

地質工學

第 15 輯

NGP 日本物理探鑛株式会社

季刊誌 地質工学 発刊の辞

我が日本物理探鉱株式会社は本年 12 月（1952 年）を以て創立 10 周年を迎えることになった。就いてはその記念事業の一つとして季刊誌地質工学を発刊することにした。これは我々科学技術の仕事に携わるものとしては最も相応しいことだと思ったからである。

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。

兎に角本誌の内容は我々の事業の定期的な集積の里程標としたい考えであるが、一面地質工学に興味と関心を持たれる諸氏に取って有意義な存在となるであろうことを確信する。

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別項投稿規定によって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大いなる寄与をなすであろうことを我等はここに切に念願する次第である。

1952 年 10 月

渡 邊 貫

【創刊号より転載】

Laughter is timeless, imagination has
no age, and dream are forever .

(笑いは不朽であり、想像力には年齢がなく、夢は永遠である。)

ディズニーランドの創設者であるウォルト・ディズニーの言葉より

地質工学 第15輯

目 次

● 渡辺貫とその足跡

公益財団法人鉄道総合技術研究所情報管理部 博士(工学) 小野田 滋 …… 1

● 遺跡探査の面白さ

東京工業大学 博物館 教授 亀井 宏行 ……15

● 打音検査装置の開発

公益財団法人鉄道総合技術研究所防災技術研究部 川越 健 ……25

● GNSS を用いた総合防災ブイの開発

東京大学 地震研究所教授 加藤 照之 ……33
高知工業高等専門学校 寺田 幸博

● バイオオーグメンテーションによる油含有土壌の原位置浄化

日本物理探鉱株式会社 九州支店 伊藤 吉宏 ……39

● 駿河湾における植物プランクトン群衆の一次生産

日本物理探鉱株式会社 関東支店 上原 武志 ……49

渡辺貫とその足跡

小野田 滋¹⁾

1) 公益財団法人鉄道総合技術研究所 情報管理部 博士 (工学)

1. はじめに

かつて、国鉄の土木系技術者の間では、法螺話に近い奔放な発想で周囲を煙に巻く3人の人物に対して、「ホラ貫(かん)、ホラ弥寿(やす)、ホラ次郎(じろう)」と渾名していた。「ホラ貫」はここで紹介する渡邊貫、「ホラ弥寿」は鉄道路線の調査や航空写真測量の導入、青函トンネルの計画に功績を残した桑原弥寿雄(昭和7年・東京帝大土木卒)、「ホラ次郎」は駅ビルの開発などを国鉄の関連事業を展開した立花次郎(昭和2年・東京帝大土木卒)で、それぞれの持ち味を活かしながら窮屈な官僚組織に風穴を開け、鉄道の発展に貢献した。その筆頭格であった渡邊貫は(写真1)、理学部出身という少数派であった



写真1 渡邊貫 (1898～1974)

ため、土木工学科の出身者で占められていた鉄道土木の分野では貴重な存在となり、その希少価値を活かして組織や分野の枠にとらわれない奔放な活動を行い、その結果として土木工学と地質学の境界分野として「地質工学」という概念を体系化した^{註1)}。

2. 丹那トンネルのボーリング調査

渡邊貫は、1898(明治31)年7月16日に、渡邊雄次郎の三男として大分町大字大分(現在の大分市元町)で生まれた。父親の雄次郎は、地元で「土族の横綱」と称された人物で、県会議員を務めたほか1893(明治26)年に開業した大分銀行(のち第二十三銀行と合同して大分合同銀行を経て現在の大分銀行に改称)の初代頭取に就任したが、貫が生まれた直後の1900(明治33)年1月4日に働きざかりの41歳で急逝した(写真2)。貫は、県立大分中学校



写真2 厳父・渡邊雄次郎 (1859～1900)

(現在の県立大分上野丘高等学校)を1916(大正5)年に卒業したのち、仙台の第二高等学校理科へ進学して同校を1920(大正9)年に卒業した。さらに、東京帝国大学理学部地質学科へと進み、1923(大正12)年3月に同校を卒業して鉄道省に入省した。

当時の鉄道省は、鉄道建設工事にあたる土木技術者を豊富に抱え、内務省土木局と並んで日本の土木技術をリードしていたが、渡邊が入省するまでは地質学の専門家は在籍していなかった。また、土木工事に先立って地質調査を行うこともほとんど行われておらず、必要に応じて帝国大学や地質調査所の専門家に依頼してアドバイスを受けていた。

しかし、鉄道建設工事が平地から山岳地へと及ぶようになると特殊で複雑な地質条件に遭遇するようになり、また営業線でも地すべりや地盤沈下など地質現象に起因するさまざまな災害にみまわれ、その解決のために地質学の知識が必要とされた。地質調査の重要性が関係者に認識される契機となった丹那トンネルは、現在の御殿場線を経由していた当時の東海道本線の短絡と勾配改良を兼ねて、熱海～函南間に設けられた延長7804mの複線断面トンネルで、1918(大正7)年に起工して1934(昭和9)年に開業した。丹那トンネルの工事にあたって、東京帝国大学地質学科教授の横山又次郎(理学博士)と三菱鉱業の鈴木敏(理学博士)に地質調査が依頼され、横山は丹那盆地の成因について火口説を主張し、湧水量が多くなると予測した。これに対して、鈴木は侵食説と火山説の中間的な見解を示し、トンネル予定地点の地質は比較的良好であると予測した。このほかにも東京帝国大学地質学科教授の脇水鉄五郎(理学博士)や、当時は東京高等師範学校講師で地形学の権威者だった辻村太郎(のち東京帝国大学教授)による断層説も唱えられ、結論がまとまらないまま工事が開始された。

工事は、のちに渡邊貫が「温泉余土」と命名した膨張性の地質や大量の湧水、断層破碎帯などに阻まれ、崩落事故が発生するなどして一時は工事の中止を求める意見や、複線断面から単線並列断面に変更することなどが提案され、完成までに16年の歳月を要した^{註2)}。このため、農商務省鉱山局技師で東京帝国大学講師であった福富忠男(大正7年、東京帝大地質学科卒)に囑託を依頼していたが、1925(大正14)年に北海道帝国大学工学部教授に就任したた

め、その活動は短期間に終わってしまった。

当時、鉄道省建設局工事課長で、のちに帝都復興院（のち内務省復興局）土木部長となった太田圓三は、専任の地質学の専門家が必要であるとして、東京帝国大学理学部地質学科を卒業した渡邊貫、廣田孝一、佐伯謙吉の3名の理学士を鉄道省に採用することとした。3名は嘱託だった福富忠男とは異なり、技術者として正式に鉄道省に採用された最初の地質学科出身者となった。

ちなみに、この年には東京帝国大学工学部鉱山学科からも佐藤周一郎が鉄道省に採用されており、土木工学科出身者によって独占されていた鉄道路土木分野に、周辺分野の人材が加わることによって、より総合的な技術者集団として機能することとなった。佐藤周一郎は、建設局工事課を経て東京建設事務所第十工区主任となり、硬岩の掘削で苦労していた清水トンネルの工事に従事し、鉱山で用いられていた機械化による掘削技術を導入してこれを完成させた。

いっぽう、内務省では1922（大正11）年に東京帝国大学地質学科を卒業した高田昭が土木局に採用され、新設されたばかりの土木試験所に配属されたほか、東京帝国大学地質学科を1924（大正13）年に卒業した江畑弘毅は、帝都復興院土木部工務課技手となって太田圓三の下で震災復興事業に従事したのち1928（昭和3）年に鉄道省に転じ、工務局保線課技師として道床碎石の品質検査など保線分野の業務に従事するなど^{註3}、地質学科の出身者が土木分野に進出し始めた時期でもあった。

鉄道省入省直後の地質学科出身者の配属先は、渡邊貫が熱海線建設事務所勤務を経て建設局工事課勤務、廣田孝一が建設局工事課勤務を経て信濃川電気事務所兼務、佐伯謙吉が東京建設事務所勤務を経て長岡建設事務所勤務となっていて、それぞれ丹那トンネル、信濃川（水力）発電所、清水トンネルの工事現場を念頭として採用されていたことが推察される。

渡邊は1925（大正14）年に熱海線建設事務所から本省建設局計画課に移り、翌年には鉄道技師に昇進した。技師になって間もない1927（昭和2）年5月10日に開催された丹那隧道第一回委員会研究問題討議の議事録には^{註4}、地下水のコンターを描く必要性をめぐって、本省の局長（中村謙一）や課長（工事課長：橋本敬之、計画課長：池田嘉六）を向こうに回して堂々と持論を展開する「渡邊技師」の発言が残され（図1）、後年「剛毅な性格」と評された若き「ホラ貫」の面目躍如たるものがある^{註5}。

この頃になると、オーストリア＝ハンガリー帝国のカール・テルツァーギが「Erdbaumechnik」（土質工学）を著して新しい土質力学理論を体系化し、世

界的な注目を集めていたほか、スウェーデン鉄道省

渡邊技師	地下水のコンターを画くことが必要だ。
計画課長	其れは画けない。
局 長	其れを画いて何になるか。
渡邊技師	地下水の水位を測るのです。A、B、Cと云う様にやれば井戸でも判る。
池原技師	其れと谷の湧水だね。
楠田所長	不足でしょう。或る処は密集しているから。
工事課長	目的は。
渡邊技師	サブソイルで継いでいるものとして地下水に高低があるから何処から如何云う様に流れているかを知るの、深いものは別として水の透し得る地表の水を測るのです。
工事課長	其れを何にするか。
渡邊技師	井戸がこうなつて地表はこうなつてゐるが、地下水はこうなつてゐるかも知れない。浸水の行き方、地下水のリッチを作つたらどうかと云うのです。

図1 「丹那隧道第一回委員会研究問題討議」議事録より抜粋

（渡邊に理解のあつた建設局計画課の池原英治が渡邊の発言をフォローしている。）

では1913（大正2）年に土質調査委員会を発足させて、ウォルマー・フェレニウス（斜面の安定解析「フェレニウス法」で知られる）、アルバート・アッターベルク（土のコンシステンシーを表す「アッターベルク限界」で知られる）などの人材を擁して、多くの成果を挙げていた。渡邊はこうした海外の動向を踏まえて、1929（昭和4）年に私的な勉強会として「土と水研究委員会」を立ち上げ、この分野に関心のある鉄道技術者や大学教官などを集めて情報交換を開始した。

入省後間もない渡邊の業績としては、丹那トンネルの地質調査にボーリング調査を適用したことが挙げられる。ボーリングを用いた地質調査技術は、すでに鉱山などで用いられ、鉄道工事でも1921（大正10）年から開始された東京地下鉄道（現在の東京メトロ銀座線の浅草～新橋間）の地質調査で用いたほか、江畑弘毅が在籍していた内務省復興局では関東大震災後の東京・横浜地区のボーリング調査を大規模に実施し、都市地盤図を作成するなどその適用範囲を広げつつあった。

丹那トンネルの工事でも、1924（大正13）年3月～10月にかけて入省間もない渡邊貫の担当により直上の丹那盆地から4本の鉛直ボーリングが実施され、スウェーデンから技術者（クレリウス式試錐機製造会社の技師アイ・アール・ノードマーク）を招聘して技術指導を受けた（図2）。その成果は、より

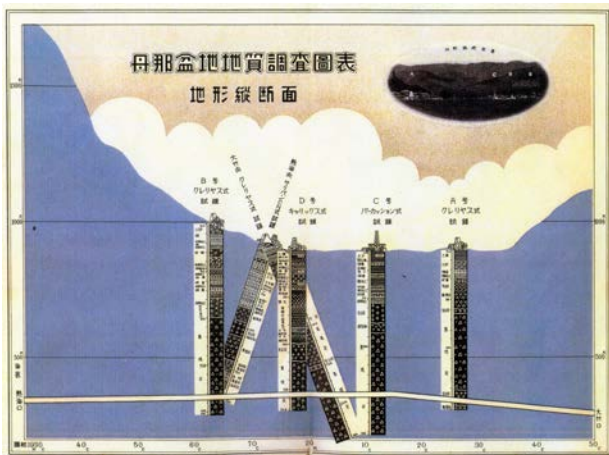


図2 丹那盆地地質調査図表（文献9より）

具体的で詳細な地質図としてまとめられ、丹那断層の位置や規模などが予見された。なお、丹那盆地からのボーリング調査は、1930（昭和5）年の北伊豆地震発生後の1932（昭和7）年にも2本の斜めボーリングが追加で実施された。

3. 土と水研究委員会の活動と成果

渡邊は、私的な研究組織として自らが立ち上げた「土と水研究委員会」について、1929（昭和4）年12月20日付でその設立目的を、「土木工事としては最も密接な交渉のある土に就いては余りに閑却されすぎていた。土の性質に関する研究が最近漸く注視されて来るようになったが、一体土を取扱うのに水を無視することは出来ない。何故ならば土の性質は恰然一個の「生物」であり、土を肉体とするならば水はその血液に相当するものでさえあり得るから。この意味からして我々の「土と水」の研究委員会が生まれた。大勢集まって一生懸命捏ね廻している中何とか形が出来るだろう。十年でも二十年でも我々は撓まずこの努力を続けて行こう。我々が駄目なら次のゼネレーションそのまた次と何かは物になる時が来るであろう。若し斯うした研究に情熱を持って呉れる人々があつたらドシドシ入会して欲しい。研究報告は年間四回刊行する積りである。尚定期的にセミナリイを開いて内外論文の輪講討議をしたいと思っている。」と述べた。

土と水研究委員会の成果は、『土と水研究委員会報告』として第1回～第4回の4冊の報告にまとめられ、渡邊もたびたび寄稿していた雑誌『鉄道技術』の出版元である鉄道技術社から市販された（図3）。

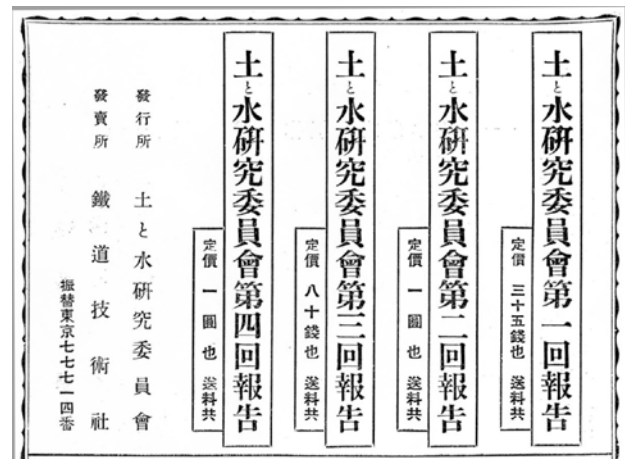


図3 「土と水研究委員会報告」の広告

執筆は鉄道省の関係者が大半を占めていたが、地方現業機関の土木技術者による報告や、部外の教育者からの寄稿もあり、この分野に関心のある専門家の情報交換のための「サロン」のような存在として機能していた。活動期間は1930（昭和5）年の1年間に限られていたが、この組織を継承するかのようになり同年末に鉄道省土質調査委員会が設置されるので、土と水研究委員会がその母体となり、「準備会」的な役割を果たしていたと考えられる。表1は第1回から第4回の報告事項を示したものであるが、注目されるのは報告者のひとりに京都帝国大学の本間不二男の名前があることで、本間は渡邊の1年先輩であったが^{註6)}、大陸へ渡ったのち戦後は日本物理探鉱取締役地質部長に就任して渡邊の社業を支える柱となった。

4. 鉄道省土質調査委員会の発足

鉄道省では、1930（昭和5）年11月21日付で省内の組織として土質調査委員会を設置し、地質や土質に関わる研究を進める体制を整えた。委員長には大臣官房研究所長の松縄信太が就任し、鉄道省の工務局、建設局、大臣官房研究所に加えて、東京帝国大学からも山口昇が委員として参加し、渡邊貫は幹事に就任した。委員会の顔ぶれは、鉄道省本省の土木系主要ポストの幹部を属職で揃えており（表2）、委員長を大臣官房研究所長、特別委員を本省局長級、委員を本省課長級としているので、委員会活動の実務に携わる組織と言うよりも、むしろ委員会の運営を管理し、その活動や成果に対して公的な担保を与えるための認証組織として機能したと考えられる。

委員会の設立趣旨では、「国有鉄道線路の建設保線改良等業務執行上、土の性質を科学的並に工学的に調査研究し、その地域の状況に応じ適切なる工事を施行して、工費の節約と線路の安全とを期するを目的とし、鉄道大臣の決裁を経て昭和5年11月21日下記委員及幹事を以て土質調査委員会が設立され

た。」としており、その設立目的が明確に示された。

土質調査委員会の第1回委員会は、1930（昭和5）年12月13日に本省工務局長室で開催され、常置の調査機関として「第1部“土質科学的調査”（土質力学的調査、土質分類、土質構造及び成層調査）」、「第2部“土質調査を基礎とする構造物の設計”（地形及び成層調査、土質試験、設計）」、「第3部“土質調査を基礎とする工事施行法”（地形及び成層調査、土質試験、施行法）」を設けたほか、内外の文献の収集・翻訳・分析を目的とした「雑誌会」を隔週で開催す

ることとした。また、実務にあたる組織として同年12月13日に事務室が開設され、6坪の執務室と書庫を備え、渡邊貫、松山教一技手（研究所第四科）、大石重成技手（建設局計画課）、野坂孝忠技手（建設局工事課）の4名が常勤することとなった。しかし、事務室は発足直後の同年12月28日に発生した鉄道省の火災によって類焼し、書類は無事であったものの、事務室そのものは焼失してしまった。このため、事務室の移転を余儀なくされ、1931（昭和6）年1

表1 「土と水研究委員会」の報告事項

回数	内容	執筆者	所属（執筆時）	年次
第1回報告 昭和5年 2月	基礎工事管見 水文学講話（一） 隧道と土圧 泥炭地の鉄道 橋梁基礎 土木地質学序論 地質状態と試錐工具 透水性の土壤内に於ける静水昂上作用に就いて 関門海底隧道に於ける残積土と水との研究	釘宮磐 阿部謙夫 岡野精之助 渡邊源一郎 河西定雄 渡邊貫 廣田孝一 内山祥一 佐伯謙吉	鉄道省熊本建設事務所長（工学士） 鉄道省建設局（工学士） 鉄道省熱海建設事務所（工学士） 鉄道省北海道建設事務所（工学士） 鉄道省熊本建設事務所（工学士） 鉄道省建設局計画課（理学士） 鉄道省建設局工事課（理学士） 鉄道省東京第一改良事務所（工学士） 鉄道省工務局関門派出所（理学士）	東大土木・明45 東大土木・大6 東大採鉱・大7 東大鉱山・大11 東大土木・大12 東大地質・大12 東大地質・大12 東大土木・大14 東大地質・大12
第2回報告 昭和5年 5月	造山運動の根本義 荒川に於て試みたる注水井筒施行法 水文学講話（二） 軟弱なる沖積粘土土質に於ける実験（一） 透水性の土壤内に於ける静水昂上作用に就いて 地質状態と試錐工具（二） 沈下する潜函の作業室の側壁に取付けたる圧力計は何を明示したか？ 雑録	本間不二男 川口 利雄 阿部謙夫 伊集院 久 内山 祥一 廣田 孝一 柳生 義郎 渡邊 貫	京都帝国大学理学部地質学鉱物学教室（理学士） 鉄道省工務局改良課（工学士） 鉄道省熊本建設事務所（工学士） 鉄道省工務局計画課（工学士）	東大地質・大11 東大土木・大9 九大土木・大15 東大土木・大8
第3回報告 昭和5年 8月	深き隧道に於ける地圧に関して 九州有明線粘土層に試みたる砂工 透水性の土壤内に於ける静水昂上作用に就いて 粘土地盤に於ける地質試験に就いて 雑録	山口 昇 川西 定雄 内山 祥一 伊集院 久 渡邊 貫	東京帝国大学教授（工学博士）	東大土木・大3
第4回報告 昭和5年 12月	三呉線三原口第一工区に於ける建造物の沈下記録 地より地域の地勢及地質的特性 応用力学晩近の発達特に破壊の理論に就て 土工工事に及ぼす寒気の破壊作用雑録	平山復二郎 本間不二男 吉田宏彦 渡邊源一郎 渡邊貫	鉄道省岡山建設事務所長（工学士） 福井高等工業学校（理学士）	東大土木・明45 東大建築・大13

表2 土質調査委員会委員・幹事（発足時）

役職	所属	氏名	年次
委員長	大臣官房研究所長	松縄 信太	東大機械・明 38
特別委員	工務局長	大河戸 宗治	東大土木・明 35
同	建設局長	黒河内 四郎	東大土木・明 40
委員	工務局保線課長	永田 民也	東大土木・明 41
同	同 計画課長	山田 隆二	東大土木・明 41
同	同 改良課長	平井 喜久松	東大土木・明 43
同	建設局計画課長	池原 英治	東大土木・明 44
同	同 工事課長	河原 直文	京大土木・明 41
同	大臣官房研究所第四科長	田中 豊	東大土木・大 2
同	嘱託・東京帝国大学教授	山口 昇	東大土木・大 3
幹事	工務局技師	柳生 義郎	東大土木・大 8
同	建設局技師	渡邊 貫	東大地質・大 12

表3 土質調査委員会の設置にともなう鉄道省大臣官房研究所の体制

所属	役職	氏名	本務	分担
研究室	委員	田中 豊	研究所第四科長	
	同	山口 昇	嘱託（東京帝国大学教授）	
	幹事	渡邊 貫	建設局計画課兼研究所第四科技師	
	事務員	松山 教一	研究所第四科技手	
	研究員	野坂 孝忠	建設局工事課技手	
	助手	竹本 寅之助	工務局計画課雇	
	同	高野 勝喜	建設局計画課雇	
	同	佐々木 克巳	建設局計画課雇	
第一実験室	同	内田 博	東京改良事務所	
	研究員	窪田 吾郎	研究所第四科技手	
	助手	秦 龍人	研究所第四科雇	
	同	菊地 慶助	東京改良事務所	
第二実験室	同	白石 公治	東京建設事務所	
	研究員	石原 呉郎	研究所第四科	鉱物検鏡助手
	助手	梶田 善	建設局工事課	光学実験助手
	同	木村 満由	東京建設事務所	
	同	菅原 永四郎	東京建設事務所	

月6日に東京建設事務所（現在の東京都中央区東新橋二丁目に所在）に臨時事務所を設けた。

また、大臣官房研究所には研究室が設置され（官制による組織上の正式な研究室ではなく土質調査委員会の任意組織として設置された）、第四科長の田中豊が筆頭委員（室長）となり、渡邊貫が幹事となったが、田中豊は橋梁工学（鋼構造）の専門家で、第四科長として土木系の研究組織全般（軌道、橋梁、トンネル、構造物設計など）を統括する立場にあつたので、実務上は渡邊が研究室の運営を一任されていたと推察される。研究室は、委員会の事務、文献調査、土質力学的計算・設計、内外文献（書籍およ

び雑誌）の備付などの業務にあたつた。人材は研究所第四科のほかには本省や地方事務所からも派遣されたが、部内の出向者のような立場で土質調査委員会の業務に従事していたと考えられる。

研究室の下には第一実験室と第二実験室が設けられた（表3）。第一実験室は、土質力学の実験的研究を担当し、土の剪断抵抗測定機（写真3）、土の淘汰

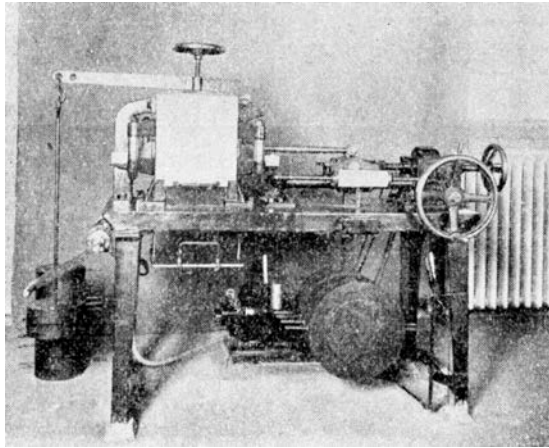


写真3 電動式標準型土質剪断抵抗試験機

分析設備, 土圧実験装置, 透水試験装置などを備えた(写真4)。第二実験室は, 組成鉱物の鑑定や分

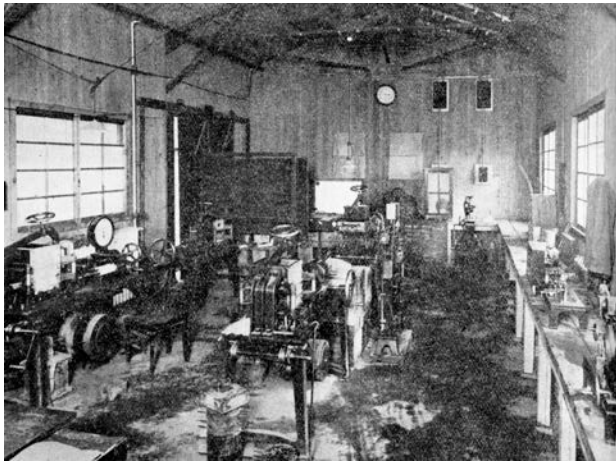


写真4 第一実験室の室内

析などを担当し, 薄片作成設備, 光学試験装置, 光弾性実験装置(写真5), 粒径分析装置などを備えた(写真6)。さらに, 各現業機関(建設局と工務局が管轄した地方建設事務所, 地方改良事務所)に対

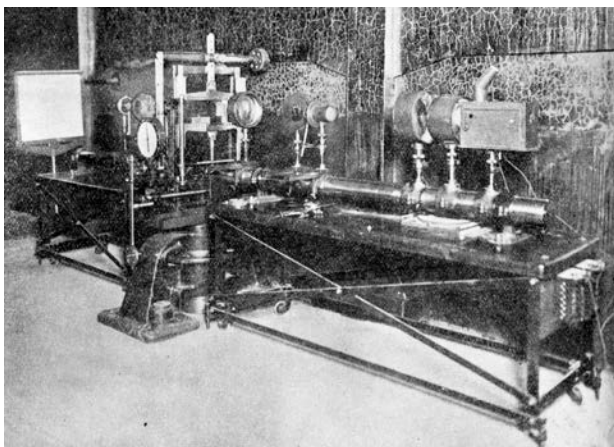


写真5 光弾性実験装置

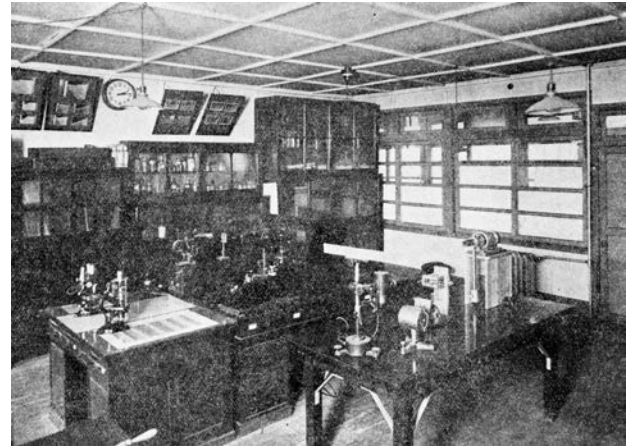


写真6 第二実験室の室内

しても, 土質標本採取機, 土質標本運搬機, 土の剪断抵抗測定器, 土の分析用具などが常備された。

委員会では, 調査業務として, 現場からの依頼に応じて随時専門家を派遣して調査にあたらせたが, 地質調査を行うコンサルタント会社はまだ設立されていなかった時代なので, 土質調査委員会が直轄でコンサルティング業務にあたっていた。初回は, 東京鉄道局改良課の依頼により 1931(昭和6)年1月13日より3日間にわたって実施された熱海線泉越トンネル改築のための調査で, 当時, 泉越トンネルは膨張性地質による変状が続いていた。その後も, 橋梁の基礎調査, 地すべり地の調査, 軟弱地盤の調査など, 鉄道建設工事や在来施設の保守管理に関するさまざまな土質工学的問題の解決にあたった(写真7)。

また, 「雑誌会」を毎月開催して, 海外文献の翻訳紹介や, 調査・研究成果の発表が行われたが, この会には土質調査委員会の関係者以外にも地方現業機関の担当者や大学教員が随時参加し, 外に開かれた組織としても機能していた。このほか, 現業機関で講習会を開いて地質学の基礎知識や土質調査の具体的方法を指導したほか, 応用力学大会, 工業大会,

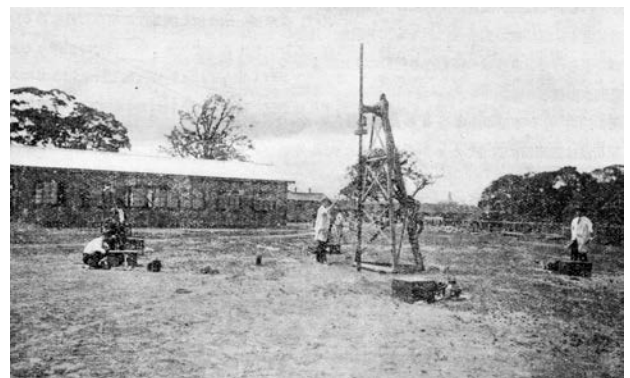


写真7 東京帝国大学地震研究所・石本巳四雄所長による石本式反射法の実施状況

道路改良会など部外の学協会の行事にも積極的に参加して成果を公表したことが特筆される。土質調査委員会は、単なる本省の諮問機関ではなく、現場に直結した実践的な組織として機能し、講習会や現地指導などを通じて現場との交流を深め、土質試験機器の取扱方法や地質学の知識が全国の現場で共有化される契機となったが、これは土質調査委員会の中心的役割を果たした渡邊貫の意志が強く働いていたと想像される。

こうした土質調査委員会の活動・成果は、『鉄道省土質調査委員会報告』として随時まとめられ、1931（昭和6）年から1938（昭和13）年の7年間にかけ「第1輯」（1931（昭和6）年6月発行）、「第2輯」（1932（昭和7）年10月発行）、「第3輯」（1934（昭和9）年7月発行）、「第4輯」（1936（昭和11）年4月発行）、「第5輯」（1938（昭和13）年3月発行）の5冊が鉄道省大臣官房研究所より発行され、現在でもその活動状況を具体的に知ることができる。

なお、萩原尊礼の追悼記事によれば、1930（昭和5）年に電気探査を試みた際に招聘したスウェーデン人技師が肝腎な解析方法を明かさなかったために渡邊が苦勞したことや、高給の外国人技師を無断で雇ったことで上司から大目玉を食らったという裏話を披露しているが^{註7)}、思ったことをただちに実行する性格が仕事ぶりにも発揮されていたことを示すエピソードである。この電気探査は、1930（昭和5）年11月に盛岡建設事務所管内の山田線（宮古、茂市）、同年12月に山口建設事務所管内の岩徳線（岩国）で、スウェーデンの Electrical Prospecting 社の技師 P.E.Lagerhjelm によって実施され、『鉄道省土質調査委員会報告・第1輯』に服部定一（鉄道省大臣官房研究所技師）と萩村龍城（同雇）によってその概要が報告されたが、「同氏（註：スウェーデン人技師のこと）より調査方法に就き簡単なる説明を聴取したが、その詳細は質すを得なかった為、見聞した二三の事項を根拠とし、帰所後、その調査方法を理論的に演繹した結果、同氏の方法と大略一致するものを得た。」とその苦勞を記している。

5. 地質工学の体系化をめざして

この時期の渡邊貫は、土木技術者に対して地質学の知識を啓蒙するために、1928（昭和3）年に工業雑誌社から『土木地質学・工事編』を出版したほか、続いて1930（昭和5）年にはその続編として『土木地質学・理論編』を出版し、知識の普及と併せて地質工学の体系化が試みられた（図4）。このうち『土



図4 『土木地質学』の広告

木地質学・工事編』は、1928（昭和3）年6月26日から5日間にわたって、全国の12箇所の建設事務所から代表者（技師および技手クラス）を集めて行った第1回測量会議（鉄道省建設局計画課主催）で、渡邊が行った「線路選定に必要な地質の智識」という講義の内容をベースとしており、「谷川に沿う線路」、「海岸に沿う線路」、「山地を縫う線路」、「平地を横断する線路」、「地質と工事」、「地下水と隧道工事」、「堰堤工事と地質」の各章を設けて、それぞれの条件で注意すべき地形・地質を解説し、付録として「岩石の分類」、「山崩の分類」、「地質調査とは如何なる仕事か」に言及した。また、『理論編』では「土木地質学の将来」、「土質科学」、「切取の安定度」、「基礎の地盤」、「堰水工の基礎」、「泥炭地の基礎工」、「隧道の地圧」、「水圧隧道の覆工」、「土地陥没現象（鉱山被害）」の各章を設けて、『工事編』の背景となる地形学や地質学の基礎知識を、現場の技術者でも理解できるよう平易に解説した（図5）。

渡邊は出版の意図について、『土木地質学・工事編』

の改訂（1930（昭和5）年）の「序」で、「工事編はもっぱら現場担当者が直接現地で役立てることを目的とし、理論編は現場の経験を収集して最近体系化された「土質力学」によってこれを解釈することを企てた」（要旨）と述べたが、まず現場に知識を普及させてその業務に役立てることを優先し、それによって得られたデータで理論を検証・補強することにより、短期間に多くの成果を挙げた。鉄道省は、全国組織であったことや、専門分野ごとの縦割組織を基本としたこと、あらゆる工学分野の専門家を抱えていたことなどもあって、委員会という横断的な組織を活用することによって、縦割りであった官僚組織を特定のプロジェクトに向けて取り組む体制を整えること（いわゆるプロジェクトチームの結成）がしばしば行われた。こうした組織を利用することによって細分化された専門分野が活性化され、短期間で具体的な成果をもたらすことに成功した（新幹線の実現はその顕著な例）。渡邊貫は、1931（昭和6）年1月に大臣官房研究所第四科を兼務し、1936（昭和11）年6月には、「土の科学」と題した論文によって東京帝国大学から理学博士の学位を授与された。

6. 地質工学の集大成

渡邊貫は、その後も単行本を執筆し続け、雑誌にも積極的に投稿して地質学の知識の普及に力を注いだ。表4は、渡邊貫が部外の論文誌や技術誌に執筆した記事の一覧を示したもので、土質調査委員会の設置までは鉄道省の内部に対して地質学の知識を啓蒙することに努力していたが、その後は『地質學雜誌』や『地球』など理学分野の論文誌にも範囲を拡げている。渡邊は純粹理学としての地質学に対して批判的だったので、自らの成果が実学として社会に貢献していることをアピールすることによって、理学の研究者が実学としての地質学にも目を向けるように促していたと考えられる。

渡邊の旺盛な執筆活動の中で、1935（昭和 10）年に古今書院から発行された日本最初の『地学辞典』

の編纂は、特筆すべき業績となった。渡邊は、1969（昭和44）年に竹内均、片山信夫、森本良平、木村敏雄の編集によって『地学辞典』が改訂された際の「序」に寄稿したが、初版の出版経緯について「その当時、いわゆる地学会がいかにも頑迷・固陋で偏見に満ちたものであったかということ物語るものである。自分はこれに対する義憤と闘志から、昭和5年32歳の時にこの編集を思い立ったので、世界中の辞典を取り寄せて、わずか一か月で計画をこしらえたものである。」（原文）と述べ、当時のアカデミズムとしての地質学のあり方を痛烈に批判した。

渡邊は、初版の「序」で編纂した動機として、「物理学や化学、生物学が体系化されているにもかかわらず、地学のみが様々な分野に細分化されてひとつの講座としてまとまっていない」（要旨）とし、用語も統一されていない（文中では「鉍物」と「砒物」、「珪酸」と「硅酸」を例示）ことや、新聞などによって通俗的な知識が横行している現状を憂い、『地学辞典』の編纂を決意するに至ったとした。

渡邊貫は、同じ年に古今書院から『地質工学』を出版したが、これは先述の工業雑誌社から出版された、『土木地質学・工事編』、『同・理論編』をベースとして土質調査委員会などの成果を含めて1冊にまとめて体系化したもので、渡邊の経験を集大成した大著となった^{註8)}。ちなみに、渡邊と同期入省の佐伯謙吉は1933(昭和8)年に工業雑誌社から『温泉と其の掘鑿』を出版したほか、廣田孝一も1941(昭和16)年に鉄道工学会から『鉄道地質学』を出版した。

昭和 10 年代に入ると関門トンネルや弾丸列車計画，朝鮮海峡トンネル計画などの大プロジェクトの地質調査にも携わり（図 6），その傍らで 1938（昭



図6 朝鮮海峡隧道に挑む「渡邊隊長」
『朝日新聞』1940（昭和15）年12月19日付より

和 13) 年に東京帝国大学地震研究所や鉄道省の同好の士を集めて自宅に地質工学会を設立し、依頼に応

表 4 渡邊貢の主要雑誌記事

番号	タイトル	雑誌名	巻	号	年
1	セメンテーション概説 (1)	土木建築雑誌	4	3	1925
2	セメンテーション概説 (2)	土木建築雑誌	4	4	
3	丹那隆道東口付近の地質	土木建築雑誌	4	8	
4	凍結法概説 (1)	土木建築雑誌	5	4	
5	凍結法概説 (2)	土木建築雑誌	5	5	1926
6	霧島地方に於ける火山灰層の土工に関する資料	土木建築雑誌	5	6	
7	凍結法概説 (5)	土木建築雑誌	5	9	
8	鉄道線路選定及水力電気水路設計に関する参考資料	土木建築雑誌	6	3	
9	丹那隆道の地質状態現況と掘削根本方針の考察	土木建築雑誌	6	6	1927
10	ベルリン・フランクフルト (オーデル河畔) 間独逸国有鉄道線路 ロオゼンガルテンの掘削切取の大山崩 (1)	土木建築雑誌	6	11	
11	マルセイユ・ロメオ運河工事	土木建築雑誌	6	7	
12	山崩の分類	地質学雑誌	35	421	
13	Terzaghi Erdbaumechanik の解説	鉄道技術	2	5	1928
14	表土に就いて	鉄道技術	2	8	
15	ベルリン・フランクフルト (オウデル河畔) 間独逸国有鉄道線路 ロオゼンガルテンの掘削切取の大山崩 (2)	土木建築雑誌	7	1	
16	片麻岩に就いて	鉄道技術	2	12	
17	土木地質学文献抄	鉄道技術	3	1	1929
18	土木地質学講座	鉄道技術	3	2	
19	土木地質学欄	鉄道技術	3	3	
20	土木地質学欄	鉄道技術	3	4	
21	土木地質学欄	鉄道技術	3	5	
22	土木地質学欄	鉄道技術	3	6	
23	土木地質学文献抄	鉄道技術	3	7	
24	西南日本の地帯構造論	土木建築雑誌	8	8	
25	土木地質学欄	鉄道技術	3	8	
26	基礎工事に応用せる地球物理学的地質調査法 (1)	土木建築雑誌	8	9	
27	土木地質学欄	鉄道技術	3	9	
28	基礎工事に応用せる地球物理学的地質調査法 (2)	土木建築雑誌	8	10	
29	Bologna-Florenz (伊太利) 間 Apennin 山脈横断鉄道	鉄道技術	3	10	
30	地球物理学的地質調査の実験報告 (1)	土木建築雑誌	8	11	
31	Bologna-Florenz (伊太利) 間 Apennin 山脈横断鉄道	鉄道技術	3	11	
32	地球物理学的地質調査の実験報告 (2)	土木建築雑誌	8	12	
33	土木地質学欄	鉄道技術	3	12	1930
34	土木地質学序論	鉄道技術	4	1	
35	基礎の電気地質調査に就いて	地球	14	3	
36	堰堤工事と地質に就いて	鉄道技術	4	3	
37	地下水に就いて	地球	13	3	
38	土木地質学欄	鉄道技術	4	4	
39	地球物理学的基礎調査法概観	土木建築雑誌	9	1	
40	国鉄裁線木興水道施工に就いて	土木建築雑誌	9	3	
41	電気探求法試験報告	土木建築雑誌	9	6	
42	ジブラルタル海峡横断海底隧道計画	土木建築雑誌	9	8	
43	基礎地盤支持力測定器新案	鉄道技術	4	11	
44	伊豆地震と丹那トンネル	鉄道技術	5	1	
45	基礎の電気地質調査に就いて	土木建築雑誌	10	1	
46	膠結法及凍結法講座	鉄道技術	5	2	
47	世界一の大アペニン隆道工事	土木建築雑誌	10	2	1931
48	ラマン効果に就いて	土木建築雑誌	10	2	
49	膠結法及凍結法講座	鉄道技術	5	3	
50	膠結法及凍結法講座	鉄道技術	5	4	
51	過去半世紀間に於ける佛蘭西應用地質学の進歩	地質学雑誌	38	455	
52	膠結法及凍結法講座	鉄道技術	5	5	
53	膠結法及凍結法講座	鉄道技術	5	6	
54	過去五十年間に於ける隆道施行法の進歩	土木建築雑誌	10	6	
55	膠結法及凍結法講座	鉄道技術	5	7	
56	膠結法及凍結法講座	鉄道技術	5	8	
57	膠結法及凍結法講座	鉄道技術	5	9	
58	過去半世紀間に於ける仏蘭西應用地質学の進歩	土木建築雑誌	10	10	
59	膠結法及凍結法講座	鉄道技術	5	10	
60	膠結法及凍結法講座	鉄道技術	5	11	
61	開通せる清水隆道と地質問題	鉄道技術	5	12	
62	過去十年間を通じて見た土木地質学の現在と将来	土木建築雑誌	11	6	1932
63	水成岩生成過程の初期 (沈積泥土層の緊密固結作用) の實驗的研究	地質学雑誌	42	505	1935
64	粘土の膨張壓力の實驗的研究	地質学雑誌	42	502	
65	北陸本線 (新潟縣西頸城郡磯部村宇藤崎地内) 能生箇石地に於ける力學的解析	地質学雑誌	42	497	
66	地学辞典	地学雑誌	47	8	
67	Key bed の對比法に就いての一試案	石油技術協会誌	4	5	1936
68	江東地盤の沈下問題	地質学雑誌	44	527	1937
69	Key Beds の對比法に就いての一試案	地質学雑誌	44	520	
70	江東地盤の沈下問題	地震・第1輯	9	4	
71	中央構造線に関する諸問題: 中央構造線の研究に就いての一試案	地学雑誌	49	1	
72	電磁方式磁物選別器	地質学雑誌	45	534	1938
73	海底炭田探査に使用せる弾性波式地下探査法用高倍率水中微動計	地質学雑誌	46	553	1939
74	弾性波式地下探査法用三聯式高倍率微動記録装置と其使用實例	地質学雑誌	48	572	1941
75	地盤の凍上 (續)	雪氷	3	8	
76	地盤の凍上	雪氷	3	4	
77	弾性波探査による實例	地質学雑誌	49	585	
78	土木界における物理探査の最近のう勢	土木学会誌	48	10	1963

じて資源調査を行うなどしてその利益を活動資金としていた^{註9)}。

しかし鉄道省土質調査委員会の活動は、1938（昭和13）年3月に『土質調査委員会報告・第5輯』を出版したことを最後に打ち切られてしまった。日中戦争が勃発してしだいに暗雲がたちこめつつある時代ではあったが、弾丸列車計画や関門トンネル工事などの大プロジェクトをはじめ、鉄道の建設・改良工事は戦時体制を支えるための重要なインフラとして位置づけられていた。土質調査委員会の果たす役割もより重要となり、最終報告書となった『土質調査委員会報告・第5輯』には数多くの調査件名が掲載され、調査方針として、「土工に関する研究」、「隧道工事に関する研究」、「基礎工事に関する研究」、「土質組成成分とその力学的ならびに物理的性質の相関関係に関する研究」、「地盤探査法に関する研究」、「地盤内圧力分布に関する研究」などを具体的な目標を掲げていたので、調査研究をさらに継続する高いモチベーションは維持し続けていたと考えられる。

考えられる理由としては、土質調査委員会がその役割を十分に果たしたと判断されたこと、官制で定められた正式な組織（官制上は大臣の諮問機関）ではないにもかかわらず常勤者や執務室（事務室や実験室）を備えて官制上の組織のように振る舞っていたことや、渡邊貫が土質調査委員会とは別に地質工学会を組織してこれを収益事業としていたことが問題視されたことなどが推察されるが、現時点で土質調査委員会の幕引き、解散がどのような経緯でなされたのかを示す傍証は乏しく、その解明については今後の課題としたい。

7. 日本物理探鑛の設立

1941（昭和16）年12月に太平洋戦争が開戦し、翌年6月には「時局ニ適応シ行政官庁ノ事務ヲ能ク限リ簡素且強力ナラシムルト共ニ人員ヲ整理シソノ余剰ハ之ヲ大東亜全般ニ亘ッテ活躍スル人士ノ充実に資スル……」という行政簡素化の方針が閣議決定され、鉄道省でも、組織の大幅な統廃合と1割（約5万人）の定員削減を断行することとなった。その結果、同年11月1日付で本省10部局50課が6局41課に削減され、土木系統では建設局と工務局を統合して新たに施設局を発足させた。

これを潮時として渡邊は鉄道省を退官することを決意し、同日付で施設局設備課勤務となったのち同年12月16日付で鉄道監（高等官二等）、大臣官房勤務が発令され、同年12月28日付で鉄道省を退官した。退官が本人の意思であったのかどうかは定かではないが、組織の枠にとらわれない仕事ぶりや、退官と同時に会社を発足させていること考慮すると、

行政整理の有無にかかわらず、退官することを前提として事前に会社の設立準備などが行われ、そのタイミングをうかがっていたとも考えられる。

渡邊は、退官を待たずに同年12月7日付で物理探査を専門とする民間コンサルタントとして日本物理探鑛を設立し、自ら社長に就任した。設立されたばかりの日本物理探鑛には、鉄道省大臣官房研究所第四科の渡邊の下で関門海峡や朝鮮海峡、東北本線荒川橋梁、東海道本線天竜川橋梁、木曽川橋梁などの弾性波地質調査に従事していた神田祐太郎（昭和11年、山梨高等工業土木科卒）が移り、同時に入社した服部保正（昭和13年、東京帝大地震学科卒）とともに創業期の社業を支えた。

ちなみに、東京帝国大学地質学科を卒業して渡邊と同期で鉄道省に入省した佐伯謙吉は、1931（昭和6）年7月に退官してヤマトボーリングに移り、廣田孝一は1943（昭和18）年2月に退官して日本放送電（のちの電源開発）に移って1923（大正12）年に入省した3人の地質学出身者はすべて鉄道から去ってしまい、地質学科の出身者は1937（昭和12）年に東京帝国大学地質学科を卒業した宮崎政三がしばらく孤塁を守ることとなった。このため、1944（昭和19）年に東京帝国大学地質学科を卒業した伊崎晃が採用されたが、関門トンネルが完成し、弾丸列車計画や朝鮮海峡トンネル計画も中止となって新規の工事は途絶え、陸軍技術候補生に応召したまま終戦を迎えた。のちに、宮崎は、1955（昭和30）年4月に日本国有鉄道の鉄道技術研究所に設置された地質研究室（国鉄の組織名として「地質」という名称が初めて正式に用いられた）の初代室長に就任し（のち日本物理探鑛取締役地質部長、社友）、伊崎はその後任として1964（昭和39）年に二代目の地質研究室長となった。

また、退官後に鉄道省（運輸省）から「建造物基礎ノ物理的地下探査並爆撃ノ地下構造物ニ及ボス影響ニ関スル研究」（1943）、「地下構造物関係工事設計上ニ於ケル地質調査ニ関スル研究」（1945）が委嘱された。戦時下にあって物理探査の需要はますます重要となり、特に地下資源の探査は、戦争遂行に必要な天然資源の確保を目的とした需要が増え、石炭、磁鉄鉱、銅、鉛、亜鉛、黒鉛、マンガン、硫黄、タングステンなどを求めて国内はもとより大陸や東南アジア地域にもその調査範囲が広がった。

8. 戦後復興から高度成長へ

戦後の渡邊貫はもっぱら日本物理探鑛の経営に専念し、鉄道界や学協会の活動にはほとんど関わらず、戦前のような組織の枠を越えた活躍はすっかり影を潜めた。社業は戦後復興とともに需要が急速に伸び

たため(図7, 図8), 多忙となって手を広げる余裕がなくなってしまったことも一因と考えられる。1947(昭和22)年には、京都帝国大学地質学科教授

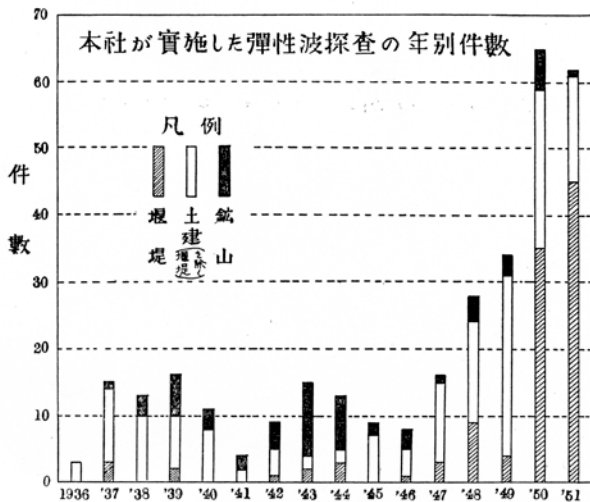


図7 日本物理探鉱が1951(昭和26)年までに実施した弾性波探査の実績(文献13より)

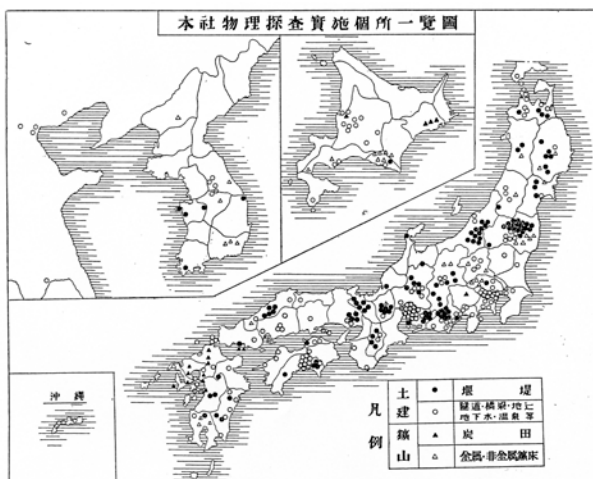


図8 日本物理探鉱が1951(昭和26)年までに実施した調査箇所(文献13より)

を経て北支開発地質調査所長となっていた本間不二男が大陸から引揚げ、日本物理探鉱取締役地質部長に就任して渡邊を支えた。日本物理探鉱における本間の業績は、服部保正によって文献16にまとめられているが、同書に掲載された渡邊貫の「弔辞」によれば、1942(昭和17)年の夏に北京で講演を行ったところ、最前列で本間が聴講していたことに気がついて物理探鉱の事業に引っ張り込むきっかけになったとしている^{註10)}。ちなみに、渡邊は土質調査委員会の運営に尽力した当時の建設局計画課長の池原英治と、日本物理探鉱の経営に尽力した本間不二男の2名の追悼録(文献7および文献16)の編纂に関わり、両者の恩義に酬いた。

渡邊の母体であった鉄道分野では、戦災復興を経て高度成長時代に至るとさまざまなプロジェクトを

抱えるようになり、地質学に対する需要はさらに高まりつつあった。同期の廣田孝一は、戦後も電源開発技術顧問、日本応用地質学会会長(初代)を歴任し、日本国有鉄道が設置した海峡連絡鉄道技術調査委員会特別委員として青函トンネルの調査に参画し、中央鉄道教習所の講師も委嘱されるなど、戦後も国鉄とのパイプを保ち続けていた。

戦前は渡邊の陰で目立たない存在であった廣田が戦後になって対外的に幅広く活躍したことは、渡邊が公職に就くことを拒んだため廣田にその役割が巡ってきたとも解釈できるが、いずれにしても渡邊が戦後の鉄道プロジェクトに対して自らの意見を主張することは皆無であった。官を辞した以上は民間企業の経営者に徹すると決意したのかもしれないが、その真意は今となっては定かではない。国有鉄道では、戦後間もなく地質学科出身者の採用を再開し、宮崎や伊崎を含む新しい世代の地質学の専門家が、1946(昭和21)年から開始された「津軽海峡連絡隧道」の地質調査などに活躍を開始するので、自ら蒔いた種が生長したことに満足し、自身の果たすべき役割は社業を通じた後方支援にあると割り切っていたようにも思われる。

1948(昭和23)年、業界団体として物理探鉱技術協会が設立され、工業技術院地質調査所内に事務所を設け、会誌『物理探鉱』が定期刊行物として発行された。物理探鉱技術協会の設立は、外地の石油探査などに従事して日本に帰還した地質調査所の飯田汲事や、東京帝国大学の淵田隆門、京都帝国大学の佐々憲三などのグループが中心となって設立され、初代会長(委員長)には飯田汲事が就任した。設立発起人には各組織から合計26名が名前を連ねたが、日本物理探鉱からは服部保正と鈴木武夫、運輸省からは久保田敬一が参画し、渡邊の名前は無かった。その後も渡邊が物理探鉱技術協会の役職に就くことは無く、唯一その名前を確認できるのは1969(昭和44)年に名誉会員に推戴された時のみである。

戦後における渡邊のメッセージは、1952(昭和27)年に季刊の論文誌として日本物理探鉱から発行された『地質工学』のみとなった。これは日本物理探鉱の創立10周年記念事業のひとつとして創刊され、「発刊の辞」と「巻頭言」は渡邊自らが執筆した。巻頭言では、「地質工学の現在及び将来」と題して、「物理探鉱の主体性」、「弾性波探鉱の偉力」、「新技術分野の発展」、「原子物理学の登場」、「音響式地下探査法の役割」、「振動学と土質力学」、「純正科学と応用科学」について幅広く持論を展開し、旺盛な好奇心と地質工学に対する情熱が失われていなかったことを示している。文章の末尾は「Academic fool」という言葉があるが、我が国の大学人種の中には往々

にしてこの種の人間がおり、理科系の学者が実用方面に赴くのを恰も学問の墮落の如く考えている愚者がいる。」と結ばれ、固陋なアカデミズムに対する反骨精神は戦後も衰えていなかった。

『地質工学』は季刊誌として発行され、「発刊の辞」によれば年2回（春秋）または4回（春夏秋冬）の発行をめざしていたようであるが実際は不定期刊で、次の第2輯が発行されたのは10年後の1962（昭和37）年であった。渡邊は1964（昭和39）年に発行された第3輯から毎回巻頭言的に総論を寄稿し、「物理探査の現況」（第3輯・1964）、「土の科学」（第4輯・1966）、「物理探査の進展」（第5輯・1968）、「物理探査の新技术」（第6輯・1969）、「物理探査の新分野」（第7輯・1971）と続き、晩年に至るまで新技术の吸収に意欲的であったことが理解できる。しかし、『地質工学』を除けば、1963（昭和38）年の『土木学会誌』に「土木界における物理探査の最近のすう勢」と題した記事を寄稿した程度で、学協会の役員や委員会の活動にも一切関わらず社業に専念した（写真8）。



写真8 1967（昭和42）年に大田区中馬込に新築された日本物理探査本社社屋

渡邊貫の薫陶を受けた宮崎政三の回想によれば、渡邊はよく「おれは実業家ではなく芸術家だよ」と口にしていただとされる^{註11)}。また、渡邊はフランス自然主義の小説家ギュスターヴ・フローベールの「L'homme n'est rien, l'oeuvre - tout（人間は無である。作品こそが全てである。）」をたびたび引用したが、この言葉はまさに渡邊貫の生涯を象徴している。渡邊の著書には、哲学者や小説家の言葉がペダンチックに引用され^{註12)}、地質学者らしいロマンチストとしての側面を見せていた。こうした渡邊の性格について、宮崎は「先生の御性格と達意の文才などを想えば「芸術家」と評する方が適わしかったのではないだろうか。」と評している^{註13)}。

戦後復興から高度成長時代を迎えて建設ブームが訪れ、鉄道分野でも青函トンネルや新幹線といった

大プロジェクトが推進されて地質の専門家が果たすべき役割はさらに重要となった。こうした中で、多くの土木技術者や地質学者にシンパシーを与え続け、実学としての地質学の普及に貢献した渡邊貫は、1974（昭和49）年12月17日に急性肺炎によって他界した。

9. 渡邊貫がもたらしたもの

渡邊貫のもたらした業績に対する評価は、鉄道技術研究所地質研究室の第七代目室長にあたる大島洋志によって下記の5点に要約されている^{註14)}。

- ①応用科学研究の推進が純粋科学の発展に通じるという信念のもとに、地質学関連分野への興味と知識力および行動で境界分野の方々を統括し、ある方向に導いていく能力ならびに自らの考えを一大出版物にする実践力（例：『地学辞典』の編纂）。
 - ②地質工学の重要性を同業者はもちろんのこと、土木技術者を主とした異分野の専門家にもわからせる能力。
 - ③地質工学的事例を多く記載するとともにそれらをわかりやすく体系化する能力。
 - ④今ではとても書けないと思えるような失敗事例を地質工学的見地から簡潔に分析・記述している剛胆さ。
 - ⑤物理探査法（とくに弾性波探査法）を土木の世界に導入し、調査業として成立させた行動力。
- 渡邊の聲咳に接したことのある諸先輩からの伝聞では、渡邊の押しが強い性格や強引な仕事の進め方は、しばしば鉄道省内でも摩擦を生じていたと伝えられる。また、官職にありながら私的な研究組織を設立し、積極的に出版物を執筆するなど、その奔放な行動が一部に好ましくないと考えられていた節もある。

しかし、渡邊は官僚組織の中での様々な制約や周囲の批判を押しつけ、自らの信念に基づいて行動し、結果的に多くの成果をもたらした。その背景には、省内では希少な地質の専門家であったが故に、その存在が周囲からも一目置かれ、土木系の学閥で固まっていた組織の中で多少の我儘も許容されていたのではないかと推察される。

官僚組織であった鉄道省（戦後の日本国有鉄道を含む）では、型破りな人物が周囲を巻き込んで新たな事業を立ち上げ、鉄道の改革に大きな足跡を残した。新幹線を実現した国鉄総裁の十河信二はその典型的な人物で、新幹線を実現するという信念の基に行動し、周囲の反対を押し切って半ば強引にこれを実現させた。渡邊貫とともに「鉄道の三法螺」と称された人物も、官僚組織の中で自らの信念に基づい

て行動し、鉄道事業に新風をもたらした。

渡邊が鉄道に在籍した期間はわずか 20 年であったが、鉄道は渡邊貫という希有な人材を確保するこ

とによって日本における黎明期の地質工学の発展をリードし、戦後の高度成長時代へとつながる下地をなした(表5)。渡邊貫が没してすでに 40 年以上の

表5 渡邊貫の略年譜

西暦	和暦	渡邊貫の年譜	主なできごと
1898	明治 31	渡邊雄次郎の三男として大分に生まれる	日露戦争 (1904)
1900	明治 33	父・雄次郎逝去	日豊本線別府～大分間開業 (1911)
1916	大正 5	県立大分中学校卒業	土木学会設立,東京駅開業 (1914)
1920	大正 9	第二高等学校卒業	丹那トンネル着工 (1918)
1923	大正 12	東京帝国大学理学部地質学科卒業 (理学士) 鉄道省入省, 熱海線建設事務所勤務	関東大震災 (1923)
1925	大正 14	建設局計画課勤務	
1926	大正 15	石澤満州枝と結婚 任鉄道技師 (高等官七等)	昭和金融恐慌 (1927)
1929	昭和 4	「土と水研究委員会」発足	
1930	昭和 5	鉄道省土質調査委員会設立, 幹事	北伊豆地震(1930)
1931	昭和 6	大臣官房研究所第四科兼務	満洲事変,清水トンネル開通 (1931)
1935	昭和 10	『地学辞典』『地質工学』出版	丹那トンネル開通 (1934)
1936	昭和 11	東京帝国大学より理学博士授与	関門トンネル着工 (1936)
1938	昭和 13	地質工学会会長	日華事変 (1937)
1940	昭和 15	海軍省建築局研究業務を委嘱	太平洋戦争開戦 (1941)
1942	昭和 17	鉄道技術研究所第二部研究室勤務 施設局設備課勤務, 任鉄道監 (高等官二等) 大臣官房勤務, 依願免本官 (退官)	関門トンネル開通 (1942)
		日本物理探鑛を設立, 社長就任	太平洋戦争終結 (1945)
1952	昭和 27	『地質工学』創刊	日本国有鉄道発足 (1949)
1963	昭和 38	『土木学会誌』に寄稿	国鉄技研に地質研究室創設 (1955)
1967	昭和 42	日本物理探鑛新社屋完成	北陸トンネル開通 (1962)
1969	昭和 44	物理探鉱技術協会名誉会員	新幹線開業,東京オリンピック (1964)
1972	昭和 47	勲四等旭日章	大阪万国博覧会 (1970)
1974	昭和 49	逝去 (12 月 17 日)	

歳月が経ってしまったが、渡邊貫によって体系化された地質工学の概念は戦後の高度成長期の土木工事の礎となり、今も日本のインフラを支えている。

<謝辞>

本稿の執筆にあたり、石澤雄一氏、加藤正男氏、大島洋志氏、内田篤貴氏の各位に御教示ならびに資料の提供をいただきました。ここに感謝申し上げます。

<本文註>

註1) 地質学と土木工学の境界分野は、「応用地質学」「地質工学」「地盤工学」「土地地質学」などさまざまな名称が用いられ、それぞれの違いや定義も曖昧なので、本稿では誌名に倣って「地質工学」を基本とした。

註2) 詳細は文献9参照。

註3) 江畑弘毅には、『土木建築工事用砂利』工業雑誌社 (1927),『保線作業と地盤』鉄道省工務局保線課 (1929),『保線地質』鉄道保線研究会 (1931) といった著作があるが、土と水研究委員会や土質調査委員会の活動に加わっていた形跡は無く、渡邊の後輩ではあったが、内務省から移籍して保線関係の業務に従事していたこともあって、特に接点は無かったようである。

註4) 『鉄道省熱海線建設事務所所報』No. 12 付録 (1927) による。

註5) 文献19では「先生は剛毅な性格で、典型的なワンマンであったために多くの人から誤解を受けましたが、……」とその性格が評された。

註6) 文献16の「弔辞」では、学生時代に深い交際は無かったとしている。

註7) 文献19による。

註8) 『地質工学』の評価については、文献28で詳

しくなされている。

註9) 文献13には、日本物理探鑛設立以前の1937(昭和12)年～1941(昭和16)年の調査実績も含まれ、会社設立以前から鉄道以外の地質調査に従事していたことは明らかである。渡邊は地質工学会会長のほかにも1937(昭和12)年に物理地下探査法研究会の総務理事を行っていたという記録もあるので、鉄道省とは別にこれらの組織のもとで鉄道以外の事業にも手を広げていた可能性がある。

註10) 文献16による。

註11) 文献20など。

註12) 「人間は無である。作品こそが全てである。」の典拠は、ギュスターヴ・フローベールが1875年12月に女流作家のジョルジュ・サンドに送った書簡による。このほか、「地質工学」では、ギヨーム・アポリネール(前衛詩人)、アルベルト・ハイム(シンプロントンネルの地質調査を行ったバーゼル大学教授)、アンリ・ポアンカレ(数学者)の言葉が原文で引用された。

註13) 文献20による。

註14) 文献28。

<参考文献>

- 1) 渡邊貫「線路選定に必要な地質の知識」『第一回測量会議記録』鉄道省建設局計画課(1928)
- 2) 渡邊貫『土木地質学(工事編)』工業雑誌社(1928)
- 3) 渡邊貫『土木地質学(理論編)』工業雑誌社(1930)
- 4) 『土と水研究委員会報告(第1回～第4回)』土と水研究委員会(1931)
- 5) 渡邊貫「鉄道省土質調査委員会の設立」岩波講座別冊, 岩波書店(1931)
- 6) 渡邊貫「過去十年を通じて見た土木地質学の現状と将来」『土木建築雑誌』Vol. 11, No. 6(1932)
- 7) 『池原英治遺稿集』工業雑誌社(1933)
- 8) 加藤武夫監修, 渡邊貫編纂『地学辞典』古今書院(1935)
- 9) 『丹那隧道工事誌』鉄道省熱海建設事務所(1936)
- 10) 渡邊貫『地質工学』古今書院(1936)
- 11) 『鉄道省土質調査委員会報告(第1輯～第5輯)』鉄道大臣官房研究所(1931～1938)
- 12) 渡邊貫『海底トンネル』電通出版部(1942)
- 13) 「日本物理探鑛株式会社によって実施された物理探査実例」『地質工学』No. 1(1952)
- 14) 福富忠男「土木地質学の実用化」『応用地質研究連絡紙』No. 13(1958)
- 15) 渡邊貫「土木界における物理探鉱の最近のすう勢」『土木学会誌』Vol. 48, No. 10(1963)
- 16) 『本間不二男先生の憶い出』本間不二男先生追悼

録出版会(1964)

- 17) 山田剛二「鉄道省「土質調査委員会」について」『土と基礎』Vol. 17, No. 12(1969)
- 18) 宮崎政三, 齊藤迪孝「土と基礎の回顧と点描／3. 鉄道関係(その1)」Vol. 21, No. 12(1973)
- 19) 萩原尊礼「名誉会員渡辺貫先生を憶う」『物理探鉱』Vol. 28, No. 1(1975)
- 20) 宮崎政三「渡辺貫先生を憶う」『地質學雑誌』Vol. 81, No. 5(1975)
- 21) 小野吉彦「物理探鉱技術協会小史」『物理探鉱』Vol. 31, No. 1(1980)
- 22) 小野田滋「国有鉄道における地質調査の黎明と発展—鉄道省土質調査委員会前史—」『日本土木史研究発表会論文集』No. 7(1987)
- 23) 山本莊毅「日本における応用地質学の歩み」『応用地質』Vol. 29, No. 1(1988)
- 24) 小野田滋「境界分野の開拓者・渡邊貫」『RRR』Vol. 54, No. 10(1997)
- 24) 表俊一郎「物理探鉱技術協会が設立された前後の事情について」『物理探査』Vol. 51, No. 4(1998)
- 26) 『大分銀行百十年史』大分銀行(2003)
- 27) 日本地学史編纂委員会「日本地学の展開(大正13年～昭和20年)(その5)」『地学雑誌』Vol. 113, No. 6(2004)
- 28) 大島洋志「温故知新・渡邊貫の地質工学再考」『応用地質』Vol. 47, No. 1(2006)
- 29) 小野田滋「渡邊貫とその業績—日本における地質工学の開拓者—」『地質学史懇話会会報』No. 42(2014)

遺跡探査の面白さ

亀井宏行

東京工業大学博物館

1. はじめに

遺跡探査とは、「物理探査の手法を使って地下の遺跡を発掘しないで調査すること」を指す。一般の物理探査と何が異なるかという点、対象が遺跡ということで、まず、埋没深度が比較的浅い、たかだか 10m 以内に限られることである。そして、対象の大きさが小さいということである。直径 20cm ほどの掘立柱の柱穴を探すなどという要求もある。浅深度を対象とすれば分解能は高くなるので、小さいものの探査は簡単になるかという点でもない。電気探査で言えば、浅深度を細かく探査しようとするれば、電極を打つ間隔を狭くして、何回も電極を打ち込まなければならない。直径 20cm の柱穴を地中レーダで探そうとするれば、レーダを引く測線間隔は 20cm 以下にしないといけない。深くにある大きなものを探すのと手間はそれほど変わらない。

最も大きな違い、それは対象が何だかわからないということである。考古学は人類の過去を探る学問である。文献資料が残っていない時代のことで、現在わかっていることは非常に少ない。私たちが中学高校で学んできたことが、一つの遺跡の発掘調査で覆ってしまった事例はいくつでも挙げられる。つまり探査対象についての事前の知識や情報が、非常に少なく、たとえ存在したとしても当てにならないということである。

物理探査で得られた結果というのは、地下の物理量の分布の様子である。遺跡探査では、この結果を、考古学の情報へ変換する手続き、「考古学的解釈」がどうしても必要となってくる。ところがその解釈に使うための事前情報が少ないので、簡単にはいかない。そこで、持てる知識と想像力を駆使して、「推理」することになる。遺跡探査は、推理小説のような謎解きの面が大きい。その謎解きの部分が、遺跡探査の面白さなのである。

医療の分野では、検査技師が異常を見つけても、その異常をどのような病変なのか判断して患者に伝えるのは医師の仕事である。遺跡探査でも、探査技術者は地下の物理量の分布を測定するだけで、考古学的な解釈は考古学者の役目だと、役割分担することが良いのかもしれない。探査技術者が勝手な解釈をして公表してしまい、それが全くの誤りだったという事例がいくつもあるので、考古担当者の間で、遺跡探査は信用できないという評判があることも事実である。そこで、筆者も公式には、「今回の遺跡探

査では、これこれの物理量が地下にこのように分布していることがわかりました。」という報告しかしないように心がけている。しかしながら考古学者が物理探査結果の解釈ができるかという点、それもまた無理なのである。考古学者が探査の原理や方法を理解しているわけではなく、物理量と言ってもそれが土壌のどのような性質を表していて、遺構を構成する要素の何を表しているかなどの判断はできない。考古学者は、単に分布の形からしか解釈はできないのが現状なのである。

探査技術者と考古学者で連携を取り、共同で解釈を進めるというのが理想である。しかし、遺跡の調査会社が受注し、下請けに探査を任せるという事例も見られ、連携がうまく取れているとは言い難い。そうすると探査技術者側が、考古学の知識を身につけて、考えられる解釈結果を考古学側に提案することができればいい。医療の現場と違い人命にかかわることではないので、間違いを恐れることなく、いろいろな解釈の可能性を、探査技術者側から提案できればいいのである。

本稿では、各種の遺跡がある中で、一般の人たちにも関心が高い古墳の探査例を紹介する。特に埋葬施設は、形態もバラエティに富み、副葬品の有無を含め、解釈の場面で最も知識と想像力を必要とする対象である。

2. 古墳の探査

2. 1 古墳の埋葬形態

古墳は、墳丘という形が目の前に存在する場合が多いので、住居跡などと違い探査対象としては焦点を絞やすい。古墳探査で目的とするものは、元々の墳丘形状、周壕の有無、埋葬施設などの内部施設、副葬品などであるが、最も関心が高いものが、埋葬施設である。古墳の埋葬施設の形態としては、竪穴式と横穴式に分けられる。古墳時代は 3 世紀から 7 世紀まで続くが、3 世紀から 6 世紀初頭くらいまで（前・中期）は竪穴式が主流、それ以降（後期から終末期）になると横穴式が主流になっていく。竪穴式は、棺を礫や板石で覆う石槨（石室）、粘土で覆う粘土槨、棺をそのまま埋める直葬などいろいろな埋葬形態が存在する。本稿では、竪穴式の埋葬施設を持つ古墳の探査事例を紹介する。

2. 2 秋常山 1 号墳の探査 1)

石川県能美市にある秋常山 1 号墳は、全長約 140m、後円部高 19.5m を誇る北陸最大の前方後円墳で、古

墳時代前期末（4世紀後半）の築造と推定されている。

図1に、整備完了後（2011年）の墳丘の写真2）を示すが、前方部が短いという特徴を持っている。



図1. 石川県秋常山1号墳整備後の全景2)

1995年には後円部墳頂部で試掘調査が実施され、攪乱や盗掘の痕跡がないことから、埋葬施設が残存していることが推定されたが、埋葬施設そのものに関する手がかりは得られなかった3)。築造時期から、竪穴系の埋葬施設の存在を想定していたが、この試掘調査では、「墓壙」が見つからなかったことから、埋葬施設について大きな謎が残された。「墓壙」とは、埋葬施設を埋めるために掘った墓穴の事で、通常、墳丘を構築した後で、墳頂部上面から掘られるので、墳頂部を浅く掘っただけで、墓壙の輪郭が捉えられることが多い。



図2. 秋常山1号墳墳丘測量図（整備前）と後円部探査領域

2004年からは整備を行うことになり、その過程で、2007年10月に物理探査を実施した。本稿では、後円部において、内部施設の確認のために実施された、地中レーダ探査、電気探査、磁気探査の結果を紹介する。

図2に墳丘測量図（整備前）を示す。整備後の写真と比べると、かなり墳丘が改変されていたことがわかる。後円部墳頂上に最も広く平坦面がとれるよう探査領域を設定した。地中レーダ探査はSensors & Software社製PulseEKKO pro with 500MHzアンテナを用い、0.5m間隔の測線配置で、東西、南北2方向測定した。

電気探査は、AGI社製SuperSting R8/IP比抵抗計と多電極切替装置MEDUSAを用い、東西15m×南北15mの範囲を、1m間隔で電極を配置して、表面電位法4)により実施した（図3）。



図3. 秋常山1号墳後円部墳頂での表面電位方による電気探査風景

磁気探査は、過去に墳頂部で鉄器が採取されたことから鉄製品の埋納可能性を探るために導入したもので、トーキン製TRM-70Dフラックスゲート型3軸グラジオメータを用い、東西15m×南北16mの範囲を0.5m間隔で測定した（図4）。



図4. 秋常山1号墳後円部墳頂での3軸グラジオメータによる磁気探査風景

まず、レーダ探査で特徴的な反応が得られた断面図を図5に示す。この図は、ほぼ墳丘主軸にそって南北に走査したレーダ断面図である。横軸は南から北へのアンテナ移動距離、縦軸には電波の反射時間をとったもので、反射時間の単位はナノ秒 (10^9 秒) で[ns]と表記している。実際の深度に変換するためには、地中の電波の伝播速度が必要であるが、本稿では関東ロームで平均的な伝播速度 6.7cm/ns (土壌の比誘電率 $\epsilon_r=20$ と仮定) を用いることとした。反射時間は電波の往復伝播時間となるので、 1ns あたり 3.35cm で深度に換算できる。

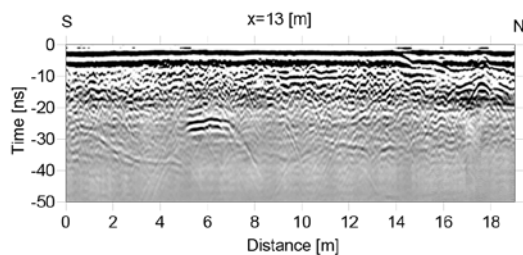


図5. 秋常山1号墳後円部 $x=13\text{m}$ の南北測線の地中レーダ断面図

本稿では、探査領域の東西方向東向きに x 軸正方向、南北方向北向きに y 軸正方向をとり、南西隅を原点(0,0)とする座標系を用いている。図5の測線は、 $x=13\text{m}$ を南北に走る。図5では、南から 6m ($y=6\text{m}$) の地点を中心に、深さ 23ns (換算深度約 80cm) あたりに幅 2m 弱の強い反射が見られる。位置からして埋葬主体であると考えられる。また、南から 1m 付近 27ns (換算深度約 90cm) の深さから北に向かって落ち込む構造が読み取れ、この反応は主体を挟んで 11m あたりで立ち上がるように見える。主体を据えるための墓壇と考えられる。墓壇の上端が主体の頂部より深いところから始まることから、墳丘築造後に掘り込んだ「掘込墓壇」ではなく、墳丘構築途中に堤で囲うような浅い墓壇を作り主体を据え、その後盛り土をして墳丘を構築した「構築墓壇」と考えられる。図5では、南から 8m 、深さ 10ns あたりから北に水平に広がる反射が見られるが、これは1995年調査時のトレンチを捉えているもので、このトレンチの深さでは墓壇が検出できないことは、レーダの断面図からも明らかである。主体からの反射については、南北方向測線では、隣接する4本の測線 (0.5m 間隔) にしか反射がとらえられていないことから判断するに、主体全体をとらえているにしては小さすぎると思われるので、主体の一部だけが残存していると考えられる。

大きさや方向性をとらえるためには、地中レーダの反射強度を、反射時間のある幅で切り出し2次元平面上に展開したタイムスライス図(平面図)を作成

することが有効である。図6に、東西測線の地中レーダ断面図から作成したタイムスライス図のうち、興味深い反応を表しているものを示す。図6(a)は、時間窓 $2\text{-}4\text{ns}$ (深度 $7\text{-}13\text{cm}$) のタイムスライス図であるが、直径 10m ほどの円盤状の強い反射(明るい色で表示)が見られる。非常に浅いところの反応なので後世の構造物や攪乱の可能性も考えられるが、古墳の構造物と考えれば、祭壇のようなものが考えられる。図6(b)は、時間窓 $10\text{-}12\text{ns}$ (換算深度 $35\text{-}41\text{cm}$) のタイムスライス図であるが、 $x=8\text{-}12\text{m}$, $y=8\text{-}10\text{m}$ の位置にある矩形の強い反射が1995年のトレンチ C1 を、その東側幅 1.5m で北に延びる反射がトレンチ C2 を、とらえている反射である。トレンチ C1 は、図6(a)でとらえられている円盤状の中に入ってしまったので、この構造が古い時代のも物であっても認識することはできなかったと考えられる。トレンチ C2 は、この円盤状構造を横切っているはずだが、報告書2)に記載はない。そうすると円盤状の構造のように見える反応は、1995年以降の何らかの工事(例えば盛り土など)によるものと考えられる。

図6(c)は、時間窓 $24\text{-}26\text{ns}$ (換算深度 $83\text{-}90\text{cm}$) のタイムスライス図で、図5でとらえられていた埋葬主体と思われる反射が、 $x=13\text{m}$ (東西)、 $y=6\text{m}$ (南北) の地点を中心に、 x 方向の幅約 1m 、 y 方向の幅約 1.5m の広がりを持つ反射としてとらえられている。埋葬主体としては小さすぎる。この反射はあくまでも主体の頂部の一部をとらえているものである。さらに深いところみれば、主体の全体像がとらえられる可能性がある。図6(e)は、時間窓 $38\text{-}40\text{ns}$ (換算深度 $131\text{-}138\text{cm}$) のタイムスライス図で、 $x=10\text{m}$, $y=9\text{m}$ 地点から、 $x=16\text{m}$, $y=2\text{m}$ 付近にかけて、強い反射が断続的ではあるがつながっている。おそらくこの反応が、主体の底部からの反射をとらえているものと思われる。

幅 2m 、長さ 10m ほどの範囲となるが、レーダの電波の広がりから大きめにとらえられることを差し引いても、長さ 8m を超える埋葬主体と思われる。おそらく木棺で、ほとんどが朽ちていて棺床かつぶれた被覆粘土からの反射が断続的にとらえられているものと思われる。古墳時代前中期の棺として典型的なもので、「割竹型木棺」というものがある。丸太を二つ割りにしてくり抜き、身と蓋を作ったもので、長さは 5m から 8m を超えるものまで存在する。この木棺は、石槨や粘土槨に収められる。木棺自体は、腐朽して全く残っていない場合も多い。この古墳のレーダの反応からは、割竹型木棺が粘土槨に収められ、そして、中央部の一部のみが残存しているか、あるいは木棺は腐朽してなくなっているが粘土槨のみが形を保っている状況であると推測される。

図 6 (d)のタイムスライス図に戻るが、北東部 $x=17-18\text{m}$, $y=10\text{m}$ から $x=12-13\text{m}$, $y=13-14\text{m}$ にかけて直線状に強い反射が並ぶのが見られる。この深さは、埋葬主体の残存部頂より少し深いところであり、墓壇とすれば、墓壇の堤状の構造の一部をとら

えているものかもしれないが、長さ 6m ほどということから、構築した段の上に置かれた副葬品を納めた副槨とか、もう一体の埋葬の存在も疑われる。

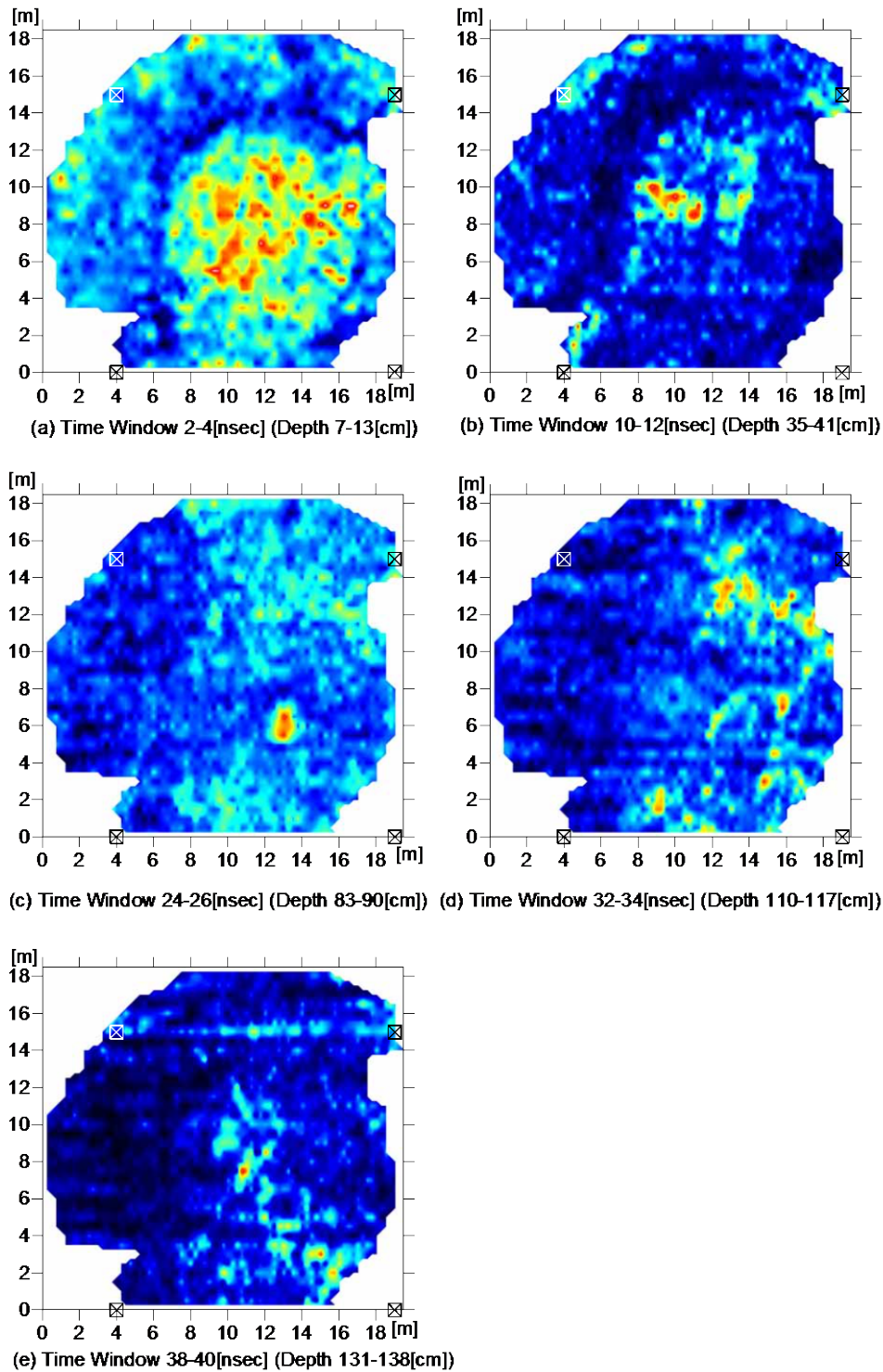


図 6. 秋常山 1 号墳後円部地中レーダタイムスライス図 (東西測線データから作成)

次に、磁気探査の結果を示す。図7は、地磁気垂直方向成分の勾配の分布である。鉄製品のような強磁性体が存在するときの磁気異常分布は、南側に正、北側に負の値を持つ双極型を示す。図7では、 $x=11\text{m}$, $y=7\text{m}$ あたりを中心とする双極型磁気異常と、 $x=15\text{m}$, $y=3\text{m}$ あたりを中心とする双極型磁気異常が見られる。いずれも大きな値を示していることから、鉄製品の存在が疑われる。地中レーダ探査で埋葬主体が残存している中心地点は、 $x=13\text{m}$, $y=6\text{m}$ は、ちょうど2つの磁気異常に挟まれた位置にあり、これら2つの磁性体は、棺内あるいは墓壇内に納められた鉄製の副葬品であると思われる。

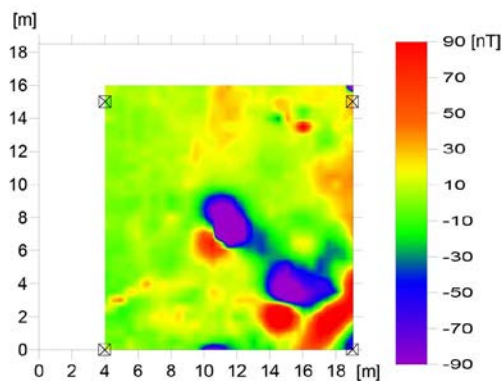


図7. 秋常山1号墳後円部墳頂磁気探査結果 (磁気勾配垂直成分分布)

この2つの磁気異常を発生させている対象物の位置を地中レーダの断面図から特定する。まず北側の磁気異常の中心を横切る、 $y=7.5\text{m}$ を通る東西測線の地中レーダ断面図を図8に示す。

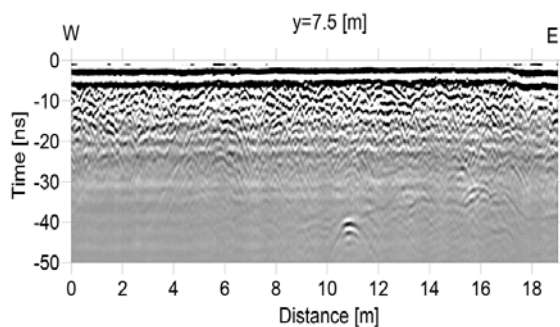


図8. 磁気異常を示す物体の地中レーダ像 (後円部 $y=7.5\text{m}$ の東西測線)

図8では、西から 11m 地点 ($x=11\text{m}$)、深さ 39ns (深度約 130cm) にきれいな双曲線パターンが見られる。この深度は、前述の埋葬主体の棺床と一致する。隣接する地中レーダの断面図では、 $y=6.5\text{m}$ から $y=8.5\text{m}$ の東西測線でこの反射が確認されるので、 2m 弱の範囲に分布する。図6(e)のタイムスライス図でその分布の形は確認でき、 $x=11\text{m}$, $y=7.5\text{m}$ の地点を中心に、 y 軸方向から少し右に傾く長さ 2m

弱の線分状の形をしていることがわかる。

もう一つの南側の磁気異常の原因物の地中レーダ像を、図9に示す。図9は、 $y=3\text{m}$ の東西測線であるが、西から 15m 地点 ($x=15\text{m}$)、深さ 33ns (深度約 110cm) に強い双曲線状の反射がこれにあたる。平面形状を確認するためのタイムスライス図が、図6(d)の時間窓 $32\text{-}34\text{ns}$ (深度 $110\text{-}117\text{cm}$) のタイムスライス図で、 $x=15\text{m}$, $y=3\text{m}$ 地点を中心に、固まりとして存在することがわかる。北側の磁気異常より 20cm ほど浅いところ、つまり棺床より 20cm ほど高いところに反射があるので、棺内に置かれたポリウムのある物体と推定される。

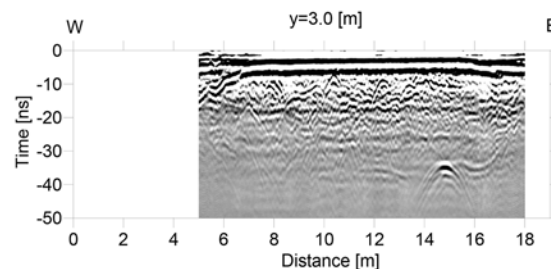


図9. 磁気異常を示す物体の地中レーダ像 (後円部 $y=3.0\text{m}$ の東西測線)

これらを考古学的な遺物と照らし合わせると、北側の磁気異常点には、鉄剣類のような細長いものが副葬され、南側には、甲冑類のようにポリウムのあるものが副葬され、それが土圧でつぶされずに残っているのではないかと解釈できる。

最後に電気探査結果を示す。今回用いた表面電位法では、地中に電流を流し込んだときに地表面に現れる電位分布を測定し、地下を 1m 四方、厚さ 0.5m の直方体ブロックの集合体に分割し、それぞれのブロックの電気抵抗率を算出している。そのため分解能は高くない。図10に、深さ 2m までの抵抗率分布を示す。抵抗率が高いところを赤く、低いところを青く表示してある。全体的に、東側の方が抵抗率が高いようすがうかがわれる。埋葬主体部が残存していたあたり ($x=13\text{m}$, $y=6\text{m}$) の深さ $1.0\text{-}1.5\text{m}$ の抵抗率は、周囲より低くなっている (図10(c))。埋葬主体がつぶれずに残っていて空洞が保たれていれば、空洞の抵抗率は無限大なので、測定される抵抗率も大きな値を示すはずだが、上部に粘土のような抵抗率の低い物質が存在する場合、電気探査では上部の低抵抗率にひっぱられ、低い抵抗率分布が現れることが多い。今回、主体が残存しているところが周囲より抵抗率が低く現れていることから、粘土の存在が疑われる。レーダ探査で、粘土層の存在を推定したが、電気探査では、その解釈を補強する結果が得られている。

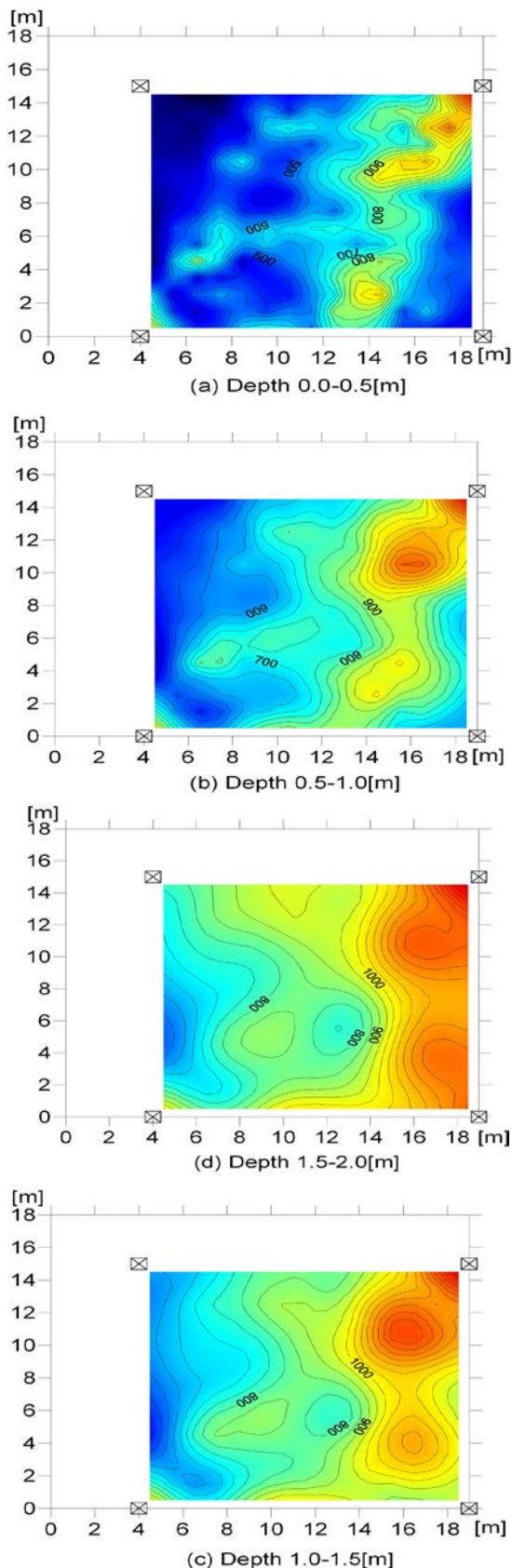


図 10. 表面電位法による秋常山 1 号墳後円部墳頂電気探査結果（抵抗率表示範囲 200-1600 Ω -m, 等値線間隔 50 Ω -m）

以上の解釈結果をまとめて、後円部の埋葬主体の様子を墳丘測量図に模式的に記したものが図 11 である。



図 11. 秋常山 1 号墳後円部墳頂探査結果の解釈

図中、A～F の記号で表したものが、埋葬に関わる遺構である。探査領域内に長さ 9m ほどの破線の長方形領域 D が、おそらく粘土槨と思われる主体で、A の部分は崩落せずに形をとどめていると思われる。粘土槨の残存部までの深度は 80cm 前後と推定される。棺内には、B、C の 2 カ所に鉄製品の副葬品が納められ、北側の C の部分には、鉄剣などの細長いものが棺底（深度約 130cm）にある。南側の B は深度が約 110cm なので、甲冑類の可能性が考えられる。墓壇は、はっきりしない部分もあるが、破線 E で囲まれた範囲あたりとなり、墓壇の「ほりかた」の始まりが浅いところでも約 90cm と、主体の頂部より深いので、掘込墓壇ではなく構築墓壇の可能性が高い。主体部の他に、破線で囲まれた F の領域に、もう一体の埋葬があるかもしれない。この古墳の埋葬施設については、発掘調査は実施されなかったので、確認できてはいない。

2. 3 昼飯大塚古墳の探査 5)

岐阜県大垣市にある昼飯（ひるい）大塚古墳は、4 世紀末築造と推定され、推定墳丘長 150m を越える東海地域第 2 位の大きさの前方後円墳である。図 12 に整備前の墳丘測量図を示す。前方部が大きいことを除けば、築造時期も大きさも秋常山 1 号墳と近い。この古墳は史跡整備のために、1994 年度から調査が開始され、2000 年度には国史跡に指定された。後円部の埋葬施設については、明治時代に盗掘があり、石棺あるいは石室があったという記録が残っているのみで、詳しいことはわかっていなかった。

後円部墳頂の物理探査は、1996 年にレーダ探査・磁気探査、1997 年に電気探査・磁気探査、さらに 1999 年にトレンチ内の磁気探査と継続的に 3 回行われた。1996 年と 1997 年に磁気探査を繰り返しているのは、墳頂部がごみ捨て場の様相を呈していた

ので、最初に樹木伐採後表面清掃を行った段階で実施し、次に表土層を除去した段階で実施した。レーダ探査は、パルスレーダ（光電製作所製 KSD-3 AM 型）および FM-CW レーダ 6) の 2 種類を用い、南北に軸あわせをした 16m 四方の正方領域に 50cm 間隔で配置した直交する 2 方向の測線群に沿って行った。電気探査は、50cm 間隔に 48 本の電極を取り付けたマルチチャンネル計測システムにて、測線間隔 50cm、測点間隔 50cm の高密度で、電極間隔 1m から 4m までの Wenner 配列によって行った。磁気探査では、フラックスゲート型 3 軸グラジオメータ（トーキン製 TRM-70D 型）を用いた。

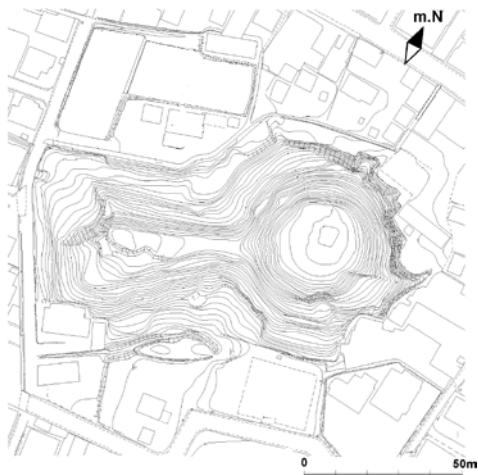


図 12. 岐阜県昼飯大塚古墳墳丘測量図（整備前）

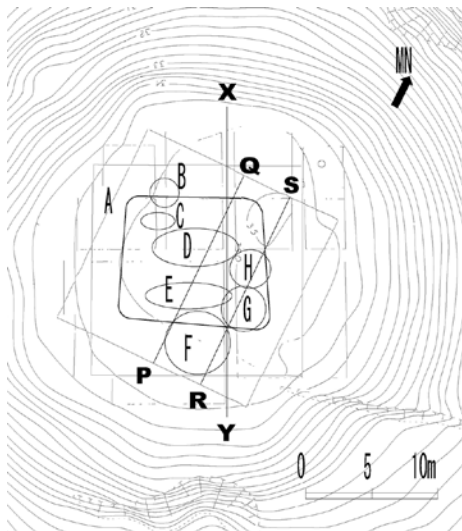
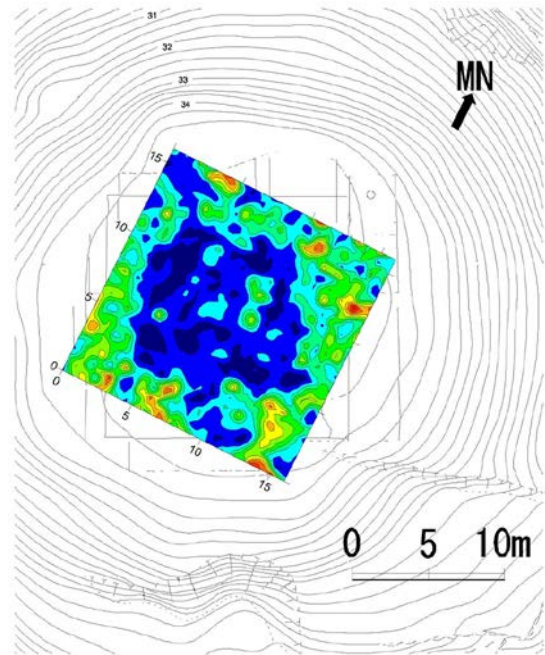


図 13. 昼飯大塚古墳後円部墳頂探査結果の解釈

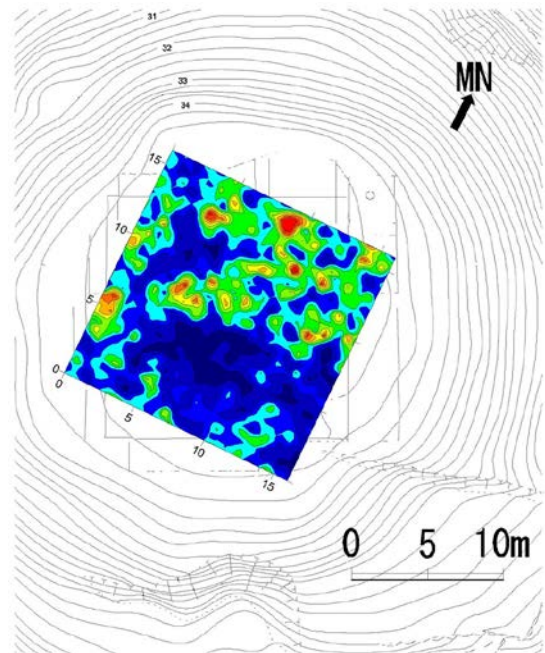
この古墳の埋葬施設については、探査後の発掘により、一つの大きな墓壇の中に、竪穴式石室、粘土槨、鉄製品を収めた副葬品庫が存在することが確認された。探査でどのような遺構の存在が推定されたか紹介する。

まず、レーダ探査・電気探査の解釈結果を模式的に記したものを、図 13 に示す。図中 A~H の異常（構

造）が読み取れるが、明らかに古墳の構造と思われるのは A と D である。A は図 14(a) に示すパルスレーダ・タイムスライス図（時間窓 18.8-21.1nsec, 換算深度 63~71cm）から読み取れる約 10m×10m のほぼ正方の領域で、墓壇の輪郭と考えられる。D は、図 14(b) に示すパルスレーダ・タイムスライス図（時間窓 32.8-35.2nsec, 換算深度 110-118cm）で出現する長さ 6m, 幅 2m ほどの構造である。この構造が、埋葬主体と思われる。



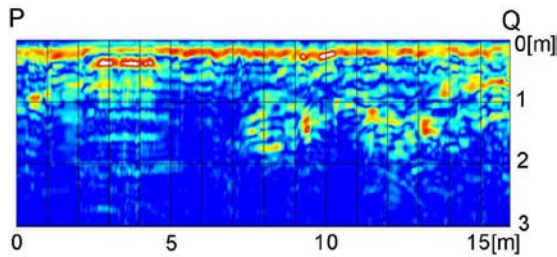
(a) 時間窓 18.8-21.1nsec（換算深度 63~71cm）



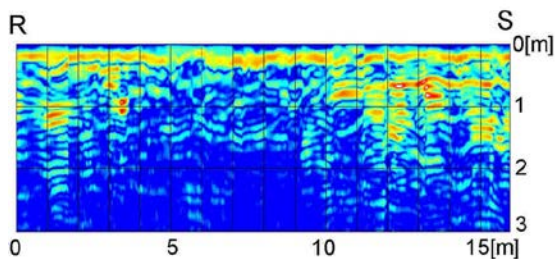
(b) 時間窓 32.8-35.2nsec（換算深度 110-118cm）

図 14. 昼飯大塚古墳後円部パルスレーダ・タイムスライス図

図 15(a)に示す FM-CW レーダ像 (図 13, P-Q 測線) では, P 端から 8~9m あたりに捕らえられている強い反射に相当する. この反応は, 地表下 90cm から 1.6m あたりまでになり, この反射像の形から判断するに埋葬施設で石室 (石槨) と考えられる.



(a) P-Q 測線



(b) R-S 測線

図 15. 昼飯大塚古墳後円部 FM-CW レーダ像

ここで一つ疑問が残るのは, A の墓墳の中にある石室 (石槨) が, 墓墳の中心になく, 北側に寄っていることである. 石室 (石槨) の南側にも, 何らかの施設が存在する可能性がある. 電気探査で, 電極間隔 1.5m の Wenner 配列で得られた見掛け比抵抗の分布を図 16 に示す. レーダ探査で石室 (石槨) と判断された D の位置には, 図 16 では, 東西 8m ほどの長さ広がる低比抵抗の分布が存在する. その南側にも低比抵抗の分布が存在するが, 墓墳 A 内に収まる部分を, 異常 E として検出した. E は, 電気探査の電極間隔 2m の見掛け比抵抗分布でも, 捕らえられていて, もう一つの埋葬主体のようにも思われるが, レーダでは何も捕らえられていない. 埋葬主体とすれば, 粘土槨か木棺直葬と考えられる.

もし D が石室 (石槨) で, 内部の空洞が保たれているなら, 電気探査で低比抵抗体として捉えられることはないはずである. そこで, 逆解析を行った. 図 13 の X-Y 測線に沿った見掛け比抵抗分布 (断面図) を図 17(a)に示す. 測線長は 23.5m である. 逆解析により抵抗率分布を計算したものが図 17(b)である. X 端から 9m を中心とする地点に高い抵抗率の集中が現れ, 石室 (石槨) の存在をうかがわせる. また, 幅 10m ほどの墓墳も, 抵抗率の低い部分として捉えられている. ただ, もう一つの埋葬主体と思われる E については, 少し抵抗率が高い塊として捉

えられているが, 粘土槨のような主体とは断定できない.

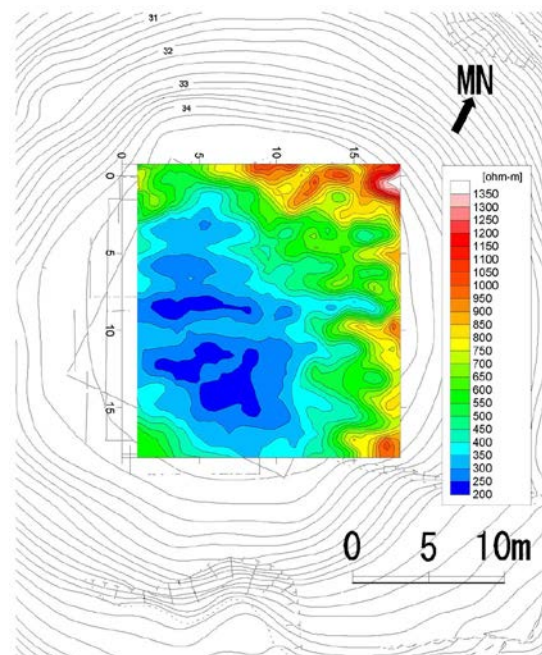
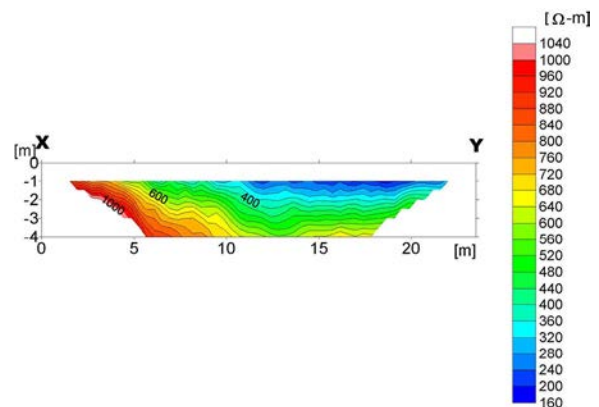
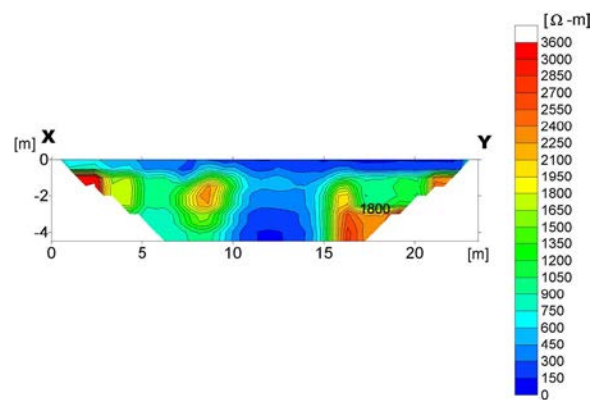


図 16. 昼飯大塚古墳後円部見掛け比抵抗分布 (Wenner 配列, 電極間隔 1.5m)



(a) 見掛け比抵抗断面



(b) 抵抗率断面 (逆解析後)

図 17. 昼飯大塚古墳後円部 X-Y 測線電気探査結果 (Wenner 配列, 電極間隔 1~4m)

図 13 中の B, C, F, G, H については、レーダ探査と電気探査の結果から、攪乱の痕跡と判断した。G, H の部分について、その根拠を述べる。図 15(b)の FM-CW レーダ像(図 13, R-S 測線)に捉えられている、R 端から 4m 地点から始まり S 端から 5m あたりで終わる地表面から掘りこまれている穴状の反射の部分にあたる。

この測線は、墓壇 A の角を横切っているので、この穴状の反射は墓壇を捉えていると考えることもできるが、通常、掘込墓壇でも、埋め戻した後、穴を隠すように覆土を盛る。さらにその上に祭壇などを設けて祭祀を行うことも報告されている。FM-CW レーダで捉えられている穴は、現地表面から掘り込まれているように見られるので、墓壇とは考えにくく、後世の攪乱と考えられる。墳頂部が後世に削平されている場合は、このような反射像になることもあるかもしれないが、この古墳では、墳頂の埴輪列も残っているので、削平の可能性は低い。

磁気探査の結果について述べる。1996 年に実施された磁気探査では、墳丘中央やや南の位置に、磁気勾配垂直方向成分で $\pm 2000\text{nT/m}$ を超える磁気異常が観測されたが、これは鉄製のカーテンレールであった。また、他の磁気異常もピークの鋭さから表面近くの塵芥と判断した。1997 年には、塵芥類の除去するために表土を薄く剥ぎ、再度磁気探査を実施したが、地下構造や埋納遺物に関する磁気異常は検出されなかった。

埋葬施設が深いことから、鉄製の副葬品があったとしても深いところにある可能性があるもので、1999 年には、墓壇 A 内の西端に南北に掘られた幅 1m、長さ 8m のトレンチ内を、25cm 間隔で磁気探査を実施した。その結果を、図 18 に示す。

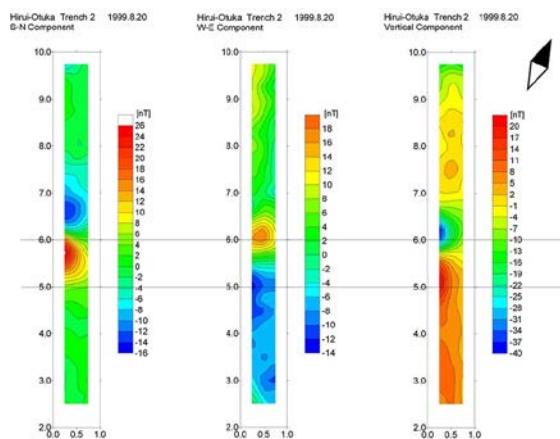
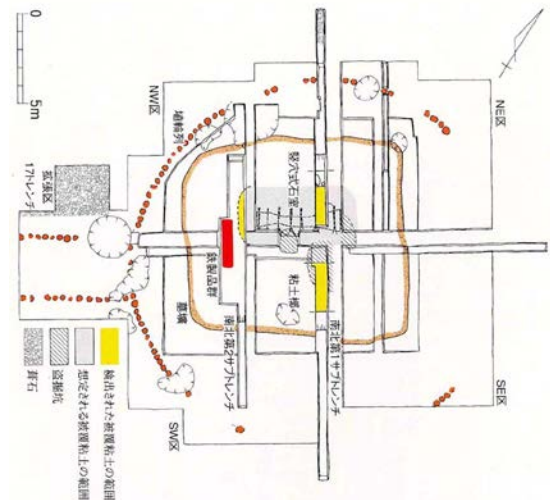


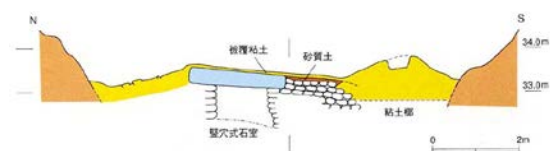
図 18. 昼飯大塚古墳後円部トレンチ内磁気探査結果

左から磁気勾配南北方向成分、東西方向成分、垂直方向成分を表している。南北軸 5m と 6m のところに描かれた水平線は、このトレンチに直交する掘

残しのベルトを表しているが、ちょうどそのベルト直下、トレンチ西壁側に磁気異常が現れている。もとの地表面から 1m ほどの深さであるので、現代の塵芥である可能性は低いので埋納鉄製品と思われる。



(a)平面図



(b)墓壇・埋葬施設断面模式図(南北サブトレンチ東壁)

図 19. 昼飯大塚古墳後円部墳頂発掘結果



図 20. 昼飯大塚古墳竪穴式石室内部(盗掘坑から東壁を撮影)

図 19 に、後円部墳頂の発掘結果を示す 7)。図 19(a)の平面図が示すように、墓壇の中に、北側に竪穴式石室(石槨)(図 20)、南側に粘土槨が発掘された。同図で、南北第 2 サブトレンチとあるのが、磁気探査を実施したトレンチで、磁気探査の結果に基づきトレンチを西側に拡張した結果、鉄製の埋納品群が見つかった。図 19(b)は、墓壇と埋葬施設の断面模式

図である。石室の天井石の上面は厚さ 20cm あまりの粘土層に覆われており、抵抗率の低い粘土層が主たる電流経路となり、見掛け比抵抗値を低くする結果となったと思われる。抵抗率分布への逆解析過程では、縦・横・深さ、各 50cm の立方体要素の抵抗率を求めたため、厚さ 20cm の粘土層は分離することはできなかった。

3. むすび

本稿で示した2つの古墳は、築造時期も大きさもほぼ同じであるのに、全く異なる形態の埋葬主体を持っていた。事前情報はあまり当てにはならず、それぞれの現場で得られた探査結果について、あらゆる可能性を想定して解釈を進めていかねばならない。その困難さゆえに、推理ゲームのような面白さがある。考古学と物理探査の両方に精通した人間など皆無に近いので、この推理ゲームを一人で進めるのは困難であり、考古学者と物理探査技術者の共同作業が重要となる。昼飯大塚古墳は、考古担当者が探査についての理解もあり、これがうまく進められた現場である。

秋常山1号墳は、探査は今回の一度のみで、埋葬主体の発掘調査はされていない。昼飯大塚古墳では、数年にわたる探査が実施でき、副葬品の発見にまでいたることができたが、埋葬主体の発掘も確認調査までで主体本体の発掘調査は許可されていない。石室内部を確認できたのは、盗掘抗があった偶然による。粘土槨も表面の検出のみで終わっている。両古墳とも、墳丘整備が完了しているので、今後埋葬主体の発掘調査が実施される可能性は低い。大きな古墳の埋葬主体の発掘調査はほとんどの場合許可されないの、探査結果が埋葬主体についての唯一の情報となる。発掘調査は、破壊行為であって、繰り返すことはできないが、探査は何度でも繰り返すことができる。また、過去に実施した探査データを処理し直したり解釈し直すことも可能である。その意味で、遺跡探査は考古学にとって非常に重要な技術で、過去の探査データも発掘された遺物と同様、全て保存しておく必要がある。しかしながら、遺跡探査データの保存については全く考慮されていないのが現状である。遺跡探査の重要性について、考古学者の認識を高めさせるためにも、探査技術者も考古学の知識を深め、探査結果の解釈の精度を上げていく必要がある。

参考文献

- 1) 石川県能美市教育委員会編(2011): 史跡秋常山古墳群-史跡秋常山古墳群保存整備事業報告書-『調査編』, pp.143-151
- 2) 石川県能美市教育委員会編(2011): 史跡秋常山古墳群-史跡秋常山古墳群保存整備事業報告書-『整備編』,

巻頭図版 3

- 3) 石川県寺井町・寺井町教育委員会編 (1997): 加賀能美古墳群, pp.213-214
- 4) 亀井宏行, 河原健一郎, 本田誠彦 (2008): 遺跡探査と電気探査—表面電位法の開発—, 最新の物理探査事例集, 物理探査学会編, pp.347-354
- 5) 大垣市教育委員会編(2003): 史跡昼飯大塚古墳『本文編』, pp.165-176
- 6) H. Kamei *et al.* (1996): A 100-500MHz Band FM-CW Ground Penetrating Radar for Archaeological Prospecting, The 30th International Symposium on Archaeometry, Urbana, Illinois, USA
- 7) 大垣市教育委員会(2000): 昼飯大塚古墳 VI-第7次調査-

打音検査装置の開発

川越 健¹⁾

1) (公財) 鉄道総合技術研究所 防災技術研究部地質

1. はじめに

検査対象物をハンマーなどで打撃し、その時の音、ハンマーの跳ね返り具合や手に伝わる振動などによって、その内部の状態を判定する調査として打音調査がある。打音調査は構造物や機械の点検に用いられるほか、青果物などの品質検査、岩盤の強度や安定性の調査など幅広い分野で利用されている。コンクリート構造物を例にすると、密実で十分な厚さのコンクリートを打撃すると、高い澄んだ音を発するのに対して、内部に空洞やクラックがある場合は低く鈍い音を発する。このようなことから、定性的かつ経験的に検査対象物内部の情報を判定できる。打音調査は対象物を破壊すること無く調査することができ、その適用範囲が広い調査方法である。また、ハンマーのみで行えることから簡便、迅速に実施できる。一方、判定結果は定性的で、調査者の感覚、経験によるところが大きい。また、主として人が行うため、広範囲を実施するには労力を必要とする。打音検査は鉄道においても構造物、車両の点検などに利用されている。また、鉄道沿線に多く存在する岩盤斜面において、岩塊の安定性の判定を調査する際にも同様の手法の調査が行われる。鉄道総合技術研究所（以下、「鉄道総研」と呼ぶ。）ではトンネル覆工の健全度調査および岩盤斜面中の岩塊の安定性評価を定量的に行うことを目的に、打音検査結果の定量化について研究開発を進めてきている。本論ではそれらの概要と今後の展望について述べる。

2. 打撃音の定量化に関する既往研究の概説

ここで、打音調査で発する打撃音を用いた構造物の健全度判定について概説する。ハンマーで対象物を打撃した際に発せられる打撃音は音圧として計測され、音圧は空気の振動速度と比例する（飯田他(2000)）。対象物表面の空気の振動速度は対象物の表面の振動速度とほぼ等しい。また、表面の振動はその対象物内部の情報を含んでいる。これらのことから、対象物に強制的に外力、（ここではハンマー打撃）、を加えた時に対象物表面で計測される音圧によって内部情報が得られると考えられ

る。例えば、伊藤・魚本(1995)は、打撃による共振周波数が対象物の縦波共振を反映していることを示している。

3. 鉄道総研における開発の背景

日本は国土の約7割が山地であることから、全国を網羅する鉄道などの交通網にはトンネルや斜面が多く存在する。このような施設を維持管理していくことは利用者の利便性、安全性を確保するために非常に重要なことである。以下で、鉄道総研におけるトンネルならびに岩盤斜面を対象とした打音検査装置の研究開発についてその背景を示す。

3.1 トンネル覆工の健全度

国土交通省(2014)の統計によれば鉄道トンネルは全国で4,900本弱（延長400万km弱）ある。これらのトンネルを維持していくためには、適切な維持管理が必要不可欠である。トンネルの維持管理は、「鉄道構造物等維持管理標準・同解説（構造物編、トンネル）」に則って行われる。その中で中心となるのは「目視」および「打音調査」を基本とし、2年ごとに行われる全般検査（通常全般検査）である。トンネルにおける打音調査では、剥落や覆工内部の欠陥（空洞、亀裂）の有無、巻き厚の不足や背面空洞の有無などを確認するとともに、浮きなどがある場合は検査と同時に叩き落としを行う。検査に関しては、1999年に相次いで発生したトンネル覆工の剥落を契機に、その重要性が改めて認識され、「トンネル保守マニュアル（案）」（(財)鉄道総合技術研究所(2000)）などが作成された。また、この事象を契機として従来、打音調査の課題としてあげられていた、覆工内部の状態の把握、検査結果の定量化や保存などの問題解決を目指した研究開発が鉄道総研でも行われた（榎本他(2001)、鈴木他(2001)、榎本他(2005)など）。既往の研究事例から、榎本(2007)は、①検査の目的は覆工の巻厚と空洞・剥離等の欠陥の有無、その危険性の程度の評価を行う、②打撃方法は、打撃装置からのノイズを抑え、一定のエネルギーで簡易に打撃可能なものを用いる、③打撃音の収録方法は、フード付きマイクロホンを壁面に押し当てて、打撃によって発生した壁面振動を

音として収録する、④打撃音の分析方法は、衝撃的に変化する波形の分析に適したウェーブレット変換を基本とする、こととして打音調査に用いる装置（以下、「総研式打音検査装置」と呼ぶ。）の開発を行っている。これらの詳細は次章以降に譲るが、榎本他(2001)、鈴木他(2001)、榎本他(2005)、榎本(2007)による総研式打音検査装置の概要を写真3-1に示す。総研式打音検査装置は対象物に対して一定の打撃力を加えられる「打撃装置」と、打撃した際の対象物から発せられる音圧を収録する「集音マイク」、そして得られた打音の音圧波形を保存し、解析するノートパソコンから構成される。



写真3-1 総研式打音検査装置（全体）



写真3-2 総研式打音検査装置（打撃装置）

3.2 岩盤斜面中の岩塊の安定性

落石には地形、地質、気象条件などの多くの要因が複雑に関係することから、落石による災害はその発生箇所や発生時期を予測することが難しい災害の一つである。落石の形態は、岩盤斜面から岩塊が剥離する剥落型落石と斜面中にある岩塊の周囲の土砂が浸食されて落下する転落型落石に大きく分けられる（図3-1）。落石による災害を防止するために、現状では定期的に行われる検査で不安定な岩塊の有無や不安定さの程度を調べ、その結果に応じた対策が実施される。この時の検査項

目は定性的なものが主であるため、検査者の経験や専門性に依存しない簡便で定量的な検査の方法が求められている。現在の検査では不安定な岩塊の状態を把握するために、岩石ハンマーで対象とする岩塊を叩いたときの音や手に伝わる振動を重要な情報の一つとして用いている。対象とする岩塊の大きさにもよるが、例えば、安定した岩塊を叩くと澄んだ高い音を発し、不安定な岩塊を叩くと鈍い音を発するといった特徴があり、これは先に例としてあげたコンクリートの場合とおおむね同様といえる。周囲の節理などの割れ目の状態とあわせて、このような定性的な結果をもとに経験的に安定か不安定か、また不安定な場合はその不安定さを判断しているが、この時の音や振動を定量化できれば、通常の検査の時に専門的な知識がなくとも、岩塊の安定性を評価する一助となることが期待された。このようなことから、榎本他が開発した総研式打音検査装置で、剥落型落石を対象に岩盤斜面中の岩塊の安定性評価が可能と考え、研究開発に取り組んだ（川越他(2011)、石原他(2014)）。これまでに、岩盤斜面に存在する岩塊を模擬した供試体実験や現地測定結果、ならびに解析的な検討から音圧波形のフーリエ解析から求まる卓越周波数とその卓越周波数での音圧の最大値（以下、「最大振幅」と呼ぶ。）が岩塊の不安定さと関係していること（川越他(2011)）、また安定した基盤岩と対象とする岩塊の最大振幅を比較することで不安定な岩塊を見つけ出せることなどが明らかとなっている（川越他(2011)、石原他(2014)）。

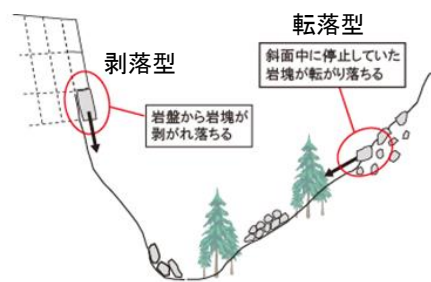


図3-1 落石の形態

4. 打音検査装置の概要

3.1 節で示した課題に対して行った研究開発の結果、作成した打音検査装置（榎本・横山(2006)、榎本(2007)）の概要を以下で示す。

4.1 打撃方法

ゴム方式の打撃装置を開発した（写真3-2参照）。この装置は、先端が球状になっている打撃部がゴムを介してフレームとつながっている。この打撃

部をフックに引っ掛け、これを後方に一定距離引いてフックを開放することで打撃部が放出されて壁面に衝突する仕組みとした。これによりほぼ一定の打撃力で打撃することができ、また作動する機械類がないため、測定に支障する打撃装置からの音を極力抑えることができる。

4.2 打撃音の収録方法

小型(1/4in)の計測用マイクを中に設置したコルク製の円筒を集音装置(写真3-1中の「打音収録用マイク」)として開発した。これをコンクリート面に密着させて打撃音を収録することで衝突によって発生する打撃装置の振動音やコンクリートとの衝突音などの測定対象外の音を低減させることを可能とした。また、収録した打撃音の周波数特性は対象物の厚さに対応して発生する卓越域を捉えることができる。

4.3 打撃音の分析方法

トンネル覆工を対象とした打撃音分析にはウェーブレット変換を採用した。このウェーブレット変換によって得られる時間-周波数領域での卓越状況から、コンクリートの厚さによって卓越周波数が異なる縦波共振現象を抽出し、厚さを判定するアルゴリズムを開発した。図4-1のコンター図は、打撃音の音圧波形をウェーブレット変換して得られる各時間、周波数ごとの信号の強さをもとに等値線表示したもので、スカログラムと呼ばれる。このスカログラムにより、各周波数成分の時間変化を容易にみることができる。本手法では、同図中の信号の最大値を最大強度と呼んでいる。

5. トンネル覆工の健全度の評価

ここでは、榎本・横山(2006)、榎本(2007)を基

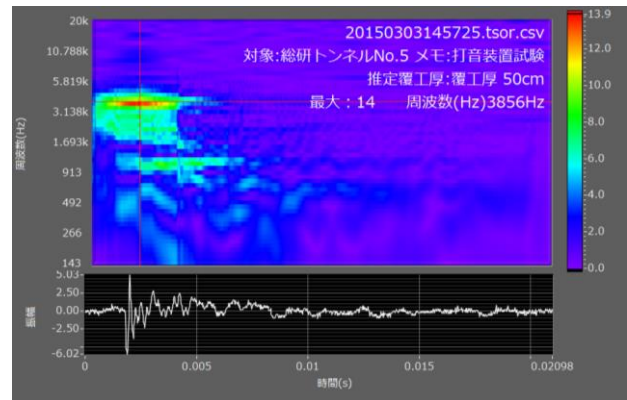


図4-1 スカログラムの例

に、コンクリートを対象としたトンネル覆工の健全度の評価について示す。

5.1 巻き厚の判定

図5-1に厚さ10～60cmのコンクリート板を打撃して得たスカログラムを示す。この図からは以下のことがわかる。

- ①厚さ10～30cmまでは0.63kHz付近の低周波成分に最大強度が存在する(図中、下側の大きな楕円部分)。また、この低周波成分の周波数は厚さ10～30cmまでは厚さが増すにつれて徐々に高くなる傾向が認められる。
- ②厚さ40～60cmでは、最大強度を示す周波数が高周波域にあり、厚さが増すにつれて周波数が低くなる傾向が認められる(図中、上の楕円部分)。
- ③厚さ20、30cmでは、高周波成分に卓越域が存在しており、厚さが増すにつれて周波数が低下する傾向が認められる(図中、上の楕円部分)。

図中の厚さの変化とともに低下する高周波の卓越域と厚さ30cm以下にみられる低周波の卓越域を組み合わせることで、10～60cmまでの

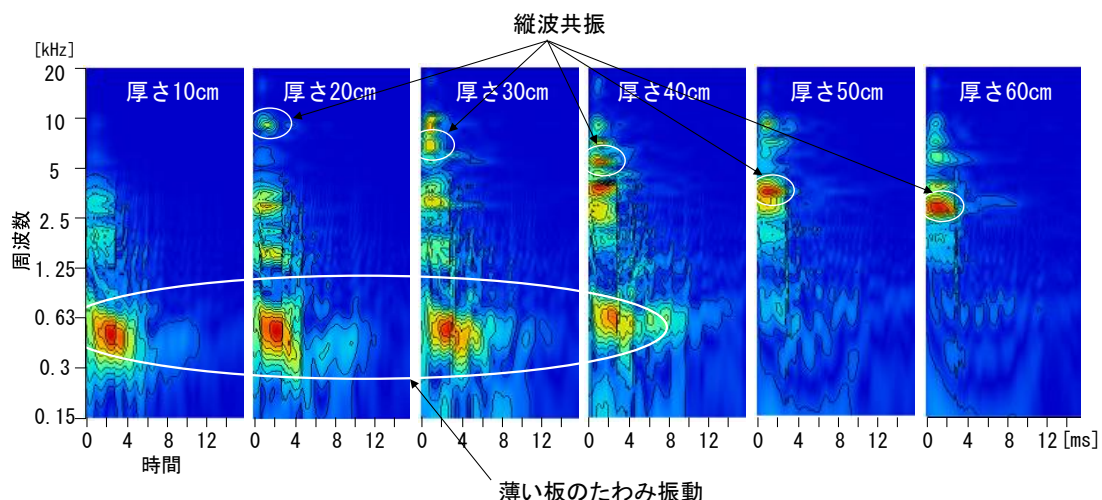


図5-1 巻厚判定の根拠とした厚さの異なるコンクリート板での打撃音のスカログラム

コンクリートの厚さの違いを評価できるものと考えられ、これらのことを判別するアルゴリズムをプログラム化した。

5.2 空洞・剥離に関する判定

空洞を模擬した供試体（図5-2）や、スリットによってひび割れを模擬した供試体を用いて打撃実験を行った。その結果、模擬空洞などの欠陥が表面に近いほど、またその規模が大きいほど最大強度が大きく、減衰時間が長くなるなど健全部とは異なる結果が得られた。

そこで、覆工模型に設定した欠陥の規模や状態などの危険性を経験的に判断し、それらのモデルで得られた最大強度と減衰時間に関してそれぞれ2つのしきい値を設定し、内部の欠陥に関するしきい値とあわせて健全度を3つのランク（健全、危険度1、危険度2）に分類する考え方を提案した（表5-1）。

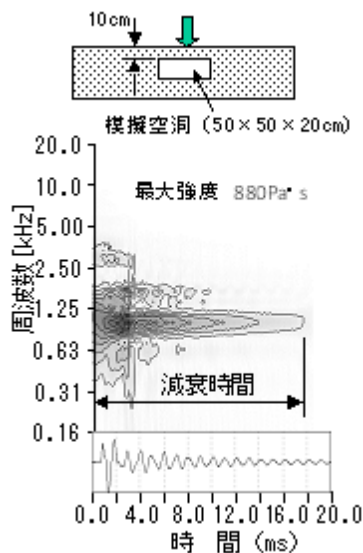


図5-2 模擬空洞上での打撃音のスカログラム

表5-1 空洞、剥離の判定区分としきい値の提案

		最大強度(Pa・s)		
		178以上	178未満 89以上	89未満
減衰時間	20ms以上	危険度2		
	20ms未満 10ms以上	危険度1		
	10ms未満	健全		

5.3 現地での測定事例

NATM工法で施工された二次覆工コンクリートで、設計巻厚(a)30cmと(b)45cmの箇所での打撃音の分析結果を図5-3に示す。

(a)では、0.4kHz付近に強い卓越域があり、これ

以外に6.0kHz付近にやや強い帯域がある。このパターンは図5-1の厚さ30cmと類似しており判定結果でも25～35cmと判定された。(b)では、0.4kHz付近が弱くなり、4.0kHz付近にピークが強く現れている。このパターンは図5-1の厚さ50cmと類似しており、45～55cmと判定された。

これらの例では削孔が困難なため、地下レーダーによる検証を行い、判定結果の妥当性を確認した。

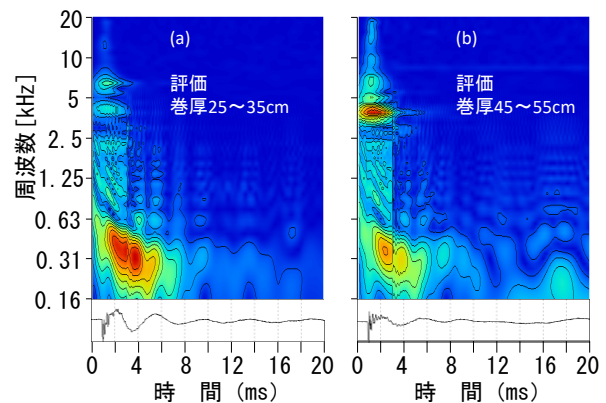


図5-3 二次覆工での打撃データ

6. 岩盤斜面中の岩塊の安定性の評価

6.1 岩塊への適応性の検討

ここでは、浮き石を模擬した供試体実験の結果から、供試体の振動の様子と打撃時の音との関係を解析により明らかにし、打音測定による岩塊の安定性評価法の妥当性について検証した結果を示す（川越他(2011), 蒲原他(2013), 川越他(2014), 蒲原他(2015)）。浮き石を模擬した供試体の概要を写真6-1, 図6-1, 表6-1, に示す。供試体は浮き石を模擬した上部ブロックと岩盤を模擬した下部ブロックからなり、それらが付着している部分（図中の付着部分）の面積を変えることにより、上部ブロックの不安定さを変化させた。



写真6-1 供試体の状況

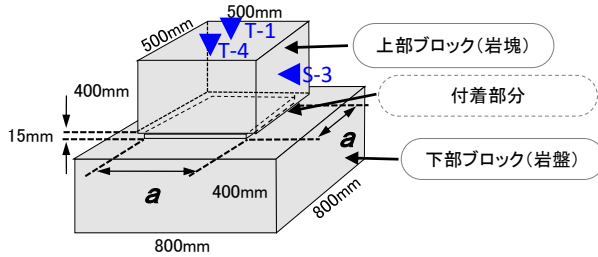


図6-1 供試体の概要

表6-1 供試体の付着部の概要

供試体No.	付着部分の幅 a (mm)	付着面積比率(%)	上部と下部ブロック の関係
1	500	100	完全に一体化
2	350	49	一部で接合
3	250	25	
4	170	11.6	
5	80	2.6	完全に分離
6	0	0	

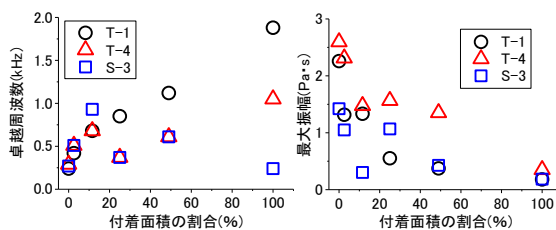


図6-2 供試体における打音測定結果

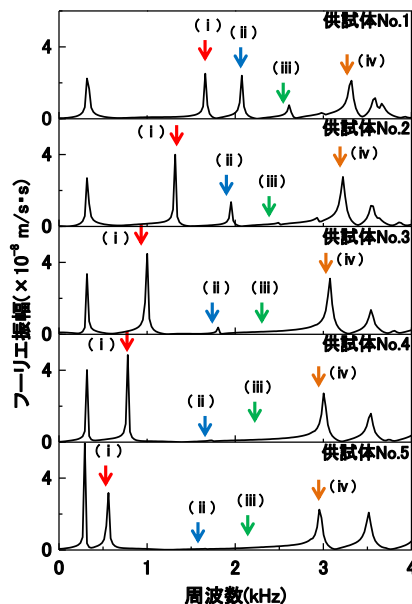


図6-3 速度スペクトル(解析値)

上部ブロックと下部ブロックの付着部分の面積が小さいほど上部ブロック、つまり浮き石は不安

定な状態にあるとした。なお、供試体はモルタル製で、上部ブロックと下部ブロックは付着部分を含めて一回の打設で製作している。供試体の様々な位置で総研式打音検査装置による打撃音を測定した。得られた卓越周波数および最大振幅と、上部ブロックと下部ブロックの付着部分の面積との関係を図6-2に示す。付着部分の面積が小さいほど卓越周波数が低くなり、また最大振幅が大きくなる傾向にある。この測定結果の傾向が供試体のどのような振動を反映しているのかを確認するために有限要素法によるモード解析で得られるモード形状により検証した。まず、解析モデルを作成し、過渡応答解析で得られた表面の振動速度スペクトルと供試体を打撃したときの同じ位置の音圧スペクトルを比較した。その結果、両者のスペクトルがおおむね同様であることから、解析モデルが妥当であると判断した。また、音圧スペクトルが振動速度スペクトルを反映することを確認した。次に、過渡応答解析により得られた速度スペクトルを図6-3に、モード解析により得られたモード形状を図6-4に示す。ここでは、上部ブロック上面の中央(図6-1中のT-1)を打撃したときを例として結果を示す。図6-3から、いずれの供試体でも0.3kHzに卓越するピークがあり、次に高いピークの周波数として図中のピーク(i)のように供試体No.1で1.6kHz、供試体No.2で1.4kHzといったものがあることがわかる。各供試体に共通する0.3kHz付近のピークは、打撃したときの衝撃により供試体全体が上下に振動するモードと考えられる。ピーク(i)は上部ブロックと下部ブロックの付着部分の面積が小さくなるとともに周波数が低くなり、フーリエ振幅は大きくなる傾向が認められる。この時のモード形状から、付着部分がばねのように動いて上部ブロックが上下に振動していることがわかる。また、この時のモード形状は付着部分の面積が小さいほど、付着部分のばねの固さが小さくなり、ピークが生じる周波数が低くなると考えられる。図6-3中のピーク(ii)や(iii)も付着部分の面積が小さくなるにしたがってフーリエ振幅が小さくなっている。モード形状をみると、これらは下部ブロックの曲げなどが主体の振動と考えられる。付着部分の面積が大きい供試体No.1とNo.2では、下部ブロックに変形が生じやすいのに対して、付着部分の面積が相対的に小さい供試体では下部ブロックの変形が小さいなど、付着部分の面積によって振動の性状が変わることが見て取れる。ピーク(iv)の矢印で示すピークに着目すると、付着

部分の面積の大きさによらずフーリエ振幅が一定となるモード形状があることがわかる。この時のモード形状は上部ブロックの曲げ振動と考えられる。これらの結果から、打音測定で得られたスペクトルには、対象とする岩塊の不安定さにかかわる情報が含まれており、それらの状態の変化によって音圧スペクトルが変化するため、打音測定によって岩盤斜面中で不安定な岩塊を見つけることを確認した。

6.2 現地での測定例

測定当時で約 10 年前に採掘を終了した採石場の新第三紀安山岩からなる斜面で実施した測定結果を例として示す。岩盤斜面での測定の状況の例を図6-5に示す。割れ目の分布状況から下方に自然落下することが想定される岩塊を対象とし、それらを目視観察や岩石ハンマーによる打音調査などから①不安定岩塊、②安定岩塊、および③割れ目がほとんど無く、風化もあり受けていない基盤岩の3種類に分類した。測定した不安定岩塊は26個、安定岩塊は8個、基盤岩は2カ所である。

岩塊ごとに数点～十数点の測点を設け、全ての測点の卓越周波数や卓越周波数のフーリエ振幅を平均化して比較した。平均化の目的は打撃箇所による結果の違いの影響を少なくするためであり、基盤岩を打撃した目的は基盤岩の結果で正規化することで岩種の違いの影響を除くためである。基盤岩の卓越周波数、振幅の平均値で各岩塊の測定値を正規化した結果を図6-6に示す。安定

岩塊の卓越周波数の振幅の大きさは基盤岩と同程度であり、卓越周波数は基盤岩の半分程度以下の値を示す。一方、不安定岩塊の卓越周波数の振幅の大きさは基盤岩や安定岩塊の振幅より大きく、卓越周波数は基盤岩の半分程度以下の値を示す。供試体実験や有限要素法による解析結果と同様に、不安定岩塊は安定岩塊よりも卓越周波数のフーリエ振幅が大きく、卓越周波数が小さいという結果である。すなわち、複数の付着面や付着面の偏りが想定される場合でも供試体実験等と同様な考え方で打音測定法による岩塊の安定性評価が可能であると言える。



図 6-5 岩盤斜面での測定状況

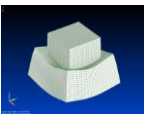
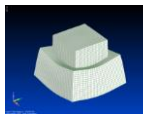
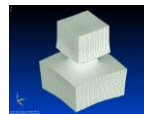
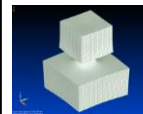
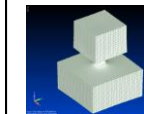
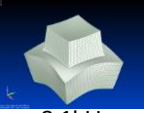
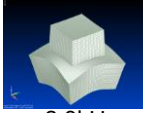
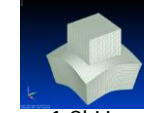
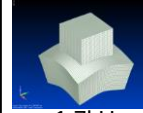
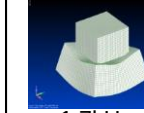
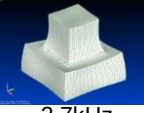
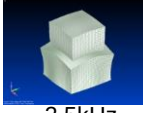
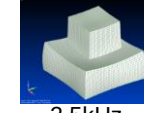
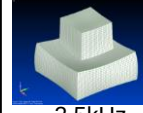
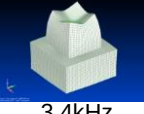
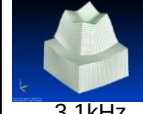
	供試体No.1	供試体No.2	供試体No.3	供試体No.4	供試体No.5
(i)の矢印で示した箇所	 1.6kHz	 1.3kHz	 1.0kHz	 0.8kHz	 0.6kHz
(ii)の矢印で示した箇所	 2.1kHz	 2.0kHz	 1.8kHz	 1.7kHz	 1.7kHz
(iii)の矢印で示した箇所	 2.7kHz	 2.5kHz	 2.5kHz	 2.5kHz	 2.5kHz
(iv)の矢印で示した箇所	 3.4kHz	 3.3kHz	 3.1kHz	 3.1kHz	 3.0kHz

図6-4 最大変位時の供試体の振動（モード形状）
変位を強調して示している。

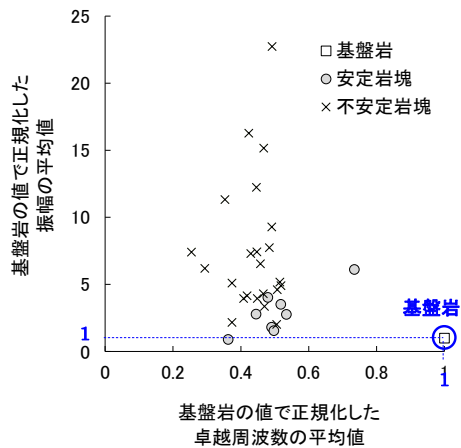


図6-6 岩盤斜面での打音の測定結果

7. 他の構造物での検討事例

堤防の張りブロック背面の欠陥は、目視点検のみでは変状が発生する前に発見することは困難である。また、構造物としての延長が長く、河川の水位によっては点検が困難な場合もあり、簡便な検査方法の開発が望まれている構造物の一つである。ブロックの浮きなどは、トンネル覆工と同様に打音検査で把握することがある程度可能であることから、ここでは西金他(2015)による、総研式打音検査装置を空洞、剥離等の欠陥を模擬した堤防の張りブロック（図7-1参照）に適用した結果を紹介する。



図7-1 欠陥を模擬した堤防の張りブロック

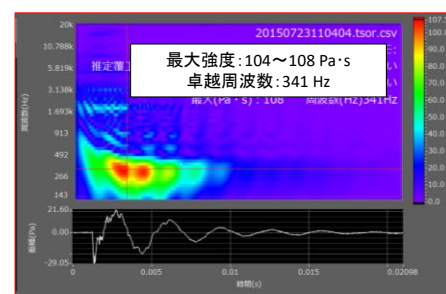
図7-2に目地開き+吸出し部の周辺で実施した測定結果を示す。目地開きに2辺で接するブロック11-3と12-3は、最大強度が104～117Pa・s、卓越周波数が341Hzを示し、目地開きに1辺で接するブロック11-2は最大強度が96～102Pa・s、卓越周波数が312～341Hzを示した。ブロックの角のみが目地開きに接するブロック12-2は最大強度が79～83Pa・s、卓越周波数が811～884Hz、健全部のブロック12-5は最大強度が78～93Pa・s、卓越周波数が682～743Hzを示した。この結果から、目地開き

に接する部分が多いと最大強度が大きく、卓越周波数が低い傾向にあると考えられる。次に、陥没+空洞部とその周辺の健全部で実施した測定結果を図7-3に示す。ここでは陥没+空洞部と健全部の卓越周波数が同様の値を示したので、最大強度の大きさを両者を比較する。榎本(2007)では、1kHz以下の卓越周波数は、コンクリートがたわみ振動を示しているものであることを示している。そこで、卓越周波数が1kHz以下を示した測定結果を対象に各ブロックで得られた最も大きい最大強度を抽出した結果を図7-4に示す。陥没+空洞部の最大強度の平均値は98.5 Pa・s、健全部の最大強度の平均値は90.0 Pa・sを示し、健全部に比べて陥没+空洞部の最大強度が大きい傾向にあることが示唆される結果を得た。健全部と欠陥部である程度の差が得られ、将来的な適応の可能性を得ることが出来たと考えられる。しかし、欠陥状況は様々

(a) 目地開き+吸出し部の状況



(b) 目地開き+吸出し部の測定結果



(c) 健全部の測定結果

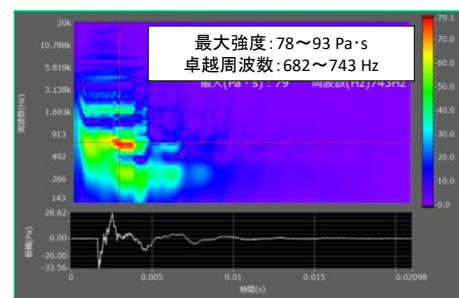


図7-2 目地開き+吸出し部の周辺で実施した測定結果

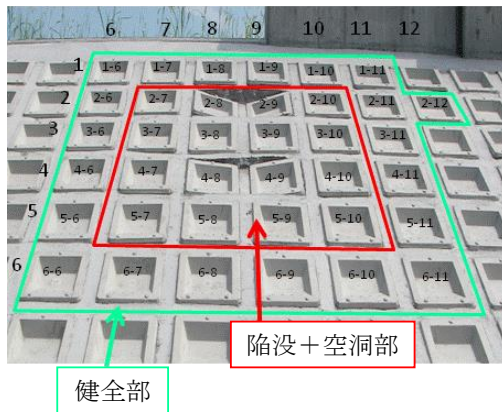


図7-3 陥没+空洞部とその周辺の健全部の状況

	6	7	8	9	10	11	12
1	113	98	80	130	127	86	
2	68	63	90	101	<100	70	64
3	83	69	67	109	102	88	
4	111	98	<91	182	108	74	
5	79	75	74	<138	142	92	
6	91	78	102	99	84	74	

赤: 最大強度が全体の平均値より大
 青: 最大強度が全体の平均値より小
 白: 卓越周波数が1kHzより大

図7-4 陥没+空洞部とその周辺の各ブロックで得られた最も大きい最大強度

であり、精度の良い結果を得るためには、より多角的な検討が必要である。

8. おわりに

目視による検査とハンマーなどでの打音検査は構造物の検査の多くの場面で利用される方法である。ここで紹介した方法は対象物を打撃した際の音を簡便に、かつ定量的に表現する手法である。そのため、トンネルの覆工と同様な検査を行う構造物、たとえば吹付け法面や河川堤防の張りブロックの健全性評価などへの適用事例も多く報告されている（例えば、土木学会(2017)）。構造物ごとに定量的な検査結果が蓄積されれば、AIの利用などでよりの確かな判定が可能となっていくことも考えられる。しかし、打音検査では目視による対象物の観察が必要不可欠である。簡易でかつ柔軟性のある検査である打音検査の利点を最大限に生かすには、点検者の技術的素養がまだまだ必要と考える。

参考文献

- 榎本秀明・稲川敏春(2001): トンネル覆工を対象とした打音検査手法の開発, 鉄道総研報告, Vol.15, No.12, pp.39-44.
- 榎本秀明・稲川敏春・横山秀史(2005): トンネル覆工コンクリートを対象とした打音検査装置の最適仕様の検討, 土木学会論文集, No.784, VI-66, pp.87-97.
- 榎本秀明(2007): 打撃応答分析に基づくトンネル覆工の健全度評価法に関する研究, 京都大学学位論文, 京都大学, 203p.
- 榎本秀明・横山秀史(2006): トンネル覆工打音検査装置の開発—打音検査の自動化・機械化—, 日本鉄道施設協会誌, Vol.4, No.5, pp.392-394
- 飯田一嘉・大橋心耳・岡田健・麦倉喬次編集(2000): 現場実務者と設計者のための実用騒音・振動制御ハンドブック, エス・テイ・エス, 963p.
- 石原朋和・太田岳洋・蒲原章裕・横山秀史・上半文昭・斎藤秀樹(2014): 打音測定による岩塊の定量的な安定性評価, 応用地質, Vol.55, No.1, pp.2-16.
- 伊藤良浩・魚本健一(1995): コンクリート打撃音の振幅の評価に関する一考察, 土木学会年次学術講演会講演概要集第 5 部, pp.416-417.
- 蒲原章裕・川越健・太田岳洋・石原朋和・浦越拓野・横山秀史(2013): 打音測定法の岩塊の安定性評価への適用性に関する検討, 総研報告, Vol.27, No.11, pp.47-52.
- 蒲原章裕・川越健・太田岳洋・横山秀史・石原朋和・浦越拓野(2015): 打音測定法による岩塊の安定性評価の検討, 土木学会論文集 C(地圏工学), Vol.71, No.2, pp.108-118.
- 川越健・横山秀史(2014): 音と振動を利用して不安定な岩を見つける, RRR, Vol.71, No.11, pp.23.
- 川越健・石原朋和・浦越拓野・太田岳洋(2011): 岩盤斜面における岩塊の安定性に関する評価法, 鉄道総研報告, Vol.25, No.7, pp.31-36.
- 国土交通省鉄道局(2014): 鉄道統計年報 [平成 26 年度], http://www.mlit.go.jp/tetudo/tetudo_tk2_000038.html (閲覧日: 2017 年 12 月 22 日).
- (一社)土木学会 建設技術研究委員会 建設技術体系化小委員会 コンクリートの非破壊検査のリニューアル WG(2017): 非破壊検査に関するアンケート調査報告, 土木学会, <http://committees.jsce.or.jp/sekou05/node/38>(閲覧日: 2017.12.25)
- 鈴木文大・榎本秀明・稲川敏春・松林弘智・千鳥雅由(2001): トンネル覆工コンクリートを対象とした打音評価手法, 物理探査, Vol.54, No.6, pp.374-387.
- 西金佑一郎・川越健・石原朋和・鈴木文大(2016): 総研式打音検査装置による堤防の張りブロックおよび函渠を対象とした打音測定, 平成 27 年度土木学会西部支部研究発表会講演論文集.

GNSS を用いた総合防災ブイの開発

加藤 照之¹⁾・寺田 幸博²⁾

1) 東京大学 地震研究所

2) 高知工業高等専門学校

1. はじめに

GNSS (Global Navigation Satellite System) とは GPS (Global Positioning System) をはじめとするいくつかの衛星測位システムの総称である。GNSS は米国が開発・運用しているものであるが、安全保障の観点からロシア、中国、EU など独自に開発・運用を行っている。日本も準天頂衛星「みちびき」を打ち上げ、GNSS を自前で保有して運用する国々の仲間入りをしている。

我々はこの GNSS 受信システムをブイに取り付けて津波を計測する GNSS 津波計（開発当初の呼称は GPS 津波計）を約 20 年にわたって開発してきた。最近の技術の進展に伴い、GNSS ブイは多様な応用に役立てられることがわかり、現在では GNSS ブイを海洋にアレイ展開して総合的な防災ブイとして活用できるようなシステムを開発中である。本稿では、我々の GNSS ブイの開発の歴史を振り返り、今後の見通しについて触れてみたい。

2. GNSS 津波計の概念

津波の被害は、襲来前に正確に計測し、その観測値に基づく沿岸への正確な到達時刻と津波高の予測、及び情報の適切な伝達によって少なくできる。このような視点の津波防災システムが構築でき、正確な観測値に基づく津波の監視・検知・伝達によって避難・誘導に活用できるようになれば、津波被災の可能性のある住民に計り知れない安心感を与え、地域の発展基盤としての貢献も期待できる。

そこで、従来の津波計測手法とは全く異なる GNSS を用いた海面変動計測装置の開発を行い、波浪から潮汐に至る広い周波数範囲の海面変位を数 cm の精度でドリフト無く計測でき、設置や維持管理が容易に実施できる津波観測システムの実現を目指した。システム構成の基本的概念を図 1 に示す。海上に浮かべたブイの最上部に GNSS アンテナを取り付け、ブイの動揺と共に変化するアンテナ位置の精密測位結果の鉛直方向時系列データから、海面高の変位を計測することができる。波浪、津波及び潮汐の計測には、数 cm の精度とリアルタイム性が必要であることから、当初は、RTK (Real Time Kinematic) 法を基本的な測位方式として採用した。この方法では、陸上に基地局を設けて同様の GNSS 観測をブイと同時に、基線解析によってブイの位置を陸上

基地に対する相対位置として推定する。ブイで取得された GNSS 衛星からの 1 秒ごとの位相データは無線によって基地局に伝送され、基地局に置かれた計算機により基線解析が行われる。この手法では電波の伝搬媒質の影響が観測点間距離とともに急速に大きくなることから、精度保持のためブイの基地局からの距離を 20 km 以内程度としなくてはならないという制限がある。最近の技術の進展により、現在では、基準点を設ける必要が無い精密単独測位法によっているため、沖合展開における限界の問題が払拭され、大洋上のどの位置にでも設置できるようになっている。

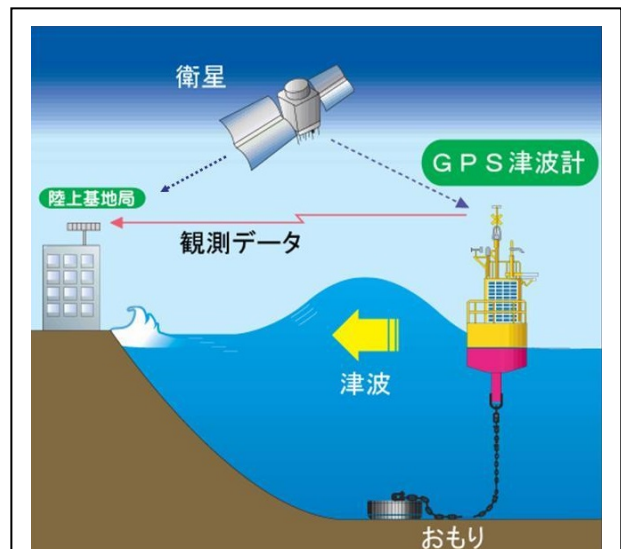


図 1 GNSS 津波計の概念。海面の動揺に追従するように設計施工したブイの上下動を GPS を用いて精密 (cm オーダー) 測位を行い、その鉛直方向位置の時系列表示を海面変動表記とする。

3. 開発の経緯とその意義

1997 年に神奈川県相模湾にて実施した基礎実験において GNSS 津波計が誕生した (加藤他, 1998)。この時の実験で、GNSS 受信器や記録装置を積み込んだブイを図 2 の左側に示す。続いて、1998 年に同地で基本機能実験を行い、波浪と潮汐を同時に cm オーダーで観測できることを示した。次に、実用化実験として 2001 年から岩手県大船渡市沖に GNSS 津波計を設置して 3 年間の連続計測を実施した。ここまでの成果は、寺田・加藤 (2003) に詳しく記している。

続いて、この技術の外洋対応の技術開発を進め、高知県室戸岬沖で実証実験を行ったときの海洋ブイを図2の右側に示す。計算結果はインターネットの



図2 GPS 津波計ブイ。(左) 白い缶体が1997年に試験的に製作したブイ。(右) 2013年に高知室戸岬沖に設置したブイ。

VPN接続でサーバー(室戸岬では高知高専)に送り、ホームページで図3に示す画像を表示してリアルタイムに市民へのデータ公開を行ってきた。通常の波浪は数秒から数十秒程度の周期であるのに対し、津波は数分以上の長い周期を持っているので、フィルタリング操作によって容易に識別が可能である。図3において、上段は周期の短い波浪を示しており、中段に示す津波データは、数分から数時間の周期で変化する成分を示すようにしている。室戸岬沖の実証実験では、図4に示すように波浪データの有義波高H1/3(波高の高い方から1/3の平均値)と周期T1/3(有義波高の計算対象とした波の周期の平均値)が、近隣の海底超音波式波浪計で得られるものと同様の傾向を示すことが確認できた。さらに、潮汐、高潮などの情報も測位データから得られるほか、多種のセンサーを搭載することにより水温、洋上風などの情報を発信でき、漁業活動や海運などの海に係わる地域の経済活動の支えとなる海洋観測ステーションとしての機能も備え得ることを示してきた。ここまでの実績によって、国土交通省港湾局がGNSS波浪計(正式名称はGPS波浪計)として全国展開することになり、防波堤や港湾施設の設計施工のために不可欠な波浪データの常時観測を行い、津波発生の非常時には気象庁によって図5に示すように津波予測に利用されている。

5章に述べるように、このシステムは2011年東北地方太平洋沖地震に伴う津波を観測し、気象庁の津波警報の更新に役立てられたものの、GNSS波浪計の設置場所が十分に沿岸から十分遠くに設置されていなかったことと、情報の伝達が十分でなかったことなどから、結果として大きな犠牲者を生むこととなった。こ

うした反省を踏まえ、システムを刷新してより効果的な津波・波浪計測システムを導入することとした。これについては6章に詳しく述べる。

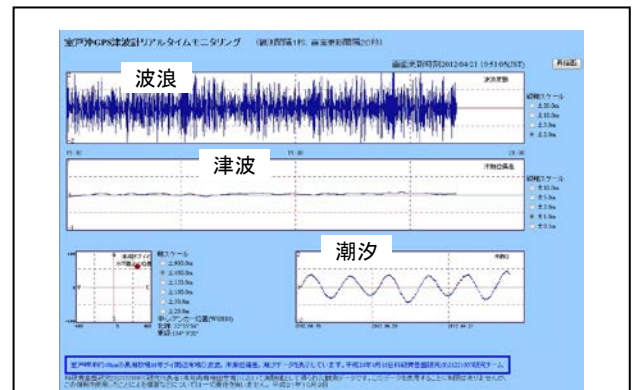


図3 リアルタイム公開中のデータ(室戸岬沖)。波浪、津波データの横軸はフルスケール1時間であり、潮汐の場合は3日である。縦軸は、いずれも海面高であり、それぞれのフルスケールは±2m, ±1m, ±2mである。

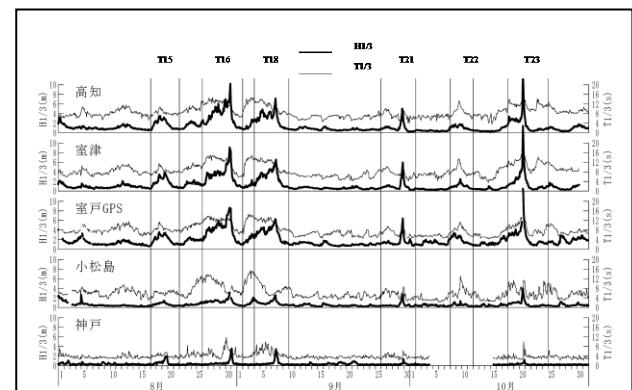


図4 2004年6月～10月に観測された有義波高。太線が有義波高を示し、細線が有義波周期を示している。横軸のフルスケールは3カ月であり、縦軸は、何れもフルスケール10mである。

- 沖合の観測データを監視し、沿岸の観測よりも早く、沖合における津波の観測値と沿岸での推定値を発表します。
- 予想よりも高い津波が推定されるときには、ただちに津波警報を更新します。

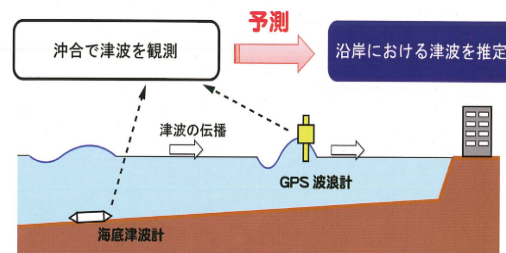


図5 新しい津波予測(気象庁パンフレットより:
<http://www.jma.go.jp/kishou/books/tsunamikeihou/>)

4. 沖合における津波観測

大船渡市沖に設置したGNSS津波計は、2001年6月25日に初めて津波を捉えた。その前日に南米のペルー沖で発生したMw7.9の地震による津波が約23時間後に大船渡市沖に到達した(寺田・加藤, 2003)。続いて、2003年9月26日の十勝沖地震津波を捉えた。これらは何れも波高10cm程度の津波であり、目標とした検出精度の確認が出来た。

2004年9月6日の紀伊半島沖地震津波では、室戸岬沖で図6に示す津波が観測できた。図中に青線で示すGNSS津波計の観測値は、波高・周期共に赤線で示すシミュレーション結果と良い一致を示している。このことは、沖合で津波を計測することによって、震源域直上での波源を推測できる可能性を示唆している。実際、津波観測直後に波源を逆計算し津波伝播シミュレーションの再計算を行うことによって、正確な津波高さや到達時間が得られるリアルタイム津波予測への道を切り開くことができた(Tatsumi and Tomita, 2010)。

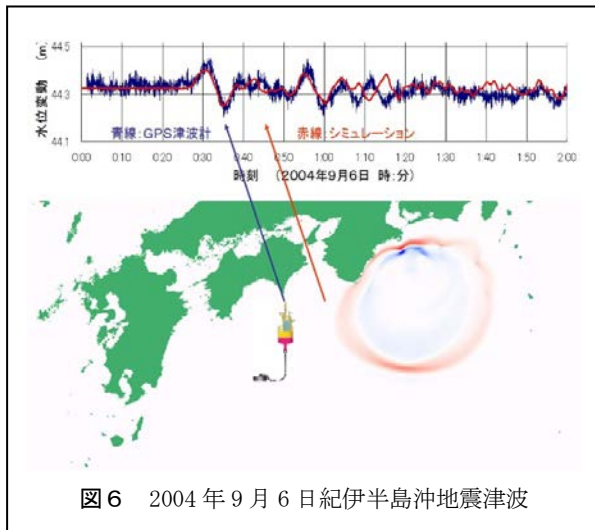


図6 2004年9月6日紀伊半島沖地震津波

沖合で津波を正確に計測できるようになれば、当然のことながら、津波をいち早く捉えて避難・誘導に活かすことができる。13km沖合に設置した室戸岬沖GNSS津波計で得られた図6の観測結果では、約8分のリードタイムが得られた。これらのことから、GNSS津波計の沖合展開への期待はさらに大きくなっていった。ただし、津波の伝播速度は、水深に重力加速度を乗じた値の平方根で与えられ、沖合への展開で水深が大きくなることによる伝播速度の増大で、リードタイムは単純な期待どおりに伸びないことに注意する必要がある。

5. 東北地方太平洋沖地震津波

2011年3月11日の東日本大震災発生時には、国土交通省港湾局によってGNSS波浪計として図7に示すように全国に15基が配備され、リアルタイムにデータが公開されていた。釜石沖に設置されていた

GNSS波浪計のリアルタイム観測値を図8に示す。

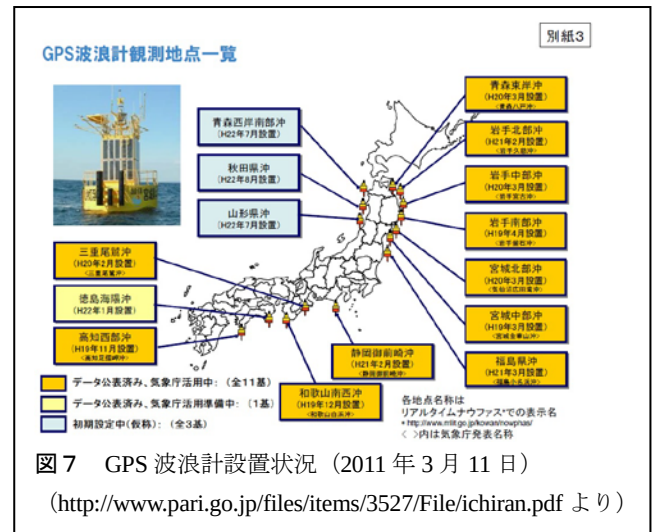


図7 GPS波浪計設置状況(2011年3月11日)

(<http://www.pari.go.jp/files/items/3527/File/ichiran.pdf> より)

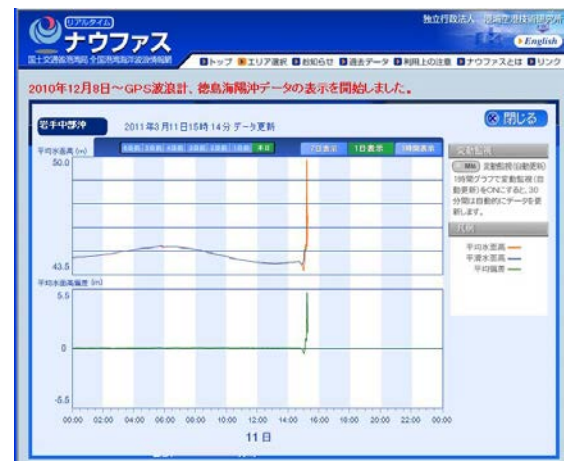
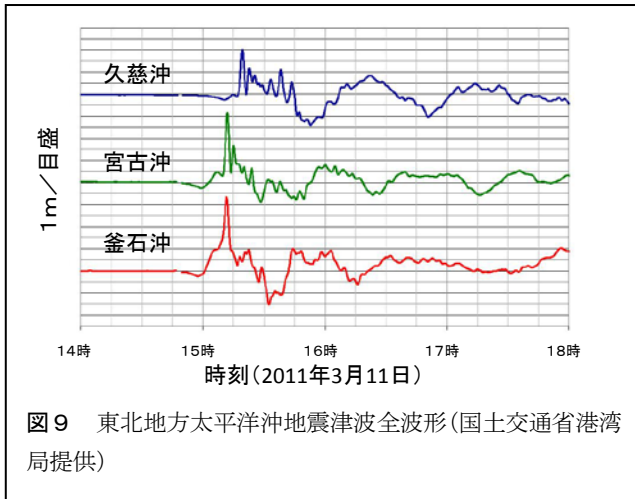


図8 2011年3月11日東北地方太平洋沖地震津波
(<http://nowphas.mlit.go.jp/index.html> より)

津波発生当日にインターネット上で公開されていたリアルタイム画像である。横軸は、上下図共フルスケール24時間を示している。上図の縦軸はフルスケール8mである。下図の縦軸は、±6.5mである。上図から潮汐成分をフィルタリングしたものが下図である。何れも、15:00過ぎから急激に立ち上がり、津波高6.7mを記録している

図中下部に平均水面高変位として表示されている津波高さは6.7mを示し、気象庁はこのデータを含む複数のデータを根拠に大津波警報を最大級に引き上げた(Ozaki, 2011)。第1波の観測データを発信した後、被災地域の停電によって通信網は寸断され、それ以降のリアルタイムデータが発信されなくなったが、観測データは高台に設置された基地局のバックアップ電源の下、図9に示す完全な津波波形が保存出来ていた(河合他, 2011)。

2013年3月に、気象庁は津波警報の発表方法を大幅に変更した。そのことを広報するリーフレットの中で、図5に示したように今後の津波予報に沖合の圧力式海底津波計とGNSS波浪計のデータを活用するとしている。

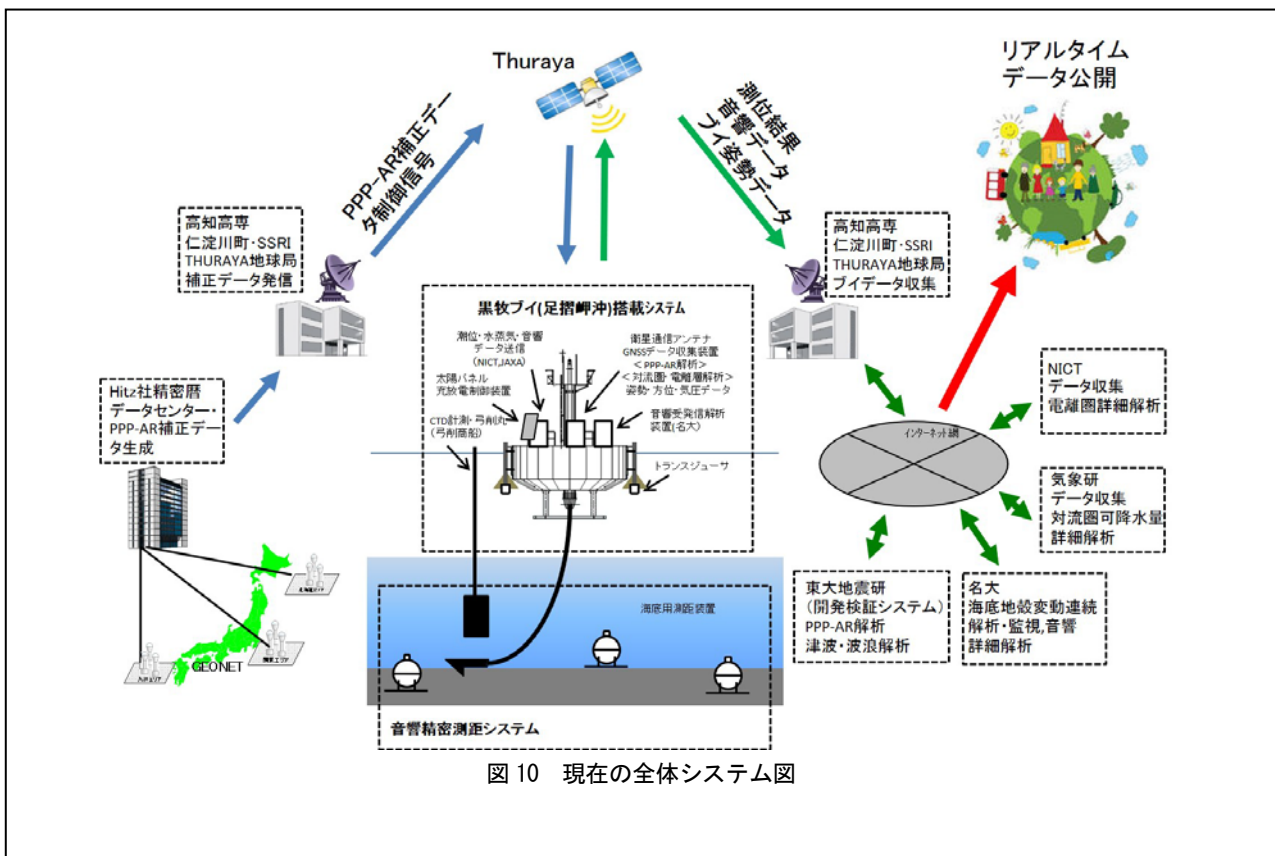


これらのことから、震源域を含む海域へのGNSS津波計の設置が強く望まれ(例えば、朝日新聞, 2011)、配置位置の離岸距離を伸ばすために、GNSS精密測位法のさらなる改良が喫緊の課題となった。この二つの課題を端的に表現すれば、「被災してもデータの続きを!」と「もっと沖合に!」となる。これらの克服には、洋上のブイからデータ伝送を行う方法とGNSS測位法の改善が必要であった。

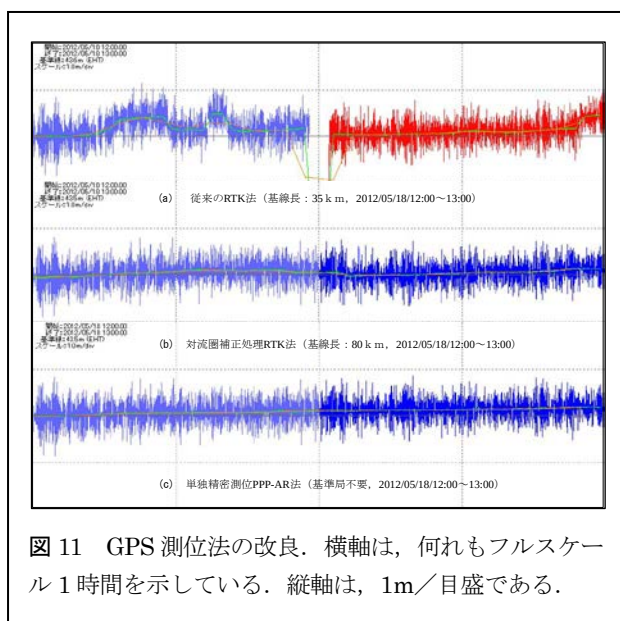
6. さらなる沖合展開に向けての開発

第1の技術課題である通信機能面の改善に取り組み、今後の早期津波警報システムを飛躍的に機能向上させる技術を確認した。被災地域の通信網の寸断への対策の基本は、観測された津波データを、全世界に向けてリアルタイムに発信することが可能な被災の無い地域に送ることである。これには、通信衛星の利用が最も有望である。しかし、揺れ動き回転するGNSS海洋ブイでは、太陽電池だけの自立的電力供給事情による省電力にも配慮する必要がある、無指向性のアンテナの使用を余儀なくされる。我々はまず2013年時点で利用可能であった通信衛星の技術試験衛星Ⅷ型「きく8号」を使い、室戸岬沖に設置したGNSS津波計実験機を用いて、衛星通信実験を行うこととした。ブイ上で精密単独測位計算を行うために必要なGNSS精密暦(正確な軌道と時計情報)を準天頂衛星初号機「みちびき」から送信し、測位計算結果を「きく8号」の通信システムを用いて地上に送り返す方式とした。波浪、津波、潮汐の変化をブイ上で計算し、得られた観測値を衛星通信で伝送して良好な結果が得られた。

その後2016年に「きく8号」は運用を停止することになったため、現在は商用衛星のスラヤを用いたソフトバンクの衛星携帯用通信装置を用いた実験に切り替えている。図10に現在使用しているシステムの全体図を示す。



第2の技術課題である GNSS 測位法については、RTK 法の改良に取り組んだ。図 11(a)は、改良前の RTK 測位結果の一例である。短い周期で上下に変化している状態が波浪による海面変位を示しているが、安定した測位ができていない。これに対して、搬送波位相計測値に対する対流圏遅延の補正を適切に行うことによって、図 11(b)に示すように基線長 80km でも安定的な測位が可能になった。また、洋上のブイの GNSS 観測データだけで測位する単独測位法の検討を進め、周期が秒単位の波浪については精密単独変位計測（PVD：Point precise Variance Detection）法（Isshiki et al., 2000）、周期の長い津波・潮汐の観測には精密単独測位（PPP-AR：Precise Point Positioning with Ambiguity Resolution）法（Mervert et al., 2008）が有効であった。図 11(c)は、PPP-AR を適用した結果である。これらの新しい測位法は、室戸岬沖 GNSS 津波計実験において、先に示したホームページでデータ公開を行った。このとき、図 3 に例示したような良好な



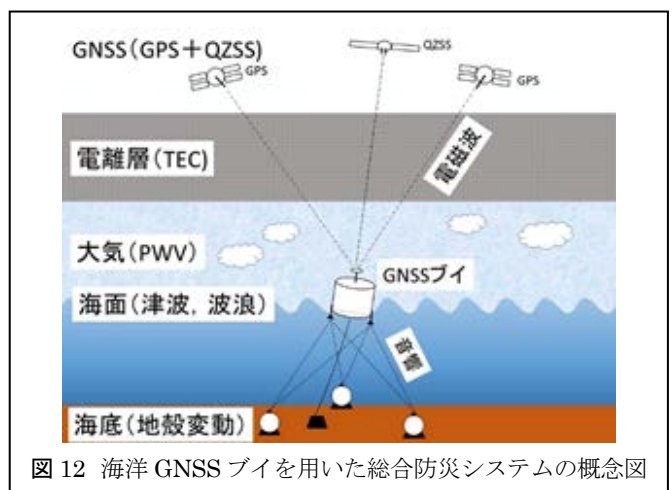
結果がリアルタイムで継続的に得られた。

以上のように技術的課題が克服できるとの見通しが得られたため、2016 年度からは新たな実験を開始した。この実験では高知県の海洋牧場ブイ No.18 を借用させてもらい、ここに GNSS 受信システム、衛星通信装置などを搭載している。これらに加え、GNSS-音響システムによる連続的な海底地殻変動計測を実現するために、ブイ直下に一辺が 1.7km の正三角形を構成するように音響トランスポンダーを投入した。なお、このブイ位置の水深はおよそ 800m 程度である。このトランスポンダーに対して音響を射出して反射波を受信するためのトランスデューサをブイの舷側に設置している。GNSS 測位はブイ上

に設置された計算機によって PVD 及び PPP-AR の出力を得るとともに、大気の大気遅延量や電離層の総電子数なども算出され、これらのデータはソフトバンク社製の衛星携帯テレメータ装置を介して地上局に送られる（図 10）。地上局は高知県仁淀川町に設置されており、ここで受信データを点検・格納するとともに、Web サーバを介して測位データをリアルタイムで公開するほか、海底地殻変動、気象や電離層の研究のために提供される。現在これらのシステムをくみ上げているところであり、近い将来誰でもこれらのデータが見られるようになることを目指している。

7. 今後の展開

本稿では、GNSS ブイによって津波や波浪などの海面高変化を計測する手法の開発について述べてきたが、この計測方式が海洋のどこでも可能となるとその応用分野は多岐にわたる。例えば、最近急速に注目が集められている分野に GNSS と音響を組み合わせ合わせた海底地殻変動の観測がある。その詳細は他書に譲るが（例えば、Spiess, 1985; Fujita et al., 2006）、現在は海上保安庁や大学グループが実施して重要な成果が得られている（例えば Yokota et al., 2016）。この計測には船舶が用いられているため常時行えるわけではなく、せいぜい年数回程度である。船舶をブイに置き換えることで計測はほぼ常時に行えることになり、海底地殻変動を連続的に監視することが可能となる。日本列島を襲う巨大地震の多くが海底下で発生し、それが津波を発生させることを考えるとこの応用分野は日本の地震・津波防災には極めて重要と考えられる。



また、GNSSを用いた精密測位では大気（水蒸気）や電離層の影響が誤差因となるが、一方ではこれらを補正するパラメータは気象学や電離層研究にとっては大変重要な物理量を提供することになる。例えば日本の西方海域に GNSS ブイを投入して、得られる水蒸気量を気象の数値予測解析に取り込んでいく

ことによって最近多くみられる集中豪雨の予測などに役立てることができると期待される。また、電離層の擾乱はいわゆる宇宙天気予報にとって重要な情報と考えられる。GNSS ブイは海底下の地殻変動から津波・波浪、海洋気象、電離層など地球の表層部で発生する多様な現象に関するデータを提供してくれる (図 12)。

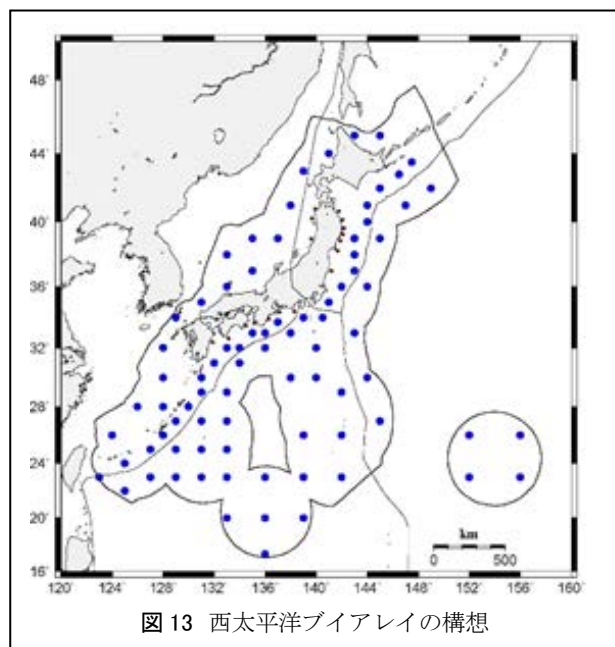


図 13 西太平洋ブイアレイの構想

もし、海洋に GNSS ブイが多数設置されれば地球表層で発生する災害要因となる地震、台風、電離層擾乱など多くの災害に関する新たなデータをこれまでになく精確かつ即時・連続的に取得することが可能となるだろう。現在、我々は GNSS ブイを図 13 に示したような北西太平洋地域に展開することを考えている。このようなアレイを様々な災害予測やその軽減に生かす総合防災ブイアレイとして構築したいと考えている。このようなアレイはまた、基礎的な地球科学の研究に新たなデータを提供し、それが我が国の地球科学の推進に役立てられることを期待している。

謝辞

本研究開発に参画した港湾空港技術研究所、宇宙航空研究開発機構、情報通信研究機構、気象研究所及び日立造船に所属する研究者の方々に感謝します。また、実験サイトを提供された国、自治体、ご協力いただいた多くの市民の皆様に謝意を表します。

本研究開発は、現在実施中の科研費(基盤研究(S): 課題番号 16H01310)のほか、科研費 4 件に加えて、文科省革新的技術開発補助金、文科省地球観測技術等調査研究委託費で推進しました。

参考文献

- 1) 朝日新聞, 2011年8月17日朝刊.
- 2) Fujita, M., T. Ishikawa, M. Mochizuki, M. Sato, S. Toyama, M. Katayama, K. Kawai, Y. Matsumoto, T. Yabuki, A. Asada, and O. L. Colombo (2006) GPS/Acoustic seafloor geodetic observation: method of data analysis and its application, *Earth Planets Space*, **58**, 265-276.
- 3) Isshiki, H., A. Tsuchiya, T. Kato, Y. Terada, H. Kakimoto, M. Kinoshita, M. Kanzaki and T. Tanno (2000) Precise Variance Detection by a Single GPS Receiver --- PVD (Point precise Variance Detection) Method ---, *J. Geod. Soc. Jap.*, **46** (4), 253-267.
- 4) 加藤照之・寺田幸博・木下正生・柿本英司・一色浩 (1998) GPS津波計の開発, *月刊海洋*, 号外**15**, 38-42
- 5) 河合弘泰・佐藤 真・川口浩二・関 克己 (2011) 平成23年(2011年)東北地方太平洋沖地震津波の特性, *港湾空港技術研究所報告*, **50**(4), 3-63.
- 6) Mervart, L., Z. Lukes, C. Rocken, T. Iwabuchi (2008) Precise Point Positioning with Ambiguity Resolution in Real-Time, *Proceedings of the 21st International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation (ION GNSS 2008)*, September, 397-405.
- 7) Ozaki, T. (2011) Outline of the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake (Mw9.0) - Tsunami warnings/advisories and observations -, *Earth Planets Space*, **63**, 827-830.
- 8) Tatsumi, D., T. Tomita (2010) Real-time Tsunami Inundation Prediction Using Offshore Tsunami Observation, *Proc. of 32nd International Conference on Coastal Engineering, currents.3*, 1-10.
- 9) Spiess, F. N. (1985) Suboceanic geodetic measurements, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, **GE-23**, 502-510.
- 10) 寺田幸博・加藤照之 (2003) GPS津波計, *非破壊検査*, **52**(7), 338-343.
- 11) Yokota, Y., T. Ishikawa, S. Watanabe, T. Tashiro, and A. Asada (2016) Seafloor geodetic constraints on interpolate coupling of the Nankai Trough megathrust zone, *Nature*, doi:10.1038/nature17632.

バイオオーグメンテーションによる油含有土壌の原位置浄化

伊藤 吉宏¹⁾

1) 日本物理探査株式会社 九州支店

1. はじめに

土壌あるいは地下水汚染の一例として油による汚染がある。

油は、現代の産業に欠かせないものであり、製品の原料として、機械を動かす燃料として、動力の潤滑油として様々な用途で使用されている。

しかしながら、油は比重が小さく、水面等に油膜を形成するとともに、油臭を発生させる。また、生態系等への環境負荷を増大させることで近年社会問題化している。

わが国では油汚染における考え方として「油汚染対策ガイドライン - 鉱油類を含む土壌に起因する油臭・油膜問題への土地所有者等による対応の考え方 - 」(以下、ガイドライン)が環境省より平成 18 年 3 月 8 日に公布された。

しかしながら、ガイドラインが対象としている油汚染はあくまで、鉱油類を含む土壌に起因して生じる油臭や油膜による生活環境保全上の支障に対しての措置のみである。

油汚染に関連する法に定められた項目は、平成 14 年 5 月に施行された「土壌汚染対策法」では、ベンゼン、鉛及びその化合物、この 2 項目に加えて昭和 46 年 6 月に施行された「水質汚濁防止法」の生活環境項目では、*n*-Hex 抽出物質、フェノール類の指定のみで留まる。そのため、特別な対象項目や規制値等は定められておらず、「油汚染土壌」という定義は存在しない。したがって、本稿では油を含む土壌を「油含有土壌」と表記することとする。

ガイドラインによる油含有土壌の対処としては、盛土や舗装により油臭・油膜を遮断する方法、遮水壁や地下水の揚水により地下水の油の拡散を防止する方法、土壌の掘削除去、土壌や地下水から油分を除去する方法等がある。

なかでも、土壌から油分を除去する方法として微生物分解を利用したバイオレメディエーションがある。バイオレメディエーションは、低コストで環境負荷の低い方法として近年広く普及してきており、特定有害物質の浄化にも用いられている。

国内では、土壌中に元々生息する微生物を活性化させ浄化するバイオスティミュレーションが一般的であるが、油分解菌は環境中に広く分布している一方で、その種類や能力は個々のサイトにより異なっている(高畑ほか, 2000)。

そのため、汚染物質に対応する微生物の有無、量、汚染現場での有効性、制御など、不確実な要素が多い。

そこで、本稿では、外部で培養した微生物を添加するバイオオーグメンテーションにより、油含有土壌を、原位置にて浄化することを目的とした事例について紹介する。

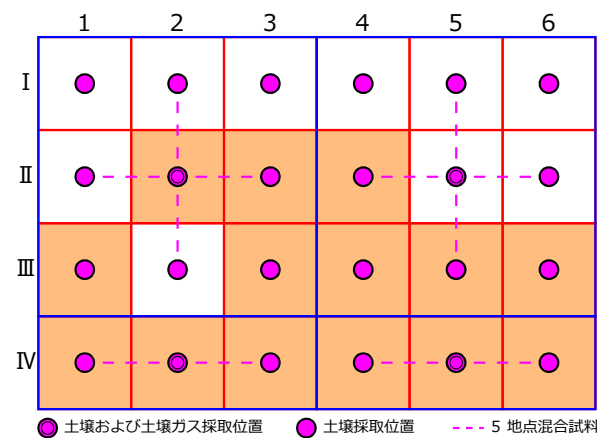
2. 経緯

当初、この土地は重金属による「汚染のおそれが比較的多い土地」で、かつ、油含有土壌が確認されていた。そこで、土壌汚染調査ならびに油分調査を実施することとした。

2.1. 土壌汚染調査

調査は、土壌汚染対策法に準拠して実施した。なお、当該地全域を、重金属は「汚染のおそれが比較的多い土地」、それ以外の項目を「汚染のおそれが少ない土地」とし、対象項目を設定した。

(1) 表層調査(図 1(a))



(a) 土壌汚染状況調査

凡 例

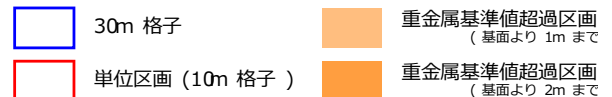


図 1(a) 調査地平面図

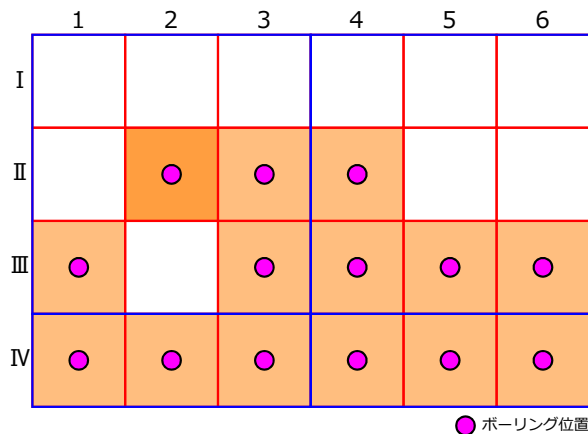
土壌ガスは、30m 格子の中心の 1 地点より採取し、第一種特定有害物質の分析を実施した。

土壌は、10m 格子(以下、単位区画)の中心の 1 地点より採取し、重金属については単位区画毎の試料で、それ以外の特定有害物質は、5 地点混合法による試料で分析を実施した。

調査の結果、重金属が土壌溶出量ならびに土壌含有量の基準値を超過した区画が多数確認された。

なお、土壤溶出量は第二溶出基準未満であった。

(2) 詳細調査(図 1(b))



(b) 土壤汚染詳細調査

凡 例



図 1(b) 調査地平面図

基準値を超過した単位区画において、深度方向への汚染の分布を把握するために、ボーリングを実施し、土壤試料を採取した。また、溶出量基準値超過した箇所においては地下水もあわせて採取した。

堀留深度は難透水層が分布する G.L.-5m 付近までとし、難透水層を 1m 確認した時点で終了とした。

分析する土壤試料は、基面より 1m 毎に採取し、難透水層境界の上部までとした。

分析の結果、「II-2」区画の 1m の土壤試料においてのみ基準値超過が確認された。

2.2. 油含有土壌の状況

油含有土壌の調査はガイドラインに基づき実施した。前述したようにこのガイドラインは「油臭」、「油膜」を除去することを目的としている。

「油臭」についての測定方法としては官能試験により臭気強度に応じた 6 段階の評価方法(表 1)、「油膜」については目視で油膜を判別する方法がある。

表 1 油臭の程度

段階	内 容
0	無 臭
1	やっと感知できるにおい (検知閾値濃度)
2	何のにおいであるかわかる弱いにおい (認知閾値濃度)
3	らくに感知できるにおい
4	強いにおい
5	強烈なにおい

(注) この表は、調査を行う作業者が調査レポートを取りまとめたりする際の作業場の目安であって、何らかの基準値や標準を示すものではない。油臭の感じ方は臭いに敏感にならざるを得ない土地の使い方がどうか、原因となっている鉱油類の種類や性状等によって様々であり、表 1 中のどの程度をもって油臭ありと判断するかはケースバイケースである。

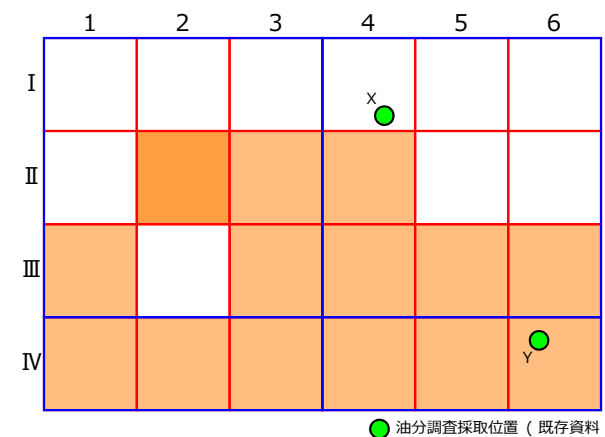
また、油種ならびに油分濃度を判別する手法として TPH 試験(Total Petroleum Hydrocarbons: 全石油系炭化水素)がある。これは、油臭や油膜などの人の感覚を補完する手段としても用いられる。

ただし、TPH 濃度と油臭、油膜との関係は油種や油含有土壌の状況によって異なるため関連付けることは難しい。

TPH 試験は、主に、簡易測定に適している赤外分光分析法(IR 法)、軽質油に感度が高く油種の判別に用いる水素炎イオン化検出器付きガスクロマトグラフ(GC-FID 法)、重質油の分析に向いている重量法(n-Hex 抽出法)がある。

一般的に GC-FID 法が TPH 試験と指すことが多く、本稿においても GC-FID 法を TPH 試験として記述することとする。

(1) 既存資料(図 1(c))



(c) 油分調査既存資料

凡 例



図 1(c) 調査地平面図

当該地では、油含有土壌が発見された際に、TPH 試験ならびに n-Hex 抽出法を実施した既存の報告書が存在する。

既存報告書によると TPH 試験値(表 2)は、C₁₂~C₂₈が最も高く、次いで C₂₈~C₄₄が高い値を示す。油分濃度(表 3)は、TPH 濃度より n-Hex 抽出物質値のほうが高い傾向がある。

表 2 既存資料による TPH 画分比率

試料名	深 度 (G.L.-m)	TPH 画分比率(%)		
		C ₆ ~C ₁₂	C ₁₂ ~C ₂₈	C ₂₈ ~C ₄₄
X	2.2	6.5	61.4	32.1
Y	2.2	10.8	75.4	13.8

表 3 既存資料による油分濃度

試料名	深 度 (G.L.-m)	TPH 濃度 (mg/kg)	n-Hex 抽出物質 (dry mg/kg)
X	2.2	2,000	4,900
Y	2.2	1,000	1,200

原子量が比較的大きな炭素化合物が検出されていることから、当該地に分布する油は潤滑油や残油に由来するものであると考えられる。

土壌試料の採取位置は、深度はほぼ同じであるが、20m 以上離れているため、油含有土壌は広範囲に分布していると想定される。

(2) 表層土壌

ガイドラインによると表層土壌試料を採取する深度は基面より 15cm および 50cm と記述されている。

本調査では、既存資料において比較的深部から油含有土壌が確認されているため、15cm の試料採取

は割愛し 50cm の試料のみを採取し、油臭・油膜試験を実施した。

試験の結果、4 箇所において油臭ならびに油膜が確認された(表 4)。浅い深度からも確認されたことから油含有土壌は広範囲に、表層から比較的深部まで分布する箇所が存在していると想定される。

(3) 深部土壌

ボーリング時に、「Ⅱ-2」、「Ⅱ-3」において地表から 2.5m 付近に黒色を呈する油を多く含有する層の存在が確認された。

試験試料は、土壌汚染詳細調査の際に採取した試料と同様のものとし、油臭・油膜試験を実施した。

また、試料採取の際に各箇所でも最も油臭が強く、油膜が顕著であると判断した試料において、n-Hex 抽出物法を実施した。ただし、「Ⅱ-3」区画の高濃度の油分を含む試料は後述するトリータビリティ試験試料として供したため、任意の箇所で実施した。

表 4 に各单位区画の油臭・油膜、n-Hex 抽出物質の試験結果を示す。

表 4 油分試験結果

区画番号	1				2				3				4				5				6			
	分析深度 (基面-m)	油 臭	油 膜	n-Hex 抽出物質	分析深度 (基面-m)	油 臭	油 膜	n-Hex 抽出物質	分析深度 (基面-m)	油 臭	油 膜	n-Hex 抽出物質	分析深度 (基面-m)	油 臭	油 膜	n-Hex 抽出物質	分析深度 (基面-m)	油 臭	油 膜	n-Hex 抽出物質	分析深度 (基面-m)	油 臭	油 膜	n-Hex 抽出物質
Ⅰ	0.5	1	あり	-	0.5	0	なし	-	0.5	0	なし	-	0.5	0	なし	-	0.5	0	なし	-	0.5	0	なし	-
	1.0	-	-	-	1.0	-	-	-	1.0	-	-	-	1.0	-	-	-	1.0	-	-	-	1.0	-	-	-
	2.0	-	-	-	2.0	-	-	-	2.0	-	-	-	2.0	-	-	-	2.0	-	-	-	2.0	-	-	-
	3.0	-	-	-	3.0	-	-	-	3.0	-	-	-	3.0	-	-	-	3.0	-	-	-	3.0	-	-	-
	4.0	-	-	-	4.0	-	-	-	4.0	-	-	-	4.0	-	-	-	4.0	-	-	-	4.0	-	-	-
	5.0	-	-	-	5.0	-	-	-	5.0	-	-	-	5.0	-	-	-	5.0	-	-	-	5.0	-	-	-
Ⅱ	0.5	0	なし	-	0.5	2	あり	-	0.5	0	なし	-	0.5	0	なし	-	0.5	0	なし	-	0.5	0	なし	-
	1.0	-	-	-	1.0	4	あり	-	1.0	0	なし	-	1.0	1	あり	-	1.0	-	-	-	1.0	-	-	-
	2.0	-	-	-	2.0	3	あり	7,700	2.0	2	あり	-	2.0	4	あり	2,700	2.0	-	-	-	2.0	-	-	-
	3.0	-	-	-	3.0	4	あり	-	3.0	3	あり	-	3.0	0	なし	-	3.0	-	-	-	3.0	-	-	-
	4.0	-	-	-	4.0	3	あり	-	4.0	3	あり	100	4.0	0	なし	-	4.0	-	-	-	4.0	-	-	-
	5.0	-	-	-	5.0	3	あり	-	5.0	0	なし	-	5.0	-	-	-	5.0	-	-	-	5.0	-	-	-
Ⅲ	0.5	2	あり	-	0.5	3	あり	-	0.5	0	なし	-	0.5	0	なし	-	0.5	0	なし	-	0.5	0	なし	-
	1.0	2	あり	100	1.0	-	-	-	1.0	2	あり	700	1.0	2	あり	-	1.0	3	あり	-	1.0	2	あり	-
	2.0	0	なし	-	2.0	-	-	-	2.0	1	あり	-	2.0	2	あり	600	2.0	3	あり	-	2.0	2	あり	800
	3.0	0	なし	-	3.0	-	-	-	3.0	1	あり	-	3.0	0	なし	-	3.0	3	あり	900	3.0	0	なし	-
	4.0	0	なし	-	4.0	-	-	-	4.0	0	なし	-	4.0	0	なし	-	4.0	2	あり	-	4.0	0	なし	-
	5.0	-	-	-	5.0	-	-	-	5.0	-	-	-	5.0	0	なし	-	5.0	-	-	-	5.0	0	なし	-
Ⅳ	0.5	0	なし	-	0.5	0	なし	-	0.5	0	なし	-	0.5	0	なし	-	0.5	0	なし	-	0.5	0	なし	-
	1.0	2	あり	-	1.0	3	あり	-	1.0	3	あり	-	1.0	3	あり	500	1.0	3	あり	400	1.0	3	あり	-
	2.0	3	あり	1,000	2.0	4	あり	1,000	2.0	4	あり	1,000	2.0	0	なし	-	2.0	2	あり	-	2.0	3	あり	-
	3.0	0	なし	-	3.0	3	あり	-	3.0	0	なし	-	3.0	0	なし	-	3.0	0	なし	-	3.0	3	あり	-
	4.0	0	なし	-	4.0	0	なし	-	4.0	0	なし	-	4.0	0	なし	-	4.0	0	なし	-	4.0	3	あり	-
	5.0	0	なし	-	5.0	0	なし	-	5.0	0	なし	-	5.0	0	なし	-	5.0	0	なし	-	5.0	3	あり	100

油含有土壌は、主に、層厚 3 m 程度の礫混じり砂質土から礫混じり粘性土からなる盛土層に分布しており、一部自然地盤まで達している。100 m²に 1 地点の情報ではあるものの、n-Hex 抽出物質は 100 ~ 7,700 mg/kg と油分濃度は一様ではなく、また、存在範囲にも規則性は認められない。

このことから、油汚染原因は複数あると考えられ、油含有土壌や残油自体を投棄したことによるものと推察される。

写真 1 には、調査により確認された油含有土壌および地下水の状況を示す。



(a) 採水器に付着する黒色の油



(b) 地下水に浮かぶ黒色を呈する油膜



(c) 土壌試料に浮く油膜

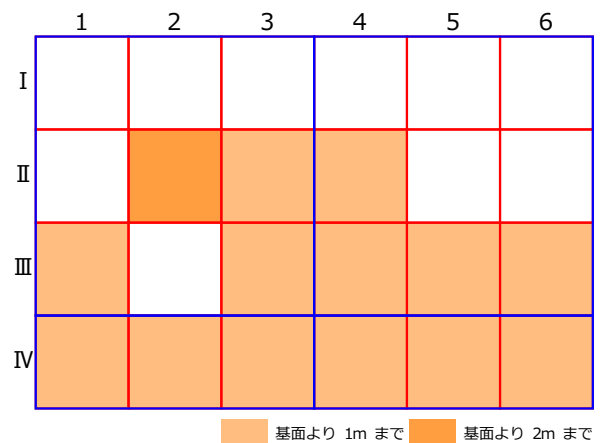
写真 1 調査時に確認された油分

2.3. 汚染土壌の処理

重金属による汚染土壌は浅部のみに確認されており、今後の土地開発や利用等から対策工事は掘削除去が適切であると判断した。

しかしながら、近隣の汚染土壌処分場において、重金属については受入れ基準を満たしたものの、さらに「油膜がない」ということが条件であった。

そこで、今後の土地開発工事における作業効率もあわせて検討した結果、重金属による汚染土壌において、バイオレメディエーションにより油膜を原位置で浄化することが適切であると考えた(図 1(d))。



(d)油含有土壌浄化範囲

凡 例



図 1(d) 調査地平面図

3. 油分浄化方法の検討

当該地に存在する土壌に含まれる油は高濃度であり、かつ、長期間にわたって存在していたと考えられる。また、油含有土壌の浄化期間は、土地開発工事の日程を考慮する必要があった。

そこで、バイオオーグメンテーションによる浄化が適切であると判断し、検討した。

ただし、当該地は重金属による土壌汚染が存在している土地であることから、施工方法は、汚染土壌の飛散を防止し、拡散を最小限に留める方法で実施することが求められる。

3.1. 当該地への適応性

(1) バイオ製剤の選定

使用するバイオ製剤はオープンハイマーバイオテクノロジー社(米国)のテラザイムを検討した。

テラザイムは、粘土鉱物であるモンモリロナイトを基材とし、10⁸~10⁹個/g の微生物数を有する自然環境から採取された複合型微生物群である。

親油性の好気性菌および嫌気性菌から成り、自然環境から採取されているため、遺伝子組み換え微生物は一切含まれない。

また、国内外の第三者機関によって数々の安全性試験が実施され、いずれの試験においても安全性が立証されている((株)BRI, 2012)。

以上より、当該地において使用しても生態系への影響はないと考えられる。

(2) トリータビリティ試験

使用するバイオ製剤の当該地における適応性を判断するため、トリータビリティ試験を実施した。

試験試料は、土壤汚染調査の際に採取した油含有土壌である。土壌 1.5 kg にテラザイム 30 g, 窒素およびリンが主成分の栄養剤 3g, 微生物の細胞を構成されるために必須とされるミネラル分(微量元素)を含む必須元素水溶液 750 μ L を添加し、よく攪拌した。なお、テラザイムは微生物増殖のタイムラグをなくするため通常の 10 倍量を添加した。

その後、7 日目、14 日目、21 日目、28 日目に各分析および測定を実施した。

油臭および油膜の推移を表 5 に示す。油臭は、試験前の初期値が「3」であったのに対し、14 日目には「0」を示した。初期の油膜は、シャーレ全体に広がる状態であったが、21 日目には消滅が確認された。

表 5 油臭・油膜の推移

試験日数	油 臭	油 膜
初期値	3	あり
7 日目	1	あり
14 日目	0	あり
21 日目	0	なし
28 日目	0	なし

TPH 濃度の推移を図 2 に示す。試験前の初期値は 15,000 mg/kg-dry, 7 日目には 12,000 mg/kg-dry にまで減少し、以降はほぼ横ばいであるものの、28 日目には 11,000 mg/kg-dry まで減少した。

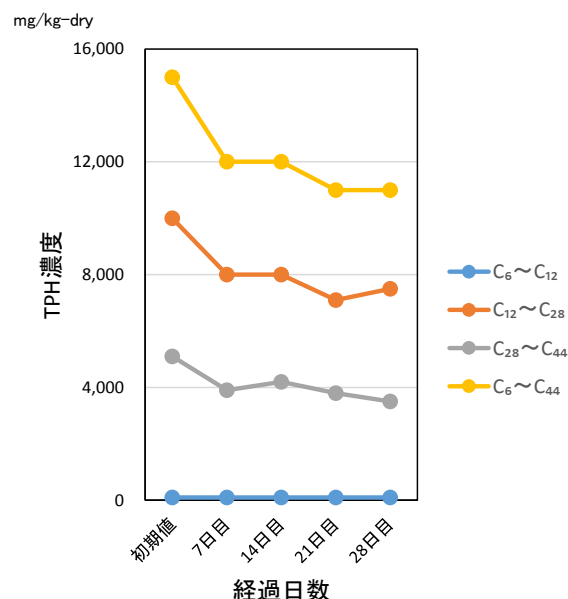


図 2 TPH 濃度の推移

全微生物数の推移を図 3 に示す。試験前初期値は $1.77\text{E}+08$ cells/g-wet, 7 日目には $7.58\text{E}+08$ cells/g-wet と約 6 倍増加し、21 日目にやや減少するものの十分な微生物数を維持している。

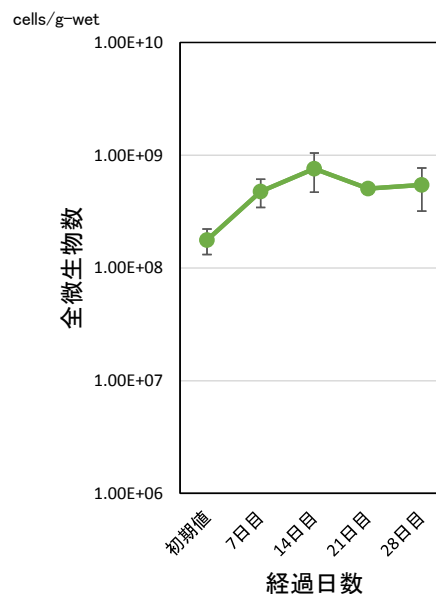


図 3 全微生物数の推移

TPH 濃度の大幅な減少はみられないものの、微生物の増殖の阻害性はなく、また、油膜は試験後 21 日目に消滅が確認された。以上のことから、当該地の土壌においてテラザイムによる油膜の除去は可能であると判断した。

4. バイオ製剤注入方法

バイオ製剤の注入は、地盤改良等でも使用されている高圧攪拌注入工法を採用した。

この工法は原位置において施工可能であり、表層は厚さ 5 cm のアスファルト、その下に 30 cm 程度の碎石層で覆われているため、現状のまま実施することで汚染土壌の飛散防止に努めることができる。

また、微生物混合溶液の注入圧力や深度および注入間隔を調整することで、汚染土壌の周囲への拡散を最小限に留めながら微生物溶液混合土壌コラムを作成することができる(図 4)。

注入する微生物混合溶液は対象土壌 1m³ に対し、水にテラザイム 2kg、栄養剤 1kg、必須元素水溶液 50mL を加え混合したものを、土壌中に微生物を添加した。

水は土壌中に存在する油をできる限り排泥とともに地表に排出するために多めに使用し、さらに、土粒子に付着した油を分離するために界面活性剤を加えた(写真 2)。なお、界面活性剤は微生物の繁殖を阻害しない濃度とし、土壌 1m³ あたり 300mL とした。

施工の際に、地表に流出する排泥は重金属による汚染土壌であるため、適宜回収し、濁水処理した後に、飛散防止のためフレコンバックに封入した。

また、濁水処理の際に発生した水には、微生物が多く含まれていることから、油水分離槽で油膜を回収した後、再利用した。

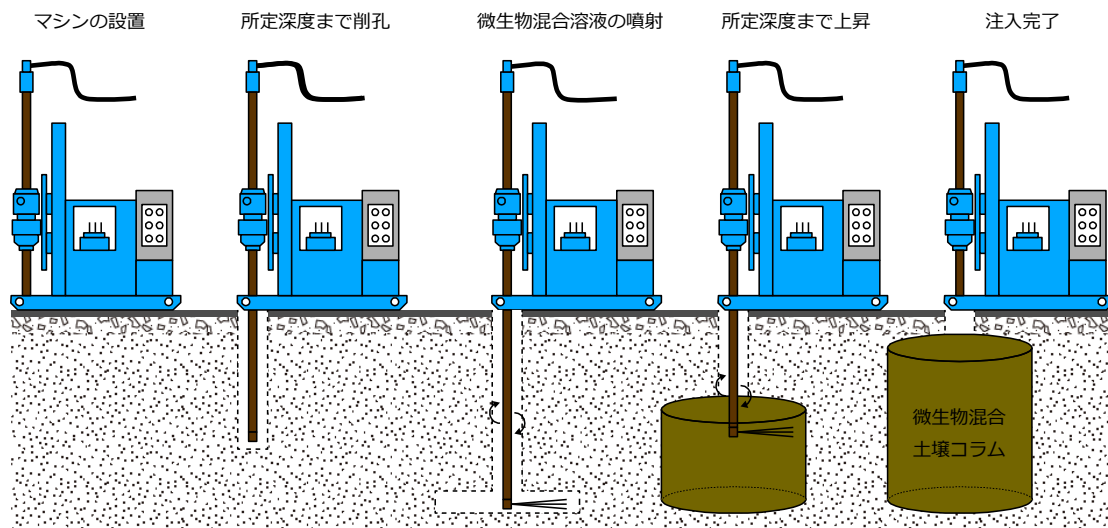
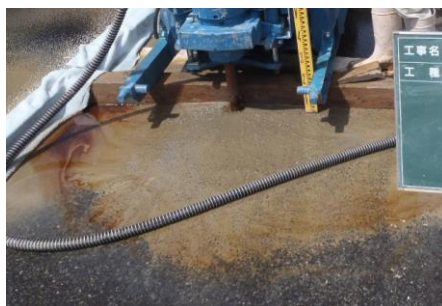


図 4 施工概念図



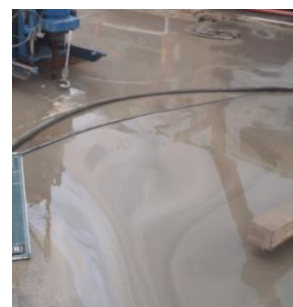
(a) 排泥縁に見られる黒色を呈する油



(b) 排泥に見られる黒色を呈する油膜



(c) 排泥に浮かぶ油膜



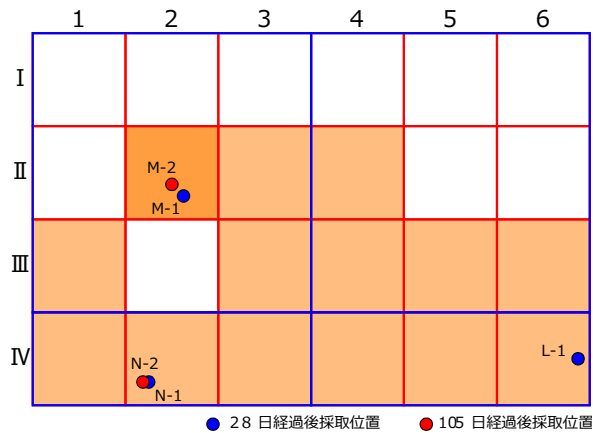
(d) 排泥とともに流れる油膜

写真 2 排泥とともに現れた油膜

5. 油分浄化経過状況

5.1. 油含有土壌の浄化状況

土壌の浄化状況を直接確認するために、施工完了の28日後および105日後に試料を採取(図5(a))し、各種試験を実施した。なお、L地点においては、28日後の試験結果において、油分が確認されなかったため、105日後の採取は割愛した。



(a) 油含有土壌浄化状況経過確認

凡 例



図5(a) 油分浄化経過観察

表7に各種試験結果を示す。経過時間が長いにもかかわらず、105日後の油分濃度は高い傾向を示している。105日後の採取試料を観察したところ、粘性土が多く、所々にごく小さな油塊が点在していた。

表6 105日後土壌油膜確認

単 位 区 画	浄化対象 下端深度 (G.L.-m)	油膜確認 上端深度 (G.L.-m)	未浄化層厚 (m)
II-2	2.00	0.50	1.50
II-3	1.00	0.70	0.30
II-4	1.00	-	0.00
III-1	1.00	-	0.00
III-3	1.00	0.65	0.35
III-4	1.00	-	0.00
III-5	1.00	0.75	0.25
III-6	1.00	-	0.00
IV-1	1.00	-	0.00
IV-2	1.00	0.50	0.50
IV-3	1.00	0.50	0.50
IV-4	1.00	0.80	0.20
IV-5	1.00	0.90	0.10
IV-6	1.00	-	0.00

さらに、40 mm 程度の黒色を呈するスラッジのようなものも確認された(写真3)。



写真3 M地点試料(105日後)

したがって、105日後の試験値の油分濃度上昇の原因は、盛土中の粘性土分に包有されるように存在している油塊であると考えられる。当該地の盛土は礫混じり粘性土および礫混じり砂質土から構成されており、全体的に不均一であることから、粘性土分が多く含まれる箇所においては周囲より油分濃度が高い状況であると推察される。

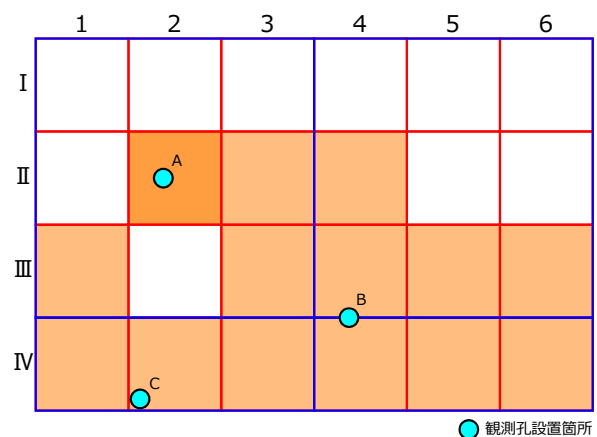
また、105日後に試験試料とは別途ボーリングを適宜実施し、現地で油膜の確認を実施した(表6)。

原位置においては105日経過してもなお、油臭・油膜が容易に確認できる箇所がある反面、油膜の消失を確認した箇所の存在も確認されている。

そのため、油分濃度の比較的小さい箇所では油分は浄化されつつあると推測される。

5.2. 地下水観察

油分の浄化状況を観察するのにあたって、簡便に採取できる地下水を定期的に採取した。当該地の任意の箇所に観測井戸を3箇所設け定期的に採水し、各種試験を実施した(図5(b))。



(b) 地下水観測孔設置箇所

凡 例



図5(b) 油分浄化経過観察

表 7 油分試験結果

採取位置	採取深度 経過日数	0.15m		0.50m		1.00m		2.00m	
		28 日後	105 日後	28 日後	105 日後	28 日後	105 日後	28 日後	105 日後
M	油 臭	2	0	1	3	2	3	3	3
	油 膜	なし	なし	あり	あり	あり	あり	あり	あり
	n-Hex 抽出物質	750	<100	410	24,000	3,200	16,000	17,000	10,000
	C ₆ -C ₄₄	<100	<100	1,100	21,000	1,600	25,000	6,300	11,000
	TPH	<100	<100	<100	<100	<100	120	<100	<100
	試験値 C ₁₂ -C ₂₈	<100	<100	580	14,000	1,100	17,000	4,200	7,000
	C ₂₈ -C ₄₄	<100	<100	570	6,800	600	7,300	2,100	3,100
L	油 臭	-	-	0	-	0	-	-	-
	油 膜	-	-	なし	-	なし	-	-	-
	n-Hex 抽出物質	-	-	<100	-	<100	-	-	-
	C ₆ -C ₄₄	-	-	<100	-	<100	-	-	-
	TPH	-	-	<100	-	<100	-	-	-
	試験値 C ₁₂ -C ₂₈	-	-	<100	-	<100	-	-	-
	C ₂₈ -C ₄₄	-	-	<100	-	<100	-	-	-
N	油 臭	-	-	2	3	3	3	-	-
	油 膜	-	-	あり	あり	あり	あり	-	-
	n-Hex 抽出物質	-	-	4,200	35,000	10,000	10,000	-	-
	C ₆ -C ₄₄	-	-	3,100	33,000	3,000	9,400	-	-
	TPH	-	-	<100	<100	<100	<100	-	-
	試験値 C ₁₂ -C ₂₈	-	-	1,800	23,000	1,700	6,400	-	-
	C ₂₈ -C ₄₄	-	-	1,300	10,000	1,200	3,100	-	-

表 8 地下水における油膜の推移

観測孔	初期値	15 日後	31 日後	46 日後	60 日後	66 日後	75 日後	88 日後	112 日後	125 日後
A	あり	あり	あり	あり	あり	あり	あり	あり	あり	あり
B	あり	あり	あり	あり	なし	あり	なし	あり	あり	あり
C	あり	なし	なし	あり	なし	なし	なし	なし	なし	なし
観測孔	139 日後	152 日後	166 日後	183 日後	194 日後	215 日後	252 日後	278 日後	338 日後	406 日後
A	あり	あり	あり	あり	あり	あり	あり	あり	あり	あり
B	あり	なし	なし	なし	なし	なし	なし	なし	なし	なし
C	なし	なし	なし	なし	なし	なし	なし	なし	なし	なし

地下水中の油膜の推移を表 8 に示す。観測孔 B においては 152 日後以降に、観測孔 C においては 60 日後以降に油膜の消失を確認した。

しかしながら、観測孔 A は油分を多く含む土壌が存在することもあり油膜の消失は認められない。

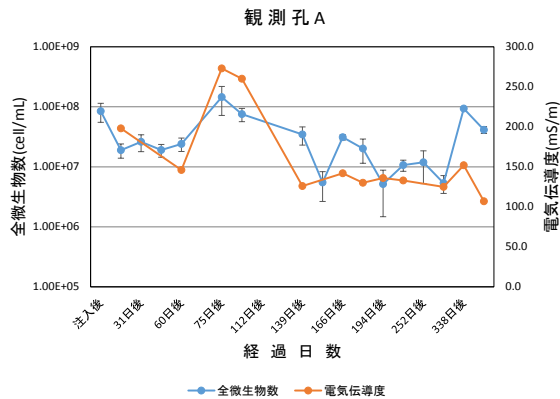
また、採取した地下水は簡易水質を測るとともに全微生物数を測定した。

簡易水質の測定項目は地下水位、水質計により水温、pH、電気伝導度、パックテストにより窒素ならびにリンの測定をした。

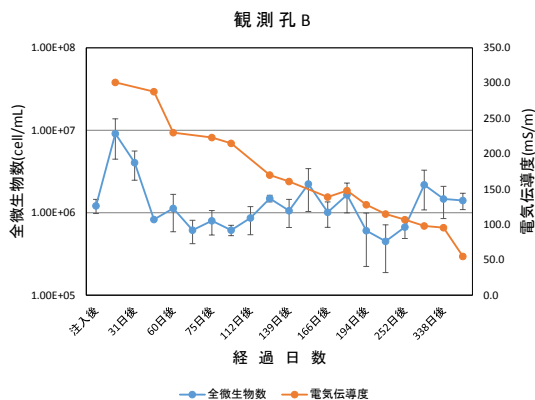
図 6 に全微生物数および水質の一部を示す。観測孔 A(図 6(a))および観測孔 B(図 6(b))の微生物数の推移は、電気伝導度と相関が見られる。

観測孔 C にみられる微生物数の推移は、電気伝導との相関がみられないが(図 6(c))、リン酸態リンの挙動と酷似した傾向が見られる(図 6(d))。

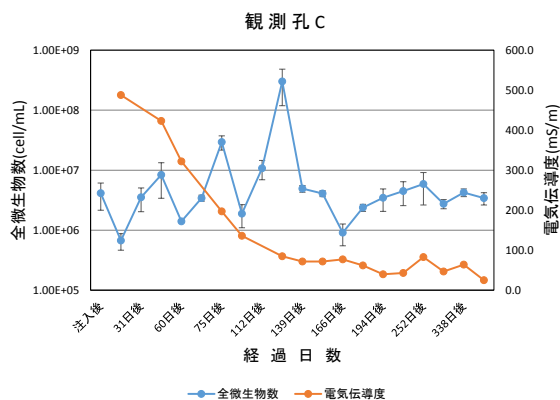
電気伝導度は、一般的な地下水より高い数値を示している。これは、地下水に含まれる栄養剤による影響であると考えられ、減少傾向にあることから微生物の活動により消費されていることが伺える。



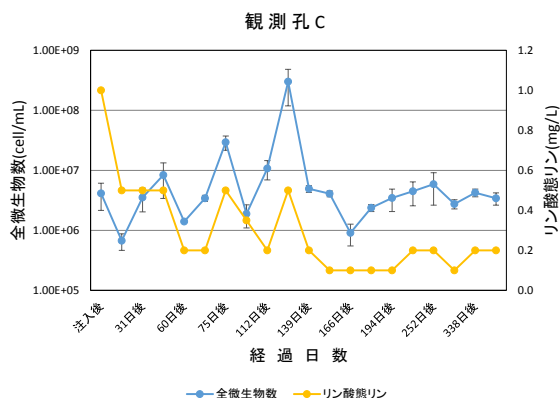
(a) 観測孔 A における微生物および電気伝導度の推移



(b) 観測孔 B における微生物および電気伝導度の推移



(c) 観測孔 C における微生物および電気伝導度の推移



(d) 観測孔 C における微生物およびリン酸態リンの推移

図 6 地下水における全微生物および水質の推移

6. 油分浄化促進の検討

原位置における油膜は以前残ったままである。当初計画では 90 日での浄化完了を目指していたが、予想以上の月日を費やしている。

ところが、経過確認時に採取した土壌試料は、数日放置することで油膜の減少、消滅を確認している。

また、現地にて保管している施工の際に発生した排泥にも油膜が認められたため、試料を約 200 g 採取し、自然風乾しながら、経過観察を実施したところ、7 日目には油臭・油膜ともに消滅を確認した(表 9)。

表 9 油臭・油膜の推移(105 日後の排泥)

経過日数	油 臭	油 膜
1 日目	4	あり
4 日目	2	あり
5 日目	2	あり
6 日目	1	なし
7 日目	0	なし
8 日目	0	なし
10 日目	0	なし

当該地の油含有土壌は大気中において、油分の分解が促進され油膜が消滅することが判明したことから、浄化停滞の要因は土壌中の酸素濃度が低く、微生物の活動が阻害されていることによるものと考えられる。

したがって、当該地の土壌において油膜の除去は可能であると判断できるものの、原位置での浄化は想定よりも長期間におよぶと推察される。

現状を踏まえた微生物の活動を促進する方法としては、原位置にて土壌中へ空気を送り込み土壌中の酸素濃度を上昇させる方法、あるいは、土壌を掘削し、攪拌するオンサイト型の浄化方法という 2 通りの手法が考えられる。

前者は原位置で実施できる一方、空気みちおよび水みちが形成されている場合は、粘性土分を多く含む土壌では通気性や透水性が低いため、空気が一様に置換されない可能性がある。

後者のオンサイト型による浄化は、浄化日数を短縮できることが期待されるものの、重金属による汚染土壌を取り扱うため、飛散防止および拡散防止に努める必要がある。そのため、作業が煩雑化し、費用が高くなることが懸念事項である。

そこで、費用が安価で簡便に実施することができする方法で土壌中の空気置換を施工 160 日後に実施することを試みた。

実施方法は、ブロワーポンプに接続したパイプを地中へ挿入し、土壌中の空気を吸引した(写真 4)。



写真 4 土壌内空気吸引状況

このとき、パイプの先端は地下水面より上までとした。土壌中の空気を吸引することで、地表の隙間より大気中の空気が土壌中に入り空気を置換するという手法である。吸引作業は場所を変えながら日中の 5 日間実施した。

また、施工 28 日後の土壌の経過観察の際に、油分が多く確認された箇所において、施行後 70 日後に追加でバイオ製剤を注入した。



写真 5 バイオ製剤追加注入

注入に用いたバイオ製剤はオープンハイマーバイオテクノロジー社(米国)製のオープンハイマー・フォーミュラ I (以下、フォーミュラ I)を使用した。

フォーミュラ I はテラザイムと含まれる微生物群は同様であるが、微生物数が多く ($10^{10} \sim 10^{11}$ 個/g)、粒子が細かいため土壌への浸透性が比較的よい。

テラザイムより高価であるものの簡易な施工方法で注入できるため施工費用を抑えることができる。

注入方法は、径 2cm 深度 1m までハンマードリルで削孔後、パイプを挿入し、グラウトポンプで微生物混合溶液を低圧注入した。

微生物混合溶液は、土壌 1m^3 に対しフォーミュラ I 0.2kg、栄養剤 1kg、界面活性剤 600mL とした

使用した界面活性剤は東京化成工業株式会社製の TWEEN80 である。微生物培養の培地に使用されるもので、微生物の増殖を促進されている。

また、株式会社バイオレンジャーズの実験によると油臭・油膜の低減に効果が期待できる。

なお、今回実施した油分浄化促進作業の検証は実施していない。

今後、油含有土壌の経過観察を行うとともに、原位置にて浄化を目指す場合は、コンプレッサーによるエアレーションなどを行い、当該地に適した油分の浄化促進作業を実施必要がある。

7. まとめ

重金属による土壌汚染が確認され油含有土壌が広範囲に存在する土地においてバイオオーグメンテーションによる油膜の除去を実施した。

トリータビリティ試験では、21 日目に油膜が消滅しているのに対し、原位置では 105 日経過してもなお土壌に油膜が容易に確認されが、空気に触れさせることで油分の浄化が促進され、油膜が消滅することが判明した。

今後、油含有土壌の経過観察をするとともに、当該地に適した微生物の増殖しやすい環境を整える方法を検討し、実施する必要がある。

なお、本稿は、現在進行中の油分浄化事例の一部をまとめたものである。

8. 謝辞

本稿の執筆にあたり、ご協力を頂きました施主様には心よりお礼申し上げます。株式会社バイオレンジャーズの皆様には様々な試験ならびに有益なご意見を頂きました。有限会社セレクトの皆様には施工ならびに有益なご意見を頂きました。

ここに、感謝の意を表します。

参考文献

- 株式会社バイオレンジャーズ環境コンサルティング部, 2012, バイオオーグメンテーションによる油汚染の浄化: 複合微生物製剤「オープンハイマー・フォーミュラ」の適応, 産業と環境, p61 ~ p64.
- 高畑陽・大場美穂・鈴木朝香・帆秋利洋, 2000, DGGE 法による石油汚染土壌中の菌相解析, 第 34 回水環境学会年会公園集, p412.

駿河湾における植物プランクトン群衆の一次生産

上原 武志¹⁾

1) 日本物理探査株式会社 関東支店

1. 緒言

駿河湾は海岸線からすぐに急傾斜で深海へ落ちる地形のため、陸のすぐ近くに深海生物から大型回遊魚まで多種多様な生物が生息している。その生態系を支えているのは、海域における重要な一次生産者である植物プランクトンであるため、植物プランクトンの現存量や季節変化を知ることは、駿河湾の生態系を知る上で非常に重要になる。

植物プランクトンの増減に影響を及ぼす主要因には、温度、光、栄養塩がある。駿河湾におけるこれら要因の特徴として、栄養塩の供給が河川など陸域からだけでなく、有光層下に存在する亜寒帯中層水や太平洋深層水と呼ばれる低水温で栄養塩の豊富な水塊からも行われていることが挙げられる。また、駿河湾は閉ざされていない湾であるとともに近くを黒潮が通っていることから、高水温で貧栄養の黒潮が流入していることも特徴である。則ち、駿河湾は低水温富栄養な水と高水温貧栄養な水が混在する特殊な環境であると言える。しかし、駿河湾の一次生産過程や季節変動を追った研究は少ない。そこで本研究では、植物プランクトンの光合成—光曲線パラメータ、光吸収係数、クロロフィル量、空中光量および海中光量から水柱一次生産量を算出し、駿河湾の一次生産の特徴を明らかにすることを目的とした。

2. 材料及び方法

2.1 観測及び採水

観測は2014年7月から12月までの毎月1回、駿河湾内に設けた湾奥 SR1(35° 03' 20" N, 138° 41' 00" E, 水深 1,000m)と湾央 SR3(34° 53' 00" N, 138° 38' 30" E, 水深 1,600m)において、東海大学調査船「北斗」に乗船して行った(図1)。

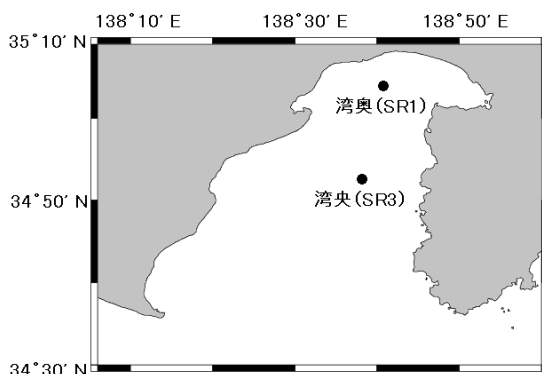


図1 調査地点

採水は、表面海水はバケツから、5m 以下はクリーン洗浄したニスキン採水器を SBE55 ECO 自動採水器(SEA-BIRD SCIENTIFIC 社製)に装着して行った。採水後の海水は、測定まで光や温度による影響を受けないよう、冷暗所にて保管した。

下向き光合成有効放射照度の鉛直分布は、PRR600 分光放射照度計(Biospherical Instruments 社製)を用いて測定を行った。

温度、塩分、クロロフィル量は採水した海水から測定した。採水機に装着した CTD から測定した値は、参考値として使用した。

2.2 光合成—光曲線の作成(P-E 曲線の作成)

光合成—光曲線の作成は、表層(5m)と亜表層(相対光量 < 10%)の海水を用いて、13C 法(Hama,1983)により行った。500 W ハロゲンランプを人工光源とし $6-1650 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ の範囲で8段階の光量に調節した培養槽にて、90 分間培養した。光合成—光曲線パラメータは、得られた光合成速度を Platt et al.(1980)の式

$$P^* = P^*_s [1 - \exp(-\alpha^* E / P^*_s)] \exp(-\beta^* E / P^*_s)$$

で回帰し、算出した。

2.3 光吸収スペクトルの作成

植物プランクトンの光吸収スペクトルは、QFT 法(Quantitative Filter Technique; 平譯ら, 2001)により、分光吸光度計を用いて 400-750nm の範囲で測定した。全懸濁粒子を GF/F フィルター上に濾過捕集後、次亜塩素酸にて漂白した。植物プランクトンの光吸収係数 a_{ph} は、全懸濁粒子の吸収スペクトルから漂白後のデトリタスの吸収スペクトルを差し引いて求め、400-700nm で平均して光吸収係数 $a_{ph} (m^{-1})$ を得た。単位クロロフィル a 当たりの光吸収係数 $a^*_{ph} (m^{-2} (mgChl a)^{-1})$ は、 a_{ph} を蛍光法によるクロロフィル a 濃度 $(mg m^{-3})$ で割ることで求めた。

2.4 クロロフィル及び栄養塩の測定

クロロフィル a は、水深 0, 5, 10, 20, 30, 50, 75, 100m から採水した海水を GF/F フィルター上に濾過捕集後、N,N-Dimethylformamide(DMF)によって色素抽出させ、蛍光光度計(日本分光社製)にて測定した(Welschmeyer, 1994)。

栄養塩分析は静岡大学理学部において TRACCS 2000 自動分析装置 (BLTEC 社製)を用いて行った。

2.5 水柱一次生産量の算出

水柱一次生産量は以下の波長組成を考慮するスペクトラルモデル(Morel, 1991)と、考慮しないブロードバンドモデル(Ryther and Yentch, 1957)の 2 つを使用して算出した。今回は主に実際の水柱一次生産量に近いスペクトラルモデルを使用し、簡易版であるブロードバンドモデルは比較用として使用した。

スペクトラルモデル

$$\Sigma PP_{PUR} = \int_0^{Z_{eu}} \int_0^D \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} PAR(\lambda, z, t) \times a^*_{ph}(\lambda, z, t) d\lambda \times Chl a(z) dt dz$$

ブロードバンドモデル

$$\Sigma PP_{PAR} = \int_0^{Z_{eu}} \int_0^D f(PAR(z, t)) \times Chl a(z) dt dz$$

ΣPP =日積算一次生産量, z =水深, t =時間, $f(PAR)$ =光合成一光曲線, Z_{eu} =光量 1% の水深, $PAR(\lambda, z, t)$ =波長 λ 水深 z 時刻 t における光合成有効放射 ($\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1} \text{nm}^{-1}$), D =日照時間 (s), λ_1 , λ_2 = PAR の短波長側 400nm 長波長側 700nm の境界, g =光合成の波長組成を考慮した以下の関数

$$g(PAR(\lambda, z, t) \times a^*_{ph}(\lambda, z, t))|_z = f(PAR(\lambda, z, t))|_z$$

3. 結果

3.1 海洋環境

水温、塩分、クロロフィル量共に季節変化が見られた。成層は夏季に確認され、冬季は鉛直混合が起きていたため見られなかった。成層期には、表層から水深約 100m まで水塊が形成されていた (図 2)。

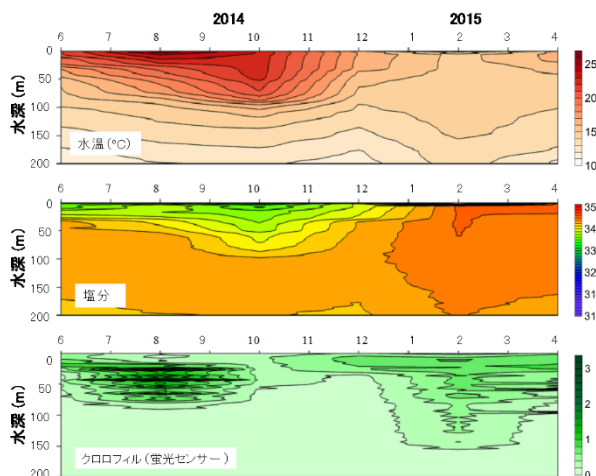


図 2 水温・塩分・クロロフィル量の鉛直断面図(湾奥, SR1)

3.2 水柱一次生産量 (スペクトラルモデル)

湾奥での一次生産量は 3 月に最も多くなり、 $3523 \text{ mgC m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ であった。3月を除く他の月では $300 \text{ mgC m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ 前後で一次生産量が推移した。

湾央では 6 月に最も一次生産量が多くなり、 $1282 \text{ mgC m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ であった。湾央も湾奥と同様に最大値が記録された月以外は $300 \text{ mgC m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ 前後で一次生産量が推移していた(図 3)。

湾奥で一次生産量が大きく増大した3月を除くと、湾奥と湾央の間で一次生産量に有意な差は認められなかった ($P > 0.05$)。

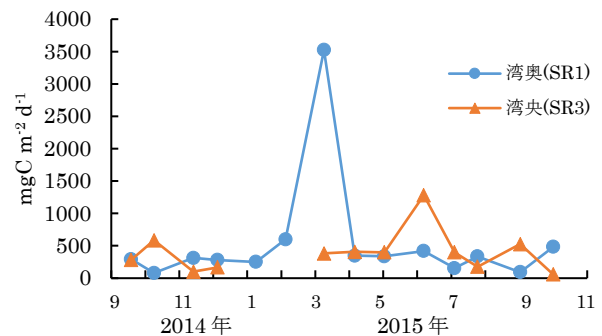


図 3 スペクトラルモデルでの水柱一次生産量の推移

3.3 水柱一次生産量 (ブロードバンドモデル)

ブロードバンドモデルで算出した水柱一次生産量はスペクトラルモデルを上回ることが多く、多くの月で水柱一次生産量を約 30%過大評価していた(図 4, 図 5)。しかし、3月の湾奥における水柱一次生産量はスペクトラルモデルが $3523 \text{ mgC m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ であったのに対してブロードバンドモデルは $2689 \text{ mgC m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ であり、ブロードバンドモデルが過小評価をしていた。

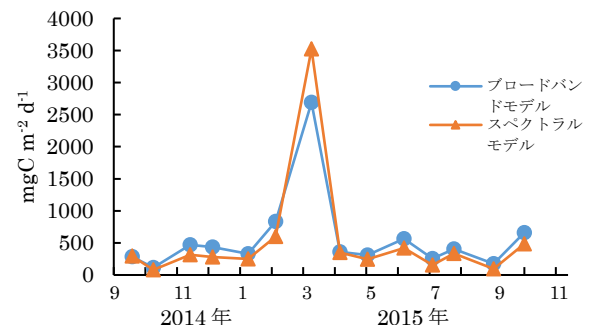


図 4 使用するモデルによる水柱一次生産量の比較 (湾奥, SR1)

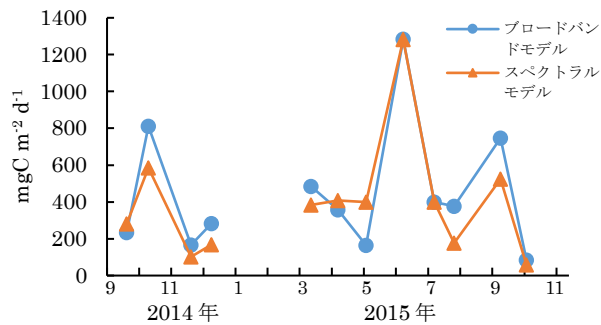


図5 使用するモデルによる水柱一次生産量の比較 (湾央, SR3)

3.4 潜在最大水柱一次生産量

湾奥と湾央は同日に調査を行っていないため、いくつかの月で同月であるにもかかわらず湾奥と湾央の日積算光量に大きな差ができてしまうことがあった。そのため、各月の日射量を月内で最も光量の多かった日の日射量に置き換え、他の光合成パラメータやクロロフィル量は変えずに水柱一次生産量を計算した。これを潜在最大水柱一次生産量とする。

潜在最大水柱一次生産量を算出した結果、多くの月で水柱一次生産量が増加した上、湾奥と湾央の値がおおよそ同等になった (図6)。しかし、湾央における2015年3月の潜在最大水柱一次生産量は観測値のおよそ4倍に増加した $1540 \text{ mgC m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ であったが、湾奥の潜在最大水柱一次生産量は $3901 \text{ mgC m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ であり、湾奥と湾央が同等には至らなかった。また、2014年10月も湾奥と湾央に差がみられた。3月を除いた平均は湾奥で $537 \text{ mgC m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ 、湾央で $549 \text{ mgC m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ であった。

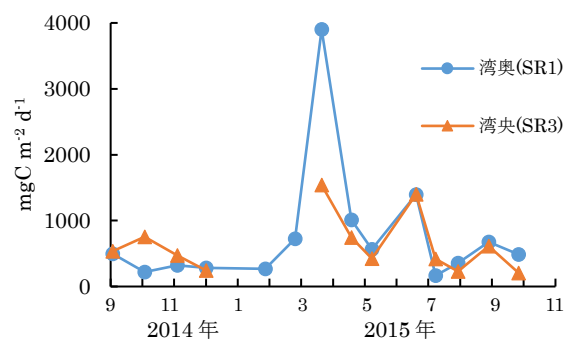


図6 潜在最大水柱一次生産量

3.5 栄養塩と水柱一次生産量の関係

栄養塩は全季節のデータが揃っている湾奥のデータのみを使用し検討した。リン酸態リン濃度は、表層と亜表層どちらも2014年の9月から12月にかけて増加し、3月のブルームで消費された

あとは大きく増加することなく推移していた (図7)。

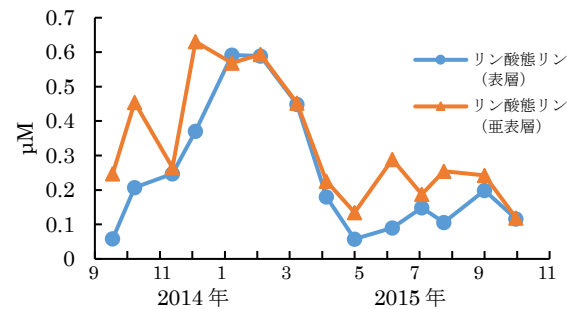


図7 リン酸態リンの季節変化 (湾奥, SR1)

ケイ酸塩濃度と無機態窒素濃度もリン酸態リンほど顕著ではないものの、リン酸態リンと同様の季節変化をしていた。しかし、表層のケイ酸塩濃度は2015年の5月と6月に大きく増加していた (図8)。

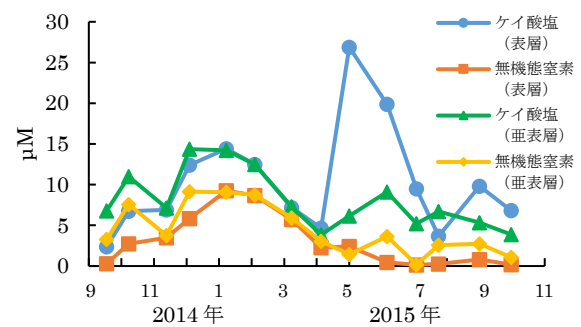


図8 ケイ酸塩と無機態窒素の季節変化 (湾奥, SR1)

3.6 クロロフィル a 量

クロロフィル a 量は、有光層 (光量 100% から 1% までの層) で積分して求めた。湾奥では $20 \sim 178 \text{ mg m}^{-2}$ の範囲で変動し、平均 58 mg m^{-2} であった。湾央は $32 \sim 166 \text{ mg m}^{-2}$ の範囲で変動し、平均 53 mg m^{-2} であった。クロロフィル a 量が大きく増加した春と秋のブルーム期を除くと、両測点ともに同程度で推移していた (図9)。

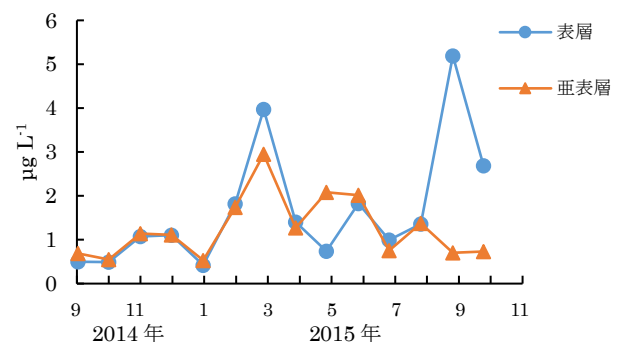


図9 クロロフィル a 量の季節変化

有光層を上部(光量 100%から 10%)と下部(光量 10%から 1%)に分けてクロロフィル *a* 量と比較した. 湾奥における有光層上部のクロロフィル *a* 量は, 有光層全体のうち 49~83%, 平均 61% を占めていた. 湾中央の有光層上部では, 32%~91%を占め, 平均 55%を占めていた (図 10, 図 11).

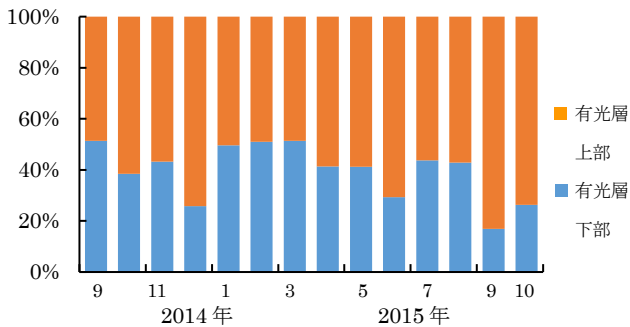


図 10 クロロフィル *a* 量において有光層上部が占める割合の季節変化 (湾奥, SR1)

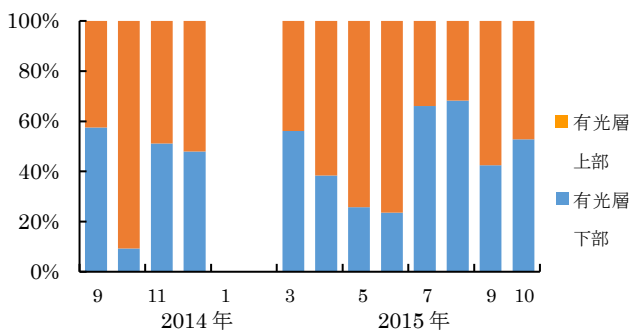


図 11 クロロフィル *a* 量において有光層上部が占める割合の季節変化 (湾中央, SR3)

3.7 有光層上部と下部の一次生産量

有光層を上部(光量 100%から 10%)と下部(光量 10%から 1%)に分けて水柱一次生産量を算出した. その結果, 湾奥湾中央共に有光層上部における水柱一次生産量の割合は約 80 から 90%であり, 年間を通じて大きく変化することは無かった. (図 12, 図 13).

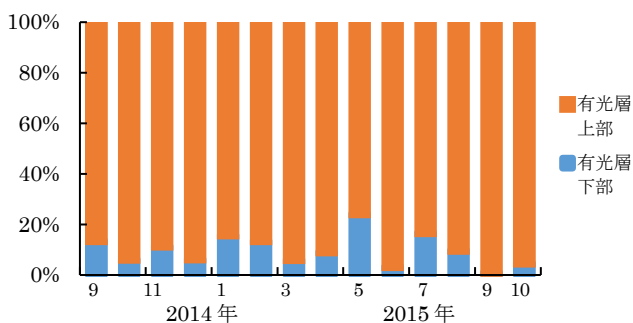


図 12 水柱一次生産量において有光層上部が占める割合の季節変化 (湾奥, SR1)

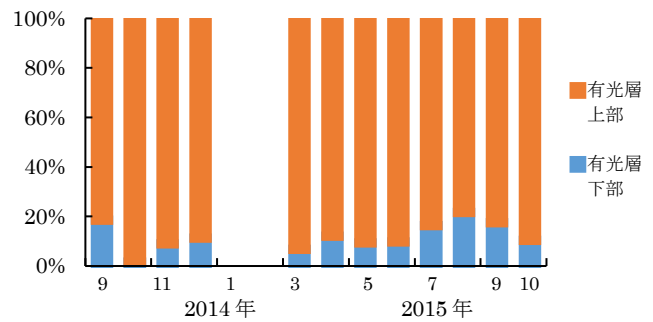


図 13 水柱一次生産量において有光層上部が占める割合の季節変化 (湾中央, SR3)

4. 考察

4.1 スペクトラルモデルによる水柱一次生産

スペクトラルモデルにて水柱一次生産量を算出する要素には, クロロフィル *a* 量, 海面光量, パラメータがある. 従って, 3 月に湾奥湾中央共に水柱一次生産量が大きく増加したことは, このどれかが大きく変化したことが原因と考えられる. まず, クロロフィル *a* 量は 3 月に大きく増加しているため, クロロフィル *a* 量は原因のひとつとして考えられる. この増加は, 10 月から 3 月にかけて行われた鉛直混合によって表層近くに栄養塩が豊富に存在したこと (図 2) 及び日照時間が伸びたこと (図 14) が原因と考えられる.

続いて, 海面光量は潜在最大光合成速度を算出した結果から水柱一次生産量に影響を与えることがわかったが, 3 月に光量が最も多くなかったため (図 14), プルーム期に起こる水柱一次生産量に大きな影響は与えないと考えられる.

パラメータに注目すると, 3 月に大きく増加していたのは, 最大光合成速度であった (図 15). このことから, 3 月に水柱一次生産量が大きく増加した原因は, クロロフィル *a* 量が増加したことで, 最大光合成速度が高かったことの 2 つだと考えられる.

6 月にも水柱一次生産量が増加したが, 3 月と同程度まで増加はしなかった. このときクロロフィル *a* 量はあまり増加していなかったため (図 9), 水柱一次生産の増加は最大光合成速度が高かったことが原因だと考えられる (図 15). 最大光合成速度が高かった原因として, 栄養塩の増加が考えられる. 6 月は調査を行う 1 週間前から雨が続き, 河川由来の栄養塩の流入量が増え, 特にケイ酸塩が増加していた (図 8). 河川から栄養塩の流入が増えると表層での一次生産量が大きく増加することは先行研究 (Tachi and Shimizu, 2012) でも明らかであり, 今回みられた水柱一次生産量の増加も同様の現象が起こったとみられ

る。本研究では植物プランクトンの同定は行っていないため組成は不明であるが、このとき増加した栄養塩はケイ酸塩であったことから、ブルームを起こした植物プランクトンはケイ酸質の被殻を持つ珪藻類であることが示唆された。

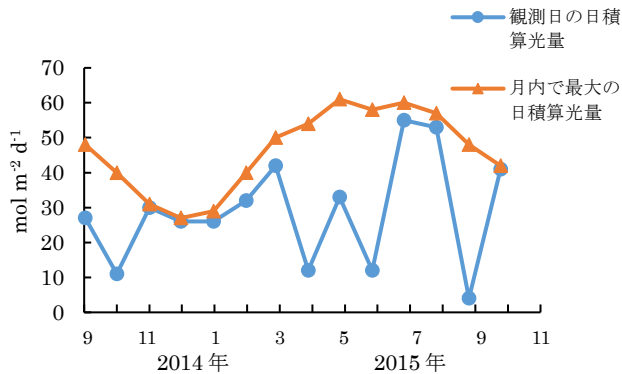


図 14 日積算光量の季節変化 (湾奥, SR1)

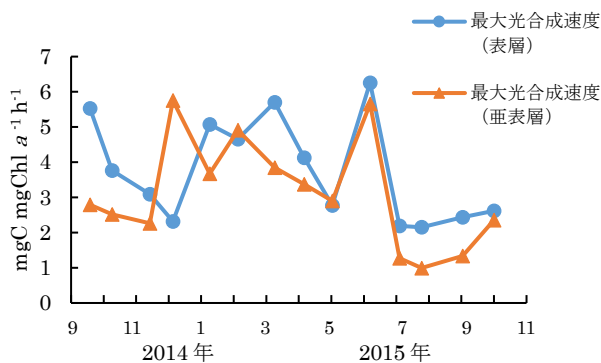


図 15 最大光合成速度の季節変化 (湾奥, SR1)

4.2 ブロードバンドモデルによる平均誤差

簡易的な調査にて水柱一次生産量を算出する場合、表面海水から得られたデータのみをブロードバンドモデルに当てはめて使用することがある。そこで表面海水から得たデータをブロードバンドモデルに当てはめて水柱一次生産量を算出し、スペクトラルモデルとの誤差を検討した。比較するにあたり、表面海水のみのデータを適用する箇所を変えて3通りの水柱一次生産量を算出した。順に、(A)：スペクトラルモデルと同一のデータを使用してブロードバンドモデルで算出したもの、(B)：水深 0m である表面海水のクロロフィル *a* 量を有光層下部まで適用したもの、(C)：表層のパラメータを亜表層でも適用したもの、(D)：0m のクロロフィル *a* 量を有光層下部まで適用し、表層のパラメータを亜表層でも適用したものとした。その結果、全ての項目で過大評価をしていた。また、ほぼ全ての項目において湾

奥は湾央より誤差が大きくなった (表 1)。

表 1 ブロードバンドモデル使用時の平均誤差
全てスペクトラルモデルとの誤差

	水塊	湾奥 誤差 (%)	湾央
(A) ブロードバンドモデル	有光層全体	+30	+25
	有光層上部	+29	+24
	有光層下部	+71	+62
(B) 同一クロロフィル <i>a</i> 量	有光層全体	+71	+51
	有光層上部	+63	+46
	有光層下部	+491	+436
(C) 同一パラメータ	有光層全体	+32	+26
	有光層上部	+30	+23
	有光層下部	+81	+156
(D) 同一クロロフィル <i>a</i> 量・パラメータ	有光層全体	+75	+48
	有光層上部	+63	+48
	有光層下部	+567	+205

いずれの算出方法でも有光層下部では誤差が大きくなり、特に (B) のクロロフィル *a* 量を同一にしたものは約 6 倍の過大評価になった。これは、有光層上部に植物プランクトンが大きく偏って分布し有光層下部では非常に少ないため、少しの違いでも大きく見えてしまうことが原因だと考えられる。

(C) の表層のパラメータを亜表層でも適用したものの水柱一次生産量は、表層と亜表層それぞれのパラメータを入れたときとほぼ同じ誤差であった。則ち、水柱一次生産量を算出するにあたり、表層と亜表層のパラメータの違いよりもクロロフィル *a* 量の違いの方が水柱一次生産量に大きな影響を及ぼすといえる。このことから、簡易的な調査であってもクロロフィル *a* 量是有光層下部まで採取することが望ましいことが示唆された。

ブロードバンドモデルによる水柱一次生産量は多くの月で過大評価をするが、おおよそ同じ季節変化を示した (図 4, 図 5)。従って、クロロフィル *a* 量及びパラメータがわかれば、ブルーム期を除きブロードバンドモデルで算出した値を 30% 程過小評価することによって、実際の水柱一次生産量に近づけることができると考えられる。

4.3 他海域との比較

スペクトラルモデルで求めた水柱一次生産量とクロロフィル *a* 量を、駿河湾と同じく黒潮の影響を受ける東シナ海及び日本海 (Yoshikawa and Furuya, 2008) と比較した。東シナ海及び日本海で使用しているデータが 9 月から 10 月までのデータのため、本研究のデータも同時期のデータを抜き出して使用した。

駿河湾は他海域と比べてクロロフィル *a* 量は多いが、水柱一次生産量は同程度であった (表 2)。他海域と比較して水柱一次生産量が高くならなかった原因はパラメータにあり、駿河湾の有光層上部では強光阻害係数が他海域より強く、有光層下部では最大光合成速度と初期勾配が低かった (表 3)。つまり、駿河湾の植物プランクトンは東シナ海及び日本海の植物プランクトンと比較して光合成の活性が低いと言える。

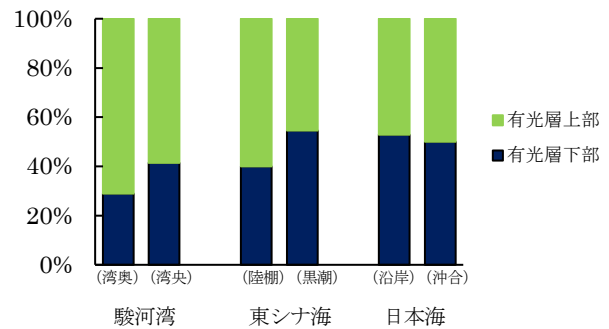
表 2 他海域との比較 1

調査地点	期間	水柱一次生産量 ($\text{mg C m}^{-2} \text{ d}^{-1}$)	クロロフィル <i>a</i> 量 (mg m^{-3})	生物量あたりの 水柱一次生産量 ($\text{mg C (mg Chl a)}^{-1} \text{ d}^{-1}$)	日積算光量 ($\text{mol m}^{-2} \text{ d}^{-1}$)	水柱の光利用効率 ($\text{mg C (mg Chl a)}^{-1} \text{ mol}^{-1} \text{ m}^{-2}$)
駿河湾(湾奥)	2015年9-10月	238±191	46±25	5.8±3.7	21±17	0.31±0.08
駿河湾(湾央)	2014年9-10月	363±242	39±9	9.1±6.4	24±13	0.35±0.14
東シナ海(陸棚)	2000年9-10月	213±108	24±5	8.5±3.6	23±8	0.38±0.13
東シナ海(黒潮)	2000年9-10月	195±72	22±5	9.3±3.2	33±7	0.29±0.10
日本海(沿岸)	1999年9-10月	458±204	35±11	14.2±8.1	27±5	0.50±0.24
日本海(沖合)	1999年9-10月	254±123	31±6	8.6±4.4	21±10	0.46±0.15

表 3 他海域との比較 2

調査地点	有光層上部 強光阻害係数	有光層下部	
	$\text{mgC (mg Chl a)}^{-1} \text{ h}^{-1} (\mu \text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1})$	最大光合成速度 $\text{mgC (mg Chl a)}^{-1} \text{ h}^{-1}$	初期勾配 $\text{mgC (mg Chl a)}^{-1} \text{ h}^{-1} (\mu \text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1})$
駿河湾(湾奥)	0.0040±0.0023	2.2±0.6	0.016±0.010
駿河湾(湾央)	0.0029±0.0021	2.9±2.0	0.013±0.007
東シナ海(陸棚)	0.0009±0.0007	3.3±1.0	0.025±0.006
東シナ海(黒潮)	0.0005±0.0007	3.9±1.4	0.019±0.005
日本海(沿岸)	0.0003±0.0003	5.2±0.6	0.033±0.010
日本海(沖合)	0.0005±0.0003	2.6±1.1	0.020±0.008

有光層を上部と下部に分けてそれぞれに存在するクロロフィル *a* 量を比較した。有光層上部にクロロフィル *a* 量が存在する割合は、駿河湾の湾奥で 67%，湾央で 59%であった (図 16)。湾央は東シナ海の沿岸域とほぼ同じ割合であったが、東シナ海の黒潮域や日本海より割合が高かった。このことから、駿河湾の特に湾奥では表層にクロロフィル極大が形成されることが多いと考えられる。黒潮域では、クロロフィル極大が亜表層に形成され (Kozasa, 1979)、沿岸域では表層に形成される (Shimura and Ichimura, 1972) ことが知られているため、駿河湾の湾奥と湾央におけるクロロフィル *a* 量の分布には、沿岸域の特徴が強くでていることが示唆された。

図 16 水柱クロロフィル *a* 量において有光層上部が占める割合

水柱一次生産量についてもクロロフィル *a* 量と同様に比較したところ、水柱一次生産量のうち有光層上部にて占める割合は、駿河湾の湾奥で 94%，湾央で 88%であった (図 17)。東シナ海黒潮域の 69%，日本海沖合の 75%と比較しても、駿河湾は他海域よりも有光層上部で占める割合が高かった。考えられる原因として、東シナ海及び日本海では形成されていた亜表層クロロフィル極大が、駿河湾ではあまり形成されなかったが挙げられる。

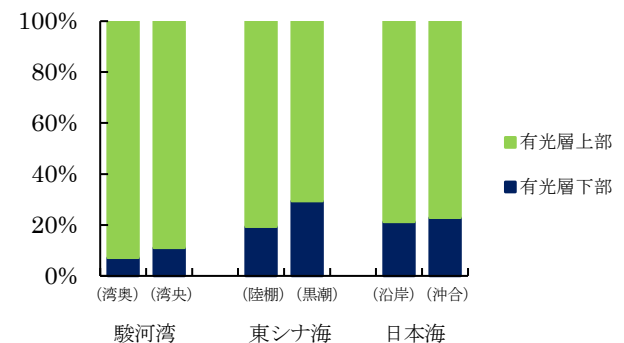


図 17 水柱一次生産量において有光層上部が占める割合

沿岸域の水柱一次生産量は、表層で最も高く、深くなるにつれて減少していく (Shimura and Ichimura, 1972) が、黒潮域では、表層にて水柱一次生産量が著しく高くなることはなく、亜表層にて極大を示す (Aruga Yokohama and Nakanishi, 1968)。本研究で得られた駿河湾の特徴として、湾奥湾央共に表層にクロロフィル *a* が多く存在していること及び表層での水柱一次生産量の割合が高いことが挙げられる。このことより、駿河湾の湾奥及び湾央における一次生産過程は、黒潮域よりも沿岸域の特徴が強く出ていることが示唆された。

本研究での調査地は湾奥及び湾央であり、湾口では調査を行っていない。湾口では黒潮の影響が湾奥や湾央よりも強く出ることが予想されるため、駿河湾の一次生産について深く知るためには、今後湾口での調査も必要であると考えられる。

5. 謝辞

本研究において終始ご指導をいただきました、東海大学海洋学部水産学科准教授 吉川尚先生に深く感謝いたします。

また、東海大学海洋学部海洋生物学科 西川淳先生、海洋学部水産学科 松浦弘行先生、静岡大学理学部 宗林留美先生、愛媛大学沿岸環境科学研究センター 大林由美子先生、吉川研究室および各研究室の方々、「北斗」乗船員の皆様には、貴重な時間を割いてご指導、ご協力をしていただきました。深く感謝の意を表します。

参考文献

- 1) Takashi Yoshikawa, Ken Furuya Phytoplankton photosynthetic parameters and primary production in Japan Sea and the East China Sea: Toward improving primary production models Continental Shelf Research 28 pp. 962-976 2008
- 2) Yusho Aruga, Yasutsugu Yokohama, Masami Nakanishi Primary Productivity Studies in February-March in the Northwestern Pacific off Japan Journal of the Oceanographical Society of Japan Vol.24, No.6 pp. 275-280 1968
- 3) T. Hama, T. Miyazaki, Y. Ogawa, T. Iwakuma, M. Takahashi, A. Otsuki, S. Ichimura Measurement of photosynthetic production of a marine phytoplankton population using a stable ^{13}C isotope Marine Biology Vol. 73 pp. 31-36 1983
- 4) Platt, T., Gallegos, C. L., Harrison, W. G. Photo inhibition of photosynthesis in natural assemblages of marine phytoplankton J. Mar. Res. 26 pp.2345-2349 1980
- 5) 平譚享 鈴木光次 岸野元彰 古谷研 田口哲 齊藤誠一 才野敏郎 松本和彦 榎本孝史 佐々木宏明 藤木徹一 古原慎一 柏俊行 QFT法及び現場型水中分光光度計による植物プランクトンの光吸収スペクトル測定プロトコル 海の研究 Vol. 10 pp. 471-484 2001
- 6) Welschmeyer, N. A. Fluorometric analysis of chlorophyll a in the presence of chlorophyll b and pheopigments. Limnol. Oceanogr., Vol. 39 pp. 1985-1992 1994
- 7) Andire Morel Light and marine photosynthesis: a spectral model with geochemical and climatological implications Progress in Oceanography Vol. 26 pp. 263-306 1991
- 8) J. H. Ryther, C. S. Yentsch The Estimation of Phytoplankton Production in the Ocean from Chlorophyll and Light Data Limnology and Oceanography Vol. 2 pp.281-286 1957
- 9) 高橋正征, 古谷研, 石丸隆 生物海洋学 粒状物質の一次生産 東海大学出版 1996
- 10) Trevor Platt, Shubha Sathyendranath 光と海洋の一次生産 株式会社生物研究社 2009
- 11) 多田邦尚, 一見和彦, 山口一岩 海洋科学入門 海の低次生物生産過程 恒星社厚生閣 2014
- 12) 舘洋, 清水康弘 河川水の流入が英虞湾の一次生産に及ぼす影響. 三重県水産研究所研究 21号 pp. 15-20 2012
- 13) 志村宗司 市村俊英 黒潮隣接沿岸水域の基礎生産 Journal of the Oceanographical Society of Japan Vol.28 pp. 8-17 1972
- 14) 小笹悦二 東シナ海におけるクロロフィルの分布-I. Variosensで測定した1978年7月の鉛直分布特性 日本プランクトン学会報 26巻2号 pp. 87-95 1979

編 集 後 記

当社は、平成 29（2017）年 12 月 7 日で創立 75 周年を迎えました。各方面の皆様のご支援のたまものと感謝いたしております。

今号は、75 周年を記念いたしまして当社の創始者である渡邊貫について、鉄道総合技術研究所の小野田氏に執筆いただきました。また、当社の技術指導をいただいております亀井先生をはじめ、川越室長、加藤教授に執筆していただきました。

皆様のお時間のある折にお目を通していただければ幸いです。

企画本部 内田

地質工学 第 15 輯

平成 30 年 4 月 16 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 日本物理探査株式会社

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 さいたま市南区别所 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)3024 FAX 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	〒940-2011 長岡市藤沢二丁目 7 番 6 号	TEL 0258(22)4617 FAX 0258(22)4618
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
浜松事務所	〒432-8062 浜松市南区増楽町 2516 番 2 号 RELAFly E-101	TEL 053(449)5970 FAX 053(449)5971
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 大阪市天王寺区堂ヶ芝一丁目 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
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	〒904-2154 沖縄市東二丁目 3 番 13 号 メゾンクリオネ 103	TEL 098(923)1915 FAX 098(923)1916

※NGP は Nippon Geophysical Prospecting Co.,Ltd. の略称です。