

# 稠密物理探査技術による浅部地盤構造の把握と3次元可視化技術

稲崎富士・青池邦夫

## 1. はじめに

地球表層部に構築される土木構造物は、本来的には3次元的な構造を有している。しかし従来の構造物設計やその維持管理においては、平面図や断面図のような2次元情報の集合体として構造物を取り扱ってきた。一方近年、空間情報データ処理解析技術の進展を契機に、3次元CADやBIM(Building Information Modeling)の技術とその適用が急速に拡大してきている。土木分野においてもCIM(Construction Information Modeling)と称される空間情報処理技術を開発導入し、調査・設計段階から施工・維持管理段階まで構造物の3次元モデル情報を利活用しようとする取り組みが進められつつある。そしてこのCIMの構築と有効活用には、地下空間情報のモデル化と土木構造物情報との統合が不可欠であるということが再認識され始めている。というのも土木構造物は本来的に地盤に支持され、それと一体不可分のものとして地表あるいは地中に存在するからである。

地盤や岩盤は本質的に不均質である。土木構造物を適切に設計施工し、長期にわたって維持管理するにはそのような地下の不均質構造を的確に把握・評価することが求められる。しかしボーリング調査に代表される従来の地盤調査ではスポット的な情報しか得ることができず、地盤構造の空間的連続性を把握してモデル化することが困難であった。

地盤構造の調査技術の一つに、物理探査と称される調査計測技術があり、これまでも活断層調査や地下資源調査などに広く用いられてきている。物理探査では、多数のセンサを線状に、あるいは面的に配列して計測することで、地下構造を2次元、3次元に可視化する。センサを稠密に配列すれば、地下数mの領域を数cmの分解能で可

視化することも可能であり、実際に路面下空洞や断層による地盤の変位などの局所異常構造把握に利用されてきた。また堤防の弱点箇所の抽出やトンネル切羽前方の弱層抽出などにも利用されている。物理探査は連続的な断面情報を提供することができ、不連続構造や局所異常などはそのような連続的な断面情報によってのみ検出できるのである。

従来の物理探査は主として資源調査や地下構造調査に利用され、地下数kmないし数100kmの領域を対象としている。これに対し筆者らは地下5cmから30m程度の領域を対象とする浅部物理探査の手法開発<sup>2)</sup>や特殊なツール開発<sup>3)</sup>に携わってきた。そのなかから、最新の調査研究成果とその適用例を以下に紹介する。

## 2. 稠密物理探査による浅部地盤構造の把握

### 2.1 路面性状と舗装内部構造の統合探査解析例

社会インフラを構成するストックの一つである舗装道路を将来にわたって安定的に維持管理・更新することは、重要な社会的課題の一つになっている。舗装のメンテナンスサイクルを確立するためには、まずその健全性、補修の要否を的確に評

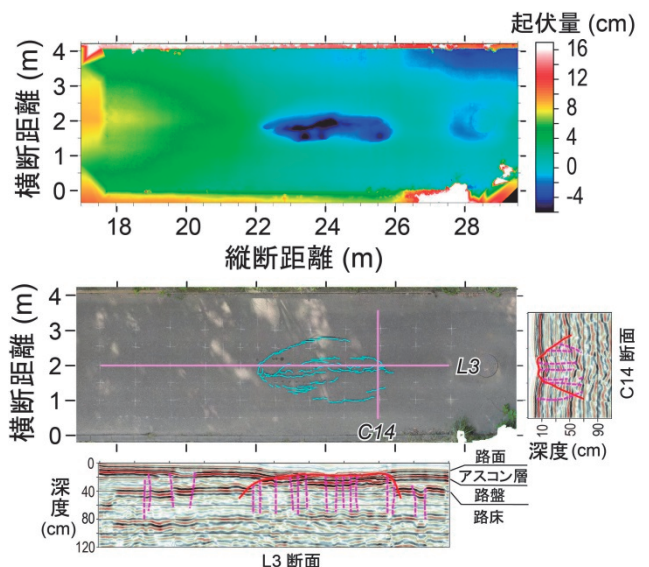


図-1 路面陥没発生箇所の舗装内部亀裂の探査例

上：陥没箇所の相対起伏分布、中：陥没箇所の路面オルソ画像、下・右：陥没箇所の地中レーダ探査断面

High-resolution Geophysical Explorations for the Delineation of Near Surfaces and their Utilization to 3D Modeling and Rendering

価する必要がある。この健全性評価は基本的に目視等による路面性状調査によるとされている<sup>4)</sup>が、路面に出現する変状は、路盤・路面下で発生した変状の一部を反映したものであり、両者を合わせて一体的・統合的に点検調査する手法の開発と普及が期待されていた。これに関連し、簡易写真測量と地中レーダ探査を組み合わせた稠密物理探査技術の適用性を検討した。

図-1は、構内道路に発生した路面陥没箇所の調査例である。2011年東北地方太平洋沖地震の4ヶ月後に幅約2m、長さ約4mにわたって道路中央部が陥没し、最大で約6cmの沈下が発生した。この直下約2mに雨水排水管が埋設されており、地震によって緩んだ路床・地盤の一部が吸出しによって流出し、路面の陥没を発生させたことが推定された。陥没発生箇所の路面をデジタルカメラで撮影し、それらを写真測量・3次元モデル作成解析ソフトウェアを用いて処理し、高解像度オルソモザイク画像（図-1中）と5mmメッシュの数値表層モデル：DSM（図-1上）を作成した。陥没の空間的分布や沈下量を高精度で把握できることが示されている。この陥没箇所では、あわせて地中レーダ探査を実施し舗装内の変状を可視化した。道路センター縦断L3測線と、陥没帯右縁部の横断C14測線の断面を同図下および右に示す。この断面が示すように、陥没による路面クラックは少なくとも路面下80cm程度から上方にまで連続していることがわかった。さらに路面には出現していない潜在クラックが存在することもわかった。このようなクラックの出現形態は、路面の陥没が舗装下部の変位の進展によって発生したことを示すものである。陥没部ではアスコン層が10cm程度撓み下がり、陥没帯外では明瞭な路盤路床境界面が、陥没帯内では多くのクラックで断裂していることにより、境界面が不明瞭になっている。この箇所では調査後に舗装の打直し補修が実施されたが、その際路盤上面に最大5cm程度の変位を伴う開口亀裂が確認された。またアスコン層厚は約10cm、路盤層厚は約30cmで、地中レーダ探査結果と整合的であった。

図-2は、別の路面変状発生箇所において各種物理探査を実施し、その結果を統合して舗装内部構造を3次元モデル化して表示したものである<sup>5)</sup>。この探査箇所ではMMS（Mobile Mapping

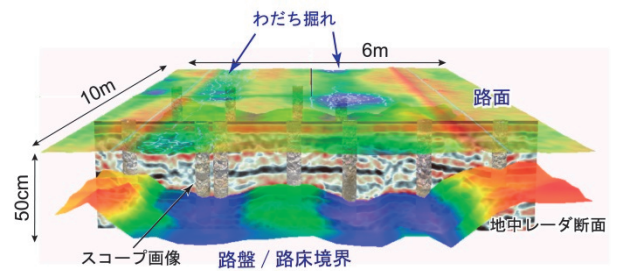


図-2 路面変状発生箇所の3D舗装内部構造解析・表示例（文献5）に加筆）

System)計測と写真測量を実施しており、それらからオルソ画像を作成するとともに路面の起伏を10mmメッシュで再現した。また25cmグリッドで地中レーダ探査を行ない、さらに11地点で削孔・スコープ調査を、9測線で高周波表面波探査<sup>6)</sup>を実施している。図-2には、路面に2条のわだち掘れが形成されていること、わだちの直下では路盤層が厚くなり路床を大きくたわみ変形させていること、地中レーダ探査で捉えた舗装構成各部層の境界が、削孔調査・スコープ壁面画像データと極めて整合的であることが示されている。また同図には示していないが、高周波表面波探査結果から推定した舗装構造ともよく一致していた<sup>5)</sup>。

これらの図に示すように、路面性状と舗装内部構造とを一体的に取り扱い3次元的に解析表示することで、路面性状だけでなく、変状の範囲や発達過程とその影響範囲を立体的に把握して舗装の健全性を総合的に評価することが可能となる。

## 2.2 舗装と盛土内部構造の統合探査解析例

舗装路面に発生した変状が、さらに下位の盛土施工上の不具合に起因している場合もある。このような場合、舗装の補修のみでは変状に対処できない場合がある。

積雪寒冷地において冬期施工されたジオテキスタイル補強土壁道路盛土の一部区間において、施工後一年を経て路面沈下や補強土壁の傾動沈下などの変状が発生した。この変状発生箇所において、盛土内部の構造を3次元で把握することを目的として稠密物理探査を実施した<sup>6)</sup>。このような変状発生事例はこれまでも数多く報告されている<sup>7)</sup>。補強土壁背面にはジオテキスタイル、盛土材、凍結抑制土、裏込め排水材などの多種の部材・材料が配置されるため、それに起因する材料不均質性と締固め方法の違いが、変状発生の変因と考えら

れている。探査を実施した盛土変状発生箇所では、オーバーレイと大型土のう積層による抑制対策が実施されていたが、変状がさらに進行したことから全体を掘削撤去して再構築する対策工が実施された。この盛土掘削撤去に先立ち、稠密物理探査を実施した。適用した探査・解析手法は、高所撮影カメラ画像解析によるオルソ画像作成、RTK-GNSS精密測位機能付き地中レーダ<sup>6)</sup>探査および高周波表面波探査である。図-3は、同一の横断測線で取得した地中レーダ探査断面（グレースケール）と高周波表面波探査断面（カラー）とを合わせて表示したものである。視点は盛土内（凍結抑制層中）に設定し、路面のオルソ画像を地中から見上げて表示している。この断面図に示されるように、アスコン層、路盤層、凍結抑制層とも、道路両端部（補強土壁背面）で下方に垂れ下がっており、盛土層の相対沈下量は50cm以上に達すると見積もられた。図-4は、変状発生区間の舗装・盛土内部の変形構造を3次元モデル化し立体的に表示したものである。補強土壁施工区間で盛土上面が大きく沈下していること、盛土沈下に伴って橋台部に設置された踏掛版も傾動していること、層厚の変動は凍結抑制層で最も大きいこと、を読み取ることができる。以上のような稠密物理探査の結果から、凍結土が混入していた補強土壁背面部の盛土層と凍結抑制層が融雪期に圧縮沈下するとともに一部が流出し、路盤層およびアスコン層にまで沈下変形が伝達した、という変状発達過程を解釈することができる。沈下の影響は補強土壁設置側である右側で大きく内奥部にまで達しているが、左の法面工施工側でも盛土上面が傾斜している。凍結抑制層施工前の盛土の形状を示している可能性がある。

2.3 河川堤防の内部不均質構造の統合探査解析例

河川堤防は基本的に連続的線形体であることが求められる構造物の一つである。たとえ一部であっても堤防が損壊すれば、堤内地を洪水から防護するという本来機能が喪失する。すなわち局所的な弱点箇所の存在とその物性が全体の安全性を律するという、「最小律」の視点で安全性を評価すべき構造物であることを意味する。したがって、河川堤防の内部がどの程度不均質であるか、その不均質部が浸透や液状化を引き起こす危険性を有しているか、という不均質性の空間的オー

ダーとその物性的特性を把握することが極めて重要な課題となっていた。これに関して筆者らは、複数の物理探査手法を堤防上に設定した探査測線に沿って実施し、既往資料や地歴データ等を含めて総合的に解析して河川堤防の浸透に対する安全性を連続断面情報に基づいて評価する、という「統合物理探査」<sup>8)</sup>を提唱し、全国55箇所の堤防区間で実証調査を実施してきた。2011年東北地方太平洋沖地震で被災を受けた関東平野域の河川堤防に対する緊急調査も含め、同探査は既に全国で800km以上の堤防区間で適用されてきている。その結果、河川堤防の内部が極めて不均質で、横断方向には数mのオーダーで、縦断方向にも数10m

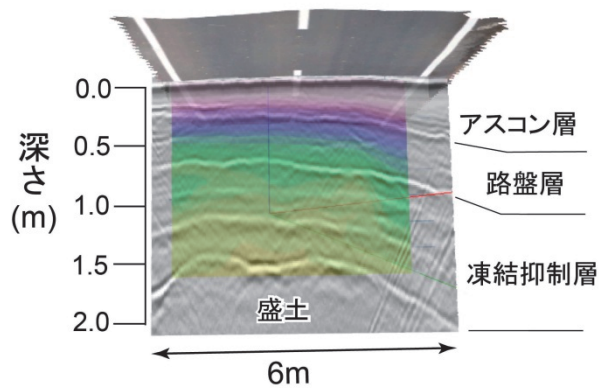


図-3 補強土壁盛土内部の構造 (文献6) を一部改変)

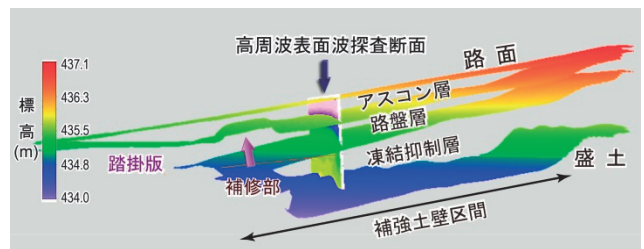


図-4 補強土壁盛土変状発生箇所の3D盛土内部構造表示例 (文献6) を一部改変)

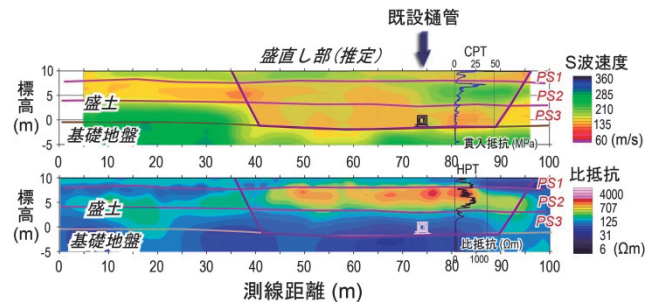


図-5 河川堤防の樋管設置部に認められる不均質構造の例 上図：S波速度構造、下図：比抵抗構造 (文献10) に加筆)

オーダーで構成材料や構造が異なることが明らかになってきた<sup>9)</sup>。

その一例を図-5に示す。老朽化した樋管を撤去することが予定されていた堤防区間において、堤防開削前に天端に測線を設定して統合物理探査を実施した<sup>10)</sup>。さらに探査区間内で3成分コーン貫入試験(CPT/HPT)を実施し、貫入抵抗および比抵抗プロファイルを取得した。同図に示されるように、高々100mの探査区間にもかかわらず、堤体部(標高0mより上)のS波速度(同図上)も比抵抗(同図下)も縦断方向に有意に変化していることが捉えられている。たとえば比抵抗断面では、測線距離42mから85mにかけて堤体部が有意に大きな値を示すことが捉えられている。またS波速度断面(同図上)では、5mから35m間、35mから75mまで、そして75mから95mの間では構造を異にしており、既設樋管部を埋設する際に、他の区間とは異質の材料が使用されたことが推定できる。樋管横断部が異なった物性を示すことは多くの堤防で普遍的に認められる特徴でもある。また同図からは当該区間の堤体が基本的に3層構造をしていること、同様の構造が3成分コーン貫入試験結果にも見出されることがわかる。この断面に典型的に示されているように、河川堤防の縦断方向の不均質性のオーダーは、従来考えられてきたものよりかなり小さく、数10m程度以下の場合があることを留意する必要がある。

#### 2.4 基礎地盤不整形構造の可視化例

臨海平野部では表層部に沖積層が分布している場合が多い。沖積層は地質学的に最も新しい地層の一つで、 $N$ 値がゼロを示す場合があるなど極めて軟弱であること、下位の地層を削り込んで堆積していることが多く、地表は平坦であっても基盤層・支持層が複雑に分布している場合があることに注意する必要がある。水平距離で15m程度しか離れていないのに、基盤層の深さが10m近く変化する場合があります。図-6はその典型例である。

2007年3月に発生した能登半島地震では、石川県穴水町で震度6に相当する強震動を記録し、多くの家屋が倒壊したが、家屋倒壊が特定の区域に集中していたことが特徴的であり、沖積層の層厚・基盤層の深さとの関連性が指摘された<sup>11)</sup>。そこで強震動が観測されていたK-NET穴水観測点(ISK005)の近くで高分解能S波反射法地震探査

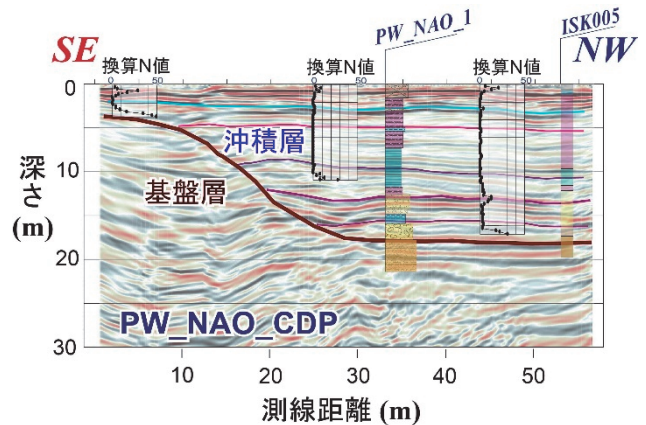


図-6 高分解能S波反射法地震探査による基盤急変構造可視化例(文献12)に加筆)

を実施し、併せてオールコアボーリング・検層を行ない浅部地盤構造の把握を試みた<sup>12)</sup>。同図に示されるように、測線南東側では深さ3m程度に確認された基盤層表面が、約50m離れた強震計設置点(ISK005)では18m近くまで落ち込んでいる。最急傾斜部の傾きは約40度に達していることがわかった。ボーリング調査でこのような急傾斜構造を捉えようとするには、少なくとも10m程度の間隔で群列配置する必要がある。これに対しS波反射法地震探査では、200m程度の測線区間を約半日の現場作業で終わらせ、深さ30m程度までの詳細な地盤構造を構築することができる。短時間での計測調査が可能なコーン貫入試験、動的サウンディング等を補足的に組み合わせることで、さらに詳細に地盤構造を把握することが可能になるので、今後の一層の普及展開が期待される。

#### 2.5 4次元での地下物性構造の可視化

液状化やパイピングなど土木構造物の本来機能を著しく低下させるような地盤現象は、微小領域を核として局所的にかつ過渡的に進行する現象であり、そのメカニズム解明や効果的な対策工の適用には、関連する地盤物性の空間的分布の詳細把握とその時間変動モニタリングが求められていた。従来のモデル実験では計測センサの配置が疎であったり、計測時間間隔が粗かったため、動的な挙動を詳細な空間分解能で把握することができなかった。一方物理探査においては、これまで得られた物性情報を時間的に変化しない固有値として取り扱うことが多かったが、近年4次元(空間3次元+時間)で物性の変化を追跡する手法の適用が急速に拡大しつつある。筆者らは独自に開発し

た高速多チャンネル電気探査装置<sup>13)</sup>を用い、堤防や道路盛土の不飽和帯における地表からの浸透水の浸透過程をほぼリアルタイムでモニタリングする新しい手法<sup>14)</sup>を考案し、堤防等の安全性評価への適用を検討してきている。

図-7は、堤防天端に掘削した長さ6m、幅25cm、深さ30cmの溝から水を浸透させ、堤防不飽和帯中への浸潤体の拡がりを比抵抗の変化率として3次元的に表現したものである<sup>15)</sup>。この溝に、断続的に総計1100Lの水を注水したが、それに伴い、堤防不飽和帯中に形成された浸潤体がまず溝の直下に形成され、その後のり方向に進展成長する過程が鮮明に捉えられている。現時点では浸透過程の追跡にとどまっているが、堤体材料の土質特性の分析、体積含水率と比抵抗変化率との関係を実験的および数値モデル解析によって明らかにすることにより、不飽和-飽和浸透過程を原位置で定量的に評価することが可能になると期待される。

### 3. まとめ

不均質な構造が想定される調査地において地盤調査を実施する場合、調査地点の間隔を想定される不均質構造が把握できるよう設定することが重要である。空間エイリアシングの原理によれば調査点間隔の2倍以下の不均質構造は検出することができない。たとえば100m間隔のボーリング調査では、原理的に波長が200m以下の基盤面の起伏形状を捉えることができない。最近大規模道路陥没や重金属による地層汚染などの地質トラブルが多発しているが、どのような地盤調査をどの程度の空間的密度で実施したか、それが想定されていた地盤構造の不均質性のオーダーに対する空間エイリアシングの条件を満たしていたか、を吟味する必要がある。本報文で紹介した稠密物理探査技術は、たとえば地中レーダ探査では測線方向に1~10mm間隔、反射法地震探査では10~50cm間隔で地下構造を捉えることができ、小規模空洞や断層変位などを検出することが可能な十分な空間解像度を有している。逆に複雑に変化する我が国の浅部地盤の内部不均質構造を可視化することができるのは、稠密物理探査技術だけであると結論しても過言ではない。

筆者らが研究開発してきた稠密物理探査技術では、いくつかの手法を組み合わせることによって

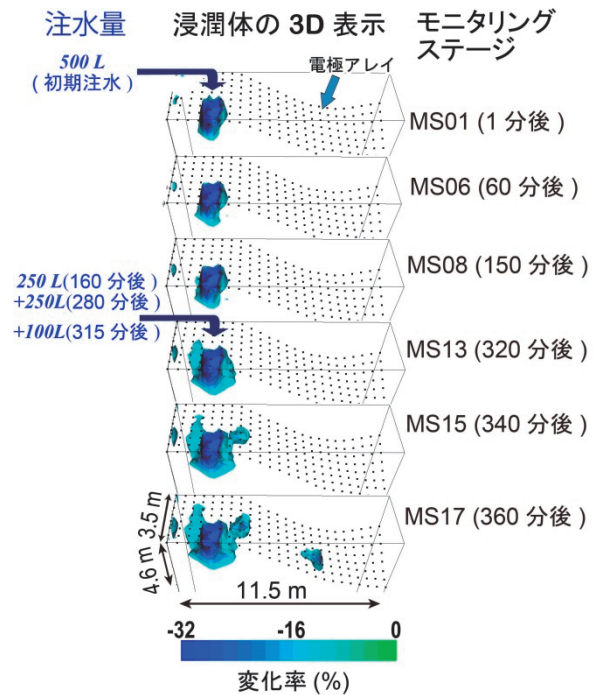


図-7 高速3次元電気探査によりイメージングした堤体表層部の浸透による浸潤体の成長過程 (文献15) に加筆)

深さ5cmから30m程度までの浅部地盤領域を調査することが可能である。さらに従来の2次元断面にとどまらず、3次元の立体的な構造の把握、時間軸を加えた4次元での物性変化の可視化も可能になってきている。加えて3次元の地盤構造をモデル化してWEB上で配信するツールも整備しつつある。このように高解像度の3次元地盤構造モデルを容易に構築することが可能になってきており、浅部地盤の不均質構造や複雑性に対する理解と従来のボーリング調査を主体とした地盤調査の限界に対する理解が深まりつつある。本報文で紹介した地中レーダ探査、高周波表面波探査、高密度電気探査、S波反射法探査などは比較的安価に適用することができ、高解像度の空間情報を得られることから今後の一層の利活用が期待される。

物理探査によって得られる空間情報は、S波速度、比抵抗、比誘電率などの物性情報であり、それらから直接的に地盤の強度や透水性などの工学的特性を推定することは困難であった。しかし近年室内試験データの蓄積や物理モデルを用いた理論的検討が進み、計測物性情報から工学的評価物性情報を推定することが可能になりつつある。調査設計段階から維持管理段階まで、各種土木構造物を地盤の3次元構造と空間的物性分布情報を含

めて統合的にモデル化し管理する時代が近づきつつある<sup>16)</sup>。

## 謝 辞

本報文で紹介した現地探査計測のうち一部は木佐貫寛現交流研究員と共同で実施したものである。また写真測量および3次元地下構造モデル作成には小河原敬徳非常勤職員の手を煩わせた。路面陥没発生箇所のDSM作成にあたっては、東洋計測リサーチ(株)の片野定男氏から同社が実施した測量データを提供していただいた。WEB上での3次元地下構造モデルの配信・表示には、キューブワークス(合)の北尾馨氏が開発・作成したシステムを使用させていただいた。以上の諸氏の協力と、本報文での関連成果物の発表許諾に対して深甚の謝意を表します。

## 参考文献

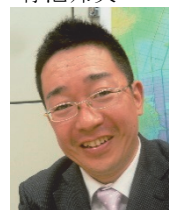
- 1) 国土交通省：国土交通白書 2014、321p、2012
- 2) 稲崎富士：舗装・盛土の内部物性構造を可視化するー非接触・非破壊計測技術の開発ー、平成 27 年度土木研究所講演会講演集、21-32、土木研究所、2015
- 3) 稲崎富士：S 波ランドストリーマーの開発と都市域表層地盤構造調査への適用、土木研究所報告、206、1-30、土木研究所、2007
- 4) 国土交通省：舗装点検要領(案)、50p、2016
- 5) Aoike, K., Saito, H., and Inazaki, T., (2014): Detailed characterization of pavement surface structure using high resolution GPR, *Proceedings of the 27th Annual Symposium of the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems (SAGEEP 2014)*, 4p.
- 6) Aoike, K., Fujita, T., and Inazaki, T., (2015): Detailed GPR surveys for delineating near-surface deformation structure in embankments with aid of RTK-GNSS, *Proceedings of the Near-Surface Asia Pacific Conference*, 4p.
- 7) 佐藤厚子：融雪期におけるジオテクスタイル補強土壁の変状について、寒地土木研究所月報、第 373 号、pp.39~41、2014
- 8) 稲崎富士：河川堤防安全性評価への統合物理探査情報の活用、河川技術論文集、Vol.14、pp.85~90、土木学会水工学委員会、2008
- 9) 土木研究所・物理探査学会(編)：河川堤防の統合物理探査ー安全性評価への適用の手引きー、120p、愛智出版、2013
- 10) Inazaki, T. (2013): Ground *truthing* for the verification of integrated geophysical surveying for the safety assessment of levee systems, *Proceedings of the 26h Annual Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems (SAGEEP2013)*, 6p
- 11) Yoshimi, M. and Yoshida, K. (2008): Site amplification and strong ground motion of the 2007 Noto Hanto, Japan earthquake estimated from aftershock observation, *Earth Planets Space*, 60, 161-167.
- 12) 稲崎富士、林宏一、飯場正紀、吉見雅行、小原一成：ランドストリーマー高分解能反射法および S 波 VSP による K-NET 穴水観測点近傍の浅部地盤構造調査、物理探査学会第 120 回学術講演会講演論文集、pp.101~104、2009
- 13) 今村杉夫、稲崎富士、北高穂、坂西啓一郎：符号分割多点同時通電による高速比抵抗探査装置の開発と適用、物理探査学会第 128 回学術講演会講演論文集、pp.203~206、2013
- 14) 稲崎富士、坂西啓一郎、今村杉夫：実堤防における不飽和帯浸透過程の比抵抗経時変化モニタリング、物理探査学会第 132 回学術講演会論文集、pp.79~82、2015
- 15) 稲崎富士、坂西啓一郎、今村杉夫：実堤防における不飽和帯浸透過程の比抵抗経時モニタリング模擬堤防を用いた水の浸透モニタリング、物理探査学会第 132 回学術講演会講演論文集、pp.79~82、2015
- 16) 松岡俊文：地盤を対象とした物理探査技術の過去と現在、そして未来、地盤工学会誌、Vol.65、No.1、p3、2017

稲崎富士



土木研究所地質・地盤研究グループ 特任研究員  
Tomio INAZAKI

青池邦夫



研究当時 土木研究所地質・地盤研究グループ 交流研究員  
Kunio AOIKE