

## 地中レーダの探査可能深度に関する考察 —地域減衰特性について—

鈴木敬一

深田地質研究所

Consideration on the penetrating depth of ground penetrating radar  
- On the regional characteristics of radio wave attenuation -

SUZUKI Keiichi

Fukada Geological Institute

要旨：2025年1月に埼玉県八潮市で発生した道路陥没事故は、地下空洞探査技術への注目を高めた。従来から地下空洞の非破壊探査には地中レーダ（GPR）が用いられてきた。長大な道路を高速で探査するために、車両搭載型GPRも開発されている。八潮市の事故では、空洞の原因となった下水管は地下10mに埋設されており、地下10m以上の深さまで探査できる技術が求められている。しかし、地中における電波の減衰は非常に大きく、GPRで地下10mまで探査することは困難であることを示している（鈴木、2025）。地中における電波減衰の最大の要因は導電率である。地表付近の導電率から、GPRの探査可能深度を推定することができる。本稿では、既存の比抵抗マップを用いてGPRの推定探査深度を計算した。これにより、各地域におけるGPRの探査可能深度を推定することができる。

キーワード：地中レーダ、誘電特性、比誘電率、導電率、減衰率、探査深度

Abstract: The road collapse in Yashio City, Saitama Prefecture, in January 2025, has drawn attention to underground cavity detection technology. Ground-penetrating radar (GPR) has traditionally been used to nondestructively detect such underground cavities. Vehicle-mounted GPRs have also been developed for high-speed detection of extremely long roads. In the Yashio City accident, the sewer pipe that caused the cavity was laid 10 meters underground, and cavity detection technology capable of penetrating depths of more than 10 meters underground is required. However, Suzuki (2025) has shown that radio wave attenuation underground is very significant, making it difficult to detect up to 10 meters underground using GPR. The largest factor in radio wave attenuation underground is electrical conductivity. The electrical conductivity near the surface allows for estimation of the GPR penetrating depth. This paper presents the estimated GPR penetrating depth using existing surface resistivity maps. This allows us to show the GPR penetrating depth for each region.

Keywords: ground penetrating radar, dielectric constant, relative permittivity, electrical conductivity, attenuation ratio, penetrating depth

### 1. はじめに

2025年1月に埼玉県八潮市で道路陥没事故が

発生した。下水道管の老朽化により、管路が破損し、周囲の土粒子が管内に流入することで空洞が発生したものと推定される。この事故では運転手

1名の死亡が確認され、陥没した道路は未だに復旧されていない(2025年10月時点)。復旧には数年の歳月と数百億ともいわれる工事費用が必要とされている。

このような道路陥没を引き起こす空洞を非破壊で探査するために地中レーダが適用されてきた。地中レーダは高分解能で、測定時間も短いことから長大な道路の空洞探査には適している。近年は自動車に搭載あるいは牽引して高速で探査する装置も開発され、成果を上げている。しかし、地中レーダは長所ばかりでなく、探査深度が浅いという欠点もあり、探査可能深度が2~3mである(たとえば、物理探査学会(2008))。

八潮市の陥没事故では問題となった埋設管の深度は10m程度とされている(埼玉県下水道局, 2025)。そのため、探査可能深度10mの空洞調査が求められている。

探査可能深度10mのレーダの実現可能性については既に鈴木(2025)で検討している、そのときの結論では、不可能ではないが可能性はかなり低いというものであった。

探査深度を決めているのは探査装置のダイナミックレンジである。ダイナミックレンジを広げると探査可能深度は増加する。ダイナミックレンジを拡大するには送信電力を増加する方法と、受信信号のノイズレベルを低下させる方法の2種類がある。鈴木(2025)は送信電力を増大する方法は現実的ではなく、受信信号のノイズレベルを低下させるべきであると主張した。しかし、この方法は、測定時間を増加させることになるため、探査時間効率のよい地中レーダの長所を失うことになる。他にも周波数帯域を下げることで探査可能深度を増大させる方法も考えられるが、分解能を損ねる可能性もある。分解能を保ったまま地中レーダの探査可能深度を増大させることは容易で

はない。

探査可能深度は2~3m程度であるといわれているが、実際に様々な場所で地中レーダの測定を行うと、場所によって探査可能深度が大きく異なることはよく経験する。鈴木(2025)では探査可能深度を決める最も大きな要因は、導電率であると指摘している。探査する場所の導電率を知ることができれば探査可能深度を推定することが可能である。事前に電気探査や電磁探査により、導電率(または比抵抗)を把握することができればよいが、それも現実的ではない。

アマチュア無線などの本には、アンテナを設計するために、地表の導電率マップが掲載されていることがある。しかし、そのようなマップは非常に小さく、地中レーダの探査可能深度を知るには粗すぎて使用することができない。

そこでインターネット上で「接地抵抗」などのキーワードで検索したところ株式会社ホクデンのホームページに「全国接地マップ」があり、ここに地表の比抵抗分布が示されている。Googleマップ上で、地表の比抵抗が色分けされて表示される。このマップを使用することができれば、地中レーダの探査可能深度を推定することができる。本稿では、この全国接地マップを利用して、地中レーダの探査可能深度の推定を行った。

## 2. 探査可能深度の計算

鈴木(2025)は、通常行われている誘電損失の2乗が1より十分小さいという仮定を設けず、厳密に計算した。本稿でも同じ計算により、導電率の値から探査可能深度を推定した。与えたパラメータは表1に示すとおりである。比誘電率は10~30程度の値を示すことが多い(佐藤(2024))が、減衰率の計算にはあまり影響を与えないので、こ

ここでは16を用いた。平方数したのは次式に示すように誘電率 $\epsilon$  (F/m)が平方根の中にあり、計算途中のチェックを容易にするためである。

$$\alpha = \sqrt{\frac{\omega^2 \mu \epsilon}{\sigma} \sqrt{1 + \left(\frac{\sigma^2}{\omega^2 \epsilon^2}\right)} - 1} \quad (1)$$

ここで、 $\alpha$ は減衰定数(1/m)、 $\sigma$ は導電率(S/m)、 $\mu$ は透磁率(H/m)、 $\omega$ は角周波数( $\omega = 2\pi f$ (rad/s)、 $f$ :周波数(Hz))である。

ダイナミックレンジ $d_r$ 、空洞による反射係数の損失 $L_r$ 、比透磁率 $\mu_0$ については鈴木(2025)に従った。周波数 $f$ は標準的な地中レーダの400MHzを与えた。全国接地マップの値は比抵抗 $\rho$ であらわされているため、逆数を取り導電率( $\sigma = 1/\rho$ )に換算した。探査可能深度 $D$ は、次式であらわされる。

$$D = \frac{d_r - L_r}{2 \times 20 \times \log(e) \times \alpha} \quad (2)$$

ただし、減衰についてはdB/mに換算するため、 $20 \times \log(e) \doteq 8.686$

をかけ( $e$ は自然対数の底)、さらに反射波の往復分の経路を半分する必要があるため2で割っている。

図1に比抵抗の値と探査可能深度の関係を示す。比抵抗が高くなるにつれ、探査可能深度が増加している。

この関係を利用して全国接地マップの比抵抗の値を探査可能深度に変換したのが図2である。有効数字2桁で、比較的切りの良い数字になっている。

### 3. 地域ごとの探査可能深度マップ

図3に全国接地マップから換算した北海道石

狩地域の探査可能推定深度を示す。石狩平野は湿地の堆積物が分布し、泥炭層も広く分布する。特に泥炭層は比抵抗が低く、地中レーダの探査可能推定深度が浅くなる傾向にある。

図4は新潟を含む東北地方南部の探査可能推定深度である。仙台平野、山形盆地、新潟平野など主要都市が存在するところは、軒並み探査可能

表1 与えたパラメータ

項目	数値
ダイナミックレンジ	60 dB
周波数	400MHz
比誘電率	16
比抵抗の範囲	3~3000 $\Omega \cdot m$
透磁率	$\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} H/m$
反射係数による損失	-15 dB

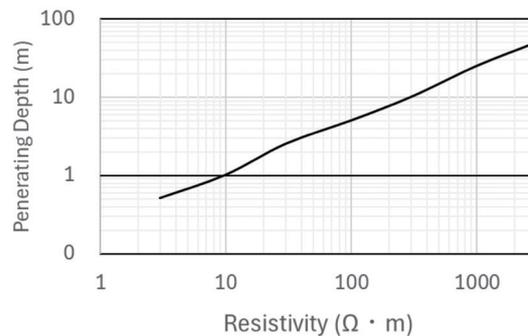


図1 比抵抗と探査可能深度との関係

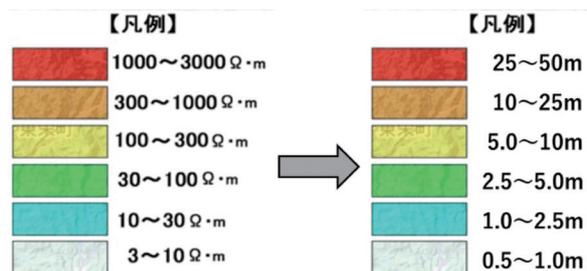


図2 比抵抗から探査可能推定深度への換算

深度が小さい。特に仙台市，寒河江市，村上市はその傾向が顕著である。

図5は南関東の探査可能推定深度である。利根川下流域や東京湾の埋め立て地は特に探査可能深度が小さい。台地の上は探査可能深度が低地に比べて大きくなる傾向にある。これは関東ローム層の分布域と重複している領域が多い。利根川下

流域も探査可能深度は小さい。

図6は東海地方の探査可能推定深度である。名古屋市の低地は低く，北側の岐阜県に入ると比較的探査可能深度は大きい。この付近の比抵抗が高いのは花崗岩地帯だからである。特に山岳地帯は比抵抗が高い。このような場所で，空洞探査を計画することはほとんどないが，坑道やトンネル

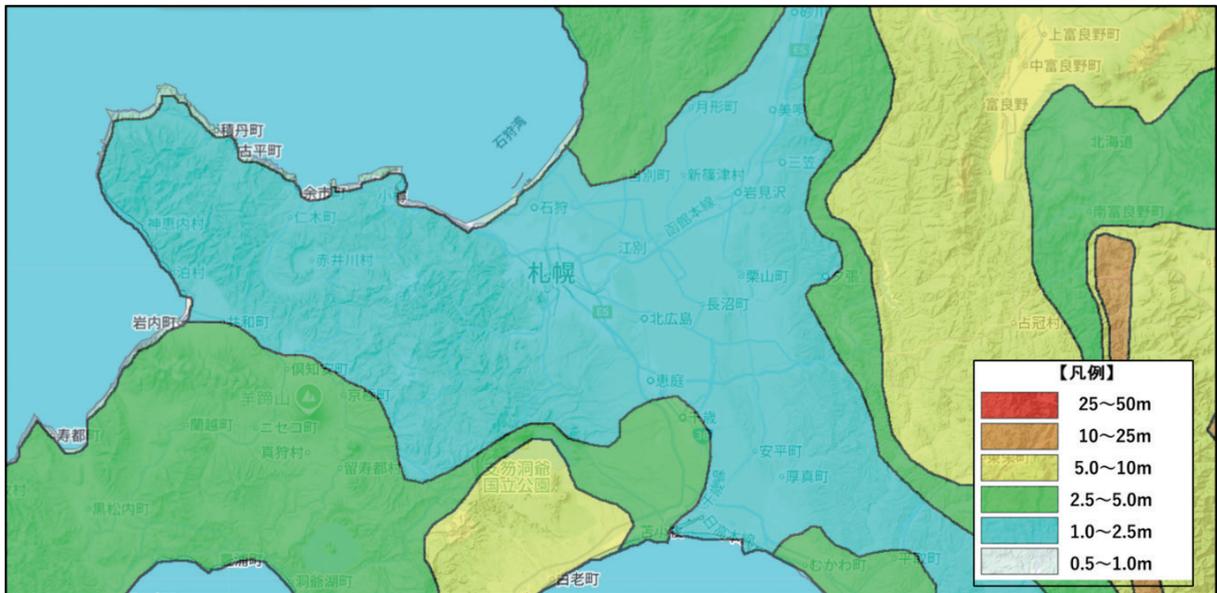


図3 北海道石狩地域の探査可能推定深度

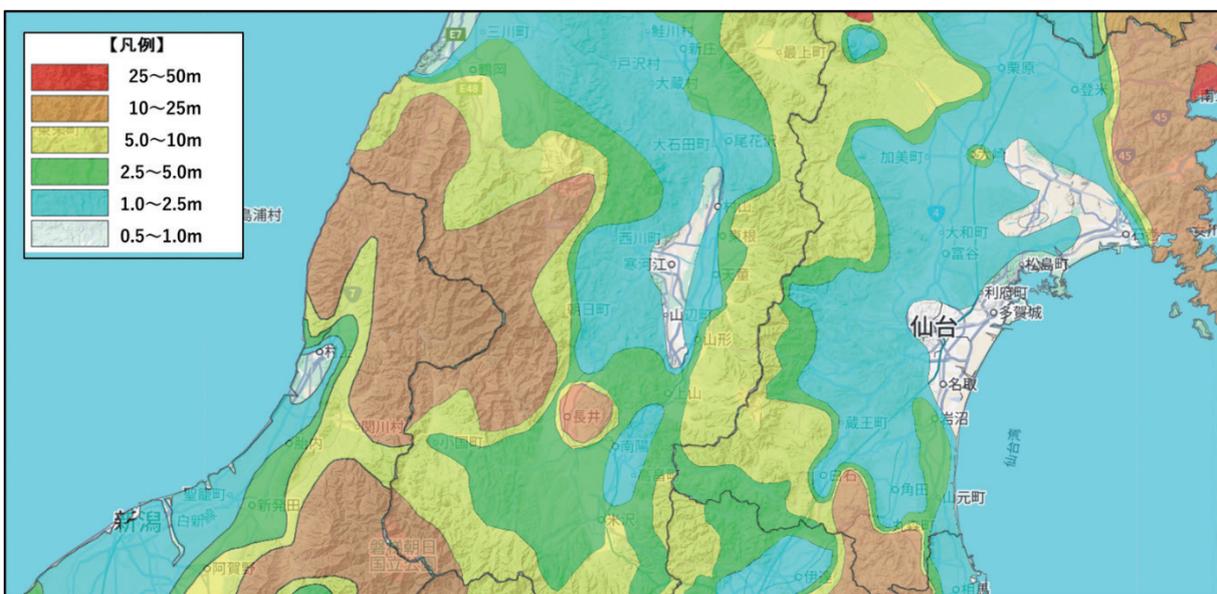


図4 東北地方南部の探査可能推定深度

地中レーダの探査可能深度に関する考察  
—地域減衰特性について—

から、あるいはボーリング孔を利用したボアホールレーダによる探査を計画するために利用することができる。

図7は、近畿地方の探査可能推定深度である。大阪や神戸の埋め立て地は探査可能深度が小さい。姫路を中心とした平野の広い範囲も探査可能深度が小さい。神戸の北にある六甲山地は花崗岩

であり、探査可能深度も大きい。

図8は中国地方の探査可能推定深度である。この地域は広く花崗岩が分布しており、探査可能深度は全体的に大きい。ただし、岡山市内については探査可能深度が小さく、注意が必要である。

図9は九州地方北部の探査可能推定深度である。有明海沿岸の干拓地は探査可能深度が小さい。

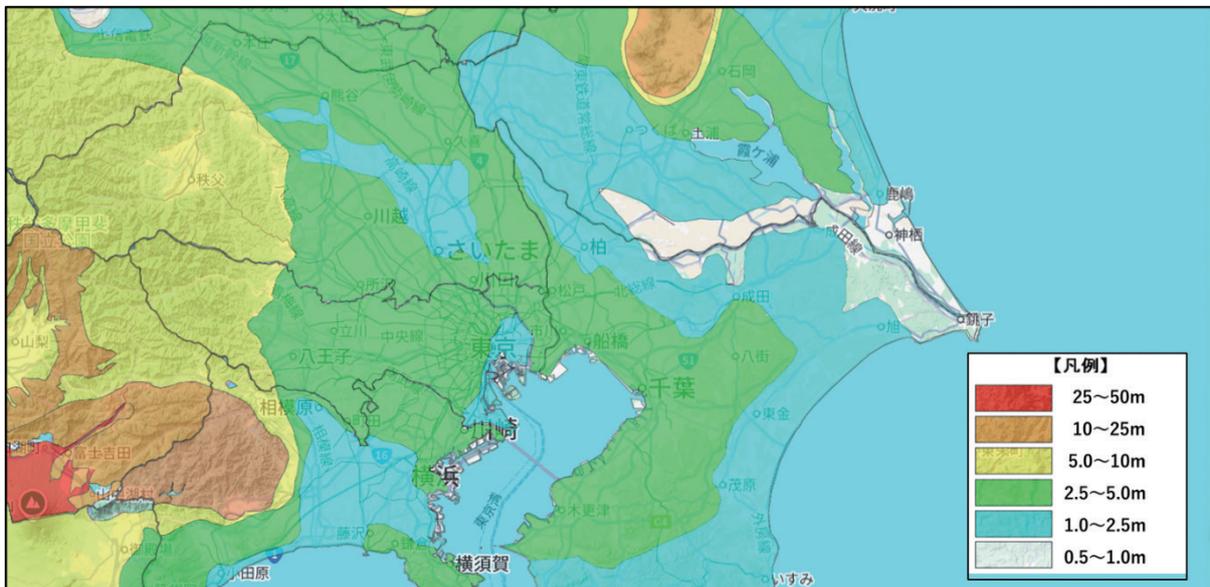


図5 南関東の探査可能推定深度

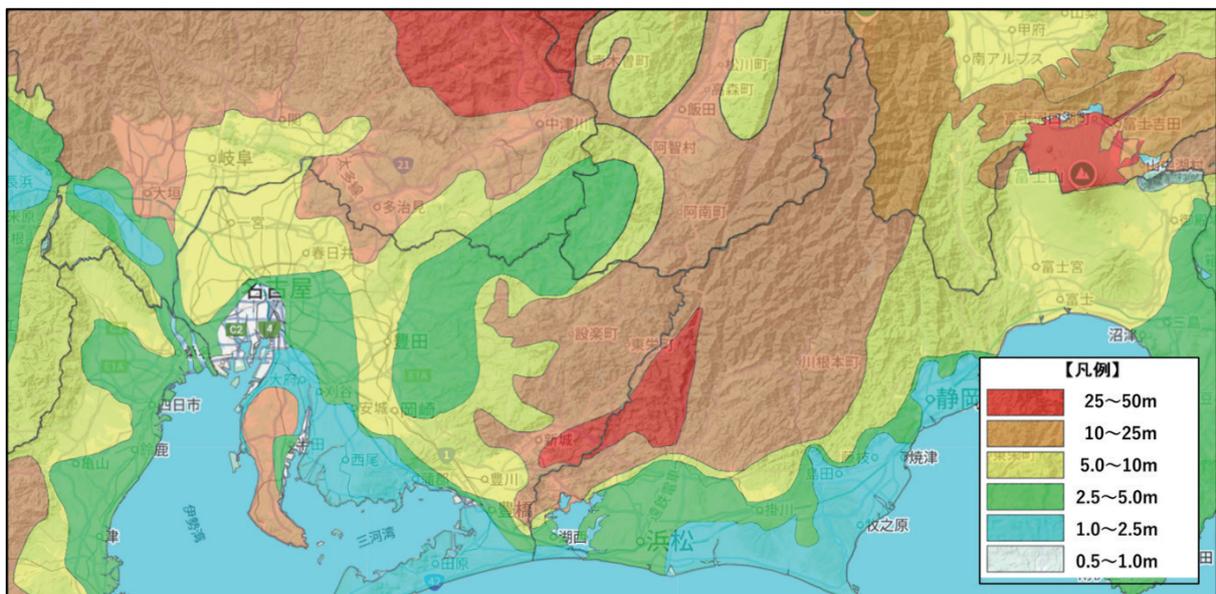


図6 東海地方の探査可能推定深度

背振山地は花崗岩系であり、ここも探査可能深度が大きい。

図 10 は九州地方南部の探査可能推定深度である。宮崎の低地以外は比較的探査可能深度が大きい。これはシラスと呼ばれる火山灰層の比抵抗が高いためである。

#### 4. 探査可能推定深度マップの注意点

本稿における探査可能深度は、あくまでも地中を電波が透過し、空洞で反射し、地表における受信可能性を示したものである。また、媒質は均質を仮定している。従って、地質の不均質性による散乱減衰や、空洞など対象物以外の反射波、ク

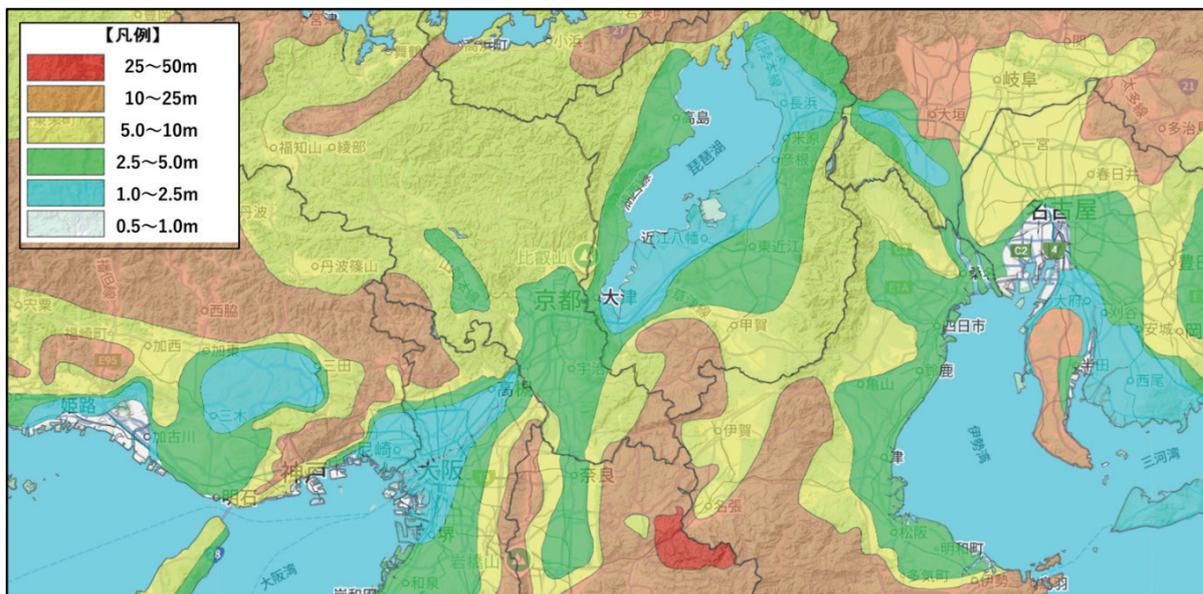


図 7 近畿地方の探査可能推定深度

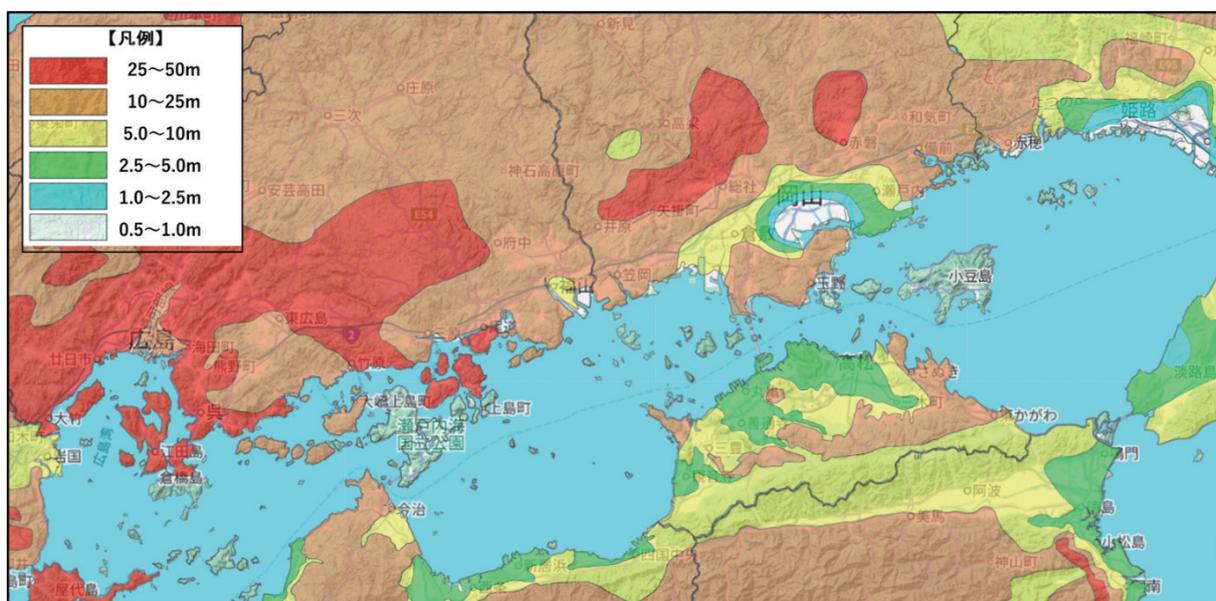


図 8 中国地方南部～四国地方北部の探査可能推定深度

ラッタと呼ばれる不要反射などの影響により、必ずしも空洞がとらえられるとは限らないことに注意する必要がある。さらに局所的な比抵抗の違いにより、必ずしも本稿で示した探査可能深度マップの通りに行かない場合がある。あくまでも探査計画を立案するときの参考資料である。

## 5. おわりに

埼玉県八潮市の陥没事故を契機に地中レーダによる空洞探査への期待が高まっている。探査可能深度 10m が要求されているが、地下の減衰率、特に導電率（比抵抗）による影響が非常に大きい。

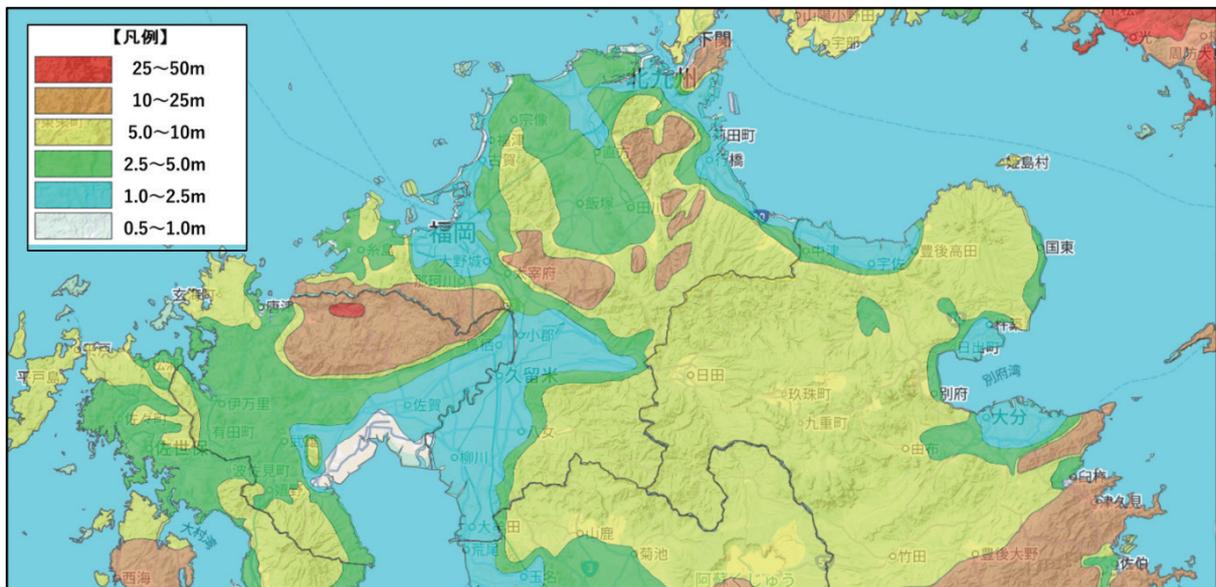


図9 九州地方北部の探査可能推定深度

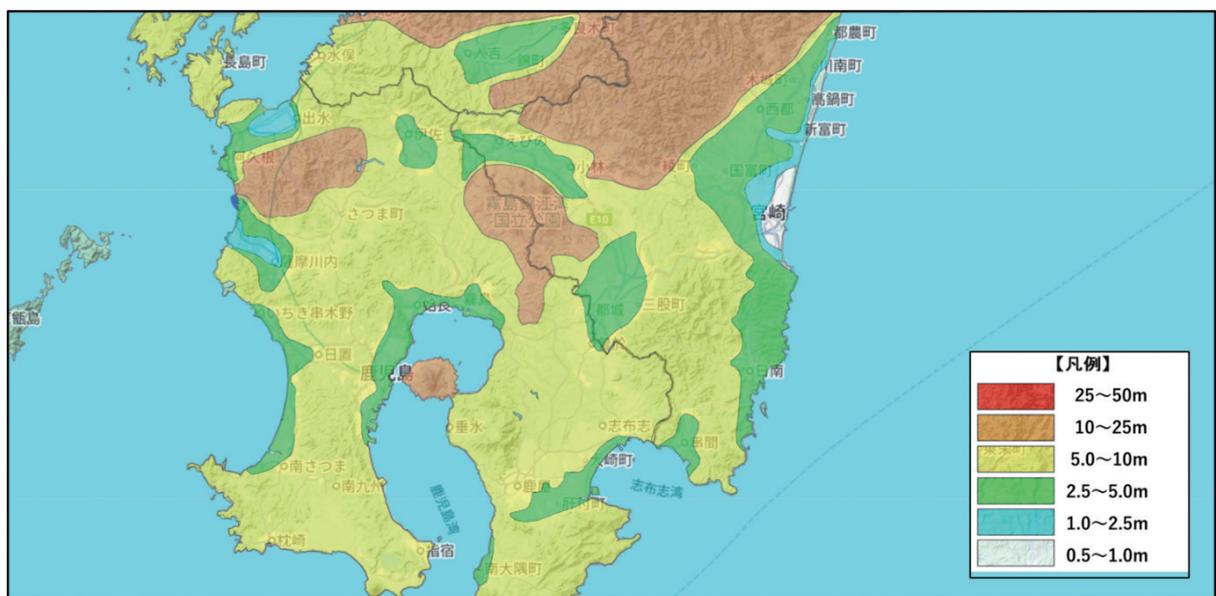


図10 九州地方南部の探査可能推定深度

海外製品などのカタログでは探査可能深度 10 m 以上を示したものも少なくない。このような装置を日本国内に持ち込んでもカタログ値と同じ探査深度は得られない。その理由は、ヨーロッパやアメリカなどの大陸地殻を起源とした導電率の低い（比抵抗の高い）地質と、日本の導電率の高い（比抵抗の低い）地質とでは、地中レーダの探査可能深度が違うのである。このことを知らずに、10 m まで探査しようとしても成果が得られるはずがない。

本稿では、全国接地マップを用いて、地中レーダによる探査可能深度を地域ごとに推定した。空洞探査の需要が高まる現在、地中レーダが正しく適用されることを望む。

## 謝辞

株式会社ホクデン様には「全国接地マップ」の使用許可を快諾していただきました。ここに記して心より感謝の意を表します。なお、図 3～図 10 については、筆者に責任があることをお断りしておきます。

## 文献

物理探査学会（2008）：地中レーダ，新版物理探査適用の手引き第 8 章，281-299.

株式会社ホクデン：全国接地マップ，

<https://www.hokuden-earth.co.jp/resistivity/>

埼玉県下水道局（2025）：流域下水道管の破損に起因する道路陥没事故に関する復旧工法検討委員会資料 2，

[https://www.pref.saitama.lg.jp/documents/](https://www.pref.saitama.lg.jp/documents/264359/shiryu.pdf)

264359/shiryu.pdf

佐藤源之（2024）：地中レーダ，物理探査ハン

ドブック第三版第 7 編，517-546.

鈴木敬一（2025）：地中レーダにおける電波の減衰特性についての検討，物理探査学会第 152 回学術講演会論文集，176-179.