

2. SAR 衛星画像を活用した道路被災模擬事象把握実験

(1) 使用衛星及び観測

我が国の小型 SAR 衛星（高分解能 X バンド SAR 衛星）には、表-1 に示す株式会社 QPS 研究所や株式会社 Synspective の衛星が存在するが、衛星基数もいまだ少なく、現時点では観測頻度が限られている。そこで今回は、日本の小型 SAR 衛星とほぼ同性能を有する米国 Capella Space 社の衛星を活用し、分解能が高い Spotlight モードにより観測を実施した。また、観測において衛星電波照射方向は全て同一とし、電波の入射角は反射強度性能に影響するため 30 度及び 40 度程度とした。

(2) 実験盛土及び道路被災模擬事象の作成

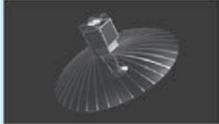
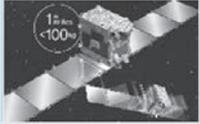
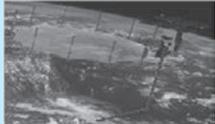
つくば市内の試験フィールドにおいて、天端を

アスファルト舗装した、天端面積 10 m × 30 m、高さ 1.5 m、勾配 1 : 1.5 の簡易盛土を構築し、路面クラック、陥没、法崩れ、路上障害物、段差の 5 種類の道路被災模擬事象を作成した（写真-1、表-2、3）。なお、道路被災模擬事象の作成では、SAR 衛星画像解析の経験上、路面クラックの長さは画像上で線として認識できるよう分解能の 5 ~ 6 倍（3 m 程度）、陥没の直径は同じく一定規模の事象として認識できるよう分解能の 3 倍（1.5 m 程度）を基本に設定した。

(3) 事前観測

SAR 衛星画像は図-2 に示すように、衛星から電波を照射する際の入射角や周辺の地形条件により、画像判読が非常に困難となる場合があることが知られている³⁾。その影響を確認するため、事前に模擬事象作成前のアスファルト舗装のみの状況（写真-2）に対する観測を実施した。図-3 に観測した小型 SAR 衛星の強度画像を示す（入

表-1 SAR 衛星の種類・性能（一例）

		IQPS	Synspective	Capella Space	だいち2号 (ALOS-2)
イメージ					
分解能	Spotlight [※] Stripmap	0.46 × 0.46m 1.8 × 0.46m	0.5 × 0.9m 1.8 × 2.6m	0.25 × 0.5m 1.2 × 1.5m	3 × 1 m 3, 6, 10m
観測幅	Spotlight [※] Stripmap	7 × 7km 14 × 7km	10 × 10km 10-30 × 50-70km	5 × 5 km 5-10 × 20, 50, 100km	25 × 25km 50, 50, 70km
観測波長帯		Xバンド	Xバンド	Xバンド	Lバンド
国		日本	日本	米国	日本

※ 株式会社Synspectiveは、Sliding Spotlightモード

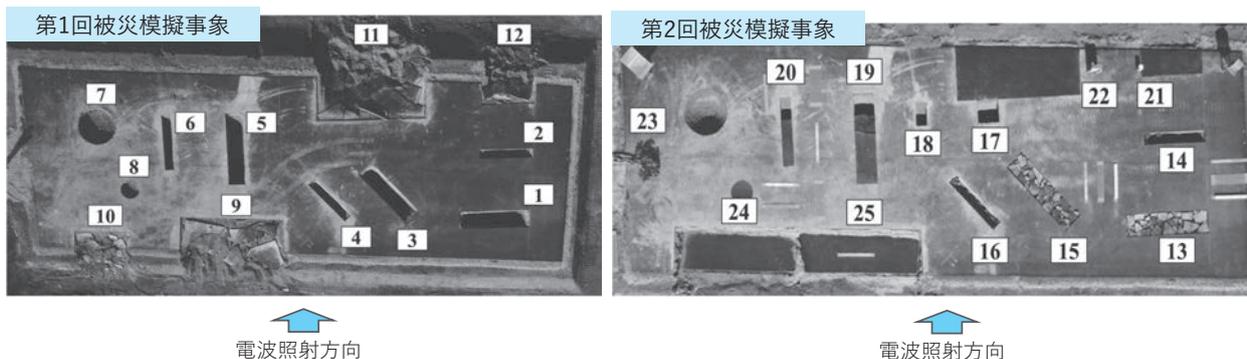


写真-1 道路被災模擬事象の作成

表-2 第1回被災模擬事象ケース

No.	被災模擬事象	規模	電波照射方向 に対する 事象発生方向
1	路面クラック	長さ4m, 幅1m, 深さ1m	横
2	路面クラック	長さ3m, 幅0.5m, 深さ0.5m	横
3	路面クラック	長さ4m, 幅1m, 深さ1m	斜め
4	路面クラック	長さ3m, 幅0.5m, 深さ0.5m	斜め
5	路面クラック	長さ4m, 幅1m, 深さ1m	縦
6	路面クラック	長さ3m, 幅0.5m, 深さ0.5m	縦
7	陥没	直径2m, 深さ0.5m	-
8	陥没	直径1m, 深さ0.3m	-
9	法崩れ	長さ6m, 奥行き2m	盛土手前側
10	法崩れ	長さ3m, 奥行き1m	盛土手前側
11	法崩れ	長さ6m, 奥行き2m	盛土奥側
12	法崩れ	長さ3m, 奥行き1m	盛土奥側

表-3 第2回被災模擬事象ケース

No.	被災模擬事象	規模	電波照射方向 に対する 事象発生方向
13	路面クラック	複数の小規模クラック (範囲: 長さ4m, 幅1m)	横
14	路面クラック	長さ3m, 幅0.5m, 深さ0.5m (内部に割れたアスファルト片投入)	横
15	路面クラック	複数の小規模クラック (範囲: 長さ4m, 幅1m)	斜め
16	路面クラック	長さ3m, 幅0.5m, 深さ0.5m (内部に割れたアスファルト片投入)	斜め
17	陥没	長さ1m, 幅1m, 深さ0.5m (内空傾斜40~45度)	-
18	陥没	長さ0.5m, 幅0.5m, 深さ0.5m (内空傾斜40~45度)	-
19	陥没	長さ1m, 幅1m, 深さ0.5m (内空傾斜30~35度)	-
20	陥没	長さ0.5m, 幅0.5m, 深さ0.5m (内空傾斜30~35度)	-
21	路上障害物 (ブロック)	幅0.2m, 高さ0.3m	-
22	路上障害物 (ブロック)	幅0.6m, 高さ0.6m	-
23	路上障害物 (枝葉)	長さ2m	横
24	段差	高さ0.7m	縦/横
25	段差	高さ0.3m	縦/横

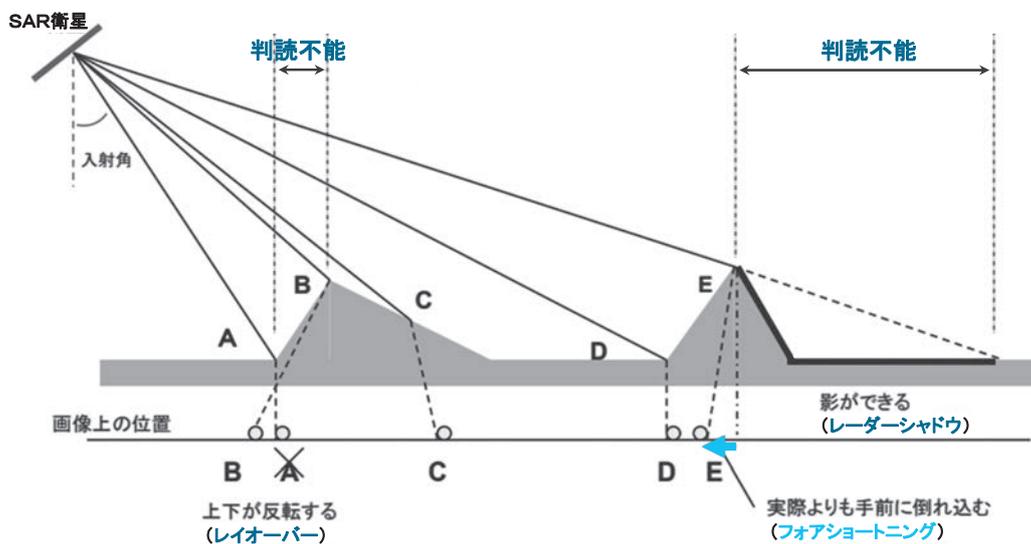


図-2 SAR衛星画像で確認できない場所の概念図³⁾

射角40度)。ここでの強度画像とは、小型SAR衛星で受信した電波の強度を白黒の濃淡で表した画像のことであり、強度が高いと白くなる。

図-3の強度画像をみると、衛星電波照射方向

と正対する盛土の傾斜部は白く写っており、強く反射していることが確認できる。また一般的に舗装面からの反射強度は低く、画像上では黒く写るが、図-2に示すフォアショートニング（観測対



写真-2 実験盛土設置及びその周辺状況

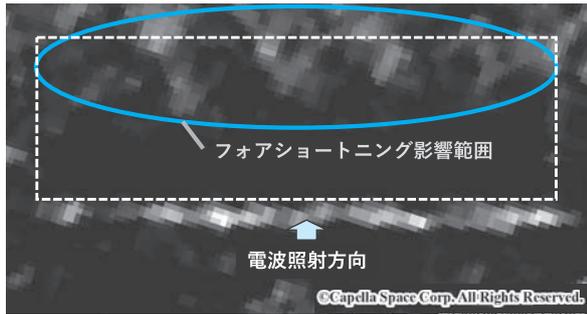


図-3 SAR衛星の強度画像（事前観測_40度）

象物に高さがある場合にマイクロ波の送受信時間が短くなる分だけ手前側に投影される現象の影響により、入射角40度の観測でも周辺樹木の反射が混ざった状態で、模擬事象を判読しづらい状況となっている。しかしながら、入射角30度での観測では、影響がさらに大きかったことから、今回は入射角40度の観測結果を用いて、道路被災模擬事象の把握可能性を検証した。

(4) 道路被災模擬事象の把握結果

写真-1の道路被災模擬事象を観測した小型SAR衛星の強度画像を図-4, 5に示す。なお、確認できた被災事象は図中に青実線で示した。

① 路面クラック

路面クラックでは、規模や電波照射方向に対する事象発生方向の違い等に注目して検証した。その結果、長さ4m、幅1m、深さ1mの路面クラック(No.1, 3)では、クラック形状に沿った反応が確認できた。これは衛星電波がクラック内部の底面で反射した後、さらに壁面で反射し、その電波を衛星が受信したものと考えられる。一方で、長さ3m、幅0.5m、深さ0.5mの路面クラック(No.2, 4, 6)では明瞭な反応が確認できな

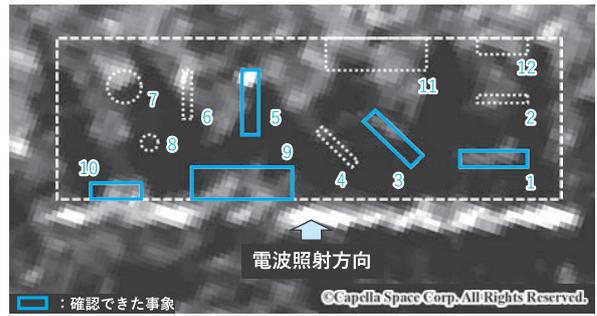


図-4 SAR衛星の強度画像（第1回被災模擬事象_40度）

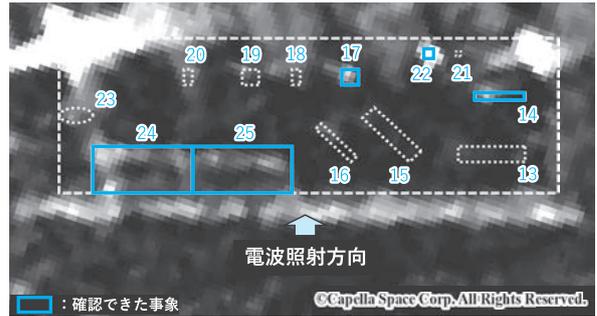


図-5 SAR衛星の強度画像（第2回被災模擬事象_40度）

かった。これは、クラック幅及び深さが半分となり被災事象の構造が電波を遮ったことが理由と考えられる。割れたアスファルト片で複数の小規模クラックを模した(No.13, 15)でも、電波がクラック表面で乱反射したことで、衛星が受信する電波量が減少したため、反応がみられなかったと考えられる。

また、路面クラック(No.5)や、長さ3m、幅0.5m、深さ0.5mの路面クラックの内部に割れたアスファルト片を投入した状況のうち、電波照射方向と正対する事象(No.14)(写真-3)では、一部で強い反応が確認された。これは、クラック端部の内部斜面や内部のアスファルト片の面が電波

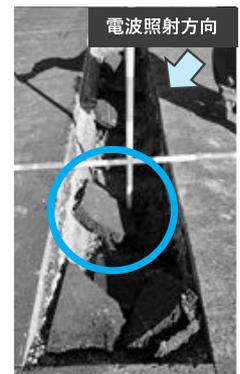


写真-3 事象No.14の状況

照射方向に対して正対する向きであったことから、強い反応が発生したものと考えられる。

② 陥没

陥没では、範囲や形状、内空状況の違いに着目して検証した。その結果、長さ1m、幅1m、深

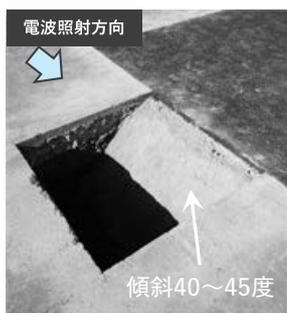


写真-4 事象 No.17 の状況

さ 0.5 m と規模の比較的大きい陥没で、内空状況を電波照射方向とほぼ直角に設定した事象 (No.17) (写真-4) では強い反応が確認できた。しかし、その他の陥没ではフォアショートニングの影響もあり確認できる反応はなかった。

③ 法崩れ

法崩れでは、規模や電波照射方向に対する事象発生方向の違いに着目して検証した。その結果、電波照射方向と正対する手前側の盛土、長さ 3 m 以上、奥行き 1 m 以上の事象 (No.9, 10) では、崩壊範囲と SAR 衛星画像上で盛土のエッジがぼやけている範囲が一致しており、変化が明瞭に確認できた。一方で、同じ規模でも盛土の奥側の事象 (No.11, 12) では、フォアショートニングの影響もあり明瞭な反応は確認できなかった。

④ 路上障害物

路上障害物では、規模や障害物の違い等に着目して検証した。その結果、高さ 60 cm のコンクリートブロック (No.22) (写真-5) については明瞭な反応が確認できたものの、高さ 30 cm のコンクリートブロック (No.21) (写真-6) や倒

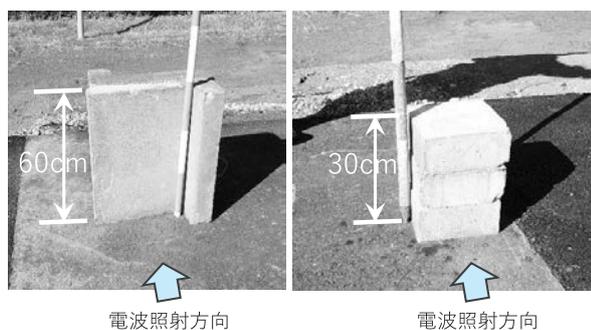


写真-5 事象 No.22 の状況

写真-6 事象 No.21 の状況

木を模した長さ 2 m の枝葉 (No.23) では明瞭な反応が確認できなかった。一方で、本稿には掲載していないが、入射角 30 度程度で高さ 30 cm のコンクリートブロック (No.21) を観測した結果では明瞭な反応が確認できたことから、SAR 衛星画像を用いた被災事象の把握は電波の入射角に関する影響も受けることが確認できた。

⑤ 段差

段差では規模の違いに着目して検証した結果、電波照射方向に正対した高さ 70 cm 及び 30 cm の段差 (No.24, 25) (写真-7) において、明瞭な線状の反応が確認できた。



写真-7 事象 No.24, 25 の状況

この実験の結果、SAR 衛星画像を活用した道路被災状況把握では、クラックや陥没といった舗装面下に発生する事象は、衛星の観測原理から図-6 に示すように反射有効面が大きくなるほど、衛星に戻ってくる電波も多く、明瞭な反応が確認され、幅 1 m、深さ 1 m 程度の大きい事象であれば確認できることが分かった。加えて今回は、フォアショートニングの影響で明確にはならなかったが、この原理から入射角を 30 度と小さくすることで有効面が大きくなり、舗装面下に発生する

●入射角40度の場合

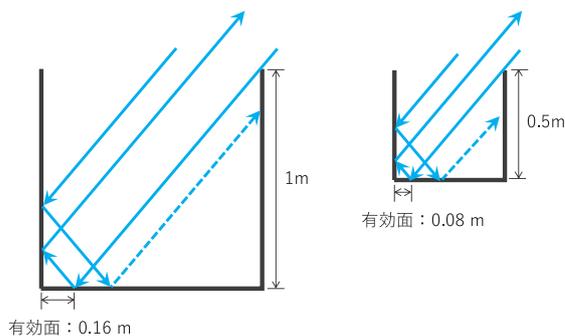


図-6 衛星電波反射イメージ (路面クラック)

事象の把握精度の向上が期待できると考えられる。また、段差や障害物等の路面上に発生する事象は、衛星電波の入射角にもよるが、電波照射方向に対して正対する高さ 30 cm 以上の事象であれば確認できることは分かったものの、明確な観測原理までは明らかにできなかった。さらに法崩れでは、図-7のように電波照射方向に対して正対する法面において発生した事象であれば電波が衛星に戻りやすく明確に確認できるが、電波照射方向と反対側の法崩れは電波が散乱して衛星に戻らず、確認困難となることが分かった。

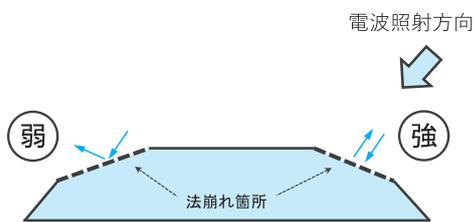


図-7 衛星電波反射イメージ (法崩れ)

3. SAR 衛星画像を活用した道路被災状況把握

前記の実験結果を踏まえ、令和6年能登半島地震における道路被災事象を対象に、株式会社 QPS 研究所の SAR 衛星画像を活用した道路被災

状況の把握可能性の検討を実施している。本稿では、斜面崩壊箇所に関する事例の一部を紹介する。

今回は、大規模災害時の道路パトロールに時間を要すると考えられる能登半島の先端付近の地方道 (図-8の No.1~3) と都市間をつなぐ重要な都市幹線道路 (図-8の No.4, 5) で発生した5カ所の斜面崩壊箇所を対象とし、SAR衛星画像での判読可否について検証を実施した。

図-9に令和6年能登半島地震で発生した斜面崩壊による道路被災箇所の状況写真及びSAR衛星画像を示す。なお、地方道の事例においては、地震発生前にも観測を実施していたため比較して示した。

事例 No.1 や No.3 の SAR 衛星画像を確認すると、崩壊箇所が白く写っていることがうかがえる (図中の青丸箇所)。これは、衛星照射方向とほぼ正対する斜面で発生した崩壊であったことから、実験結果同様、明瞭な反射が確認できたものと考えられる。一方で、事例 No.2 では崩壊箇所が局所的であること、斜面が電波照射方向と正対していない箇所であること、また周辺の植生のフォアショートニングによる影響を受けていることが考えられ、確認は困難であった。事例 No.4 は、レーダーシャドウと近い条件の箇所であること、また電波照射方向と反対側の斜面崩壊であっ

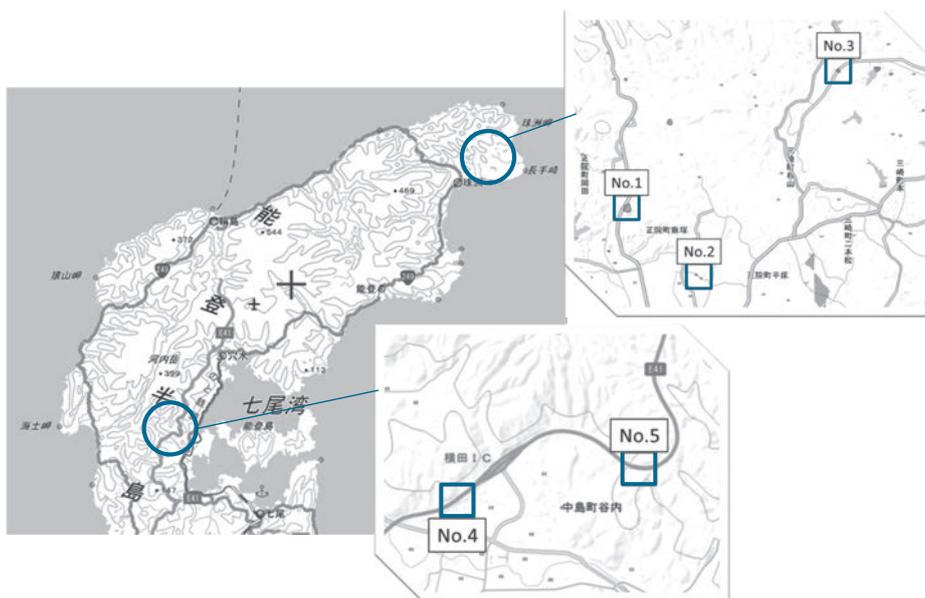


図-8 令和6年能登半島地震における斜面崩壊箇所 (一部抜粋)

No.	被災状況写真 (国土地理院_航空写真)	SAR衛星画像 (QPS-SAR)	
		震災前	震災後
1	1月5日撮影	12月14日13:17観測 ©2023 IQPS,Inc.	1月3日13:19観測 ©2024 IQPS,Inc.
2	1月2日撮影	12月14日13:17観測 ©2023 IQPS,Inc.	1月3日13:19観測 ©2024 IQPS,Inc. 判読困難
3	1月2日撮影	12月14日13:17観測 ©2023 IQPS,Inc.	1月3日13:19観測 ©2024 IQPS,Inc.

No.	被災状況写真	SAR衛星画像 (QPS-SAR)
		震災後
4	(国土地理院_航空写真) 1月5日撮影	1月6日13:56観測 ©2024 IQPS,Inc. 判読困難
5	(提供: 株式会社バスコ/ 国際航業株式会社) 1月2日撮影	1月6日13:56観測 ©2024 IQPS,Inc.

← 衛星電波照射方向

図-9 令和6年能登半島地震におけるSAR衛星画像判読事例(斜面崩壊箇所)

たことから、実験同様、確認は困難であった。最後に、事例 No.5 は、被災前の斜面が電波照射方向と正対していない箇所であったが、斜面崩壊の影響により正対する面が発生したことにより、崩壊箇所が白く写り、確認が可能であった。

4. おわりに

今回、試験フィールドに作成した道路被災模擬事象や実災害での道路被災事象を小型 SAR 衛星

で撮像し、その画像から被災事象の判読が可能であるか試みた。その結果、強度画像による各被災事象の把握において大まかな傾向はつかめたものの、把握結果と衛星の観測原理との関係については、一部において明らかにできなかった。

一方で、SAR 衛星画像を活用する際の留意事項として、実道路上では周辺の樹木等の影響を受けることが多々あるため、観測原理上、判読が不可能となる領域を事前に検証しておくことや道路線を SAR 衛星画像上に落とし込めれば、より判読しやすくなるため、道路線データをあらかじめ準備しておく必要があることが分かった。

今後は衛星観測データを蓄積しつつ、各被災事象と観測原理との関係についてさらに検討していくとともに、実災害で観測された SAR 衛星画像を用いた道路被災状況把握を実施していくことで、実災害における小型 SAR 衛星の活用可能性について検討し、小型 SAR 衛星を活用した道路被災状況把握に関する活用手引き(案)を取りまとめていく予定である。

謝辞

令和6年能登半島地震における SAR 衛星画像は、内閣府の「令和5年度小型 SAR 衛星コンステレーションの利用拡大に向けた実証」により撮像され、内閣府宇宙開発戦略推進事務局から提供いただいた。ここに記して謝意を表します。

【参考文献】

- 1) 梅原剛, 森賢二, 渡邊和宏, 増田仁, 片岡正次郎: 現場適用性を考慮したリモートセンシング技術による道路被災状況調査方策の提案, 土木技術資料, 第62巻, 第10号, pp.26-29, 2020
- 2) 梅原剛, 増田仁: 自動航行 UAV を用いた実道における被災状況把握実験, 土木技術資料, 第64巻, 第4号, pp.24-27, 2022
- 3) 水野正樹, 神山嬢子, 江川真史, 佐藤匠, 蒲原潤一, 林真一郎: 単偏波の高分解能 SAR 画像による河道閉塞箇所判読調査手法(案), 国総研資料第760号, pp.5-7, 2013