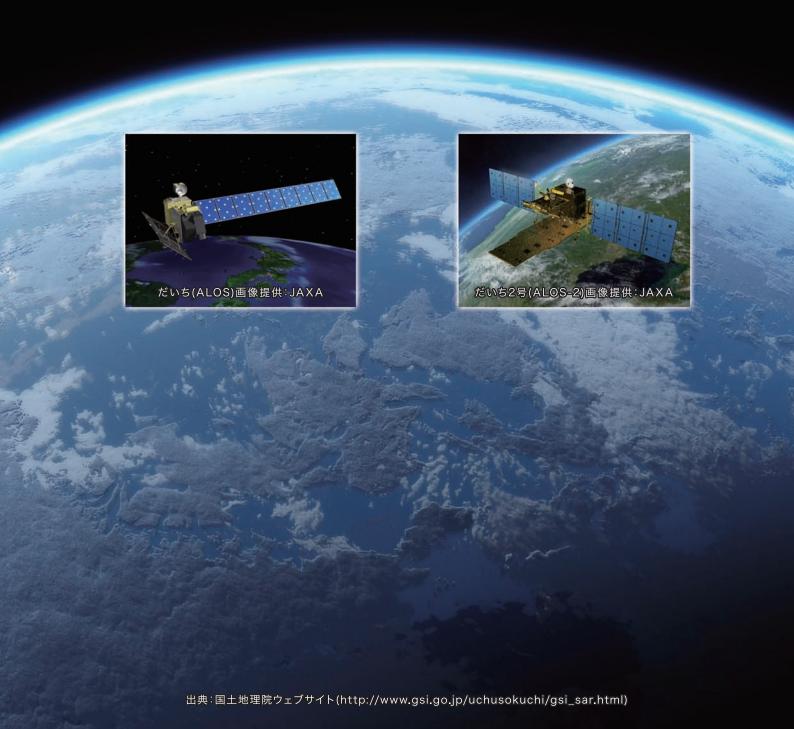


地質미最新技術

~これからの地質調査~



^{地質の} 最新 技術

干渉SARを利用した地盤変状のモニタリング

基礎地盤コンサルタンツ(株) 技術本部 物理探査部 吉川 猛 東京大学 大学院 工学系研究科 古関 潤一

1.はじめに

社会インフラの維持管理の効率化が叫ばれて久しいが,近年,維持管理に衛星SAR(SAR:合成開口レーダ)を活用しようという動きがある。

例えば、内閣府の戦略的イノベーション創造プログラム(SIP)では、河川堤防やダム、港湾構造物など、社会インフラのモニタリングに衛星SARを活用する研究開発が採択されている。衛星SARの1データは、数10km×数10kmをカバーするため、これを活用すれば、広範囲を効率的に監視することができる。

また、行政にもSARの活用を後押しする動きがある。例えば、環境省は平成29年5月に「地盤沈下観測等における衛星活用マニュアル」を公開し、国土交通省は宇宙航空研究開発機構(JAXA)と共同で、平成30年3月に「災害時の人工衛星活用ガイドブック(水害版・衛星基礎編、水害版・浸水編、土砂災害版)」を公開した。

環境省は、地盤沈下の監視体制の維持・向上のための 効率的かつ効果的技術としてSARの活用を勧めており、 国土交通省は、災害時の迅速な概略把握や初動対応の 迅速化のためにSARの活用を勧めている。

そこで本稿では、SARの解析手法である干渉SARについて、その概要と土木分野における活用事例を紹介する。

2.干渉SARとは

2.1.1 干渉SARの概要

SARで観測を行うと、地表の対象物からのレーダ反射波の強度と反射波の位相を得ることができる。地表の同じ場所に対して2回の観測を行い、それらを干渉させることによって、わずかな距離差を抽出することができる。図-2.1.1に示す通り、1回目の観測と2回目の観測の間に生じる位相差は、衛星と地表との距離変化であり、それはすなわち地表に生じた変位ということになる。SARの観測は、衛星から地表にむけて斜めにレーダを照射しているため、解析により得られる変位はあくまでも衛星視線方向(斜め方向)の変位である。仮に鉛直方向の地表変位が生じている場合でも、解析により得られるのは衛星視線方向の変位であることを理解しておく必要がある。

2.2.2 干渉SARの解析手順

一般的な干渉SARの解析手順を図-2.2.1に示す。 干渉SARに供するSARデータは、例えば、だいち2号 (ALOS-2/PALSAR-2)の場合、処理レベル1.1のデータ(SLC:Single Look Complex)である。

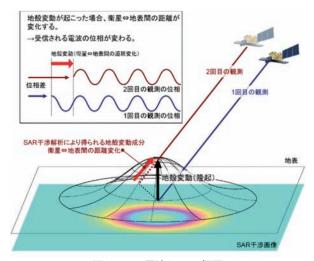


図-2.1.1 干渉SARの概要 出典:国土地理院 干渉SARの原理 http://www.gsi.go.jp/uchusokuchi/sar_mechanism.html

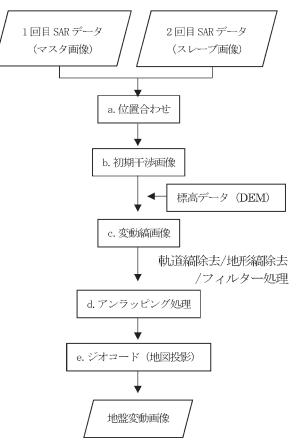


図-2.2.1 干渉SARの解析手順

a.位置合わせ

マスタ画像にスレーブ画像の位置を合わせる。

b.初期干渉画像

位置合わせを行った2枚の画像の画素ごとに位相の差分を計算し、初期干渉画像を作成。この段階では、まだ、 軌道縞や地形縞などの誤差成分を除去していない。

c.変動縞画像

初期干渉画像から誤差成分を除去し、地表面の変動情報のみを抽出する。衛星軌道情報から算出した軌道縞、 DEMから算出した地形縞を除去する。また、ノイズを軽減するためのフィルター処理を施す。

d.アンラッピング処理

変動縞画像までは位相差を表現した画像であるため、位相差を変動量へ換算処理する。位相は0°~360°までの値しか持たないため、変位が大きくなると360°から0°に戻ってしまう。そのため、位相差を変位の絶対値に変える必要がある。これをアンラッピング処理という。アンラッピング処理の模式図を図-2.2.2に示す。アンラッピング処理を行った後の変位は衛星視線方向の変位となる。

e.ジオコード(地図投影)

前項までの処理は、SAR衛星によるレーダ座標系で処理をしているため、地形図等への重ね合わせができない。 そこで、必要な座標系に変換し、任意の空間情報と重ね合わせができる地盤変動画像を作成する。

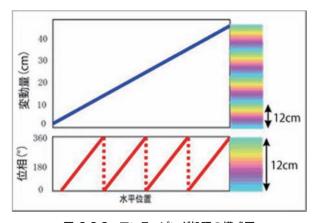


図-2.2.2 アンラッピング処理の模式図 出典:国土地理院 干渉SARの原理

http://www.gsi.go.jp/uchusokuchi/sar_mechanism.html

2.2.3 干渉SAR解析の種類

干渉SARの解析方法には,前項で記述した二時期の差分を取る方法に加え,スタッキング解析,2.5次元解析など,いくつかの解析方法がある。表-2.2.1¹¹に干渉SAR解析の種類を示す。

その他には、Permanent Scatters Interferometric

Synthetic Aperture Radar(PSInSAR), Small Baseline Subset(SBAS)などの解析手法がある。

PSInSARは、建物など反射の位相が非常に安定している恒久散乱体(Permanent Scatters)を含む画素のみを用いて干渉処理を行う方法で、①データ量を減らすことができる、②20枚以上の画像を同時に使って重ね合わせを行い、それらを位相モデルにあてはめ、DEMの補正量や地表の変位量を同時に推定できる、③時系列の地盤変位量を推定できることが特徴である。

SBASは、多数のSAR画像から垂直基線長と時間間隔の短い干渉ペアを選択して干渉処理を行う。干渉性の高い画素を抽出し、時間変化を検出する方法である。

3.SARデータの種類、入手先

現在、日本を含む世界各国において複数のSAR衛星が運用されている。SARで採用されている波長帯としては、L、C、Xバンドの3種類がある。日本のだいち2号(ALOS-2/PALSAR-2)はLバンドの波長帯を採用しており、世界では日本だけである。主なSAR衛星の一覧を表-3.1.1に、主なSAR衛星と衛星データの入手先を表-3.1.2に示す。

干渉SARによる変位分解能は、一般的に「波長の1/10程度」と言われており、波長が短いXバンドやCバンドの方が分解能は高い。一方、XバンドやCバンドでは植生の影響を受けやすい。例えば、図-3.1.1に示すようにXバンドは樹木の表面で反射し、Cバンドは幹で反射、Lバンドは樹木を透過し地盤で反射する、と言った具合である。また、XバンドやCバンドでは雲の影響も受けやすいことも特徴である。

従って、山間部で地盤の変位を抽出しようと思う場合は、Lバンドの方が適していると言える。人工構造物の多い都市域で変位を抽出しようと思う場合は、XバンドやCバンドが良いだろう。

このように、SARデータはそれぞれ特徴があるため、目的、対象地域、対象時期に合わせ、最適なデータを検討の上、選択する必要がある。なお、SAR衛星については、過去に運用されていた衛星、例えば、だいち1号(ALOS-1/PALSAR-1、2006年~2011年)やRADARSAT-1(1995年~2013年)などもあるので、必要に応じてアーカイブの検索をしていただきたい。

SARデータのアーカイブ検索については、例えば、ALOS-2/PALSAR-2のデータであれば宇宙研究開発機構(JAXA)が運営するAUIG 2^2 というサイトがある。また、Sentinel-1のデータであれば、Copernics Open Access Hub 3 というサイトがあり、両者は任意のアーカイブを検索することができる。

表-2.2.1 干渉SAR解析の種類¹⁾

	1ペアの干渉 SAR 解析	スタッキング解析	2.5 次元解析
	2時期の衛星データ (1ペア) による干	複数ペアの干渉 SAR 解析結果 を合成	撮影方向の異なるスタッキング解析結
	渉 SAR 解析。衛星データから初期干渉	することで、大気遅延 の誤差等を低減	果を組み合わせ、変動成分を鉛直方向
概要	画像を作成し地形による成分や軌道に	し、精度を上げることができる。時系列	と東西方向に分離することで、鉛直方
	よる成分を除いて地盤高の変動画像を	解 析とも呼ばれる。	向の変位の精度を向上させる。
	作成する。この地盤高の変動画像は大		
	気遅延による誤差等を含んでいる。		
	<利点>	<利点>	<利点>
	・2 時期の衛星データだけで解析でき	・大気遅延などの誤差を低減すること	・大気遅延などの誤差をより低減する
	る。	ができる。	ことができる。
	<欠点>	・合成する衛星データ数 (ペア数) が多	・水平移動成分を除き、鉛直方向の変
特徴	・大気遅延などの誤差が多く含まれ	いほど精度が向上する。	動成分を抽出で きる。
	る。	<欠点>	<欠点>
		・同一の衛星軌道で複数回の 観測が	・異なる軌道の衛星データが必要とな
		必要となり、1 ペアの干渉 SAR 解析よ	り、解析可能範囲が狭くなる。
		りも多くのデータが必要となる。	

表-3.1.1 主なSAR衛星一覧

衛星名	開発国	波長帯(波長)	解像度の例	打ち上げ年
ALOS-2	日本 (JAXA)	L バンド (約 24cm)	$3m\times3m$	2014年
TerraSAR-X	ドイツ	Xバンド(約3cm)	1 m $\times 2$ m	2007年
TanDEM·X	ドイツ	Xバンド(約3cm)	1m×2m	2010年
COSMO-Skymed	イタリア	X バンド(約 3cm)	$1\text{m}\times1\text{m}$	2007年
RADARSAT-2	カナダ	Cバンド(約6cm)	$1\text{m}\times1\text{m}$	2007年
Sentinel-1	欧州宇宙機関(ESA)	Cバンド(約6cm)	$5\text{m}\times20\text{m}$	2014年

表-3.1.2 主なSAR衛星と衛星データの入手先

衛星名	有料/無料	衛星データの主な入手先		
ALOS-2	有料	株式会社パスコ		
ALOS 2	1月14年	(一財) リモートセンシング技術センター		
TerraSAR-X	有料	株式会社パスコ		
TanDEM-X	有料	株式会社パスコ		
COCMO CII	有料	日本スペースイメージング株式会社		
COSMO-Skymed		(一財) リモートセンシング技術センター		
RADARSAT-2	有料	株式会社パスコ		
Sentinel-1	無料	欧州宇宙機関(ESA)		

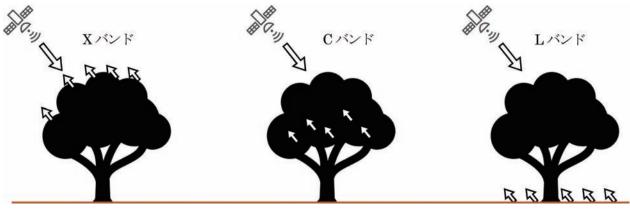


図-3.1.1 波長帯と樹木の関係

AUIG2における検索例を図-3.1.2に示す。このサイトでは、「差分干渉ペア候補検索」という機能があり、簡単に干渉SARに適したアーカイブを検索することができる。なお、AUIG2はMicrosoft Silverlightの機能を使用するため、ブラウザはIE(Internet Explorer)を使う必要がある。

次に、Copernics Open Access Hubにおける検索 例を図-3.1.3に示す。こちらはAUIG2のような便利な機能はなく、条件に合う個々の検索されたアーカイブを個々にダウンロードする必要がある。一度にダウンロードできるアーカイブは2つに限定されており、経験上、ダウンロードの完了までに一晩以上を要することが多い。

その他の海外のSARデータのアーカイブについては、 販売代理店に検索をお願いする必要がある。

SARデータは基本的に有料である。ALOS-2であれば数万円、それ以外の衛星は数十万円する。解像度によって価格も変わるため、詳しくは販売代理店にて確認いただきたい。なお、欧州宇宙機関が運用する



図-3.1.2 AUIG2検索例 だいち1号(ALOS-1/PALSAR-1)も検索可能

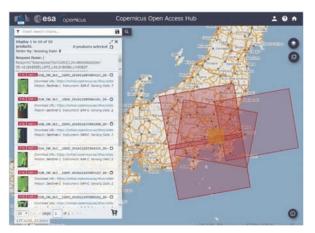


図-3.1.3 Copernics Open Access Hub検索例

Sentinel-1のデータのうち、表-3.1.1で示す解像度の データは無料で公開されている。

4.干渉SAR解析ソフトの種類

干渉SARの解析ソフトは世の中に多数存在する。それぞれ、有償・無償、Windows環境で動くもの、Linux環境で動くもの、共同研究やユーザーグループへの参加が必要なものなど、多様である。

有償ソフトは多機能で使いやすく、また、ソフトウェアアップデートにより、常に最新の解析技術を享受できる一方で、1ライセンス数百万と非常に高価である。

無償ソフトは自由に入手できる一方、機能が限定的であったり、一通りの処理を行うために複数のパッケージが必要であったり、マニュアルが英語であったりと、使い勝手に特徴がある。ここでは、一部の解析ソフトについて紹介したい。主な干渉SAR解析ソフトを表-4.1.1に示す。

有償ソフトについては、販売会社がソフトウェアセミナーを開催している場合がある。このような機会を利用すれば、ソフトのおおまかな使い勝手を知ることができる。また、ソフト販売会社とは別に、衛星データの販売会社

表-4.1.1 主な干渉SAR解析ソフトの一覧

ソフト名称	有償 /無償	説明	URL
SARscape	有償	HarrisGeospatial 株式会社が販売 評価用ライセンスあり	https://www.harrisgeospatial.co.jp/
GAMMA SAR	有償	株式会社オープン GIS (日本代理店) が販売 評価用ライセンスあり	http://www.opengis.co.jp/
GMTSAR	無償	GMT ユーザ向けに開発されたオ ープンソースシステム	https://topex.ucsd.edu/gmtsar/
SNAP	無償	ESA が公開、Windows、Mac、 Linuxで動作	http://step.esa.int/main/toolboxes/snap/
StaMPS	無償	ユーザーグループへの参加が必要	https://homepages.see.leeds.ac.uk/~earahoo/stamps/

※URLの最終アクセス日 2019 年 1 月 24 日

がSARに関する講座を開催している。例えば、(一財)リモートセンシング技術センターでは、年に数回、SARに関する講座を開催している。このような機会を利用して基礎的な解析処理技術を学ぶこともできる。

5.解析事例

5.1 軟弱地盤地域の道路路面変位解析事例

5.1.1 調査対象地および調査方法

調査対象地は軟弱地盤が広く分布する山形県酒田市の高速道路である。当該地区では、澤野4)らや友清5)らが高速道路盛土の長期沈下についてまとめており、筆者らはだいち1号(ALOS-1/PALSAR-1)の衛星データを使用してPSInSAR(干渉SAR時系列解析)を行い、解析結果とこれら既往の報告との比較検討を行った。衛星データは、平成19年6月9日から平成22年11月2日までの20シーン、北向き軌道のものを使用した。解析では、平成19年6月9日を基準日とする路面沈下速度を求め、それを沈下量に換算した。解析グリッドは10m×10m、しきい値はコヒーレンス0.75以上とした。

コヒーレンスは干渉の度合いを表す数値で0~1の値を取り、1に近づくほど干渉性が良いことを示す。この値が低くなると干渉しにくくなる。

5.1.2 解析結果

酒田市付近における高速道路路面沈下量を図-5.1.1⁶⁾に示す。図中の数字は高速道路のキロポスト(KP)を表している。また、各キロポストの実測値とPSInSAR解析結果の比較図を図-5.1.2に示す。

当該地域は、「粘性土優勢区間(後背湿地)」、「砂質 土優勢区間(自然堤防)」、「粘性土および有機質土優勢 区間(後背湿地)」に区分されており、澤野らは、150KP ~153KP付近の「粘性土および有機質土優勢区間(後背湿地)」において特に沈下が大きいことを報告している。PSInSARの結果においても、151KP~153KP付近において特に大きな沈下量を示している。また、各キロポストにおける実測値との比較においても、澤野らの報告と同様の沈下傾向を示すことが認められた。ただし、152.1KPの比較のように、一部では沈下量を過小評価しており、精度の検証が必要な部分も認められた。

5.1.3 道路管理を考慮した整理方法

PSInSAR解析では、年間数mmオーダーの変位速度を評価できる一方、その対象は「PS点」に限られる。道路の維持管理では「点」ではなく「区間の変位速度」が分かることが望ましい。そこで、任意区間のPS点をグルーピングして各PS点が持つ沈下速度を平均化し、それを区間沈下速度とする方法を検討した。具体的には、ボックスカルバートとボックスカルバートの間、橋梁と橋梁の間など、道路盛土部ごとにグルーピングを行う。図-5.1.3にグルーピングの概念図を示す。なお、図-5.1.1の整理にあたっては、グルーピング範囲のPS点が2つ以下の区間については除外した。

5.1.4 地盤工学的概念の補助利用

PSInSAR解析では、道路路面上に必ずしもPS点が得られるとは限らない。そのような区間については、図5.1.4のように圧密沈下の概念を補助的に利用した。具体的には、路面と盛土のり面の沈下量の比を用いて、盛土のり面で得られた変位速度(図-5.1.3における白点のうち盛土のり面部分のもの)を路面上の値に補正した。



図-5.1.1 平成19年~平成22年の路面沈下量⁶⁾(地理院タイルを加工して作成)

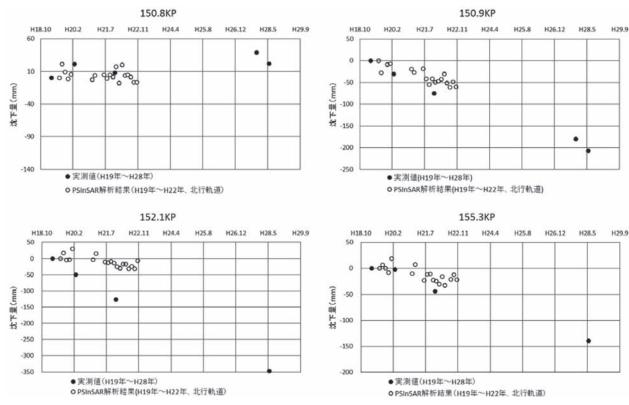


図-5.1.2 路面沈下量と経時変化比較7)(実測値は文献5)に基づく)



図-5.1.3 PS点グルーピング概念図7)

5.2 地すべり土塊および道路変状推定事例 5.2.1 調査対象および調査方法

調査対象地の虻田地区は、有珠山西側の火山活動地域に当たり、洞爺湖や有珠山の火山活動に起因する地質(凝灰岩、軽石流堆積物など)が厚く分布する。当該地区では、2010年にアンカーの浮きなど、地すべり活動に伴う道路のり面の変状が確認されている。筆者らは、だいち1号(ALOS-1/PALSAR-1)の衛星データを使用して干渉SAR解析およびPSInSAR解析を行い、地すべり

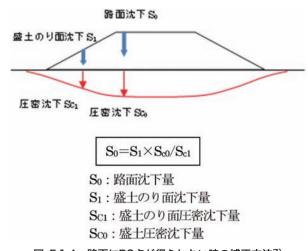


図-5.1.4 路面にPS点が得られない時の補正方法⁷⁾

土塊の範囲および道路周辺の変状状況を推定した。

5.2.2 地すべり範囲の推定

虻田地区の干渉SAR解析(平成19年10月20日~平成22年6月12日,北向き軌道)結果を図-5.2.1)に示す。解析グリッドは20m×20mとしている。図-5.2.1において、白色系は衛星に近づき、黒色系は衛星から遠ざかる傾向を示す。図中央部の白色系に着色された斜面は、地すべり変動領域を表していることが示唆される。解析に

よって示唆された地すべり範囲は地表地質踏査による推定地すべり範囲(図中赤線)をほぼ再現しており、すべり土塊は衛星視線方向に近づいている。つまり斜面は押し出されていると考えられる。

5.2.3 道路周辺の変状状況

次に、PSInSAR解析(平成19年1月17日~平成23年3月15日、北向き軌道)で求めた結果を図 $-5.2.2^{7}$ に示す。解析グリッドは $10m \times 10m$ 、しきい値はコヒーレンス0.75以上とした。斜面で得られたPS点では、約4年間で8cm、のり面では約4cm衛星視線方向に近づく変位履歴が得られ、道路面ではほぼ動きがないことが分かった。

本解析では得られたPS点は少ないものの、この方法により時系列の地すべり変動量と変動方向を推定できる可能性が示唆された。

最後に、PSInSAR解析による、平成18年6月12日を基準とした虻田地区周辺の道路路面沈下量を図-5.2.38 に示す。解析グリッドは10m×10m、しきい値はコヒーレンス0.75以上とした。得られた解析結果をもとに道路をグルーピング(ボックスカルバート〜ボックスカルバート間、橋梁〜橋梁間など)し、3つ以上のPS点が得られた道路区間のみ着色した。図-5.2.3より、虻田地区周辺の道路はおおむね沈下傾向にあり、最大で25〜30mm沈下していることがわかる。

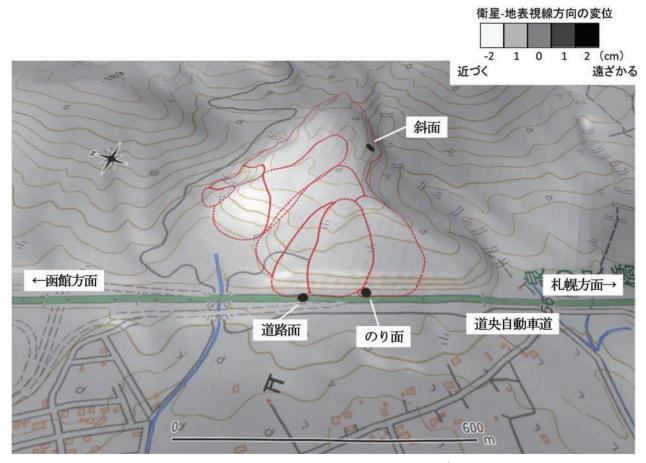


図-5.2.1 干渉SAR解析より抽出した地すべり範囲⁷⁾ (地理院タイルを加工して作成) 図中赤線は地質技術者による推定地すべりブロック 白い部分(衛星に近づく)とほぼ一致する

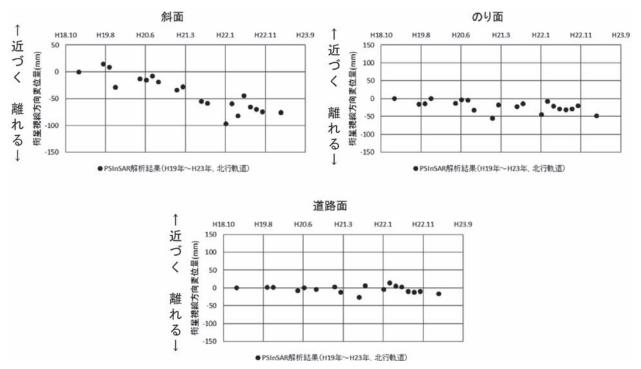


図-5.2.2 PSInSAR解析による変位の経時変化⁷⁾ (それぞれの位置は図-5.2.1に示す)



図-5.2.3 虻田地区周辺の路面の変状状況⁸⁾ (変位量の負「一」は沈下を示す)

参考文献

- 1)環境省:地盤沈下観測等における衛生活用マニュアル, p35, 2018.
- 2) https://auig2.jaxa.jp/ips/home URLの最終アクセス日2019年1月24日
- 3) https://scihub.copernicus.eu/dhus/#/home URLの最終アクセス日2019年1月24日
- 4) 澤野ほか: 軟弱地盤上の高速道路盛土における長期観測結果からの一 考察, 第52回地盤工学会研究発表会, pp1079-1080, 2017.
- 5) 友清ほか: 圧密沈下促進工法に伴う長期圧密沈下ひずみ速度に関する 一考察, 第52回地盤工学会研究発表会, pp1081-1082, 2017.
- 6) 吉川ほか: SARを利用した軟弱地盤地域における高速道路路面沈下量

- の把握, 第53回地盤工学会研究発表会, pp1111-1112, 2018.
- 7) 古関ほか: 道路土構造物の維持管理のための干渉SARによる変状調査 方法、地盤工学会誌、pp22-25、No.10、vol.66、2018.
- 8)野口ほか: SARを利用した地すべり土塊および道路変状の推定, 第53 回地盤工学会研究発表会, pp1113-1114, 2018.

^{地質の} 最新 技術

CIMを当たり前のものにするために

名古屋工業大学 大学院 工学研究科 秀島 栄三

CIM(Construction Information Modeling)は、コンピュータ上に建築物の3次元モデルを生成するBIM (Building Information Modeling)を、建設分野に拡張導入したものである。建設プロジェクトの計画、設計、施工、維持管理の全ての段階を通じて整備対象となる空間あるいは個々の社会基盤施設を3次元モデルとして記述することで「設計の可視化による関係者協議等の効率化」「数量算出作業の省力化」「情報化施工による施工の高度化」「維持管理の効率化」等に寄与する。国土交通省が謳う「建設業の生産性革命」に資する「i-construction」の一翼を担う。

これまでにも生産性向上に向けてCALS/ECの普及が図られ¹⁾,電子納品,電子入札などが進展したが,建設生産システム全体としての情報の共有・活用という点で課題を残した。CIMについても普及導入がなかなか進まない。建設ライフサイクルの全行程にわたって関係者間で利用されなければ意味がなく,諸々のハードルを乗り越えていく努力と工夫が必要である。

本稿では、CIMが有する機能を活用することでインフラと建築物を含む公共施設の管理(以下、公共施設マネジメントと言う)が合理化される可能性について述べる。その意味が理解されることによってCIMが当たり前のものとなることを願う。このために克服すべき課題として少なくとも次の3つが挙げられる。

- (1)構造物および地域空間に係る3次元データが現状では著しく乏しく、3次元データを生成するための2次元の設計図も紙で保管されており活用がしにくい。そこでもし3次元データが揃った場合にはCIMによって公共施設マネジメントがどのように効率化できるか考察する。
- (2)公共施設マネジメント、特に維持管理の業務の中で どのようにCIMを活用すればよいかよくわかってい ない。CIM導入による業務がどのように変化する か業務プロセスマネジメント(Business Process Reengineering, 以下BPRと呼ぶ)の手法を用いて 考察する。
- (3) 3次元データ作成のコストを誰がどれだけ負えばよいかが明らかでない。建設ライフサイクルを通じて主体間でどのように分担し合えばよいか考察する。それぞれについて以下2.3.4.で触れていく。

2.GIS型データベースを活用した施設管理

平成26年に総務省は全国の地方自治体に対して公共 施設等総合管理計画の策定を要請した。今後は、個々 の施設にとどまらず校舎の統廃合に伴う学区再編や都市のコンパクト化など地理空間上に及ぶような政策課題について関係者間で議論することが避けられない²⁾。さらに今後の人口減少や利用需要の変動を見据えた公共施設の再配置が求められている。このために新たにデータベースをつくる場合に地理的データを活用することが望ましい。最近ではコンピュータの高性能化、クラウド化により、地理情報システム(GIS)を活用したデータベースの利用可能性が高まっている。そこでGIS型データベースを利用した公共施設マネジメントについて考察する。

これまで諸施設は、個々の施設を縦に並べ、諸元を横に並べて記載する台帳によって記録されてきた。ハコモノであれば名義的な順序で並べればよい。道路など線状の施設であれば各路線をキロポストに沿って複数の区間に区切って並べる。道路等は本来的にはネットワークとして機能するものであり、そのことを考察するべき場面もある。このような場合に地理的属性を維持するGIS型のデータベースが有効となる。また、施設の種類別にデータベースを作成すると複数種類にわたっての検討や管理が難しくなる。例えば財政上の配分問題、複合施設群としての機能評価、複数種類の施設で同時に維持管理を行う方式を検討する場合などである。

このような課題に応えるべく筆者らは公共施設マネジメントに資するGISを利用したデータベースの開発を進めてきた。図-1はその基本コンセプトである。この事例では、ソフトウェア会社がサーバを管理し、建設コンサルタント会社がデータの入力、維持を行い、自治体がデータベースにアクセスして諸業務に利用するという運用形態となっている。点検結果などをもとにデータの更新、蓄積を行っていくことでより合理的な維持管理が達成できるだるう

本稿ではそのデータを一部使用して財政シミュレーションを試みる。そして従来の台帳を用いた管理とGIS型データベースを用いた管理を比較する。

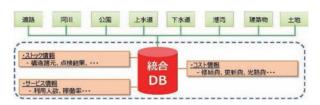


図-1 公共施設マネジメントのための統合データベース 注:焼津市,株式会社オリエンタルコンサルタンツ, 名古屋工業大学の共同研究の資料より転載

長期的にみて維持管理等にかかる費用をできるかぎり 小さくすることが望ましい。いわゆるライフサイクルコスト最小化の考え方である。具体的には、まず施設の状態を表す指標として健全度判定を用いる。健全度判定はA・B・C・Dの4段階で表し、Aが最も良い状態、Dが最も悪い状態とする。施設ごとに基本情報から重要度評価点、各年の健全度判定から緊急度評価点を算出し、それらを足し合わせて各施設の改修の優先順位をつける。シミュレーションでは、1年あたりの投資額を設定した上で、改修の優先順位が高い順に投資していく。投資した際には、その翌年に健全度判定を回復させる。更に翌年も改修の優先順位を改めて決定し、その順に投資をする。このように健全度判定と重要度から改修の優先順位を決定し、その順に投資するという流れを繰り返す。

公共建築物の管理では、健全度判定が低い施設における活動が他施設で行えるように他施設との統廃合を念頭に置く。施設の統廃合は、施設間距離や施設の統廃合後の交通状況等を総合的に考慮して決定する。施設間距離を検討する場面について図-2に一例を示す。施設の統廃合の際には改修費などの前提条件を変更して再シミュレーションを実施する。

道路は他の道路や公共建築物との間でネットワークとして機能するものである。その機能を持つ道路の管理を 始点と終点の座標のみで行うことは不可能である。焼津

43	宮島会館	34.857258	138.297366	
M	48 mt 27	10進(分秒)	表示は不可)	算出距離
No.	場所名	緯度	経度	km
34	藤守地区コミュニティ紡炎センター	34.808218	138.317762	5.751
35	下小杉地区コミュニライ紡炎センター	34.812737	138.315582	5.213
36	三区ズュニティー防災センター	34.865948	138.323231	2.554
37	坂本コミュニティー防災センター	34.892384	138.311436	4.104
38	高新田地区コミュニティ紡災センター	34.794161	138.307018	7.055
39	浜当目コミュニティー防炎センター	34.878969	138.331252	3.924
40	小川新地コミュニティー防災センター	34.858644	138.321555	2.217

図-2 台帳による検討の場面

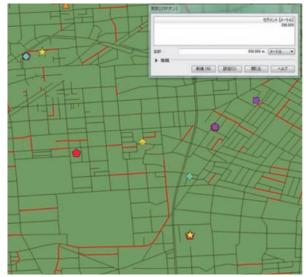


図-3 GIS上での検討場面

市のデータベースでは道路に関しては地理情報と関連づけられていないため、ここではOpen Street Map 3 を用いる。諸資料を参考に個々の道路を評価する 4 $^{\sim7}$)。

GISを用いるにしても基本的な考え方は台帳による管理と同様である。GIS上で財政シミュレーションの結果を表示することで、各地域における道路の状況がわかる。図-4にある地域の道路の状況を示す。この地域において健全度判定がDの道路は赤で、それ以外の道路は黒で示している。この地域の道路はその半数以上の健全度判定がDである。



図-4 ある地域の道路の状況



図-5 大きなネットワークとして捉えた道路網

ネットワークの観点からみると、道路は健全度判定がC 以上の道路によって格子状を保っていることが望ましい。 そのため、図-5に黄色で示した道路を大きなネットワー クとして捉え、重要度評価点を10点増して再シミュレー ションを実施することとする。

このようにして台帳を用いた場合とGIS型データベースを用いた場合の施設管理プロセスの違いについて考察する。

i)公共建築物の管理プロセスの比較

台帳を用いた検討では施設の統廃合を施設間距離から検討する。GIS上での検討では、GIS上に公共建築物及び道路を明示し、施設の統廃合を施設間距離及び統廃合後の交通状況から検討できる。すなわちGISを用いれば施設統廃合後の交通を考慮した検討ができる。

ii) 道路の管理プロセスの比較

GIS上での道路の検討は, 道路を周辺にある道路や公共建築物との関係という観点で捉え, 重要度評価点を上げるなどの対応措置を講じることができる。 つまり, 道路のネットワーク機能を向上させることができる。

3.自治体における施設維持管理の業務プロセスリエンジニアリング

本章では、道路橋の維持管理を事例として取り上げ、点検から診断、措置、記録のメンテナンスサイクルを対象に某自治体の土木部門に繰り返して行ったヒアリング調査を通じて、現状の業務プロセスのモデリング⁸⁾⁹⁾を行う。CIMを導入することで生じる利点と欠点を踏まえ、モデル化した業務プロセスをもとにCIM導入後のプロセスの再構成を行い、その有効性について検討する。

対象構造物を道路橋とし、維持管理業務は点検、診断、措置、記録のメンテナンスサイクルとする。道路橋の管理者である自治体職員と、損傷の補修を実施する業者にヒアリング調査を行い、維持管理の業務プロセスのモデル化を行った。業務は点検の種類によって定期点検、通常点検、中間点検、巡視員点検、異常時点検、詳細調査、追加調査の7種類に分けられる。点検後の措置に含まれる補修工事については、ヒアリングより全てで共通とした。

定期点検は請負業者が決定次第,建設課と請負業者で初回打ち合わせを行う。ここでは点検計画の調整を行い、その後決定事項を土木事務所に報告する2度目の打ち合わせを行う。必要であれば土木事務所が警察協議等で交通規制を決定する。請負業者が点検を行い、作業完了後建設課と業者で健全度の検討を行う(3度目の打ち合わせ)。請負業者が成果品を作成し、建設課がこれを確認したのち、4回目の打ち合わせとして土木事務所に成果品の説明や、補修の必要性の検討及び業者から措置に関する提案等を話し合う機会が設けられている。

ヒアリング調査よりモデル化した現在の業務プロセス (図-6)をもとにCIMを導入した場合を想定した業務プ ロセスの検討を行った。図-7でCIMを導入した際の定期 点検の業務フローをモデル化したアクティビティ図の一 部を示す。図-6と図-7の相違点は、一つ目にはCIM導入 による点検方法自体の変化がある。ドローン等での3次 元データの取得などによって点検作業の機械化が進み, 請負業者が点検を行う際に実施する交通規制が緩和さ れると、警察協議等が不要となる。二つ目に、点検業務終 了後に請負業者が作成する成果品は紙媒体とCDで納品 されているが、CIM導入によりデータベース上での一元 的な管理が実現すれば、これが電子納品のみになりうる。 ただしPCの精度の問題もあり、すべての成果品を電子 データに完全に移行できていないのが実状である。図-8 と図-9は、中間点検業務に於けるCIM導入前後のプロセ スの相違を示している。

ヒアリングによれば、定期点検では計4回の打合せがあるとのことで、直接出向く手間を省くためにメール等でのやり取りが予想されたが、関係者間の面会は必要であるとの見解が示された。TV電話で相手の顔が見える形であれば好ましいという意見も出た。技術が進む中にもフェーストゥフェースコミュニケーションの必要性がある

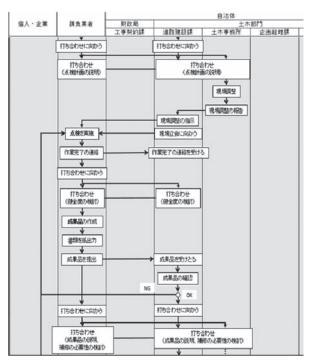


図-6 定期点検のアクティビティ図

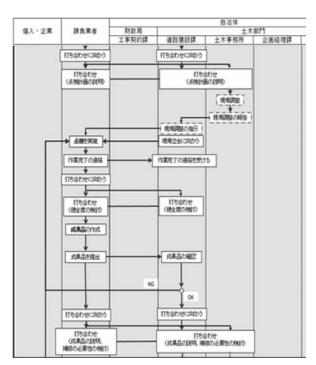


図-7 CIMの導入を想定した定期点検のアクティビティ図

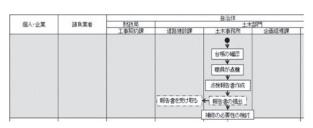


図-8 中間点検のアクティビティ図

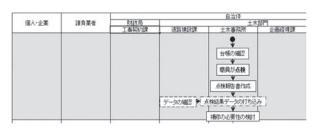


図-9 CIM導入を想定した中間点検のアクティビティ図

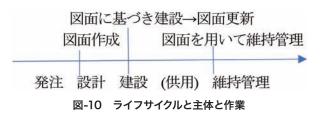
という認識を確認できた。また請負業者が建設課との初回打ち合わせの後に作成する施工計画書のデータベース化も考えたが、ミスとその訂正が生じる可能性が高く、かえって面倒になるのではとの見解が示された。

4.3次元データ生成の主体間負担配分

これまでも自治体はインフラの維持管理を行ってきて いるが、いくつかの点で非効率的であった。一つには経 済性から見た検証および計画が十分とはいえなかった。 また一つには管理台帳が継続的な維持管理に適合する ように作られてこなかった。紙書類が倉庫に蓄積される 状態では、既往のデータの活用はおぼつかない。維持管 理の重要性が言われるようになり、施設台帳等のデータ の電子化は急務となっている10)11)。そこでCIMを活用 し、設計や施工の段階で生成されたデータを維持管理に おいても利用できることが理想的であるといえる。しかし、 現実的問題として設計図は2次元で作成されてきており、 維持管理で3次元データが求められるとすると、3次元化 の作業を誰が担うかという問題が生じる。また、建設ラ イフサイクルを通じて要求されるデータの詳細度(LOD: Level of description) は異なる¹²⁾。よって基本的には 詳細度が高い段階に合わせなければライフサイクルを通 じて互換しないものとなる。こうした条件を満たしつつ最 終的に3次元データを安価に得るために主体間で作業経 費や作業量など異なる種類の負担を適切に配分しあうこ とが考えられる。これをゲーム論的な問題として捉えつ つ. 建設ライフサイクル上の実際的な諸条件に沿って合 意可能な配分ルールを求める。

建設ライフサイクルに関与する主体は、関与する時間順に大まかに発注者、設計者、施工者、管理者に分けられる。3次元データの作成、保存、運用といった作業が必要である。その作業量を貨幣換算し、データの作成、保存、運用に係る総作業量は金額で表示できるものとする。総額を発注者、設計者、施工者、管理者といった主体間で配分する問題として問題を定義することができよう。以上を整理すると図-10のようになる。

3次元データをさほど必要としない主体にとっては多く 負担することは非合理である。特に設計者にとってはわ ざわざ費用をかけて3次元化する動機を持たない。また、 要求されるデータの詳細度LODは段階において異なる。 基本的には詳細度が高い段階に合わせなければ互換し



ない。特に設計段階より建設段階はレベルが低くてよい。そうなると施工者は3次元化を拒まないにしても詳細化を図る動機は小さい。また、各主体は同時に交渉の場に立たないこととなる。しかし他の主体が代理的に負担額を受け入れ、当該主体に後になって分担を負わせるという余地はある。また、実時間を考慮して分担金が目減りすることをも含めて配分計算を行うという考え方も可能である。以上を考慮して配分原則を検討する必要がある。

土木構造物のライフサイクルが上流から下流にかけて、設計、施工、維持管理の3つの工程からなるとする。それぞれの工程に携わる主体 P_i (設計者)、 P_2 (施工者)、 P_3 (管理者)をゲームのプレイヤーとみなす。設計の前段階で建設予定地の地質調査や測量等を上記以外の主体が行うことがあるが、簡単のためここでは P_i が設計以前の業務はすべて担うと考える。これら3主体は同一の発注者から別々に業務を受注し、適切に連携を図りながら事業を進めるものとする。技術や情報が工程全体で十分に共有され、下流の知見を上流に取り入れることで全体最適が図られていることを想定する。例えば、設計段階で施工者の知見も反映することで施工性や景観、施設利用の快適性を向上させることができる。

3次元モデルは計画、調査、設計段階から導入され、その後の施工、維持管理の各段階を含む事業全体にわたる関係者間で共有されることがCIM導入の前提となっている。発注者はCIMを活用しない従来通りの金額で各業務を発注し、CIMを活用することによって削減された費用は受注者の利益となるとし、この費用削減効果を本モデルにおける便益と設定する。特性関数を式(1)で定義し、各提携の便益を算出する。

$$v(S) = VE(S) + VR(S) - CM \tag{1}$$

ここに、VE(S): CIM活用による業務効率化効果(円), VR(S): CIM活用による各主体間引継ぎ効率化効果(円), CM: 3次元モデル作成費(円)である。

3次元モデルを使用することにより業務がどれだけ効率化されるかは、設計、施工、維持管理の各工程により異なる。また、一般に使用するモデルの詳細度が上がるにつれて、有用性が高くなると考えられている。そこで、VE は各主体が担う工程の種類、及び使用するモデルの詳細度によって値が変化するとし、各提携の業務効率化効果を式(2)で定義する。例えば $VE_{IDD}(\{1\})$ は、設計者のみの個人提携がLOD100の3次元モデルを使用したときの

業務効率化効果を表す。

$$VE(S) = \sum_{i} VE_{i}(\{i\})$$
 (2)

ここに、/:モデルの詳細度、i:業務を担う主体である。 異なる工程間で発生する業務の引継ぎ作業もCIMを 用いることで効率化される。引継ぎはライフサイクルの 上流を担う主体から下流を担う主体に行われるが、効率 化の効果は引継ぎに関係する主体の組み合わせによって 異なる。そのため各主体間引継ぎ効率化効果VRは、設 計者から施工者,施工者から管理者,設計者から管理者 の3組のパターンを考える。各提携の引継ぎ効率化効果 は式(3)で定義する。例えばVR({1,2})は, 設計者と施 工者間で引継ぎを行うときの効率化効果を表す。特性パ ラメータ α は、引継ぎ主体間でのモデル共有の有無、エ 程での順番が連続か否かによって変化する。連続の定義 については、設計者・施工者間、施工者・管理者間が連続 であり、設計者・管理者間が連続ではない。 α は表-1の ように設定する。「モデルの共有」下段の○は共有あり、 ×は共有なしを表し、「工程の連続」下段の〇は連続であ る、×は連続ではないことを表す。主体間でモデルを共 有した場合. 各主体が別々に作成したモデルを用いる場 合より引継ぎ効率化効果が大きい。同じ詳細度であって も部材の属性情報を付与する方法や表記の仕方など細 かな差が生じ、引継ぎにかかる時間が増加するからであ る。また工程が連続している方が効率化効果は大きい。

$$VR(S) = \sum_{i,j} VR(\{i,j\}) \times \alpha \times n \tag{3}$$

ここに, i, j: 引継ぎを行う主体, n: 提携に含まれる引継ぎを行う主体数である。

一般に3次元モデル作成にかかる費用は、モデルの詳細度が高くなるほど増加する。板倉ら¹²⁾はこの費用を、モデル作成にかかる人件費とモデル作成にかかる時間を掛けたものと考え、作成にかかる時間を測定することで費用を求めた。測定された時間は、詳細度が高くなるほど増加していた。この考えに則り、モデル作成費はモデルの詳細度にのみ依存し、*CM*の右下に詳細度を添字として付与する。

以上を踏まえて、各種パラメータに具体的な数値を与えた場合のゲーム理論の解(コア、仁、シャープレイ値)を求める。図-11に一般的なゲームのコアと解を図示する。

表-1 αの値

モデルの共有	工程の連続	α
0	0	1
0	×	0.25
×	0	0.5
×	×	0

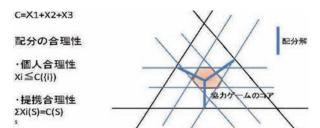


図-11 3人ゲームの解とコア

表-2 各パラメータの設定(CASE1~4)

$VE_{300}(\{1\})$	$VE_{200}(\{1\})$	$VE_{300}(\{2\})$	$VE_{300}({3})$	VR({2,3})	VR({1,3})	CM300	CM200
28000	16000	21600	35000	800	400	20000	4000

単位は万円

表-3 配分便益(CASE5)

		コア	S	仁	シャープレイ値
1	22000	~	26200	24100	24767
2	1600	~	21600	12550	12267
3	15000	~	35200	26150	25767

単位は万円

維持管理を担う主体も、設計者、施工者の2パターンがある。同一主体間で引継ぎを行う場合は、異なる主体間で行う場合より効率化効果が大きくなると考えられる。式(3)の α は異なる主体間で引継ぎを行う場合は0とする条件を新たに加える。上記4ケースで用いるパラメータを表-2に示す。さらにCIMの詳細度を施工段階で上げ、維持管理を設計者が担うケースを標準としてパラメータを変化させた場合に配分便益がどれだけ変化するかについて比較する。

ゲーム解の一般的な解釈として、全ての主体にとって 合意できる配分解が求められる場合もあれば、一部の主 体は合意できない配分解となる場合もある。コアは全て の主体が合意可能な範囲にその配分解があることを意 味する。もしもこの範囲に入らない場合は、合意可能な 主体が合意できない主体の負担をカバーすることでコア の範囲内に移動し、配分を成立させることができる場合 もある。諸パラメータが変化することにより、コアが変形 し、また仁やシャープレイ値などの解が移動する。ゲーム 解は、仁、シャープレイ値というように唯一の考え方が支 持されるものではないため、実際に適用する上では、コア が広いことが、主体間の交渉をより安定させるという意味 で、望ましいと言える。

紙幅の都合により詳細は割愛するが、このようにして構築した数理モデルでは、プレイヤーとして発注者を含めていない。発注者が支払う金額を受注者が受け取る構造であるため、発注者をプレイヤーとすることはできない。

発注者の存在を考慮した場合、CIM導入時の費用分担問題にどのような影響を与えるか考察する。平成29年

度現在, 国土交通省はCIMの実施方針として, 発注者指 定型, 受注者希望型の2つのタイプを設けている13)。前 者は、発注者が受注者に対して要求項目を設定し、CIM 活用による業務効率化の検討を行う。後者は、これまで の試行事業で効果が認められたフロントローディングが 期待できる業務や、関係者協議において実施するとされ ている¹¹⁾。発注者指定型ではCIM活用の充実に向けた 検討を目的としているため、受注者に対する要求項目に 「CIM導入ガイドライン」に準拠することが含まれるはず である。本ガイドラインでは、計画、調査、設計段階から 3次元モデルを導入し、その後の施工、維持管理の各段 階の各段階においても3次元モデルに連携・発展させ、併 せて事業全体にわたる関係者間で情報を共有するとされ ている。そのため、各工程を担う主体間で全提携が形成 される可能性が高い。ただCIM活用の範囲については、 本ガイドラインで示された業務以外にも導入効果が期待 される業務への試行的活用が行われる可能性がある。そ のような場合, 各提携の便益, すなわち特性関数の算出 は、参考とする前例が少なく、数値の正確性を担保するこ とが難しい。

受注者希望型では、受注者は発注者からCIMの導入を要求されず、総合評価においてCIM活用が成績評価で加点されるにとどまる。そのため、受注者はCIM導入によりどれだけ事業費を抑えることができるかに注目する。CIMは建設ライフサイクルの上流からの導入が想定されているため、設計段階でCIMが導入されなければ下流で活用される可能性は低くなる。反対に設計段階で導入されれば、3次元モデルがライフサイクル全体で共有され、全提携が形成される。

5.おわりに

公共施設マネジメントにCIMを導入することがその効率化をもたらすことはほぼ疑いがない。問題は、導入を阻む幾多のハードルである。本稿ではそうしたハードルを下げるためにまず、GIS型データベースを活用することで期待される効果を示した。次にCIM導入により業務プロセスがどのように変化するか考察した。そしてデータ作成コストの分担のあり方について考察した。今後も研究と実践の両面からCIMの普及定着に臨んでいきたい。

謝辞

本稿には焼津市,株式会社オリエンタルコンサルタン ツとの共同研究,一般財団法人日本建設情報総合セン ターによる助成を受けた研究の成果を含んでいる。記し て謝意を表する。

参考文献

- 1)JACIC:CALS/ECとは?
- http://www.cals.jacic.or.jp/calsec/ 2017.12.29 現在.
- 2)日本計画行政学会:特集:人口減少局面の公共施設・インフラマネジメントの諸相,計画行政 第39巻,第2号,日本計画行政学会,2016.
- 3) Open Street Map Japanホームページ, https://openstreetmap.jp/, 2017.01.04.現在.
- 4)国土交通省:道路の標準幅員に関する基準(案)について、 http://www.mlit.go.jp/road/sign/kijyun/pdf/19750715 hyoujunnhukuinn.pdf, 2017.12.25.現在.
- 5)狭あい道路とまちづくり研究会:狭あい道路とまちづくり、地域科学研究会,1996.
- 6)焼津市ホームページ,
 - https://www.city.yaizu.lg.jp/index.html, 2017.01.04.現在.
- 7)政府統計の総合窓口(e-Stat),
 - https://www.e-stat.go.jp/,2017.01.04.現在.
- 8) 児玉公信: UMLモデリングの本質 良いモデルを作るための知識と実践, 日経BP社, 2004.
- 9) 窪田寛之: コンサルタントになる人の初めての業務分析, ソフトバンクク リエイティブ, 2004.
- 10) 一般社団法人日本建設業連合会:建設業界ハンドブック 2017.
- 11)国土交通省CIM導入推進委員会:CIM導入ガイドライン(案), 2017.
- 12) 板倉崇理, 矢吹信喜, 福田知弘, 道川隆士:維持管理のための橋梁3 次元プロダクトモデルの最適詳細度に関する基礎的検討, 土木学会論 文集F3, Vol.70, No.2, I_42-I_49, 2014.
- 13)国土交通省:公共工事の入札契約方式の適用に関するガイドライン 【本編】, 2015.

世質の 最新 技術

宇宙線ミュー粒子による空洞探査

川崎地質株式会社 戦略企画本部 技術企画部 鈴木 敬一・草茅 太郎

1.はじめに

宇宙線ミュー粒子を利用した非破壊探査がにわかに注目を集めている。この技術を使って、ピラミッドで未知の空間と推定される低密度の領域が見つかったからである。NHKの番組として放映されたため、ご存知の方もいるだろう。権威ある科学誌であるNatureにも論文が掲載された1)。

筆者らは土木物理探査として宇宙線ミュー粒子を利用 するためにこれまで研究を重ねてきた。本稿では宇宙線 ミュー粒子とそれを利用した探査技術の歴史を振り返り ながら、これまでの適用事例や将来展望を示してみたい。

2.宇宙線ミュー粒子

ミュー粒子は、素粒子の一種であり、素粒子は物質を 構成する最小単位である。電子は最もなじみのある素粒 子であるが、ミュー粒子は電子の兄弟のようなものであ り、レプトンという素粒子群のひとつである。

電力供給や通信に必要な電子がなければ、現代社会は成り立たない状況にある。しかし、ミュー粒子は電子ほどなじみがなく、特になくてもよさそうである。物質を構成する原子は、クオークとそれを結びつけているボゾンという素粒子群と、原子核の周りにある電子があれば良さそうなものである。しかし、存在する以上は何か存在する理由があるはずで、それについては宇宙の起源にまでさかのぼるような、先端的な研究の成果を待つ必要がある。

素粒子の説明については文献²⁾に比較的詳しく書いたので、ここではこれ以上は示さない。ミュー粒子は英語ではmuonと綴るため「ミューオン」あるいは「ミュオン」と表記される場合もあるが、同じものを指している。

ところで宇宙線とわざわざ接頭語のようについているが、これは宇宙からやってくる高エネルギーの陽子や原子核などの宇宙線が大気中の原子と相互作用して生じるためである。

生成されるミュー粒子は非常に高エネルギーであるため、物質中の透過力が非常に高い。純粋な水であれば数キロメートルの距離を十分に透過することができる³⁾。さらに物質と適度に相互作用するため、ニュートリノのように巨大な検出器も必要としない。

宇宙線ミュー粒子は、常にランダムに大気の最上部で発生し、地表に到達している。平均して10センチメートル平方あたり1秒間に1個の割合、すなわち手のひらに毎秒1個程度のミュー粒子が通過していることになる。

単位面積、単位時間、単位立体角あたりのミュー粒子

の数をフラックスという。このフラックスを精度よく計測 することが宇宙線ミュー粒子探査のキモとなる。

宇宙線ミュー粒子フラックスは、鉛直方向が最も大きく、鉛直から水平に近づくにつれて減少し、水平方向では鉛直の100分の1以下となる。鉛直を基準とした角度のことを天頂角という。宇宙線ミュー粒子フラックスは、天頂角にも依存し、その依存性についても既知である。

3.宇宙線ミュー粒子の検出方法と探査原理

荷電粒子や放射線が通過すると光を放出する物質がある。光を放出する現象をシンチレーション、その物質をシンチレータという。宇宙線ミュー粒子も荷電粒子であるため、シンチレータを利用して検出することができる。フラックスを求めるには検出器で計数された数を、検出器の大きさによって決まる面積と立体角および計測時間で割ることによって求めることができる。

宇宙線ミュー粒子は物質中を進むうちに徐々にエネルギーを損失し、電子とニュートリノに崩壊する。透過する距離が長くなればなるほど損失エネルギーが増え、フラックスは徐々に減少する。透過距離が同じでも経路に沿った平均密度が大きい場合は、物質との相互作用が増えるためフラックスは減少する。

このことはX線によるレントゲンと同じ考え方である。 皮膚や筋肉と、骨とを比較すると骨の方の密度が大きいためX線フラックスが減る。レントゲン写真ではフラックスの小さいところを白く表示し、骨を可視化することができる。 内臓や筋肉は密度の差がないため、胃や食道を可視化するためには密度の高い硫酸バリウムを口から流し込んで、密度の違いをつけてからその形を映し、内臓の形状などを把握することができる。

宇宙線ミュー粒子を利用してレントゲン写真と同じような画像を得るには、宇宙線ミュー粒子が鉛直方向で最も大きいことを考えると、地表に検出器を設置しても何も見ることはできない。地下に検出器を設置することにより、その上部の地盤や構造物の密度を計測することができる。

4.研究の歴史

冒頭で宇宙線ミュー粒子探査が注目されていると書いたが、意外に歴史は古い。1955年には鉱山でミュー粒子を測定し、岩盤と鉱床の密度差を検出することが試みられた⁴⁾。筆者らが知る限りこれが最も古い報告である。1970年にはノーベル賞物理学者のAlvarezらによるエジプトの大ピラミッドでの試みが有名である⁵⁾。その

後,鉱床を対象とした数値実験などの論文が発表されたが、目立った報告はなかった。1995年には火山を対象としたミューオンラジオグラフィ⁶⁾が行われ、このころから急激に認知度を増してくる。ラジオグラフィとは放射線を用いた画像化技術ことのであり、X線レントゲン写真も同じである。ミュー粒子というと粒々のようなもののように思われるが、素粒子と放射線は物理的には区別ができないものである。ミュー粒子を使ったラジオグラフィをミューオンラジオグラフィ(Muon radiography)、最近ではミューオグラフィ(Muography)という言い方も徐々に定着しつつある。

ミューオンラジオグラフィは火山の内部構造, 例えば 火道の位置や, マグマや火山ガスなどの低密度の物質を 探査することが目的に研究された。しかし, それ以前に当 時工業技術院名古屋工業技術試験所の湊進博士によっ て, 大型の構造物などを対象にした非破壊探査が1980 年代後半には行われていた。一般的にはあまり広く知ら れていないので本稿では特筆すべきものとして次章でい くつかの例を示したい。

5.全方位計測による構造物非破壊探査

宇宙線ミュー粒子は、天頂角分布を有するが、あらゆる 方向から到来するため、ひとつの検出器で計測すると検 出器を設置した場所より上の部分の平均密度しかわから ない。ただし、非常に簡単に計測を行うことができ、実用 的である。

図-17)では名古屋城の各階で計測し、幾何学的に単純な形状に置き換えて、平均密度を計算し、その上に計測値を載せている。単位はフラックスではなく、放射線の単位時間当たりの量を示す線量率になっているが、本質的にはフラックスと同等である。4階から5階に上がると平均密度が0.5g/cm³から0.3g/cm³に急激に減少し、7階

になるとさらに減少する。これは上に行くに従って、物質 が少なくなっているためであり、名古屋城の構造を反映し たものである。

図-28)は名古屋国際センターの各階で計測したものであり、こちらはどの階で計測しても同じような密度が得られている。

大変興味深いのは図-3⁹に示す市営地下鉄の各駅で計測した結果であり、宇宙線ミュー粒子の線量率が地下鉄の深さを見事に表している。東山線は最初に作られたため浅く、新しいものほど深くなっていることが見て取れる。実際に名古屋市営地下鉄の歴史を調べてみると、東山線、名城線(環状になる前)、名港線、鶴舞線、桜通線の順になっている(上飯田線はこのときはまだない)。東山線の右側の方では急激に線量率が増加し、一定値に落ち着いている。これは上社駅の手前で地下鉄が地表に顔を出し、藤が丘駅までほぼ同じ高さを走っているためである。

筆者もこれを見て東京の地下鉄で計測してみた。その結果が、図-4である¹⁰⁾。白抜きが名古屋、赤丸が東京である。名古屋市営地下鉄と併せてあるが、深さと大変良い相関性があることがわかる。東京の場合、名古屋より深い駅(大江戸線六本木駅など)があるが、名古屋での値の延長線上にあることがわかる。

他にも真宗大谷派名古屋別院(通称「お東さん」)の山門で計測した事例¹¹⁾なども報告されていて大変興味深い。

文献¹¹⁾では、宇宙線ミュー粒子フラックスと面密度(深さと平均密度を掛け合わせた量)との関係を示す実験式も提案されている。深さは図面や測量などにより知ることができるので、ミュー粒子フラックスから面密度を求めて、深さで割ることにより、密度を求めることができる。他に文献¹²⁾には大深度の場合のミュー粒子フラックスと面密度との関係を示す式が提案されている。

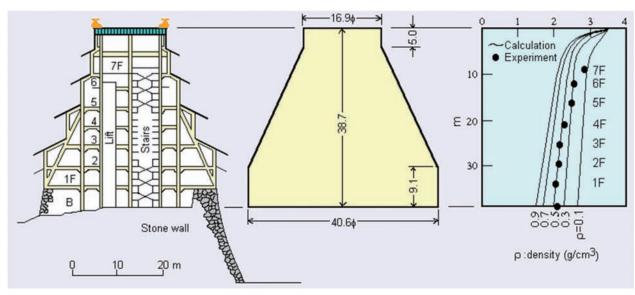


図-1 宇宙線ミュー粒子によって計測された名古屋城の鉛直方向のかさ密度分布

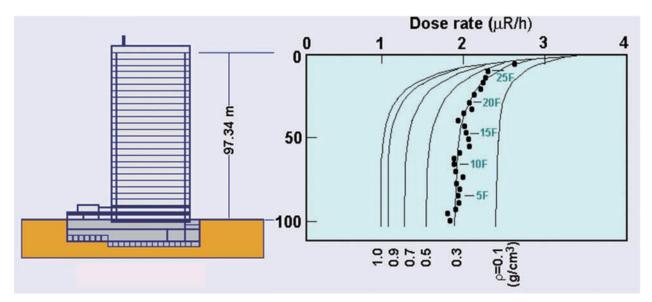


図-2 宇宙線ミュー粒子によって計測された名古屋国際センタービルの鉛直方向かさ密度分布

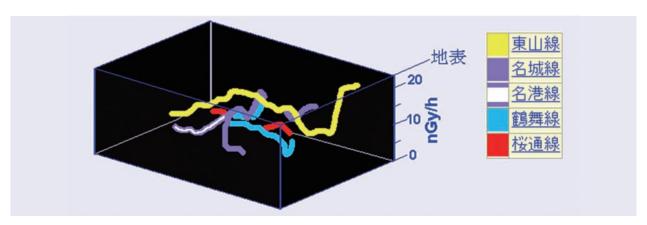


図-3 名古屋市営地下鉄各駅での宇宙線ミュー粒子強度

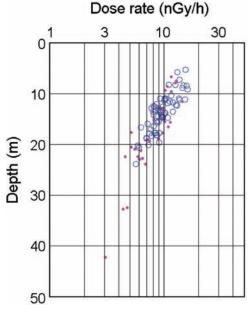


図-4 名古屋と東京での地下鉄駅での計測結果

6.同時計数法による非破壊探査

全方位の計測は、迅速に測定できるという利点がある 反面、到来方向がわからないので密度の異常値がどこに あるかの判断が難しい。そのためミュー粒子の到来方向 を知るために複数の検出器を用いて、同時に複数の検出器を通過したミュー粒子を計数することにより到来方向 を知ることができる。図-5に検出器の例を示す。上部に 検出器(主検出器)があり、その下に5台の検出器(副検出器)を配置している。前者は球形、後者は円筒形である。主検出器と副検出器を同時に通過したミュー粒子だけを 測定すれば、副検出器上の点から主検出器を見上げた 円錐形の範囲(立体角)から到来したミュー粒子であることがわかる。ふたつの検出器を同時に通過したミュー粒子を計数するため、同時計数法という。図-5の検出器は 5方向から到来したミュー粒子を一度に計数できるため、マルチ計測器と呼んでいる。

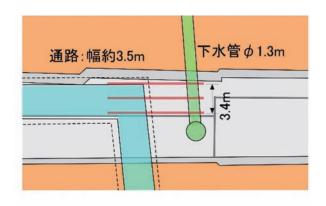


図-5 ミュー粒子マルチ計測器

このマルチ計測器を用いて三次元トモグラフィを試みた。図-6に実験を行った場所の平面図と断面図を示す。通路と書かれた灰色の部分が地下の構造物(主に鉄筋コンクリート)であり、茶色い部分が地盤である。水色のところは通路としての空間があり、途中で屈曲している。緑色は下水管(雨水)である。平面図上の赤い線が後述する3本の測線である。断面図を参照すると、鉄筋コンクリート構造物上面から地表までの深さは11.1m、幅は約3.5m、下水管の直径は1.3m、水色の通路の高さは2.8mである。

水色の部分の通路と下水管を空洞と見立てて、その下 の通路で計測を行った。

初めに示すのは、中央の測線において、測線方向とは 直交する方向にマルチ計測器を配置し、これを1m間隔 で移動して計測した結果を示す。図-7は1地点あたりの 測定の方向を示したものである。マルチ計測器は、1回で 5方向を同時に計測できるが、各検出器間の角度を変え



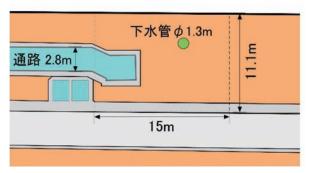


図-6 実験場の平面図(上)と断面図(下)

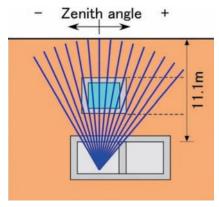


図-7 実験場の直交方向の断面図

ることはできない。しかし、計測器全体の角度を変えることができるので、このような計測が可能である。

図-8はこの方法で取得された結果である。計測で得られたミュー粒子フラックスを湊の式を用いて面密度に変換し、これを土被り11.1mで除して平均密度を求めた。これによると図-6や図-7で水色に見えていた通路は、その部分が見かけ密度1.4g/cm³以下の低密度としてあらわれている。図-8の右側にはマンホールと下水管に相当する低密度領域も認められる。画像の上下には周囲の建物の影が映りこんでいて、通路の屈曲部に重なり合っている。

次に三次元トモグラフィを行うために、検出器の並んでいる方向を測線と同じ方向にして、1地点あたり15方向、これを0から12mまで1m間隔で13地点を計測した(図-9)。これを平行に3測線計測し、三次元トモグラフィの

解析を行った¹³⁾。その結果が図-10である。密度の低い部分は透明で表示した。水色の通路部分と埋設管が明瞭に低密度として取られている。地盤の平均密度は1.6g/cm³程度と解析されているが、周囲のボーリングデータと比べても調和的である¹⁴⁾。

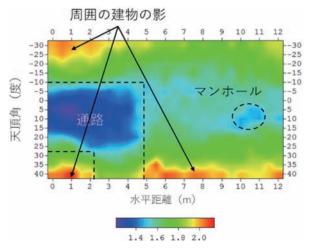


図-8 マルチ計測器による可視化結果

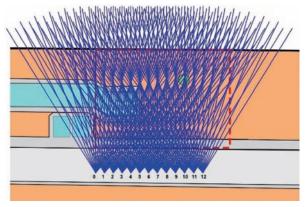


図-9 三次元トモグラフィのための波線図

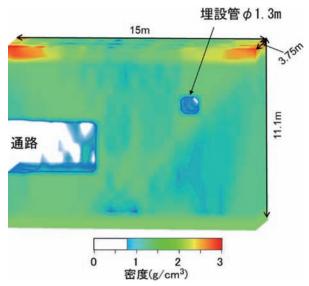


図-10 三次元トモグラフィ解析による密度分布図

7.宇宙線ミュー粒子フラックスの特性

宇宙線ミュー粒子は到来するフラックスはほぼ一定であることは既に述べた通りである。フラックスを増やすことはできないか、という質問を受けることが多い。人工的に発生させればよいのではないか、ということである。答えを先に示すと「現実的にできない」である。

探査に利用する宇宙線ミュー粒子のエネルギーレベルはGeV(ギガエレクトロンボルト)からTeV(テラエレクトロンボルト)という非常に高エネルギーの領域である。このレベルの高エネルギー素粒子を生成するには、例えば欧州原子核研究機構(通称CERN)にある大型ハドロン衝突型加速器(LHC)のような装置が必要である(ハドロンとはこの場合は陽子を指す)。陽子のような粒子同士を衝突させて、ミュー粒子を発生させることは可能である。

しかし、これがどれくらい現実的でないかというと、CERNのLHCでは山手線1周分に等しいといわれるほどの大型の装置である。これを任意の場所に設置して探査のために稼働させるなどそもそもできない。さらに陽子のような素粒子でない複合粒子(陽子はクオーク3個から構成される)を衝突させると、所望する素粒子以外にも様々な素粒子が生成され、これらがノイズになり、ミュー粒子だけを選別することが難しくなる。

ミュー粒子フラックスを計測する場合,検出器を大きくすればするほど短時間で正確な値を得ることができる。しかし、宇宙線ミュー粒子は水平より下向きの角度からはほとんど到来しないため、対象物の水平延長方向よりよりも下に検出器を設置しなければならない。特に地下の空間に設置する場所は、空間が限られることが多い、従って、設置する場所と対象物および深さに応じて検出器を設計する必要がある。

検出器間の面積と距離も重要である。同時計数法の場合、検出器の面積を増やせば増やすほど、ミュー粒子フラックスを正確に求める時間が少なくなる。検出器間の距離を増やせば増やすほど、立体角が小さくなり、空間的な分解能は向上する。さらに、同じ検出器を用いた場合でも、探査対象の平均密度や土被りによって計測時間が異なる。

ミュー粒子はランダムに発生することが知られている。例えば、1個のミュー粒子を計測したからといって、地盤の密度の情報が得られるわけではない。ミュー粒子のフラックスには統計的な誤差が含まれている。これは計数した数によって異なり、計数した数が多いほどフラックスの誤差は少なくなる。従って、計数する時間を増やせば、それだけ誤差は少なくなるが、探査にかけられる時間にも限りがあることが多いため、最適な計測時間をあらかじめ計算しておく必要がある。

宇宙線ミュー粒子を利用して地盤探査や空洞探査を行うには、検出器の設置できる空間の大きさ・必要とする分解能・土被り・平均密度・計測にかけることができる

時間,などパラメータの数が多いため,探査の目的・対象物・設置空間の大きさ,概略の密度差などに応じて,検出器や計測時間を最適化する必要がある。場合によっては,目的や対象に合わせた検出器を製作する必要がある。

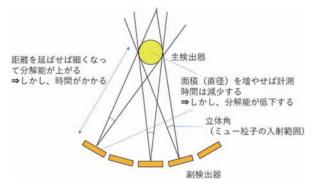


図11 立体角・検出器間距離・断面積の関係

8.原子核乾板によるラジオグラフィ

冒頭で述べたピラミッドの探査は、名古屋大学により 原子核乾板を用いて行われたものである。

原子核乾板は、素粒子の飛跡を検出し、可視化することができる特殊な写真フィルムである。健康診断の胸部 X線撮影でおなじみのレントゲン乾板と原理的には同じである(X線はエネルギーの低い光子という素粒子と等価である)。

ハロゲン化銀の粒子を混ぜた乳剤をプラスチック製の 薄い板(昔はガラス板を用いた)に塗って, 乾かすので乾 板という(湿板というのもかつては存在した)。

この乾板にミュー粒子など、高エネルギーの素粒子が 通過するとハロゲン化銀粒子が黒く変色する(図-12)。 これを現像して定着させて、その飛跡を顕微鏡レベルの スキャナで読みとって、濃淡として画像を得ることができる (図-13)。図-14は飛跡の例である¹⁶⁾。

岐阜県や愛知県などの一部地域では戦時中を中心に 採掘された亜炭廃坑が問題となっている15)。これらを弾 性波探査や電気探査あるいは地中レーダなど物理探査 を利用して探査することは非常に難しい。その理由はふ たつある。ひとつは廃坑が三次元的に複雑で、二次元を 前提にした物理探査では限界がある(二次元とは測線直 下の構造が、その垂直方向に変化しないこと)。 三次元 物理探査も原理的には可能であるが、道路や住宅地など では測線を効率よく配置できない、調査費用が高額であ るなどの理由により、適用されることがほとんどない。も うひとつの理由は、弾性波や電気探査の場合には、空洞 と周囲の地盤との物性のコントラストがないことである。 採掘を終えた廃坑は、水没していることが多く、水没した 空洞は周囲の亜炭層や堆積岩層と物性があまり違わな いと考えられる。地中レーダなどでは、亜炭層とそれを含 む堆積岩層の電磁波の減衰が大きく、十分な探査可能な

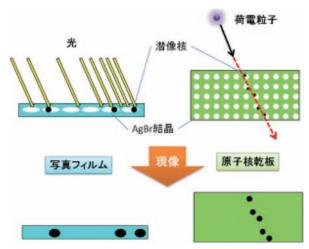


図-12 原子核乾板の原理

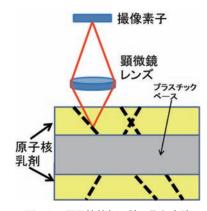


図-13 原子核乾板の読み取り方法

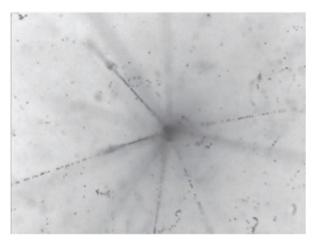


図-14 原子核乾板の飛跡読み取り例

深さを確保できない、など原理的な限界がある。

そこで宇宙線ミュー粒子を原子核乾板でとらえて空洞 を探査できないか検討してみた¹⁷⁾。

図-15はシミュレーションに使用した密度数値モデルである。土被り20m,深さ10mのところに1m³の空洞があった場合を考える。ここに原子核乾板を設置し、フラックスを求めると図-16のようになる。同図の中央にフラックスの大きい領域が認められ、これが空洞に相当する。

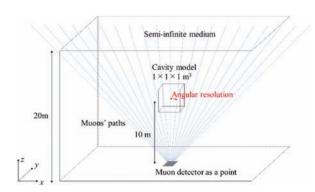


図-15 亜炭廃坑を想定した密度数値モデル

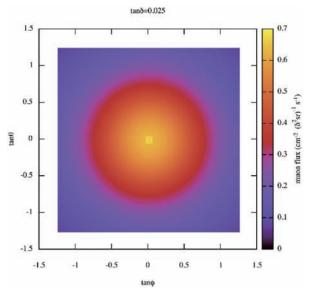


図-16 亜炭廃坑をモデルにした数値シミュレーション結果

もちろんこの結果は理想的な場合を計算したものであり、実際にはノイズや地形の影響など様々な要因が想定されるため、このような鮮明な画像を得ることは難しいが、原理的には空洞の検出が可能であるといえる。

次に、栃木県宇都宮市の大谷石採取場跡地で、シンチレータ方式と原子核乾板とを同じ場所で計測して比較した実験の結果を示す¹⁸⁾。実験を行った場所の平面図と断面図を図-17、図-18にそれぞれ示す。

対象とした空洞は図-17に示すようにA, B, Cの3つの空洞である。赤線は測線である。図-18の断面図を参照すると、空洞は断面形状がかまぼこ型で、幅4m, 高さ3m程度である。その下に計測を実施した大型空洞がある。土被りは30mから50m程度である。

地形が比較的複雑であり、これらの補正をする必要がある。現在はDEMのデータが比較的簡便に入手できるのでそれを用いた。

図-19に原子核乾板とシンチレータ方式の異なる方法で計測された結果を示す。計算には三宅の式を用いている。ふたつの方式でのミュー粒子フラックスの計測結果と、地形に基づいて求めた理論ミュー粒子フラックスを示している。大谷石の平均密度は乾燥していると仮定し、一

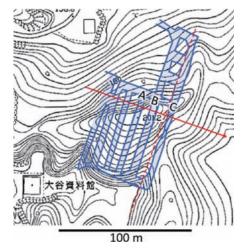


図-17 大谷石採石場跡地の測線平面図

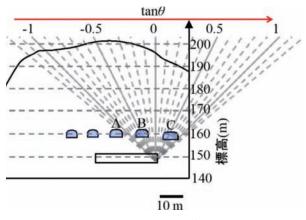


図-18 大谷石採石場跡地の測線平面図断面図

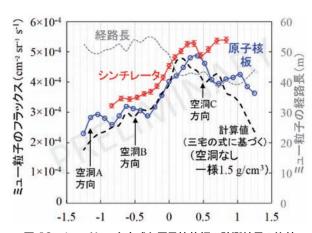


図-19 シンチレータ方式と原子核乾板の計測結果の比較

様な密度1.5g/cm³を与えた。

空洞C方向については原子核乾板・シンチレータ方式いずれでも同じようにフラックスが大きくなっており、定性的には空洞の影響が見られる。空洞B方向については、シンチレータ方式ではフラックスの増加が見られないが、原子核乾板では空洞の影響と思われるフラックスの増加が認められる。これは、原子核乾板の角度分解能が高く、空洞と空洞以外の分別が計測できたためだと考えられ

る。空洞A方向については、シンチレータ方式の計測範 囲外だが、原子核乾板では空洞Aによるフラックスの増 加が見られる。ただし、両者を十分に説明できないところ もあり、今後の検討を要する。

原子核乾板とシンチレータ方式との違いを表-1にまとめた。原子核乾板は電源が不要で空間分解能も高く、安価で取り扱いも比較的簡単である。シンチレータ方式は、その逆である。しかし、シンチレータにはリアルタイムの計測が可能であり、原子核乾板にはない特徴を有する。

探査目的に応じて両者をうまく使い分ける必要がある。

表-1 原子核乾板とシンチレータ方式との比較

	原子核乾板	シンチレータ方式
電源	不要	必要
2 空間分解能	高い	低い(高くすることは可能)
表大きさ・重さ	薄い・軽い	大きい・重い
取扱	易しい (現状では安定性に やや難あり)	姓しい (光電子増倍管)
一 時間分解能	無し(使い捨て)	有り
データ読出	遅い	早い
温度耐性	低い(約30℃)	高い(約70℃)

8.今後の展望

前章ではシンチレータ方式と原子核乾板を比較した。 シンチレータ方式には大きく、重く、取り扱いが難しいという課題がある。なにより原子核乾板と比較すると高価である。そこで光電子増倍管のかわりに半導体を用いた検出器などが考えられる。筆者らは現在半導体検出器をテーマに、技術開発を進め、既存のシンチレータ方式にはない特長をもった検出器の開発も行っている。成果が出た場合には改めて報告したいと考える。

地下インフラ施設の老朽化に伴う空洞による陥没事故を未然に防ぐために物理探査が適用されている。なかでも地中レーダは、路面下空洞探査として技術が確立してきつつある。しかし、地中レーダは高分解能で、作業効率も良い反面、探査可能な深さが浅いという欠点がある。探査可能深さを確保するには弾性波を使った反射法や電気探査なども考えられる。しかし、地下インフラ施設が多く存在する都市部では、振動や電気的なノイズにより、物理探査の特性が発揮できないことがある(図-20)¹⁹⁾。宇宙線ミュー粒子を利用した探査ではこのようなノイズに影響することは全くないという利点がある。都市部ではミュー粒子検出器を設置できる地下インフラ施設が多数あり、設置する場所には事欠かない。直上だけでなく、斜め上方向も探査できるため、設置条件もそれほど厳しくない。

地下インフラ施設などの設置空間がない場合は、ボーリング孔を利用することで探査が可能である。図-21は、 亜炭廃坑を想定した場合であるが、斜めボーリングを 行って、そこへ原子核乾板を設置すればよい。最近では、 土木分野でもコントロールボーリングの適用が可能になっている。条件が許せばコントロールボーリングを行って、水平に設置することができれば、効率よく探査することができる。

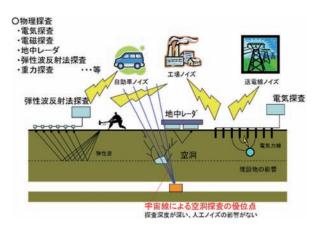


図-20 都市部における空洞探査の問題点

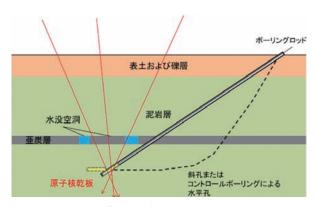


図-21 ボーリング孔を利用した計測方法

図-22は全地連の報告書²⁰⁾から引用した空洞探査に 対する物理探査の探査可能深さと分解能の関係を示し たものである。

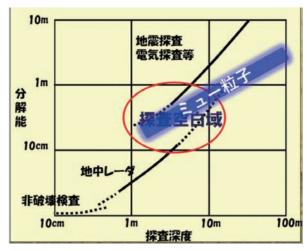


図-22 空洞探査における探査空白域(文献²⁰⁾に加筆)

地中レーダは深さ数メートルまでを高分解能で探査することができる。地震探査や電気探査数メートルから数十メートルの深さに対して、数メートル程度の分解能である。このことは地中レーダでは小さな空洞をとらえることはできるが、探査深さが不足する。地震探査や電気探査では探査深さは十分であるが大規模な空洞しか探査できない。同図中の中央、探査深さ1~10メートル、かつ分解能0.1~1メートルの領域が探査空白域として、現状の課題とされている。宇宙線ミュー粒子探査は、これまで示した事例から、この探査空白域を埋める可能性を十分に持っていると考えられる。

空洞は密度が地盤に比べて極端に小さいと考えられるため、密度分布を得ることで空洞を判定することができる。空洞探査に物理探査を適用する場合、例えば地中レーダであれば地盤(土粒子・地下水・空気の混合物)と空洞(空気)の比誘電率の違いによる反射波により判断する。電気探査の場合は、地盤と空洞の比抵抗値、弾性波探査であれば音響インピーダンス(密度と弾性波速度を掛け合わせた物理量)の違いにより判断する。これらの方法はいずれも密度の違いを間接的に見ていることになる。重力探査や密度検層などの方法も密度を直接得ることができるが、前者は密度構造を一意に決めることが難しく、後者はボーリング孔のごく周辺しか探査できないという課題がある。宇宙線ミュー粒子を利用すれば密度を広い範囲で直接的に得ることが可能である。

筆者らはこれまで様々な分野に適用できるのではないかと考えて検討を行ってきた。図-23は宇宙線ミュー粒子探査の適用可能性がある分野を示したものである²¹⁾。

大型の土木構造物, 例えばダム堤体の探査なども可能となる。監査廊や堤体の法尻に設置することが可能である。河川堤防では樋管内部や堤体法尻に設置することができる。福島第一原子力発電所の事故後は, ミュー粒子を利用して内部の可視化を試みた例もある²²。

岐阜県瑞浪市にある日本原子力研究開発機構の瑞浪町深地層研究所においては、地下300mにおける断層破砕帯の検出が試みられ、健全部と破砕部の密度差が検出できている²³⁾。

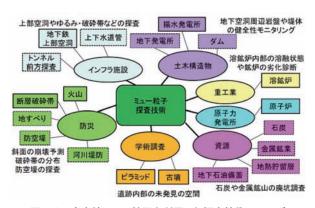


図-23 宇宙線ミュー粒子を利用した探査技術のニーズ

トンネル施工現場においても断層破砕帯の密度差を検出した事例²⁴⁾もあり、今後トンネル施工現場においても 斜め前方の探査に適用できる可能性がある。

資源探査にも適用しようという動きも出てきている²⁵⁾。 物理探査学会誌の第71巻に「宇宙線ミュオンを利用した 地下探査の新潮流」と題して特集が組まれている。

様々なニーズが想定されるが、宇宙線ミュー粒子を利用した探査には計測時間がかかるという大きな課題がある。計測時間の短縮には検出器の多チャンネル化や検出器本体の多数化を行えば原理的には実現できる。そのためには安価で小型の検出器を多数設置する必要がある。これを実現できる具体的な手法として原子核乾板がある。また、リアルタイムの計測を効率良く実現する方法として、シンチレータに光ファイバ、光電子増倍管の代わりに半導体検出器を用いるなどのアイデアもあり、筆者らは現在これらの課題に取り組んでいる。

地下環境への対応としては防水・防滴も必要であり、ボアホール型の検出器には小型化と防水構造、あるいは姿勢制御などの課題もある。

究極はロボット化を行って、自動計測により安価で効率の良い計測が実現できると考えられる。

おわりに

本稿では宇宙線ミュー粒子探査の歴史や事例について紹介した。宇宙線ミュー粒子による構造物や地盤の非破壊探査は意外に古いことや、わが国では名古屋で盛んに研究されていることがおわかりいただけたものと考える。

東海地方では、亜炭の採掘跡の空洞が原因の陥没事故が後を絶たない。しかし、既存の物理探査では、三次元的に複雑な空洞の形状をとらえることは非常に難しい。第8章にシミュレーションの結果を示したが、原理的にはこれまでの物理探査では検出が難しかった空洞だけでなく、これまで不可能であった領域の探査ができるようになる可能性を十分に擁している。

本稿ではいくつかの事例を示したが、今後はより具体 的な条件での実証実験を行って宇宙線ミュー粒子探査 の有効性を検証して行く予定である。

宇宙線ミュー粒子を使う利点としては、なにより自然放射線であるため安全かつ免許なども必要ないこと、さらに測定器を設置しておけばデータは取得できるため、計測中に別の仕事ができるなどがあげられる。このような利点にも着目していただきたいと考える。

謝辞

放射線地学研究所代表の湊進博士には、HPに掲載されている図面の使用を快諾していただいた。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 1) Morishima, K., Kuno, M., Nishio, A., Kitagawa, N., Manabe, Y., Moto, M., Takasaki, F., Fujii, H., Satoh, K., Kodama, H., Hayashi, K., Odaka, S., Procureur, S., Attié D., Bouteille, S., Clavet, D., Filosa, C., Magnier, P., Mandjavidze, I., Riallot, M., Marini, B., Gable, P., Date, Y., Sugiura, M., Elshayeb, Y., Elnady, T., Ezzy, M., Guerriero, E., Steiger, V., Serikoff, N., Mouret, J.B., Charlès, B., Helal, H., and Tayoubi, M.:Discovery of a big void in Khufu's Pyramid by observation of cosmic-ray muons, *Nature*, 552, 386-390, doi:10.1038/nature24647, 2017.
- 2) 鈴木敬一・金沢淳: 宇宙線ミュー粒子を利用した探査技術の応用地質 分野への適用, 応用地質,57, pp.266-276, 2017.
- 3) Nagamine, K.:Introductory Muon Science, Cambridge Univ. Press, p.208, 2003.
- 4) George, E. P.: Cosmic Rays measure Overburden of Tunnel, Commonwealth Engineer, 455, 1955.
- 5) Alvarez, L. W., Anderson, J. A., El Bedwei, F., Burkhard, J., Fakhry A., Girgins, A., Goneid, A., Hassan, F., Iverson, D., Lynch, G., Miligy, Z., Moussa, A. H., Sharkawi, M. and Yanozolino, L.: Search for hidden chambers in the Pyramids, *Science*, 167, pp.832-839, 1970.
- 6)田中宏幸・永嶺謙忠:宇宙線ミュオンによる火山体内部探索, 火山, 48, pp.345-366, 2003.
- 7) Minato, S.: Bulk density estimates of buildings using cosmic rays, *Applied Radiation and Isotopes*, 37, pp.941-946, 1986.
- 8) 湊 進: 宇宙線を利用する非破壊計測技術,放射線, 17, pp.60-71, 1991.
- 9) Minato, S.: Feasibility study on cosmic-ray nondestructive testing through structural analysis of subway stations, *NDT International*, 20, pp.231-234, 1987.
- 10) 鈴木敬一・湊 進: $3"\phi \times 3"$ Nal (TI) シンチレーション・スペクトロメータを用いた地下鉄における宇宙線ミュー粒子測定,放射線地学ノート,SCS-0062, 2010.
- 11)湊 進:宇宙線透視像, 放射線, 19, pp.49-56, 1992.
- 12) 三宅三郎: 地下深部における宇宙線研究, 日本物理学会誌, 34, pp.292-301, 1979.
- 13) 鈴木敬一: ミュー粒子による土木物理探査の可能性,物理探査,65,pp.251-259,2012.
- 14) 鈴木敬一・大沼寛・淺沼博信:宇宙線ミュー粒子による三次元トモグラフィの地盤密度精度の検討,全地連「技術フォーラム2012」新潟,No.100,2012.
- 15)ひろたみを:御嵩の亜炭鉱, リヨン社, p.207, 2002.
- 16) 名古屋大学理学研究科素粒子宇宙物理系基本粒子研究室 HP:http://flab.phys.nagoya-u.ac.jp/2011/tech/nuclear_ emulsion/
 - (2019年1月22日閲覧)
- 17) Kusagaya, T., Morishima, K., Narita, K., Suzuki, K., Nakano, T. and Nakamura, M.: Muon radiography in Exploration Geophysics, *Proc*, *13th SEGJ Int. Symp.*, 2018
- 18) 草茅太郎・鈴木敬一・森島邦博・成田浩司:原子核乾板方式とシンチ

- レータ方式による宇宙線ミュー粒子探査の比較~大谷石採石場跡地の 事例~, 日本応用地質学会北海道支部・北海道応用地質研究会講演予 稿集, pp.31-32, 2017.
- 19) 一般財団法人エンジニアリング協会地下開発利用研究センター: ミュー粒子の工学応用による地中空洞化調査システムに関する調査研究報告書(要旨), 20-R-8, 2008.
 - https://www.enaa.or.jp/GEC/report/youshi/20R8.PDF (2019年1月22日閲覧)
- 20) 一般社団法人全国地質調査業協会連合会: 「防災・維持管理分野における物理探査の適用」報告書, p.20,2007.
 - https://www.zenchiren.or.jp/geocenter/zenchi/report.html (2019年1月22日閲覧)
- 21) 鈴木敬一・大沼寛・奥村忠彦・淺沼博信: 宇宙線ミュー粒子を利用した マルチ計測器の改良と社会ニーズの開拓, 平成24年度土木学会全国 大会土木学会第67回年次学術講演会論文集, VI-239, 2012.
- 22) Takamatsu, K., Takegami, H., Ito, C., Suzuki, K., Ohnuma, H., Hino R., and Okumura, T.: Cosmic-ray muon radiography for reactor core observation, *Annals of Nuclear Energy*, pp.166-175, 2015.
- 23)Sasao, E., Suzuki, K., Yamada, N. and Kuboshima, K.: Geological investigations using cosmic ray muons: a trial to detect fault at the Mizunami Underground Research Laboratory, Proc. 12th SEGJ Int. Symp., 2015.
- 24) 片山政弘・森島邦博・草茅太郎・鈴木敬一・金沢 淳・トンネル施工現場 における原子核乾板を利用した宇宙線ミュー粒子探査の試み、日本応 用地質学会平成29年度研究発表会講演論文集、pp.33-34、2017.
- 25) 松島 潤: 石油・天然ガス探査における密度分布推定手法の進展と展望 既存体系の課題抽出とミュオグラフィの貢献可能性 、物理探査、71、pp.179-188、2018.

業界トピック1

地質リスクマネジメントの現状と今後の動向

全国地質調査業協会連合会 技術委員長 岩﨑 公俊(基礎地盤コンサルタンツ㈱) 代表取締役社長)

1.はじめに

国土交通省(以下,国交省)において地質リスク調査検討業務の発注が数年前から始まっている。この業務は、全地連が従来から提案している地質リスクマネジメントの一環として地質リスクを抽出・分析・評価する業務である。

予測困難な地質・地盤条件が顕在化したことによる工事中の事故や変更増額を、早い段階からリスクを管理することにより安全確保とコスト縮減を可能な限り達成しようという試みである。そのため、これはi-Constructionの目的である生産性向上にも極めて有効な手法である。

本稿では、地質リスクマネジメントに関する全地連のこれまでの取組みと地質リスクマネジメントの考え方、地質リスク検討業務の概要、さらに今後の動向を紹介したい。

2.全地連の地質リスクへの取組み

全地連では、平成16年頃から地質リスクWGが主体となり、地質リスクについての検討を始めた。これまでの取組みは、表-1に示すように大きく3段階に分けることができる。

最初の段階は、当時の国交省において建設コストを抑制するための「コスト構造改革」が課題として取り上げられていた時期にあたる。地質リスクを抑制することがコスト縮減に大きな効果があることを示すため、事例研究を中心に検討が行われた。このような背景に基づき、地質リスクの定義は「地質に起因する事業リスクで事業損失とその不確実性」とされた。

次の第2段階は、リスクの洗い出しを実務として行う「地質リスク調査検討業務」が始まった段階である。この業務を発注する際に役立つよう、「地質リスク調査検討業務発注ガイド」¹⁾が作成された。そしてこの業務は、国交省のプロポーザル業務の例としても採用されている²⁾。

第3段階は今後の展開を提案するものであり、地質リスクの検討を建設生産システム全般に拡大し、事業全般のリスクマネジメントに役立てようという段階である。また、発注者側に立った地質技術顧問を地方自治体などで有効活用することを提案している。

3.地質リスクマネジメント

3.1 地質リスクとその要因

全地連においては地質リスクの定義は、上述したように、その目的を事業損失すなわちコスト増大を抑えることとしてとらえている。言い換えれば、地質リスクは建設事業において地質、地盤、地下水などの不確実性が建設コストに及ぼす影響のことを意味している。このリスクを減ずることは建設コスト縮減に直結することであり、国交省が進めてきたコスト構造改革に即したものである。

我々が直面する地質リスクとなる事象として,新規の建設事業において対象構造物ごとに考えられる主な事象を表-2に示している。そして,これらの地質リスクの発生に影響する要因には素因と誘因がある。

素因としては, 地形, 地質, 破砕帯, 地下水状況, 地盤 特性, 岩盤性状, 汚染物質・ガス等の存在, 構造物の劣化

	全地連における地質し	
4X - I	工地进行30773地员。	

段階	内容	成果等
【第1段階】 地質リスクマネジメン トの勉強開始	・地質リスクの現状把握、提案 事例収集 海外調査(GBR) マネジメント効果 地質技術顧問 事例研究発表会	・「地質に係わる事業リスク検討報告書(2005) ・「地質リスクに関する調査・研究報告書(2006) ・「地質リスク海外調査ミッション報告書(2007) ・地質リスクとリスクマネージメントシンポジウム(2008、産総研と共同開催) ・地質と調査 2008 年第 2 号 地質リスクマネジメント小特集号 ・「地質リスクマネジメント入門」(2010、オーム社) ・第1回地質リスクマネジメント事例研究発表会(2010)
【第2段階】 地質リスク事始め	・リスクの洗い出し 「地質リスク調査検討業務」 リスク抽出・分析・対応検討	・「地質リスク調査検討業務発注ガイド 2016」 ・国交省プロポ総合評価ガイドライン(2017、国交省)に地質リスク調査検討 業務掲載
【第3段階】 マネジメントへの進 展(一気通貫のリスク マネジメントへ)	・リスク情報の関係者間での共 有化(三者会議) ・建設事業全般で地質リスクを主 体としたリスクマネジメント ・地質技術顧問	・「ジオリスクマネジメント」(2016、古今書院) ・国交省三者会議に地質技術者の参加試行(2018)

表-2 地質リスクの主な事象例1)

	建設事業	地質リスクの発現に直結する事象の例
	切土のり面	すべり破壊, 落石, 豪雨時表層崩壊, のり面保護 エの劣化・背面空洞化, 掘削土の重金属汚染
	盛土	すべり破壊、材料劣化、基礎地盤沈下、基礎地盤・ 盛土材料の液状化、路面不陸、長期沈下、周辺施 設の沈下・傾斜
道路	橋梁	橋脚・橋台基礎の沈下・傾斜、側方流動、基礎地盤 の液状化、仮設構造物の沈下・破壊
鉄道	山岳トンネル	異常出水、破砕帯の存在誤認、覆工亀裂、坑口斜 面崩壊、周辺井戸の枯渇、ずりの重金属汚染、ガ ス発生
	都市トンネル	地層変化, 地表面沈下, 建築物の沈下・傾斜, メタンガス発生
	開削	周辺地下水位低下、近接構造物の沈下・傾斜、土 留壁の変形・破壊、掘削底面の盤膨れ・パイピン グ
河	堤防	沈下, すべり破壊, 浸透破壊, 地震時崩壊, 漏水, 堤体及び基礎地盤の液状化
川・海	河川· 海岸施設	沈下・傾斜、漏水、地震時損傷
岸	ダム	亀裂, 沈下・傾斜, 漏水, 地震時損傷, ダム貯水池 周辺地すべり
	地すべり	すべり面誤認、対策工の変状、水抜き工の不良、 地すべり範囲の誤認
砂防	がけ地	降雨時崩壊,危険度ランク評価の誤り,のり面保 護工の劣化・背面空洞化
	土石流	土石流土砂量・崩壊規模想定の誤り、範囲誤認、 砂防堰堤の沈下・傾斜
	宅地	降雨時の沈下、基礎地盤の液状化、盛土部の基 礎変状、のり面の崩壊、道路路面の不陸
建	建築基礎	建物の不同沈下, 支持層の急変, 軟弱層の存在, 地盤の液状化
築	地下掘削	山留め壁の変形・破壊、周辺地下水位の低下、近 接構造物の沈下・傾斜、掘削底面の盤膨れ・パイ ピング

などがあり、誘因としては、気象、地震、地形の人工改変、構造物築造等による外力変化がある。これら以外にも、地層断面の誤り、設計モデルの誤り、解析モデルの誤り、設計・解析パラメーターの誤りなどの人的判断の誤りもあるが、これらは一般的な品質管理の問題として取り扱われるべきであるう。

3.2 地質リスクマネジメントとは

地質リスクを低減させるために、いたずらに地質調査の数量を増やせばよいわけではない。図-1は、英国の高速道路建設事業における工事費に対する地質調査費の比率と工事費の増額割合の関係である。この図から、調査費が少ないと工事費が最悪で当初の倍近くまで増える場合があることが分かる。しかし、工事費の増額を10%程度に抑えるために調査費を工事費の8%程度実施するかと言えば、それはやり過ぎであろう。このことから、現場の地質・地盤状況に応じて、的確な調査内容が必要であることは自明であり、ここに地質リスクマネジメントの意義がある。

地質リスクのマネジメントは、JIS Q31000で示されている図-2のようなプロセスを実行することである。詳細は後述するが、地質リスクの特定・分析・評価を行うリ

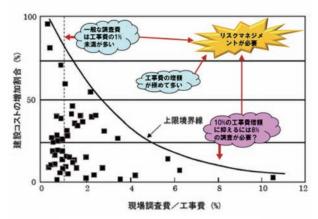


図-1 設計変更増額と調査費の関係例3)

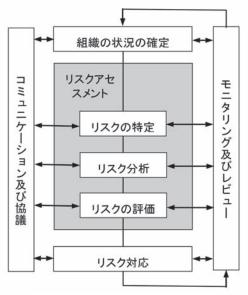


図-2 リスクマネジメントプロセス4)

スクアセスメントを実施した後リスクへの対応を検討する流れである。「モニタリング及びレビュー」は地質調査とその結果の考察を意味し、「コミュニケーション及び協議」は発注者を含む関係者との情報共有と協議に相当する。そして、事業の進捗段階に応じて繰返し実施されることが必要である。

地質リスクマネジメントが注目され始めたのは、横浜マンション基礎杭問題や博多駅前陥没事故のような衝撃的な事故の反省によるところが大きい。このような事故を防ぐため、事前に地形・地質や既往地盤情報などをできるだけ収集し、地質工学、地盤工学等の知見に基づくリスクの評価を行う必要があることが改めて認識されてきたと言える。これは、事故防止のみならず各種の地質リスク発現に伴う工費増大に対しても必要である。

このような考えを一般的な建設事業に当てはめて考えると、図-3に示すような取組みが必要と考えられる。

すなわち、地質リスクを抽出(特定)し、分析・評価する 地質リスク調査検討業務をできるだけ早い段階で実施す

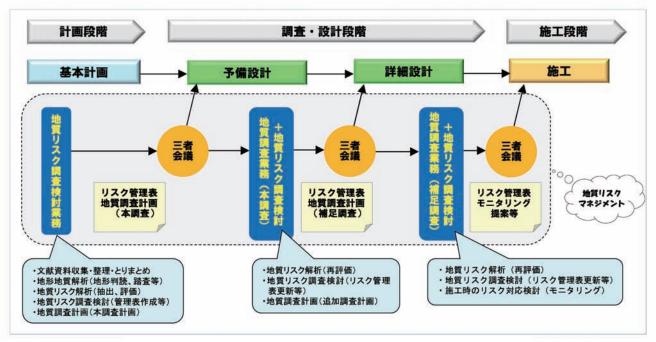


図-3 地質リスク調査検討業務と合同会議を組み合わせた地質リスクマネジメント

る。その結果に基づき、発注者など関係者との協議(三者 会議)を行いリスク情報の共有化を図るとともにそれらの リスクをより明確にするための地質調査計画も策定する。

次の設計前段階においては、上記で計画された地質調査結果に基づき地質リスクの検討(特定・分析・評価)が行われ、設計に引き渡す条件としてのリスク対応が検討され、三者会議で情報の共有化を行う。さらに、施工前段階においては施工時に残されている地質リスクの程度(残存リスク)が最も問題となる。必要に応じて追加調査が行われ地質リスクが再評価される。施工者は、残存リスクを意識してモニタリングなどを行い安全な施工に努めることができる。

以上のような流れは、事業のすべての段階を通じて地質リスクマネジメントを行うことであり、一気通貫の地質リスクマネジメントと言えよう。

建設段階ごとに地質リスクマネジメントを繰り返していけば、全体の地質リスクを低減させることができる。図-4は、そのイメージを示したもので、地質リスクマネジメントの効果を示している。

事業が進むにつれて当初懸念された地質リスクが調査の結果解消されてくることがあり、地質リスクマネジメントを実施しなくても地質リスクが低減することはある。一方、初期の段階から地質リスクマネジメントを開始していれば、そのリスクへの対応(対策による低減やルート変更による転嫁など)ができるため、さらにリスクが低減する。逆に地質リスクマネジメントを行わない場合には、地質リスクが施工途中に発現し、予想外の対策工が必要になり予算超過に至るケースも多い。このように、的確に地質リスクマネジメントを行えばトータルコストを下げることが可能となり、事業全体の生産性向上に寄与できる。

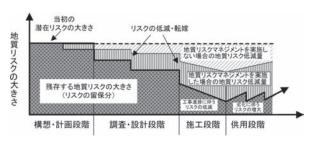


図-4 建設段階に応じた地質リスクの低減1)

4.地質リスク調査検討業務5)

4.1 地質リスク調査検討業務発注ガイド

全地連では、地質リスク調査検討業務について、発注に際して必要な基本的な考え方をまとめた「地質リスク調査検討業務発注ガイド」を2014年に作成し、その後大幅に加筆した改訂版¹⁾を2016年に公表した。これは、国交省がプロポーザル業務で発注すべき業務の例の一つとして地質リスク調査検討業務を示したこと²⁾に対応したものである。

この発注ガイドに関連して重要となる事項について以下に述べる。

4.2 検討内容

地質リスク調査検討業務の標準的な検討手順と内容の例を図-5に示す。これらの作業は、業務を適用する段階によって取捨選択することになる。すなわち、事前に本検討業務あるいはそれに類した業務が行われていれば、その確認程度でよい場合もある。また、非常に早い段階(構想・計画段階)では、「地質リスク解析」はその検討に

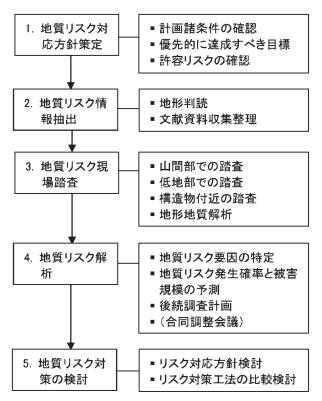


図-5 地質リスクの検討手順と内容の例

必要な情報が得られない可能性があり概略検討になるであろう。この場合,対策の検討は省略してもよい場合もある。

「地質リスクの対応方針策定」は、構造物の重要度、工期の制約、コストと安全性の相反関係をどのように考えるかなど事業の特性を考慮して検討しなければならない。

「地質リスク情報抽出」は、既往資料に基づく地質リスク要因の机上調査である。技術者の経験も加味して当該地域の地質的な課題を的確に洗い出す必要がある。

「地質リスク現場踏査」は、机上調査でイメージされた 注意個所を確認することも含め、極めて重要な作業とな る。場合によってはドローンを活用することも必要である う。

「地質リスク解析」は、上記の調査結果に基づき、地質 リスクの素因と誘因を抽出し、各地質リスクの発生確率 や被害程度の大小を判定する。リスク管理表(登録表) を作成し、必要に応じて追加調査の計画を策定する。

「地質リスク対策の検討」は、優先度の高い(リスクスコアが高い)リスクに対して、その対応方針を検討し、リスク管理表(措置計画表)を作成する。なお、対策工の検討においては設計業務との調整が必要である。

4.3 リスク管理表

上述のリスク管理表の一例を表-3に示す。この例は比較的単純な例を示したものであり、当該事業に適するものを提案すべきである。英国では、業務を実施する会社が独自のものを作成しており、それを売り物にしている。

このような管理表と合わせて地質リスクを平面図や断面図上で表記するなどの工夫が望ましい。

4.4 リスクスコアの考え方

地質リスクへの対応を検討するうえでリスクの程度の 大きさが重要となる。そのため何らかの定量化が必要で あるが、一般にリスクの程度は以下のように表される。

リスク程度R=影響度E×可能性の高さL

表-4はこの考えを導入して文献¹⁾で示されたリスクスコアを修正したものである。すなわち、影響度と可能性の高さの5段階に1~5の評点を与え、それらをかけ合わせたリスク程度の大きさによって同表の注に示した範囲でリスクスコアのランク(C, B, A, AA)を決めている。

ただし, あくまでもこの方法は一例であり, 対象とする 事業特性や地域の地質特性などを考慮して発注者と入 念な打合せで決定すべきものである。

このリスクスコアの考え方に関しては、地域ごとの事例に基づきレベルアップを図るべきと考えている。なお、文献³⁾では英国におけるリスク管理表やリスク程度の考え方が述べられているので参考にして頂きたい。

4.5 積算の考え方

地質リスク調査検討業務の積算に関しては、全国標準 積算資料(通称赤本)の平成30年度改訂歩掛版⁶⁾に初め て歩掛の構成が記載された。基本的には図-5に示した 項目の詳細が示されているが、実際に採用すべき項目や 歩掛は対象プロジェクトによって大きく異なる。そのため、 できる限り提案・見積を徴集したうえでプロポーザル方 式の発注を行うことが望まれる。

5.今後の動向

5.1 地質調査業務におけるリスク管理表の作成

地質リスク調査検討業務は、重要性が比較的高い事業 が対象と考えられるが、通常の地質調査業務においても 地質リスクを検討しておくことは、設計・施工の品質を高 めるうえで非常に有用である。

そのため、今後は一般的な地質調査業務にリスク管理 表の作成を追加することを提案していくべきと考えられ る。

5.2 技術顧問とGRE

発注者によっては、地質リスク調査検討業務を発注する代わりに専門家を技術顧問として顧問契約により雇うという方法もある。

特に地方自治体の大半は地質・地盤に精通した技術者を有していないと考えられるため、常時相談できる存在としてこのような専門家の存在は地質リスクを回避・低減・予防するという観点から極めて重要な存在となりうる。

この技術顧問としては、GRE (地質リスク・エンジニア)

表-3 調査・設計段階におけるリスク管理表の一例

(1) 登録表

No	リスク項目	説明	可能性	影響	リスク スコア	分析結果概要	対応案	優先 度
1	液状化 (A地区)	A地区付近における地震時 における砂地盤の液状化 の懸念	低い	中程度	В	調査結果に基づき道路橋示方 書の方法で判定した結果、対 象砂層に細粒分が多く含まれ るため液状化の可能性は高く ないと判断された。	ボーリング調査間隔が大きい箇所での補足調査が望ましい。	ф
2	切土のり面 の安定性 (B地区)	B地区付近の泥岩切土斜 面のすべりの危険性	低い	中程度	В	ボーリング調査結果から潜在 すべり面は認められないが、風 化しやすい岩盤であることが判 明。	大きな問題はない と考えられるが、 風化しやすい地質 であることに留意 すべき。	低
3	軟弱粘性土 の沈下 (C地区)	C地区軟弱層による盛土の 安定・沈下の懸念	非常に高い	高い	АА	軟弱粘土の層厚は約15m程度 と推定され、強度が小さく圧縮 性が高いため、地盤改良が必 要と判断される。	軟弱層の層厚変 化が激しいため、 特に起点側の補 足調査が必要であ る。	高

(2) 措置計画表

No	リスク項目 措置対策		担当	時期	概算コスト	備考・施工上の留意点		
1	液状化 (A地区)	補足調査結果によっては液状 化対策が必要	設計者	設計	4.000~ 5,000万円	SCP施工を想定したが、補足調査結果によっては 不要となる。		
2	切土のり面 の安定性 (B地区)	風化しやすい地質であるため、 のり面の被覆(モルタル吹付け)や排水対策が必要	設計者	設計	1,000~ 2,000万円	工法については別途景観等も配慮して検討		
3	軟弱粘性土 の沈下 (C地区)	盛土部の軟弱地盤対策が必要	設計者	設計	40~80億円	基礎地盤は超軟弱なため、深層混合処理工法を 想定した(Ikm区間)。今後、低改良率の工法の適 用についても検討すべき。		

表-4 リスクスコアの一例(文献1), 3)を加筆修正)

			可能性の高さ(発生確率) L						
			非常に低い (1)	低い (2)	中程度 (3)	高い (4)	非常に高い(5)		
	非常に低い (1)	事業の継続に影響を与 えない	С	С	С	С	В		
	低い (2)	軽微な修復で事業継続 可能となる影響	С	С	В	В	Α		
影響度E	中程度 (3)	大きな損失を受けるが 事業は継続可能で,遅 延がある	С	В	В	А	А		
	高い (4)	事業が中断または大 幅な遅延となる影響	С	В	Α	А	AA		
	非常に高い (5)	事業の継続不能とな る影響	В	Α	А	AA	AA		

(注)リスクスコア(リスク程度 R=E×L)

AA: リスクを回避することが望ましいリスク事象(R=20~25)

A : 詳細な地質調査を実施して、完全なリスク低減対策を講じるべきリスク事象(R=10~19)

B : 地質調査を行い、調査結果に応じた適切なリスク低減対策を講じるべきリスク事象(R=5~9)

C:リスク回避や低減対策を必要とせず、施工段階へリスクを留保することが可能な事象(R=1~4)

※ 発生確率のランクは当該事業ごとに、事業や工事の特性を考慮して定義

が最も適した存在である。GREは地質リスク学会とNPO 地質情報整備活用機構が運営する認定制度⁷⁾で、養成講 座を履修したうえで小論文を提出して合格した技術者が 認定される。

GREの発注機関における位置づけや地質リスク調査 検討業務との関係を図-6に示す。GREの活躍の場を作ることが今後の課題である。地方自治体の建設事業や災 害対応のみならず、国交省の事業推進PPPにおいても活 用できる可能性があると考えられる。

5.3 GBR (ジオテクニカル・ベースライン・レポート)

GBRとはGeotechnical Baseline Reportの略で、欧米主要国の工事契約文書の一つであり、地質査結果を取りまとめ地盤条件などを具体的に示した報告書である。示された条件を越えた状況が出現すれば、予見し難き事象として発注者が設計変更を認める基準として用いられるためベースラインという表現が使われている。言い換えれば、GBRは発注者と請負者が共有するリスク分担の基準を示すものとも言える。

国内での適用例はほとんどないが、今後、設計・施工一括発注方式やPFIなどの入札契約に際して適用すれば有効であると考えられる。

5.4 3次元地盤モデルと地質リスク

現在、国交省はi-Constructionによる調査、設計、施工から維持管理まで3次元データ化し、一気通貫に情報管理を行うことで生産性や品質の向上を図ろうとしている。地盤の3次元モデルを作成することは、地形データや土木構造物の3次元データと比べて、調査地点間の推定が必要となる点で状況が全く異なり、地質リスクが含まれる可能性がある。

そのため、3次元地盤モデルを作成する際に地質技術者が関わり、そのモデルに含まれる地質リスクについて何らかの方法で明示することが必要である。

6.おわりに

地質調査は、従来、設計のための地質・地盤情報を提供することが目的であった。しかしながら、地質リスクという概念を追求することは、単に設計のための情報提供だけでなく、調査段階以外のすべての段階でも地質リスクの検討が有益であることが分かる。また、地質技術顧問のような存在は従来はなく、新たな役割と考えられる。このようなことから、地質リスクは地質調査のパラダイムシフトに結びつくキーテクノロジーであるとも言ってよいであろう。

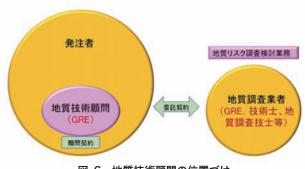


図-6 地質技術顧問の位置づけ

参考文献

- 1)(一社)全国地質調査業協会連合会:2016改訂版 地質リスク調査検 討業務発注ガイドー建設事業の生産性向上と品質向上のためにー, 2016
- 2)国土交通省:建設コンサルタント業務等におけるプロポーザル方式及び総合評価落札方式の運用ガイドライン, 2015.
- 3) C.R.I. Clayton, 英国土木学会編,全国地質調査業協会連合会訳:ジオリスクマネジメント、古今書院, 2016.
- 4)日本工業規格ISO Q 31000:2010「リスクマネジメントー原則及び 指針」, 2010.
- 5)岩崎公俊:基礎技術講座 地質リスクマネジメント(前編), 地質と調査, 2018年第2号, pp.57~62, 2018.
- 6) (一社)全国地質調査業協会連合会:全国標準積算資料(土質調査·地質調査)平成30年度改訂歩掛版,2018.
- 7) 地質リスク学会: 地質リスク・エンジニア(GRE) 認定制度, http://www.georisk.jp/gre/gre_oubo.pd(2019年1月現在).