地質工學

第 19 輯

NGP　日本物理探鑛株式会社

地質工学 80 周年記念号　巻頭言

1942 年に創業した日本物理探鑛株式会社は，2022 年 12 月 7 日に創立 80 周年を迎えます。その記念として『地質工学　80 周年記念号』を発刊できますことを大変喜ばしく思うと同時に，皆様のご支援，ご協力に感謝申し上げます。

「地質工学」は初代社長渡邊貫の強い意志によって 1952 年に創刊されました。渡邊は「地質工学の専門誌を発行することは我々科学技術の仕事に携わるものとして最も相応しいことだと思った。記事の内容は物理探鉱（Geophysical Prospecting）と土質力学（Soil Mechanics）を主体とするが，地質工学（Geotechnics）という土木建築に関する応用地質という立場から地下水または水文学(Hydrology)，建造物の基礎工，隧道，堰堤の施工法等も含めたい。また応用地質学という見地からいえば勿論，温泉，鉱床地質等に関する諸問題も含んでくることになる。同好の士の投稿は大いに歓迎することになっているから活発な合流を期待する。知識と経験の交換によって斯界の進歩と発達に就いて寄与をなすことを我等はここに切に念願する次第である」と述べております。

創刊以来 70 年が経過し，記事の内容は時代の変化とともに地震工学や環境科学の分野にも範囲を広げております。今後も渡邊貫の意志を引き継ぎ，斯界の専門家の方々にご執筆頂き，更に当社技術者の技術発表の場でもある本誌『地質工学』を継続・発展させてまいります。

どうぞよろしくお願い申し上げます。

日本物理探鑛株式会社
代表取締役　石田 定

地質工学　第 19 輯

目　　次

●高周波交流電気探査による都市域での非破壊電気探査
国立研究開発法人産業技術総合研究所 地質調査研究センター　　神宮司　元治 ……1

●土壌地下水汚染問題を振り返る
和歌山大学名誉教授　　平田　健正 ……5

●山岳トンネルを中心とした私の地質工学を振り返る
国際航業株式会社　公共コンサルタント事業部　　大島　洋志 ……15

●常時微動測定に基づく免震構造物の柱・大梁・スラブの上下振動性状
日本物理探鑛株式会社　関東支店　　関根　康平 ……31

●インドメダカとハブスメダカにおける Gsdf の機能解析
日本物理探鑛株式会社　関西支店　　木村　優太 ……37

●異なる水質変成度を持つ CR コンドライト隕石中の有機物同位体分析に向けた準備
日本物理探鑛株式会社　関東支店　　金子　綾乃 ……45

高周波交流電気探査による都市域での非破壊電気探査

神宮司　元治 1)
1）（国研）産業技術総合研究所 地質調査研究センター

1. はじめに

我が国では，1960年代の高度成長期から全国的に都市化が進んでおり，既に拡大期から成熟期に移行している．また，高度成長期に急速に整備された社会インフラも，整備後40年以上が経過したものが多く，老朽化が進みつつある．特に多くのインフラが埋設されている道路の下は，水道管や送電線などの多くの地下インフラが整備されているが，地表面がアスファルトやコンクリートで被覆されており，老朽化調査や更新は，労力とコストがかかるため頻繁に行うことができない．また，都市化が進むと，大都市の一部では，地下鉄や地下高速道路などの地下トンネルの開発が進められてきた．それらの都市部の地下トンネル技術は，シールド工法の発達とともに，より大深度で長距離なトンネルが開発されるようになってきた．その一方で，大規模な地表面陥没事故が発生することが度々あり社会問題化している．これらの水道の老朽化や地表面陥没につながる地下空洞の調査は，地表面から短時間・低コストかつ非破壊で実施できるものが望ましく，これまでにない非破壊探査法が求められている．高周波交流電気探査は，高周波の交流を，PVA電極を用いて地下に通電することによって，非破壊の電気探査を行う技術である．本稿では，本技術の紹介と展望および課題について述べる．

2. 高周波交流電気探査

高周波交流電気探査（Jinguuji and Yokota, 2022）は，VLF 帯の周波数（20kHz）の交流を用いた交流電気探査法であり，地表面がアスファルトなどの絶縁体やコンクリートなどの高比抵抗体でも，容量性カップリングにより地中に通電させることができる．高周波交流電気探査は，PVA（ポリビニルアルコール）スポンジ電極を用いている．PVA スポンジ電極は，微細な連続孔隙を持ち，誘電率の高い水を大量に含み，吸水性・保水性・柔軟性・弾力性・耐摩耗性に優れており，柔軟性と弾力に富むことから地表面との接地能力が高い．この PVA 電極を二組用いて送信ダイポールとし，地中に高周波の交流電流を効率的に通電することができる．また，受信ダイポールにも同様の PVA 電極を二組用い，相互に独立した送受信器で調査を行う（Fig.1）．

Fig.1 高周波交流電気探査による調査の様子

PVAスポンジ電極には，Fig.1調査で使われているような，平板タイプのものとFig.2のようなローラータイプのものがあり，ローラータイプの電極は，牽引測定に向いている．

Fig.2 PVAローラースポンジ電極

送信器と受信器は，GNSSによる共通の参照信号により相互に同期させ，直交同期検波を用いたデータ取得を行う．その結果，10μV（分解能1μV）程度の極めて微弱な電位差をも検出可能となった．また，同時に直交同期検波を用いた信号検出は，周囲の電気的ノイズにも高い耐性を持つ．そのため，周辺のアースなどから流れてくる電気的ノイズにも強い耐性を持ち，電気的ノイズの多い場所での利用も可能である．

3. 水道管の腐食土壌調査および地下空洞調査への応用

我が国の水道管は，高度成長期を中心に多くが整備され，法定耐用年数の40年を超えて更新の必

要性が増している．その一方で，人口減少や水需要の低下のため，更新費用を含めた水道収入は伸び悩み，水道の更新は進んでいない．水道の老朽化は，水道管の埋設環境に依存しており，水道管の劣化速度は，場所によって異なる．特に水道管が埋設されている土壌環境は，水道管の腐食に大きな影響を与える．そのため，幾つかの自治体では，水道管の更新優先度を決めるため，水道管の管体調査を行い，水道管の腐食程度と周辺土壌の分析調査を行っている．我が国では，土壌の分析評価基準として，米国国家規格であるANSI/AWWA C105/A21.5-1999が多く用いられている．本規格は，土壌サンプルから土壌の比抵抗，pH値，酸化還元電位（Redox電位），水分，硫化物を分析し，ANSIによる評価基準に照らし合わせて測定結果を点数化し，総合得点で評価する方法である．ANSIによる基準では，この合計点数が10点以上になれば腐食性土壌として判断している．高周波交流電気探査では，この評価点数の中でも特に配点の高い比抵抗に注目し，地表から水道管周囲の土壌の比抵抗を計測することで腐食土壌の評価を行う．本探査法は，アスファルト舗装などの舗装道路の上から非破壊で地下の調査が可能であり，容易に土壌比抵抗の調査が可能である．

同様に社会問題視されている課題で高周波交流電気探査が有効と考えられるものとして，地下空洞調査への応用が考えられる．地下空洞の調査としては，地中レーダが幅広く使われている（Alsharahi et al., 2019）．地中レーダは，地下空洞の調査法としては非常に有効な調査法であるが，探査深度が2mから3mと浅く，探査深度より深くに空洞が発生した場合の検出が困難である．

地下空洞から地表面陥没へのプロセスは，Fig.3に示すように，パイピングなどの自然発生原因や排水管・下水などの地下埋設管への流出，トンネル工事に起因する土砂流出による空洞源の発生に始まる．

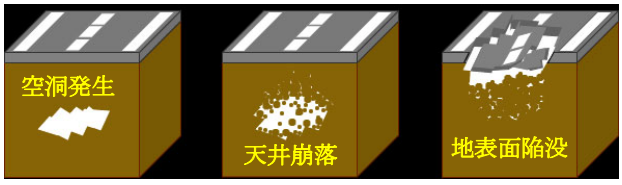


Fig.3 地表面陥没へのプロセス

その後，降雨や地下水の変動に伴い，空洞の上面の天井が崩れていき，空洞が地表面に進展し，最終的に地表面が陥没する．地中レーダは，探査深度が浅いため，地表面に影響を与える段階での空洞の検知が有効である．一方で，トンネル工事に起因する土砂流出などで発生する地表面陥没事故は，より大きなスケールで発生する事が多いが，初期の空洞の発生は，トンネル工事の深度のように比較的深部で発生し，その後，地表面に進展していく．高周波交流電気探査などの電気探査法は，地中レーダと比べて比較的深部（～20m）の比抵抗構造を探査（Cardarelli et al., 2010）することができるため，比較的深部から進展する空洞の探査に有効と考えられる．また，アスファルト路面のような舗装路上から，測定が可能であるため特に都市域での調査に有効であると考えられる．

4. 牽引型高周波交流電気探査装置の開発

多くの水道管路や地下鉄などの鉄道・道路インフラは，道路下に整備される．そのため，多くの水道管破裂事故や，トンネル掘削時の土砂流失に伴う陥没事故は，道路下で発生することが多い．このような水道管路などの道路下のインフラは道路に沿って，路上から連続的に長距離に渡って計測できることが望ましい．そのため，高周波交流電気探査の受信器ならびに電極を多数配置した，牽引型の探査手法が望ましいものと考えられる（Fig.4）．

Fig.4 牽引型高周波交流電気探査装置

高周波交流電気探査で用いられるPVA（ポリビニルアルコール）ローラー電極は，複数のPVAスポンジ製ローラーで構成されており，ローラーが路面上を回転しながら移動する．そのため，牽引抵抗が小さく，小型のUGVでも牽引が可能である．本研究では，(株) エンルート製のUGV BERG-400を利用している．BERG-400の最大積載量は100kgで，ラジオコントローラによる無線操縦と，GNSSによるプログラム自律走行が可能である．牽引型の測定システムは，Fig.4に示すように，UGV上に送信器が設置され，その後部にローラー電極で構成される一対の送信ダイポールが設置されている．その後部には，受信用のローラー電極と受信器が設置されるが，受信器は，ローラー電極の直上30cmにマウントされる．これは，受信電極と受信

器との間の静電的な干渉を防ぐためである．また，ローラー電極同士は，可動部を持つ塩ビ製の剛性接続板で接続される．なお，長さの異なる剛体接続版を交換することで任意のダイポール長に設定でき，探査深度を変えることができる．

牽引型高周波交流電気探査の探査方法には，一定間隔で一時停止して計測する方法と停止せず連続的に移動しながら測定する2つの方法がある．一定間隔で停止する方法は，手動で巻き尺などに合わせて一定間隔で停止して行く方法であり，正確に一定間隔で計測することができる．また，停止中に計測するため，電極と路面との間の接地抵抗の変化を受けずに計測することが可能である．しかしながら，連続移動測定と比べて著しく時間がかかる．

5. 牽引型高周波交流電気探査装置と直流電気探査との比較実験

高周波交流電気探査の信頼性を確認するため，一時停止測定における高周波交流電気探査と直流電気探査の比較実験を行った．直流電気探査で使用した電気探査装置は，応用地質製 McOHM Profiler 4で，ステンレス電極を用いてダイポール・ダイポール配置で高周波交流電気探査の測定と同じ電極レイアウトで計測を行った．また，一時停止測定の高周波交流電気探査は，2度測定を行い再現性の確認を行った．比較対象を行ったのは，（国研）産業技術総合研究所（産総研）内のグラウンドと駐車場で，地表面はそれぞれ芝生とアスファルトで，ダイポール長は1m，受信器は4台である（Fig.5, Fig.6）．

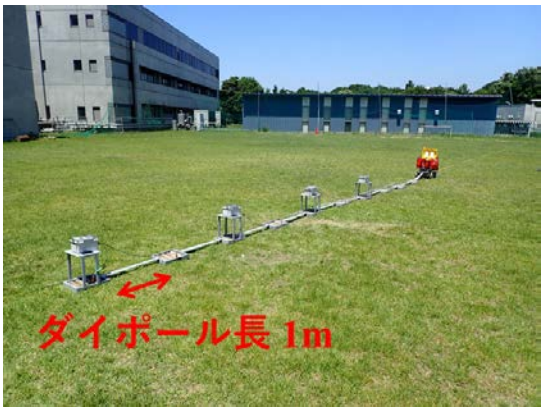


Fig.5 産総研内のグラウンドでの測定

その結果をFig.7とFig.8に示す．グラウンドおよびアスファルトで2回測定を行ったが，再現性は高く，2回の測定でほぼ同一の測定結果が得られた．

Fig.6 産総研内の駐車場での測定

また，直流電気探査との比較については，ステンレス電極の打設が可能なグラウンドのみで行った．その結果，Fig.7のように高周波交流電気探査と直流電気探査の結果で整合性があることを確認した．

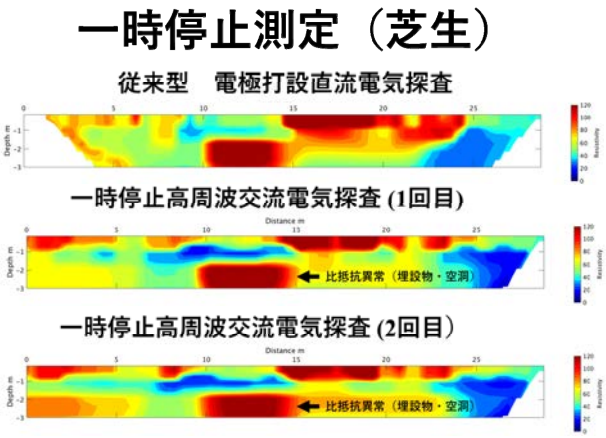


Fig.7 グラウンド（芝生）における一時停止測定結果

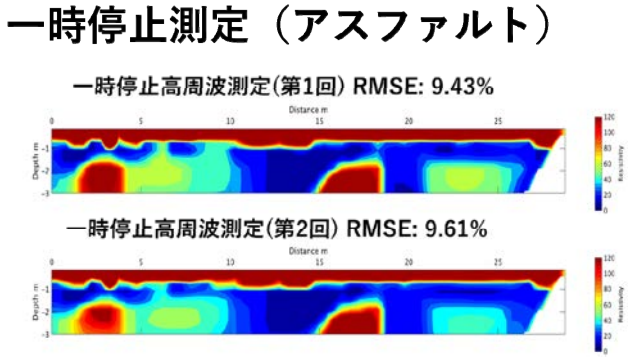


Fig.8 駐車場（アスファルト）における一時停止測定結果

Fig.7およびFig.8から分かるように，グラウンドと駐車場の両方で，一時停止での測定において再現性の高い測定結果が得られた．このように，一

時停止による測定で十分な再現性が得られ，安定した計測ができることが示された．

しかしながら，一時停止による測定は，測定に時間がかかるが，連続移動測定型は，連続的な牽引と測定により，より高速な計測が可能である．ここで，UGVの移動速度を0.5m/sに設定して連続走行させた場合の測定結果をFig.9とFig.10に示す．Fig.9とFgi.10は，同じ条件下で30mの測線を2回計測した結果である．

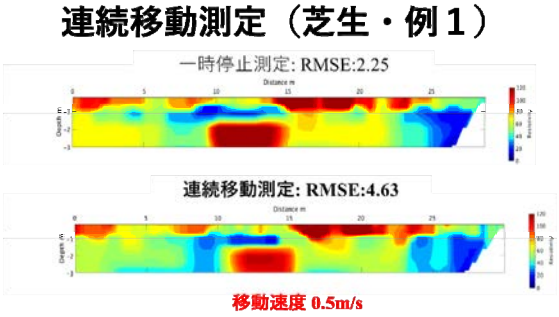


Fig.9 連続移動測定1回目

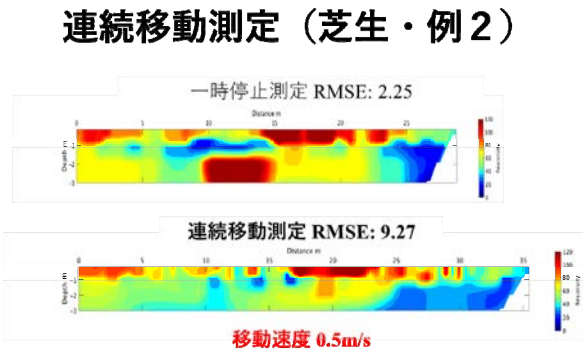


Fig.10 連続移動測定2回目

1回目の連続移動測定結果（Fig.9下図）では，直流電気探査の結果や一時停止測定結果と整合的な構造が得られているが，Fig,7の一時停止測定結果（1回目と2回目）と比べると，やや再現性が低い．また，2回目の連続移動測定結果（Fig.10下図）は，距離10mから15mに見られる特徴的な構造すら再現できていない．この理由として，連続移動測定における位置決め精度が低いことが考えられる．連続移動測定では，測定位置をGNSSから得られる位置情報から取得しているが，本測定装置で用いている単独測位のGNSSは，水平位置決め精度が6mと悪い．そのため，Fig.9とFig.10の連続移動測定の測線長が，一時停止測定の測線長（30m）と同じなのに，GNSSの位置座標から変換した連続移動測定の推定位置と実際の位置の間に大きな差が出ている．また，高周波交流電気探査では，受信電極の切り替えができないため，Fig.11のように奇数の電極隔離係数のデータと偶数の電極隔離係数のデータを別々に計測し，データを合成する必要がある．そのため，連続移動測定の推定位置が実際の位置と大きく異なる場合，合成データに大きなエラーが発生し，正確な比抵抗構造を求めることができない．

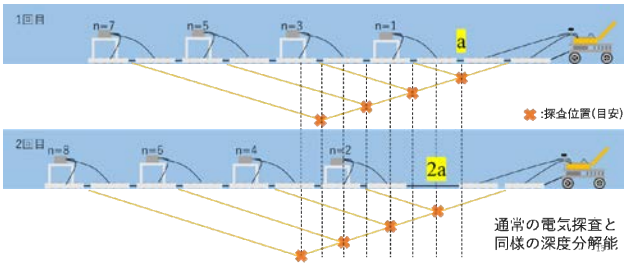


Fig.11 異なる電極隔離係数データの合成

6. まとめ

高周波交流電気探査は，地下の比抵抗構造を路面上から非破壊で探査可能である．そのため，都市部での調査に向いており，水道管の腐食土壌調査や地表面陥没の原因となる地下空洞探査にも有効と考えられる．本装置を牽引して探査を行う手法は，長距離の測定に適しており，特に道路下の地盤調査に有効であると考えられる．測定法には，一時停止中に測定する方法と停止せずに連続的に移動測定する2つの方法が考えられるが，その2つの方法についての比較実験を行った．その結果，一時停止では再現性の高い測定結果が得られた一方，連続移動測定では精度の高い測定結果は得られなかった．これは，測定に使用したGNSSの水平精度が低いことに起因している．現在，より精度の高いRTK-GNSS（水平精度2.5cm）を用いる研究を進めており，連続移動測定でも高精度の結果が得られるよう研究開発を進めている．

参考文献

1) Alsharahi, G., Faize, A., Louzazni, M., Mostapha, A.M.M. , Bayjja, M. and Driouach, A. (2019) Detection of cavities and fragile areas by numerical methods and GPR application, Journal of Applied Geophysics, 164, 225-236.

2) Cardarelli, E., Cercato1, M., Cerreto, A. and Filippo, G. D. (2010) Electrical resistivity and seismic refraction tomography to detect buried cavities. Geophysical Prospecting, 58, 685–695.

3) Jinguuji, M. and Yokota, T. (2022) Investigating soil conditions around buried water pipelines using VLF-AC electrical resistivity survey. Near Surface Geophysics, 20, 192–207.

土壌地下水汚染問題を振り返る

平田　健正 1)
1)　和歌山大学名誉教授

1. なぜ土壌地下水汚染なのか

土壌や地下水の汚染を含めて有害物質による環境汚染が顕在化するたびに，なぜ汚染されるのか，が問われる．汚染原因となった行為や活動が明らかになるに伴って，汚染物質の製造や使用を止め，新たに代替物質を開発し導入することもある．これまでに一千万種以上の化学物質が産み出され，現在工業規模で生産されている物質だけでも数万種に上ると言われている．化学物質は人間活動にとって有用であるから生産され，使用するのであるが，人工的に合成された物質は自然界に存在しない物質も多く，難分解性で生態系に影響を及ぼすものもある．

これらの化学物質は，製造，使用，処理，処分の過程で様々な形態をとって環境中に侵入していく．一例として図1には揮発性物質の環境への侵入経路を描いている．使用された物質の一部は，排ガスとして大気へ直接放出されているし，廃棄物や排水の不適切な土壌処分は土壌や地下水に直接侵入していくことになる．さらに環境中でどのような経路を経て移動しても，図中の矢印を辿れば，最終的には土壌や地下水環境に到達していることが分かる．

しかも土壌や地下水といった地下環境は，もともと有機物が少なく微生物活性が低い．さらに水や物質の移動速度は表流水に比べて格段に遅いため，難分解性の化学物質は長く残留する傾向がある．そのため先進諸国を中心に顕在化している有害物質による土壌や地下水の汚染は，これまでに経験した環境汚染の中でも最大規模の汚染に発展している．

汚染物質の暴露経路を遮断し健康影響リスクを低減すれば，土地利用は可能であるが（土壌汚染対策法），その一方で自ら所有する土地については環境基準達成を条件に土地の売買が行われているのが実情である．土壌汚染は土地の資産価値低下を招き，浄化した土地であってもスティグマ（イメージ低下や嫌悪感）が残るからであろう．

このように土壌や地下水といった地下環境の汚染問題は，環境財としての汚染防止と私有財産の資産リスクと言う両側面を有する．土壌汚染か土地汚染かが議論の対象となり，対策にしても環境基準達成はもとより，ときにはゼロリスクが求められることもある．

土壌地下水汚染は身近な生活空間の中で生じている環境問題であり，それだけに社会的関心は高い．特に土壌汚染は，私有地あるいは私有財産と不可分の関係にある点で，他の環境問題とは一線を画している．本小論では，こうした土壌地下水汚染の調査や汚染の現状，法制度の整備，さらには対策の変遷などについて，これまでにかかわってきた事例を中心に紹介する．

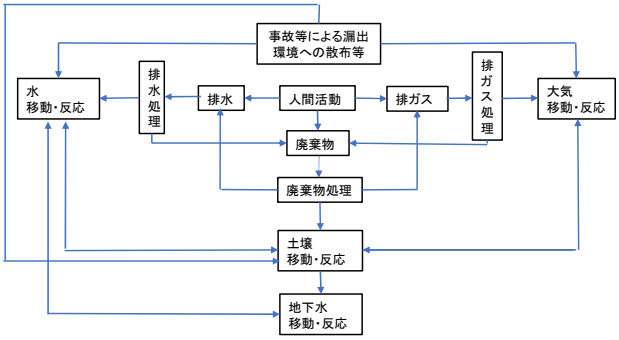


図1　揮発性物質の環境への侵入経路

2. 汚染の現状と法制度の整備

2.1　法制度の変遷

わが国の土壌汚染は，渡良瀬川流域の銅汚染，神通川流域のカドミウム汚染や土呂久のヒ素汚染など，鉱山由来の農用地汚染に始まる．なかでも足尾鉱毒問題（渡良瀬川流域）は，銅精錬工場からの排水や排煙による典型的な土壌汚染事例である．こうした重金属類による土壌汚染は，一等早くから指摘されてきた環境問題であり，その後も農作物への影響や神通川流域のカドミウム汚染による人体影響（リウマチあるいは骨軟化症）などが顕在化するに至り，1970年に「農用地の土壌の汚染防止等に関する法律」が定められた（図2）．

その後も農用地に加えて，工場跡地の再開発や水質汚濁防止法に基づく地下水質の常時監視により，市街地の土壌汚染も次第に明らかになってくる．1970年代には東京都の鉱滓埋立跡地で六価クロム汚染が顕在化し，さらに筑波研究学園都市に移転する国立研究機関の跡地から数多くの土壌汚染が発見されるなど，市街地土壌汚染が引き金となり，1991年に土壌環境基準が制定された．

諸外国をみても，欧米の先進諸国を中心に土壌

地下水汚染が顕在化している．地質構造や土地利用特性が違っても，共通するのは土壌地下水中での水や物質の移動速度は遅く，原因となる行為と汚染発現にはかなりの時間遅れのあることである．代表的な事例として米国ラブカナルにおける有機塩素化合物汚染がある（寺島，1996）．1940年代に始まる化学工場廃棄物の埋立が原因であるが，周辺住宅地域の地下室で臭気や化学物質の漏洩が確認されたのは30年を隔てた1970年代半ばである．健康影響を惹起し，２度の大統領声明が発せられるまでに発展した汚染事例である．このラブカナル汚染が契機となり，1980年代初頭には米国でスーパーファンド法(EPA,2022a)による土壌地下水汚染の修復と革新的技術の開発が開始されている．ほぼ同時期の1980年代始めには，米国サンタクララバレー（通称シリコンバレー）で1,1,1-トリクロロエタンやトリクロロエチレンなどの揮発性有機塩素化合物による土壌地下水汚染が発見され，しかもIC産業など先端産業が汚染原因であっただけに，大きな社会問題となっていた．

翻って当時のわが国は，国全体がシリコンアイランドと呼ばれるほどICや精密機器生産の世界基地であった．洗浄剤としてのトリクロロエチレンなどの使用目的や方法が米国とほぼ同じであり，シリコンバレーで発見された土壌地下水汚染と似通った汚染の存在が予想されてはいた．そうした当時の状況で，1982年に全国規模の地下水汚染調査が実施されたのであるが，検出された化学物質や地下水汚染は予想を遙かに超えるものであった（環境庁，1983）．

1982年の環境庁調査とその後に継続されている地下水汚染モニタリングにより，全国各地で地下水汚染や土壌汚染が明らかになってくる．これらの汚染実態に基づいて土壌環境基準に加えて地下水環境基準が整備され（1997年），環境基準を担保する調査・対策技術の開発・普及が進められてきた．環境基準は環境基本法のもとで維持することが望ましい目標値として定められている．適正な環境を維持するため1999年には「土壌・地下水汚染に係る調査・対策指針運用基準」が策定された（環境庁，1999）．このうち土壌汚染関連は，2002年に策定された「土壌汚染対策法」に引き継がれていく．

2.2　全国規模の地下水質モニタリング

環境庁の実施した地下水汚染の全国調査は，地域的なバランスを考慮して全国15の都市（札幌，仙台，川崎，横浜，金沢，長野，名古屋，京都，大阪，神戸，広島，高松，北九州，福岡，熊本）から1,360検体の試料を採取し分析している（環境庁，1983）．対象物質はトリクロロエチレンやテトラクロロエチレンなどの揮発性有機塩素化合物を中心に，硝酸性窒素を含めた18物質であり，その検出率を図3に描いている．

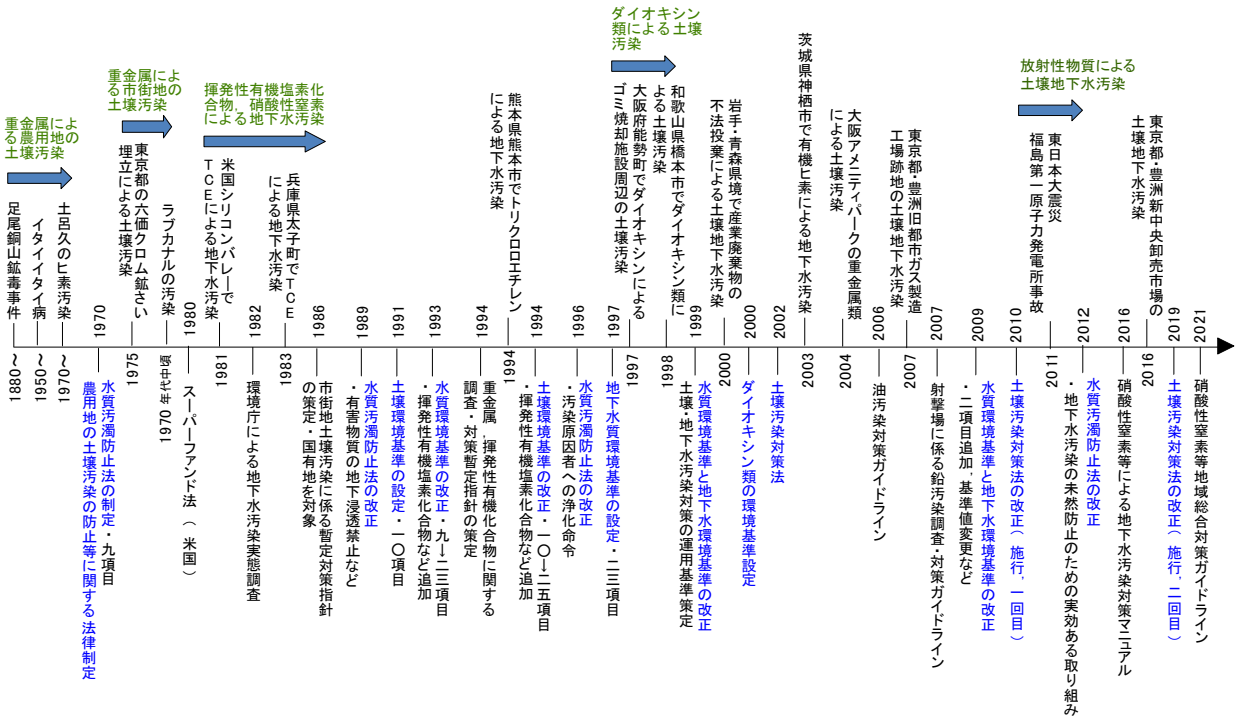


図２　土壌地下水汚染事例と法制度の変遷（和歌山大学江種伸之教授作成）

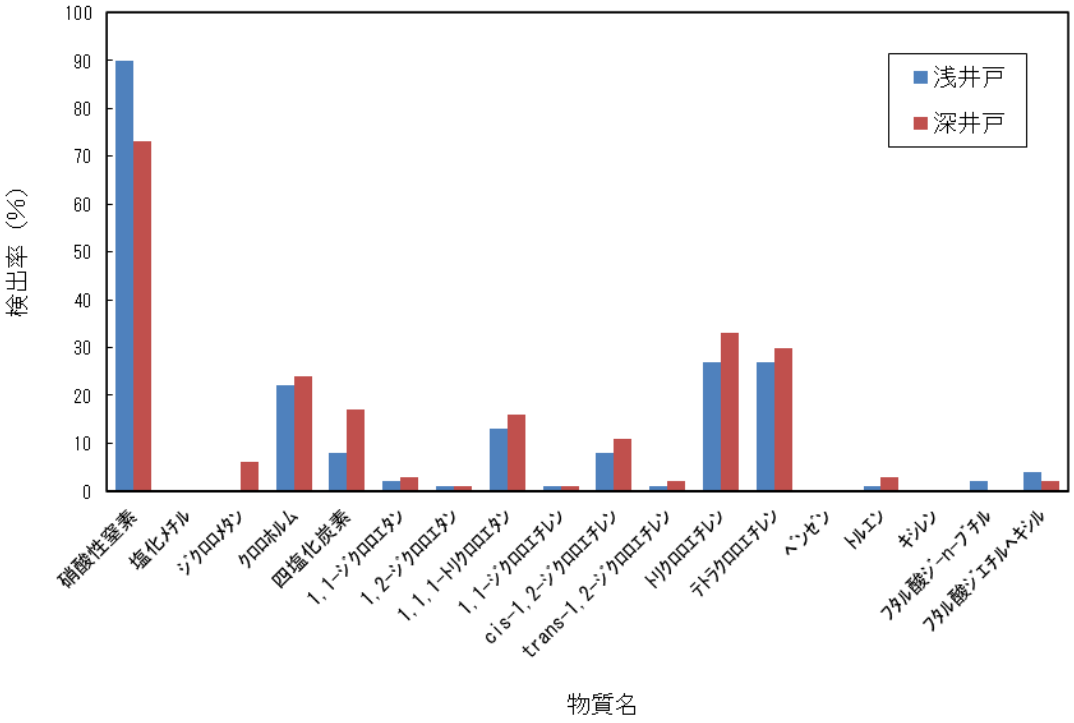


図 3　1982 年に実施した環境庁地下水汚染実態調査結果（環境庁，1983）

この調査で最も検出率の高かった物質は硝酸性窒素であり約80%の試料から検出され，10%が水道水質基準値（10 mg/L）を超過していた．ただ硝酸性窒素以上に注目されたのは発ガン性の疑われるトリクロロエチレンやテトラクロロエチレンであった．現在の環境基準に照らすとトリクロロエチレンで3%，テトラクロロエチレンで4%の試料が基準値を超えて検出されたからである．トリクロロエチレンなど揮発性有機塩素化合物はその緊急性から先行して土壌・地下水汚染の調査法や対策技術の開発が進められてきたが，硝酸性窒素による地下水汚染は，生活排水の地下浸透や農地への施肥，畜産廃棄物の不適切管理などと関連して，かねてより指摘されてきた環境問題である．

この全国調査が契機となり，環境省は1984年度から都道府県等の協力を得て地下水質調査を継続実施している（環境省，1984-2022）．地下水質の環境基準超過率の推移を図4に示しているが，当初数%が超過していたトリクロロエチレンなどは最近では１%程度にまで低下している．一見して地下水汚染状況が改善しているように見受けられるが，調査は毎年度地下水採取地点を変更する概況調査である．概況調査は，それぞれの自治体が所掌する行政区域を5kmあるいは2kmのメッシュに区切り，5年で全区域をカバーするように地下水採取計画が策定されている．

そのためこの調査結果は，汚染される可能性の高い都市域から周辺地域にまで調査が進んできたからと考えられる．この概況調査では2020年度までに15万検体の試料が採取分析されており，地下水中のトリクロロエチレンやテトラクロロエチレンは平均的に1%が地下水環境基準を超過している状況にある．

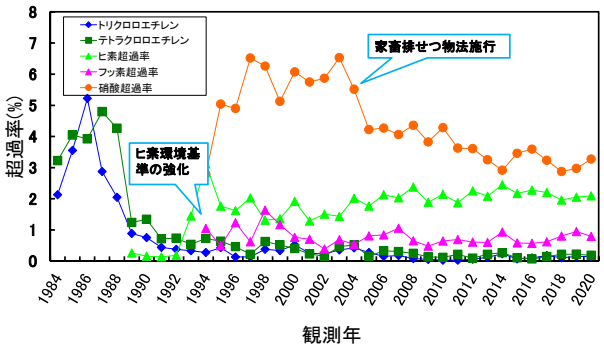


図 4　地下水の有害物質超過率の推移．環境省の調査結果より作成（環境省，1984－2020）

2.3　土壌汚染調査

水循環基本法において地下水は，地表水とともに水循環を構成する要素であり，公共性のある国民共有の財産として位置づけられている（宮崎淳，2015）．一方で土壌あるいは土地は私有地が多く，試料採取にしても土地所有者の同意が必要で，任意に試料採取や分析を実施することは難しい．そ

のため土壌汚染対策法では，機会を見て土壌調査を実施することが明示されている．その調査契機として，基本的には，

(1) 特定有害物質を使用する水質汚濁防止法の特定施設を廃止する場合，
(2) 面積要件として3,000m²を超える土地の形質変更を行う場合，
(3) 土壌汚染により健康被害が生じるおそれがあると都道府県知事が認める場合，

が定められている．調査手法や調査精度などが土壌汚染対策法を満たしていれば，自主的な土壌汚染調査を実施することは可能である．

土壌汚染調査事例数と基準不適合事例数の推移を図５に示した．同図は，2020年度までに都道府県等が把握した調査数であり，累計調査数34,071件に対して累計不適合事例数は15,472件であった（環境省，2022）．図5には，土壌環境基準の設定や土壌汚染対策法の施行なども経時的に記しているが，環境基準の強化や法施行・改正といった施策の強化・改正に伴い土壌汚染調査が増える傾向にある．

不適合事例では，トリクロロエチレンなどの揮発性有機塩素化合物が多く，重金属類では鉛，フッ素，ヒ素の順に汚染事例数が多くなっている．ただこれらの重金属類は，自然状態の土壌や岩の構成成分であり，自然由来の汚染と判定される事例もある．

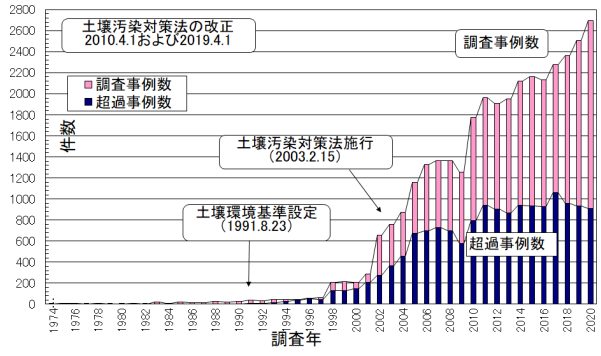


図５　土壌汚染調査事例数の推移（環境省，2022）

3. 法制度と土壌地下水汚染対策事例

3.1 調査対策技術の実証試験

これまでに汚染機構解明調査や対策に携わってきた汚染事例を中心に，法制度の整備を含めて図２に経年的に整理している．調査や対策事例が積み上がり，汚染に関係する情報量の増加や技術革新が法制度の整備を促し，そのことが新たな手法開発の原動力にもなっている．

環境庁（当時）が全国各地で実施した1982年の地下水汚染調査が系統立った調査や対策の始まりである．その後に地下水を水道原水として利用している水質調査が加わり，兵庫県・太子町などのトリクロロエチレンによる地下水汚染が発見された．太子町の汚染対策は，汚染土壌の除去後に継続して地下水揚水を実施し，30トン近いトリクロロエチレンを回収して浅い地下水については環境基準達成まで浄化した事例である（平田，2006）．地下水揚水は時間はかかるが確実に汚染物質を除去できる技術であることが実証されている．

さらに1990年代始めには，トリクロロエチレンなどの揮発性有機塩素化合物の汚染源探査に表層土壌ガス調査を行って汚染物質の侵入源を絞り込み，高濃度土壌ガス地点でのボーリング調査と組み合わせて，土壌や地下水中に残留している高濃度汚染を把握する現場実証試験が行われている．山形県東根市ではフィンガープリント法やヘキサン固定法，検知管法など各種土壌ガス調査法の汚染検出感度を比較した．この汚染源探査の比較試験では，ヘキサン固定法など中程度の感度では60mメッシュ，感度の低い検知管法では10mメッシュのかなり密な土壌ガスの採取分析が必要である結果が得られた（平田ほか,1994）．こうした土壌ガス調査法は，揮発性物質の公的調査手法として活用されている．

トリクロロエチレンで汚染された土壌と地下水浄化に，土壌ガス吸引と地下水揚水の二重吸引技術についても実証試験が行われた（平田，1996a）．両者のトリクロロエチレン除去率を図6に比較している．対策当初の土壌ガス吸引は地下水揚水の除去率を1桁上回っているが，対策の進捗とともに除去率は逆転し，同一の技術を対策開始から最終段階まで適用することは効率的でないことを示している．対策の進捗とともに汚染物

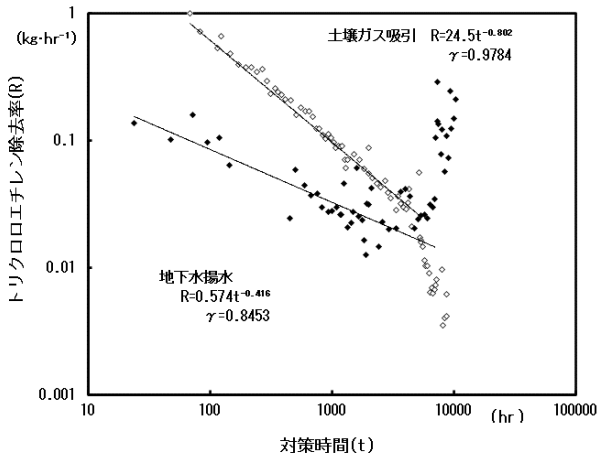


図６　地下水揚水と土壌ガス吸引の除去率の比較

質の土壌や地下水中での存在形態が変化するからであり，より適切な技術を選定し，あるいは組み合わせて用いることの必要性を示唆している．

こうした実証試験を積み重ねる一方で，環境基準の強化や土壌汚染対策法の施行など，法制度が整備されるに伴って，汚染の実体や対策そのものが変化していく．

3.2 社会的関心の高い汚染事例

土壌汚染対策法は，有害物質を管理することによって人の健康影響を防止する一方，経済活動においては汚染された土地の完全浄化が求められるなど，両者にねじれ現象が生じている．

こうした中で社会規範への挑戦とも取れるおぞましい環境汚染問題が頻発している．茨城県神栖市における有機ヒ素汚染（平田，2022a），大阪アメニティーパークの重金属汚染，三重・愛知・岐阜・京都四府県にまたがるフェロシルト問題など，これまでにかかわった汚染事案だけでかなりの数に上る．こうした土壌地下水汚染を巡る環境問題は，単に特殊事例として片付けられない側面を有し，それどころか真摯な取り組みを蝕み，土壌地下水汚染問題解決への道のりをさらに険しく危うくすることにもなりかねない．

東京都・旧都市ガス製造工場跡地（石炭乾留に起因する汚染，豊洲埋立地）の土壌地下水汚染問題は，土壌汚染対策法のあり方とも関係して，大きな社会的関心を集めた．この土壌地下水汚染問題解決のため，専門家会議が2007年5月に設置され，過去の土壌地下水汚染調査・対策の検証やあるべき土壌地下水汚染対策を検討することとなった（東京都，2008）．過去の調査結果を基に追加調査を実施し，1地点の地下水から高濃度ベンゼン汚染(10mg/L)とシアン化合物汚染（8mg/L）が検出された．この結果は，土壌地下水汚染の基本調査の必要性を強く指示し，対象となる豊洲埋立地全域（40.7ha）で10mメッシュ間隔（4,122箇所）の表層土壌と地下水を採取分析することとなった．

これにより1箇所ではあるが土壌溶出濃度430mg/Lのベンゼンと86mg/Lのシアン化合物が検出され，再度その周辺でも汚染の広がりを把握する調査が行われた．ところが高濃度地点の上下0.5m地点でも，横方向5m地点でも高濃度汚染は確認できず，小規模なパッチ状で汚染土壌（おそらくタール状）の存在することが推察された．こうした小規模パッチ状の土壌汚染をボーリング調査で捉えることは難しく，そのため対象とする豊洲埋立地全域で地下水面上2m範囲を全て掘削して汚染物質の存在状況を確認すると言う，これまでに類を見ない対策に発展することになった．

その後，豊洲新市場が建設され，この建屋地下ピットに地下水が湛水する状況が生じたため，改めて専門家会議が招集された（2016年）．詳細は報告書（東京都，2017）に譲るが，地下ピットの床面にコンクリートを打設し，地下水揚水など地下水管理を強化する対策が実施された．

4. 看過されがちな土壌地下水汚染

社会生活に役立つから大量の化学物質が製造・使用されてきた．このことが土壌地下水汚染を惹起する最大の要因である．全国規模の地下水汚染調査結果では，硝酸性窒素の環境基準超過率が最も高く，国も自治体も下水道の整備や農地への施肥基準の見直しなど適宜施策を講じてきたが，大きく改善する兆しは見えない．

窒素はアミノ基の構成元素であり，生命体の必須元素である．肥料は農業生産の量と質を確保するための必須の物質である．この極めて有用な硝酸性窒素と，全く役に立たない物質として毒ガスと関連する有機ヒ素化合物を取り上げ，両極にある物質の汚染事例を紹介する．

4.1 硝酸性窒素による地下水汚染

地下水に含まれる硝酸性窒素の起源は多様であり，環境省の調査結果でも汚染原因が明確になった事例は汚染事例3,239件のうち58%の1,879件である（環境省，2021）．その内訳は，農地への過剰な施肥1,749件（93.1%，母数1,879件），生活排水の地下浸透757件（同40.3%），家畜排せつ物の不適正処理739件（同39.3%）の順となっている．

さらに硝酸性窒素による地下水汚染は，事業場由来の揮発性有機塩素化合物汚染とは際立った違いを見せる．図4の硝酸性窒素地下水環境基準超過率は9万検体の試料を基に得られた結果である．1982年の調査結果に比べて超過率は低いものの，それでも調査当初の3%から調査が進むに従って徐々に増加し，毎年度5〜6%といった高い超過率を維持している．概況調査において超過率が低下しない傾向は，汚染物質の供給源が事業場由来のポイントソースである揮発性有機塩素化合物に対して，農地への施肥などノンポイントソースとして供給される硝酸性窒素の特性を表していると考えられる．

硝酸性窒素の供給源の一つである畜産廃棄物について1999年に家畜排せつ物法が施行され，施設整備に要する最大5年間の猶予期間を経て2004年に本格施行に移っている．この本格施行後から環境基準超過率は6%から低下し始め最近では3%前後を推移しているが，今後も容易には低下しないであ

ろう. 法制度が強化される以前に素掘りピットなどに投棄された家畜排せつ物が残置されていることも一因である.

このように硝酸性窒素による地下水汚染の主要な原因は，農地への施肥や畜産廃棄物の不適切処理に由来するとみられている（平田，2022b）. 少し古くなるが，ニンジンへの施肥が主因となる各務ヶ原の地下水汚染事例（寺尾，2001）やサトウキビへの施肥と生活排水の地下浸透に起因する宮古島の事例（近藤，1997）などが知られている.

素言うまでもなく窒素はリン酸やカリウムと並んで植物体の必須元素であり，リン酸は実肥え，カリウムは根肥えと並んで,窒素は葉肥えとして知られている. そのため高原野菜のセロリやレタス，茶など葉物野菜に多量の窒素肥料を施用する傾向がある. 現在は肥培管理技術など栽培技術が改善され茶樹園地への窒素施用量は年500kg/ha程度まで減量されているが，かつては1トン/haを超えていた時期もある.

わが国の観測結果をみる限りでは，年間の窒素施肥量が200 kg/haを超える付近から急激に増加し，施肥量の約半量が地下浸透するとの報告もある（平田，1996b）. 茶樹園地を例に年間施肥量500kg/haの半量250kg/haが溶脱し，降水を含めて1,000 mmが地下浸透すると考えると，浸透水中の硝酸性窒素濃度は25 mg/Lにもなり，これは地下水環境基準10mg/Lを超えている.

こうした多量の窒素肥料，特に無機化学肥料は地下水への硝酸性窒素の供給に加えて，水環境に酸性化を招く. 施用された無機態（硫安）窒素は，土壌中ではアンモニア態として供給され，硝酸性窒素にまで硝化される.

$(NH_4)_2SO_4 + 4O_2 = 2HNO_3 + H_2SO_4 + 2H_2O$

その過程で水素イオンが放出され，土壌中で酸性化が生じる. その水素イオン濃度によりpHが低下し，土壌中のアルミニウムイオンが溶出する. 例えばカオリナイトは，

$Al_2Si_2O_5(OH)_4 + 6H^+ = 2Al^{3+} + 2H_4SiO_4 + H_2O$

となり，植物プランクトンの生育阻害に加えて，魚類のえらへの吸着により生態影響を及ぼすことになる. 図7は，茶樹園地の湧水や下流の池水で測定されたアルミニウムイオン濃度とpHの関係を示している(井伊ほか，1998). 湧水ではpHが6以下になると著しくアルミニウムイオン濃度が上昇している. 多量の窒素肥料の施用は，硝酸性窒素による地下水汚染に加えて，流域の酸性化と生態系への影響も発現することが懸念される.

こうした茶樹園地への窒素施肥ついて，減肥しても茶葉の収量を減らさないような肥培管理技術の改良も試みられている. 福岡県では年間1,192 kg/haの窒素施用量を810 kg/haにまで減量し，2年間の対策で茶樹園流出水の硝酸性窒素濃度が34 mg/Lから29 mg/Lにまで減少することを確認している（松尾ほか，2000）. 三重県では慣行施肥量を1/3の300 kg/haにまで減肥し，地下水の硝酸性窒素濃度は基準値を上回るが減少傾向にあること，さらに生葉収量や荒茶品質は慣行区と同等であることを実証するなど，茶樹園地の硝酸性窒素対策に光明をもたらす結果も得られている（喜多嶋，2009）.

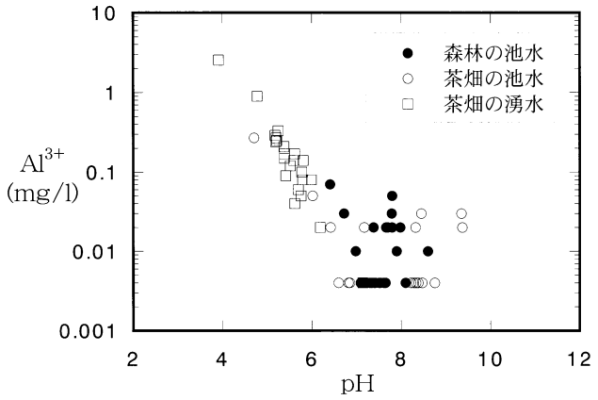


図7　茶樹園地下流で観測されたpHとアルミニウムイオン濃度の関係(井伊ほか，1998)

4.2　有機ヒ素化合物による土壌地下水汚染

(1)汚染発見の経緯

茨城県神栖市（当時は神栖町）における有機ヒ素による地下水汚染は，近接した地区住民に神経症状がみられたことから，筑波大学附属病院の担当医が地元保健所に井戸水調査を依頼したことに始まる. その結果，飲用していた井戸水（A井戸）から4.5mg/Lのヒ素が検出された（2003年3月）. この飲用井戸の西方1kmに位置する井戸でも0.43mg/Lのヒ素が検出され，いずれのヒ素も有機ヒ素化合物（ジフェニルアルシン酸，DPAA）であることが判明した.

このDPAAはジフェニルクロロアルシンやジフェニルシアノアルシン（いずれも毒ガス，くしゃみ剤）の原材料であり，両物質の分解時にも副生されるため，当初，毒ガス由来の地下水汚染の可能性が指摘されていた. とりわけ当時は旧日本軍が中国ハルバレイなどに遺棄した化学兵器の処理，さらに国内では神奈川県寒川町の旧相模海軍工廠跡地の道路建設現場で毒ガス成分マスタードが入ったビール瓶が発見されなど（環境省，

2005），旧軍由来の毒ガスによる環境汚染が大きな社会問題となり，対策が急がれていた．

こうした状況にあって，一般環境中の地下水飲用による人への健康影響発現を重く見て，神栖市の地下水汚染調査と対策は政府直轄（環境省担当）で実施することとなった．環境省では茨城県や神栖市等と協力して，地歴・DPAA等の情報収集，土壌地下水汚染の調査と高濃度汚染域の特定，数値解析による汚染機構解明と汚染物質除去対策，さらに除去対策後のモニタリングを実施してきた．

神栖市の汚染事例では，当初から浅層より深層の地下水から高濃度のDPAAが検出された．しかも30mg/Lを超える濃度であり，なぜ深い地層の地下水から高濃度ヒ素が検出されるのか，汚染機構解明の中心を成す課題であった．

特に健康影響を発現したA井戸周辺ではDPAAの汚染源絞り込みのボーリング調査を実施し（図8），2005年1月に飲用井戸南東90m地点で極めて高濃度のDPAAを含むコンクリート様塊が発見された（図9）．このコンクリート様塊の掘削と詳細分析により汚染機構解明が飛躍的に進むこととなった．掘削現場から3つのコンクリート様塊が掘削され，周辺の小片を含めると重量は86.6トンと推定された．塊Ⅰから最大4,800mg-As/kgのDPAAが検出され，溶出濃度は3,200mg-As/Lに上る極めて高濃度な汚染であった（環境省，2013）．

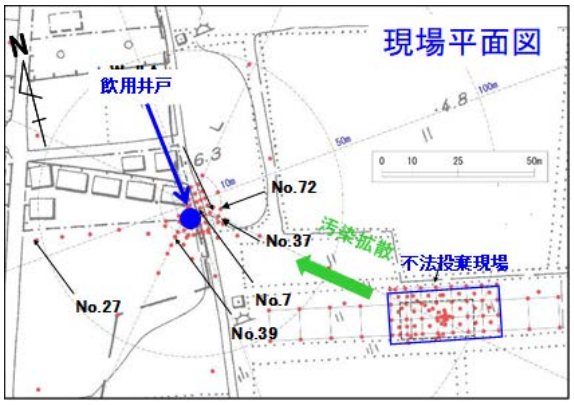


図8　飲用井戸Aとボーリング地点の位置

(2)汚染機構解明の数値解析

神栖市の地質は，地表面から埋土層，沖積砂層・礫層，洪積砂層・礫層が洪積粘土層上に堆積している．この地層の中で洪積砂礫層の透水性が高く，主要な地下帯水層を形成している．神栖地

図9　A井戸南東90m地点で発見された3つのコンクリート様塊

域特有の砂利採取跡の人工地盤と自然地盤を立体表現し，さらに3,200mg/Lという溶出濃度を数値モデルに投入して，その後の汚染物質DPAAを数値的に追跡した結果が図10である．数値解析の始点は，コンクリート様塊の掘削時に発見された飲用水缶などの製造日から1993年10月とした．

図10は，2mg/Lの包絡線の経時変化を描いており，コンクリート塊から溶出したDPAAを含む水（緑色）は自重によって地下水中を降下浸透し，30m付近の深層地下水にまで到達する．その後は透水性のよい深度25～30m付近を流れる地下水流れに運搬され，飲用井戸Aの地下水揚水効果もあって，2001年11月頃には飲用井戸Aに到達していることが読みとれる（渡辺ほか，2011）．

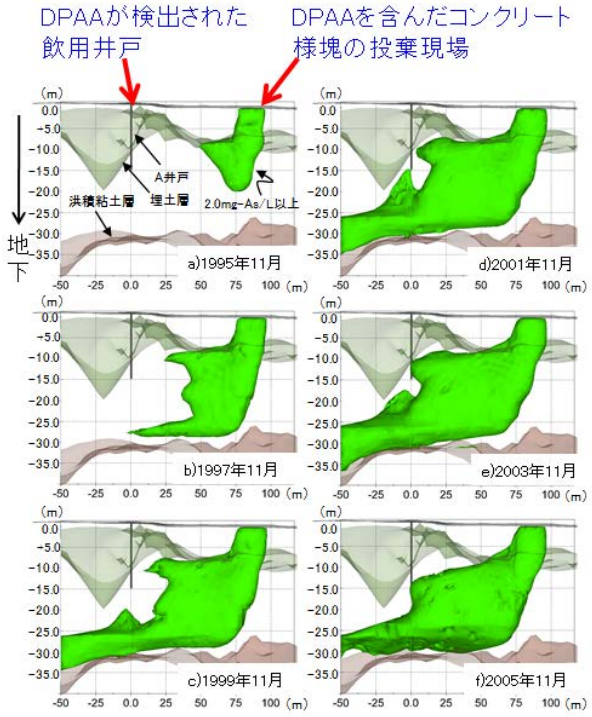


図10　地下水数値解析で得られた汚染プルーム

こうした数値解析結果は，汚染機構解明の初期から最大の課題であった深層地下水で高濃度DPAAが観測されるメカニズムを解明するとともに，地下水揚水や土壌洗浄など具体的なDPAA除去対策の策定に活用されている．

コンクリート様塊から高濃度のDPAAは検出されても，ジフェニルクロロアルシン，ジフェニルシアノアルシン，マスタード，ルイサイトなど毒ガス成分は全く検出されなかった．これらの結果より，神栖市地下水の有機ヒ素汚染はDPAAを混入したコンクリート様塊の不法投棄に由来すると結論できる．投棄されたDPAAは，コンクリート様塊から骨材成分（30％）を差し引き，4,800mg-As/kgのDPAAが一様に溶解していると見なすと約290kgと推定されている．

(3)地下水揚水など汚染対策と効果

数値解析結果によると，汚染物質除去対策を実施せず清浄な地下水による希釈など自然浄化に委ねた場合，神栖地区全域でヒ素の地下水環境基準0.01mg/Lを達成するのは60年後と推定された．より早期に環境改善を図るため，(1)汚染源である高濃度コンクリート塊の除去，(2)その周辺汚染土壌の水道水注入洗浄と注入水の除去，(3)A井戸周辺の地下水に存在するDPAA（数値解析より推定161.3kg-As）の90%を揚水・処理（揚水量日量最大300トン），の対策を2009年度から2011年度までの3か年実施することとした．

土壌洗浄と地下水揚水で3年間のDPAA除去量は159kg-Asとなり，当初の目標を越えて除去率は98.6%となった．こうしたDPAAの除去対策によって，自然浄化のみでは60年要する期間が40年まで短縮できると数値解析結果より推定されている．除去対策実施後10年が経過したが，2021年秋季の地下水中のDPAA濃度は，掘削現場付近で1mg-As/Lを超過する地点はあるものの，全体として極めて順調にDPAA濃度は減少している．かつて30mg-As/Lを超過していたA井戸周辺でも(図11(a))，0.1mg-As/L以下にまで低下し（図11(b)）ている（平田，2022a）．

5. 法制度とモニタリングの重要性

土壌汚染対策法が施行されて20年が経過した．その間，2回の改正を含めて環境基準の強化など法制度の整備が進んでいる．土壌地下水の浄化技術にしても，対策の始まった当初は汚染土壌の掘削除去や地下水揚水，揮発性有機塩素化合物については土壌ガス吸引やエアースパージングといった物理的対策技術が，化学分解や微生物分解など原位置無害化技術までに発展し，実用化されている．

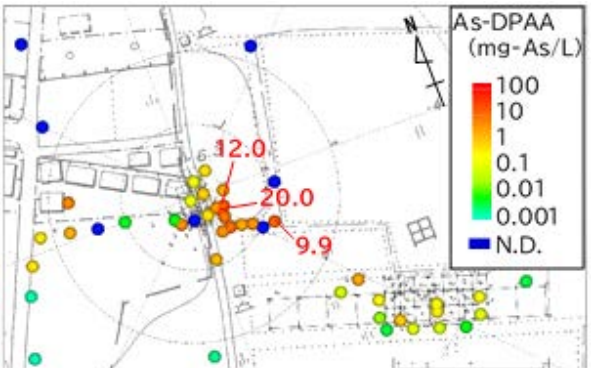
最近では粘性土などに浸入した揮発性物質を熱をかけ追い出し，地下水中への溶出を促進して微生物分解などで無害化するハイブリッドな技術開発が進んでいる．特に粘性土は一度対策を施しても再度リバウンドする現象がしばしば観測され，こうした最終段階ともいえる技術開発が必要とされるまでに対策が進んできたからである．革新的な技術開発は法制度が確立されて初めて可能となり，開発された技術が実用化されてさらに法制度や環境基準の強化が図られるなど，相互

に強いシナジー効果を持つ．

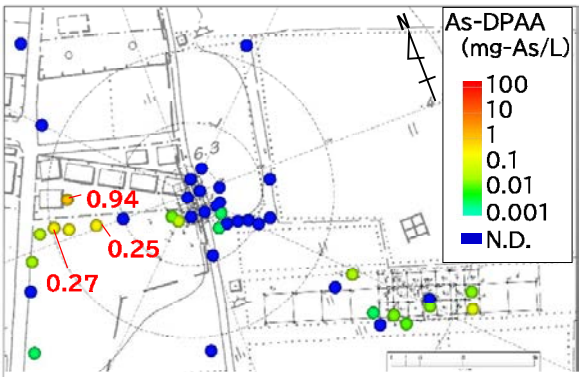
管理対象物質も使用することを目的に製造されてきた物質に加えて，製造・使用・処理・処分の過程で非意図的に生成する物質まで拡がっている．ダイオキシン類は既に環境基準が設定され，化石燃料の不完全燃焼に起因する多環芳香族炭化水素についてもスクリーニングされている．最近では泡消火剤や撥水剤など極めて多様な用途をもつPFOSなど有機フッ素化合物が要監視項目に指定され，（PFOS＋PFOA）合計値として指針値50ng/Lが定められた．河川水からも検出され，人口密度とある程度の相関を持つことも報告されている（茂木，2012）．有機フッ素化合物による地下水汚染原因究明の調査も進められている（沖縄県，2022）．この有機フッ素化合物についてごく最近になって米国環境保護庁から，PFOS：0.02ng/L以下，PFOA：0.004ng/L以下といった分析精度が担保できるかどうか危惧されるほどの低濃度の生涯健康勧告値が発表された（EPA，2022b）．こうした厳しい勧告値に実効性がどの程度あるのか，今後の判断を待たなければならないが，その動向に留意する必要があろう．

このように対象物質も環境基準値も，今後に益々強化される傾向にある．しかも有害性のある元素や化学物質は多様である．これらの物質は，様々な法律で規制され管理されているが，大気・水・土壌の媒体間で存在形態は大きく異なる．環境基準物質は限られているが，それでも基準値の10倍を超える物質は管理型処分場の受け入れ基準を超えており，一般環境中での検出については敏感である必要があろう．ヒ素など土壌の構成成分として，自然由来とみなされる事例も例外ではない．

特に土壌や地下水は，様々な物質が最終的に集積する媒体であり，そこでのモニタリングを通して微細であっても，人間活動に由来する何らかのシグナルを検知できる可能性がある．不断にモニタリングし，足下で生じている環境状態を把握するには国として体力が必要となるが，物つくりや経済活動の環境影響を知る手掛かりとなる．



(a) 2009 年冬季 30m 深度の地下水濃度



(b) 2021 年秋季 30m 深度の地下水濃度

図 11　A 井戸周辺の地下水揚水など DPAA 除去対策前後の地下水濃度の比較

参考文献

1) EPA(2022a)：Land, Waste, and Cleanup Topics. https://www.epa.gov/environmental-topics/land-waste-and-cleanup-topics.
2) EPA(2022ｂ)：Lifetime Drinking Water Health Advisories for Four Perfluoroalkyl Substances (PFAS),EPA,FRL 9855-01-OW.https://www.epa.gov/system/files/documents/2022-06/prepublication-four-pfas-june-2022.pdf
3) 平田健正・中杉修身・大岩敏男・唐　常源・宮本健一(1994)：土壌・地下水汚染調査における表層土壌ガス調査法の役割.第３回地下水・土壌汚染とその防止対策に関する研究集会講演集,87-92.
4) 平田健正(1996a)：第7章わが国の対策事例.平田健正編著「土壌・地下水汚染と対策」,日本環境測定分析協会,103-128.
5) 平田健正(1996b)：わが国における硝酸性窒素による地下水汚染の現状と問題点.水環境学会誌,19,950-955.
6) 平田健正(2006)：地下水・土壌汚染の現状と対策.地下水学会編「地下水・土壌汚染の基礎から応用」,理工図書,1-26.
7) 平田健正(2022a)：有機ヒ素化合物による土壌地下水汚染と対策.日本学術会議安全工学シンポジウム2022「老朽・遺棄化学兵器廃棄リスク評価・管理の現況と展望」.
8) 平田健正(2022b)：硝酸性窒素による地下水汚染問題の環境省の取り組み.地学雑誌特集号「硝酸性窒素による地下水汚染問題の過去・現在・未来」,(印刷中).
9) 井伊博行・平田健正・松尾　宏・田瀬則雄・西川雅高(1998)：茶畑周辺の池水のpH変化と窒素,リン,硫黄,アルミニウムの挙動について.土木学会論文集VII,594,57-63.
10) 環境庁(1983)　：昭和57年度地下水汚染実態調査結果.
11) 環境省（1984-2022）：令和2年度 地下水質測定結果.http://www.env.go.jp/water/report/r03-01_full_r.pdf.
12) 環境庁(1999)：土壌・地下水汚染に係る調査・対策指針運用基準. https://www.env.go.jp/hourei/06/000019.html.
13) 環境省(2005)：A事案の区域である寒川,平塚,習志野における環境調査の結果について. https://www.env.go.jp/chemi//gas_inform/sonota_singi/gas/17_01/mat03-1.pdf.
14) 環境省(2013):茨城県神栖市における汚染メカニズム解明のための調査(高濃度汚染対策等報告書). https://www.env.go.jp/chemi/report/h25-04/index.html.
15) 環境省（2021）：硝酸性窒素等地域総合対策ガイドライン―概要版,計画策定編,技術・資料編―.https://www.env.go.jp/water/chikasui/post_91.html.
16) 環境省(2022)：令和2年度土壌汚染対策法の施行状況及び土壌

汚染調査・対策事例等に関する調査結果.
http://www.env.go.jp/water/report/r3-01/index.html.
17) 喜多嶋秀幸(2009)：環境に配慮した茶の施肥削減.技術と普及,46(9),17-19.
18) 近藤洋正・田瀬則雄・平田健正(1997)：沖縄県宮古島における地下水中の硝酸性窒素の窒素安定同位体比について.地下水学会誌,39(1),1-15.
19) 松尾　宏・馬場義輝・中村融子・徳永隆司・北森成治・平田健正・西川雅高(2000)：窒素フロー収支からみた茶畑施肥量削減の効果―茶畑の事例―.福岡県保健環境研究所年報,54-59.
20) 宮崎　淳(2015)：水循環基本法における地下水管理の法理論-地下水の法的性質をめぐって.地下水学会誌,57(1),63-72.
21) 茂木　茂(2012)：県内河川における残留性有機フッ素化合物の汚染実態－PFOS,PFOAと前駆物質について－.平成24年度埼玉県環境科学国際センター講演会要旨,9-14.
22) 沖縄県(2022)：有機フッ素化合物環境中残留実態調査事業－汚染源調査に係る専門家会議－報告書.https://www.pref.okinawa.lg.jp/site/kankyo/hozen/mizu_tsuchi/water/documents/r3report.pdf.
23) 寺尾宏(2001)：岐阜県各務原市の硝酸性窒素による地下水汚染対策.第41回日本水環境学会セミナー,130-141.
24) 寺島　泰(1996)：第6章アメリカ・ラブカナルの対策事例.平田健正編著「土壌・地下水汚染と対策」,日本環境測定分析協会,85-102.
25) 東京都（2008）：豊洲新市場予定地における土壌汚染対策等に関する専門家会議報告書.
26) 東京都(2017)：豊洲市場における土壌汚染対策等に関する専門家会議報告書.
27) 渡辺俊一・江種伸之・平田健正・横山尚秀・山里洋介・森田昌敏(2011)：茨城県神栖市で起きた有機ヒ素化合物による地下水汚染機構の解明に関する数値解析.地盤工学ジャーナル,6(2),383-39

山岳トンネルを中心とした私の地質工学を振り返る

大島　洋志 1)
1)　国際航業株式会社　公共コンサルタント事業部

1. まえがき

私は大学で地質学を学び,東海道新幹線が開業したばかりの当時の国鉄に1965年に就職した．１年間の現場実習を終え,鉄道技術研究所地質研究室に配属された．当研究室はトンネルの建設史上，世界的に有名となった丹那トンネルの異常ともいえる湧水と地圧現象に起因した難工事がもとで,トンネルには地質学的素養が必要と痛感した鉄道省が1923年に採用した東京帝国大学卒の三人の地質理学士の一人渡邊貫に端を発していた．

急曲線と急勾配をきらう鉄道は島国日本においては必然的にトンネルの比重が高くなる.そのトンネルの建設に関わる湧水や地圧といった地質的な問題解決を役割とするのが地質研究室だった．

国鉄へ入社以来，研究所を本籍として，本社や工事局を転勤しながら鉄道建設に関わる業務に携わってきた．1993年にJRの(財)鉄道総研退職以降も，現在の職場に身を置き,引き続きトンネル地質工学分野の技術者として活動している．

表-1　【私の職歴】

1965年	九州大学理学部地質学科卒
同年	日本国有鉄道入社→鉄道技研→東京第2工事局
1969年	国鉄本社建設局→山陽新幹線建設部
1971年	下関工事局福岡工事事務所若宮工事区
1973年	鉄道技研（兼）本社建設局
1981年	本社外務部（中国鉄道部）
1982年	鉄道技研→(財)鉄道総研
1993年	国際航業(株)　現在に至る
日本応用地質学会長、IAEG（国際応用地質学会）副会長、東京工業大学非常勤講師，首都大学東京客員教授等を歴任	
理学博士、技術士（総合技術監理・建設・応用理学部門）	

前述した渡邊は丹那トンネルの経験に端を発し，「地質工学」なる学問名を提唱し，同名の大著（渡邊貫，1939）や『地学事典』の編纂・出版をするなど偉大な功績を残した地質技術者であり,私が生まれる4ヶ月前に本誌を発行する日本物理探鑛㈱を創業された偉人であるが,今やその名を知る人は少ないのではなかろうか．

国鉄に就職した私は，その渡邊の業績を，当然のように知ることとなるが,戦前に鉄道省を辞めておられ，あまりに歳が違いすぎること，自ら創設された会社の経営に専念されていたことなどがあって，お会いしてその薫陶をうける機会は残念ながら一度もなかった．しかし，私はその著『地質工学』を介して間接的指導を受けた門下生気分の渡邊ファンであり，その業績の素晴らしさを発表（大島，2006）するとか，学名としてはなかなか定着しない「地質工学」の学問名を冠した私家本（大島，2012）を出版するなどしているほどである．

今回，日本物理探鑛(株)創業80年記念の一環とて、光栄にも社の年刊技術誌『地質工学』への寄稿を求められた．私が山岳トンネルを中心として57年余関わってきた業務（**表-1**）のうち，第4章のトンネルの路線選定を中心にして地質工学分野で関わってきた仕事の幾つかを紹介させていただく．

2. トンネルを対象とした水文地質調査の体系化

まえがきに記したとおり,山岳トンネル工事を難航させるものの巨頭は，湧水と地圧現象であり,所属研究室長の著になる同名の著書（高橋，1963）があるほどであった．

トンネルの水問題に関わったのは上記高橋の指示により，「ひかりは西へ」のうたい文句のもと建設が始まった山陽新幹線の中で難工事が予想された六甲山地を貫く六甲トンネル（16,250m）の水文調査が最初であった（大島他，1967）．

入社5年後には山陽新幹線福岡県下約15km間の場長を拝命し，そこで福岡トンネル（8,488m）の湧水に伴う切羽崩壊と周辺の渇水問題で苦労するという２年余の現場経験をした（大島，1973）．

その後，鉄道技研地質研究室に復帰し，国鉄本社建設局線増課も兼務することになり,以後は地質技術者として本社的視野で活動することとなった．

主たる業務は，中央本線岡谷・塩尻間28kmを別線で12kmに短絡する区間に建設される塩嶺トンネル（5,944m）の減・渇水問題となった．　福岡トンネルの経験から,トンネル湧水に伴う周辺流域の減・渇水問題は，トンネル湧水を水循環系の中の水収支要素の相互関係として捉えなければ解決できないと痛感していた（**図-1**）．そこで，塩嶺トンネルで起きているような減・渇水問題は,基礎となる．

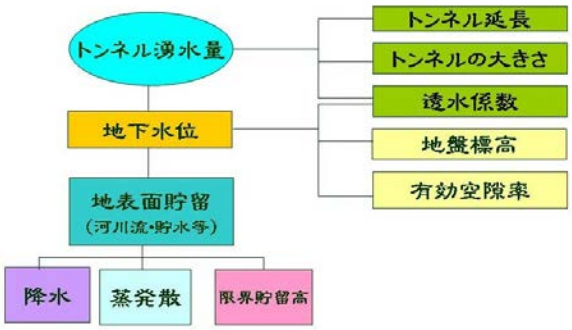


図-1　トンネル湧水量と水収支要素との相互関係

継続的な水文観測データをそろえ，水文地質構造もよく把握したうえで，トンネル工事の影響を水収支的に捉える調査・解析方法を採用しなければ解決できないと考えた．具体的には，①地下水位や河川流量の変化をトンネル工事の進捗と降雨量の変動との関係で計測することにし，②水田用水の尺度として用いられる減水深，土壌水分の変化を測定するpF 値なども計測に加え，③地下水の受皿としての地質構造を広域に把握する目的で，浅層反射法などの物理探査法も試用し，④植生の活力度調査法としてリモセン手法も試用するなど総合的な水文地質調査法を定め（大島他，1979），この手法を道路公団等も含め全国展開して頂いた．

一方，類似事例として，東海道本線丹那トンネル（7,804m）を対象として文献調査から，先人の偉大な仕事（阿部，1954）などを知ることになり，丹那トンネルの現状を調べたりした（大島他，1977）．さらに，トンネル掘削に伴う周辺水収支の変化を予測する独自の水収支シミュレーション手法を開発し，計画中の整備新幹線等の路線選定調査（第4章で後述）に適用するなどして，これら一連の成果を学位論文としてまとめた（大島，1983）．

これらの業務を経てトンネルの地下水問題は現在に至るまで私のlife workとなり，多くの委員会に参加させて頂いていることを有り難く思う．

本章に関してはもっと記述したいという気持ちもあるが，日本地下水学会から求められて数年まえにまとめたばかりのトンネル地下水に関する拙文（大島，2008a&2020）があるので，これ以上の既述はそちらに譲ることにする．

3. スラブ軌道トンネルの坑内路盤噴泥対策

1975 年春に博多まで延伸開業した山陽新幹線のうち岡山以西は省力化を目的に従来の一般軌道（バラスト軌道）からスラブ軌道へと画期的な変換をとげた新幹線であった（図-2）．しかし，トンネル区間で予想せぬ噴泥問題が生じて，その問題解決に関わることとなった．

3.1　山陽新幹線スラブ軌道の路盤噴泥対策

軌道狂いは，岡山以西に広域に分布する風化花崗岩（マサ）部分に共通する現象であった．現地調査から列車走行時に路盤コンクリート下の間隙水圧が急上昇し，打継目などから路盤下の地下水が路盤下の細粒土砂とともに噴出という現象の繰り返しが，路盤コンクリート下の空隙を徐々に拡大させ，軌道狂いへと発展していくものと判断した（図-3）．

私は，山陽新幹線に先だってスラブ軌道を試験的に採用していた旧足尾線（現わたらせ渓谷鉄道）の草木トンネル（5,242m）で類似の現象があり，側壁両側の排水溝を掘り下げ，路盤コンクリート下の

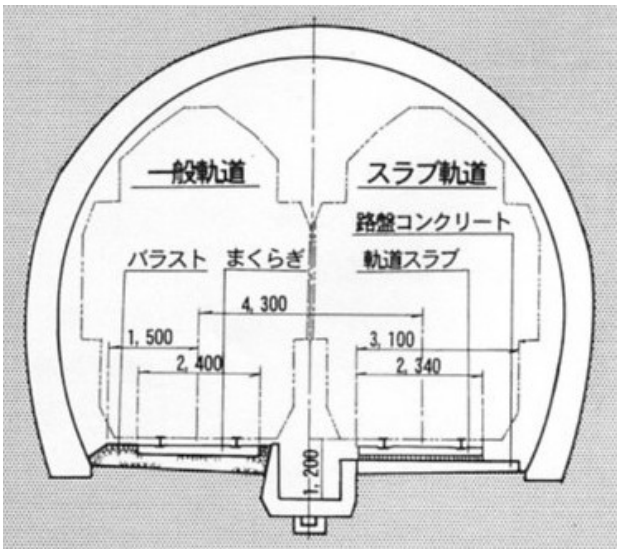


図-2　新幹線トンネルの軌道構造比較図

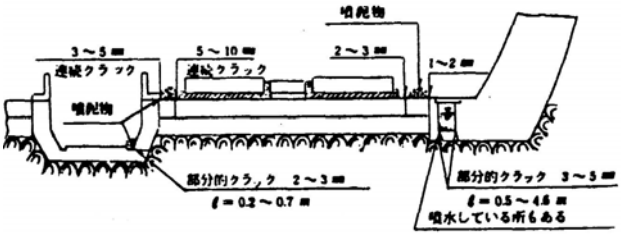


図-3　スラブ軌道トンネル路盤部に見られた変状

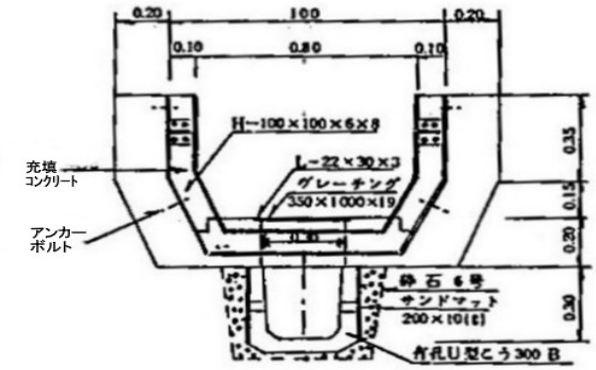


図-4 中央通路下に排水溝を設置した応急対策

水をドライにするという町医者的な処方で問題を解決したことがあった.

この考えの基になったのは地質学で教える浸食・運搬・堆積作用の考えであった．山地から海岸線までと流下していく河川水には分級作用による土粒子の選別堆積がなされているのだが,この地質学的現象の基本を簡単に述べるならば,①水の浸食作用は流速，流量，水中に混濁・浮遊している土粒子量，対象地盤の硬さに左右され，②運搬されうる土粒子の粒径は流速の2乗に比例するとされ，③堆積作用は上記以下の流速･流量に応じた粒径のものが漸次選別堆積していくというものである.さらにこの考えの延長線ともいえる土粒子の水流による限界流速（Vc：下式）という考えがあること学んだことであった.

Vc=（2/3（Gs-1）*d*G)1/2

d：土粒子径　Gs：真比重　G：重力の加速度

これらの経験をもとに,路盤下の空隙を充填のうえ,中央通路下に路盤コンクリート下面地山ができるだけ地下水と触れない状態にすることを目的に中央排水溝（**図**-4）を追加施工し，それなりの効果をあげた（大島他，1991）．しかし，この中央排水溝だけでは路盤下の完全ドライ化は出来ず,抜本策とはいい難かった.

3.2　しらす地帯のトンネルに水砕スラグを採用

九州幹線鹿児島ルートは終点方約20kmが水浸食に弱いしらすで,その半分が地下水面下のトンネルであって,山陽新幹線よりはさらに慎重なトンネル路盤噴泥対策を考慮する必要があった．そこで,後に触れる（第4章 路線選定の第2節）が，水砕スラグを用いた透水性路盤（**図**-5）の採用を主導し,その実現に努めた．　提案した頃は理解者が少なかったが、しらす地山の坑内路盤噴泥問題の解決にはこれしかないと主張し続けているうちに支援･協力者が現れ,執念でもってこの改良に取り組むという苦労があった.

この新しい考えに基づく水砕スラグ路盤を地下

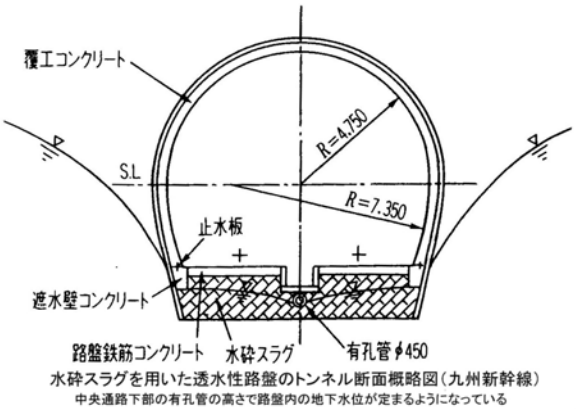


図-5　しらす地山トンネル路盤に水砕スラグを採用

水面下のしらす地盤トンネルに採用することによって,山陽新幹線での路盤噴泥問題を完璧に解決された(松本他,2000/大島他,2001/Ohshima,2005).

この一連の施策は土木学会から評価され工事の主体者である鉄道運輸機構やJR九州・新日鉄・太平工業は技術賞という栄誉を得た．2004年の開業からまもなく20年になろうとしている．現在もトラブルなく供用されており,関係者からも喜ばれている.この業務成果は私にとって技術者冥利の誇りを感じる一つである.

4.　幾つかのトンネル主体の路線選定に関わる

鉄道地質屋として生きがいを感じた業務は本章で述べる,整備新幹線などのトンネル路線選定である（大島，1986，2004，2015）．地質屋冥利の仕事をさせて頂いたことに大感謝の気持ちで一杯である.

私が路線選定に関わる立場になったのは,東北新幹線の盛岡以北や整備新幹線の計画段階以降だが,それまで従事していた業務を介してご指導頂いた諸先輩･同僚，工事誌等の諸文献などから路線選定の大事さを学ぶことができたと思う．渡邊（1936）の『地質工学』は非情に良い教科書的な存在だったし，山陽本線関門トンネル（3,614/3，605m）に現場長として従事された高坂紫朗氏からは難航していた上越新幹線の榛名・中山トンネル（各々15,350　14,857m）に関し「僕はね榛名は“掘るな”,中山は“馬鹿山”と呼んでいる．あんな路線選定はすべきではない」という未だ記憶に残る強烈な教えを頂いた．また，仁杉元国鉄総裁が北陸新幹線高崎・軽井沢間の路線選定に30‰という急こう配を初めて用いたという話（仁杉　，2003）は非常に刺激的で,その後の私の路線選定業務への取り組み姿勢に非常に役立ったと思う.

以下,私が関わった業務の中で印象的なものを数例掲げ,続いて路線選定に関して大事と考える要点をまとめてみる.

4.1　九州新幹線における路線選定事例紹介

私はトンネル主体の路線選定にかなりの数，関わってきているが，ここでは，地質技術者という立場から、若いということと，九州出身で地元のインフラ整備に関われるという喜び両面から，全力投球し，ほぼ私の提案を受け入れていただいた一期（新八代･鹿児島中央間）および二期（博多・新八代間）の事例紹介に限らせていただき，その他は4.3節の中で適宜紹介という形にする.

(1)九州新幹線新八代・鹿児島中央間

いろいろな理由から,九州新幹線の鹿児島ルートは熊本県八代以南を先行着手することになった.こ

の区間では下記２区間に絞って紹介する．

・新八代・新水俣間

この山地区間の地質は秩父帯からなり，その北縁は中央構造線の九州への延長とされる臼杵－八代構造線，南縁は仏像構造線で画されている．

私が関与するまでは，現在のJR鹿児島本線に沿う海沿い路線が考えられていたが，一旦原点に戻して八代海側から球磨川までの幅の中で自由に考え直すことにし，横断方向に地質を把握することに努めた．そのため，例えば，弾性波探査測線を想定路線に沿わせるのではなく，地質構造に直交させて実施してみた．それにより地山の硬軟をかなり明瞭に把握できるなど新しい知見が得られた．

そのうえで，最終的に①日奈久温泉への影響を避ける②蛇紋岩等の不良地山は「明かり」や短いトンネルで抜ける③石灰岩の洞穴への遭遇は避ける（**図－10**）④不良地質とは極力南東方向に短く突破し，良好な地質の部分で西南方向に向きを変える，ということを前提に，球磨川（国道219号線）に沿って南下し，吉尾の付近から南西へ向きを変える路線を提案した（**図-6**の破線）．蛇紋岩地山や付加体地質に起因する問題箇所を短絡できることと，球磨川筋からの資機材運搬を楽にできると考えたからである．しかし最終的には私の中国赴任中に諸般の事情をもとに図-6の実線のように決定された，

工事は田上トンネル（6,991m）が大量の湧水とそれに伴う渇水問題で難航という苦労はあったが，大きな問題はなかったと聞く．私案を採用しておれば，その苦労は少なくなったのではと，残念だが，概ね合格の路線選定だったのではと思う．

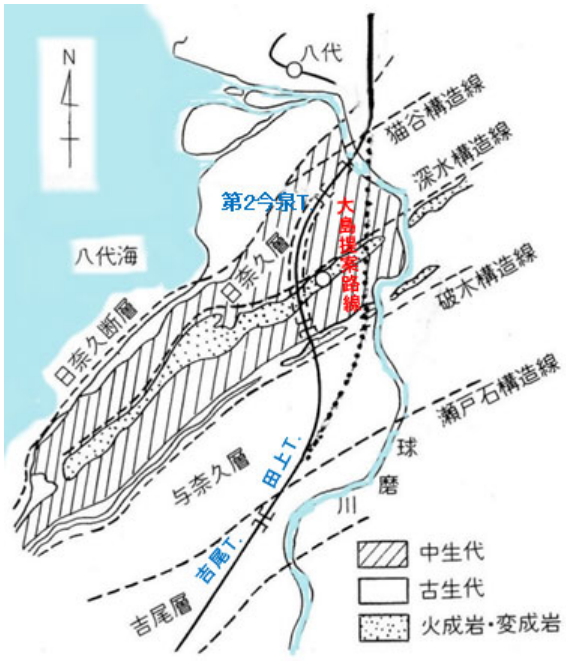


図-6　九州新幹線新八代・新水俣間路線図

・川内・鹿児島中央間のシラス地山トンネル群

南九州を広範に覆うシラスは流水により浸食されやすく．また含水比の高い状態では崩壊しやすいといった性質をもっており．降雨などに非常に弱い特殊な不良地質として忌避されている．九州新幹線鹿児島ルートもこの地質と無縁では済まされない．新幹線は在来線の線路規格よりグレードの高い曲線半径と縦断勾配をもっているため，土被りが大きく，延長の長いトンネル主体の路線にならざるを得ない．そこで問題となるのが，水に極端に弱いシラス地山どう対処してトンネルを設計・施工・維持管理するかであった．

幾多の検討の中でトンネルをNATMで行くかECL（後のSENS）で行くかの戦いがあったが，地下深部を長大トンネルで行くというECL案の場合，信濃川発電用導水路トンネルや北陸新幹線秋間トンネルの施工実績からして，あまりにも地質的な情報が少なく，かなりの地質リスクが危惧されたので，自然にNATMで決まった．そのうえで，約20kmのシラス地山区間に対しては下記のような方針を採用し，問題を解決した．

・北陸新幹線高崎・軽井沢で採用された急こう配を採用する（30‰→35‰にさらに変更）．

＜それまでは新幹線の縦断勾配は最大12‰とされていたものを30‰まで走行可能な車両を開発することで，北陸新幹線軽井沢駅を在来駅に併設する地上駅に変更した当時の仁杉鉄道公団総裁の決断がその後の流れを作ってくれた（仁杉,2003）．＞

・これにより、シラス地山区間のトンネル長は14kmとなり，かつ地下水面下のトンネル長と最大水頭を11.5→７km，70→20mと大幅に軽減できた．

・水砕スラグによる透水性路盤の設計・施工法を確立し、路盤噴泥の危険性を回避できた（3. 2章）．

・シラス地山へのNATM適用は最大水頭の大幅な低下により，ウェルポイント（以下WP）を補助工法として用いることで切羽の自立性と水砕スラグの確実な養生が可能になった（松本，2000）．

学会レベルでは，水砕スラグ路盤の採用が表向き評価されているが，その採用を可能にしたのは急こう配を採用する利点を重視した路線選定がなされたことであって，これを先ず評価すべきと考える．

⑵九州新幹線博多・新八代間

・博多・新鳥栖間脊振山地の筑紫トンネル

九州新幹線の博多以南には，福岡・佐賀両県にまたがる標高1,000m級の東西方向の稜線をもつ脊振山地が障壁となっている．この山地を南北方向に横断する筑紫トンネル（12,115m）の計画においては，博多駅から車両基地までは，既設路線が南下しており，　その先をどうするかが問題だった．

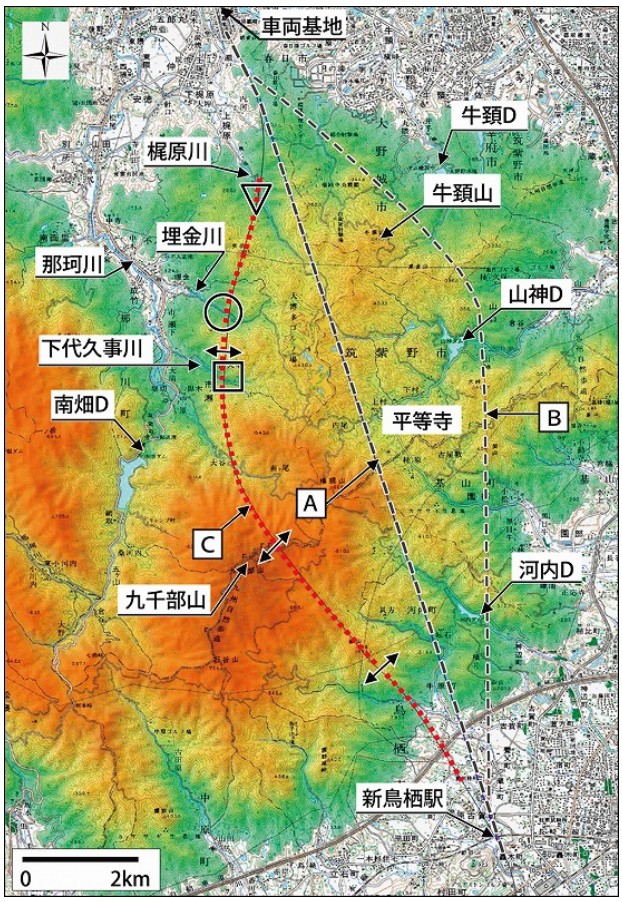


図-7　九州新幹線筑紫トンネルの比較路線

写真-1　筑紫トンネル北口梶原川横断部の土石流対策

いろんな路線が考えられたが，私が開発した水収支シミュレーション手法を用いて幾つかの比較路線を検討した．その結果，西側に迂回しながら施工基面を上げて地下水頭を小さくできるようにすれば，　周辺地域の水瓶的役割をもっている脊振山地水への影響の度合いを少なくできると判断し，この案を採用してもらった（**図-7**のCルート）．

図7中，□○部は急勾配で流れる下代久事・埋金川を小土被り通過部であるが，坑内湧水は少なかった．また，下代久事においては本坑に向けて上り勾配の作業坑を設置出来たため，坑内水を作業坑口横の河川に自然流下できたので那賀川町地区で心配された渇水問題には至らなかった．▽部は北側坑口近くであるが，土石流対策のためトンネルを梶原川に設けた堰堤の上流側に埋設し，河川の基底流はトンネル下部に設けた暗渠を，洪水流は上部開水路流れる構造とした（**写真-1**）．これらは当トンネル路線選定の妙味の数例である（佐々木他，2008/大島，2013．）．

結果的には，当トンネルの路線選定や設計施工は，孫子の兵法よろしく十分に水文地質情報を入手しながら進めたため，山陽新幹線福岡トンネルで経験した大きな渇水問題にもならず，無事に竣工し，工事関係者から感謝され，万事OKとなった．

・新玉名・熊本間田原坂付近路線選定

大牟田から熊本に至る新幹線ルート上には，古戦場として名高い田原坂がある．田原坂の西，有明海側には金峰山（665m）を中央火口丘とし，二ノ岳・三ノ岳などを外輪山とする鮮新世～更新世の活動とされる金峰火山が分布している．在来線はこの外輪山の東側山裾を縫うように走っているが．その複線化に際しては，この難所を田原坂トンネル（940m）で貫いた．しかし完成後，トンネル上部の水田化に伴い，地表陥没を何度も経験していた．

当区間の新幹線の当初計画は，田原坂の西側にある三ノ岳・金峰山部を長大トンネルで貫くものであった．しかし，この火山山麓のあちこちに豊富な湧泉（井芹川水系の太郎迫神社横の湧水や田原坂川水系の桝形池湧泉など）があり，それらが地元の貴重な水資源として活用されていたので，大量で高圧の湧水による難航と減・渇水による環境問題が懸念される山であると判断し，在来線よりも西側の外輪山東山麓を地下水面より上になるよう平面・縦断形を配慮しながら，比較的小土被りのトンネルで通す案に変更させてもらった．

こうしたことで，熊本駅に近い側の小土被りトンネル区間では一部がゴミ処分場になってしまう変化があって，別の苦労が出現するなど予測せぬ土地利用変化があったが，水利用に関しては想定通り大きな社会問題に発展することもなく工事は無事終了した（竹下他，2003/丸山他，2009）．

4.2　路線選定の良否が工事の難易を決める-路線選定には優れた地質技術者の参加が必要-

わが国のトンネル技術発展の歴史をみると，日本人が持つすばらしい技術力と精神力があったからこそ，想像を絶する不良地山を悪戦苦闘しながらも突破できた！といった具合に，トンネル技術を賞賛する形で自分らの計画ミスを置き換えている面が

あると思う． 東海道本線丹那トンネルの難航はその最大の事例と言ってよいと思う．

丹那トンネルのような難工事経験をもたないまたは知らない俗にいう計画屋が地形・地質条件を軽視し，できるだけ短く平坦な路線が良いという観点からトンネル路線を決めた後に体裁を繕うような地質調査を行っている例が多々あると思う．

そうして決まったトンネル路線で施工中に予期せぬ極悪地質遭遇しても，とき既に遅し．その路線を断念しない限り，どんなに工期が延び，工費が上がろうとも挑み続けなければならない．

こういう事態を避けるには，路線計画段階から優れた地質技術者の参加のもとに，経済的に安全に施工と維持管理ができる路線を選定するしかないと考えるに至った．この考えは，仁杉さんがかねがね①路線選定など計画段階で本気に工夫すればコストは大きくカットできる②計画段階で経済的にできる工夫をしたほうが良い。構造物をあれこれ手を入れても案外安くならない（仁杉 ，2003/ 大内，2010）と言っておられたものと同趣であり心強く思う．以下私の考えをもう少し記してみる．

・路線選定段階では地形・地質条件も考慮した検討がなされるが，この段階ではボーリングなどの徹底した点的な調査は経費的には困難であり，それを補いうる地形・地質のことをよく分かった経験豊かな技術者の参加が必須である．

・上記と重複するが，地形・地質調査は比較路線も含めた広域の地質踏査や地形判読（**地相を観る**）主体で行わざるを得ない場合が多い．

・路線選定には，地質条件を犠牲にしてでも優先させるべきもの（コントロールポイント）があり，地質リスクなしの路線を選ぶことは至難の業であることを理解し，トータルとして最適なものを選ぶという弾力的考えで従事しなければならない．

・大事なことは，個々の比較路線に残る重大な地質リスクの存在を忘れぬよう，どのような地質リスクがどこに，どの程度考えられるかを明記し，引き継ぎを確実にすることである．

・決定路線に対し，どこにどういった地質リスクがあるといった情報がある程度分かっておれば，以後の段階でそれなりの調査を行い，それに基づく設計・施工がなされることになり，地質リスクが何も分かっていない場合と比較すれば，工事は案外に順調に進捗するものである．

4.3 路線選定段階で考慮すべき地形・地質条件

路線選定に長らく関わってきた私が考えるトンネル路線選定上の地形・地質上注意すべきトン要点を，要約・概説してみる．

⑴急がば回れ

一般論としては，路線を計画する際の基本は，極力真っ直・平坦であることは自明である．しかし，それに拘りすぎたために失敗したと思われる事例は多々あるのではなかろうか．

たとえば現在の御殿場線沿い（箱根の山の北側山麓を国府津-山北-御殿場-沼津）に走っていた東海道本線を小田原-真鶴-熱海-函南-三島経由の現在路線に変更するに際して設けた熱海-函南間を直線で結ぶ丹那トンネルはその一例といえる．結果論だが，未経験の長大トンネルを，十分な地質調査がないまま箱根火山々地を貫く箇所に適用し， 完成までに16年を要することになってしまったのは，当時のトンネル技術レベルの過信・盲信の結果なのではと言われても反論できなかったのではなかろうか．同様なことは本章の最初に紹介した上越新幹線榛名・中山トンネルにも言える．

順序が後先になったが，『急がば回れ』で路線選定をしてうまくいった事例も紹介しておく．

先述した仁杉（2003）の北陸新幹線高崎・軽井沢間路線選定はその代表格と言ってよい．

私が国鉄入社5年目の本社新幹線建設部在籍中に，これがトンネル路線選定の極意なんだ，と強烈な印象を受けた山陽新幹線三原・広島間もその好例と考える．当該地域には、機関車が重連で押し上げていく難所として有名だった在来線の瀬野・八本松駅間の急勾配があることからもわかるように，西条盆地から広島までをどう降りていくかが選定の対象であった．最終的には最短路線よりは長いが，工期短縮のための作業坑が施工可能であり、環境問題の少ない盆地の南側を迂回する路線が選ばれた．最長の安芸トンネル（13,030m）は中間部に斜坑3本を設けた5工区に分割して施工された．斜坑工区は早期着工や坑内からの搬出土砂処理が容易だったこともあり，トンネル工事はトラブルなく，所定の工期内で順調に進んだ．

私が関わった，奥入瀬渓谷のバイパスとして施工中の青撫山避難坑はその好例と言ってよい．

⑵断層地形は避けよう

断層鞍部地形や遷緩線付近には断層があると考え，これは避ける．避けられないときは極力小土被りまたは直交させるなどで対応させるのが良い．

明治以降日本の土木技術を牽引していた時代の鉄道は蒸気機関車の時代でもあったため，機関車の牽引力と制動力の関係で急な勾配を嫌い，かつ排煙問題を抱えるトンネルはできるだけ短くすることが望まれていた．そのため，できるだけ明かり区間の中で高度を稼ぎつつ高所まで上がって行き，最後の部分をトンネルにするという考えで路線選定をしていた．そのため峠の鞍部直下に路線を引いてい

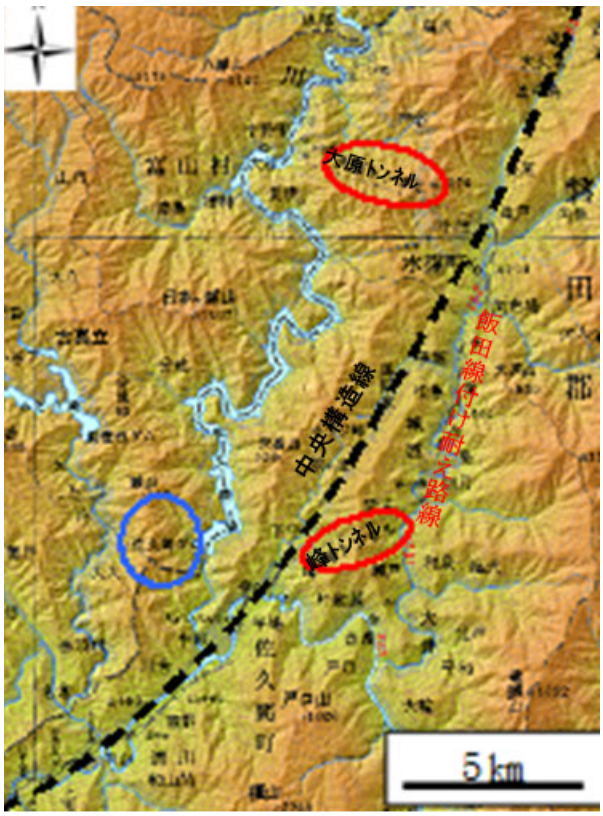


図-8　中央構造線をうまく避けた飯田線の付け替え

た. 結果としてそこがトンネル工事で難航する断層破砕帯であることが多く, 枚挙に暇がないほど数多くの事例がある.

素晴らしい路線選定を行った事例として, 天竜川に佐久間ダムを建設に伴い線路付け替えを余儀なくされた中部天竜・大嵐間の路線選定を紹介する. これは，天竜川筋から東側に位置する水窪町側の谷筋に迂回する際に，峰・大原トンネル（各々3,619m/5,063m）をうまく配置して，当地域をNNE-SSWに走る中央構造線を明かりでうまく避けたというものである（図-8）.

中央新幹線の中央アルプストンネル（23, 288m）の路線は, どこかで横断しなければならない阿寺断層を極力小土被りで通過できる位置を平面図上で選んだ良き好例になると思う.

(3)極力山の芯 土被りは小さからず大きからず

一般論としては, 山の芯部は地質も安定し, 土圧的にもバランスしている. 土被りは坑口付近を除き, 3～5D（Dはトンネル直径）以上とする.

一方, 土被りが大きいほど良いとは限らない. 私は山岳トンネルの場合，300m程度までを理想と考える. その理由は, 高圧大量の湧水や膨大な地圧, ときには山はね等の難題に遭遇する危険性, 地質調査も実施しにくいという欠点等々からである.

私が施工段階の委員会で関わった国道361号権兵衛トンネル（4,467m）では土被りが500m以上あり, そこで採用された弾性波探査法から得られた弾性波速度で地山評価を実際以上に良い方に評価したため, 積算上の行程と大幅に乖離し, 当初設計を大幅に上回る難工事となった（堀田，2004）.

(4)地質構造の走向には極力直交

地質構造を横断する際の路線は, 極力直交させるのが良い. 断層破砕帯は直交させると不良地山の延長を短くできるし, 地層の走向に直交させると偏圧状況を避けることができる.

中央新幹線南アルプストンネル（25,019m）の路線選定はこの考えを基本に行った．1，000m級の大土被りであるが直に近く傾斜した地層の走行にほぼ直交したトンネル路線となっていることもあって大きな苦労をすることなく施工できている.

(5)砂質地山は極力小さな水頭で

高水頭の砂質地山は切羽付近で流砂現象を起こしやすく，多額の補助工法が必要となる．また，維持管理段階にまで問題が継続するので, 極力水頭を押さえたトンネルにするのが良いと考える.

奥羽本線大釈迦トンネル（1,768m），WPを試用した東海道本線小原トンネル（660m），斜めWPを用いた上越新幹線榛名トンネル，延長僅か600m間に6年以上を要した同浦佐トンネル（6, 087m）や, 北海道新幹線津軽トンネル（5, 880m/中山他, 1984, 山口他，1986），常磐道原町トンネル（750m/廣瀬他，2010）などの難航例が上げられる.

私が関わった事例には九州新幹線のシラス地山のトンネルと筑紫トンネル北･南坑口側工区が水頭を小さくするよう努めて問題の軽減化を図ったトンネル（図-7）がある.

(6)坑口付近は災害や偏圧に注意

トンネル坑口付近は力学的に不安定な偏圧条件下にあり，その位置選定には細心の注意を要する. ギリギリに追いこんで造られた坑口, 土かぶりが左右非対称のいわゆる斜坑門などは, 後々土砂崩壊や雪崩など防災上の問題箇所となることを肝に銘じておくべきである.

NATMが標準的に用いられるようになって以降の坑門工にはししおどし(先を斜めに切った竹筒に, 水の出入を利用してコーンといった心地よい音を聞かせる日本庭園等にみられる細工)の竹筒先端に似ていることを名の由来とする竹割り坑門が採用されるようになり, 比較的経済的な坑門が建設されるようになったと思う. また, 私が関与した筑紫トンネル梶原川横断部の事例はここまでやるかという意味の特殊事例となろう（写真-1）.

(7)盆地・沢直下の併行，地下河川には注意

豊富な水の供給源をもった盆地や沢の直下を横断したり, 沢と平行したりするような場合は大量の水が施工中だけでなく, 竣工後も恒常的に続くので, できれば避けたい地形条件である.

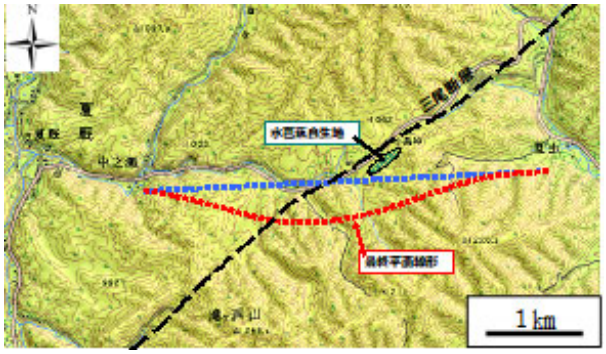


図-9　中部縦貫道路小鳥トンネル比較新旧比較図

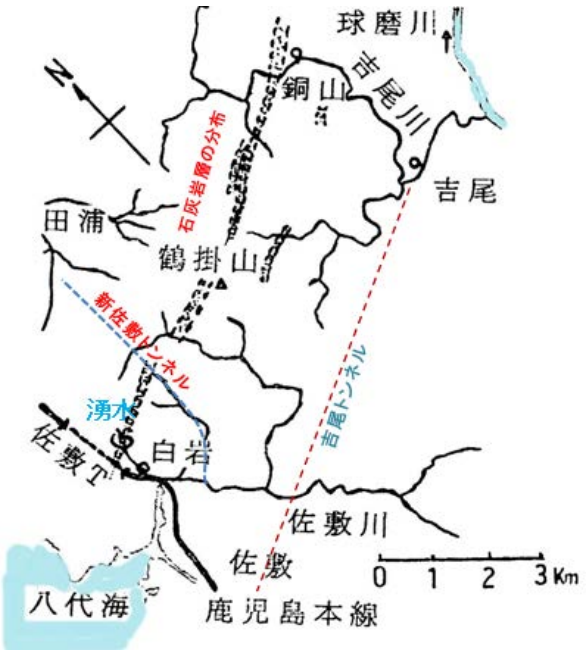


図-10　九州新幹線吉尾付近の地下河川

石灰岩層中を流れる地下河川（銅山地区で伏没した河川水が下流側白岩付近で湧水として流出している）

丹那盆地や下丹那環状凹地直下を抜いた丹那トンネル難工事はその反省事例である（大島，2010）．

また，東の子持山と西の小野子山が作る鞍部直下を北上し，さらに中山盆地直下に選定した上越新幹線中山トンネルの路線選定は先に紹介した高坂先輩の批判どおりだと思う．松本・高山間を結ぶ国道158号安房トンネル（4,350m）が180m³/分の大量湧水等で難航したのは安房湿原形成に起因すると考えられる火山噴出物からなる盆地部近くを通る路線となっていることと無関係ではない（武藤他，1989，松下，1992）．

私が相談を受けた高山国道事務所管轄の中部縦貫自動車道小鳥トンネル（4,346m）では当初案の一部変更を提案した（**図-9**で青破線⇒赤破線）．当初案では，近傍に貴重な水芭蕉の自生があることと，谷部に大土被りで緩く斜交する三尾断層（活断層）があり，さらにその西側は河川にほぼ平行したトンネル線形となっているなどの地質リスクが考えられた．そのうえで，両坑口は固定し可能な範囲で南へ垂れた曲線トンネルとすれば上記の問題を軽減できるのではと考えたからであった．提案は概ねそのまま受け入れていただいた．(1)の急がば回れにも繋がる事例かもしれないが，結果はなかなか効果的であったようで，無事貫通し，関係者から随分と謝意を表された．

(8)石灰岩分布地帯の地下河川には注意

また，石灰岩分布域には，地下にできた浸食割れ目や洞窟内を流れる地下河川に遭遇することがある．こういう事態は極力避ける配慮が望まれる．

九州自動車道の肥後トンネル（6，340m/朽網他，1987）や四国カルストを抜く国道440号地芳トンネル（2,990m/片岡他，2009）等はこういう地質条件で難航した事例である．

私は図-6の下半部に示された吉尾層分布域に，石灰岩分布に起因した河川水の伏没点（銅山）とその湧出点（地元の重要水源である白岩湧水）に気づき，南東へ約3km避けた吉尾トンネル（6，040m）の路線を選定した（**図-10**）．その後この地区には図-10に概略示した南九州西回り自動車道路の新佐敷トンネル（2,920m/竹下他，2009）が計画・施工されている．何らかの水問題があったと仄聞したが，上記文献には南側工区に関する記載はない．

(9)坑内の勾配変更点は行政界に

坑内に設ける拝み勾配の変更点は，極力行政界に設けるようにするのが良い．高度に水を利用している地域においては，自分の行政内の水がトンネルを介して他へ流れて行くのを認めない雰囲気があるし，減・渇水が生じても，坑口湧水を対象地に比較的容易に送水できるからである．

トンネル構造の高規格化に伴いこの考えに従わずに造ったトンネルで．隣の自治体側に流下するようになったトンネル湧水を元の自治体側へ未来永劫送水し続けなければならなくなった事例があるので計画段階で十分に検討する必要がある．

(10)付かず離れず下流側上位に

東海道新幹線の新丹那トンネル（7,959m）は，丹那トンネルの北側に平行して約50m離れ，5m高で建設したため新トンネルの湧水量は旧トンネルの約1割しかないということから，既設トンネル近くに新トンネルを計画する場合，掘削の影響が旧トンネルに及ばない程度に離し，旧トンネルの水位低下が及ぶ範囲の下流側で，かつ上位に選定するのを基本とすれば良いと思うようになった．

私が関わった東海道本線根府川・真鶴間の別線付け替え路線中にあった真鶴トンネル（1,710m）は山側に大量湧水で苦労した東海道新幹線南郷山ト

ンネル（5,174m）があり突発湧水の懸念を抱く方が結構いたが，新旧丹那トンネルの事例から心配無用と予想したとおり，水問題は皆無であった．

その後，トンネルの恒常湧水量調査（大島他，1985）を行った際に，併設トンネルの湧水量の多寡と地下水流に対する上下関係とを比較した結果，標記の言葉を考えにしたものである．

新トンネルをこの考えをもとに計画すれば，地質や施工上の問題を既設トンネルの実績をもとに精度良く想定することや，新たな渇水問題の発生も軽微なものに抑制できるし，結果的には工事費の軽減にもつながることになると思う．

国道41号宮峠トンネル（1,861m）の新設に際して安房トンネルの頃から知り合った高山国道事務所の方から特命で相談を受けた際に，施工段階で大量湧水が原因で大変な苦労があった1934年開通の高山線宮トンネル（2,080m）の存在を利用した路線選定を提案したのだが，この意見をもとにした道路トンネルは期待に応え，既設の鉄道トンネル湧水に対する既得水利権などへの影響もなく渇水問題を最小限にできた（大﨑，2019）と喜ばれた．

一方，京都・兵庫県境にある山陰本線夜久野トンネル（旧1,287m，新1,517m）では，新トンネル増設にあたり平面線形上，標記の考えに反し，地下水流の上流・山側に沿わせた路線にせざるを得なかった．そのためか，残念ながら，玄武岩からなる宝山火山（GH359m）の東北山麓側に新たな渇水問題を引き起こすこととなってしまった．

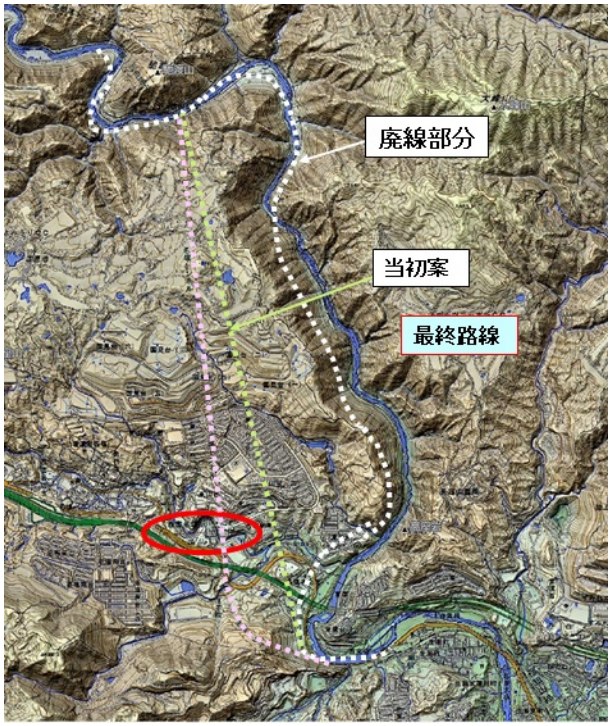


図-11　福知山線宝塚・武田尾間路線選定

(11)施工性も考えて

工程短縮の目的として複数の作業坑を必要とする長大トンネルの場合も含め，どこに作業ヤードを設けることができるか，という視点もトンネルの路線選定段階ではもっておくべきである．

4.3の(1)で紹介した山陽新幹線三原・広島間の事例は作業坑の設置しやすさ等を考慮したものでもあり，当項の事例としても相応しい．

福知山線宝塚・三田間の複線電化に際し，急曲線が連続し災害多発区間でもあった武庫川渓谷沿い旧線は，1986年にトンネル主体の別線路線に変更された．当区間で私が関わった事例も紹介する．

昔から親交があった当件の担当者から路線計画の相談を受けた．現地を一緒に調査し，当初計画の南坑口の位置を数100ｍ西に振るなどの提案した（**図**-11）．当初案ではトンネル建設のための坑外設備可能箇所が極めて狭隘で施工性が悪いうえに，買収・撤去を要する民家が多数あるなど欠点がかなりあった．私の提案が採用された結果として，名塩川河原の広場を坑外設備基地に利用でき，民家への支障も全くなく工事を楽に推進できた．最終的にはこの広場部分に当初計画には全くなかった西宮名塩駅が新設され，大型の住宅団地開発とその効果として鉄道の増収にもつながることとなり，先見の明ある提案だったと自画自讃している．

5. 大口径超長尺先進ボーリング技術を導入

5.1　トンネルにおけるボーリング技術の発達

トンネル工事とボーリング調査の関係について文献で知ったのは渡邊（1936）の『地質工学』序文にある下記名文句を通じてである．

･･･北米の土木工学雑誌（中略）の論説記者が･･･丹那隧道の世界的難工事であることを評し，“Without geological investigation and borings”でこの如き大隧道工事に着手したことは，日本人が如何に驚くべき大胆さを持ち合わせているかを知る，といった風に･･･無謀を揶揄している．過半東京で開かれた World Engineering Congress でも，各国の技術者から丹那隧道の位置選定問題が俎上に載せられ、･･･工事着手前何故に地質調査に重きをおくかを実例をあげて報告され、最後に結局丹那隧道の難工事は日本の地質学者の無能と当局がボーリングの必要を認めなかった怠慢の結果であるとさへ非難された．･･･結局彼等の結論に従うと，日本人のやり方は『一文おしみの千両失い』･･･になる。･･･ 地質学者の現地踏査や･･･ボーリングの工費等は総工事費から見れば九牛の一毛である．･･･ いわんや地質調査をしなかったため･･･巨

額の工費を損失したかに想到する時，Bautechnikの論説記者の･･･ “Ohne bautechnishe Geologie kein wirtschaftliche Bauen（土木地質学なしには経済的工事は不可能なり）”のスローガンに到達することになろう．

この批判は80年以上経った今でも十分に通用するものであり，旧態依然な面が残っていることを残念に思う．とはいえ，ボーリング技術はトンネルの設計･施工にとって欠かせない技術の一つとして確実に発展してきていることも事実である．

わが国のボーリング技術は青函トンネルを主とするビッグプロジェクト華やかりし頃，飛躍的な進歩を遂げている．青函トンネルでは利根ボーリングのTOP-LSという二重管シールドリバース方式による高速掘進技術開発で，最長2,150mの水平先進ボーリングを行っているし，幻となった中津川線（飯田・中津川間を結ぶ鉄道計画線）の神坂トンネルでは先端駆動方式のエレクトロドリルを用いて約2kmの水平ボーリングがなされている．また，コア採取率100％を可能にしたコアパックボーリング，換気立坑の早期施工を可能にしたビッグマン，等々はその輝かしい成果の代表事例である．しかしその後は， PSワイヤライン（例えば鉱研工業のアロードリル）のような切羽前方100m程度を対象としたNATM対応先進ボーリング機器の実用化を除き，青函等で用いられた超長尺のボーリング技術は定着しないままである． この種の技術革新は青函トンネルのような国家的プロジェクトがなければなかなか育たないのかもしれない（大島，2008b）．

5.2 超長尺ボーリングをトンネルに常用する夢

トンネルの計画路線に沿って，水平ボーリングが全長にわたって事前に行うことができれば，理想的な地質調査になる．それは無理としも，坑口から可能な限り奥までの地質を探ろうという水平ボーリングは必要により採用されている．東海北陸自動車道の平山トンネル（1,410m）でのボーリングはまさにその良き事例といえる（領家，2009）．しかし，1km超の調査ボーリングとなると，残念ながら先に紹介した中津川線神坂トンネルの約2kmの事例しか知らない．それは経済性と，必要性がどこまであるかという面からの制約もあるが，ロッドに作用する地山の摩擦抵抗を切ってロッドを押し込む機構では，地質変化の激しい我が国においては常に2～3kmという長尺を掘ることができず，破砕帯に遭遇すると削孔を断念といった，技術面での制約が解決できていないというのも事実である．しかし，世界の技術に目を向けると，経済性やトンネルへの応用という問題は別として，長さへの挑戦は可能なレベルにあるように思う． 例えば， Eastman Christensen 社のナビドリル（ダウンホールモーター）は、ノンコアであるが，循環流体を原動力とし，ドリルパイプを回転させないで孔内にてモーターでビットを回転させて掘削するという機構で，上述の摩擦を抵抗の問題を解決しているようである．

また，American Auger社のDD-330というボーリング機械は、最大トルク68tm、最大引張り／押力150ｔ，ロッド単位長9mは，我が国でも使用実績があったが，トンネルでの使用実績はない．しかし，国産ボーリング機で最大能力をもつとされる鉱研工業のGSR-100改（本体重量10ｔ、ストローク長0．8m、回転数35～730rpm、最大トルク12．5kN-m、最大引張り力330ｋN、最大押力230ｋN）と比較していかに巨大な能力をもつ機器であることが分かる．こういった能力をもった機械が、坑口部から先行してトンネルの事前探査や水抜きに実用できるようになれば，私の夢が一歩現実のものになる可能性があると考えた．

5.3 大口径超長尺コントロールボーリングの開発

私は，長年関わっている中央新幹線の南・中央アルプスを貫くトンネルの実現には，前節で述べたようなボーリング技術のbreakthroughが絶対的に必要と痛感し続けていた．いわば私の夢であった．その夢の実現に向けて，10年以上前から，切羽付近から行う方向制御可能な大口径超長尺高速先進ボーリング技術の確立に取り組み始めた．

まず手始めに，前節で紹介したDD-330の能力を実感する必要があると思い，あるトンネル現場の作業坑計画のある箇所に使用してみた．詳細は省略するが最大183m/dayという驚異的な結果を得た（二村他，2010）．しかしこの機械はロッド長が1本9mというだけでもわかるように，切羽前方調査に用いるにはとても不適な超大型機である．そこで，トンネル工事に適用可能な従来機器よりは格段に性能が高い小ぶりの実用機器の開発を目指した次第である．

私はこのボーリング機を本坑の約5m±下側に平行して1,000m級のボーリングを精度良く先行施工することを考えている．それができれば，その間の地質の硬軟，良し悪し，湧水の多寡などからトンネル施工に必要な地質情報が得られるだけでなく，切羽到達前にトンネル基面よりも下にあるボーリング孔は常に水抜き効果を発揮し続けるという点に対してである．すなわち当機はトンネル施工の半年相当分の切羽前方地質調査だけでなく，その部分の長期にわたる水抜きボーリングという補助工法の役割も期待できるので，昔の底設導坑が果たしていた役割と同等かそれ以上の効能を発揮できる可能性があると期待している．

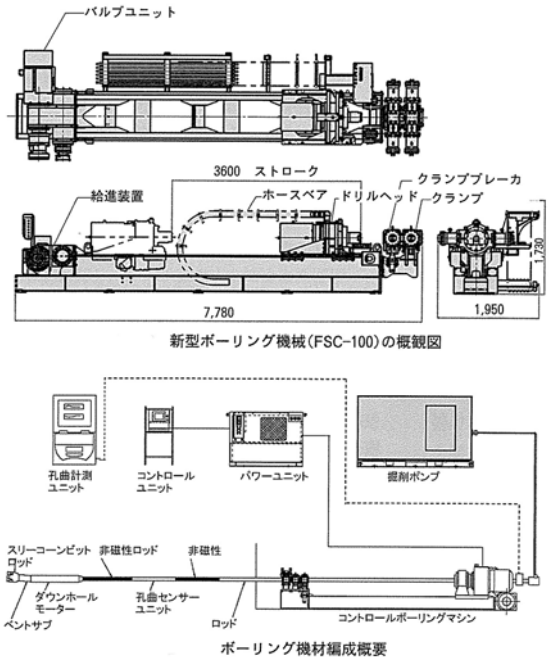


図-12　FSC-100の全体概要図

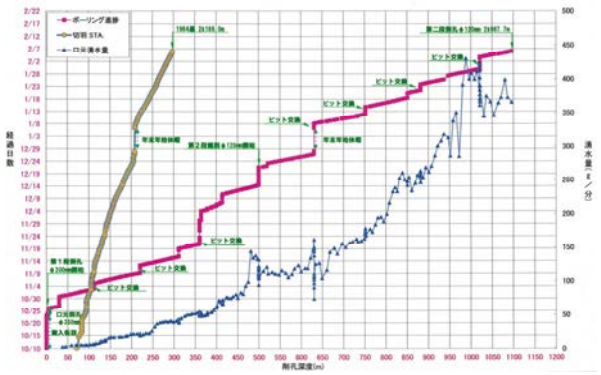


図-13　トンネル施工基面に平行に1150mを制御削孔

本技術のこれまでの歩みに関する技術的な発表は日本トンネル技術協会の機関誌「トンネルと地下」に複数回発表されている程度（大島，2008/二村他，2010/萩原他，2011/岡，2014）で，その後まとまった発表はなされていないが，　今日に至るまで，　関係者と一緒に夢の実現にむけ試行錯誤を続けており，不満足ながらもそれなりの実績と効果を発揮しつつあると思う（図-12，図-13）．

2022年に当機に関し元森地茂東京大学名誉教授から「･･･リニアのトンネルで使われているのは高速長尺先進ボーリングという技術で，元々アメリカで･･･開発されたものですが，画期的な技術です．･･･この掘削機材でファッサマグナの破砕帯の貫通を見た時は私も感激しました．･･･この機械があれば内視鏡手術のように1,000m先の掘削方向を細かく制御できるのでその心配もありません．ただ苦労したのはアメリカの機械は大き過ぎてトンネル内には運び込めないため，今回の工事のために自前で小型版を造って使用したことですね」（葛西他，2022）と私らの開発技術に対する嬉しい評価をいただいたことを嬉しく思ったものです．とはいえ，まだまだ未完の技術であるが，当技術に対する理解・応援者も増えつつあることを嬉しく思いつつ，さらなる技術向上に努め，抵抗なく用いられるようになることを夢見ている．

こういう夢を追い続けるのは楽しいものである．世の中の進歩は目を見張るものがある．我々地盤を相手にする技術分野も積極的にこの種の新文化を取りこみながら，自己変革をしていかねば将来はないのだと思う．老いてもなお，常に現状を打破する気概で新技術開発に挑む意欲が必要と思い．自分に気合いをかけている．

6. 道床バラストの石質基準等を整備

鉄道独特の地質材料として道床バラストがある．道床バラストは鉄道線路の形を整え，マクラギに作用する三次元方向の力を軟らかく受け止め，路盤や車両を守っている縁の下の力持ち的存在である．

このバラストに関わる技術的問題は，国鉄本社施設局保線課を元締めとし，鉄道技術研究所の地質，軌道材料両研究室が担当（前者は石質基準面，後者は粒度面）した．この鉄道の地質屋しか関わることのできない，縁の下の力持ち的目立たぬ仕事も，鉄道在職中，　何故かずっと私の仕事となった．

この面の業績は，国鉄（後のJR各社）仕様の道床バラスト制作･積み込み工事標準示方書の一部となっているが，　大島他（1975，1990a&b），吉川他（1983），日本鉄道施設協会（1994），川越他（2021）等の文献からその業績の概略を記述する．

6.1　道床バラストの標準示方書のお守り

バラストの製作･積込工事標準示方書には，４年に１度を目安に品質試験を鉄道技研で行うという定めがあり，会計検査などで時折，「こんな不良なバラストが線路に撒布されているがどういう品質管理をしているのか」という厳しい指摘があるたびに，本社施設局保線課の依頼のもと，品質管理のあり方に関してまじめに勉強した時期があった．その検討の中で1954年の長崎総裁時代の基準の改訂を提案し，1975年度の改正に併せて次の提案を行って採用してもらった．

- 摩損率試験をドバル方式→ロサンゼルス方式
- 岩石試料単体の靭性試験の廃止し，マスとしての性格を評価する圧縮粉砕率試験を採用
- 岩石圧縮試験用円筒状供試体の高さと径の比を従来の1：1から1：2に変更し，　十分に吸水させた状態の吸水耐圧強度に変更

・粒度分布試験用篩を，板篩から網篩に変更

その後,バラスト道床の安定性はバラストの形状と強く関係しているはずと仮説を証明すべく,下記のような実験や現地調査に取り組んだ.

バラストの形状は大まかにはサイコロ・偏平・細長状の３つに大別できる．サイコロ状の石片が細・粗粒理想的に組み合わさっているほど,道床の安定性は優れているが，その面の規制に関しては，「稜角性に富み､極端に偏平な石片及び細長い石片を含まないものとする」と規定しているだけだった．そこで粒度ごとに３大別した形状の試料を準備し,形状が与える効果を圧縮粉砕率試験による沈下量の大きさや微粒子分の発生の割合を調べた.

その結果①集合体全体の形状の良否は道床沈下の重要な因子となり,中でも細長い石片より偏平な石片の混入が多いものほど悪い影響を与えている②沈下は石片の稜角部等の破砕によって生じる割合が強く,細長よりも偏平な石片が破砕されやすい③形状表現法は偏平および細長の混入の程度を評価できるものでなければならない,などを明らかにした．そこで③の形状表現法を検討し，偏平や細長の試料の混入度のみを簡易に把握できる英国標準に準拠した偏平・細長度を新たに定め，簡易に計測するためのゲージも製作した.

さらに細長や偏平な石はバラストにとって思わしくないことが明瞭になったのを受け,砕石工場で使われている破砕機（クラッシャ）の破砕方式と形状との関係を調べてみた．その結果，採石工場では「大～中破砕工程」には破砕エネルギの効率が優れているジョークラッシャが主に使われている.しかし，このクラッシャの破砕機構は「押し潰す」であるので,石種にもよるが偏平や細長の石片ができやすい．その欠点を補うのが，石をハンマで叩き割る要領に類似しているが,遠心力で石を鋼鉄の盤に叩きつけて小割り,整形するインパクトクラッシャであることが分かった．したがって，石片の外側に残った微細な稜角が削られるとか,マイクロクラックを介して付着していたものが剥がれ,芯だけがサイコロ状の石片として残る．こういう学習を経て「最終工程」にはインパクトクラッシャを用いるのが良いという結論を得た.これらの諸試験･調査結果(大島他，1990a，b）をもとにJR各社用材担当者へ示方書の提案を諮った結果，1991年に試験項目に細長度・偏平度を追加し，品質向上を図るなどの変更がなされ．現在に至っている.

6.2　道床バラストの必要運搬容積

バラストは振動を与えていくと粗な状態から密な状態へと変わる.この現象はマルチプルタイタンパによる道床締め固め作業で実感できる.

バラストを貨車やダンプカーで運ぶ時は容積で検収をするが,そのときの重量は示方書に定める単位容積重量と考えれば良いのだろうかということが発端となり試験を行なった.以下はその結果の要約(大島他1985b)である.

鉄道技研の試験で求まる単位容積重量は規定の容器（容積0．01m³）にバラストを入れ，左右交互に5cmあげて落とす，という振動締め固めを50回,3層に分けて行ったうえでの値であるので，密詰め状態の値と考えて良い．しかし，車で運搬するときは密詰め状態にはほど遠い粗詰め状態である.そこで､①ダンプカーに積みこんだ状態での単位容積重量と鉄道技研の試験容器で計った粗詰めの単位容積重量とを比較するとともに，②粗詰め/密詰めの重量比との比較を行ってみた.その結果①小容器で計測した値を車両運搬時の値と考えても問題ない,②粗密重量比は平均で85％くらいになる．その結果をもとに，車両で運搬する際のバラスト容積は,道床敷に必要とする締め固め時バラスト容積の1.2倍（≒100/85）を目安とすれば良いとした.

6.3　バラストの良し悪しは品質管理が命

標記に関しては,国鉄本社の求めに応じて調査研究の成果を鉄道総研速報（吉川他，1983）にまとめ,さらに鉄道バラスト連絡協議会の求めに応じて,採石製作を①原石の採取②破砕③ふるい④貯蔵･運搬・積みこみ，の4工程に区分して品質管理の要点を鉄道総研教材（1989）としてまとめ，講習会を数回開催した.

7．記録を後世に残すよう努める

国鉄入社後しばらくは，トンネル関係の単行本や，丹那隧道，北陸トンネルなどの工事誌などの工事の記録や池田俊雄（1964）のような地質出身の先輩達の著述とか対話を通して，担当業務のことだけでなく，仕事への取組姿勢のほか，成果を記録に残すことの大切さを学んだ.

調査・研究部門が主だったこともあり，業務成果を形に残すのは当然のことと思い，鉄道部内だけでなく，学・協会の部外発表も他流試合のつもりで積極的に行った．それらの大部分は，価値あるものは少ないが，自分自身にとっては，過去を振り返ることのできる貴重な記録となった.

還暦を迎える 2002 年にこれまでの仕事を「私の地質工学随想」と題する私家本にまとめた．仕事を通じて体得した「現場主義に徹底した実学を目指せ」を後進の方々に記録として伝えたい，併せてお世話になった方々にお礼を述べたいという気持ちからだった．この企画は，色々な場で公表した記録や，東京工業大学など幾つかの大学の

非常勤講師を務めた際に作成した教材等があったから比較的簡単にできた．古稀を迎える 2012 年には，前書の増補版を出版した．前書には，恐れ多くも仁杉巖元国鉄総裁からは「僕からみれば還暦なんてまだまだヒヨコだ．これからももっともっと勉強して技術の発展に寄与して欲しい」と激励文をいただき，その縁は後書にも続いた．多くの方々から面白く有益な本だと喜ばれ，記録を後世に残すという意味で，良い記念の仕事ができたと嬉しく思った．

その前後から，今後の余生は①自分が得た有益なことを伝える語り部となろう，②いつまでも若い気持ちで技術の進歩を追い求める気概と夢をもってできるだけ頑張ろう，と考えるようになった． こういう観点で関わった書籍，随想，講演等の代表的なものには下記がある．

❶わかりやすい土木地質学（大島他，2000）

土木学会のトンネル工事標準示方書作成に関わった仲間を核にトンネルと地下誌に連載したものを単行本にしたもの．

❷IAEG シンポジウム基調講演（大島，2009a）

国際応用地質学会のアジア地区シンポジウムが中国成都であった際に，日本に与えられた枠に応じて私のトンネル地質工学を紹介した．

❸土木学会トンネルライブラリー（大島，2009b）

❹地盤工学会誌　土と基礎（大島，2011）

技術の伝承を目的に執筆を依頼された際に，技術者としての成長過程を①歴史に学ぶ②経験に学ぶ③両者に学ぶ，の 3 つに区分して記述した．

①は書物や先生，先輩達からよく学んだ初期段階②はそれらの勉強がどれほど実用に供せるかを自ら現場で実経験を重ねた中間段階③はこれらの経験を自分流の経験智としてまとめ上げて来た後半段階，である．自分なりによくまとめられたかなと感じたので，その後この種の依頼にはよくこの執筆スタイルで応じる雛形となった．

❺単行本 地相入門（大島他，2014）

トンネル十訓の最初にある「地相は人相 山の性状」は 4.2 節で述べた「地相を観る目」＝地形を観て地質を判断する能力，を磨くことの大切さ述べた私の好きな教えである．これを主張したく，トンネルと地下誌にゼネコンのトンネル・地質屋と分担しながら連載したものを単行本にした．

❻トンネルと地下誌（大島，2018）

編集委員長時代に私の発案で始めた連載の 101 人目の語り部として登場して，トンネル地質技術者人生を振り返って思うところを述べたもの．

末尾に，私の地質工学感を次のように記した．

地質工学の価値は，現場にみられる地質現象の観察から発想するという実学を大事にする姿勢にあり，地質学の素養をもった者が地盤に関わる実際の工事現場などを数多く経験すれば，工学教育しか受けていない技術者では及ばない独自の有益な知識をもつ実務的な地質工学者となれる．その差は，諸現象を時間軸も含めた 4 次元空間の中で考えようとする習性の有無から生まれるのだと思う．しかし，地質学を学んだだけでは実務的な地質工学者にはなれない．意識的，計画的に多様な現場を経験させ，育てていく必要がある．

❼日本地下水学会誌（大島，2020）

第 2 章末尾で略記したが，私のトンネル人生で学んだ地下水との関わりを私なりに総括した．

8. あとがき

以上，社会人となって今日にいたるまで私が学んだ地質工学の概要を紹介した．

自分の技術者人生を振り返ると，一通りの現場経験を終え，筆頭主研になった40歳過ぎの（第7章❹でいう③の段階に入ったばかりの）頃から，これまでの経験をより広い範囲で活かすことが求められるようになったと思う．例えば，内外から「山岳トンネル地下水問題の専門家」と認知され，意見を求められるとか，国鉄内部における地質的問題で重要な判断を求められるようになったとか，大学の非常勤講師や，学協会活動への関わりを求められるようになったことなどである．この環境は50歳の鉄道退職後も今日にいたるまであまり変わらない．

このこと，有り難くもあり，不思議にも思っていた．ある方から，「現場が困っている問題に対して，空理空論ではなく，実用的な助言や判断をしてくれるから相談するのだ」と言われたことがある．ごく当たり前の行動のつもりであったが，それが出来ない人が多いのだという．もし，私の姿勢が評価されているのならば，その原点は間違いなく『若い頃先輩方から組織的に鍛えられ，貴重な現場経験を踏んだ』ことにある，と確信した．実学を大事にするという， 旧国鉄時代の教育方針に沿って， 研究所採用の私ごとき地質屋にも十分な現場経験をさせて頂いたことに感謝しなければならないと思う．

まえがきの冒頭部分で，渡邊貫氏らが当時の鉄道省に入省される契機となったのは，実用的地質学を求めた当時の鉄道省丹那トンネル難工事であったと紹介したが，そういう方針をその後採用の鉄道地質屋にも求め・引き継がれた結果，私もそういう土壌の中で鍛えていただいたことになるのであろう．

トンネルの計画や設計・施工の場に，有能な地質工学者がいると，仕事がうまく回転するようになることは間違いないと思う．私自身がどこまでその期

待に応えられたか自信はないが，ある程度は貢献出来たのではと思いたい．

拙稿を閉じるにあたって，私が長い技術屋人生で得た技術屋心得を以下に略記して筆を擱く．

・若い時は，見れども見えずという感覚で，「歴史に学ぶ」（文献をよく調べ、先達の教えを良く聞く）ことにひたすら努力すべきである．

・その上で，机上の学問がどの程度実用に供せるかを，「経験に学ぶ」（実際の現場に学ぶ）必要がある．この経験はできるだけ多感な若い頃に買ってでもすべきで，泣きたいほど苦しいこと，分からないことが山ほどあり，不条理な世界があることを実感できることが大切である．

・現場に解決を要する技術的問題はないか？それらの問題解決に専門を活かせるものはないか？という姿勢で，現場の仕事に臨むべきである．

・経験したことは，機会をみて対外発表する努力も必要である．その過程で，できるだけ部外や専門外の方々と交流の場を拡げる努力も必要である．それは，どれだけ多様な経験をし，どれだけ尊敬できる人々に出会えたかが，その人の視野の広さと発想力の柔軟さとモラルの高さを決定するといっても過言ではないからである．

・歴史と現場に学びつつ，自分流の経験智を構築し，語り部として，社会に貢献するのが良い．

参考文献

1) 阿部謙夫,1954. 12,水の正体 開通 20 周年記念 随筆「丹那トンネル」.国鉄新橋工事事務所編,1954.12 ,242-253
2) 二村亨・梅村哲男・萩原博之・生森敏,2010,先進ボーリング技術のブレークスルーを目指して-長尺・超高速掘進・孔曲がり制御などの技術開発-,トンネルと地下,Vo41,No.8,45-55
3) 萩原博之・三好壮一郎・倉岡研一・田中雅裕,2011,先進ボーリング技術のブレークスルーを目指して（その2）-削孔データによる地山評価指標の検討-,トンネルと地下,Vo42,No.12,53-61
4) 廣瀬貴樹・宮越信・森英治・伊藤毅浩,2010,坑内外のウェルを併用し細粒砂質地山を掘削常磐自動車道-原町トンネル-,トンネルと地下,Vol41,No.10,29-40
5) 堀田匡彦,2004,山岳トンネルにおける工事用機械の選定(6) 掘削機械(4)-小断面-,6.権兵衛トンネル，トンネルと地下,Vo35,No.4,54-57
6) 池田俊雄,1964 東海道における沖積層の研究,東北大学理学部地質古生物学教室邦文報告第60号別冊,85p,,
7) 片岡正彦・濱田向啓・松川久俊・藤井広志,,2004,四国カルスト直下の高圧大量湧水帯を貫く-一般国道 440 号地芳トンネル-，トンネルと地下,Vo40,No.3,15-26
8) 葛西敬之・森地茂・松井孝典,2022,リニアはなぜ必要か？,文藝春秋 2022 年 3 月特集号,94-109,
9) 川越健・大島洋志,2021，鉄道における道床バラストの品質基準の変遷,土木学会論文集 D2（土木史）,Vol.77,No.1 , 53-67
10) 朽網新・満枝春櫻・田中秀和,25tf/min に及ぶ多量湧水と闘う-九州縦貫自動車道肥後トンネル-，トンネルと地下,Vo18,No.7,45-52
11) 丸山修・吉村直人・鹿狄耕治,2009,複数の開削予定小土かぶり区間を地盤改良によりＮＡＴＭで貫く-九州新幹線新田原坂トンネル-,トンネルと地下,Vo40,No.7,7-16
12) 松本雄二・須永誠・大島洋志・加藤僚一, ,2000.,地下水面下のシラス地山に透水性路盤を採用-九州新幹線麦生田トンネル-,トンネルと地下,Vol31,No.8,7-14,
13) 松下敏郎, 1992,高熱帯と高水圧低速度帯を克服して調査坑が貫通-一般国道安房トンネル-,トンネルと地下,Vol23,No.3,7-14,
14) 武藤章・鈴木和夫, 1989,北アルプスの大湧水（平湯低速度帯）に挑む-一般国道安房トンネル調査坑-,トンネルと地下,Vol20,No.6,7-14,
15) 中山範一.成田一男・藤沢武夫,1984,含水未固結地山を掘る-津軽海峡線・津軽トンネル-,トンネルと地下,Vol15,No.7,7-14
16) 日本鉄道施設協会,1994,鉄道施設技術発達史,953p,第 5 章 道床バラスト pp.676-679（大島洋志担当箇所）
17) 仁杉巖,2003,挑戦-鉄道とコンクリートと共に六十年-,交通新聞社,313p,
18) 岡浩一・山下学・三隅宏明・加藤宏征,2014，道路トンネルで初めて超長尺先進コントロールボーリングを採用-新名神高速道路 箕面トンネル-,トンネルと地下,Vol.45,No.11,15-24,
19) 大﨑義保・上田竹寛,2019.10,既設トンネルの存在を活かした路線選定で渇水問題を軽減-国道 41 号宮峠トンネル-,トンネルと地下,Vol.50,No.10,7-14,
20) 大内雅博,仁杉巖の決断のとき,2010,交通新聞社,274p,
21) 大島洋志・石井政次・永橋建藏,1967.05,山陽新幹線六甲トンネル水文地質調査,鉄道技術研究報告,No.587,69p,
22) 大島洋志,1973.08,毎分 23t の異状湧水に挑むー山陽新幹線福岡トンネル東工区-,トンネルと地下,Vol.4,No.8,12-21,
23) 大島洋志・中林好範,1975,道床バラストの石質基準および試験法の改正に関する研究-附 道床バラスト仕様書にもとづく過去 20 年の成績-，鉄道技術研究速報,No.75-154,205p,
24) 大島洋志・村上郁雄・塚本正夫,1977,丹那トンネルの

湧水・渇水はどうなっているか,トンネルと地下,Vol8,No.10,41-51,

25) 大島洋志・西森紳一,1979.03,トンネル工事を対象とした水文調査法の研究.鉄道技術研究報告 No.1108,186p.

26) 大島洋志・高木盛男・西森紳一,1980.10,スラブ軌道トンネルにおける排水溝設置による噴泥等の防止効果,, 鉄道技術研究速報,No.80-144,29p,

27) 大島洋志,1983.03,トンネル掘削に伴う湧水とそれに伴う水収支変化に関する水文地質学的研究,鉄道技術研究報告,No.1228,58p,

28) 大島洋志・榎本秀明・高木盛男,1985a,鉄道トンネルの湧水量実態調査, 鉄道技術研究速報,No.85-195,37p,

29) 大島洋志・榎本秀明・木谷日出男,1985b,道床バラスト運搬時の単位容積の推定法 鉄研速報 A85-181 1985-10,8p,

30) 大島洋志,1986.12,減・渇水問題を中心としたトンネルの路線選定と環境地質,日本応用地質学会誌,Vol27,No.4,202-209,

31) 大島洋志,1990a,道床バラストの石質と技術的問題点, 鉄道総研報告,Vol.4,No.4, 1990-4, 18-25,

32) 大島洋志・木谷日出男・榎本秀明,1990b,道床バラストの形状評価に関する研究-形状の定量的規制法-,鉄道総研研究開発テーマ報告,9p,

33) 大島洋志・木谷日出男・榎本秀明,1991,スラブ軌道トンネル等における路盤変状の実態,鉄道総研研究業務資料,

34) 大島洋志監修・執筆,石橋弘道・蝦名克彦・木谷日出男・魚住誠司・神藤健一・萩原博之・佐々木靖人・向山栄・長谷川昌弘・水野敏実,2000,わかりやすい土木地質学, 土木工学社,第 1 版 2000.11,207p

35) 大島洋志・松本雄二・市橋学・柿原宏,2001,シラス地帯の新幹線計画とトンネル路盤の設計・施工, 日本応用地質学会誌,Vol42,No.2,123-130,

36) 大島洋志,2004,私のトンネル路線選定秘伝,日本応用地質学会誌,Vol45,No.4,197-209,

37) H.Ohshima,2005, Route planning, design & construction of Shinkansen tunnel in particular pyroclastic sediments, IAEG(Lyon) GEOLINE2005,

38) 大島洋志,2005,私と山岳トンネル地下水との関わり, 日本地下水学会学術賞受賞記念講演,2005.05,

39) 大島洋志,2006.04,温故知新 渡邊貫の地質工学再考, 日本応用地質学会誌,Vol47,No.1,27-31,

40) 大島洋志,2008a, 山岳トンネルの地下水問題を主対象とした 私の地質工学への実学的挑戦,地下水学会誌,vol.50,No.2、2008.6, 89-95

41) 大島洋志,2008b,山岳トンネル先進ボーリング入門(1) ボーリング・先進ボーリングの概要, トンネルと地下,Vol39,No.9,55-66.

42) Oshima2009a,基調講演 Engineering geological problems in the planning and construction of long and large scale mountain tunnels -Case studies in Japan and advice from my experiences-IAEG International Symposium and the 7 'th Asian Regional Conference of IAEG

43) 大島洋志, 2009b,目から鱗のトンネル技術史―先達が語る最先端技術への歩み―12.地質とトンネル湧水問題,土木学会トンネルライブラリー第 22 号, 119-125,

44) 大島洋志,2010, 開通 75 周年を迎えた丹那トンネルの難工事を振り返る-環状凹地で発生した最大 200m³/分の突発湧水--,トンネルと地下,Vol41,No.5,7-13.

45) 大島洋志,2011,技術の伝承－現場の教訓から学ぶ－歴史と経験に学ぶことの重要性-山岳トンネルと地盤との関わり-.地盤工学会誌,Vol.59,No.10, 59-66+口絵 2011.10

46) 大島洋志,2012,増補 私の地質工学随想 国鉄・ずい道とともに-古稀を記念して,私家本,394p,

47) 大島洋志,2013 特集 あの日あの時あの仕事 歴史と経験の両方を学ぶことの必要性,土木技術,Vol.68.No.9,109-114,

48) 大島洋志監修・執筆,木谷日出男編著,居相好信・泉谷泰志・一條勝・稲葉武史・岩永茂治・上野將司・大津敏郎・片山政弘・角湯克典・兼松亮・桑原徹・佐々木靖人・佐藤岳史・志岐寛・鈴木雅行・中間祥二・端則夫・服部修一・服部博通・松原利之・三好壮一郎・向山栄・武藤直樹・山本浩之, 2014,トンネル技術者のための地相入門,土木工学社,200,

49) 大島洋志,2015, 特集 掘る 温故知新 山岳トンネルの難易は湧水と地圧及び路線選定で決まる,土木技術,Vol.70.No.4,14-20,

50) 大島洋志・三好壮一郎・生森敏・吉川亙司,2016,トンネル新技術への挑戦(4)-超長尺コントロールボーリング FSC-100-,vol.47 No.3,63-72

51) 大島洋志,2018,語り継ぎ言い継ぎ行かむ 第 101 回 歴史と経験に学び 現場に根ざした経験智を得よう,トンネル地下 Vol.49 No.5,39-50,

52) 大島洋志,2020,トンネルと地下水－私が学んできたこと－,地下水学会誌,Vol.62,No.2,257-281,

53) 領家邦泰,2009,山岳トンネル先進ボーリング入門(6)-施工事例(1)施工前に坑外から実施する地質調査ボーリング-, トンネルと地下,Vol.40,No.2,63-66.

54) 佐々木幸一・芳賀康司・直江久永,2008,九州新幹線筑紫トンネルの貫通-周辺環境を考慮したルート選定と施工--,トンネルと地下,Vol39,No4,7-16

55) 高橋彦治,1939.06,湧水と地圧,山海堂,土木ライブラリー(21),167

56) 竹下卓宏・森山安夫・伊藤典彦・益子篤史,2009 付加体の破砕質粘板岩層を早期閉合で施工-日奈久芦北道

路新佐敷トンネル-,トンネルと地下,Vol40,No.6,17-24
57) 竹下安司・恩塚和信・干場登・福田浩二,2003, 産業廃棄物最終処分場直下の近接施工-九州新幹線小塚トンネル-,トンネルと地下,Vol34,No.9,7-13
58) 鉄道総合技術研究所・鉄道バラスト連絡協議会,1989, 道床バラストの品質向上-道床バラスト技術講習会資料-,60p,
59) 渡邊貫,1936.09,地質工学,古今書院,627p,
60) 山口泰男・安波盛雄,1986, 含水未固結砂層を克服-津軽海峡線津軽トンネルの総まとめ--,トンネルと地下,Vol15,No.7,41-50
61) 吉川惠也・大島洋志・木谷日出男・辻徹,1983,道床バラスト品質管理の手引き（案）, 鉄道技術研究速報,No.83-47,52p,

常時微動測定に基づく免震構造物の柱・大梁・スラブの上下振動性状

関根　康平 1)
1)　日本物理探鑛株式会社　関東支店

1. はじめに

免震構造物は阪神淡路大震災を契機に急激にその採用棟数が増加し，集合住宅の他近年ではホールなどの文化施設にも採用件数が増加している．しかし，免震構造物の上下振動性状は，水平振動に比べて解析事例が少なく，不明な点も多い．常時微動測定記録を用いて建物の解析を行った既往の研究[1)]では主に柱の上下振動特性について着目した研究であり，梁やスラブの振動特性については明らかになっていない．そこで本研究では，単純平面形状の低層免震建物における，免震構造物の各部材である，柱，梁，スラブの上下振動特性の把握を目的とする．

2. 対象建物

対象建物は東北大学工学部構内に位置する免震実証試験建屋である．南側より見た建物の全景を図1に示す．この建物は同じ上部構造を持つ免震構法建屋（以下，免震棟）と在来構法建屋（本報では使用せず）の2棟により構成されている．共にRC造3階建てであり，免震棟の地下部分には6基の高減衰積層ゴムの免震装置が配置されている．建築設計概要書により与えられている対象建物の構造図を図2に示す．

図 1　対象建物

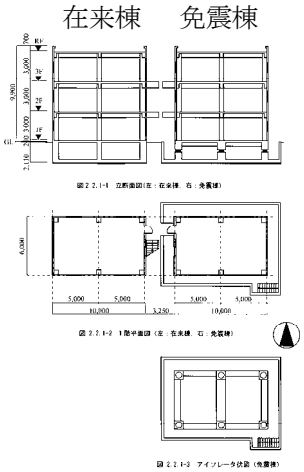


図 2　構造図

3. 常時微動測定概要

建物における常時微動は測定が容易であることから，振動特性の推定に広く用いられる．そこで，本研究でも常時微動測定により計測したデータを用いて解析を行った．

3.1 計測機器

常時微動測定に用いた測定器は，ポータブル地震計㈱ミツトヨ製GPL-6A3P（以下，GPL）と㈱白山工業製JU210/220(以下,JU)の2種類である．GPLの標準仕様と振動特性を図3に，JUの標準仕様を図4に示す．

GPL-6A3P の主な仕様

方式	過減衰型加速度計
測定成分	水平2成分(X･Y方向)，上下1成分(Z方向)
測定範囲	±2000gal
周波数特性	0.07~100Hz

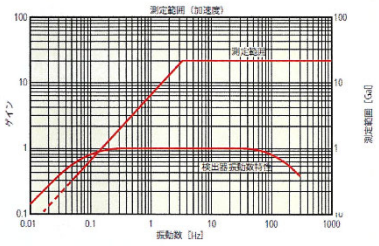


図3　GPLの標準仕様，振動特性

JU210/220 の主な仕様

方式	JA-40GA04型加速度計
測定成分	水平2成分(X･Y方向)，上下1成分(Z方向)
測定範囲	±39.2gal
周波数特性	DC~200Hz

図4　JUの標準仕様

3.2 測定計画

免震棟を対象として多点同時微動測定を計3回行った．

GPL，JUにおいて，水平方向2成分，上下方向1成分の計3成分の加速度を測定した．その際，GPLにおいてはGAINを1倍，MULTIを10倍，Low-PassFilterを50Hzと設定し，JUにおいてはGAINを1倍，MULTIを1倍，Low-PassFilterを80Hzと設定した．サンプリング周波数は200Hzとした．

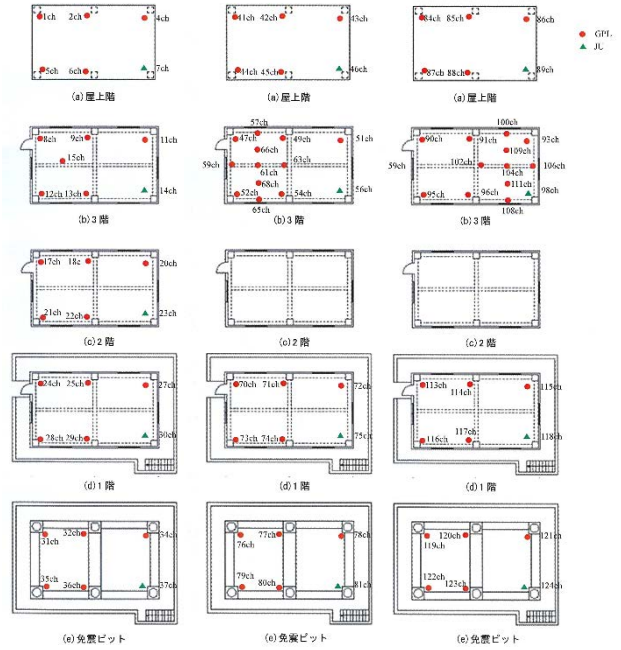
各測定の概要を表1に示す．測定1では免震ピット下部架台（以降免震ピットと略す）の上の6基，

および1階からR階各床の6本の柱近傍床板上（以降柱脚と略す）に振動計を設置した．測定2，3では建物3階床の梁中央，スラブ中央にそれぞれ振動計を設置した．各測定における振動計の設置位置を図5に示す．

表1　各測定の概要

測定日:2012年7月28日

	測定時間	サンプリング周波数
測定1	45分間	200Hz
測定2	45分間	
測定3	30分間	



測定1　　測定2　　測定3

図5　計測機器配置図

4. 解析方法

4.1　伝達関数について

本研究では周波数応答倍率（以下，伝達関数と呼ぶ）を用いて常時微動測定の分析を行った．常時微動測定によって得られた加速度記録に対し，周波数ごとにスペクトル分解を行い，フーリエスペクトルを求める．その後，入力と出力に当たるデータのフーリエスペクトルを用いて，パワースペクトル・クロススペクトルを求めた．この時，微動記録に含まれるノイズの影響を除去するため，統計力学から導入された処理方法であるアンサンブル平均を用いている．アンサンブル平均とは，複数の1郡モデルを統計集団（アンサンブル）と考え，各1郡モデルから算出された結果を平均化することである．本解析ではサンプリング周波数が200HzでありFFTデータ数8192を1郡として解析を行うため，測定時間が45分間である測定1，2では式の平均回数はN=65，測定時間が30分間である測定3では式の平均回数はN=43となる．

パワースペクトル・クロススペクトルの算出方法を式4．1に示す．

$$\text{パワースペクトル}：S_{xx}=\frac{1}{N}\sum_{i=0}^{N}X_i^*(\omega)\cdot X_i(\omega)\qquad S_{yy}=\frac{1}{N}\sum_{i=0}^{N}Y_i^*(\omega)\cdot Y_i(\omega)$$

$$\text{クロススペクトル}：S_{xy}=\frac{1}{N}\sum_{i=0}^{N}X_i^*(\omega)\cdot Y_i(\omega)\qquad S_{yx}=\frac{1}{N}\sum_{i=0}^{N}Y_i^*(\omega)\cdot X_i(\omega)$$

式 4.1

S_{xx}:入力のパワースペクトル　S_{yy}:出力のパワースペクトル
S_{xy}:入出力のクロススペクトル　S_{yx}：出入力のクロススペクトル
$X(\omega)$:入力のフーリエスペクトル　$Y(\omega)$:出力のフーリエスペクトル

添え字*：共役複素数　N：平均回数

求めたクロススペクトルを用いて，入力と出力の位相差スペクトルを算出した．位相差スペクトルの式を式4.2に示す．位相差ϕ_fの値から，入力と出力が同位相であるか判断することができる．また，位相差スペクトルの解析結果から線形最小2乗法[2)]を用いて時刻補正を行った．

$$\text{位相差スペクトル}：\varphi_f=\tan^{-1}\left(\frac{B_f}{A_f}\right)$$

A_f：クロススペクトルの実部
B_f：クロススペクトルの虚部

式 4.2

$-90°\le\varphi_f\le 90°$のとき同位相
$90°<\varphi_f$、$\varphi_f<-90°$のとき逆位相

パワースペクトル・クロススペクトルから伝達関数を求める．伝達関数は入力と出力の振幅の比を表しており，1に近いと入力と出力の振幅が同程度だと判断できる．また，伝達関数の倍率が大きい場合は，入力に比べ出力の振幅が大きいと判断できる．伝達関数の式を式4.3に示す．また，伝達関数は，前後のデータ5つを含めた-0.122Hzから+0.122Hzの範囲の記録を用いて平滑化を行った．

$$H(\omega)=\frac{E[X_i^*\cdot X_o]}{E[X_i^*\cdot X_i]}\qquad \text{式 4.3}$$

Xi　:入力のフーリエスペクトル　Xo:出力のフーリエスペクトル
E[ ]:アンサンブル平均　*:複素共役

4.2　相対加速度

加速度計から得られた絶対加速度記録を用いて解析を行った場合，絶対加速度には地動加速度の影響が含まれているため，地動の振動性状が伝達関数に表れる恐れがある．本研究では，地動加速度の影響を排除するため，絶対加速度に加えて相対加速度を用いて解析を行った．相対加速度を用いた伝達関数を算出する際には，伝達関数の式の入力X_i，もしくは出力X_0に，式4.4のX_i'もしくはX_0'の値を用いて伝達関数を算出する．

$$X_i'=X_n-X_s$$
$$X_o'=X_n-X_s\qquad \text{式 4.4}$$

Xn:相対加速度を求める点のフーリエスペクトル　Xs:基準点のフーリエスペクトル

4.3　振動モード

免震棟における柱・梁・スラブの振動モードを求めるためにFDD法を用いた．FDD法とは，多点で得られた加速度記録から応答のパワースペクトル行列を作成し，振動数ごとにスペクトル分解することで導かれた近似値から固有値スペクトル，固有ベクトルを求め，振動モードを同定する手法である．本解析では，飯山らが提案したFDD法[3]を用いて解析を行った．この方法は非比例粘性減衰系で仮定している従来法に対し，比例粘性減衰系を仮定している．FDD法による振動モード同定の流れを図6に示す．

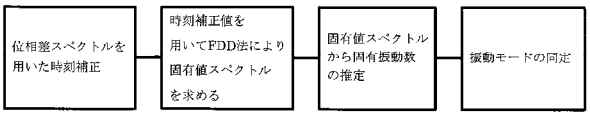


図6　FDD法解析フロー

5. 柱の上下振動特性

本章では測定１の微動測定記録より，絶対，相対加速度を用いた解析を行い，建物の柱の上下振動特性について考察する．なお，各柱，梁，スラブの名称を図７に示す．

5.1　免震ピット間の振動性状比較

免震ピット間の各柱の挙動の違いを調べるため，免震ピットの絶対加速度を用いて各柱間の伝達関数を比較する．柱1の免震ピットを入力として，同階の柱2，柱4，柱5の免震ピットを出力とした伝達関数を図8に示す．図8より，北側の柱2は20Hzまで倍率が1倍程度であることから，柱1と同程度の動きをしていることがわかる．南側の柱4，5においては，10Hzより高い振動数で倍率が異なる．これより，免震ピット下部において南北で異なる挙動をしていると言える．

5.2　同一平面の柱の伝達関数比較

前節の柱の南北の入力の違いをふまえ，柱の卓越振動数を相対の伝達関数を用いて調べる．免震ピットを入力，3階柱脚を出力として，北側の柱1，2，3の伝達関数を図9に，南側の柱4，5，6の伝達関数を図10に示す．図9より，北側の柱は15Hz付近で卓越が確認でき，図10の南側の柱では17Hz付近で卓越が確認された．これより，各柱の卓越部の振動数は，北側の柱では15Hz付近，南側の柱では17Hz付近といえる．また，南北各3本の柱間でその卓越部の倍率が違うことから，柱毎に異なる振動特性を示していることが確認できる．

なお，卓越振動数における免震部材の影響を確認するため，柱4の免震ピット，1階柱脚をそれぞれ入力，3階柱脚を出力とした相対の伝達関数を図11に示す．図11より，1階柱脚入力と比べて，免震ピット入力での卓越の倍率が大きく，その卓越も低い振動側に確認できる．この傾向が他の柱でも確認されたことから，免震部材は低い振動数側の卓越に寄与している可能性がある．

図7　各柱，梁，スラブの名称

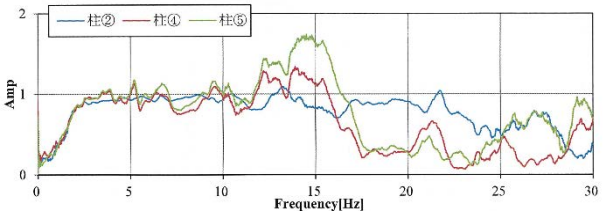


図8　柱1を入力とした免震ピットの伝達関数比較

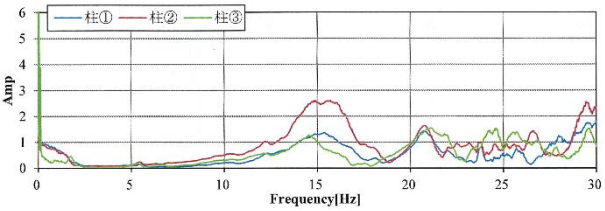


図9　北側柱の伝達関数比較
［入力：免震ピット　出力：3階柱脚］

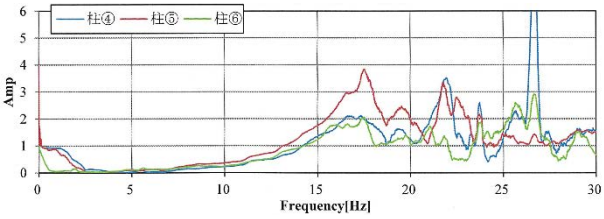


図10　南側柱の伝達関数比較
［入力：免震ピット　出力：3階柱脚］

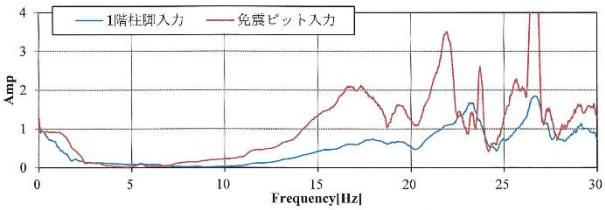


図11　柱4の免震部材による伝達関数への影響比較

5.3　各階の柱の伝達関数比較

上階に対する柱の振動性状を把握するため，各階の相対の伝達関数を比較する．代表として柱1の免震ピットを入力とし，各階柱脚を出力とした伝達関数を図12に示す．図12より，いずれの階でも

15Hzで卓越し，また，上階へいくに従いその倍率が大きくなる．特に屋上階で倍率が大きくなることが分かる．また，21Hz付近にも卓越が見られ，屋上階より3階の倍率が大きくなっている．これより，21Hzでの3階の卓越は，柱以外の構造部材の影響があると推察される．

次に全柱の挙動を確認するため，各柱の北側は15Hz, 南側は17Hz付近の卓越部分での倍率をまとめたものを図13に示す．図13から伝達関数の倍率は北側では建物中央の柱2が，南側では建物中央の柱5の倍率が最も大きい．これより，この建物は中央の柱が最も大きく揺れていることがわかる．

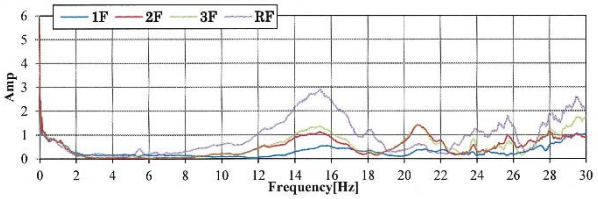


図 12　各階柱脚を出力とした伝達関数
［入力：免震ピット］

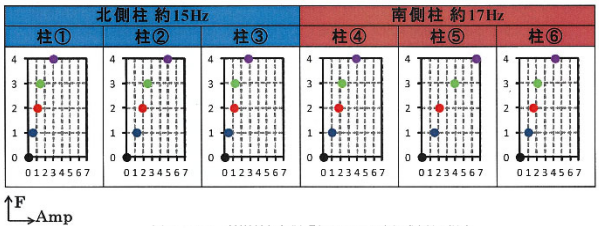


図 13　各階各柱脚を出力とした伝達関数の倍率

6. 梁とスラブの上下振動特性

本章では測定2，3の微動測定記録より，絶対加速度を用いた解析を行い，同一床板上の梁・スラブの上下振動特性について考察する．

6.1　長辺方向と短辺方向の大梁の上下振動特性

(1) 柱 1 を入力とした伝達関数

建物長辺方向と短辺方向の大梁の振動特性を把握するため，柱1の3階柱脚を入力とし長辺方向の大梁中央(12)，短辺方向の大梁中央(14)を出力とした伝達関数を図14に，位相差スペクトルを図15に示す．図14より長辺方向の大梁12を出力とした伝達関数は倍率が1倍程度になっており，図15より柱1と大梁12は同位相であると言えるため，30Hzまで柱1と大梁12は同様の動きをしたと考えられる．短辺方向の大梁14を出力とした伝達関数は15Hz, 22Hz付近で卓越が確認できる．

15Hzに関して，前述の図12において柱1の各階柱脚を出力とした伝達関数でも卓越が見られた．また，22Hzに関して，図12を見ると3階の柱を出力とした伝達関数の倍率が大きくなることから，梁・スラブの振動の影響が出ている可能性がある．

(2) 他の柱を入力とした伝達関数

柱1を入力とした伝達関数に見られた傾向が他の柱においても表れているか確認するため，絶対加速度記録を用いて他の柱を入力とした大梁の伝達関数を求めた．代表して，東側の柱3を入力とし長辺方向の大梁23，短辺方向の大梁36を出力とした伝達関数を図16に，柱4を入力とし長辺方向の大梁45，短辺方向の大梁14を出力とした伝達関数を図17に示す．図16から，柱3を入力とした伝達関数は先ほどの柱1を入力とした伝達関数と外形が似ており，建物の東西で同様の傾向を示すと考えられる．図17から，柱4を入力とした伝達関数は15Hz付近で卓越が見られない．これは5章にて確認した，南北の柱の振動特性の違いが影響していると考えられる．また柱4を入力とした伝達関数は，柱1，3と異なり21Hz付近で卓越が確認できた．

図7　各柱，梁，スラブの名称

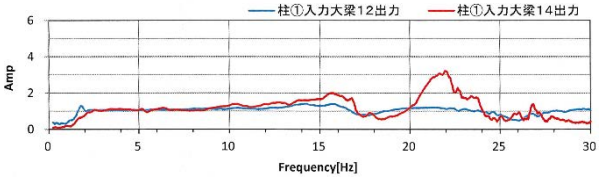


図 14　大梁中央を出力とした伝達関数

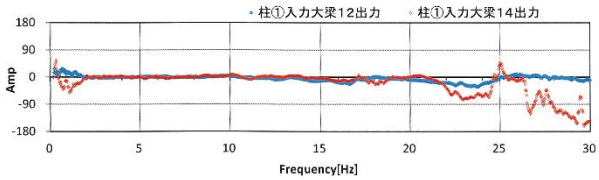


図15　位相差スペクトル

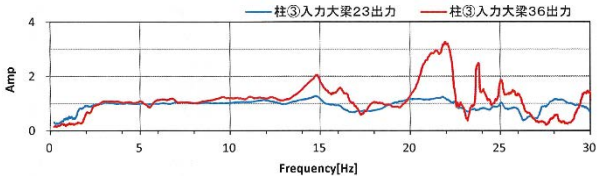


図16　柱3を入力とした大梁の伝達関数

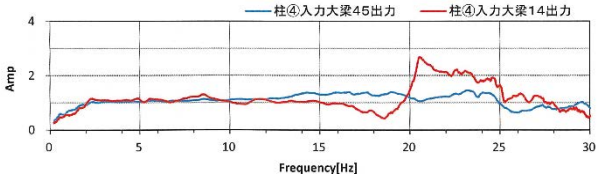


図17　柱4を入力とした大梁の伝達関数

6.2　スラブの伝達関数比較

(1) 柱 1 を入力とした伝達関数

スラブの上下振動に対する大梁・小梁の影響を把握するため，柱 1 の 3 階柱脚を入力とし，大梁と小梁で囲われたスラブの中央(スラブ 81)，大梁で囲われたスラブの中央(小梁 71)，3 階全体のスラブの中央(大梁 25)を出力とした伝達関数を図 18 に示す. また位相差スペクトルを図 19 に示す. 図 18 より，いずれも共通して 15Hz，22Hz 付近で卓越が確認でき，図 19 より 15Hz，22Hz において大梁 25 と小梁 71 はほぼ同位相であることが言える.

大梁 25 を出力とした伝達関数は，先ほどの長辺方向の大梁 12，短辺方向の大梁 14 を出力とした伝達関数と比較して卓越部の倍率が大きいことから，大梁 25 は外周部の大梁より大きく揺れていることが言える. また 22Hz において小梁 71 の伝達関数の倍率が最も大きいことから，床の上下振動に対する小梁の拘束効果は低いと考えられる.

(2) 他の柱を入力とした伝達関数

柱1を入力とした伝達関数に見られた傾向が他の柱においても表れているかを確認するため，絶対加速度記録を用いて他の柱を入力とした大梁の伝達関数を求めた．柱3の3階柱脚を入力とし，スラブ83，スラブ72，大梁25を出力とした伝達関数を図20に，柱4の3階柱脚を入力とし，スラブ81，スラブ71，大梁25を出力とした伝達関数を図21に示す.

図20から，柱3を入力とした伝達関数は柱1を入力とした伝達関数に比べ明瞭な卓越が見られた．また，柱1を入力とした伝達関数と外形が似ており，建物の東西で同様の傾向を示すと考えられる．図21から，柱4を入力とした伝達関数は17Hz付近までどれも倍率が1倍程度であるため，17Hzまでスラブ81，スラブ71，大梁25は同様の動きをしたと考えられる．また，22Hz付近においてはっきりとした卓越が見られなかった.

<table>
<tr><td>柱1</td><td>大梁12</td><td>柱2</td><td>大梁23</td><td>柱3</td></tr>
<tr><td rowspan="3">大梁14</td><td>スラブ81</td><td rowspan="3">大梁25</td><td>スラブ83</td><td rowspan="3">大梁36</td></tr>
<tr><td>スラブ71</td><td>スラブ72</td></tr>
<tr><td>スラブ82(JU)</td><td>スラブ84(JU)</td></tr>
<tr><td>柱4</td><td>大梁45</td><td>柱5</td><td>大梁56</td><td>柱6</td></tr>
</table>

図7　各柱，梁，スラブの名称

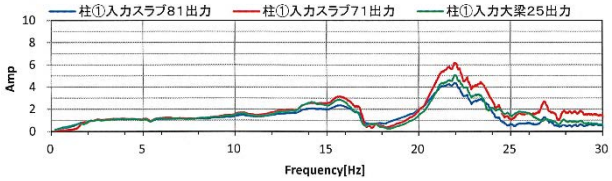


図18　大梁出力とした伝達関数

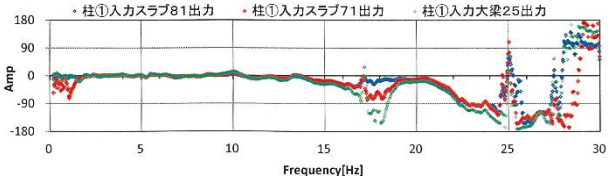


図19　位相差スペクトル

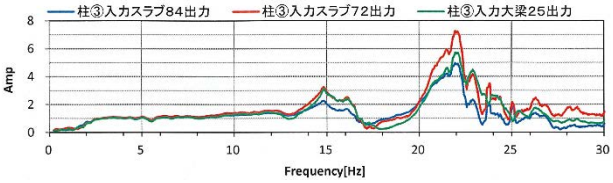


図20　柱3を入力とした大梁の伝達関数

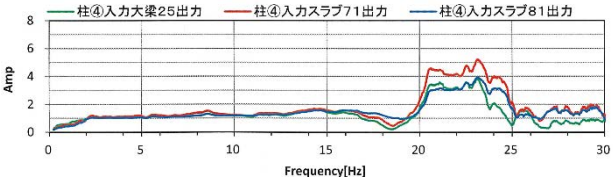


図21　柱4を入力とした大梁の伝達関数

(3) 振動モード

15Hz，22Hz付近での梁・スラブの立体振動性状を把握するため，FDD法を用いて振動モードを同定した．大梁25の固有ベクトルを測定2の値に合わせる形で，測定3の固有ベクトルに補正をかけて合成した．15Hzに対応する振動モード図を図22に，固有ベクトルを表2に示す．22Hzに対応する振動モード図を図23に，固有ベクトルを表3に示す．固有ベクトルは最大値を1として正規化してある.

図22から，15Hz付近では北側の柱に比べて南側の柱が大きく揺れたことが分かる．この傾向は5章での柱ごとの伝達関数にも見られた．また，表2から，南側の柱と3階床のスラブは同程度揺れたことが分かる.

また表3から，22Hzにおいては柱と長辺方向の大梁の固有ベクトルが同程度の値を示している．また振動モード図より3階中央の大梁が3階全体のスラブの上下振動を拘束しており，小梁の拘束効果は低いことが確認できる.

表2　固有ベクトル（15Hz）

0.27	0.38	0.40	0.24	0.19
0.49	0.61	0.75	0.47	0.39
	0.80		0.72	
	0.74		0.75	
0.46	0.64	0.77	0.67	0.43

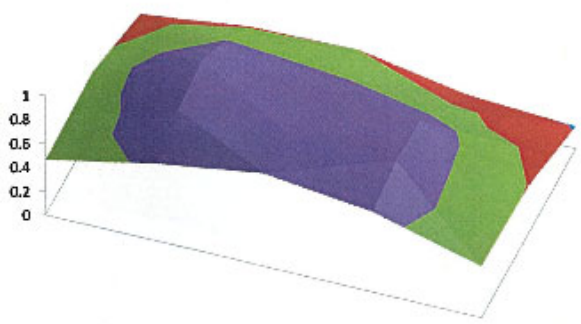


図22　振動モード図（15Hz）

表3　固有ベクトル（22Hz）

0.12	0.17	0.15	0.17	0.19
0.40	0.64	0.75	0.67	0.53
	0.87		1.00	
	0.57		0.70	
0.15	0.20	0.17	0.27	0.16

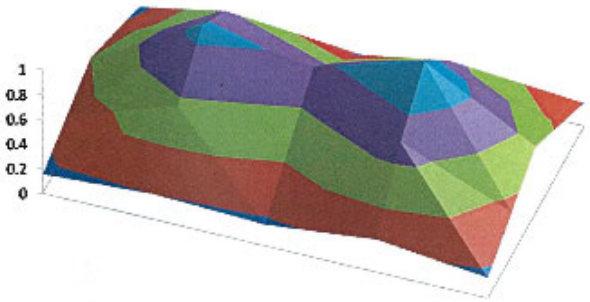


図23　振動モード図（22Hz）

7. まとめ

対象の免震構造物の常時微動記録を用いた伝達関数，振動モードの解析結果より，以下の知見が得られた．

1)同一平面上の柱では，柱毎に異なる振動特性を示す．特に，建物中央の柱は伝達関数が大きな倍率を示す．

2)柱の上下振動は，上階へいくに従いその伝達関数の倍率が大きくなる．特に，屋上階での倍率の増加が著しく大きい．

3)免震部材が低振動数側の卓越に寄与している可能性がある．

4)22Hz付近で3階全体のスラブが同位相で振動するモードが確認された．このモードより，小梁は上下振動をほとんど拘束せず，中央の大梁は上下振動を拘束することが確認できた．また柱・梁の伝達関数においても22Hz付近で卓越が見られることから，スラブの振動が柱・梁に影響したと考えられる．

参考文献

1) 箱崎文子，西尾亘司：常時微動測定に基づく免震構造物の上下振
動特性 その 1 その 2，日本建築学会大会，2013
2) 川鍋朋昌：ポータブル地震計間の時間ずれが微動測定におけるモード同定に及ぼす影響，2012
3) 飯山かほり，栗田哲：スペクトル分解を用いたFDD法による比例粘性減衰系の振動モード同定手法の理論展開，日本建築学会近畿支部研究報告集，第52号(構造系)，pp.109-112，2012

インドメダカとハブスメダカにおける *Gsdf* の機能解析

木村 優太[1)]
1)　日本物理探鑛株式会社　関西支店

1. 序論

多くの脊椎動物では，性染色体によって遺伝的に性別が決定される．性染色体には性決定遺伝子が存在し，これが性別を決定するマスター因子として働く．例えば，哺乳類はXY型の性染色体をもち，Y染色体にはオス決定遺伝子の *Sry* が存在する（Sinclair et al.，1990）．ところが，哺乳類以外の脊椎動物には *Sry* が存在せず，分類群によって異なる性染色体が報告されている（Matsubara et al.，2006）．特に魚類の多様性は著しく，近縁種が異なる性染色体をもつことも珍しくない．そのため，魚類の進化過程では新規の性決定遺伝子が何度も誕生し，それによって異なる性染色体が頻繁に生じてきたと考えられている．一方，精巣形成や卵巣形成の過程には形態的類似性が認められることから，性決定遺伝子によって活性化される下流の分子機構には，ある程度の共通性が予想される．実際に，*Dmrt1* や *Foxl2* のように，脊椎動物に共通して精巣分化や卵巣分化に関わる遺伝子群が同定されつつある（Li et al.，2013；Ottolenghi et al.，2005；Raymond et al.，1998；Smith et al.，1999）．しかし，これら性分化遺伝子群がその機能にどの程度の共通性があるかについては，ほとんど理解が進んでいない．

このような種を超えて保存されている性分化遺伝子のひとつに *Gonadal Soma Differentiation Factor*（*Gsdf*）がある（reviewed in Hsu and Chung, 2021）．*Gsdf* はTGFβスーパーファミリーに属するリガンドをコードし，2007年にニジマス（*Oncorhynchus mykiss*）の精巣から発見された（Sawatari et al.，2007）．この遺伝子は真骨魚類で広く保存されており，シーラカンスやポリプテルスなどの条鰭類や無尾両生類の一部からも発見されているが，他の四肢類では失われている（Forconi et al.，2013；Biscotti et al.，2018；2020）．また，魚類では共通して精巣のセルトリ細胞と卵巣の顆粒膜細胞で発現し（Gautier et al.，2011；Kaneko et al.，2015；Sawatari et al.，2007；Shibata et al.，2010），ゼブラフィッシュでは精巣と卵巣における生殖細胞増殖と卵成熟に関与することが知られている(Yan et al.，2017)．さらに，ルソンメダカ（*Oryzias luzonensis*）では，Y染色体上に位置するオス決定遺伝子として同定された（Myosho et al.，2012）．本種では，*Gsdf* の対立遺伝子はX染色体とY染色体の両方に存在するが，$Gsdf^Y$ と呼ばれるY対立遺伝子は $Gsdf^X$ よりも早い時期に未分化生殖腺で発現し，この $Gsdf^Y$ を遺伝子導入するとXX個体がオスに性転換することが明らかにされている（Myosho et al.，2012）．ルソンメダカ以外にも，トラフグ属（*Takifugu*）の複数種やギンダラ（*Anoplopoma fimbria*）でも *Gsdf* が性決定に関連することが示されており（Herpin et al.，2021；Kabir et al.，2021；Rondeau et al.，2013），*Gsdf* が異なる魚類で独立に性決定遺伝子として進化したことが示唆されている．したがって，*Gsdf* は生殖細胞の増殖や卵成熟だけでなく，一部の魚類では性決定にも関与する分子と考えられている．

魚類の中でも，メダカ属（O*ryzias*）は著しく多様な性決定遺伝子をもつが，異なる性決定遺伝子の下流で *Gsdf* が共通してオス分化に関わることが示唆されている．近年の研究から，彼らはXY型とZW型の性決定様式を示し，性染色体も種ごとに異なることが明らかにされた（Myosho et al.，2015；Nagai et al.，2008；Takehana et al 2007a；2007b；2008；Takehana et al.，2007）．これらのうち，上述のルソンメダカ以外にも，メダカ（*O. latipes*）とインドメダカ（*O. dancena*）のY染色体からそれぞれ異なる性決定遺伝子（*Dmy* および *Sox3*）が同定された（Matsuda et al.，2002；Takehana et al.，2014）．ところが，メダカでもインドメダカでも，受精後6日目胚における *Gsdf* の発現量は，XY生殖腺における精巣分化の開始と同時にXY特異的に増加した（Shibata et al.，2010；Takehana et al.，2014）．逆に，XX生殖巣では胚発生期の *Gsdf* の発現は非常に弱いことが明らかにされた．また，in situハイブリダイゼーションにより発現部位を調べたところ，XY個体の未分化生殖腺においてセルトリ前駆細胞で発現していることが明らかにされた．ルソンメダカではY染色体上の $Gsdf^Y$ が性決定遺伝子そのものであるが，メダカでは *Dmy* と *Gsdf* が同一セルトリ前駆細胞で共発現する（Shibata et al.，2010）．しかも，メダカにおいて *Gsdf* をノックアウトするとXY個体がメスに，*Gsdf* を強制発現させるとXX個体がオスに性転換することから，転写因子であるDMYが *Gsdf* を活性化してオス分化を導くと考えられている（Imai et al.，2015；Zhang et al.，2016）．インドメダカにおいても，オス決定遺伝子である $Sox3^Y$ 依存的に *Gsdf* が誘導され，*Gsdf* の強制発現によってXX個体がオスに性転換することから，*Gsdf* が $Sox3^Y$ 下流のオス分化遺伝子であることが示唆されている（Takehana et al.，2014）．また，メダカではエストロゲンやアンドロゲンの暴露によってXYメスやXXオスなどの性転換が生じるが，

この性転換の出現頻度と *Gsdf* 発現量には相関が認められる（Horie et al.，2016；Shibata et al.，2010）．さらに，オス特異的な *Gsdf* の高発現は，ZW 型のジャワメダカ（O. javanicus）でも認められたことから（Myosho et al.，2021），メダカ属魚類では共通して *Gsdf* がオス分化に重要な役割を果たすことが予想された．

しかし最近，ジャワメダカに近縁な ZW 型のハブスメダカ（*O. hubbsi*）について *Gsdf* の発現パターンを調べたところ，ZZ 個体だけでなく ZW 個体でも生殖腺で発現しており，本種では性差を示さないことが判明した（竹花．未発表）．そこで本研究では，メダカ属で共通して *Gsdf* がオス分化に関与するかどうか明らかにするため，*Gsdf* 発現に性差があるインドメダカと，性差がないハブスメダカについて *Gsdf* の機能解析を行った．CRISPR/Cas9 システムを用いて作出した *Gsdf* ノックアウト系統について表現型解析を行い，ノックアウト個体が性転換するかどうかを検討した．その結果，インドメダカの *Gsdf* をノックアウトした XY 個体はメスに性転換した一方，ハブスメダカの *Gsdf* をノックアウトした ZZ 個体はすべてオスに分化したことから，ハブスメダカは *Gsdf* に依存しないオス分化経路をもつことが示唆された．

2. 材料および方法

2.1 材料

本研究では，XY 型のインドメダカ（*O. dancena*）と ZW 型のハブスメダカ（*O. hubbsi*）を用いた．メダカの飼育は 28℃ ± 2℃・明期 14 時間/暗期 10 時間条件下で行い，循環システムにて 3L， または 9L 水槽で飼育した．給餌は，一日 2 回，成魚にはブラインシュリンプ（*Artemia franciscana*，マリンテック株式会社），稚魚には稚魚用の粉餌（ひかり Labo 130，株式会社キョーリン）を適量与えた．

2.2 CRISPR-Cas9 による *Gsdf* ノックアウト個体の作成

CRISPR-Cas9 法を用いて，インドメダカとハブスメダカの *Gsdf* をノックアウトした．sgRNA（終濃度 25 ng/ml）と Cas9 mRNA（終濃度 200 ng/ml）をマイクロインジェクションによって胚に導入し，G0 世代を得た．sgRNA はインドメダカの場合，*Gsdf* のエキソン 1 の塩基配列

（ 5’-TGTCTTGTTGATGCTCCATGG -3’ ）をターゲットにした．ハブスメダカの場合は *Gsdf* のエキソン 1 の塩基配列

（ 5’- ATTGCCTTGTTGATGCTCCATGG -3’ ）をターゲットにした． G0 個体と野生型個体をかけ合わせ，単一のフレームシフト変異のみをもつノックアウト系統を作成した（図 3）．インドメダカについては 14 塩基挿入（ins14）系統， 37 塩基欠失（del37）系統，ハブスメダカについては 13 塩基欠失（del13）系統を実験に用いた．

2.3 表現型の性判定

孵化後 2 か月以上経過した成熟個体について，背びれと尻びれの形態からオスとメスを判定した．

2.4 メダカ尾ビレからの DNA 抽出

50 mL チューブに飼育水 50 mL を入れ，オイゲノール溶液［商品名 FA-100（10% オイゲノール水溶液）］を 25 µL 加えて麻酔液を作成した（終濃度 0.05% ）．1.5 mL チューブに Buffer G2 100µL と

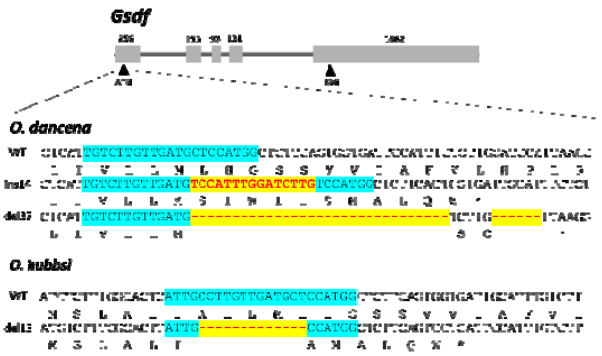


図1 *Gsdf* の遺伝子構造とCRISPR/Cas9による変異

Protenase K（ProK）1 µL を加え（終濃度 0.1 mg / mL ProK in G2），そこにメダカ成魚の尾びれをカミソリで切断して（先端から 1/2 ～ 1/3 程度）入れた． 55℃で 10 分間インキュベートし，短くボルテックスした後，さらに 55℃で 45 分間インキュベートした．1,5000 rpm，4℃で 5 分間遠心し，新しい 1.5 mL チューブにグリコーゲン 2 µL とエタノール 125 µL を加え，そこに遠心した上清 50 µL を移し転倒混和した．さらに 1,5000rpm，4℃で 5 分間遠心後，デカントでエタノールを除き，70 % エタノール 100µL 加えて転倒混和し，1,5000 rpm， 4℃で 3 分間遠心，デカントで（あるいはピペットで）エタノールを除いた後，室温で 5 分間乾燥させた．TE 100µL を加えて短くボルテックスし，これを PCR のゲノム DNA 鋳型として用いた．

2.5 PCR による遺伝子型の性と *Gsdf* 遺伝子型の判定

1 サンプルあたりを以下の反応液で調整した．MQ（超純水） 5. 8 µL, 5 × KAPA Taq Buffer (final 1×) 2.0 µL, 25 mM $MgCl_2$ (final 2.5 mM) 1.0 µL, dNTPs (10 mM each) (final 0.3 mM each) 0.3 µL, Primer Fw (10 µM) (final 0.5 µM) 0. 5 µL, Primer Rv (10 µM) (final 0.5 µM) 0. 5 µL, Kapa Taq Extra (final 2.5 U/100 µL) 0. 05 µL （ Total Volume 10.15 µL) を混ぜてスピンダウンしたのち，8 連チューブ or 96 連チューブに 10 µL ずつ分注した．調整時に用いたプライマーは BJ010529F (5’-AAAACAAGAACGAAGGAGAAATAC-3’)と BJ010529R (5’-TCAGACTGACCCAACTTCTTCTTGA-3’)をインドメダカの遺伝子型の性(XX/XY)判定，danGsdf-KO_chk_4fw

(5'-GATCCTACTGCGTCGTCCAC-3')，と
danGsdf-KO_chk_4rv
(5'-AACAGCAGAGGCAGGAGAG-3')をインドメダカの *Gsdf* の変異の確認に用いた．また，
RAD53927_F
(5'-TTCTTAC TAAACAGGACGTCTACAAC-3')と RAD53927_R
(5'-TCAAGTTCATTTTGTGCAGCTC-3')をハブスメダカの遺伝子型の性(ZZ/ZW)判定，
hub-Gsdf_1f
(5'-GATCCTACTGCGTTGACCAC-3')と
hub-Gsdf_2r
(5'-AACAGCAGAGGCAGGAGAG-3')をハブスメダカの *Gsdf* 変異の確認に用いた．

各チューブに鋳型 DNA を 1 μL ずつ加え，短くボルテックスしてスピンダウンし，サーマルサイクラーを用いて以下の条件で PCR 反応を行った．① 95 ℃, 2 分を 1 サイクル，② 95 ℃, 15 秒，55 ℃, 15 秒，72 ℃，15 秒を 35 サイクル，③ 72 ℃，15 秒を 1 サイクル，④ 4 ℃，∞，で PCR を行い，DNA-500 キットを用いて MultiNA で電気泳動した．

なお，インドメダカの遺伝子型の性判定で XX，XY，YY を識別するためにプライマーの BJ010529F，BJ010529R を用いた PCR 産物に関しては *Hinf* I 処理を行った．*Hinf* I 処理は 1 サンプルあたりを以下の反応液で調整した．MQ 8.0 μL，10×Buffer 2.0 μL，*Hinf* I 0.3 μL（Total Volume 1.3 μL ）をボルテックスし，10 μL ずつ PCR 産物 10 μL に加えた. 37 ℃で 2 時間インキュベートし，95℃のサーマルサイクラーで 2 分間不活性化を行い，DNA-1000 キットを用いて MultiNA で電気泳動した．

2.6 パラフィン切片の作製

成魚の生殖腺を含む胴体部分をブアン固定液に入れ，一晩固定した．エタノール系列による脱水後，レモゾールで透徹し，Paraplast Plus を用いてパラフィン包埋を行った．薄さ 5 μm でパラフィン切片を作製し，ヘマトキシリン・エオシン（HE）染色を行い，MGK-S 標本封入剤（松浪硝子）で封入，室温にて一晩乾燥させ，光学顕微鏡で観察した．

3 結果

3.1 *Gsdf* のノックアウト

Gsdf の性分化における役割を明らかにするため，CRISPR/Cas9 を用いて第 1 エキソンに挿入欠失変異を誘導した．インドメダカについては， ins14 系統（14 塩基挿入）と de137 系統（37 塩基欠失），ハブスメダカについては del13 系統（13 塩基欠失）を作出した．これらの変異はいずれもフレームシフトを生じ，変異対立遺伝子からは 216 残基の正常な *Gsdf* タンパク質ではなく，フレームアウトした不完全な配列を含む 12～21 残基の短いタンパク質が予測された．これらの変異はプロドメインを破壊し，TGFβ ドメインを完全に欠くため，これらの変異 GSDF タンパク質は完全に機能を失っていると考えられた．

3.2 インドメダカの *Gsdf* ノックアウト個体における表現型の性

インドメダカにおいて *Gsdf* 変異をヘテロ接合でもつ個体同士を交配し，次世代を成魚まで育てて表現型の性と遺伝子型の性を判定した（表 1）．その結果， XX 個体は変異の有無にかかわらずすべてがメスに分化した．一方， XY 個体では，野生型ホモ接合（+/+）個体と変異をヘテロ接合でもつ（+/−）個体はすべてオスに分化したが，変異をホモ接合でもつノックアウト（−/−）個体の一部はメスに性転換した．性転換の頻度は， ins14 系統では 12 個体中 10 個体 （83%），del37 系では 12 個体中 8 個体（67%）であった．これらの結果は，*Gsdf* が本種のオス分化に必要であることを示している．

また， XY 同士の交配から YY 個体が得られ，変異の有無にかかわらずすべてがオスに分化した．このことは本種の YY 個体が生存可能であり，*Gsdf* をノックアウトしても YY 個体は性転換しないことを示している．したがって，Y 染色体が 2 本，すなわち性決定遺伝子が 2 コピーあれば，*Gsdf* ノックアウトによる XY 性転換をレスキューできることが示唆される．

3.3 ハブスメダカの *Gsdf* ノックアウト個体における表現型の性

ハブスメダカにおいて *Gsdf* 変異をヘテロ接合でもつ個体同士を交配し，次世代を成魚まで育てて表現型の性と遺伝子型の性を判定した（表 2）．その結果，ZZ 個体は変異の有無にかかわらずすべてがオスに分化し，ZW 個体もすべてがメスに分化した．*Gsdf* 変異をホモ接合でもつノックアウト ZZ 個体は 47 個体得られているが，インドメダカとは異なり，メスへの性転換は全く認められなかった．このことから *Gsdf* が本種のオス分化に必要ないことが示された．

3.4 *Gsdf* ノックアウト個体における生殖腺の組織学的解析

生殖腺形成における *Gsdf* の役割を明らかにするため，インドメダカとハブスメダカのノックアウト個体について，生殖腺の組織学的解析を行った．どちらの種においても，ノックアウト個体では野生型よりも大きな肥大化した精巣が認められ，生殖細胞が著しく増加していた（図 2，3）．ノックアウト個体でも野生型と同様に成熟精子を含むすべての精子発生段階を含むが，すべての段階のシスト数が増加しており，断面積は野生型精巣の約 5 倍以上に拡大していた．このことから，*Gsdf* は精子の形成や成熟に必要ではなく，生殖細胞の増殖や精巣サイズの調節に関与することが示唆された．

卵巣についても，両種のノックアウト個体では野

生型よりも大型で肥大化した卵巣が認められ，生殖細胞も著しく増加していた（図 4，5）．また，ノックアウト個体の卵巣は野生型に比べて若いステージの卵母細胞が多く，古いステージの卵母細胞が少なかった．野生型卵巣には多くの成熟卵母細胞が存在するのに対し，ノックアウト卵巣には卵黄形成期の卵母細胞しかなく，ステージⅦ以降の卵母細胞はほとんど認められなかった（ステージは Iwamatsu et al.，1988 に従った）．これらのことから，*Gsdf* は生殖細胞の増殖や卵巣サイズの調節だけでなく，若い卵母細胞が蓄積しないように，卵母細胞がステージⅦを超えて成熟するのにも必要であることが示唆された．

表1 インドメダカの*Gsdf*ノックアウト系統における表現型の性と遺伝子型の性

Gsdf	−/−			−/−			−/−			Total
Genotype	XX	XY	YY	XX	XY	YY	XX	XY	YY	
Phenotype	♀ ♂	♀ ♂	♀ ♂	♀ ♂	♀ ♂	♀ ♂	♀ ♂	♀ ♂	♀ ♂	
ins 14	1 0	0 3	- -	4 0	0 23	0 5	5 0	10 2	0 2	55
del 37	3 0	0 5	- -	18 0	0 14	- -	17 0	8 4	0 8	77

表2 ハブスメダカの*Gsdf*ノックアウト系統における表現型の性と遺伝子型の性

Gsdf	+/+		+/−		−/−		Total
Genotype	ZZ	ZW	ZZ	ZW	ZZ	ZW	
Phenotype	♀ ♂	♀ ♂	♀ ♂	♀ ♂	♀ ♂	♀ ♂	
del 13	0 37	44 0	0 107	105 0	0 47	52 0	392

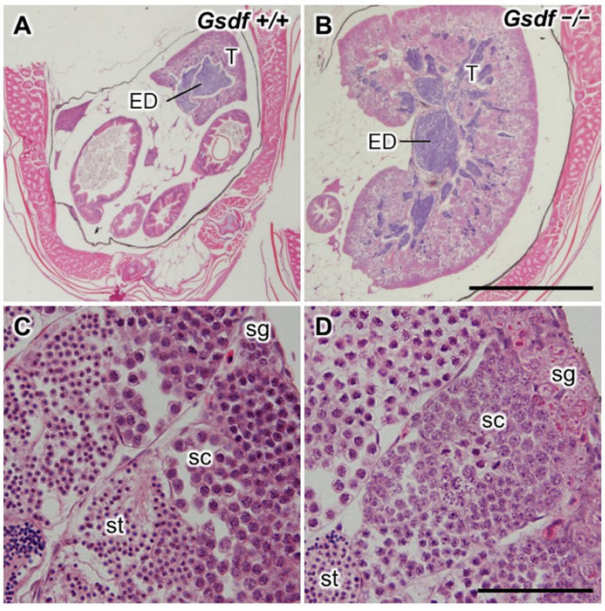


図 2．インドメダカの *Gsdf* ノックアウト（ins14）系統における成魚の精巣組織 野生型（*Gsdf +/+*）XY 個体（A），およびノックアウト（*Gsdf -/-*）XY 個体（B）の精巣と，それらの拡大像（C および D）．T, 精巣；ED, 輸精管；sc, 精母細胞；sg, 精原細胞；st, 精子細胞．スケールバーは 1 mm（A, B），あるいは 50 µm（C, D）を示す．

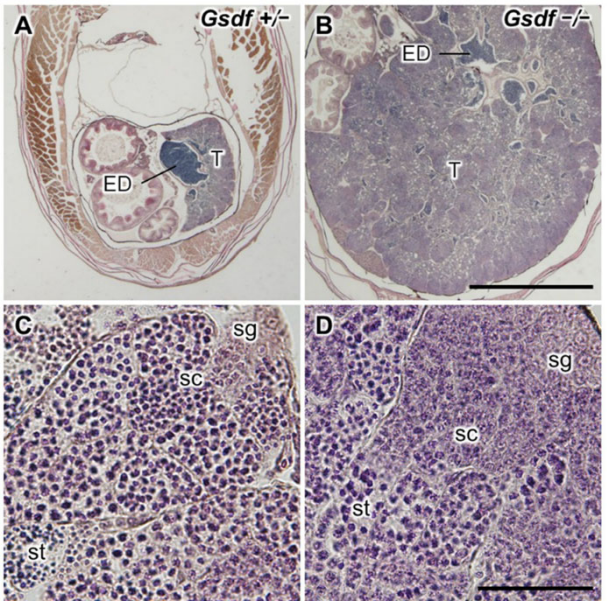


図 3．ハブスメダカの *Gsdf* ノックアウト系統における成魚の精巣組織
野生型とのヘテロ接合（*Gsdf +/-*）ZZ 個体（A），およびノックアウト（*Gsdf -/-*）ZZ 個体（B）の精巣と，それらの拡大像（C および D）．T, 精巣；ED, 輸精管；sc, 精母細胞；sg, 精原細胞；st, 精子細胞．スケールバーは 1 mm（A, B），あるいは 50 µm（C, D）を示す．

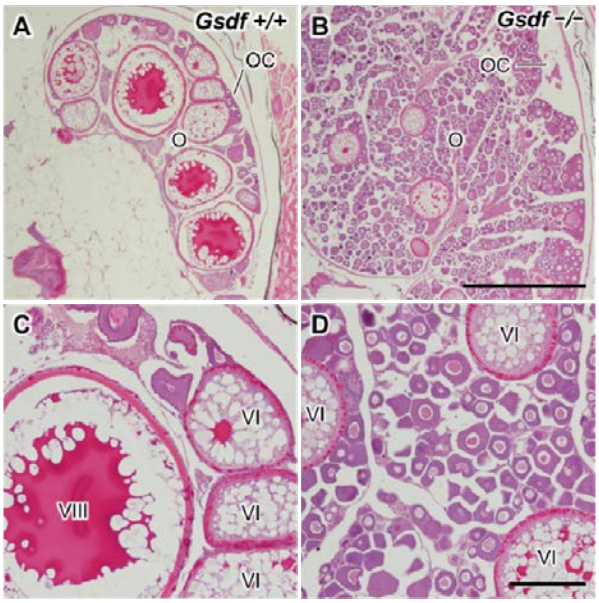


図 4．インドメダカの *Gsdf* ノックアウト（ins14）系統における成魚の卵巣組織
野生型（*Gsdf +/+*）XY 個体（A），およびノックアウト（*Gsdf -/-*）XY 個体（B）の卵巣と，それらの拡大像（C および D）．O, 卵巣；OC, 卵巣腔；VI；卵母細胞（ステージ VI）；VIII；卵母細胞（ステージ VIII）．スケールバーは 1 mm（A, B），あるいは 200 µm（C, D）を示す．

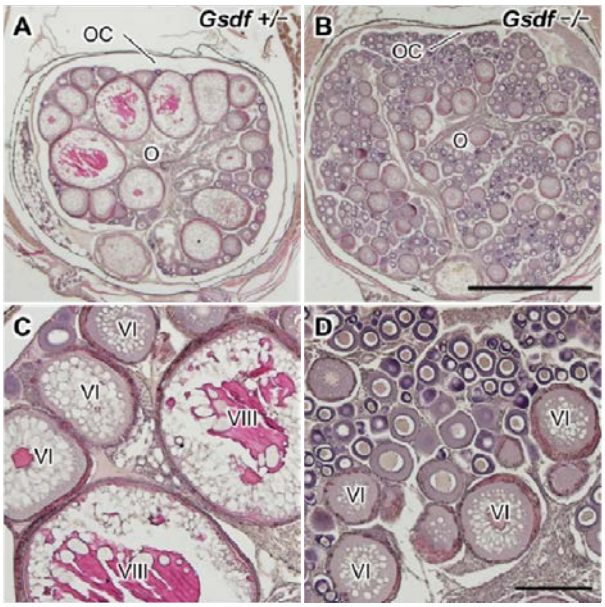


図5．ハブスメダカの *Gsdf* ノックアウト系統における成魚の卵巣組織
野生型とのヘテロ接合（*Gsdf* +/-）ZW 個体（A），およびノックアウト（*Gsdf* -/-）ZW 個体（B）の卵巣と，それらの拡大像（C および D）．O，卵巣；OC，卵巣腔；VI；卵母細胞（ステージ VI）；VIII；卵母細胞（ステージ VIII）．スケールバーは 1 mm（A, B），あるいは 200 μm（C, D）を示す．

4 考察

4.1 インドメダカのオス分化には *Gsdf* が必要

本研究により，インドメダカ（*Oryzias dancena*）の *Gsdf* をノックアウトすると XY 個体がメスに性転換することが判明し，オス分化に *Gsdf* が必要であることが示された．これまでの研究から，本種の性決定遺伝子は *Sox3* の Y 染色体対立遺伝子（$Sox3^Y$）であることが明らかにされている（Takehana et al.，2014）．$Sox3^Y$ は HMG ドメインをもつ転写因子をコードし，未分化生殖腺における体細胞で発現する．*Gsdf* も生殖腺体細胞において XY 特異的に高発現し，*Gsdf* を強制発現させると XX 個体がオスに性転換する．さらに，$Sox3^Y$ を遺伝子導入した XX 個体では *Gsdf* の発現上昇が認められ，$Sox3^Y$ をノックアウトした XY 系統では *Gsdf* 発現が消失する．以上の結果から，インドメダカの性決定遺伝子 $Sox3^Y$ は *Gsdf* の転写制御を介して精巣分化を誘導すると考えられる（図 6）．*Gsdf* のオス分化における同様の役割はメダカ（*O. latipes*）でも報告されている．本種では Y 染色体特異的な *Dmy* がオス決定遺伝子として働くが，*Gsdf* は *Dmy* の発現直後に同じ生殖腺体細胞で発現する（Shibata et al.，2010）．また，*Gsdf* をノックアウトすると XY 個体がメスに性転換し，*Gsdf* を強制発現させると XX 個体がオスに性転換する（Imai et al.，2015；Zhang et al.，2016）．さらに，*Gsdf* のプロモーター領域には，転写因子である DMY に対する 2 つの推定結合部位が存在し（Zhang et al.，2016），DMY はこの領域に直接結合して *Gsdf* の転写を活性化する（Chakraborty et al.，2016）．そのためメダカもインドメダカと同様に，*Dmy* が *Gsdf* を活性化させることでオス分化が開始されると考えられている．

さらに，ルソンメダカ（*O. luzonensis*）の性決定遺伝子は *Gsdf* そのものであり，Y 染色体上の対立遺伝子 $Gsdf^Y$ が生殖腺体細胞でより早期に発現することでオス分化が開始される（Myosho et al.，2012）．*Dmy* はメダカとルソンメダカの共通祖先で生じたことが推定されているが，ルソンメダカに *Dmy* は存在しない．そのため，ルソンメダカの祖先において *Dmy* の下流で働いていた *Gsdf* のシス調節領域に変異が生じ，これが原因で *Dmy* の役割を $Gsdf^Y$ が奪ったと考えられている．以上のように，メダカ属では *Gsdf* がオス分化の中心的役割を担っており，*Gsdf* そのもの，あるいはその転写制御因子の多様化によって異なる性決定機構が進化してきたと予想される．

なお本研究では，インドメダカの *Gsdf* ノックアウト個体は，必ずしもすべてが性転換しなかった．すべてのノックアウト XY 個体のうち，ins14 系統では 10/12 （83%），del37 系統では 8/12 （67%）がメスに性転換したが，残りの個体はいずれもオスに分化した．また，*Gsdf* をノックアウトしても YY 個体は全く性転換せず，すべての個体がオスに分化した．これらの結果は，Y 上の性決定遺伝子 *Sox3* が *Gsdf* 以外のオス分化遺伝子を活性化する可能性を示唆している．同様の現象はメダカの *Gsdf* ノックアウト個体でも確認されており，*Gsdf* を介さないオス分化経路の存在が示唆されている（Imai et al.，2012）．ただし，メダカの *Gsdf* ノックアウトでは，初期性分化過程では全ての XY 個体が卵巣分化を示し，その後，一部の個体が精巣方向へ分化転換することから，性決定遺伝子の制御下に精巣の維持に関わる経路の存在が予想される．今後，インドメダカにおいてもノックアウト個体の初期性分化過程を解析することにより，同様の精巣維持経路の存在を解明できる可能性がある．

4.2 ハブスメダカのオス分化に *Gsdf* は必要ない

本研究では，ZW 型のハブスメダカ（*O. hubbs*）でも同様に *Gsdf* のノックアウト解析を行ったが，ZZ 個体はすべてオスに分化し，全く性転換を生じなかった．このことは，ハブスメダカのオス分化に *Gsdf* は必要ないことを示している．本種の性決定遺伝子はまだ同定されていないが，その作用点は *Gsdf* より下流にあることが予想され，メダカやインドメダカとは異なる性分化経路をもつことが示唆された（図 6）．

ゲノム解析の進展により，近年複数の魚類で性決

定遺伝子やその候補が特定されつつある．メダカ属で発見された *Dmy*，*Sox3*，および *Gsdf* 以外に，TGFß 因子とその受容体をコードする *Amh* と *Amhr2* 遺伝子も性決定遺伝子としての関与が同定されている．*Amh* のパラログである *AmhY* はパタゴニアペヘレイ（*Odontesthes hatcheri*）の Y 染色体上から同定された性決定遺伝子であり（Hattori et al.， 2012），他にもイトヨやティラピアなど複数の魚類で独立に性決定遺伝子として獲得されている（Li et al.，2015；Peichel et al.， 2020）．一方，*Amhr2* はトラフグ属のいくつかの種とアユ（*Plecoglossus altivelis*）で独立に性決定遺伝子として作用している（Kamiya et al.，2012；Nakamoto et al.，2021）．もう一つの TGFß 因子をコードする *Growth Differentiation Factor 6*（*Gdf6*）は，ノソブランキウス属の一種における Y 連鎖性決定遺伝子として働いている（Reichwald et al.，2015）．このように，魚類では特定の転写因子群に加えて，TGFß 因子とその受容体が，何度も繰り返し性決定遺伝子として獲得されてきた．しかし，現在ハブスメダカでは PacBio シークエンサーによる HiFi リードを高精度のゲノム解析が実施されているが，性決定領域を含むコンティグにはこれら既知の性決定遺伝子や性分化遺伝子は存在しなかった（竹花ほか，未発表）．したがって，今後の解析によって本種から未知の性決定遺伝子を同定できれば，*Gsdf* に依存しない性分化経路を解明できると考えられる．

4.3 生殖腺形成における *Gsdf* の役割

また本研究では，インドメダカとハブスメダカに共通して，ノックアウト個体では生殖腺の肥大化が認められた．オスでは精子形成が観察され，受精能をもつ精子も得られたが，精巣には正常個体よりも著しく多数の生殖細胞が存在した．また，メスの卵巣中でも著しく多数の生殖細胞が観察される一方で，成熟した卵母細胞の数は減少していた．これらのことから，*Gsdf* は両種に共通して生殖細胞の増殖を負に制御し，卵巣では卵母細胞の成熟にも関与することが示された．

同様の表現型はメダカの *Gsdf* ノックアウトでも認められている．ノックアウト精巣では生殖細胞が過剰に増殖し，性分化初期には XY 生殖腺の生殖細胞数が XX 生殖腺と同様に増加する（Imai et al.，2015；Zhang et al.，2016）．ノックアウト卵巣では，生殖細胞が異常分裂を起こし，卵巣の過形成を引き起こす（Wu et al.，2019）．また，卵母細胞の成長が抑制され，卵巣の成熟が損なわれる（Guan et al.，2017）．したがって，*Gsdf* はメダカ属魚類に共通して生殖細胞の増殖抑制に関与し，卵巣では顆粒膜細胞の維持を介して卵成熟にも関わることが考えられる．

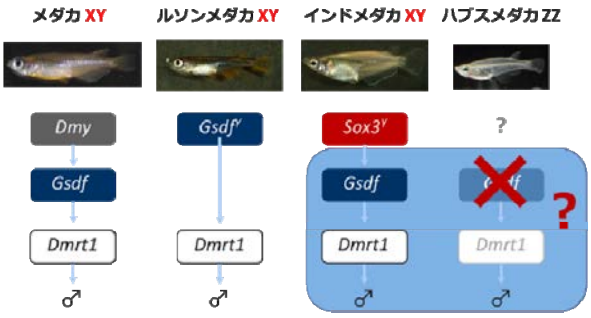


図 6. メダカ属における *Gsdf* の性分化への役割

メダカ属には *Gsdf* に依存したオス分化経路と，*Gsdf* に依存しないオス分化経路が存在することが考えられる．

参考文献

1)Biscotti MA, Adolfi MC, Barucca M, Forconi M, Pallavicini A, Gerdol M, Canapa A, Schart M: A Comparative View on Sex Differentiation and Gametogenesis Genes in Lungfish and Coelacanths.Genome Biol Evol 10:1430-1444,2018

2)Biscotti MA, Carducci F, Barucca M, Gerdol M. Pallavicini A, Schartl M, Canapa A, Adolfi MC: The transcriptome of the newt Cynops orientalis provides new insights into evolution and function of sexual gene networks in sarcopterygians. Sci Rep 10:5445,2020

3)Chakraborty T,Zhou LY,Chaudhari A,Iguchi T, Nagahama Y: *Dmy* initiates masculinity by altering *Gsdf*/Sox9a2/Rspol expression in medaka (*Oryzias latipes*).Sci Rep 6:19480,2016

4)Forconi M,Canapa A,Barucca M,Biscotti MA,Capriglione T, Buonocore F,Fausto AM,Makapedua DM,Pallavicini A,Gerdol M,De Moro G,Scapigliati G,Olmo E,Schart M: Characterization of sex determination and sex differentiation genes in Latimeria. PLoS One 8:e56006,2013

5)Gautier A,Le Gac F,Lareyre JJ: The *gsdf* gene locus harbors evolutionary conserved and clustered genes preferentially expressed in fish previtellogenic oocytes.Gene 472:7-17,2011

6)Guan G,Sun K,Zhang X Zhao X,Li M,Yan Y,Wang Y,Chen J,Yi M,Hong Y: Developmental tracing of oocyte development in gonadal soma-derived factor deficiency medaka (*Oryzias latipes*) using a transgenic approach.Mech Dev 143:53-61,2017

7)Hattori RS,Murai Y,Oura M,Masuda S,Majhi SK, Sakamoto T,Fernandino JI,Somoza GM,Yokota M, Strussmann CA: A Y-linked anti-Mullerian hormone duplication takes over a critical role in sex determination.Proc Natl Acad SciU S A 109:2955-2959,2012

8)Herpin A,Schartl M,Depinc A,Guiguen Y,Bobe J,Hua-Van A, Hayman ES,Octavera A,Yoshizaki G,Nichols KM,Goetz GW,Luckenbach JA: Allelic diversification after transposable element exaptation promoted *gsdf* as the master sex determining gene of sablefish.Genome Res 31:1366-1380,2021

9)Horie Y,Myosho T,Sato T,Sakaizumi M,Hamaguchi S, Kobayashi T: Androgen induces gonadal soma-derived factor, *Gsdf*,in XX gonads correlated to sex-reversal but not *Dmrt1* directly,in the teleost fish,northern medaka (*Oryzias sakaizumii*).. Mol Cell Endocrinol 436:141-149,2016

10)Hsu CW,Chung BC: Evolution,Expression,and Function of Gonadal Somatic Cell-Derived Factor.Front Cell Dev Biol 9:684352,2021

11)Imai T,Saino K,Matsuda M: Mutation of Gonadal soma-derived factor induces medaka XY gonads to undergo ovarian development.Biochem Biophys Res Commun 467:109-

114,2015

12)Iwamatsu T,Onitake K (1988) On the effects of cyanoketone on gonadotropin- and steroid-induced in vitro maturation of *Oryzias* oocytes.Gen.Comp.Endocrinol.52 418-425.

13)Kabir A,leda R,Hosoya S,Fujikawa D,Atsumi K,Tajima S,Nozawa A,Hirase T,Nakamura O,Kadota M.Nishimura O, Kuraku S, Nakamura Y, Kobayashi H, Toyota S, Tasumi S, Kikuchi K.Repeated translocation of a supergene underlying rapid sex chromosome turnover in Takifugu fish.bioRxiv 2021 (https://www.biorxiv.org/content/10.1101/2021.11.16.468883v1.full)

14)Kaneko H, Ijiri S, Kobayashi T, Izumi H, Kuramochi Y, Wang DS, Mizuno S, Nagahama Y: *Gonadal soma-derived factor* (*gsdf*), a TGF-beta superfamily gene, induces testis differentiation in the teleost fish Oreochromis niloticus. Mol Cell Endocrinol 415:87 99,2015

15)Li M,Sun Y,Zhao J,Shi H,Zeng S,Ye K,Jiang D,Zhou L,Sun L,Tao W,Nagahama Y,Kocher D,Wang D: A Tandem Duplicate of Anti-M lerian Hormone with a Missense SNP on the Y Chromosome Is Essential for Male Sex Determination in Nile Tilapia., Oreochromis niloticus. PLoS Genet 11:c1005678,2015

16)Li,M.-H.,Yang,H.-H.,Li,M.-R.et al.: Antagonistic roles of Dmrtl and Foxl2 in sex differentiation via estrogen production in tilapia as demonstrated by TALENs. Endocrinology,154 4814-4825(2013)

17)Matsubara K Tarui H,Toriba M,Yamada K,Nishida Umehara C,Agata K,Matsubara Y: Evidence for different origin of sex chromosomes in snakes,birds,and mammals and step-wise differentiation of snake sex chromosomes.Proc Natl Acad Sci U sS A 103:18190-18195,2006

18)Myosho T, Hattori M,Yamamoto J,Toda M,Okamura T, Onishi Y,Takehana Y,Kobayashi T: Effects of synthetic sex steroid hormone exposures on gonadal sex differentia dynamics of a male-related gene,*Gonadal soma-derived factor* (*Gsdf*) and an estrogen up-regulated gene,*Choriogenine-H* (*ChgH*) gene expression in the euryhaline Javatish medaka,*Oryzias javanicus*, based on genetic sexes.Chemosphere 274:129893,2021

19)Myosho T,Otake H,Masuyama H,Matsuda M,Kuroki Y, Fujiyama A,Naruse K,Hamagu S,Sakaizumi M: Tracing the emergence of a novel sex-determining gene in medaka,*Oryzias luzonensis*.Genetics 191:163-170,2012

20)Myosho T,Takehana Y,Hamaguchi S,Sakaizumi M: Turnover of sex chromosomes in celebensis group medaka fishes.G3 (Bethesda) 5:2685-2691,2015

21)Nagai T,Takehana Y,Hamaguchi S,Sakaizumi M: Identification of the sex-determining locus in the Thai medaka, *Oryzias minutillus*.Cytogenet Genome Res 121:137-142,2008

22)Nakamoto M,Uchino T,Koshimizu E,Kuchiishi Y, Sekiguchi R, Wang L, Sudo R, E iguen Y, Schartl M, Postlethwait JH, Sakamoto T: A Y-linked anti-Mullerian type-II receptor is the sex-determining gene in ayu, Plecoglossus altivelis. PLoS Genet 17:c1009705,2021

23)Ottolenghi,C.,Omari, S.,Garcia-Ortiz,J.E.et al.:Foxl2 is required for commitment to ovary differentiation.Hum.Mol. Genet.,14,2053-2062 (2005)

24)Peichel CL, McCann SR, Ross JA, Naftaly AFS, Urton JR, Cech JN,Grimwood J,Sers RM.Kingsley DM.White MA: Assembly of the threespine stick chromosome reveals convergent signatures of sex chromosome cvolution.Genome Biol 21:177,2020

25)Raymond CS Shamu CE,Shen MM. Seifert K.J. Hirsch B, Hodgkin J.Zarkower for evolutionary conservation of sex-determining genes.Nature 391:691-695,1998

26)Reichwald K,Petold A.Koch P Downie BR.Hartmann N. Pietsch S,Baumgart M.Ch D,Felder M,Bens M.Sahm A, Szafranski K.Taudien S.Croth M.Arisi 1.Weise A.Bhatt Sharma V,Kraus M.Schmid F, Priebe S.Lichr T, Gertach M. Than ME Kestler HA, Volf Jr, Schartl M. Cellerino A, Englert C,Platzer M: Insights into Sex Chromosome Evolution and Aging from the Genome of a Short-Lived I163:1527-1538,2015

27)Rondeau EB,Messmer AM,Sanderson DS, Jantzen SG, von Schalburg KR,Minkley DR,Leong .JS,Macdonald GM, Davidsen AE, Parker WA, Mazzola RS, Campbel F: Genomics of sabletish (*Anoplopoma fimbria*):expressed genes, mitochondrial phylogeny, linkage map and identification of a putative sex gene.BMC Geno 14:452,2013

28)Sawatari E,Shikina S,Takeuchi T,Yoshizaki G: A novel transforming growth superfamily member expressed in gonadal somatie cells enhances primordial germ cell and spermatogonial proliferation in rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*). Dov Biol 301:266-275,2007

29)Shibata Y,Paul Prasanth B, Suzuki A, Usami T, Nakamoto M,Matsuda M,Nagahama Y: Expression of gonadal soma derived factor (*GSDF*) is spatially and temporally correlated with carly testicular differentiation in medaka.Gene Expr Patterns 10:283-289,2010

30)Sinclair AH,Berta P.Palmer MS,Hawkins JR, Griftiths BL, Smith MJ,Foster JW.Frischaut M. Lovell Badge R,Goodfellow PN: A gene from the human sex-determining regi encodes a protein with homology to a conserved DNA-binding motif. Nature 346:240- 244,1990

31)Smith CA,McClive PJ,Wester PS,Reed KJ,Sinclair AH: Conservation of a sex-determining gene.Nature 402:601-602,1999

32)Takehana Y,Demiyah D,Naruse K,Hamaguchi S, Sakaizumi M: Evolution of different Y chromosomes in two medaka species,*Oryzias dancena* and *O.latipes*..Genetics 175:1335-1340,2007a

33)Takehana Y,Hamaguchi S, Sakaizumi M: Different origins of ZZ/ZW sex chromosomes in closely related medaka fishes, *Oryzias javanicus* and *O.hubbsi*. Chromosome Res 16:801-811,2008

34)Takehana Y,Matsuda M.Myosho T,Suster ML,Kawakami K,Shin-I T.Kohara Y,Kuroki Y,Toyoda A,Fujiyama A, Hamaguchi S.Sakaizumi M,Naruse K: Co-option of Sox3 as the male-deterining factor on the Y chromosome in the fish *Oryzias dancena*.Nat Commun 5:4157,2014

35)Takehana Y,Naruse K,Hamaguchi S,Sakaizumi M: Evolution of ZZIZW and XX/XY sex-determination systems in the closely related medaka species,*Oryzias hubbsi* and *O.dancena*. Chromosoma 116:463-470,2007b

36)Tanaka K,Takehana Y,Naruse K, Hamaguchi S. Sakaizumi M: Evidence for different origins sex chromosomes in closely related medaka fishes:Substitution of the master sex-determining gene.Genetics 177:2075-2081,2007

37)Wu X,Zhang Y,Xu S,Chang Y,Ye Y,Guo A,Kang Y, Guo H,Xu H,Chen L,Zhao X,Guan G: Loss of *Gsdf* leads to a dysregulation of Igf2bp3-mediated oocyte development in medaka. Gen Comp Endocrinol 277:122-129,2019

38)Yan YL,Desvignes T,Bremiller R,Wilson C,Dillon D,High S,Draper B,Buck CL,Postlethwait J: Gonadal soma controls ovarian follicle proliferation through *Gsdf* in zebrafish.Dev Dyn 246:925-945,2017

39)Zhang X,Guan G,Li M,Zhu F,Liu Q,Naruse K,Herpin

A,Nagahama Y,Li J,Hong Y:
Autosomal *gsdf* acts as a male sex initiator in the fish medaka. Sci
Rep 6:19738,2016

異なる水質変成度を持つ CR コンドライト隕石中の有機物同位体分析に向けた準備

金子　綾乃[1)]
1）　日本物理探鑛株式会社　関東支店

1. 序論

地球に大気や海洋，生物が存在するためには水と有機物が必須である．しかしこれらは高い揮発性を持つため，温度の高い地球軌道付近に固体微粒子として浮かんでいたとしても地球に取り込まれる前に蒸発してしまうと考えられる．そのため，これらは地球軌道から遥か遠く，スノーライン(原始太陽系星雲において水が気体で存在する領域と固体で存在する領域の境目)の外側で形成されたのち微惑星に取り込まれ，隕石として地球に飛来したのではないかと考えられている．隕石は構成物質により大きく石質隕石，石鉄隕石，鉄隕石の 3 つに分類され，石質隕石は母天体内部で溶融を経験した分化隕石(エイコンドライト)と経験していないコンドライト質隕石(以下コンドライト)とに分けられる．コンドライトには「コンドルール」と呼ばれるケイ酸塩鉱物の球粒状組織が見られ，また溶融，マグマ分化を経験していないことから始原的隕石とも呼ばれる．コンドライトは形成時の酸化還元状態と化学組成により①炭素質コンドライト②普通コンドライト③エンスタタイトコンドライトに分けられ，構成鉱物などによりさらに細分化される．加えて，コンドライトは変成の度合いから岩石学タイプ 1～6 までの分類がある．タイプ 3 が最も二次的変化を受けていない始原的な隕石とされ，タイプ 6 に近いほど熱変成の影響を，タイプ 1 に近いほど水質変成の影響を大きく受けている隕石とされる．その中でも炭素質コンドライトは CI, CM, CR, CO, CV, CK，CH，CB コンドライトに細分化される．また，炭素質コンドライトには最大 4wt%程度の有機物が含まれ(Alexander et al.，2007)，そのうち 75%以上が溶媒に不溶で複雑な構造を持つ高分子有機物(以下 IOM: Insoluble Organic Matter)である(Gilmour，2003)．この隕石中の有機物がどのような環境下で形成されたのかを議論したい．そこで注目するのが同位体組成である．同位体組成は物質の形成過程や環境を反映して異なる組成を示すため，隕石有機物中の同位体組成を分析することで地球の大気や海洋の起源について考察することができる．

今回は CR コンドライトである QUE99177 と GRA95229 を用い，有機物分析の事前準備として岩石厚片の作成と鉱物組織の観察を行う．CR コンドライトには岩石学タイプ 1 から 3 のものが存在し，他の隕石グループよりも大きな IOM 中の ^{15}N，^{2}H(以下 D)の濃縮またはそれらの痕跡をより良く保存していることによって特徴づけられる(Hashizume et al.，2011)．^{15}N や D の濃縮は極低温下で顕著に起こるため，CR コンドライトは炭素質コンドライトグループの中でもより始原的な隕石といえる．さらに，CR コンドライトには ^{15}N や D の大きな正の同位体異常を持つ「同位体ホットスポット」が存在し，このホットスポットは二次イオン質量分析装置(以下 SIMS: Secondary Ion Mass Spectrometry)を用いることにより，サブミクロンサイズからミクロンサイズの領域として検出される(Hashiguchi，2016)．

2. 研究試料

今回用いた QUE99177，GRA95229 はどちらも南極隕石である．QUE99177 はタイプ 3 の隕石であり，水質変成の影響が小さい始原的な隕石である．先行研究においてコンドルールの周囲には層状ケイ酸塩にとんだリムが確認されるが，これは軽度の水質変成を受けた特徴でもあるため，サブタイプ(岩石学タイプにおけるさらに細かい分類)は 2．8 に分類される．熱変成を受けた痕跡は確認されていない．コンドルール中の斑晶にはカンラン石や輝石が，マトリクス(コンドルールの周

囲を埋める細粒組織)中には少量の層状ケイ酸塩やマグネタイトが確認される(Harju et al. , 2014).

GRA95229 はタイプ 2 に分類され，特徴としてコンドルールの斑晶中には水質変成の痕跡は見られず，試料中には Fe-Ni 合金が豊富に存在することが挙げられる．部分的にマグネタイトが見られ，マトリクス構成は層状ケイ酸塩の割合が大きい．水質変成の程度は CR3 コンドライトと CR2 コンドライトの中間にあたるとされている(Abreu and Brearley，2008)．また，GRA95229 は現在分析されている炭素質コンドライトの中で，EET92042 隕石と並び最もアミノ酸に富む試料である．

3. 分析

どちらの試料もダイヤモンド切断砥石を用いて 3 分割する．よりコンタミの影響が少ないと考えられる中心のもので岩石厚片を作成し，両端のものは有機物分析に回す．厚片の作成にはエポキシ樹脂を用い，ラッピングフィルムで研磨した後，試料表面にオスミウムコーティングを施す．このようにして作成した岩石厚片は走査型電子顕微鏡(SEM: Scanning Electron Microscope)を用いて岩石組織の観察や反射電子像の撮影を行った．また，エネルギー分散型 X 線分析装置(EDS: Energy Dispersive Spectrometry)で組成の分析及び鉱物の同定を行った．

4. 分析結果

4.1 QUE99177

コンドルール中(図 1)の斑晶には Fe の割合が小さく Mg に富むカンラン石や輝石類が見られた．メソスタシス(コンドルール中の石基部分)中の非晶質ガラスは Al と Ca の割合が大きい．金属鉄はそのほとんどが Fe-Ni 合金であり，Ni と同程度の割合の S を含むものも少量見られた．マトリクスは Fe に富む無水ケイ酸塩鉱物の割合が大きかったが，層状ケイ酸塩も確認された．しかし，コンドルールを囲む層状ケイ酸塩のリムや蜂の巣構造(図 2)など，QUE99177 に見られる特徴的な組織(Harju et al.，2014)は，この試料中からは発見できなかった．

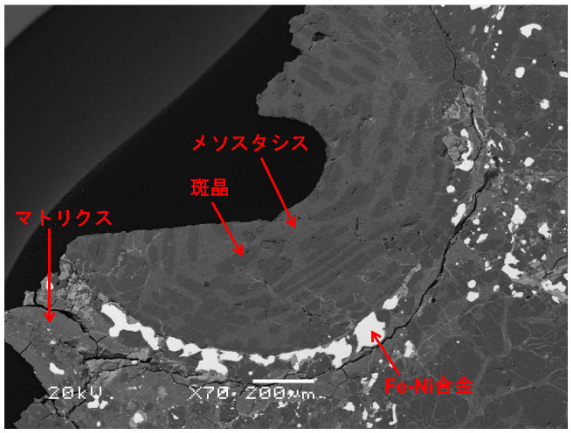
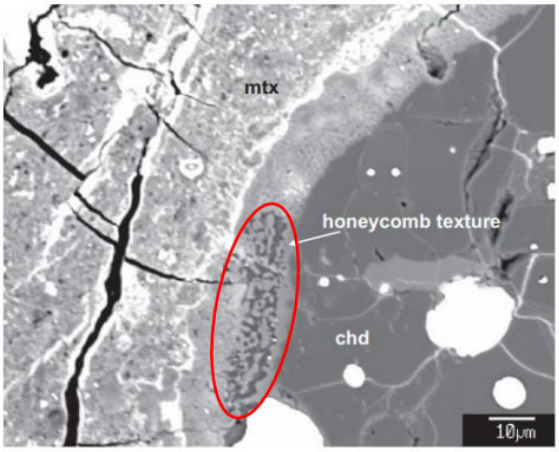


図 1：QUE99177 中のコンドルール



(Harju et al., 2014) より引用

図 2:QUE99177 のリムに見られる蜂の巣構造(赤枠内)．構造中の暗い部分はシリカ，明るい部分は輝石である．

4.2 GRA95229

コンドルール中(図 3)の斑晶には Mg に富むカンラン石や輝石が見られた．金属鉄のほとんどは Fe-Ni 合金であったが，QUE99177 には見られなかった Fe-Ni サルファイドのリム(図 4)も確認された．メソスタシスは QUE99177 と同じく他の領域に比べ Al や Ca の割合が大きい．マトリクス中には Fe に富む層状ケイ酸塩が多く確認され，QUE99177 とは異なりシリケイトの割合が少なかった．

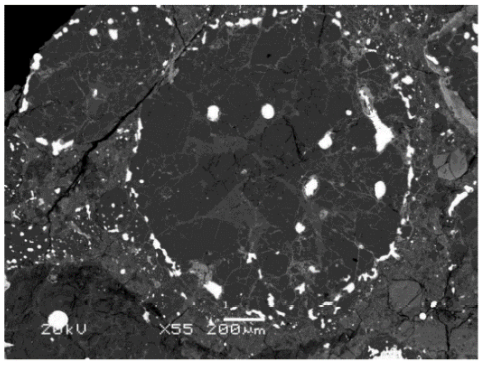


図 3：GRA95229 中のコンドルール

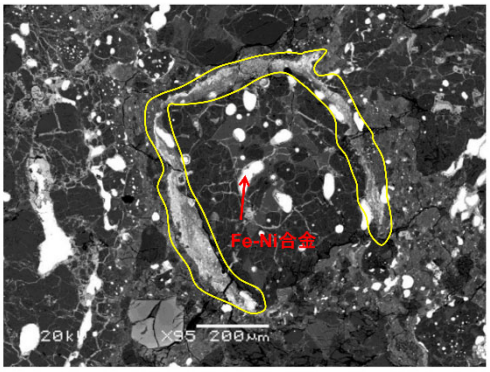


図 4：コンドルールを取り囲む Fe-Ni サルファイド(黄枠内)．S の割合が大きいため Fe-Ni 合金よりも暗く見える．

また，微小領域ではあるが水質変成を受けた証拠であるマグネタイト(図 5)と炭酸塩鉱物(図 6)が確認できた．

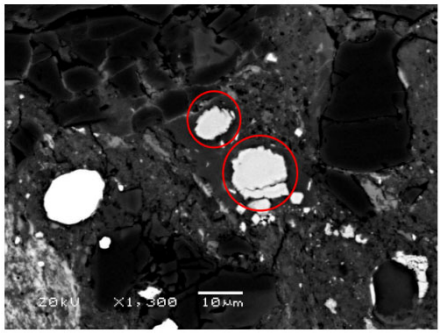
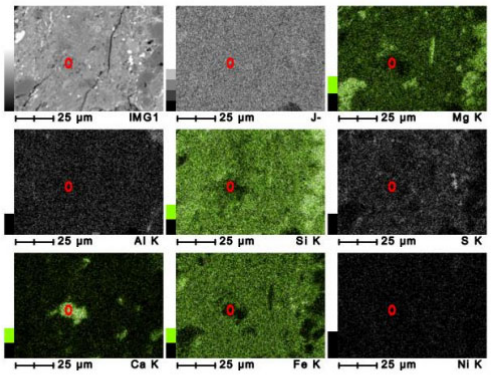


図 5：GRA95229 中のマグネタイト(赤枠内)
マグネタイトは Fe-Ni 合金より暗く，サルファイドより明るく見える．また，Ni のピークがほとんど見られないことも特徴の一つである．



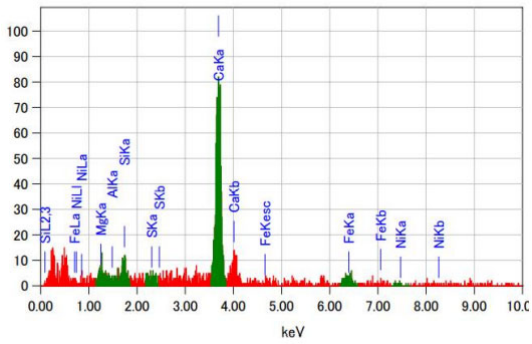


図 6：GRA95229 中の炭酸塩鉱物(赤枠内)
Ca の大きなピークが見られ，ほかの元素のピークは一様に小さい．

さらに，GRA95229 には捕獲鉱物(図 7)が見られたため，これも分析した．

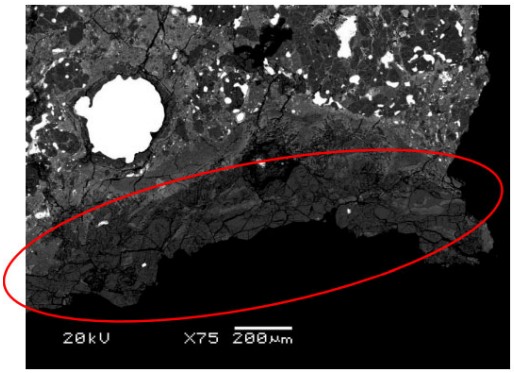


図 7 ：GRA95229 中の捕獲鉱物(赤枠内)

5. 議論

QUE99177 には層状ケイ酸塩にとんだリムや蜂の巣構造など，水質変成をわずかに受けたコンドライトに特徴的な組織は発見できなかったが，苦鉄質ケイ酸塩の斑晶やマトリクス中の Fe に富むシリケイトなど，QUE99177 に普遍的に見られる組織が確認された．QUE99177，GRA95229 両者に見られる Fe-Ni 合金は，分析した組成比

により，Fe:Ni=95:5 または Fe:Ni=90:10 の比をとるカマサイトであると考えた．GRA95229 に見られた捕獲鉱物は，三角ダイアグラム(図 8)より単斜エンスタタイトであると考えられる．この三角ダイアグラムは，捕獲鉱物の任意の点から抽出した含有元素の質量パーセントをもとに，Ca，Mg，Fe の比をとって作成したものである．

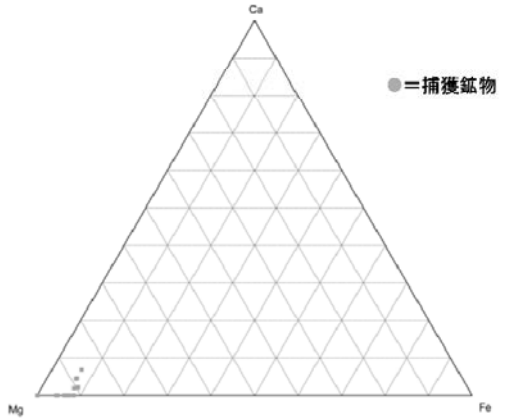


図 8：GRA95229 中の捕獲鉱物の三角ダイアグラム

また，QUE99177 のメソスタシス組成は，同じく CR3 コンドライトである MET00426 と類似している(Harju et al.，2014)．今回の分析結果と MET00426 のメソスタシス組成(表 1)と比較してみると，Al や Fe はずれた値となってしまったが，Si や Mg，Ca は MET00426 と近い値をとった．本来ガラス質のメソスタシスはサブタイプが 2. 8 以上の隕石にしか見られない．GRA95229 は，Harju et al.，2014 によってサブタイプ 2．7 に分類されているためガラス質のメソスタシスは見られないはずであるが，今回の分析では表 1 に示す隕石に近い値をとった(表 2)．岩石薄片の作成・観察は行わなかったため，メソスタシスの非晶質ガラスを直接見ることはできなかったが，メソスタシスの組成より，GRA95229 はサブタイプ 2. 8 に近いメソスタシスを持っているのではないかと考えた．

表 1：EET92062 と MET00426 のメソスタシス組成．どちらの隕石もサブタイプは 2．8 に分類される．

Table 3
Mean composition (wt.%) of glassy mesostasis in CR-chondrite chondrules.

Meteorite	EET 92062 POP chondrule 1	MET 00426 POP chondrule E2l
Mesostasis type	Clear, colorless, isotropic glass	Clear, light brown isotropic glass
No. analyses	10	2
SiO_2	56.7 ± 1.1	52.0 ± 0.3
Al_2O_3	17.9 ± 0.7	24.1 ± 0.04
Cr_2O_3	0.76 ± 0.08	0.23 ± 0.09
FeO	2.2 ± 0.2	0.56 ± 0.03
MnO	0.47 ± 0.06	0.56 ± 0.03
MgO	5.1 ± 0.4	5.7 ± 0.5
CaO	14.5 ± 0.4	14.8 ± 0.6
Na_2O	0.86 ± 0.09	0.94 ± 0.25
K_2O	0.05 ± 0.02	n.d.
Total	98.5 ± 0.4	98.9 ± 0.1

n.d. = not determined.

Harju et al., 2014 より引用

表 2：QUE99177(左)と GRA95229(右)のメソスタシス組成

	wt%
SiO_2	54.40
Al_2O_3	17.14
Cr_2O_3	0.94
FeO	5.03
MnO	0.59
MgO	6.63
CaO	14.99
Na_2O	0.14
K_2O	-
total	99.86

	wt%
SiO_2	53.29
Al_2O_3	21.82
Cr_2O_3	0.74
FeO	5.78
MnO	0.09
MgO	2.16
CaO	14.73
Na_2O	1.395
K_2O	-
total	100.01

しかし，GRA95229 のマトリクスには層状ケイ酸塩が多く確認され，QUE99177 のマトリクスに比べ Fe 含有量が多いシリケイトが少なかった．GRA95229 には QUE99177 に見られなかったマグネタイトが確認されたが，これはサブタイプ 2. 7 と 2．8 の境界を示す指標となる(表 3)．マトリクスはコンドルール中の斑晶よりはるかに細粒であるため，水質変成の影響を受けやすい．マトリクスの Fe 含有量の減少は，水質変成によるマグネタイトの段階的な形成を反映していると考えられている(Abreu and Brearley，2008)．さらに，GRA95229 には炭酸塩鉱物が確認されたが，これも水質変成を受けた証拠となる．表 4 は CM コンドライトの水質変成を評価する際に用いる

指標である．CM コンドライトのサブタイプは 2.0～2.6 まで存在しているが，GRA95229 の分析から表中の指標を満たす結果は得られなかったため，GRA95229 はサブタイプ 2.6 以上と考えることが出来る．

表 3：CR コンドライトのサブタイプ指標

Table 11
Diagnostic parameters for CR-chondrite subtypes.

Petrologic subtype	3.0	2.9	2.8	2.7	2.6
Abundance of chondrules with glass	Moderate to high	Moderate	Rare	Absent	Absent
Magnetite	Absent	Absent	Absent	Incipient	Present
Mafic phenocryst alteration	None	None	None	None	None
Replacement of coarse metal and silicate by phyllosilicate and oxide	None	Little or none	Little or none	Little	Little
Abundance of phyllosilicate in matrix and chondrule rims	Absent	Incipient	Minor	Significant	Major

Harju et al., 2014 より引用

今回は QUE99177 と GRA95229 において，マグネタイトとマトリクス組成に当てはまる特徴が見られた．

表 4：CM コンドライトのサブタイプ指標

Table 5
Principal diagnostic characteristics of progressive alteration in CM chondrite petrologic subtypes

Petrologic subtype	2.6	2.5	2.4	2.3	2.2	2.1	2.0
Chondrule mesostasis	Phyllosilicate	Phyllosilicate	Phyllosilicate	Phyllosilicate	Phyllosilicate	Phyllosilicate	Phyllosilicate
Matrix phyllosilicates	Abundant	Abundant	Abundant	Abundant	Abundant	Abundant	Abundant
Metallic Fe–Ni	~1 vol %	0.03–0.30 vol %	0.03–0.30 vol %	0.03–0.30 vol %	0.03–0.30 vol %	≤0.02 vol %	≤0.02 vol %
Mafic silicate phenocrysts in chondrules	Unaltered	Unaltered	Unaltered	2–15% altered	15–85% altered	85–99% altered	Completely altered
Large PCP clumps	15–40 vol %	15–40 vol %	15–40 vol %	15–40 vol %	15–40 vol %	2–5 vol %	2–5 vol %
PCP composition: "FeO"/SiO_2	2.0–3.3	2.0–3.3	1.5–2.0	1.5–2.0	1.0–1.7	1.0–1.7	1.0–1.7
Sulfide	Mainly po + pn	Mainly po + pn	po + pn + int	po + pn + int	Mainly pn + int	Mainly pn + int	Mainly pn + int
Carbonate	Ca carbonate	Ca carbonate	Ca carbonate	Ca carbonate	Ca carbonate	Ca carbonate and complex carbonate	Ca carbonate and complex carbonate

The mineralogic and textural properties and petrologic-subtype designations apply to the dominant lithology of brecciated CM chondrites. The "FeO" concentration includes FeO in phyllosilicates, Fe^{2+} in cronstedtite and Fe^{2+} in sulfide.
po, pyrrhotite; pn, pentlandite; int, "intermediate" sulfide with atomic Ni/(Fe + Ni) ratios of 0.10–0.40 (cf. Chokai et al., 2004).

Rubin et al., 2007 より引用

体積%を求めることはできなかったが，マトリクス中に輝石類も確認されること，ピローライトやペントランダイトが見られなかったことから，GRA95229 のサブタイプは 2.6 以上であると考えられる．

また,前述したように GRA95229 は EET92042 と並び分析された中では最もアミノ酸に富む炭素質コンドライトである．隕石中のアミノ酸濃度は母天体内で受けた水質変成度を反映しており，水質変成度が高いほどアミノ酸濃度は低くなる(Martins et al.，2007)．EET92042 はサブタイプ 2．8 に分類される CR コンドライトであり，以上のことから GRA95229 のサブタイプ 2.7 への分類は妥当であるが，きわめて 2．8 に近い特徴を持っていると考えられる．

また，隕石有機物については，水質変成度が高いほど δD 値が小さく，それに伴い D ホットスポットの存在度も小さくなることが知られている(Herd et al.，2011)．QUE99177，GRA95229 は水質変成度が小さい CR コンドライトであるため D ホットスポットが消失することなく存在しており，GRA95229 よりも QUE99177 の D ホットスポットの存在度が大きくなると考えられる．さらに，始原的な太陽系物質には「有機ナノグロビュール」と呼ばれる IOM で構成されたナノサイズの球体が認められる．QUE99177 は水質変成度が低い CR コンドライトであり，含まれる有機ナノグロビュールは変成を受ける前の状態を最大限に保つとされる．加えて，水質変成の影響をほとんど受けていない隕石中のナノグロビュールからは，水質変成に敏感なニトリル基(-C≡N)が NanoSIMS での分析により検出されている(中村　2014)．そのため，今回準備をした QUE99177 からもオリジナルの形状を保った有機ナノグロビュール並びにニトリル基が検出されることが期待される．

6. 結論

・分析結果より，QUE99177 は水質変成をほとんど受けていない始原的な隕石であり，GRA95229 はわずかに水質変成を受けた隕石であることが確認できた．
・QUE99177 と GRA95229 のメソスタシス組成には類似点がある．
・GRA95229 のサブタイプ 2.7 への分類は妥当である．

7. 謝辞

茨城大学理学部　橋爪光先生には，研究や卒業論文執筆におきまして多大なるご指導をいただきました．茨城大学理学部　藤谷渉先生にはゼミなどにおいて有力な助言をいただきました．また，同研究室の皆様には分析機器の取り扱いなどに

ついて多くの助言をいただきました．この場をお借りして心より御礼申し上げます.

参考文献

1) Abreu N.M.and Brearley A.J.(2008) Petrologic and chemical effect of the onset of aqueous alteration on the matrices of CR chondrites: GRA95229.*Lunar and Planetary Science* XXXIX,p2013

2) Harju E.R.et al.(2014) Progressive aqueous alteration of CR carbonaceous chondrites.*GeoChimica et Cosmochimica* Acta 139,p267-292

3) 橋口未奈子 (2016) ホットスポット : 顕微鏡で観る先太陽系・原始太陽系化学 *地球化学* 50 巻 2 号,p51-66

4) 橋爪光 高畑直人 奈良岡浩 佐野有司 (2011) 太陽系有機物の起源が解明された！－同 位体が解き明かす隕石有機物のふるさと－ *化学* Vol.66 No.4,p50-53

5) Hashizume K,Takahata N,Naraoka H,and Sano Y (2011) Extreme oxygen isotope anomaly with a solar origin detected in meteoritic organics.*Nature Geoscience* Vol.4, p165-169

6) Martins Z.et al (2007) Indigenous amino acids in primitive CR meteorites.*Meteoritics & Planetary Science* 42, p2125-2136

7) 長嶋理子 (2019) CR コンドライトの非樹脂による固定・切断技術,茨城大学理学部 地球環境科学コース卒業論文

8) 中村圭子 (2014) 始原天体有機物研究の今とこれからⅢ．有機ナノグロビュール *日本惑星科学会誌* Vol.23,No.2, p92-102

9) 野津憲治 宇宙・地球化学

10) Rubin A.E,Rodriguez J.M.T,Huber H,Wasson J. T (2007) Progressive aqueous alteration of CM carbonaceous chondrites.*GeoChimica et Cosmochimica* Acta71, p2361-2382

編　集　後　記

当社は本年 2022 年 12 月で創立 80 周年を迎えます。地質工学は今年で第 19 輯になりますが、今後も毎年発刊し 100 周年には、第 39 輯が発刊できるよう努めて参りたいと思います。

本 19 輯は、産業技術総合研究所の神宮司さまに「高周波交流電気探査による都市域での非破壊電気探査」について、和歌山大学の平田先生に「土壌地下水汚染問題を振り返る」について、国際航業株式会社の大島さまに「山岳トンネルを中心とした私の地質工学を振り返る」について、それぞれ執筆していただきました。ご寄稿いただきありがとうございました。

皆様のお時間のある時にお目通しいただければ幸いです。

企画本部　篠田　里子

地質工学　第 19 輯
令和 4 年 11 月 1 日発行
編　集　日本物理探鑛株式会社　企画本部
印刷所　前田印刷株式会社

NGP 日本物理探鑛株式会社

本　　社　〒143-0027 東京都大田区中馬込二丁目 2 番 12 号　TEL 03(3774)3211　FAX 03(3774)3180
URL：http://www.n-buturi.co.jp
E-mail：gijutsu@n-buturi.co.jp

東関東支店	〒310-0804 水戸市白梅三丁目 10 番 5 号 コーラルトップ 108	TEL 029(231)7315　FAX 029(231)7316 E-mail：mito@n-buturi.co.jp
関東支店	〒143-0027 東京都大田区中馬込二丁目 2 番 12 号	TEL 03(3774)3161　FAX 03(3774)9353 E-mail：kanto@n-buturi.co.jp
札幌営業所	〒060-0061 北海道札幌市中央区南 1 条西 16 丁目 1-323 春野ビル 3F	TEL 011(558)3121　FAX 011(558)0900 E-mail：sapporo@n-buturi.co.jp
東北営業所	〒980-0021 仙台市青葉区中央四丁目 8 番 15 号	TEL 022(393)4155　FAX 022(393)4156 E-mail：tohoku@n-buturi.co.jp
埼玉営業所	〒336-0021 さいたま市南区別所 5-15-2	TEL 048(700)3184　FAX 048(700)3100
千葉営業所	〒273-0011 船橋市湊町 2-12-24 湊町日本橋ビル 6F	TEL 050(6861)3024FAX 050(6865)6843
神奈川営業所	〒221-0856 横浜市神奈川区三ツ沢上町 7-8 ジュネス 203	TEL 045(550)4865　FAX 045(314)6499
北陸支店	〒950-0983 新潟市中央区神道寺三丁目 11 番 19 号	TEL 025(241)2960　FAX 025(241)2959 E-mail：hokuriku@n-buturi.co.jp
中越営業所	〒940-2033　新潟県長岡市上除町 1128-3	TEL 0258(94)4420　FAX 0258(94)4421
中部支店	〒465-0094 名古屋市名東区亀の井二丁目 134 番地	TEL 052(753)9662　FAX 052(753)9664 E-mail：chubu@n-buturi.co.jp
三重営業所	〒511-0041 桑名市外堀 22 番地　ITO ビル 102	TEL 0594(32)7725　FAX 0594(32)7726
関西支店	〒543-0033 大阪市天王寺区堂ケ芝一丁目 3 番 24 号 LN 堂ヶ芝ビル 2F	TEL 06(6777)3517　FAX 06(6773)5488 E-mail：kansai@n-buturi.co.jp
滋賀営業所	〒520-0246 大津市仰木の里四丁目 13 番 2-204	TEL 077(574)2261　FAX 06(6773)5488
四国営業所	〒760-0012 高松市瀬戸内町 19 番 25 号	TEL 087(863)6191　FAX 087(863)6192 E-mail：shikoku@n-buturi.co.jp
中国支店	〒731-0138 広島市安佐南区祇園 3-48-13	TEL 082(850)0073　FAX 082(850)0080 E-mail：cyugoku@n-buturi.co.jp
山口営業所	〒751-0875 下関市秋根本町 2-10-10 トワムール２１ 409 号室	TEL 083(242)2980　FAX 083(242)2981
九州支店	〒803-0814 北九州市小倉北区大手町 7 番 38 号 大手町ビル 3F	TEL 093(581)8281　FAX 093(581)8267 E-mail：kyushu@n-buturi.co.jp
福岡営業所	〒812-0016 福岡市博多区博多駅南三丁目 13 番 17号	TEL 092(474)3087　FAX 092(474)3107
沖縄事務所	〒904-2155 沖縄県沖縄市美原 4-7-1　春マンション 103	TEL 098(923)1915　FAX 098(923)1916

※NGP は日本物理探鑛株式会社の略称です

2022.10