有無にかかわらず集計から除外した。車の接近検出結果を表3に示す。検出件数を総走行数で除した検出率は、電動ビークルの走行速度が4.5km/h時で92.6%、6.0km/h時で90.5%となった。30分間の電動ビークル走行での誤検出件数は、電動ビークルの走行速度が4.5km/h時で1件、6.0km/h時で3件という結果であった。6.0km/h走行時であっても、モータの駆



図9 音センサ評価実験の様子

動音，走行音によって常に誤検出してしまう不具合が改善できた。検出率も4.5km/h走行時と大差ない結果となった。今回，車種ごとのデータは取得していないが，トラックなどの大型車両で，エンジン音，ロードノイズが大きい場合には，距離が離れていても車の接近を検出できた。逆に低速度で走行してくる普通自動車は，かなり接近しないと検出できなかった。未検出であった計4件のうち，3件が普通自動車，1件が軽自動車であり，実験者の主観的な評価ではあるが，4件とも静かな走行音であった。検出できた車の中にはハイブリッド車も何台か含まれていた。ただし，エンジン音も聞こえていたので，電気モータのみの走行モードではなかったようである。

表3 車の接近検出結果

電動ビークル走行速度 [km/h]	検出件数 [件]	未検出件数 [件]	誤検出数 [件]
4.5	25	2	1
6.0	19	2	3

## 5. 距離センサを用いた溝検出システム

独立行政法人製品評価技術基盤機構 (NITE) によると，2009年度から2018年11月末までの約10年間にNITEに通知された踏切で発生した電動車いすの事故は16件あり，その事故事例としては，タイヤが線路の溝にはまったことによる事故，踏切での脱輪による事故などが報告されている<sup>[5]</sup>。踏切以外の事故事例でも路肩での脱輪が報告されており<sup>[6]</sup>，電動ビークルの安全装置として，凸形状の障害物だけでなく，溝や下り階段などの凹んだ段差の検出も重要である。一方，近年，レーザやLEDを用いた距離センサモジュールが比較的安価で提供されている。そこで，この距離センサを用いて，溝などの凹形状の段差を検出する手法について検討した。

### 5. 1 距離センサを用いた溝検出の原理

図10に距離センサを用いた溝検出の原理を示す。距離センサを斜め下向きになるように電動ビークルに設置し，路面との距離を測定する。平坦な道路を走行しているときは常に路面との距離は $l$ で一定である。溝のように凹んだ段差部にさしかかると，凹んだ部分との距離が計測されるため，計測値は $l' (>l)$ となるため溝が検出できる。今回は溝のように凹形状の場合を考えたが，凸形状の障害物の場合も検出可能で，その場合，計測値 $l''$ は $l' < l$ となる。

実際に溝が検出可能か確認するために，台車に，路面より40cmの高さで，左右2か所にセンサを設置し，60cm先の路面との距離を測定するように，水平より約34度下に傾けた。今回使用した距離センサは，TFMini (Benewake製) で，光源に赤外LEDを使用し，ToF (Time of Flight) によって対象物との距離を測定する。測定範囲は0.3m～

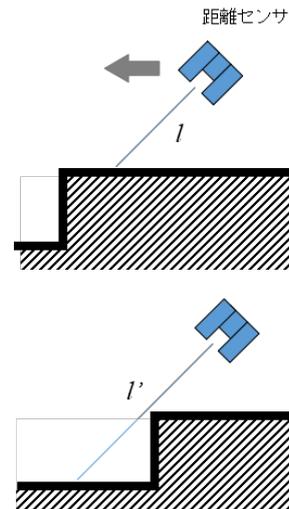


図10 距離センサを用いた溝検出の原理

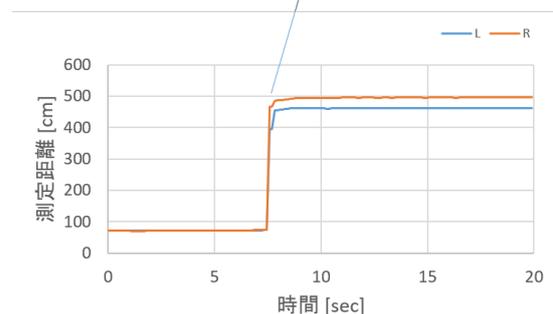


図11 下り階段での測定距離

12mで，測定精度は，6m未満で±4cm，6m～12mで±6cmである。

センサを取り付けた台車を廊下から下り階段に向かって移動させた時の測定距離を図11に示す。平坦な廊下を移動している時は，センサと床面との距離が変わらないため，測定距離は左右のセンサとも約72cmでほぼ一定であった。下りの階段にさしかかると測定距離は急激に増大した。この実験から，測定距離を常時監視することで，溝などの凹形状の段差にさしかかったことを検出できそうであることがわかった。

### 5. 2 後進時の脱輪防止制御

前節で述べた距離センサを電動車いすの後輪付近の左右2か所に取り付け，後進時の脱輪防止制御を試みた(図12)。距離センサは，路面から40cmの高さに設置し，60cm

先の路面との距離を測定するように、水平より約34度下に傾けた。マイコンにはmbed LPC1768 (NXPセミコンダクターズ)を使用し、センサ信号をシリアル通信によってマイコンに取り込んだ。後進時にセンサで溝を検出すると、電動ビークルが非常停止するようにマイコンのプログラムを作成した。非常停止後、電動ビークルが動けなくなってしまう状態を回避するために、運転者が操作レバーを前進側に操作しているときは、停止状態を解除して操作を有効にした。

電動ビークルを運転してシステムの評価試験を実施した。溝に向かって後進していくと、溝を検出して電動ビークルが非常停止することを確認した。停止した際の溝から電動ビークルの後輪までの距離は10回の試行の平均で40cmであった。しかしながら、操作の状況によっては、非常停止しないことがあった。原因の究明と対策を行い、システムの完成度を高めたい。

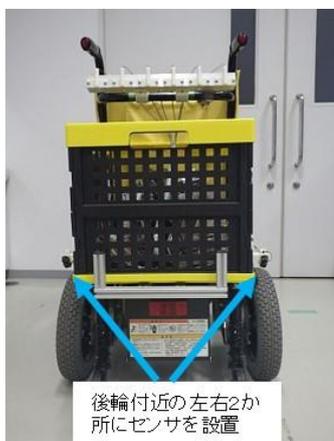


図12 後進時の脱輪防止システム

## 6. まとめ

これまで開発してきた安全装置のセンサシステムの改良と、距離センサを使用して溝のように凹んだ段差を検出する手法を検討した。超音波PAソナーでは、素子の取り付け位置、角度を検討し、送受信分離型の構造とした。障害物に対して斜め方向から接近するときの角度が、従来よりも広い範囲で障害物検出が可能になった。イメージセンサでは、時系列断面画像から得られる特徴点の位置を追跡し、その変化から危険度を判定する方法を試みた。電動ビークルに実装し動作確認を行ったところ、路肩等との距離の変化に反応して警報が鳴ることを確認した。音センサでは、速度の切り替え状態によって、車検出の閾値が変更するように改良した。交通量が少なく、静かな環境であれば、後方からの車の接近を約90%の率で検出できることを確認した。また、新たに、距離センサを使用して、溝のように凹んだ段差を検出する手法を提案した。電動ビークル後進時の脱輪防止制御を行い基本動作の確認をした。

これまでに開発した安全装置のセンサシステムを実用化につなげ、高齢者の生活を支える安全な電動ビークルを提供できるように取り組みを継続したい。

## 謝 辞

本研究で試作した部品の一部は、公益財団法人JKAの補助事業で導入した三次元造形機で製作した。

## 文 献

- [1] 久富茂樹, 藤井勝敏, 窪田直樹, “安全性を考慮した高齢者用電動ビークルの開発 (第10報) —センサシステムの電動車いすへの搭載—”, 岐阜県情報技術研究所研究報告 第19号, pp.18-22, 2018.
- [2] 藤井勝敏, 田畑克彦, 久富茂樹, “安全性を考慮した高齢者用電動ビークルの開発 (第7報) —イメージセンサー—”, 岐阜県情報技術研究所研究報告 第18号, pp.34-36, 2017.
- [3] 田畑克彦, 久富茂樹, 藤井勝敏, “安全性を考慮した高齢者用電動ビークルの開発 (第8報) —超音波フェーズドアレイソナー—”, 岐阜県情報技術研究所研究報告 第18号, pp.37-40, 2017.
- [4] 久富茂樹, 平湯秀和, 田畑克彦, “安全性を考慮した高齢者用電動ビークルの開発 (第6報) —音センサー—”, 岐阜県情報技術研究所研究報告 第17号, pp.12-15, 2016.
- [5] 独立行政法人製品評価技術基盤機構  
<https://www.nite.go.jp/data/000096188.pdf>
- [6] 独立行政法人製品評価技術基盤機構  
<https://www.nite.go.jp/jiko/chuikanki/poster/sonota/1152.html>