

**遠隔離島における地下空間利用のための
調査研究検討委員会**

報告書

2019 年 3 月 29 日

公益社団法人 地盤工学会

委員会報告書 目次

	頁
第1章 委員会の概要	
1.1 委員会設置の趣旨	1.1
1.2 委員	1.2
1.3 開催概要	1.3
第2章 遠隔離島の地質、水理的特性	
2.1 遠隔離島の地質とテクトニクス	2.1
2.1.1 遠隔離島の成長過程	2.1
2.1.2 遠隔離島の内部構造：南鳥島の例	2.3
2.1.3 遠隔離島の基盤の長期安定性と地震活動	2.6
2.2 遠隔離島の地下水理	2.9
2.2.1 ムルロア（Mururoa）環礁を対象とした研究	2.9
2.2.2 エニウェトク（Enewetak）環礁を対象とした研究	2.13
2.2.3 小括	2.14
第3章 遠隔離島および周辺海域の調査技術	
3.1 遠隔離島周辺の海底地形調査	3.1
3.1.1 海底地形情報の必要性	3.1
3.1.2 海底地形情報の現状	3.1
3.1.3 海底地形調査	3.2
3.1.4 水平解像度	3.3
3.1.5 鉛直精度	3.5
3.1.6 山体の性状から地形を探る手段	3.6
3.1.7 提案	3.6
3.2 遠隔離島周辺の地質調査	3.8
3.2.1 地下空間利用の基礎データ	3.8
3.2.2 地質調査の流れ	3.9
3.2.3 概略調査（第一段階）	3.10
3.2.4 掘削検層（第二段階）	3.15
3.2.5 詳細調査	3.17
3.2.6 地質調査のまとめ	3.23
第4章 遠隔離島及びその周辺海底下の地下空間利用のための技術等	
4.1 竪坑施工技術	4.1
4.1.1 一般的な竪坑施工技術	4.1
4.1.2 坑井掘削技術	4.6

4.1.2.1	ケーシングパイプ	4.6
4.1.2.2	ケーシングパイプの設計	4.6
4.1.2.3	大径ケーシングの降下限界深度試算	4.8
4.1.3	まとめ	4.15
4.2	水平坑道施工技術	4.16
4.2.1	掘削技術	4.16
4.2.2	不良地山，湧水対策技術	4.17
4.2.3	遠隔離島における坑道施工技術の課題と展望	4.20
4.3	鋼材の腐食	4.23
4.3.1	腐食劣化特性と腐食因子	4.23
4.3.2	鋼材の防食法	4.25
4.3.3	遠隔離島（沖ノ鳥島）での長期暴露試験	4.26
4.3.4	各種防食法の長期暴露試験	4.26
4.3.5	まとめ	4.27
4.4	遠隔離島のインフラ整備	4.28
4.4.1	各種施設	4.28
4.4.2	腐遠隔離島におけるインフラ整備の課題と展望	4.28
第5章	まとめ	5.1

【巻末資料】

遠隔離島における地下空間利用のための調査研究検討委員会 開催概要

第1章 委員会の概要

1.1 委員会設置の趣旨

我が国の国土の大宗はプレート境界域に近接しているため、火山噴火や地震等地殻変動が活発である。一方で我が国の南方海域には、沖ノ鳥島、沖大東島、南鳥島等いわゆる遠隔離島が存在する。これら遠隔離島は火山島として誕生したものであるが、火山活動が終焉してから一千万年以上が経過している。またプレート境界から離れており、プレート運動を考慮しても向後数百万年は地殻変動に巻き込まれないことが予想される。

我が国の国土としては希有な、地殻変動が今後長期にわたり発生しないという特性を積極的に活かして、遠隔離島を活用するための課題と検討事項を明らかにするため、地盤・地形・地質に関する情報及び調査技術、施工技術に関して概括した上で、空間利用を行う場合の施工計画、経済効果、社会的インパクトも含めた実現可能性を検討するため、調査・研究部の研究委員会として本委員会を設置した。具体的な技術的検討項目は、以下のとおりである。

- 1) 陸地及び海底地盤の安定性・遮水性の検討
- 2) 1)に必要な現場データ調査方法の検討
- 3) 2)を行うための技術開発項目の検討
- 4) 施工技術の検討
- 5) 遠隔離島の海底地下空間利用方法の検討

なお、本検討は、今後生じる可能性のある遠隔離島の地下空間の多様な有効利用の参考となることを想定するものである。

1.2 委員

委員長 菊池 喜昭 東京理科大学 理工学部 土木学科 教授

委員 川村 喜一郎 山口大学 大学院創成科学研究科 地球圏生物物質科学系専攻
准教授

坂下 晋 応用地質株式会社 エネルギー事業部 計測探査部 上級専門職

武村 貢 エスケイエンジニアリング株式会社 代表取締役社長

(第6回より中村委員に代わり参加)

谷 伸 東洋建設株式会社 顧問

徳永 朋祥 東京大学 大学院 新領域創成科学研究科

環境学研究系系長 教授

長縄 成実 秋田大学 大学院 国際資源学研究科 資源開発環境学専攻教授

(第4回より参加)

中村 常太 エスケイエンジニアリング株式会社 常務取締役

(第4回より参加)

原田 典佳 新日鐵住金株式会社 建材事業部 建材開発技術部

土木基礎建材技術第二室 室長

柳浦 良行 基礎地盤コンサルタンツ株式会社 取締役

事業本部長兼技術本部長

横尾 敦 鹿島建設株式会社 土木管理本部 土木技術部 担当部長

事務局 阪口 秀 国立研究開発法人海洋研究開発機構 理事

山田 康夫 国立研究開発法人海洋研究開発機構イノベーション・事業推進部

企画調整統括 (第4回より参加)

1.3 開催概要

本委員会は、2016年12月に第1回委員会が開催され、2016年度は主に海洋プレート上に位置する遠隔離島の地質学的な特徴の確認、地下空間の利用を進めるにあたっての技術的な検討事項、社会的な課題についての把握を行った。

2017年度は各委員からその専門分野における、遠隔離島周辺での過去の調査事例や、大深度の地下空間利用に関するこれまでの技術的検討事例について話題提供を頂き、今後、遠隔離島周辺の地下空間利用を進めるにあたって、本委員会において議論、検討すべき調査手法や技術開発課題、確認が必要な地質・構造、水理、環境に関するデータ類についての理解、共通認識を深めた。

2017年度までの本委員会での議論、検討を基に2018年6月にこれまでの成果と残された課題について、中間の取り纏めを行い、報告書として公開した。

2018年度は、中間とりまとめで抽出された課題について更に検討を深めると共に、今後、遠隔離島周辺海域の地下空間利用を進めるにあたって必要なデータ取得のための調査計画、大深度で間隙が大きい地盤での試錐、坑道の施工に関する技術開発についての提案を行った。

表 1-1 委員会開催概要

	開催日	議題・検討事項
第1回	2016年12月27日	本委員会設置の趣旨説明、本委員会での検討事項
第2回	2017年3月14日	遠隔離島における地下空間利用に関する技術的課題、問題点の抽出
第3回	2017年5月29日	遠隔離島の地質学的、水理学的特性について
第4回	2017年7月25日	遠隔離島周辺海底下の地下環境の特性 地下空間利用のための工学的課題（土木工学、材料工学等）
第5回	2017年10月30日	大深度掘削に関する技術的課題 地下空間利用に関わる法的要件
第6回	2018年1月22日	遠隔離島周辺海域での科学調査 遠隔離島周辺での過去の火山活動
第7回	2018年5月22日	中間報告書（案）について 次回以降の検討課題について
第8回	2018年7月30日	遠隔離島周辺での過去の地下空間利用の事例 大深度坑道施工に関する技術的課題
第9回	2018年11月2日	遠隔離島の地質環境評価のための調査計画 遠隔離島を対象とした地下水流動モデリング
第10回	2019年1月28日	最終報告書（案）について

委員会開催の詳細については別紙参照

第2章 遠隔離島の地質、水理的特性

この章は、世界に分布する遠隔離島の地質・テクトニクスに関わる背景、離島内部の水理的特性に関する資料を収集・整理することで、日本に属する遠隔離島の地質、水理的特性に関して様々な観点から検討した結果を記述する。また、その結果から見えてくる問題点やその解決法についても論じる。

2.1 遠隔離島の地質とテクトニクス

日本列島は、4つのプレート、即ちユーラシア（アムール）プレート、北米プレート、フィリピン海プレート、太平洋プレートがせめぎあっている場所であり、北海道、本州、四国、九州、沖縄などの日本の主要な国土は、地球上でも火山活動や地震活動が活発な地域である。

一方、これから述べる遠隔離島とは、それらの日本の主要な国土との連絡が容易でなく、孤立性、隔絶性といった性格が強い離島に対して用いられる言葉である。日本では、沖大東島、沖ノ鳥島、南鳥島が遠隔離島の代表例であり、沖大東島と沖ノ鳥島がフィリピン海プレート上に、南鳥島が太平洋プレート上に位置し、それらは主要な国土から隔絶されている。

日本に属するこれらの遠隔離島のうち南鳥島は、いわゆる「ホットスポット（後述）」によって地質学的時間スケールで形成されたとされている。

その内部構造は、大きく分けると、島の下部は玄武岩質岩石、上部はサンゴの破片などからなる炭酸塩岩から構成されている。

しかし、細かく見るとその内部構造は極めて不均質であり、この内部構造の不均質性こそが次に述べる水理的特性や力学的特性などに大きく関わる。そして、内部構造の不均質性は遠隔離島の地下空間利用においても大きな障害となり得る。

ここでは、以下に、遠隔離島の地質とテクトニクスについて形成史を紐解きながら説明し、内部構造の形成プロセス、特に不均質性の成因について記述する。遠隔離島の内部構造の不均質性の成因を理解できれば、遠隔離島の地下空間分布を理解する手助けとなる。不均質性の空間分布は内部構造モデルを構築する際に大いに役立つだろうし、地下空間利用での障害に対する対策を考える上でも重要な知見であろう。

2.1.1 遠隔離島の成長過程

日本周辺の遠隔離島は海底での火山活動によって形成された。現在、火山活動によって島が形成されている場所の代表例は太平洋プレート上のハワイ島である。

ハワイ島は活火山を有しており、その一つであるキラウエア火山の活動中の火口であるプウ・オオ火口からは頻繁に玄武岩質のマグマが流れ出ている。玄武岩質マグマは粘性が低く広域に流下するため、周囲の住宅や道路に被害が及ぶことも珍しくない。表面がなめらかな溶岩はパホイホイ溶岩と呼ばれる。マグマの表面が冷え固まった後もその下のマグマは流れ続け、その後空洞

(溶岩洞)となる。地表の冷え固まった溶岩が崩落することもある。噴火によってマグマが連続的に火口から噴出し、溶岩層となり、島の陸上部を覆う。

このようなハワイ型の火山は、以下のような成長過程であったとされている(横山ほか, 1992 参照)。まず、海洋底でのマグマ噴出から始まる。このときマグマは海水によって急冷されながら噴出、流下するため、特徴的な枕状の形状となる。そのような枕状溶岩が積み重なることによって海底に小さな山が形成される。現在、ハワイ島南方のロイヒ海底火山でそのような火山活動が進行している。次に、山が成長し、比高が 5000m を超える、すなわち山頂の水深が数百 m となると、火道に海水が侵入し、マグマ-水蒸気爆発になり火砕物を噴出し始める。これにより、枕状溶岩からなる海底火山を火砕岩が覆うことになる。その後、山頂が海面上に現れると先に紹介したような陸上部での溶岩層が覆う。溶岩流が海岸線に達すると、枕状溶岩や急冷されてバラバラになった火砕物が海底斜面を覆う。このようにして、火山島の内部は、まず、枕状溶岩があり、その上にマグマ-水蒸気爆発による火砕岩、さらにその上に溶岩層が覆っている。また、海底斜面では枕状溶岩や火砕岩が覆っており、その上位には、サンゴ礁が覆っている。

ハワイ型の火山のような火山活動は、地下深部からの熱源によってもたらされているとされている。そのような熱源はホットスポットと呼ばれ、地球を覆うプレートが動くとともに、今まで活火山であった海山はホットスポットの位置からはずれるため、火山活動を停止し、火山島はプレート運動とともに移動する。プレートは年月を経て冷却されより重たくなり、海山周辺の水深は深くなり、火山島は沈水する。一方で、それが低緯度であれば、海山の沈水と連動して、山頂部にサンゴ礁が発達し、沈水すればするほど、サンゴ礁からなる炭酸塩岩層はより厚くなる。このようにして形成されたものが、環礁(アトール)であることがダーウィンによって示され、太平洋プレート上ではムルロア環礁やビキニ環礁などが有名である。このように、火山島の内部は、下部が玄武岩質岩石、上部が炭酸塩岩となる。

その後、炭酸塩岩層は、海水準の上下変動によって内部が不規則に溶食される。過去数十万年間では、氷期・間氷期が繰り返されており、それにより、氷期には現在よりも約 100m 海水準が低かったとされており、海山を覆う炭酸塩岩層は、海面上に露出する。その露出した部分は、雨水などにより不規則に溶食され、大小さまざまな洞窟が形成される。内部構造が明らかになっているムルロア環礁などではそのような空洞が複数確認されている。そして、その下部では続成作用によってドロマイト化している。

以上のように、太平洋プレート上では、ハワイ島やムルロア環礁などの若年期から壮年期までのホットスポットによる海山の成長過程を観察することができる。先に紹介した日本の遠隔離島の一つである南鳥島は、同じ太平洋プレート上に存在し、成長の最終段階の海山と言える。次に、日本の遠隔離島の一例として、南鳥島の内部構造について論じ、その不均質性について議論する。

2.1.2 遠隔離島の内部構造：南鳥島の例

(1) 南鳥島の気象・海象

南鳥島は、東京より南東へ約 1860km の位置にあり、サンゴ礁でできた小さな島である。北緯 24 度 18 分、東経 153 度 58 分に位置し、ほぼ正三角形に近い形である (URL 気象庁ホームページ)。海上保安庁水路部 (2001) によると、南鳥島は、伊豆・小笠原海溝とマリアナ海溝との会合部付近より東側に広い帯状に東西に分布する多数の海山 (マークス・ウェイク海山群) の中であって、マークス・ウェイク海山群における唯一の島である。サンゴ礁より成り、南洋サンゴ礁島の北限をなしている。本島を含む海山の基底部は、5000~6000 m の深海平原が広がっている。島の形状は、北西辺 1700 m、東辺 1600 m、南辺 1500 m の三角形をなしており、最高地点は、標高 9 m であり、島の面積は約 1.9 km² である (海上保安庁水路部, 2001)。

南鳥島では、地上気象観測として、気圧、気温、湿度、風向、風速、降水量、日照、日射が自動的に観測されており、観測値は、衛星回線で気象庁に送られている (URL 気象庁ホームページ)。高層気象観測も 1 日 2 回、9 時と 21 時に行われており、気圧、気温、湿度、風向、風速が計測されている (URL 気象庁ホームページ)。また、台風接近時には臨時の観測も行われている (URL 気象庁ホームページ)。南鳥島付近は、年に数回、台風の発生や通過があり、島の標高が低いこともあり、島全域に対して、数十 m/s の暴風や高潮・高波の懸念がある。

南鳥島周辺の海面の塩濃度は、約 35.5‰ であり、水深 2000 m より深くなると約 34.6‰ となる。水温は、水深 2000m 以深で 2℃ を下回る通常の海洋環境であると推測される (Kawabe et al., 2006)。表層流は、おおよそ東から西への北赤道海流によって支配されている。底層流は、南から北へのゆっくりした流れが存在しているとされる (Kawabe et al., 2006)。

遠地津波観測が平成 8 年から常時行われており、2010 年チリ津波、2011 年東北地方太平洋沖地震津波を観測した。いずれも十~数十 cm の波高であった。

以上のことから、南鳥島は、気象観測データが整っており、陸上部の利活用において 1951 年から現在までの有用なデータの蓄積があることから、今後起こりうる気象災害についての予測をある程度立てることができる。また、周辺の海洋データに基づくと、日本周辺を流れる黒潮のような強い流れはない。さらに、津波災害については、近年の観測結果から、日本列島を襲う巨大津波であったり、チリなどの遠地津波であったとしても、脅威となりうるものではないことが明らかとなっている。このように、南鳥島は、陸上部の利活用において、多くの気象・海象のメリットがあると言えるが、台風などの荒天時の自然災害に対しての対策が必要であろう。

(2) 南鳥島の地質

島の地形は、新しいものから、主に戦後の著しい人工改変地形、現生のサンゴ礁及び海浜地形、海拔 1~2 m 付近の汀線際に分布する低位離水サンゴ礁またはビーチロック (地表で硬くなった炭酸塩類の碎屑物)、海拔 2.5m~6m 付近で島の中央に広く発達する高位離水サンゴ礁、海拔 6~9

mに点在するカルスト地形の5つから形成されている。

海上保安庁水路部(2001)によると、南鳥島の地質は、音波探査記録の音響的層相の特徴に基づき、4層に区分（Ⅰ_M、Ⅱ_M、Ⅲ_M、Ⅳ_M）される。

Ⅰ_M：音響測深記録によりⅠ_{M-a}とⅠ_{M-b}に細分。Ⅰ_{M-a}層は、水深30m以浅の浅海部に分布、現生の海浜堆積物に対比される。Ⅰ_{M-b}層は、水深30～40m以浅に分布し、現生のリーフ（礁原）に連続する。現生のリーフの基底水深は40～50mとされていることから、低位離水サンゴ礁と対比している。

Ⅱ_M：水深1000m以深の斜面や谷底に薄く分布する。採取底質は泥分（石灰質）が多いことから更新世以前の未固結堆積物に対比している。

Ⅲ_M：南鳥島より三方向に伸びる尾根上地形の頂部に、下位のⅣ_M層を覆ってキャップロック状に堆積している。最大層厚は1000mに達している所もある。石灰岩化した枝サンゴ、サンゴ礁（再堆積石灰岩も含む）に対比している。

Ⅳ_M：音響基盤層で海山地形の核をなす。分布域では玄武岩礫が採取されていることから玄武岩層と推定されている。

また、その地史は、時代ごとに概観すると以下の通りである。

1) ジュラ紀～白亜紀

- ・ Ⅳ_M（玄武岩）の噴出により、南鳥島や三方に延びる尾根状地形の核（原型）が形成される。

2) 白亜紀から更新世

- ・ Ⅳ_M（玄武岩）の上にサンゴ礁が形成され石灰岩化し、Ⅲ_M層となる。
- ・ Ⅲ_M層の一部は、崩落し碎屑され再堆積して石灰岩化したものも含まれる。
- ・ 斜面や谷底で転動・懸濁されたⅣ_M層やⅢ_M層の碎屑物は、未固結のⅡ_M層を形成する。
- ・ 陸上の高位離水サンゴ礁等が形成される。

3) 現世

- ・ 現世サンゴ礁の発達によるⅠ_{M-b}層が形成される。
- ・ 海浜、浅海部での碎屑によるⅠ_{M-a}層が形成される。

Ⅲ_M層は深海部から浅海部までⅣ_M層上を覆って、はい上がるように発達している。このようなサンゴ礁の分布形状は、海水準変動だけでは説明できず、基盤の沈降による相対的な海水準の上昇によりサンゴが上方に成長してきたと推定される。

以上のように、内部構造は、下部は火山岩類、上部は炭酸塩岩類となっており、一般的な海山の内部構造と大局的には同じである。ただし、島内部の火山岩類には礫岩があるだけでなく、炭酸塩岩類は碎屑物が含まれる。このことから、内部構造には、多くの隙間が存在することが示唆され、南鳥島の地下空間利用における障害となることは確実である。このような不均質な地質構造をより詳細に解明するためにも、物理探査やボーリング調査といった一連の地質調査が不可欠であると結論づけられる。

(3) 南鳥島周辺の地殻構造

南鳥島のより深部の地質構造は、大規模な地震波速度構造探査によって明らかになっている(金田ほか, 2015)。金田らによると、海山の特徴として、山体の中心には貫入核と推定される、P波速度 6 km/sec 以上の構造が深海平原付近まで達しており、山体斜面は溶岩等と推測される P波速度 4~5 km/sec の厚い層で覆われている。

一般に、かつての海底面は山体の中心に近づくにつれ深くなる傾向にあり、海山の自重により地殻が下方方向に撓んでいることが分かるが、南鳥島ではほとんど地殻の撓みが認められない。

石原・藤岡(2015)によれば、モホ面は、拓洋第五海山や咸臨海山等の海山のように、深さ 15km を越えるような大きな窪みが存在するのに対し、南鳥島においては、頂部が海面上に出ているにしては、モホ面の窪みが小さい。海山の火山活動が生じたときのプレートの年代にもよるが、比較的若いプレートの上に多量の物質が乗れば大きなモホ面の窪みが生じるが、火山活動により生じた物質の量が少ないか、プレートが火山の大きさに比べて十分古い場合には、モホ面の窪みがあまり生じないということが考えられる。

南鳥島は、その深部においても一般的な海山の特徴を有しており、ホットスポット起源、すなわち深部には玄武岩などの火山岩が存在していることが、この地震波速度からもわかる。また、後述する火山活動の一つであるプチスポットの活動度を知る上でも重要であろう。上記のデータ、そして、先の地質学的な記録を見る限り、南鳥島周辺での現在の地殻変動、もしくは火山活動を示す積極的な情報は得られない。

(4) 南鳥島周辺の海洋地質

南鳥島周辺の地形を詳しくみると、複数の円弧状の窪地があり、その円弧の直下は、平均勾配 30/100~40/100 の斜面である。さらにその直下は 14/100~25/100 であり、斜面下部に行くと、4/100~8/100 になる。これらの勾配の違いから、上部の比較的急勾配の領域が地すべりの滑落崖、中部~下部の比較的緩い勾配の領域が地すべりの堆積体(移動体)と推測される。このように、南鳥島周辺には、多くの海底地すべり地形が存在するが、おそらく、それらはすべて南鳥島形成初期のものであると推測されるが、今後の詳細な調査が必要である。

また、河野ほか(2016)では、2010年に南鳥島山麓海底でしんかい 6500による調査を実施し、異なる火山活動が想定される3種類の地形(溶岩流、火山丘、リッジ)から岩石試料を採取し、薄片観察、全岩組成分析を実施した。その結果、ホットスポット火山に典型的な盾状期、再生期といった海山・海洋島の成長過程を示している可能性が示唆された。現段階において、最近の火山活動の存在は、地殻熱流量測定などからは示されておらず、よくわかっていないというのが現状である。

南鳥島が位置する西太平洋では、いくつかの科学掘削が実施されており、未だ掘削されていない南鳥島の地質構造についてヒントが示されている。科学掘削のほとんどは、大洋底で海洋地殻を構成する玄武岩を掘削したものであるが、平頂海山である MIT ギョーが ODP Leg 144 Site 878

で掘削された。このギョーは、南鳥島の北西約 1000 km に位置する。掘削点は、水深約 1400 m であり、海底下 910 m が掘削され、南鳥島の内部構造を考える上では重要なデータとなっている。上部から 0～394 m が P 波速度約 2.45km/sec のサンゴからなる上部炭酸塩岩、394～604 m が P 波速度約 3.2 km/sec 玄武岩と炭酸塩岩からなる角礫岩、604～727 m が P 波速度約 3.5 km/sec 下部炭酸塩岩、727～910 m が玄武岩となっている。ただし、船上に回収された炭酸塩岩塊は、P 波速度約 4 km/sec となっている。間隙率は、おおよそ 0～20%であるが、玄武岩では数%から 50%まで小刻みに変化する。これらのことから、MIT ギョーの炭酸塩岩層と玄武岩層とは、岩石化しているものの、地下に間隙（おそらく亀裂など）が多く存在していると結論づけられる。この玄武岩層は、発泡した輝石カンラン石玄武岩であり、0.2～1.5 mm のカンラン石の斑晶を 25%程度含む。基質は、斜長石であり、チタン磁鉄鉱を少量含む。カンラン石と基質とは、やや変質しており、スメクタイト化している。また、発泡部にもスメクタイトが充填している (Premoli Silva et al., 1993)。

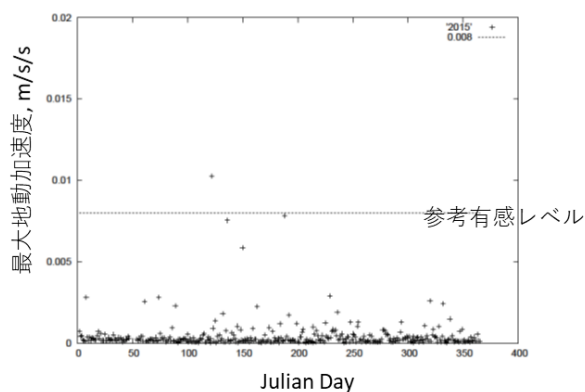
このように、周辺の海山におけるボーリングコアデータに基づく、炭酸塩岩類や玄武岩類には、多くの間隙が存在し、特に、深部での玄武岩では、変質したり、スメクタイト（粘土）化したりしている部分も存在し、地下空間利用における障害となりうる。ただし、南鳥島の地質構造を考える上では、この海山でのデータは参考資料にすぎず、海山にはそれぞれ個性があり、南鳥島に関しては、実際に掘削しないと、その実態がわからないことを付記しておく。

2.1.3 遠隔離島の基盤の長期安定性と地震活動

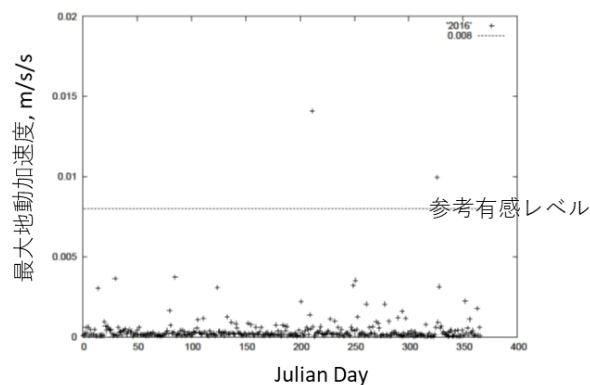
プレート境界域に近接しているため、火山活動や地震活動が活発な我が国の大部分と異なり、我が国の南方海域に存在する沖ノ鳥島、沖大東島、南鳥島等いわゆる遠隔離島は火山島として誕生したものであるが、火山活動が終焉してから一千万年以上が経過している。またプレート境界から離れており、プレート運動を考慮しても向後数百万年は地殻変動に巻き込まれないことが予想される。例えば太平洋プレート上に位置する南鳥島では、プレートが沈み込む伊豆・小笠原海溝までは 1000km 以上離れている。太平洋プレートの移動速度は 8cm/年と言われており、沈み込むまでに一千万年の時間スケールで安定している。また、沖大東島はフィリピン海プレート上に位置しており、沖大東島が沈み込む南西諸島海溝までは 200km 以上離れている。フィリピン海プレートの移動速度は 3～5cm/年であり、数百万年程度の安定性を有する。

これらの遠隔離島において継続した定常的な地震観測が行われるのは最近であるが、南鳥島において、海洋研究開発機構、気象庁気象研究所および東京大学地震研究所が共同研究として観測を開始した 2015 年以降では、南鳥島周辺を震源とする有感となる地震は検出されていない。但し、公式には報告されていないが、海溝沿いの大規模な地震から励起される、海中を伝わる音波 (T 相) による有感レベルの地動が数回記録されている (図 2-1-1)。

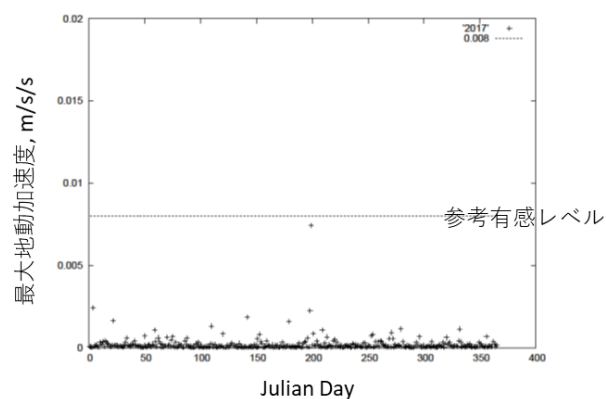
2015



2016



2017



2018

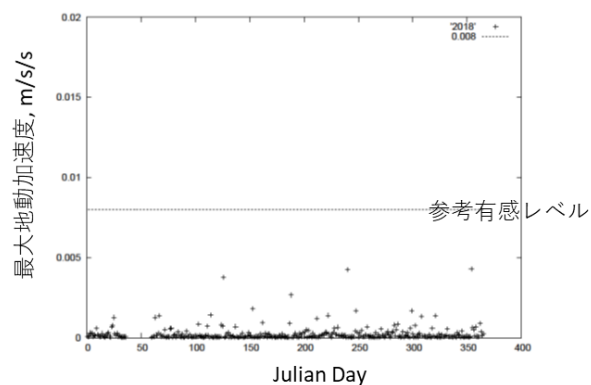


図 2-1-1 南鳥島で観測される地震動 (石原 靖, JAMSTEC, 2019)

参考文献

速水浩一, 永藏克己, 阿部博, 真角聡一郎, 熊坂文雄, 林田政和, 杉山伸二, 牛島学, 鮫島真吾, 池田俊一, 神田静恵, 打田昭雄, 小川正泰, 飯塚正城, 中川正則, 山崎誠一, 井上渉, 及川幸四郎, 2001, 「南鳥島西方」「南鳥島」「南鳥島東方」の大陸棚調査速報. 水路部技報, 19, 30-50.

石原丈実・藤岡ゆかり(2015):地殻構造調査結果を反映させた重力モデルによる西太平洋海域の地殻の密度構造, 124(5), 749-771, 地学雑誌.

海上保安庁水路部(2001):5万分の1沿岸の海の基本図 海底地形地質調査報告書「南鳥島」

金田謙太郎・西沢あずさ・及川光弘(2015):太平洋プレート北西部およびフィリピン海プレートにおける大規模な地震波速度構造探索—海上保安庁による調査結果—,124(5),787-811, 地学雑誌.

Kawabe, M., Yanagimoto, D., Kitagawa, S., 2006, Variations of deep western boundary currents in the Malanesian Basin in the western North Pacific. Deep-Sea Research I, 53, 942-959,

doi:10.1016/j.dsr.2006.03.003.

河野尊臣, 平野直人, 森下泰成(2016):南鳥島の形成過程とその周辺海丘群の火山活動, 日本地球化学会年会講演要旨集,63,282-282,日本地球化学会,DOI

Premoli Silva, I., Haggerty, J., Rack, F., et al., 1993, Site 878. Proceedings of ODP Initial Reports, 144: College Station, TX (Ocean Drilling Program), pp. 331-412.

横山泉, 中村一明, 荒牧重雄, 1992, 火山 (地球科学選書). 岩波書店, 306p.

石原 靖(2019), 南鳥島で観測される地震動, 海洋研究開発機構 地震津波海域観測研究開発センター

2.2. 遠隔離島の地下水理

遠隔離島における地下水理に関する研究はそれほど多くなされているわけではないが、南太平洋のムルロア(Mururoa)環礁を対象とした研究(Henry et al., 1996; IAEA, 1998)や中部太平洋マーシャル諸島にあるエニウェトク(Enewetak)環礁を対象とした研究 (Sanford et al., 1998; Jones et al., 2000; 2002; 2004) が知られている。本節ではこれらの研究の紹介を行う。なお、これらの研究の成果からは、遠隔離島の地下水流動を引き起こす駆動力は多様なものがあり、一般に想像するよりも地下水流動は活発であると考えることが妥当なのかもしれない。

2.2.1 ムルロア(Mururoa)環礁を対象とした研究(Henry et al., 1996; IAEA, 1998)

ムルロア(Mururoa)環礁はフランス共和国による地下核実験が実施された島であり、IAEA(1998)の研究はその結果、地下に放出された放射性核種の地下水流動に伴う移行を評価することを目的として行なわれたものである。そのため、IAEA(1998)のレポートには、地下核実験に伴う岩盤破壊やそれに伴う新たな亀裂を通る地下水流動系の評価等もなされている。一方、今回の調査研究においては、岩盤破壊を受ける前の地下水流動に関する評価検討が重要な情報となる。

ムルロア(Mururoa)環礁では上記のような経緯があるために、地下地質に関する調査や地下温度分布の計測がなされている。その結果は図 2-2-1 に取りまとめられている。この島は地表(海面)から深さ約 300 ないし 400m ぐらいまでは石灰岩から構成されており、それより深部は玄武岩からなっている。島のラグーン及びリムのところからそれぞれ 1 本のボーリングが掘削されており、地質及び地下の温度情報が得られている。また、島の近傍の海水温の鉛直分布も求められている。この結果からは、地表から石灰岩の最下部に向けて地下の温度は減少していき、その後、玄武岩の領域に入ってから温度が上昇していることが見て取れる。このことから、海洋の低い温度の水が玄武岩/石灰岩境界を卓越する流路として島の地下に浸入し、温度構造を規制していることが想定される(図 2-2-1 上)。

このような地下水流動系を評価・検討するための数値解析もなされている。表 2-2-1 は、IAEA(1998)で用いられている地下水流動・熱挙動数値解析の基本ケースに用いられている物性値を示す。この解析における境界条件は以下のとおりである。ラグーン及びリムの温度は一定とし、海底面の温度は図 2-2-1 下の海洋の温度条件を設定している。また、島の基盤から一定の熱流量が与えられている。その値について IAEA(1998)では明確に記載されていないが、Henry et al. (1996)の解析を念頭においていることに基づくと、その値は 50mW/m^2 と想定される。この計算においては、リムの部分に存在する淡水については考慮しておらず、簡単のために、地下水の塩濃度は一定としている。数値解析は case 1 から case 6 までの 6 つが実施されている。すなわち、上述のように表 2-2-1 の物性を用い、二次元断面モデルとしたものを case 1 とし、同様のモデルで軸対象モデルとしたものを case 2、石灰岩を上部と下部に分け、下部石灰岩の物性を表 2-2-1 に示すものとし、上部石灰岩の透水性を 1 オーダー小さく($K=10^{-5}\text{ m/s}$)、間隙率を 0.1 小さく($\varepsilon=0.3$) 設定したものを case 3 としている。それ以外の 3 つのケースは、石灰岩の透水性を表 2-2-1 から 5 倍

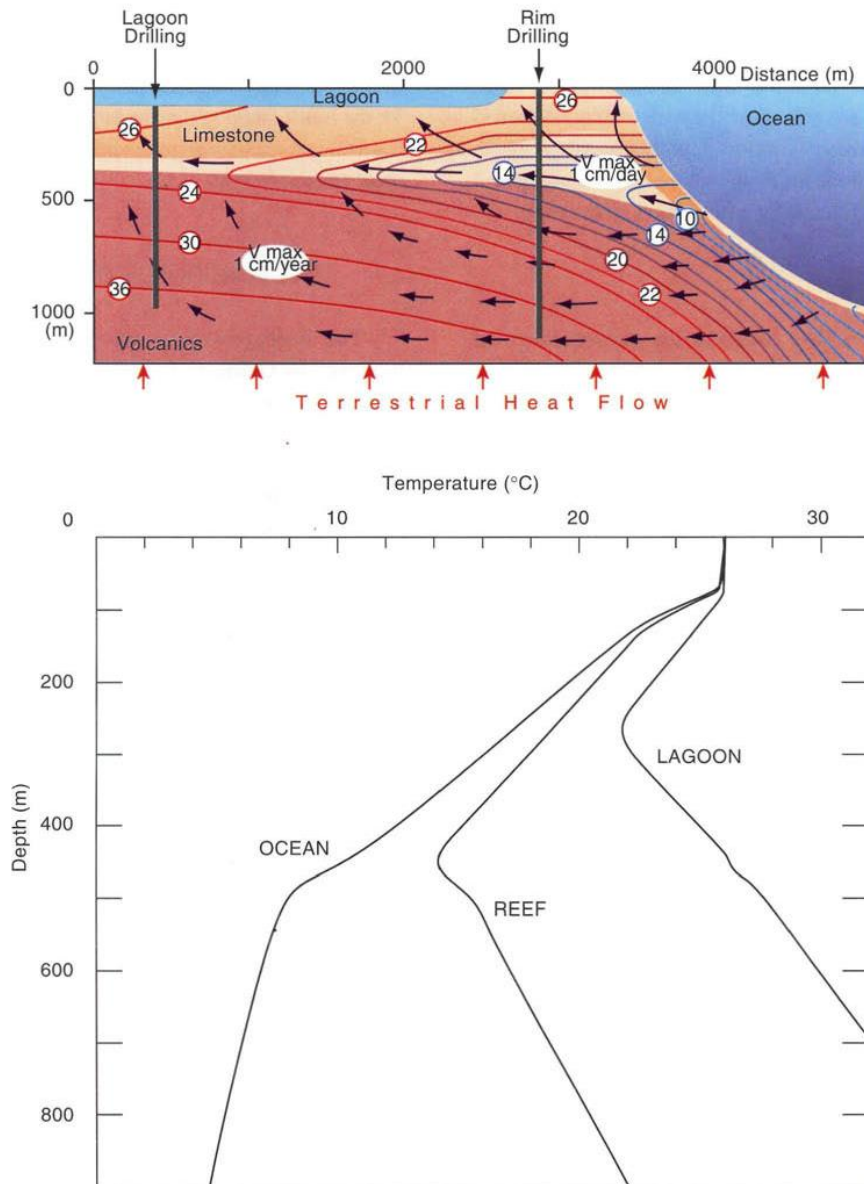


図 2-2-1 ムルロア (Mururoa) 環礁の地質・地下水流動・温度分布の概念図 (上) とボアホールの温度プロファイルと海水温度の深度プロファイル (下) (IAEA, 1998)

大きくしたもの(case 4), 石灰岩の透水性に異方性を設定したもの(case 5), 石灰岩の最下部にカルスト状構造があると想定し, その領域(10m 区間)の透水性を 10^{-2} m/s と極めて大きくしたもの(case 6)が実施されている。

Case 1 から 3 の解析結果は, 図 2-2-2 及び図 2-2-3 に示されており, いずれの場合も, 石灰岩の下底の部分に温度の極小が形成されていること, 石灰岩中のみならずその下に存在する玄武岩中でも浮力に伴う地下水流動が発生していること, 海底面から地下に流入した水が, 島の中央付近で上向きに流れの方向を変え, 最終的にはラグーンに流出することが見て取れる。なお, これらの計算によると, 島の中心付近の上向きの Darcy 流束は, 玄武岩の領域において年間数 mm,

石灰岩の領域では年間数 10cm から数 m となっている。

図 2-2-4 は case 1 から 6 の計算結果の温度分布と計測されたそれを比較したものであるが、その結果からは、IAEA(1998)が行なっている計算は、少なくとも計測された温度構造を十分によく説明するものになっているといえることができる。

表 2-2-1 ムルロア (Mururoa) 環礁の地下水・熱挙動解析において基本モデルとされた物性値一覧 (IAEA, 1998)

TABLE XXXIV. REFERENCE VALUES OF PARAMETERS USED IN FEFLOW SIMULATIONS

Parameter	Carbonates	Volcanics
<i>Matrix parameters</i>		
Hydraulic conductivity, K (m/s)	10^{-4}	10^{-7}
Porosity, ϵ	0.4	0.1
Specific storage coefficient, S (m^{-1})	10^{-4}	10^{-4}
Thermal conductivity, λ_s ($J \cdot m^{-1} \cdot s^{-1} \cdot K^{-1}$)	2	2.5
Volumetric heat capacity, $(\rho c)_s$ ($10^6 J \cdot m^{-3} K^{-1}$)	2.2	2.2
Longitudinal thermal dispersivity, α_L (m)	10	10
Transverse thermal dispersivity, α_T (m)	1	1
<i>Fluid parameters</i>		
Salinity (g/L)	34	34
Thermal conductivity, λ_f ($J \cdot m^{-1} \cdot s^{-1} \cdot K^{-1}$)	0.65	0.65
Volumetric heat capacity, $(\rho c)_f$ ($10^6 J \cdot m^{-3} K^{-1}$)	4.2	4.2
Density and viscosity	High order temperature dependent functions are used	

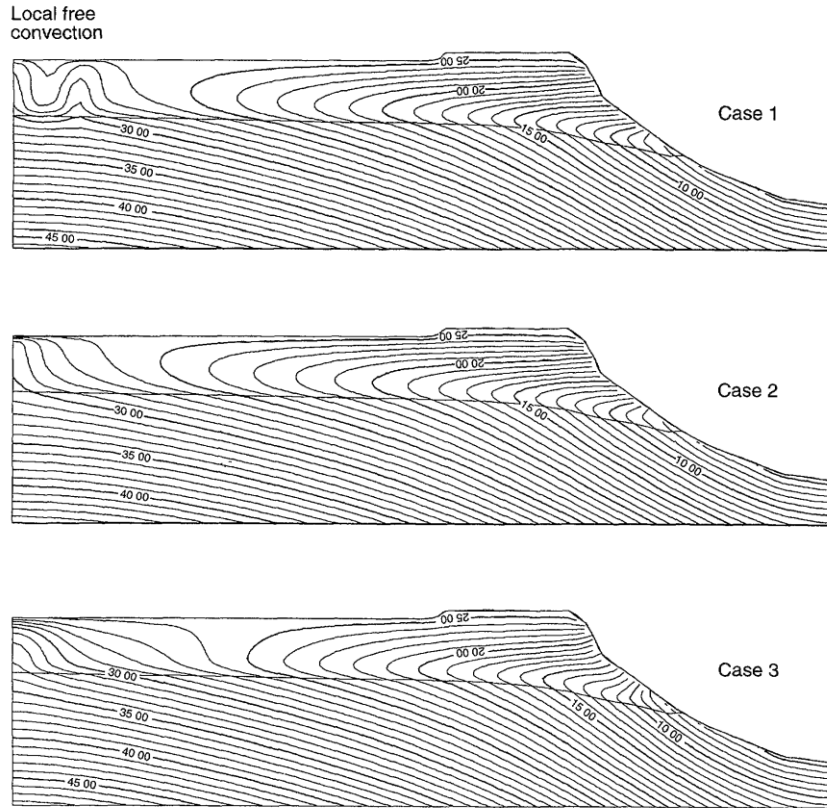


図 2-2-2 ムルロア (Mururoa) 環礁を対象とした解析結果 (温度分布) (IAEA, 1998)

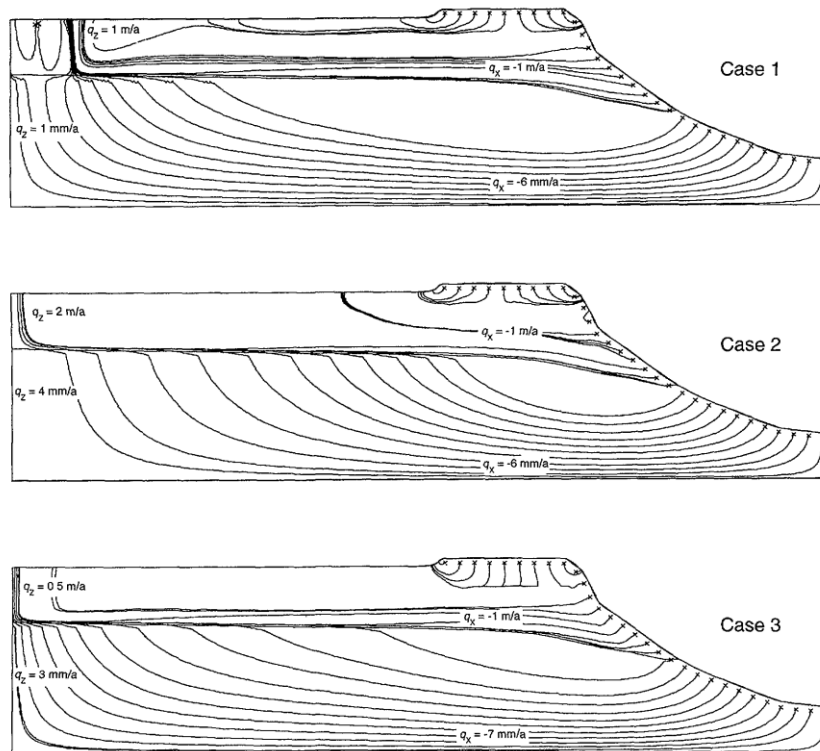


図 2-2-3 ムルロア (Mururoa) 環礁を対象とした解析結果 (Darcy 流束分布) (IAEA, 1998)

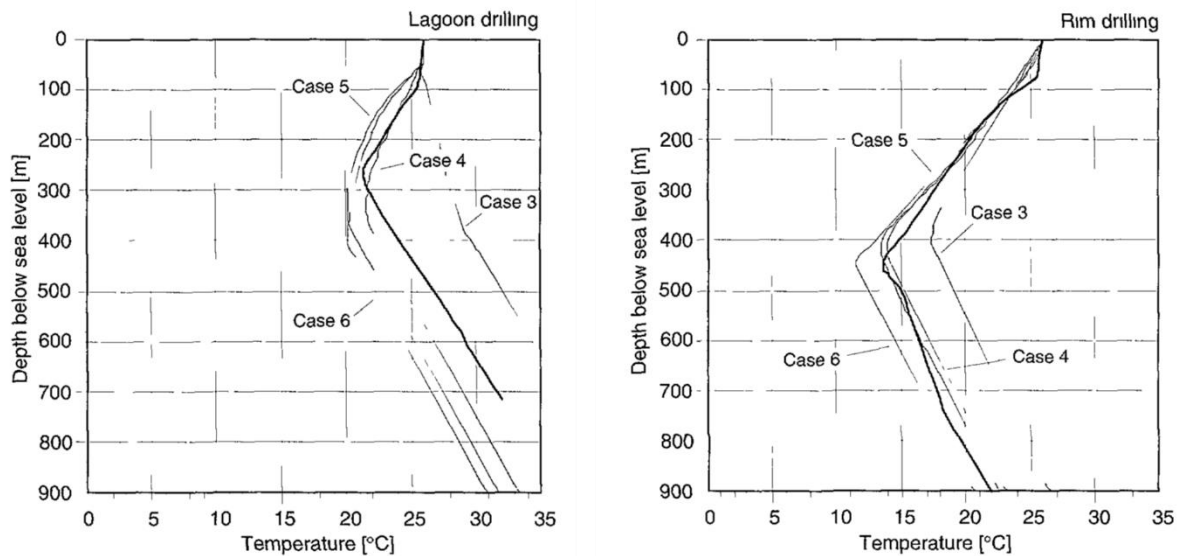


図 2-2-4 ムルロア (Mururoa) 環礁を対象とした数値解析結果と計測値の比較 (IAEA, 1998)

2.2.2 エニウェトク (Enewetak) 環礁を対象とした研究 (Sanford et al., 1998; Jones et al., 2000; 2002; 2004)

Jones たちのグループは、エニウェトク (Enewetak) 環礁での地下水流動評価を目的とし、数値解析モデルに基づく検討を行なっている。特に、reflux (ラグーンが外洋と隔離されたときに発生する蒸発によるラグーン内海水の密度上昇) の影響と地殻熱流量の影響の評価がターゲットとなっている。なお、このグループのモデルにおいては、海底面の深さを 3km とし、その上に海山が海面まで存在する形となっている。そのうえで、海面から 5km までの領域は透水性が高い領域として設定、約 5km よりも深い領域は、モデルの下底まで透水性を極めて小さい値に設定 (透水性を上領域より 4 オーダー低く設定) し、その領域は熱伝導のみによって熱が移動するという形にし、地下水流動による島内部での熱挙動に下底の境界設定の影響が与えられないような工夫をしている。

Jones たちのグループは、透水性に異方性 (水平方向の透水性が鉛直方向の透水性の 1000 倍) をつけており、その結果からは、ムルロア (Mururoa) 環礁のときの計算結果と同じように、海底面および海山の斜面の透水性の高い領域から地下への水の流入が認められ、島の中心付近において、上向きのフラックスが発生することが明瞭に示されている。また、水平方向の透水性に応じて、島の中心部の温度が変化することがわかる。なお、5 km の深度において、計算上の温度の最大値は 200°C となっているが、その値は、水平方向の透水性が大きくなると急激に低くなっており、条件によっては、5 km の深度においても、その温度が 100°C よりも低くなるという状況が発生しうることを示している。

図 2-2-5 は、10 万年ごとにラグーンが外洋と隔離され、いわゆる reflux が発生するという条件で行なった計算結果の事例である。この図からは、reflux が発生する系においては、流線がそ

れまでに示された計算結果と全く違っており、ラグーンから下向きに地下水が流動し、その流れが支配的になっていることが示されている。一方、極めて小規模ではあるが、海底からの水の流入も認められており、ラグーンから下向きの密度流による流れと、地殻熱流量による浮力の発生に伴う流れが複雑に起こる場が遠隔離島の地下に形成される可能性があることが示唆されている。

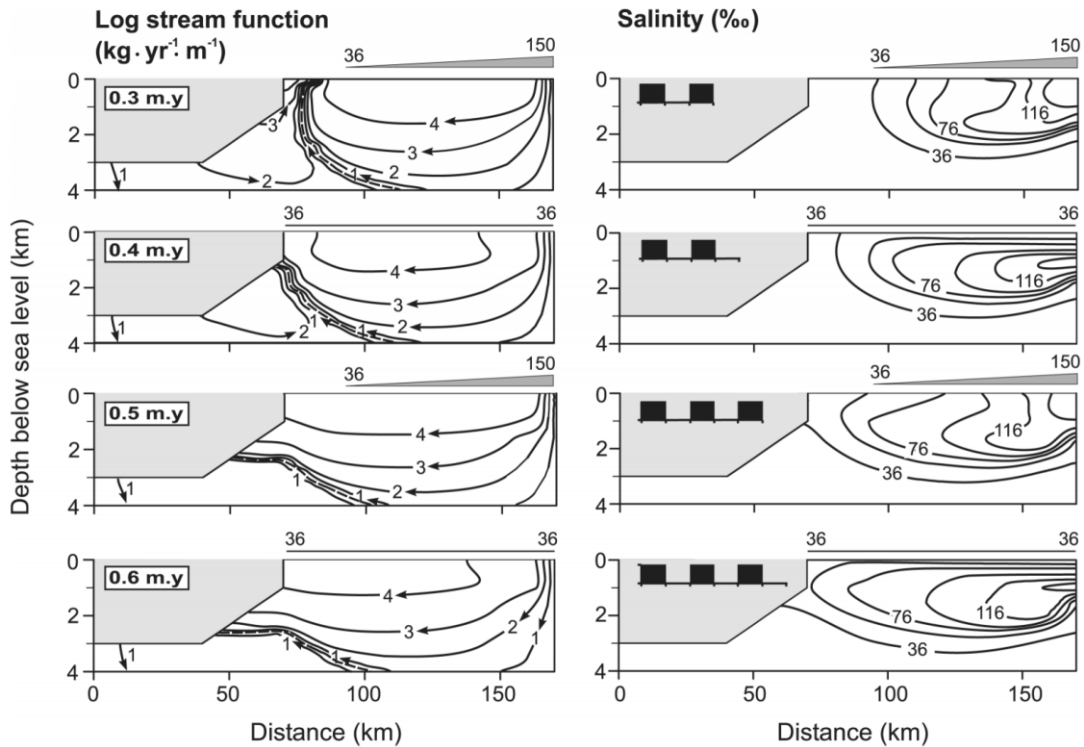


図 2-2-5 reflux が発生する場における地下水流線(左)と地下の塩濃度分布(右) (Jones et al., 2002)

2.2.3 小括

遠隔離島の地下水流動・熱挙動に関しては、数値解析的手法を用いることにより、その現象を追跡することは可能なように思われる。なお、そのモデルには水・熱・溶質移動を取り扱えることが必要となる。一方、最近の一般的な地下水学で用いられている数値解析モデルの多くはこれらの現象を取り扱うことが可能となっており、その観点からはモデル化に基づく研究は実施できると考える。なお、その場合に重要になってくるのは境界条件の設定と物性値、物性分布・物性の異方性等であろう。特に、ラグーン内部の濃度上昇による特有な流れ場の発生 (reflux)、透水性の異方性に伴う浮力に駆動される流れの発生の仕方の違いなどが議論されることが想定される。一方、ムルロア(Mururoa)環礁の研究成果に基づけば、掘削孔の温度プロファイルや、場合によっては塩濃度等のプロファイルが、計算結果との比較で有用な情報となりそうである。いずれにせよ、遠隔離島の地下水流動・熱挙動は、多彩な駆動力が存在することもあり、複雑な可能性が

あることは念頭に置いておくことが必要であろう。

参考文献

- Henry, P. et al., A convective model of water flow in Mururoa basalts, *Geochim. Cosmochim. Acta* 60 (1996) 2087-2109.
- IAEA, The Radiological Situation at the Atolls of Mururoa and Fangataufa. Radiological Assessment Reports Series 1, IAEA, Vienna (1998) 282pp.
- Jones, G. et al., Numerical modelling of geothermal and reflux circulation in Enewetak Atoll: implications for dolomitization, *J. Geochem. Explor.* 69-20 (2000) 71-75
- Jones, G. et al., Fate of reflux brines in carbonate platforms, *Geology* 30(2002) 371-374
- Jones, G. et al., Numerical analysis of seawater circulation in carbonate platforms: II. The dynamic interaction between geothermal and brine reflux circulation, *Amer. J. Sc.* 304 (2004) 250-284
- Sanford, W. et al., Numerical analysis of seawater circulation in carbonate platforms: I. Geothermal convection, *Amer. J. Sc.* 298 (1998) 801-828

第3章 遠隔離島および周辺海域の調査技術

3.1 遠隔離島周辺の海底地形調査

3.1.1 海底地形情報の必要性

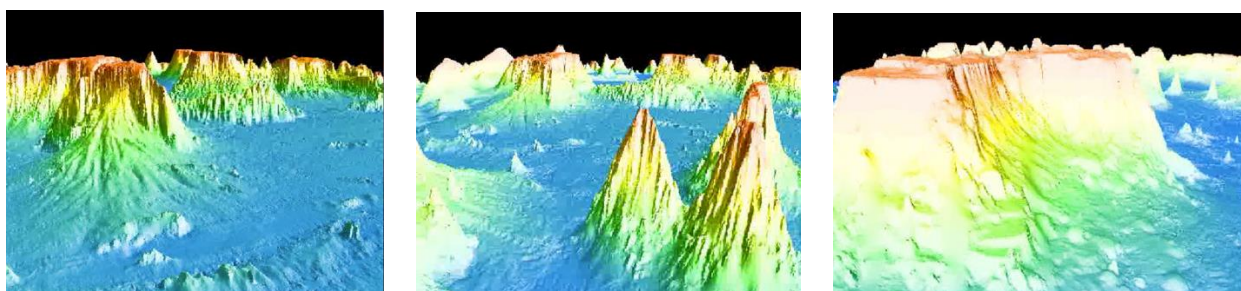
海底地形は、海底の状況を知る一義的な情報であり、遠隔離島およびその周辺海域の成因や現在までの変化(成長)の過程を探るための糸口でもある。遠隔離島の安定的な地下利用を考える際に以下の2点で海底地形は重要な役割を果たす。

a) 透水性

火山島であった遠隔離島の水面下は相当な透水性を有する可能性がある。マクロな透水性は、深部ボーリングで地下水を採取し年代分析することにより推定することとなるが、遠隔離島の海底下の詳細な地形及び表層の組成から当該離島の成り立ちが推定でき、透水性に関する理解を深めることができる。このためには1mオーダーの水平解像度の地形情報のほか、山腹のサイドスキャンイメージ、光学写真、表層のサンプルが有効である。

b) 安定性

太平洋プレート上の複数の大規模海山の山腹には、大規模な崩壊の跡と思われる地形が見られる(下図参照)。海底地形図と表層音波探査の記録から、崩壊地形とともに形成されたと思われる崩壊流が堆積した地形は、崩壊した山腹から数百キロ先まで及ぶ場合があるように見える。このような山腹崩壊が海山の歴史のどの時期にどのような理由で発生したのかは、遠隔離島の現在及び今後の物理的な安定性を検討する際に重要な情報となる。このためには巨視的な100mオーダーの水平解像度の地形情報に加え、谷頭部付近及び崖錐部での数メートルオーダーの水平解像度の地形情報、谷頭部及び崖錐部のサイドスキャンソナー情報、流下堆積物の層厚を押さえるための表層探査情報が有効である。



3.1.2 海底地形情報の現状

現在、自由に入手可能な海底地形情報としてはGEBCO2014がある。GEBCO_2014 gridは南北それぞれ30弧秒<赤道域で約500m>のグリッドで全球を覆うグリッド水深データで、全グリッドの18%は実測水深に基づくが、残り(82%)は人工衛星海面高度計で得られた海上重力値を用いて周辺の水深値から誘導した水深値が採用されている。我が国が大陸棚調査を

行った海域については海上保安庁が測量した水深データから構築したグリッド値を GEBCO に提供しており、この海域の GEBCO2014 は他の海域に比べて圧倒的に誘導水深値が少ないため、巨視的な地形把握を目的とした使用には十分使用できる。(著者注：本稿完成時までは日本財団-GEBCO Seabed 2030 事業の第一弾の成果として GEBCO_2019 grid が公開されている見込みである。GEBCO_2019 grid はグリッドサイズが 15 弧秒<赤道域で約 250m>となり、グリッド作成を下支えする水深データ量は飛躍的に増えている。)

海上保安庁の測量データ自体は公開されていないが、学術目的その他海上保安庁が必要であると認めた場合、グリッド化される前のデータの提供を海上保安庁から受けることができる場合があるようである。大陸棚調査は海洋法条約に基づく大陸棚延伸の基礎資料を得るため 1983 年から 2008 年までの 28 年間にわたり実施されたものであり、測量された時期によって測位精度、測深精度、測量区域内のカバレッジ（音響測深が行われた比率）がかなり異なる。また、大陸棚延伸に直接関係すると判断された場合には海山の浅部に至るまでフルカバレッジに近い測量が行われるが、そうではないと判断された場合には浅部に未測域が多く残っている。これはマルチビーム音響測深の場合、測深できる幅が水深が浅いほど狭くなるのが理由である。浅所でフルカバレッジの測量を行おうとすると測線間隔を稠密にする必要があり、限られた測量時間内で任務を達成するため、已むを得ない場合以外は浅所に未測域が残っても已むを得ないとされた模様である。

海上保安庁以外に国立研究開発法人海洋研究開発機構(JAMSTEC)がいくつかの遠隔離島及びその周辺海域においてマルチビーム音響測深測量を行っており、水深データが利用可能である。

拓洋第五海山ではコバルトリッチクラストに関する調査が行われてきており、AUV や ROV による高解像度の地形情報が得られているが、公開されているものは、あるとしても限られている。遠隔離島において AUV や ROV を用いた高解像度の地形調査が行われたという話は知られていない。

3.1.3 海底地形調査

海底地形を把握するためには水深という物理量を使用することが一般的である。この他に、人工衛星に搭載された海面高度計のデータから海面重力を算出し、これと既知の水深を基に未調査の海底地形を導出する方法や、海底地形の傾斜による音波の反射強度の違いを基に海底地形を妄想すること等も状況によっては有効な手段である。

水深は水面から海底表面までの距離である。この物理量の計測にはいくつかの方法がある。電磁波の伝搬が容易ではない海水を介しての計測であるため、いろいろな制約が加わる。電波は殆ど海水に浸透しないため、レーダーでの水深測定は行われていない。光は海面下に浸透するが精々数十メートルまで計測するのが限界である。光を用いる方法の一つはエアボーンライダー測量と呼ばれ、航空機から発射したレーザー光の往復時間を計測して水深

値を得る。透明度が高い海域では40m以深まで測量できる。エアボーンライダー測量の精度は音響測深には劣るものの海図に採用できる精度のデータが得られる。

海水中を通過する光の減衰率が周波数で異なることを用いて航空写真または衛星写真から水深を推定する手法があり、透明度や底質によっては30m以深まで測量できる。この方式の測深精度は水深の10%程度とされ、海図には採用できないものの、音響測深が行えない浅所の地形の概要が分かる上、音響測深やライダー測量に比べて経費が圧倒的に安く、成果が迅速に得られるメリットがある。また遠隔地で測量船や航空機が手配できない海域でも誤差を覚悟できるなら水深情報がほぼ即座にデスクトップで得られる点で優れている。

数十メートル以深の水深測量は、測鉛（レッド）とワイヤーを使用するか、音波の往復時間を計測するか、海底に水圧計を投入して圧力を計測するぐらいしか方法がない。音波の往復時間による水深測量（音響測深）には、いくつかの問題はあるものの時間的・経費的に他の二つより圧倒的に有利であるため、専ら音響測深が水深の計測に採用されている。音波は周波数によっては世界最深部までも届くが、音波の到達深度と解像度や精度は裏腹の関係にあり、到達深度最大・解像度最良という選択はできない。このため、この方法で測れば、という決め手がなく、必要な水平解像度、鉛直精度、センサーから海底までの距離等々を考慮して、最適な（あるいは最善の）周波数を選ぶこととなる。

さて水深は水面から海底表面までの距離であるが、ここで「海底の表面」は自明か、というとなかなか難しい。ヘドロのようなものが柔らかく降り積もっている場合、ヘドロ表面をどのように定義するかは難物である。目で見た感じと手で触った感じすら異なるかもしれない。水深測定の場合、水と海底の物性的な違いが顕著な点（あるいは変化が始まる点）を持って海底ということになる。測鉛測量の場合、一定の地耐力を期待して測鉛を下ろして水深を計測するが、測鉛の単位面積当たりの重量によってこの点の深さは変わる。重ければめり込むからである。音波の往復時間で計測する場合、音響インピーダンスの違いが顕著な点をもって海底面と判断することとなる。音響インピーダンスは物質の密度と物質内音速に依存する。物質の地耐力の変化点は音響インピーダンスの急激な変化点とは必ずしも一致しない。光学的反射面もこれらとは一致しないだろう。したがって計測に用いる手法によって「海底の表面」は異なる。

このため、測鉛測深、音響測深、レーザー測深、あるいはこれら以外の方法で得られた水深は本質的に異なった反応点なり反射点を海底と認識しているものであって、異なった値が得られたとしても不思議はないことを了知しておく必要がある。

3.1.4 水平解像度

海底の地形情報から何を把握したいかによって必要な水平解像度は異なる。100m等深線で描けば目的が叶えられるような地形情報が必要な場合であれば、水深値の水平方向の解像度は概ね100mオーダーあれば十分である。崖錐の転石を描き出したいというような調査目

的であれば、水深方向も水平方向も解像度がメートルオーダーであって欲しい。海底にラバフローがあるかないかを水深データから判定しようとするれば 10cm オーダーの水平解像度で地形を計測する必要がある。ただ、水深以外の情報、例えば海底表面での音波の反射率を加えることで、DTM（デジタル地形モデル）のみから得られる情報よりもわかりやすい表現が可能になるため、サイドスキャンイメージを併用すれば、水深データの水平解像度が一桁粗くても海底表面の性状の理解は十分可能である。

(1) 現実

沖ノ鳥島、沖大東島、南鳥島のような遠隔地の離島は、深海平原から屹立していることが多く、これらの島嶼の裾（深海平原と接する線）は 5000m 以上の水深を持つ。このような大水深を海面上から広範囲に測定するのは現実的には音響測深によるしかない。水深 3000m 以深 7000m までの水深測量において民生用で最も水平方向の解像度が高いとされる音響測深機である Kongsberg 社の EM302 マルチビーム音響測深機の最もシャープなビームは 0.5 度（船の前後方向）×1.0 度（船の左右方向）であり、水深 5000m においては音波ビームのフットプリントは 45m×90m 程度になる。遠隔離島及びその周辺海域の巨視的な状況の把握には十分に適切であるが、山体の透水性や山体の安定性を議論しようとする場合、この程度の水平解像度では不十分である。

(2) 水平解像度を向上させる方法

音波の指向角は周波数と送受波機の大きさで決まる。同じサイズの送受波機なら周波数が高い方が音波ビームの指向角は狭く（音波ビームが細く）なり、同じ周波数なら送受波機のサイズが大きい方が音波ビームの指向角が狭くなる。R2Sonic 社の SONIC 2024/2026 マルチビーム音響測深機を例にとれば、長さ 27cm の送受波機が作り出すビームの幅は 200kHz で 2 度、450kHz で 0.9 度、700kHz で 0.6 度であるが、長さ 48cm の送受波機の場合、同じ周波数に対して音波ビームの指向角は長さ 27cm の送受波機の場合の半分（例えば 200kHz で 1 度）になる。Kongsberg 社の EM122 マルチビーム音響測深機では、12kHz で 0.5 度の指向角の音波ビームを作り出す場合、15.2m の長さの送受波機を選択する必要がある。より短い送受波機を採用すると指向角が広くなる。したがって船底のサイズが小さい船を用いて深海域の地形情報を高分解能で得るには合成開口など大変高度な手法を使う必要がある。

音波が遠くまで届くようにするためには、低い周波数の音波を使う必要がある。12kHz の音響測深機で水深 5000m の海底に 10cm の解像度の音波ビームを海面の測量船から送るとした場合、送受波機は 8km 程度の大きさが必要で（従って船底が 8km×8km の測量船が必要）、あまり現実的・実用的ではない。測深機が海底面上 10m まで近付けば、市販のマルチビーム音響測深機（例えば SONIC 2024 の耐圧 6000m バージョン）で水平方向 10cm の解像度で水深データを得ることができる。SONIC 2024 は ROV や AUV に装着可能であるため、この方法

は現実的である。

一方、ROV や AUV を使用した場合の水平位置の精度を解像度に見合ったオーダーで得ることは現時点ではあまり容易ではない。水深 5000m 付近で AUV や ROV の位置を把握する場合、現在は慣性航法装置 (INS) に超短距離基線 (SSBL) 音響測位装置やドップラー速度計 (DVL) 情報を加味して位置情報とするが、INS のドリフト、SSBL の性能上の限界等から、絶対位置精度を 10m より良くすることは大変困難なのが現状である。ただ、海上保安庁が実施している海底地殻変動観測で使用している GPS-A 手法では、海面下 2000m の海底に設置した音響トランスポンダの位置をセンチメートルオーダーで決定している。この手法を用いて海底に設置した LBL トランスポンダの絶対位置をセンチメートルオーダーで決定し、LBL (長距離基線) 方式の音響測位を使用すれば、ROV や AUV の位置精度をかなり向上させることは可能であろう。

3.1.5 鉛直精度

音波の往復時間で水深を計測する場合、鉛直方向の解像度は使用する音波の周波数に依存する。周波数が高い、即ち音波の波長が短いほど高い解像度が期待できる。一方で周波数が高いと水中での音波の減衰が大きくなるため、到達距離は短くなる。このためセンサーから海底までの距離が大きい場合、周波数を下げる必要がある。音響測深機が探査できる最大水深は、12kHz の音波を使用すれば 11000m (現在知られている地球海洋の最深部が 10920m)、30kHz の音波では 7000m 程度、200kHz で 400m、500kHz で 100m と言った感じである。即ち、水面からの音響測深の場合、水深が深いほど低い周波数を使用することが必要となる。即ち大水深では海面からの測量の場合、水深値の鉛直方向の解像度が低下する。

一方、精度に関しては解像度以外に正確さも問われる。音響測深機では距離を音波の往復時間で計測するため、通過する水塊の音波伝搬速度が正しく知られていなければ、往復時間を極めて正確に測っていても正確な測深値は得られない。水中の音速度は概ね 1500m/秒であるが、例えば 3000m を超えるような水深に対し音速度の補正 (音速改正と呼ばれる) を行わない場合、100m を超える差が出る。マルチビーム音響測深機やサイドスキャンソナーのようにセンサー直下ではなく斜め方向の水深を計測する場合、深さにより音速度が異なることにより音線が屈折し、センサーの直下ではない測深点の位置がずれ、水深値も誤差が発生する。音速改正は、水中音速計を投入して行うほか、水中音速度が水温、塩分、圧力により変化することから、CTD により水温・塩分のプロファイルを得、この値を基に水中音速度を計算する。水中音速計や CTD は、計測に際し船舶の停船を必要とすることから、XCTD (投棄式電気伝導度水温水深センサー) や、塩分の変化が無視できる海域では投棄式である XBT (投棄式水温センサー) を使用して水温 (・塩分) のプロファイルを得ることが行われている。親潮と黒潮のぶつかる海域のように海域の水塊構造が複雑な場合、氷海や河川水が流入する沿岸のように表層の塩分が深層と大きく異なる場合などでは、かなり頻繁に水温・塩分

のプロファイルを得ないと、マルチビーム音響測深機データの特に外側データにエラーが発生する。遠隔離島周辺海域では、暖水渦、冷水渦により水塊構造が変動するため、水温・塩分のプロファイルの適切・的確な確認が重要である。

3.1.6 山体の性状を地形から探る手段

サイドスキャンソナーは、海底から帰ってきた音波の反射強度を到達時間順に記録するので、海底における音波の反射能の違いや傾斜を面的に示すことができる。近年のマルチビーム音響測深機は、往復時間の情報だけでなく海底からの音波の強度も計測し、これから海底における音波の反射率に関する情報を提供できる。一方、干渉式サイドスキャンソナー（インターフェロメトリック・サイドスキャンソナー）は、水深情報をあわせて得ることができる。一般に干渉式サイドスキャンソナーはマルチビーム音響測深機に比べて測深値の精度（正確さ）に劣るが、一回の音波発信で遥かに広い範囲をカバーすることができる。干渉式サイドスキャンソナーは水深の20倍の幅を一回の発信でカバーできるが、マルチビーム音響測深機では4倍がせいぜいである。また、水深データの水平方向の解像度は干渉式サイドスキャンソナーでは数センチから数十センチであるのに対し、マルチビーム音響測深機ではその2倍程度（粗い）がせいぜいである。

崖錐における転石の存在の把握や、ラバフローの跡を検出するような目的の地形調査は、絶対水深が重要なわけではないので、干渉式サイドスキャンソナーの使用が適切であろう。

3.1.7 提案

我が国の遠隔離島の利活用を図るための基礎調査として、海底地形調査は重要である。既存データが利用できるため、これを基により詳細なデータの必要性を吟味する必要がある。

a) 海底調査を必要とする事項と理由を確認

① 山体の透水性

山体の透水性の把握の一助として、山腹の全体的な表面性状の把握が有効である。この件に関する既存の知見は乏しいため、安全サイドで見積もれば、水平解像度がメートルオーダーの地形情報、サイドスキャンソナー画像が有効と考えられる。絶対的な水深値が必要なわけではないので干渉式サイドスキャンソナーの使用が合理的であろう。

② 山体の安定性

山体の安定性を評価するため、山腹の全体的な地形、崩壊地形の下流側数百キロの全体的な地形が必要になる。我が国の遠隔離島においてはその周辺海域の大部分に既存の水深データが存在しているので、まず既存データを精査したうえで必要に応じ海面からマルチビーム音響測深を行うとともに、表層音波探査を行って流出土量を積算し、崩壊前の山腹形状の復元に資する。崩壊流の展開範囲を把握するためにサイドスキャンソナー画像が有用である。正確な土量の算出のためには絶対水深が必要であり、干渉式サイ

ドスキャンソナーによる水深ではなく、マルチビーム音響測深機による水深が必要となる。この場合、正確な水深値を得るため、適切・的確な音速改正を実施することが大変重要である。

崩壊の誘因を検討するため、崩壊地形の谷頭部において水平解像度数メートルオーダーの水深値及びサイドスキャンソナー画像が必要である。絶対水深値が必要なわけではないので干渉式サイドスキャンソナーの使用が合理的であろう。

崩壊地形の崖錐部分には崩壊に伴う転石が散開しているものと考えられ、崩壊の原因や時期の推定のために転石の分布やサンプルが有効かもしれない。転石の把握にはサイドスキャンソナー画像が有効であるが、水平分解能を確保するためディープトウあるいはAUV、ROVによる必要があるだろう。

b) 調査手順

- ① 既存データの点検
- ② 測量船から山体及び崩壊流全域に関しマルチビーム音響測深機及び表層探査装置により必要箇所の測量及び崩壊域全景のサイドスキャンソナー調査。
- ③ 山腹全体のサイドスキャンソナー調査。
- ④ 崩壊地形谷頭部の干渉式サイドスキャンソナー調査。ディープトウ、AUV、ROVによる必要があるとされるであろう。
- ⑤ 崖錐部に対しディープトウ、AUV、ROVによるサイドスキャンソナー調査。

3.2 遠隔離島周辺の地質調査

遠隔離島周辺の地質調査技術の検討に当たり、まず地下空間を利用する上で必要となる基礎データを整理する。次いで、遠隔離島周辺広域の概略調査から島内の詳細調査に関わる調査技術について記す。ここでは、より具体的な調査技術を示すために南鳥島を例として取り上げる。これらを踏まえたうえで、最後に技術課題と開発の方向性を示す。

3.2.1 地下空間利用の基礎データ

本委員会での「中間とりまとめ」において整理した遠隔離島の地下空間を利用するうえで必要となる地質調査技術に関する基礎データの概要を示す。

a) 成因

遠隔離島周辺の地下空間利用にあたり、その長期安定性を評価するためには、遠隔離島の成因や離島誕生後の地質的变化を把握することが重要である。これらの基礎データとして、地質層序、地層年代、地層の内部構造や堆積物組成を把握することが重要である。

b) 地質構造（炭酸塩岩と玄武岩の境界深度）

遠隔離島では玄武岩の基盤の上にサンゴ礁が形成され、石灰岩化により厚い炭酸塩岩層が形成される。地下空間利用の経済性を評価するためには、堅硬な岩盤の分布深度を知ることが重要であることから、地質構造、特に炭酸塩岩と玄武岩の境界深度を把握する必要がある。

c) 地盤物性（炭酸塩岩と玄武岩の物性）

遠隔離島の炭酸塩岩には空隙が多い層とコンパクトな石灰岩層が存在する。また、石灰岩との境界部の玄武岩は角礫状で空隙率が高いことが知られている。地下空間の掘削計画や長期安定性に関わるシミュレーションを精度良く実施するために、地盤の物性値（密度、比抵抗、空隙率、弾性波速度、強度特性等）に関わる情報が必要となる。

d) 地殻熱流量・温度分布

遠隔離島周辺のマグマ活動やプチスポットと呼ばれる、ホットスポットに起因しない火山活動による小規模な海山は、長期にわたる地下空間利用のための阻害要因となることから、遠隔離島周辺における地殻熱流量データの取得は必須である。

e) 深部地下水

地下空間に設置される鋼材の腐食やコンクリートの劣化を予測する上で、遠隔離島を形成する玄武岩および石灰岩の中に存在する地下水の性質（pH、溶存酸素、含有成分、含有される微生物等）に関するデータが必要となる。また、深部地下水の長期にわたる挙動を把握するために地下水の年代と浅部から深部にわたる地層の透水性、温度分布を知ることが重要である。

f) 水理特性

地下水の影響を考慮するために遠隔離島および周辺の水理特性が重要となる。先に示した地質構造と地盤物性について力学特性に加え透水性等の水理特性も合わせて把握することが

重要である。

g) 地すべり，山（島）体崩壊

遠隔離島海底部の地すべり，山体崩壊は，遠隔離島の安定性に大きな影響を与える可能性がある。これらの過去の履歴やその原因を推定するために詳細な海底地形調査（前項参照）とともに，山体浅部の地質状況に関するデータが必要である。

3.2.2 地質調査の流れ

ここでは，近傍の遠隔離島として南鳥島を例にあげ，可能な地質調査技術について整理した。地質調査は，表 3-2-1 に示すように大きく概略調査，掘削検層および詳細調査の三段階に分けた。第一段階の概略調査は，島周辺海域および島内の地表からの物理探査や各種観測を行う。第二段階の掘削検層は島内の地質構成が不明なことから，ノンコアボーリングでの試掘と掘削した坑井を利用した検層を実施する。第三段階の詳細調査は，試掘の結果を基に調査用のボーリングを実施し，試料の採取・観察および坑内での各種検層，原位置試験を実施するとともに，採取試料の各種室内試験を実施する。

概略調査は，遠隔離島の地下空間利用に関して基礎的なデータを取得することを目的とする。具体的には，島を構成する玄武岩と炭酸塩岩の境界深度，各々の岩の概略の物性や温度分布を把握する。さらに，地すべり・山体崩壊に関わるデータとして島周辺の浅部の地下情報や地殻熱流量，温度に関するデータを得る。

掘削検層は，島内の地下物性を把握することを目的とする。坑壁崩壊のリスクを考慮して坑内水は泥水のまま測定可能な種目で，速度，比抵抗，温度，密度，間隙率等の基本的な物性を把握する。

詳細調査は，上記の調査結果を踏まえ，地表からの調査（ボーリング，坑内試験および室内試験等）により遠隔離島の成因，地質・岩石特性，水理特性，地すべり・山体崩壊に関する情報，深部地下水の成分などのデータを収集し，遠隔離島の地下空間利用に関してシミュレーション等の検討を行うための情報取得を目的とする。

表 3-2-1 地質調査の流れ

調査段階	目的	内容	期間
概略調査 (第一段階)	地質構造・水理特性（玄武岩の概略出現深度，炭酸塩岩の概略透水性，玄武岩の概略の硬さ），地殻熱流量，地すべり・山体崩壊に関する情報	物理探査（微動アレイ，電磁探査，反射法地震探査）地殻熱流量，温度探査	1 カ月
掘削検層 (第二段階)	地盤物性，温度特性	ノンコアボーリング，物理検層	0.5 年～1 年 (GL-2000m)
詳細調査 (第三段階)	成因，地質構造，地盤物性，水理特性，深部地下水，温度特性	ボーリング掘削，試料採取・観察，検層，原位置試験 室内試験	2 年～3 年 (GL-2000m)

3.2.3 概略調査（第一段階）

概略調査は、「島内のみで行う物理探査，表層温度探査」と「島内と海上で行う反射法地震探査」に区分される。

(1) 島内のみで行う調査

島内の陸地を利用して地下構造を探索する方法として微動アレイ探査と電磁探査が考えられる。図 3-2-1 に微動アレイと電磁探査を行う場合の配置を示す。図中において三角形は微動アレイ探査時の最大アレイ，黒丸は微動計位置，十字は電磁探査（MT 法）測点位置(10 点)の位置を示す。

① 微動アレイ探査

微動アレイ探査は波浪などの自然現象や交通往来などの人間活動に起因する地盤の微小振動を，地表に群設置した地震計で同時観測し，地下の S 波速度構造を推定する調査技術である。

測定は，図 3-2-2 に示すように地震計を中心およびそれを囲む複数の三角形アレイで同時観測を行い，周波数毎のレイリー波の分散曲線の解析を行い，逆解析による最適な S 波速度構造の推定を行う。

地盤構造の推定例を図 3-2-3 に示すが，広域的な S 波速度構造を推定することができる。



図 3-2-1 微動アレイ探査および磁気探査（MT 法）の調査位置図

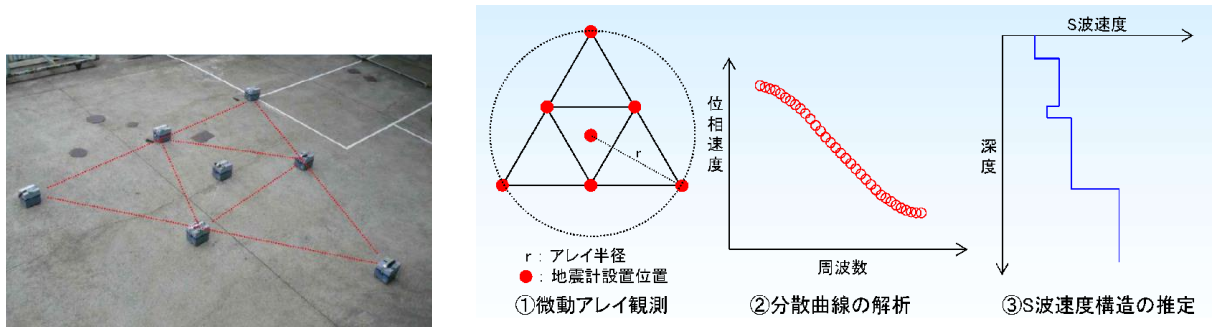


図 3-2-2 微動アレイの測定

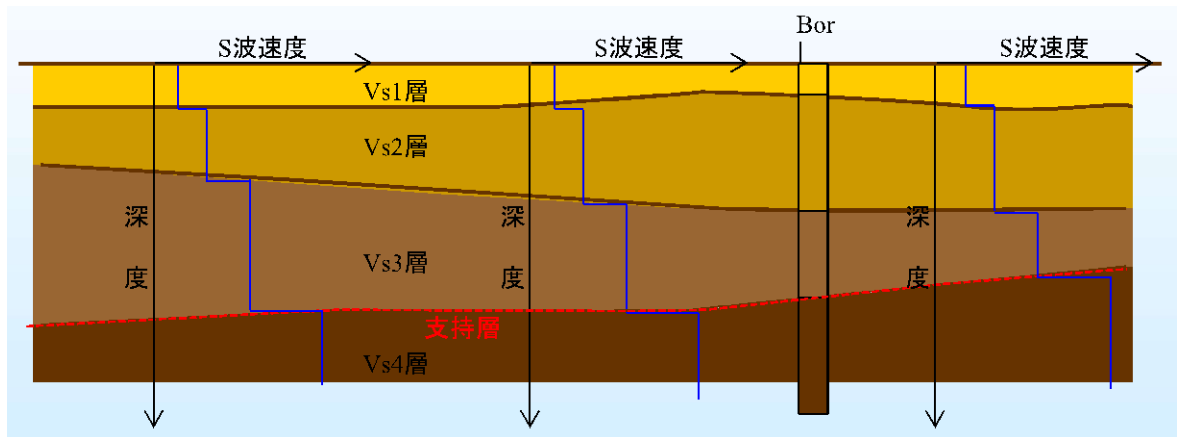


図 3-2-3 微動アレイにおける調査結果

② 電磁探査

電磁探査は、自然界に存在する電磁波を測定し、地下の比抵抗値を取得することにより、地下の地質構造を推定する方法である。

電磁探査の概要を図 3-2-4 に示す。

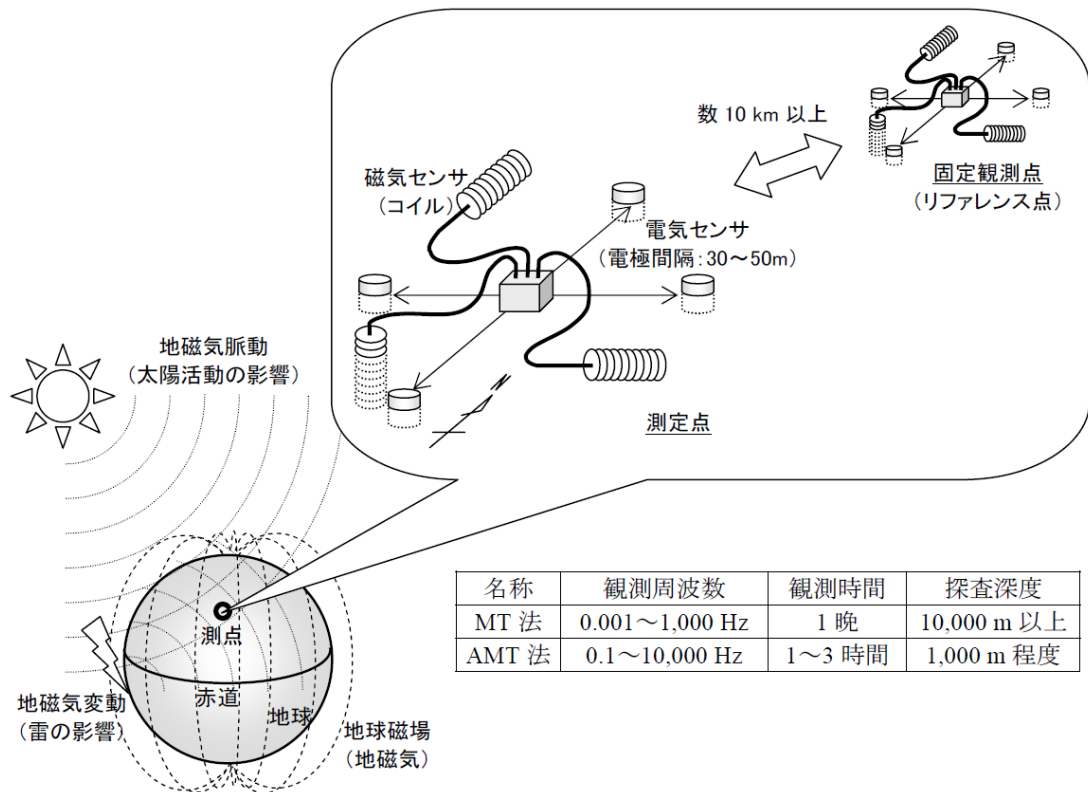


図 3-2-4 電磁探査の概要

(2) 島内と海上で行う反射法地震探査

島内と海上を利用して、深部の地質構造を探查する方法としては、反射法地震探査が考えられる。

図 3-2-5 に調査位置図を示す。島内の地表測点については、滑走路を使える場合と使えない場合の 2 案を示し、海域も含めた総測線長は 20km 程度を想定している。

受信方法としては、①島内には 10m 間隔で地表用受振器を設置、②浅海の水深数 10m までの環礁領域では、海底敷設型のバイケーブル(受振点間隔 10m, 96ch 等)を設置、③水深数 10m 以上の海域では、調査船を使用し、曳航型のストリーマケーブル(受振点間隔 6.25m, 48ch 等)を曳



図 3-2-5 島内と海上で行う反射法地震探査

航する。バイケーブルの設置およびストリーマケーブルの曳航概要を図 3-2-6 に示す。

発振方法は、海域で調査船を使用し、海中でエアガン(460cuin(平方インチ)を予定)によって発振する。

解析では、測定した時系列の波形データに対して、フィルタ処理や重合処理などを行い、反射記録断面を作成する。反射記録断面例を図 3-2-7 に示す。

留意点としては、石灰岩と基盤の玄武岩の弾性波速度差が小さい場合には、明瞭な境界を把握できない可能性が有ることである。

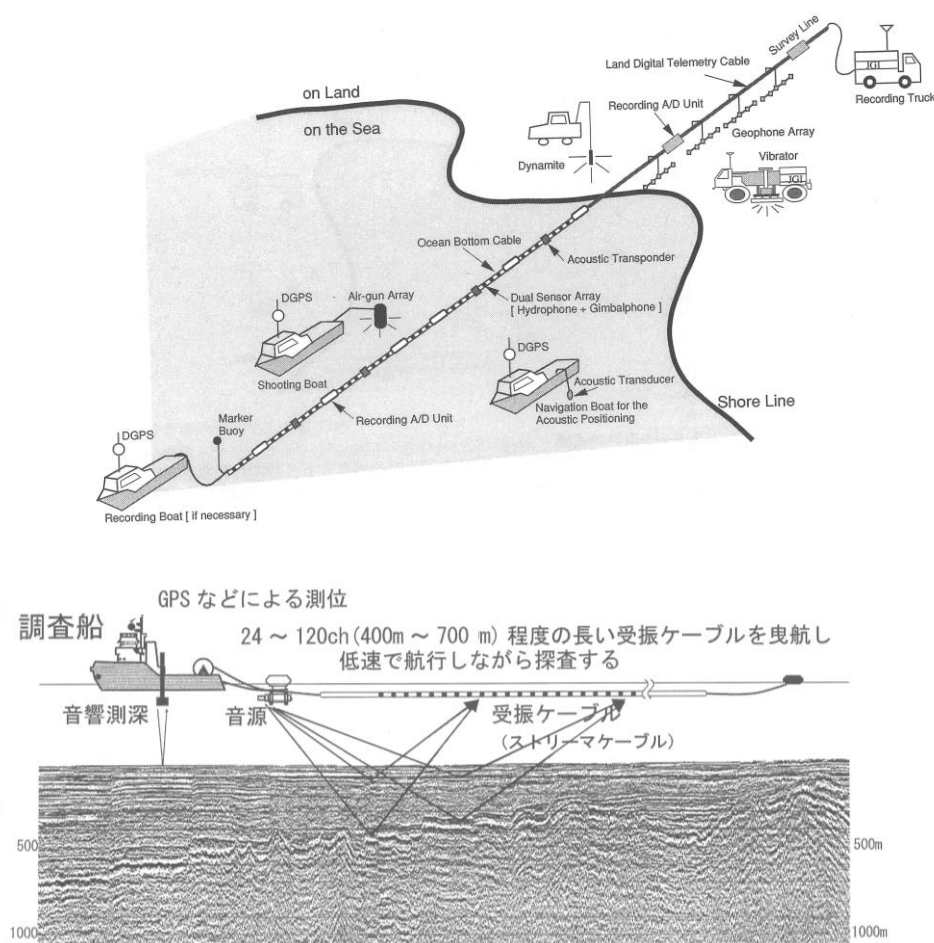


図 3-2-6 バイケーブルおよびストリーマケーブルによる音波探査測定概念図

上段：沿岸部におけるバイケーブルによる測定概念図（物理探査学会，1998）

下段：海域部におけるストリーマケーブルによる測定概念図（物理探査学会，2008）

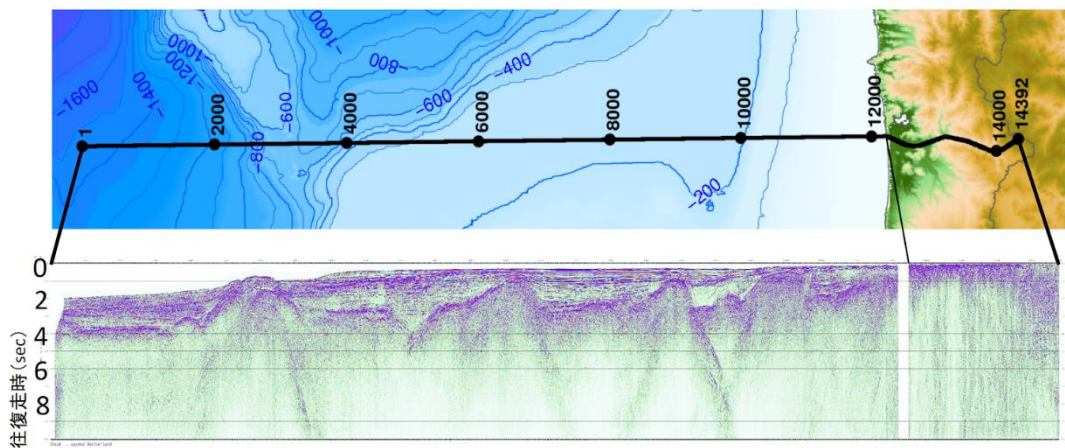


図 3-2-7 海域と陸域で連続した反射記録断面（重合断面）の例（文部科学省研究開発局・東京大学地震研究所，2016）

(3) 島内と海域で行う調査・観測

①地殻熱流量

地殻熱流量は、温度勾配とその場の物質の熱伝導率から求められる。陸域においては気温変化が大きいため数百 m 以上のボーリング孔を使用して温度測定を行う。一方、海域においては、水温変化が小さいことから測定が容易である。ピストン・コアラーの脇に複数の温度センサを付けたプローブを用いて測定を行い、温度勾配とその間の試料を採取する。採取した試料は室内試験により熱伝導率を求め地殻熱流量を算出する（物理探査学会，2016）。

②温度調査

島内において地下表層部の地下水流動状況の把握を目的とした温度調査としては、1m 深地温探査が用いられる。これは直径 2 cm 程度、長さ 130-150cm の半鋼製鉄棒をハンマー等で地中に 1m 打ち込んで作った孔に温度計を挿入し、削孔の影響が消えて温度が安定するまで 10 分程度経過した後の地温を測定する。

③ サブボトムプロファイラー

島周辺の浅部構造を把握し、地すべりや山体崩壊に関わる情報を把握するための手法として、サブボトムプロファイラーが考えられる。水深が千メートルを超えるような海域ではディープトローや ROV, AUV をプラットフォームに用いた調査が行われている。

3.2.4 掘削検層（第二段階）

第二段階の掘削検層は、遠隔離島内におけるボーリング掘削（ノンコア）とその坑井を使用した物理検層を行う。以下ではまず、ボーリング掘削を行う場所に関する事項を記す。次いでボーリング掘削のケーシングプログラムについて記す。最後に、物理検層について示す。

(1) ボーリング掘削が可能な範囲

南鳥島には滑走路が存在するため航空法による高さ制限を考慮してボーリング掘削位置を検討する必要がある。国土交通省東京航空局のホームページ (<https://www.cab.mlit.go.jp/tcab/info/02.html> 2019年1月4日アクセス)によると、滑走路の半径4000mの範囲には高さ45m以上の建物等を設置することが航空法により制限されている。ただし「仮設物」または「地形又は既存物件との関係から航空機の飛行の安全を特に害さない物件」については、申請により所管航空局長の承認を受ければ設置可能とされる。

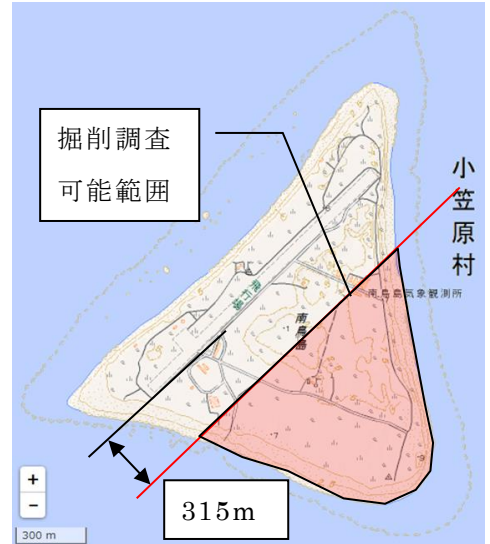


図 3-2-8 掘削調査可能範囲

掘削深度2000m程度の坑井やぐらは40mから50m程度の高さがあり航空法の制約を受けられる可能性もあるが、本報告書では島内の滑走路から315mの離隔を確保した南東側の領域を仮の掘削可能範囲とした（図3-2-8）。

(2) ボーリング掘削（ノンコア）

第二段階でのボーリング掘削は、第三段階におけるコア採取や原位置試験を目的としたボーリング調査を効率的に計画・実施するために行う。

本報告書では炭酸塩岩と玄武岩の境界を1000mと仮定して深度2000mまで掘削する計画案とした。実際には、概略調査の結果と第三段階のボーリング調査計画を考慮した地質調査全体の経済性を考慮して試掘深度や掘削およびケーシングプログラムを検討することが重要である。

掘削時にコア試料は採取しないが、掘削

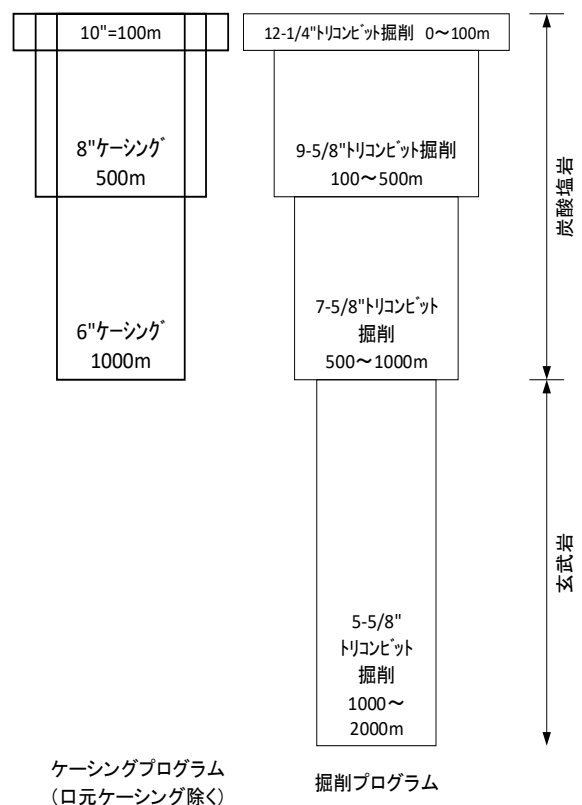


図 3-2-9 掘削およびケーシングプログラム(例)

(カッティングス)の観察を行うことにより、概略の地質構成を把握する。掘削に当たっては、泥水比重を適切にコントロールすることにより坑壁の安定を図り、掘進率の管理や坑芯位置の確認を行う。

(3) 物理検層

物理検層の特徴を国土交通省 HP (http://www.mlit.go.jp/maritime/maritime_tk7_000024.html 2019年1月11日アクセス)「海洋開発人材育成のための教材開発」における海洋開発工学概論 海洋資源開発編(改訂第1版)の第3章探鉱から生産までの基礎技術を参考にまとめる。

物理検層は坑井内に測定器を降ろし、坑井近傍の物理特性(比抵抗、密度、速度、孔隙率等)を深度方向に連続的にデータとして取得する手法である。坑井に沿った物性値の変化を連続的かつ高分解能で取得できる。測定は掘削が終了し掘削用のツールを引き上げた後に、ワイヤラインと呼ばれるデータ転送機能を備えたアーマードケーブルに坑井内装置を接続して、坑内を連続的に移動させながら実施する。ケーシングを挿入する前の裸坑の状態で行うことが一般的である。

物理検層の深度は坑井に送り込むワイヤの長さを測定する。このような深度は MD (Measured Depth) と呼ばれる。一方、坑井の方位傾斜情報を利用して TVD (True Vertical Depth) に変換される場合もある。また、測定深度の基準面をどこに設定されるかについて他の調査データと比較する際には留意を要する。使用された掘削泥水の種類に関する情報も重要で、特に塩分を含む泥水や油ベースの泥水は地層の電気的抵抗特性を大きく変化させてしまう可能性がある。また一般に泥水の圧力は地層の孔隙圧を超えている必要があり、この条件が満たされていれば泥水が地層に浸入することを意味している。泥水の浸入に伴い、坑壁表面に泥の層が形成される。これを泥壁あるいはマッドケーキと呼ぶ。泥壁よりさらに外側には、泥水置換領域 (flushed zone)、遷移領域、非侵入領域が形成される。浸透性のある砂岩層では泥水侵入の影響が大きいですが、頁岩層や緻密な砂岩など低浸透性を有する地層では影響は限定的で、この性質を利用して定性的に地層の浸透性を評価することも可能となる。

物理検層は、その測定原理及び目的により多種存在し、対象層、坑井の状態等を考慮し測定仕様を決定する必要がある。地盤の物性を把握するための基本的な物理検層を表 3-2-2 に示す。

物理検層の種目ごとに装置が異なるため、基本的には検層種目数に応じた回数分だけ坑内に装置を入れる必要がある。ただし、近年では作業の効率化を図り装置の抑留リスクを軽減するために、複数の検層種目を組み合わせたコンビネーションツールが用いられる。例えば、温度+比抵抗+自然ガンマ、キャリパー+密度、音波検層+自然ガンマの組み合わせが良く利用される。

中性子検層と密度検層は実施にあたり放射線源を用いるため届け出が必要である。

表 3-2-2 物理検層種目と主な取得情報

検層種目	取得情報
キャリパー検層	孔径分布
インダクション比抵抗検層 (DIL)	地層の比抵抗分布
温度検層	孔内温度分布
低周波ダイポール音波検層 (LFDL)	地層の P 波・S 波速度分布
自然ガンマ線検層	地層の自然ガンマ線分布
中性子検層	地層の孔隙率
密度検層	地層の密度分布

3.2.5 詳細調査

詳細調査は、遠隔離島の地下空間利用に関して、概要調査段階における地質環境特性（長期安定性等）を評価するため、地表からの調査（ボーリング、坑内試験等）により、遠隔離島の成因、地質・岩石特性、地すべり・山体崩壊に関する情報、遠隔離島の深部地下水などの基礎データを検討するための情報取得を目的とする。

(1) 調査計画条件

調査計画条件は、以下のとおりである。

- 地層分布：GL.-1000m以浅は炭酸塩岩，GL.-1000m以深は玄武岩
- ある程度は坑壁が自立可とし，海水影響は考慮していない。
- 資機材の搬入，搬出方法等に関しては考慮していない。
- 坑内検層，室内試験等の詳細な適用条件は考慮していない。
- 調査事業費に関する検討は行っていない。

(2) 地質環境の特性評価の論証整理 - 項目設定

地質環境の特性評価の論証整理に必要な項目は、表 3-2-3 に示すとおりである。

表 3-2-3 地質環境の特性評価の論証整理に必要な項目

検討項目	地質環境モデル	整理の項目別
<ul style="list-style-type: none"> ・遠隔離島の成因 ・地すべり，山体崩壊に関する情報 	地質構成・地質構造の把握 →地質構造モデル	<ul style="list-style-type: none"> ✓ 基本層序 ✓ 年代・内部構造 ✓ 堆積物組成 ✓ 割れ目・水みち
<ul style="list-style-type: none"> ・地質，岩石特性 ・地すべり，山体崩壊に関する情報 	岩盤の物理・力学特性の把握 →岩盤特性モデル	<ul style="list-style-type: none"> ✓ 物理特性 ✓ 岩級区分 ✓ 力学特性 ✓ 地殻熱流量・地温勾配
<ul style="list-style-type: none"> ・遠隔離島の深部地下水 	岩盤の水理特性の把握 →水理地質モデル	<ul style="list-style-type: none"> ✓ 水理地質区分 (水理的連続性・異方性等) ✓ 水頭分布
<ul style="list-style-type: none"> ・遠隔離島の深部地下水 	地下水の地化学特性および地下水流動概念の把握 →地下水の地化学モデルおよび地下水流動概念モデル	<ul style="list-style-type: none"> ✓ 地下水流動系の区分 (水質・安定同位体等) ✓ 地下水年代 ✓ 地下水流動概念
<ul style="list-style-type: none"> ・その他 	岩石の地化学緩衝機能，核種移行に対する遅延機能の把握 →その他重要な特性	<ul style="list-style-type: none"> ✓ 酸化還元状態の現状 ✓ 岩石の地化学緩衝機能 ✓ 岩石の吸着特性

(3) 掘削計画

掘削調査が可能な範囲は、図 3-2-8 に示す掘削検層と同様な範囲である。

掘削計画案を図 3-2-10 に示す。同図の各段階の作業手順は、以下のとおりである。

①HQ ワイヤライン(HQ-WL)

コア掘削 (φ98.4mm)

②トリコンビット(T.B)拡孔掘削

③坑内検層，試験関連

④ケーシングセメンチング

※以降①～④繰り返し

掘削中は、以下の附帯調査を行い、データを取得する。

- 岩芯観察
- 坑芯測定
- トレーサ試験
- マッドロギング
- 泥水検層

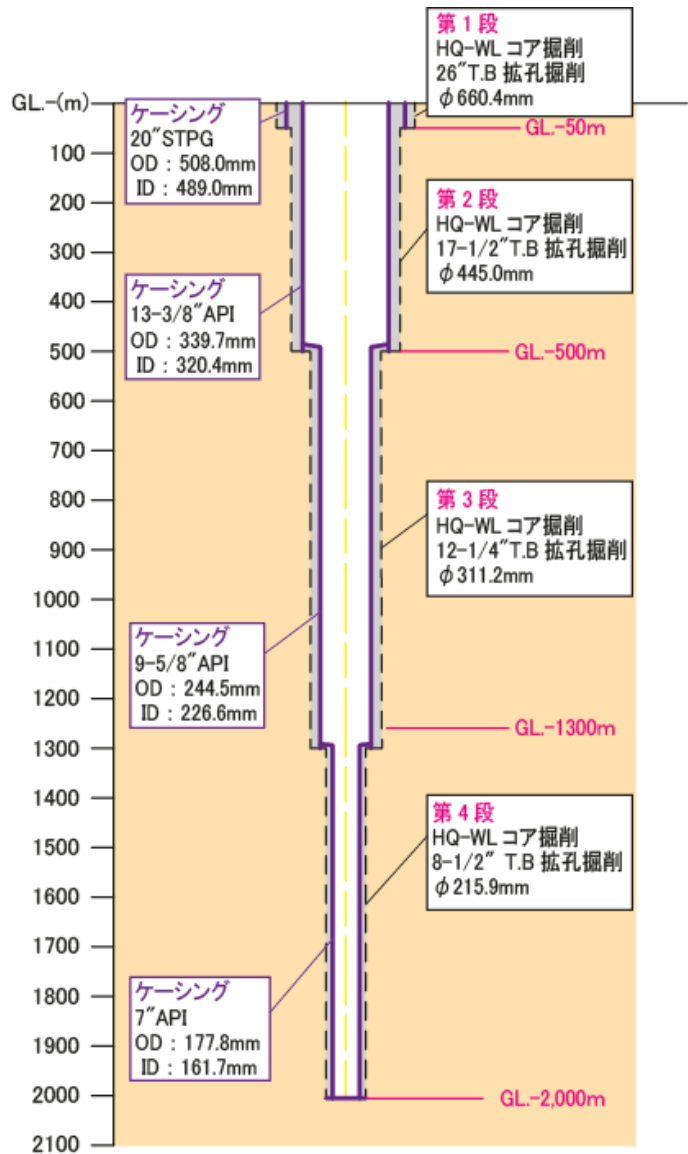


図 3-2-10 詳細調査のケーシングプログラム

(4) 詳細調査における必要範囲

詳細調査における以下の諸機材を設置するのに必要な範囲は、100m×100m程度である。概略の配置計画を図 3-2-11 に示す。

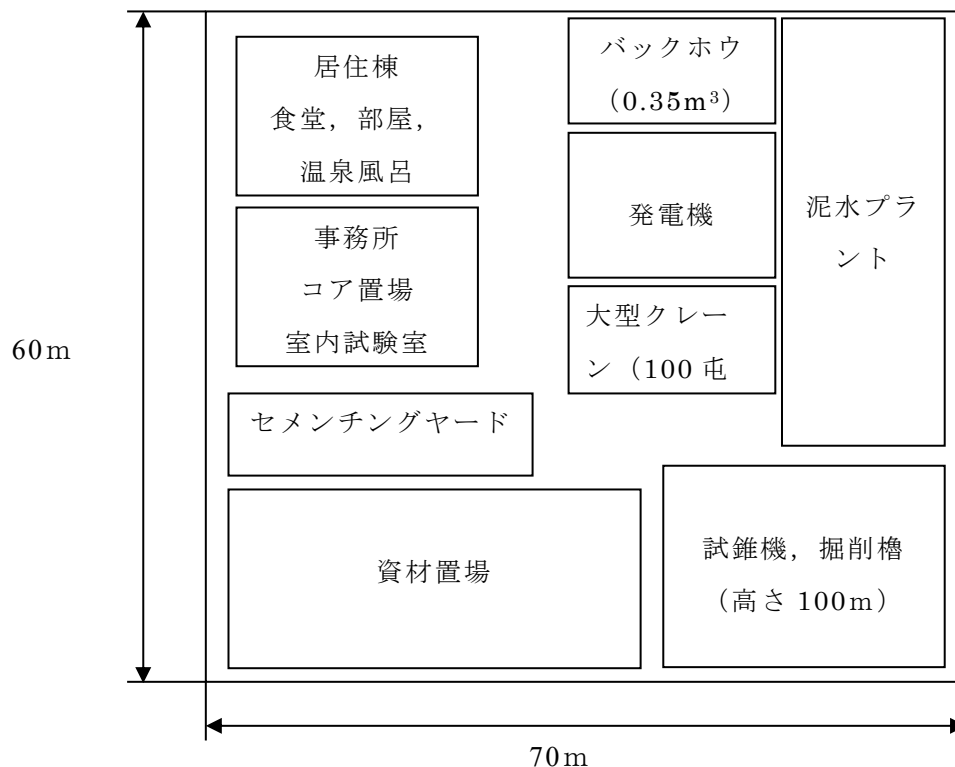


図 3-2-11 詳細調査における概略資機材配置図

(5) 検層・原位置試験

検層・原位置試験の試験項目と取得情報を表 3-2-4 に示す。以下各試験の概要を示す。

a) 物理検層

詳細調査における検層は、先に示した種目にセメントボンド検層、核磁気共鳴検層およびフォーメーションテストを追加した。

b) イメージング検層

坑壁の 360 度画像を得る検層で、通常のカメラと同じ原理の光学式、音波、比抵抗を使用するものがある。坑壁画像展開図上に表れる不連続面にサインカーブを重ね合わせ、最も合致したカーブを決定することにより、不連続面の深度・方位・傾斜を求める。ランク分けしたフラクチャーについて、頻度分布・アロープロット・ローズダイヤグラム等を作成し、解釈を加える。

光学式は泥水を清水に置き換える必要がある。また、最大深度は 1000m 程度である。

c)流体検層

温度検層で得られた温度変化傾向，フローメータの測定結果と水理試験や地質との対比により，坑内の逸水層・湧水層を検出し，それぞれの箇所での透水性に関する評価を行う。

表 3-2-4 検層・試験の項目等

項目		取得情報
物理検層	キャリパー検層，セメントボンド検層	坑径分布，ケーシングとセメントの密着度
	インダクション比抵抗検層(DIL)	地層の比抵抗分布
	温度検層	坑内温度分布
	低周波ダイポール音波検層(LFDL)	地層のP波・S波速度分布
	自然ガンマ線検層	地層の自然ガンマ線分布
	中性子検層	地層の孔隙率解析結果
	核磁気共鳴検層	地層の浸透率
	密度検層	地層の密度分布
	フォーメーションテスト	地層内流体，浸透率，圧力
イメージング検層	比抵抗，超音波(テレヴィユア)，光学*	画像解析による坑壁不連続面の分布
流体検層	電気伝導度検層，フローメータ検層 地化学検層*	電気伝導度，区間流量，間隙水圧 pH，酸化還元電位，溶存酸素
透水試験	間隙水圧測定，パルス試験，スラグ試験，揚水試験	地層の透水係数，貯留係数
	現位置地化学測定，封圧採水	地化学データ，深部(化石)地下水
力学試験	坑内水平載荷試験	強度・変形特性(変形係数，ヤング率等)
	水圧破碎試験	初期地圧
VSP 探査		坑壁沿いの反射面分布 地層の速度分布

*：清水置換が必要

d)透水試験

対象地盤の水理特性(透水係数，貯留係数)及び間隙水圧分布を確認することを目的として，透水試験を実施する。

単孔式のシステムは最大深度 1000m から 1200m 程度である。

e)力学試験

①水平載荷試験

試験深度は，コア観察，物理検層などの結果に基づき設定する。特に，キャリパー検層結果から，試験可能な坑径であることを確認し，超音波検層(BHTV)やFMI検層結果から坑壁の状態を観察し，割れ目の発達する箇所と発達しない箇所がそれぞれ試験対象となるよう

に設定する。

最大深度は 1400m 程度である。

②水圧破碎試験

水圧破碎の測定区間は，コア観察，超音波検層（BHTV），キャリパー検層，及び FMI 検層の結果に基づき，できるだけ亀裂の見られない区間，かつ物性値が安定している箇所を選定する。

f)VSP 探査

VSP 探査（Vertical Seismic Profile）は，坑井内に単一または複数レベルの受振器を設置し，地表で起震を行うことにより坑井近傍の速度構造を把握する手法である。地表で取得された震探記録と坑井内で取得された検層記録の整合性を確認できるとともに，両者の補間的な役割を果たす。また，掘削深度より深い地層境界からの反射データを取得できれば，未掘削区間の深部予測にも利用できる。

近年は扱えるデータ量が格段に増加したため 3 次元 VSP も実施されている(Blackburn et al., 2007)。

(6) 室内試験

ボーリングより採取された試料（コアおよび地下水）を用いた室内試験項目を表 3-2-5 に示す。室内試験では，物理特性，水質を確認することを目的とする。規格・基準が地盤工学会により定められている試験がある。

表 3-2-5 採取されたコアの室内試験の項目等

項目	取得情報
物性試験	密度，吸水比，有効間隙率，含水率，比表面積，間隙径分布，弾性波速度，比抵抗
力学試験	一軸圧縮強度，三軸圧縮強度
浸透率試験	透水係数，透気係数
コア水抽出	コア間隙水抽出，コア間隙水中溶存ガス抽出
レドックス関連分析	Fe 分析，C 分析，S 分析
微生物試験	全菌数分析，活性度測定，遺伝子分析
元素分析	主要元素（9 成分：Na, K, Ca, Mg, Cl, SO ₄ , HCO ₃ , CO ₃ , TDS）分析，U 分析，Th 分析
X 線回折分析	バルク，定方位
吸着特性試験	バッチ試験，拡散試験（Through Diffusion 試験）
DSCA 法，コア変形法	初期地圧

3.2.6 地質調査のまとめ

遠隔離島周辺の地質調査は、概略調査、掘削検層、詳細調査の三段階に分けて整理した。

概略調査では、遠隔離島の地下空間利用に関して基礎的なデータを取得することを目的とし、島を構成する玄武岩と炭酸塩岩の境界深度、各々の岩の概略の物性や温度分布、地すべり・山体崩壊に関わるデータとして島周辺の浅部の地下情報や地殻熱流量、温度に関するデータを得る。

掘削検層では、島内の地下物性を把握することを目的とし、坑壁崩壊のリスクを考慮して坑内水は泥水のまま測定可能な種目で、速度、比抵抗、温度、密度、間隙率等の基本的な物性を把握する。

詳細調査では、上記の調査結果を踏まえ、地表からの調査（ボーリング、坑内試験および室内試験等）により遠隔離島の成因、地質・岩石特性、水理特性、地すべり・山体崩壊に関する情報、深部地下水の成分などのデータを収集し、遠隔離島の地下空間利用に関してシミュレーション等の検討を行うための情報取得を行う。

これらの地質調査を行う上での課題は以下の通りである。

1) 共通の課題

- 運搬：人員、機材の運搬手段を確保する必要がある。特に掘削検層、詳細調査では、大型の機材を陸揚げする必要がある、その岸壁、クレーン、仮置き場などを準備する必要がある。
- 島での生活拠点：掘削検層、詳細調査では、調査期間が数年におよぶため、島での生活ができる施設の整備が必要である。
- 台風、高潮時の避難対策：台風、高潮等の時、作業員の避難、島に残置する機材の倒壊・流出防止および品質確保、ボーリングコア等の流出防止・品質保持などを事前に準備する必要がある。
- 自衛隊との調整：島を管理する自衛隊との事前調整が必要である。

2) 概略調査

- 短期間であるため、人員の宿泊船を準備する必要がある。
- 陸と海との調査時には、調査船を回航させる必要がある。

3) 掘削検層

- 自衛隊の滑走路との離隔距離を確保する必要がある。
- 検層を管理する施設、技術者が必要である。
- 詳細調査と内容が重複する点もあるため、概略調査結果を踏まえて調査全体の効率と経済性を考慮した柔軟な計画立案を行うことが重要である。

4) 詳細調査（掘削検層に追加）

- 採取コアを観察し、現場での室内試験設備を準備する必要がある。

- HQ-WL コア掘削用の掘削機器（TSL-HD など）と拡孔掘削用の掘削機器（NW-2000 など）が必要となる。
- 坑内温度上昇による掘削障害発生や火山性ガスの噴出等のリスクがある（泥水管理が重要）。
- 掘削調査にともなう産業廃棄物や廃泥処理が必要となる。
- 検層等には一部放射線源を用いるものがあり、運搬や使用可否を検討する必要がある。

参考文献

- 物理探査学会(1998)：物理探査ハンドブック 第1章 反射法地震探査，1-115.
- 物理探査学会(2008)：物理探査適用の手引きー土木物理探査マニュアル 2008ー 第13章 海上音波探査，385-412.
- 文部科学省研究開発局・東京大学地震研究所（2016）：日本海地震・津波調査プロジェクト平成28年度第1回運営委員会資料 「2-3 沿岸海域および海陸統合構造調査」，1-9
- 物理探査学会(2016)：物理探査ハンドブック増補改訂版 第11章 熱・温度探査，645-668.
- Blackburn, J., Daniels, J., Dingwall, S., Hampden-smith, G., Leaney, S., Menkiti, H., Sanchez, A. and Schinelli, M.(2007): Borehole seismic surveys: Beyond the vertical profile. Oilfield Review, Autumn 2007, vol.19, issue3, pp.20-35.

第4章 遠隔離島及びその周辺海底下の地下空間利用のための技術等

4.1 豎坑施工技術

4.1.1 一般的な豎坑施工技術

豎坑は杭基礎などの構造物構築のための仮設空間、換気や運搬のための空間など様々な用途に利用される。

表 4-1-1 に一般的な豎坑施工技術の一覧を示し、各々の技術の概要について述べる。

表 4-1-1 豎坑施工法比較

	全断面発破掘工法 (ショートステップ工法)	レイズボーラー 工法	全周回転オールケー シング工法	ロータリー掘削坑井技術
掘削径	Φ5～7m程度 (人力施工ができる径)	最大で5m程 度	Φ0.8～3m程度	口切が500～900mm程度 で徐々に径を小さくして いき、先端では200～ 400mm程度
最大延長	500m程度(国内)	900m程度	100m以下 (杭対象なので)	10,000m程度
坑壁の安定	人力による吹付けコンクリ ート	無対策(素掘 り)	泥水とケーシング	泥水とケーシング
土砂排出方 法	人力掘削+専用バケツ	下の空洞に落 とす	ハンマグラブで土 砂を直接つかんで 排出 or 泥水化し て排出	ビットで破碎し泥水とし て排出

(1) 全断面発破掘工法 (ショートステップ工法)

全断面発破掘工法は、豎坑の一般的な掘削方法として適用されており、穿孔、装薬、発破、ずり出し、支保工、覆工を上部から下部に向かって順次繰り返して掘り下げる工法である。掘削径は5～7m程度が多い。

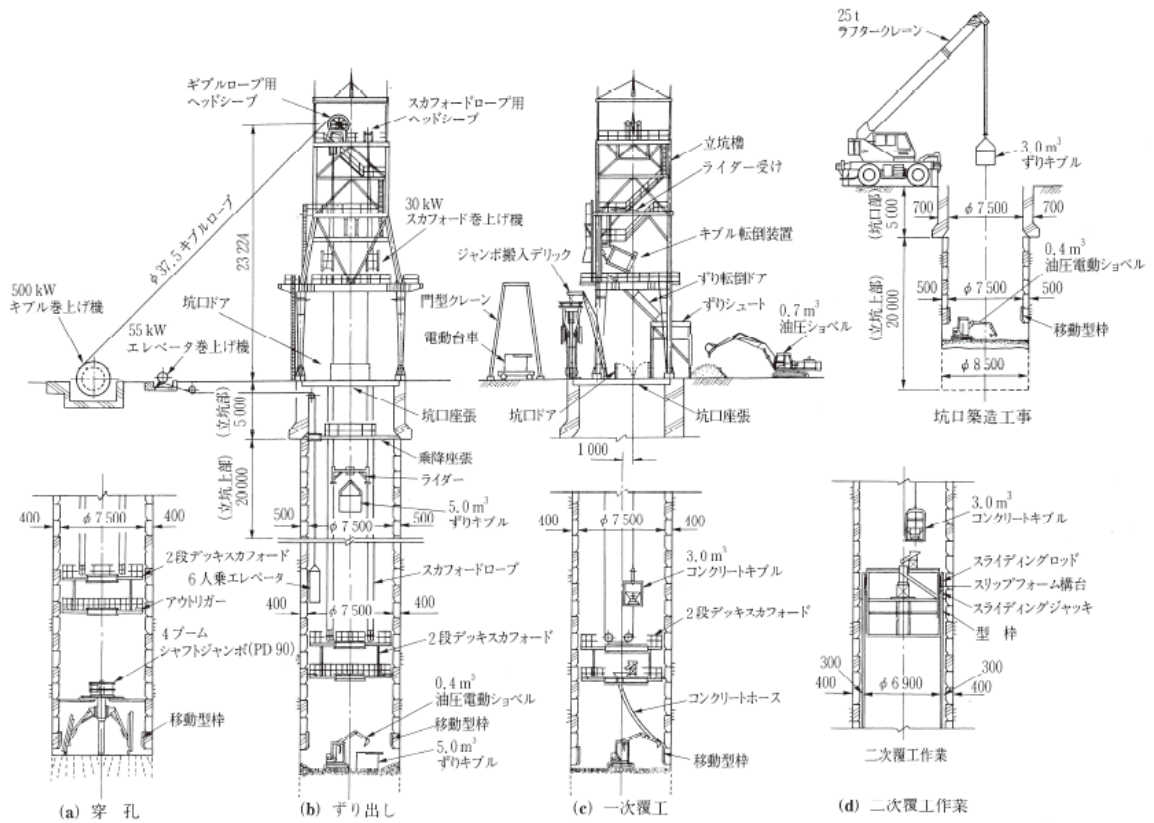


図 4-1-1 全断面発破掘工法（ショートステップ工法）
 （トンネル標準示方書山岳工法編，2016，土木学会）

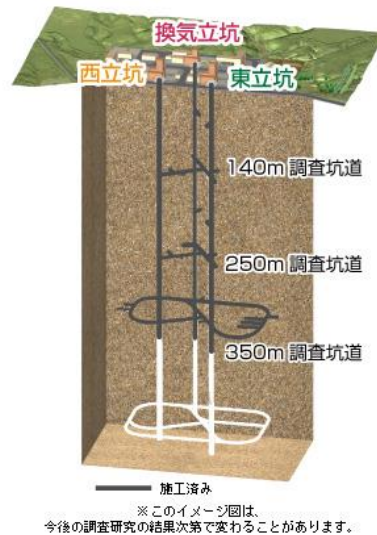


図 4-1-2 幌延地層研究地下施設坑道（日本原子力研究開発機構 HP より）

(2) レイズボーラー工法

大口径ボーリング機でパイロット孔を掘削し，下部よりリーミングアップして堅坑を掘削する

工法で、直径 5m 程度、深度 500m 程度までの実績がある。北米では深度 900m の実績がある模様。坑壁を無支保で掘削するので坑壁の安定が課題となる。なお、下部にトンネル等の空洞が無いと 拡径ビットを装着できない。

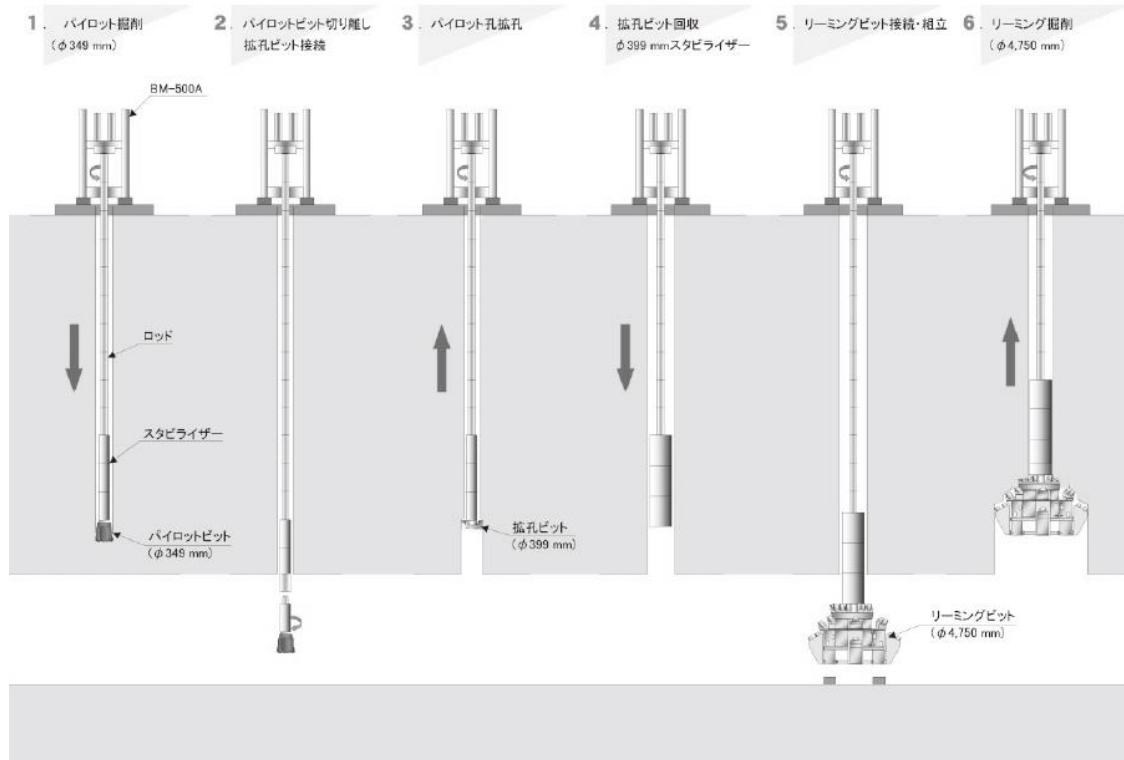


図 4-1-3 レイズボーラー工法（トンネル標準示方書山岳工法編，2016，土木学会）

(3) 全周回転オールケーシング工法

全周回転するケーシングの先端に取り付けたケーシングビットで削孔を行う工法で、掘削径はΦ800～3000mm程度である。構造物の杭の施工に用いられることが多く、最大深度は60～70m程度と思われる。坑壁は泥水とケーシングで安定させて施工する。

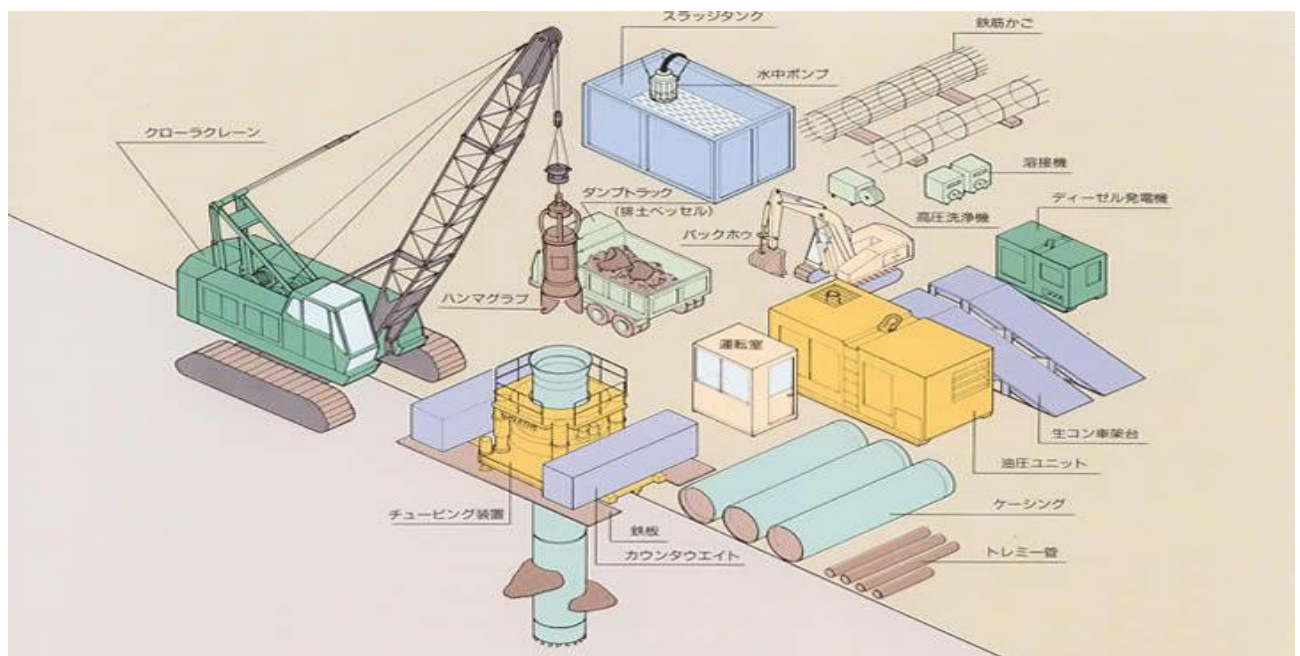
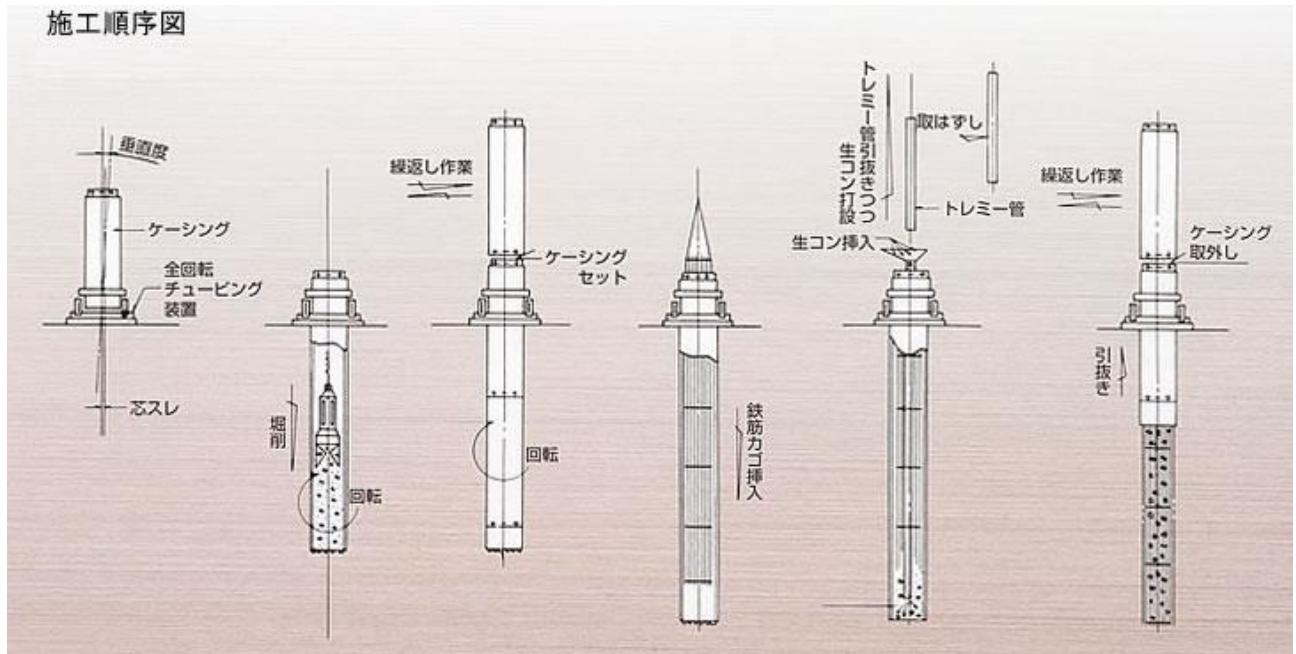


図 4-1-4 全周回転オールケーシング工法 (進明テクノホームページより)

(4) 坑井掘削技術

石油やガス田の掘削に代表される坑井掘削技術は、ロータリー掘削が主流となっている。最大深度は10000m近い実績がある。掘削径は口切が500~900mm程度で徐々に径を小さくしていき、先端では200~400mm程度となる。900mm以上の大径の孔は普通の石油ガス井では数百m程度までしか掘削されない。坑壁は泥水で安定させ、必要に応じてケーシングで防護する。

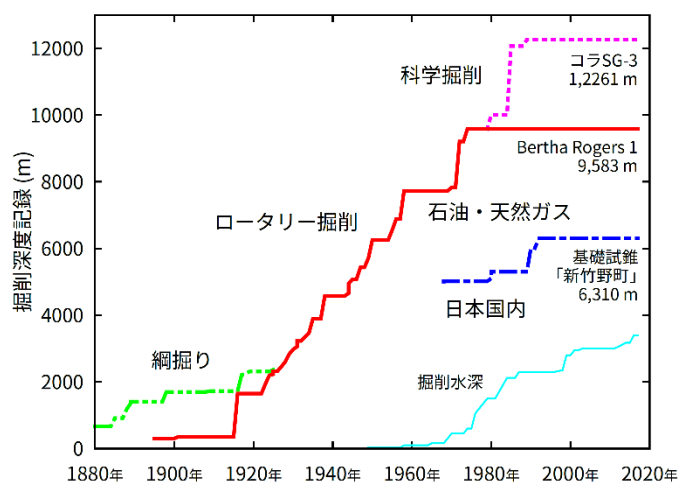


図 4-1-5 坑井掘削深度記録の推移

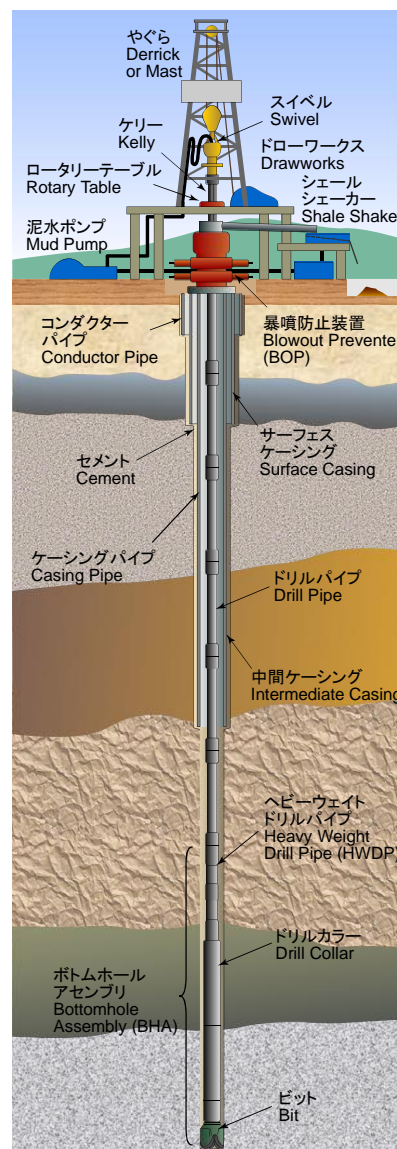


図 4-1-6 ロータリー掘削技術の概要

4.1.2 坑井掘削技術

4.1.2.1 ケーシングパイプ

石油天然ガス坑井の掘削作業においては、坑壁や浅部水層の保護、圧力の異なる層の遮断のため、坑内にケーシングパイプと呼ばれる鋼管を挿入しながら掘進していく（図 4-1-6）。地表部の崩れを防止するためにごく浅い深度に設置されるストープパイプやコンダクターパイプと呼ばれる大径鋼管は、準備作業時に溶接で接続し降下されることもある。溶接は作業と徐冷に時間がかかるので、掘削作業開始後は、ケーシングパイプの両端に設けたコネクターのネジなどを接続し降下する。降下したケーシングの外側にセメントを送入し固化させて層間の遮断を行った後、その中を通過できる少し径の小さい掘進編成でより深部へ掘進していく。

最終坑径が 8.5 inch (21.6 cm) といった小径の坑井であれば国内でも 6300 m 程度までの掘削実績があるが、空間利用の目的で大径の坑を大深度まで掘削する場合、大径ケーシングパイプの圧潰耐力とリグの吊り能力による制約が大きくなることが推測される。ここでは、石油天然ガス坑井掘削における大径ケーシング降下技術について検討する。

4.1.2.2 ケーシングパイプの設計

(1) 3つの設計要素

ケーシングパイプの設計では、坑井の掘削や仕上げ中、残置後に起こり得る様々な事象を想定し、内圧荷重、圧潰荷重、引張り荷重の設計要素について、各深度において作用する荷重に安全率を乗じた値以上になるような強度を持つ材質、肉厚、コネクション（コネクター）を選定し、設置区間（通常は全長で最大3区間）を決定する。各設計要素について以下に詳述する。

① 設計要素1：内圧（内側から外側に掛かる）荷重

ケーシングに作用する内圧荷重は次式で定義される。

内圧荷重 P = 内面に作用する圧力 - 外面に作用する圧力

内面に作用する圧力：内側の流体（泥水等）の流体圧 + 坑口に作用する圧力

外面に作用する圧力：外側の流体（泥水、セメント等）の流体圧 + 坑口に作用する圧力

図 4-1-7 に示すように、各深度での内圧荷重を計算し、安全率を考慮した上で、それ以上の耐力を持つパイプを選定する。荷重条件としては、高圧層に遭遇し、噴出防止のために坑口を密閉する場合などを想定する。

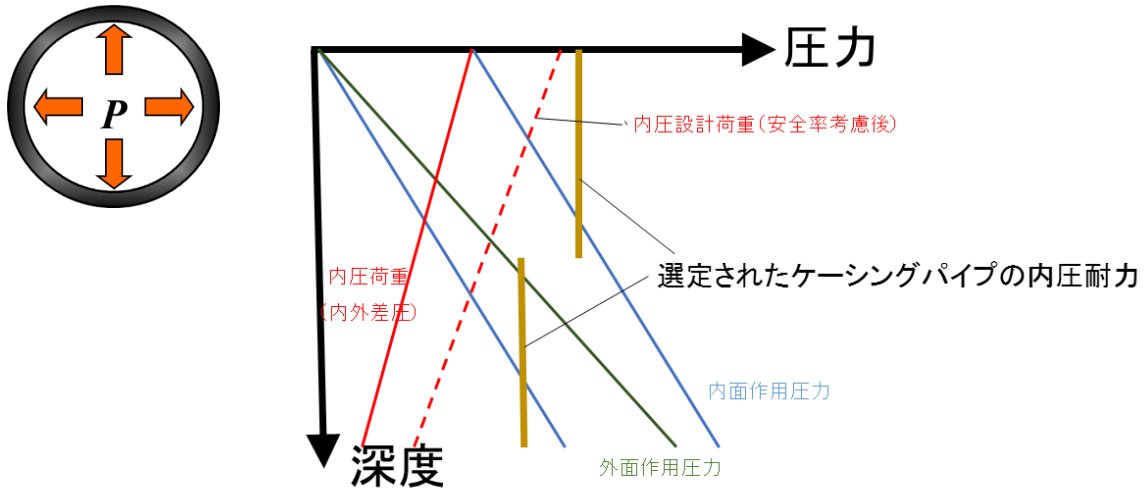


図 4-1-7 内圧設計概念図

② 設計要素 2：圧潰（外側から内側に掛かる）荷重

ケーシングに作用する圧潰荷重は次式で定義される。

圧潰荷重 $P = \text{外面に作用する圧力} - \text{内面に作用する圧力}$

外面に作用する圧力： 外側の流体（セメント等）の流体圧

内面に作用する圧力： 内側の流体（泥水等）の流体圧

圧潰設計概念は図 4-1-8 に示すとおりで、荷重条件としては、掘進中の逸泥による坑内液面低下、セメント送入により外側の流体比重が高い場合などを想定する。

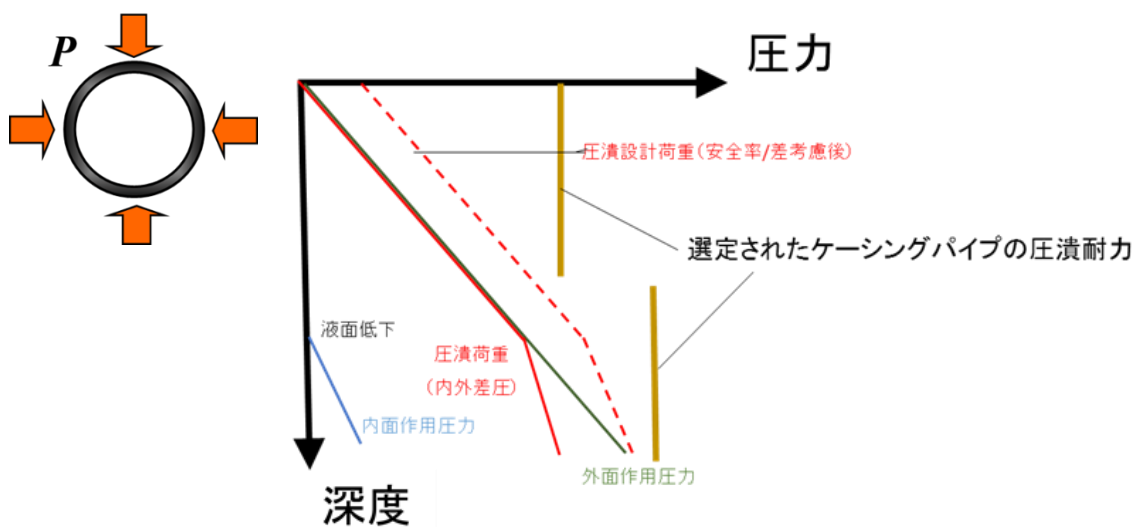


図 4-1-8 圧潰設計概念図（ケーシング内液面低下）

③ 設計要素 3：引張り（軸方向に掛かる）荷重

ケーシングに掛かる引張り応力（軸力）は、内圧と圧潰の条件を満たすように選ばれた管種とそれらの区間長をもとに、各区間のケーシングの空中重量と管体断面積変化部に掛かる静水柱圧から求めることができる（図 4-1-9 黒色実線）。内圧と圧潰の両荷重から選択した管種が必要な安全率を満たしてない場合には、引張り強度の大きい管種に変更する。

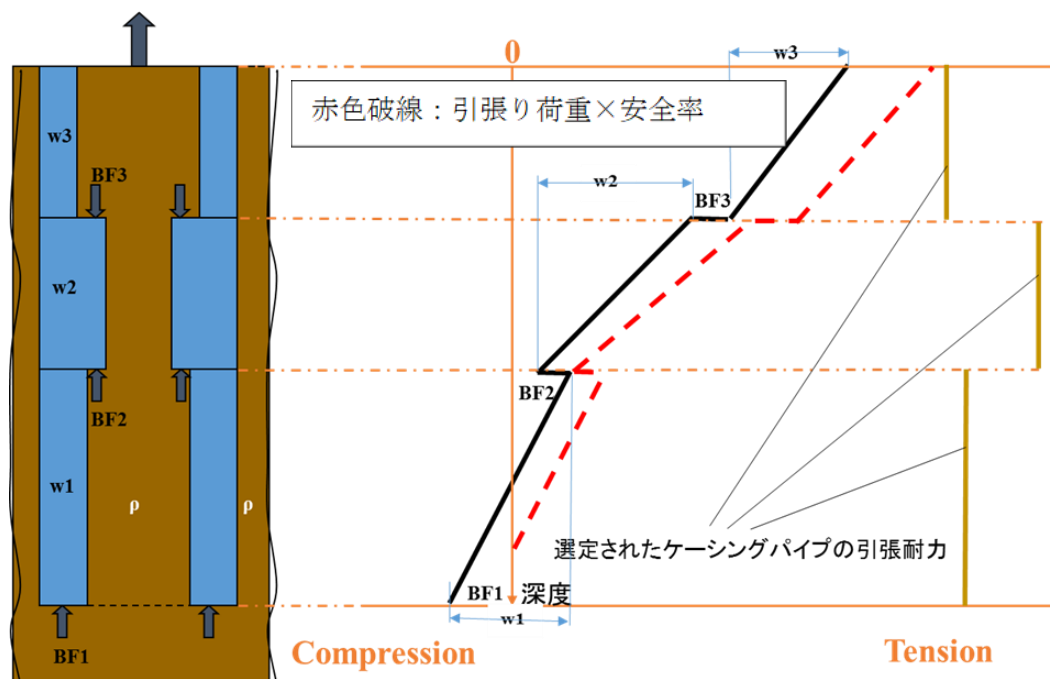


図 4-1-9 引張り設計概念図

(2) 3つの設計要素に影響を与える因子とそれらの相互関係

以上の3つの設計要素に影響を与える因子とそれらの相互関係は次のようにまとめられる。

- ① 肉厚とイールド（材質による弾性変形限界）が増加するとパイプの各耐力は増加する。
- ② 高イールドの材質は一般的に、硬く脆い、耐腐食性が低い、溶接が困難、高コストといった短所がある。
- ③ 肉厚増は重量（自重）が増加するため、リグ能力により降下可能深度が制約され易くなる。
- ④ 直径/肉厚比が大きくなると圧潰耐力は低下する—大径管の宿命。真円度が保持されないと圧潰耐力は大きく低下する。

大口径の井戸を深く掘る場合、特に③、④の考慮が重要である。

4.1.2.3 大径ケーシングの降下限界深度試算

陸上石油天然ガス掘削作業に現在用いられている API (American Petroleum Institute) 規格の標準的大径ケーシングがどの程度の深度まで降下可能か試算を行った。なお、海洋掘削では海底面下の柔らかい地層に対してジェットリングで大径ケーシングを設置することがあるが、今回の検

討対象である遠隔離島の地質は石灰岩や火成岩でそれなりの圧縮強度を持つことから、ケーシング外径より大きな坑を掘削した後にケーシングを降下すると仮定し、試算には業界で使用されている標準的なネジ接続のケーシング（最大呼称外径 36 inch まで）のデータ（表 4-1-5）を用いた。

(1) リグの吊り能力による限界

陸上リグ用ドローワークス（以下 DW：巻上装置）の巻上能力は最大級の 4000 HP の DW で 1145 ton（16 本綱）、3000 HP の DW では 644 ton（14 本綱）である。移動式海洋リグ用 DW には 12000 HP で 1450 ton（16 本綱）の巻き上げ能力を持つものもあるが、陸上ではリグ輸送時の大きさ、重量の制限があり DW の大きさと能力も制限を受ける。国内最大陸上リグの吊り能力は、3000 HP の DW、ワイヤー、櫓の 3 つの耐荷重と機械的法定安全率を考慮すると、最大静荷重で 575 ton である。現存する世界最大級の陸上リグの吊り能力はその 2 倍程度と思われるが、以上を勘案して今回の検討はリグの最大吊り上げ能力を 575 ton として試算を行った。

表 4-1-2 に標準的なケーシング降下手順（ケーシング内部を坑内の泥水と同じ比重の泥水で満たしながら降下）で降下した場合、ケーシング重量がリグの吊り能力 575 ton に達する降下深度を示す。

表 4-1-2 ドローワークス吊り能力が 575 ton のときのケーシングの降下可能深度

外径 (inch)	単位重量 (kg/m)	最小耐力 (1000psi)	引張強度 (ton)	降下可能深度 (m)
36	868	80	4969	771
30	707	80	3266	947
24	473	80	1759	1415

※1 ケーシング内外の泥水の比重を 1.10 として浮力を考慮（浮力係数 0.859）

※2 ケーシングの引張り安全率は 1.0 で計算

36 inch および 30 inch 径ケーシングの引張強度はリグ巻上げ能力よりかなり大きいので、リグの吊り能力を増加させれば、降下可能深度も比例して増加させることは理論的には可能である。ケーシングの引張り安全率は降下作業中の負荷を考慮して 1.50 から 1.75 といった大き目の値とするのが一般的である。

(2) ケーシングの圧潰耐力による限界

ケーシング内を泥水で満たさず空の状態以降下すれば浮力を増加させ総重量を大幅に減らすことが出来る。その反面、圧潰荷重が増える。表 4-1-3 にケーシングを空の状態以降下した場合の降下可能深度を示す。下の例では、36 inch および 24 inch ケーシングは圧潰耐力で、30 inch ケーシングは DW の吊り能力 575 ton によって降下可能深度が制限される結果となった。

表 4-1-3 ケーシング中空状態での降下可能深度（外側の泥水比重 1.10）

外径 (inch)	単位重量 (kg/m)	最小耐力 (1000psi)	圧潰耐力 (kgf/cm ²)	降下可能深度 (m)	総重量 (ton)
36	868	80	224	2036	294
30	707	80	351	(2809)	(575)
24	473	80	387	3518	532

※1 圧潰安全率 1.0 で計算，圧潰耐力はケーシング管体部での計算値

※2 ネジ接続コネクター部の外圧強度（シール性）に関しては別途検討が必要

外側の流体の比重が 1.10 より増加すると 36 inch および 24 inch ケーシングの降下可能深度は減少する。例えば，流体比重が 1.85 だと圧潰荷重は 1.68 倍に増加するので，降下可能深度は 59.5% (1/1.68) に減少する。

① セメンチング時の圧潰荷重の増加

ケーシング降下後，ケーシングと坑壁の間隙を充填するセメントスラリーの比重は通常 1.85 程度あり泥水比重より大きい。内外比重差が増えて圧潰荷重が増加する点も考慮しなければならない。セメンチング作業の概念図を図 4-1-10 に示す。

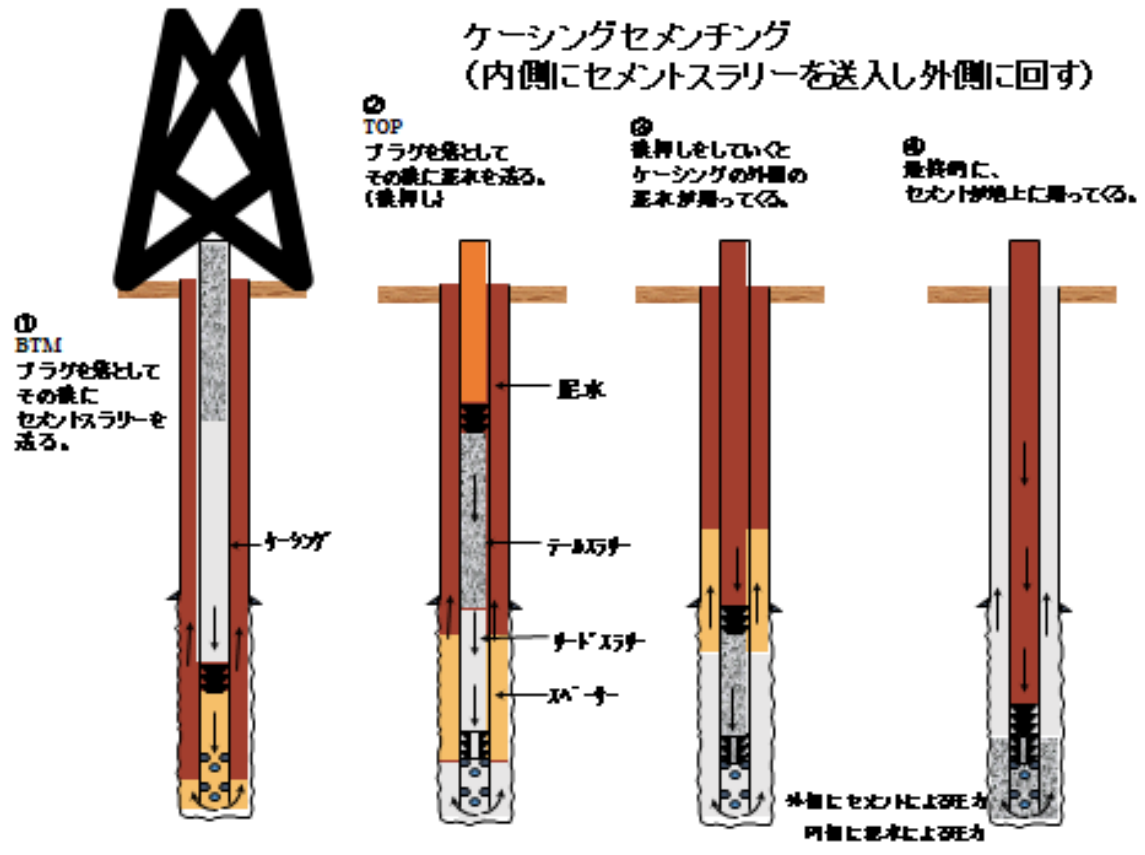


図 4-1-10 セメンチング作業概念図 (プラグ方式)

② ケーシング内外比重差がある状況での降下可能深度の計算

フロートバルブが作動している状況で内側より外側の流体の比重が大きくなると浮力は増加する。圧潰を無視すれば、内外比重差による浮力増のみ考慮した最大降下深度（静荷重 W = リグ吊り能力となる降下深度）は以下の関係から求めることができる。

$$W = \text{パイプ全長の空中重量} - \text{外径断面積に掛かる浮力} + \text{内径断面積に掛かる管内泥水重量}$$

リグ吊り能力を 575 ton, ケーシングの内側, 外側の流体比重をそれぞれ 1.10, 1.85 と仮定したとき, ケーシング重量がリグ吊り能力と等しくなるケーシング降下深度を表 4-1-4 にまとめる。この例では全て圧潰安全率は 1.0 以上となった。

表 4-1-4 内側 1.10, 外側 1.85 の流体比重で総重量が 575 ton になる降下深度

外径 (inch)	単位重量 (kg/m)	最小耐力 (1000psi)	圧潰耐力 (kgf/cm ²)	降下深度 (m)	圧潰安全率
36	868	80	224	2894	1.03
30	707	80	351	2368	1.97
24	473	80	387	3641	1.41

※1 内側と外側の流体比重はプラグ方式でセメンチングを終了した直後の状態を想定

(3) 大径ケーシング降下限界深度の試算結果

圧潰安全率 1.0 で、ケーシング管体の圧潰耐力を用いて試算すると、ケーシング内外の流体に適切な比重差を付け浮力を増加させることで、計算上は

- 外径 36 inch (91.4 cm) 肉厚 1.5inch のケーシングパイプで 最大 2000 m 程度
- 外径 24 inch (61.0 cm) 肉厚 1.25inch のケーシングパイプで 最大 3500 m 程度

まで降下できる可能性がある。

深度の浅い坑井では、固化したセメントによるサポートを期待して 1.0 より小さい圧潰安全率を採用するケースもあるが、セメンチング区間が長く作業難度が高いことを考慮すれば、圧潰安全率は最低でも 1.0 以上を確保することが望ましい。実作業においてはセメント置換中のアニュラス摩擦抵抗による圧潰荷重の増加も考慮が必要である。

ネジ接続コネクタ部の外圧強度（シール性）はコネクタの種類によりかなり差があるようなので別途情報収集を行い、差圧をどこまで大きくできるか、実際に使用するコネクタでの詳細検討が必要である。

石油開発機器のカタログには外径 22 inch ケーシング用の吊り上げ能力 1133 ton (1250 short ton) の機器が出ている。石油開発では行わない大径ケーシングパイプの大深度降下作業となると、大荷重対応の大型エレベーターやエレベーターリンク、ドリルフロアでケーシングを保持するスリップ、スパイダー等のハンドリング機器を新たに開発する必要性が生じる可能性が高いので、十分な時間を掛けて準備を進める必要がある。

(4) 設置深度増を目的とした浮力を利用した大径ケーシング降下概念作業手順

- ① フロートバルブを用い中空状態で最大浮力を得ながら、ケーシングの圧潰耐力あるいはコネクションの外圧強度内で且つリグの吊り上げ能力の範囲内で可能な深度までケーシングを降下する。
- ② 降下を終了したらスラックオフして吊り荷重を減少させる。
- ③ ケーシング内に泥水を送入し、内側を泥水で満たした後、循環調泥を行う。

※ ケーシング内の空気が重い流体で置換されることで総重量が増加するのでリグの耐荷重以下に保つようスラックオフする。スラックオフを行なうにあたっては 3 軸設計ソフト

ウェアでの曲げ応力を含めたストリング挙動の検証が必要。

- ※ ケーシング内の空間を利用する目的でケーシング内を泥水で満たさず、空のままインナーストリングを用いてセメンチングを行う場合の降下深度は、ケーシング内面にバックアップ圧を掛ける工夫をしない場合は、内外比重差変動による圧潰荷重が増加するので注意が必要（4.1.2.3の(2)参照）。
- ④ セメントスラリーを送入する。
 - ※ ケーシング内の泥水が重いセメントスラリーで置換される際にはケーシング総重量が増え荷重が増加するので注意が必要。セメントがケーシングからアニュラスに出ていくと総重量は浮力により減少する。
- ⑤ セメントの置換が終了した後、バックリング防止のため適正荷重までケーシングに引張荷重を与え、セメント硬化待機する。

掘削により発生する掘削土（ずり）の量は、硬質岩で坑壁の激しい崩壊が発生しなければ、除去した地層の体積の1.5～2倍程度と考えられる。泥水を再使用しない場合、掘削終了後にケーシングを降下しフルホールセメンチングを行なうと坑内容量と等しい掘削泥水が地表に戻ってくるので、掘り屑や余剰泥水の廃棄処理についてもしっかりと準備する必要がある。

表 4-1-5 石油ガス開発で使用されているネジ接続の大径ケーシングの仕様例

管体	公称サイズ 管体外径 X-肉厚 [inch]	36x2	36x2	36x1.5	30x1	26x1	24x1.25	22x1	22x1
	単位重量[lbs/ft]	726.9	726.9	552.69	456.57	266.91	303.61	224.28	224.49
	グレード	X-80	X-80	X-80					Q-125
	外径[mm]	914.4	914.4	914.4	762.0	660.4	609.6	558.8	558.8
	内径 [mm]	812.8	812.8	838.2	698.5	609.6	546.1	508.0	508.0
	厚さ[mm]	50.80	50.80	38.10	38.10	25.40	31.75	25.40	25.40
	圧潰耐力[kgf/cm ²]	448.7	448.7	224.3	350.8	202.1	386.8	272.1	329.8
	内圧耐力[kgf/cm ²]	610.3	610.3	409.9	492.2	378.6	512.7	447.2	698.9
	引張耐力[tf]	7801.9	7801.9	5899.5	4873.5	2850.0	3241.9	2394.1	3740.8
コネクション	外径[mm]	946.2	936.8	915.2	762.5	660.9	610.1	590.6	587.5
	内径 [mm]	786.3	795.5	796.3	663.7	562.1	511.3	505.0	518.0
	圧潰耐力[kgf/cm ²]	448.7	513.3	—	—	—	—	—	329.8
	内圧耐力[kgf/cm ²]	610.3	698.3	351.6	590.6	464.0	511.2	379.7	698.9
	引張耐力[tf]	7801	7801.0	4969	3266	1926	1759	1202	3161
	Material Yield Strength [ksi]	90	110	95	95	95	95	95	125
	Maker Type	<u>Tenaris</u> BlueDock HR 90 ELS	<u>NOV</u> XL Viper	<u>VetcoGray</u> RL-4F/1L				<u>VetcoGray</u> RL-4S/1S	<u>Tenaris</u> ER

※コネクションで網掛けした項は管体より値が小さい

4.1.3 まとめ

本節で採りあげた堅坑施工技術のうち、全断面発破掘工法やレイズボーラー工法は5 m以上の大径の堅坑の掘削が施工可能であるが、適用にあたっては作業員が安全に働ける環境を地下に確保できること、および周囲の岩盤が比較的安定していることが条件となる。とくにレイズボーラー工法は、既存のトンネルなどの空洞を利用した工法であるため、その適用範囲に大きな制約が生じる。一方、全周回転オールケーシング工法やロータリー掘削は、作業員による地上からの装置の操作のみによって施工できるが、掘削できる堅坑の径は必然的に前述の2工法より小さくなる。しかしながら、全断面発破掘工法で施工可能な堅坑最大延長の国内実績は500 m程度であり、それより深い深度までの堅坑の施工を考えたときには、ロータリー掘削法が最も有力な選択肢になる。

直径900 mmを超える大径かつ大深度の堅坑をロータリー掘削法で施工することを考えた場合、坑内に挿入するケーシングの強度不足が問題になるが、肉厚を大きくすることでケーシングの圧潰強度を高くすることは技術的には可能である。しかし、大きな空間を確保するという目的でのロータリー掘削の適用例は実際には皆無であるので、実績のない大深度への大径ケーシング降下とセメンチングに関する手法や装置、長い時間スケールでの腐食防止対策や坑の保全方法といった課題の検討が必要になってくるであろう。

遠隔離島の代表的な地層は、地表部に石灰岩、その下に火成岩である玄武岩が存在しているものと予想される。石灰岩は内部に大きな空洞を有することがあり、泥水を用いるロータリー掘削では逸泥の危険がある。さらに、石灰岩中の空洞のなかに高压ガスが存在した場合には、大逸泥の後にガスの噴出が発生するリスクがあり、遠隔離島での大径かつ大深度の掘削は容易ではない。また深部の玄武岩の掘削では、硬質の場合はビットの摩耗が早く、崩壊し易い岩質の場合は坑壁が不安定になるといった理由から掘削作業の進捗スピードは大きく低下する可能性が高い。

以上のように、必要とされる堅坑の大きさ（径や深度）だけでなく地下条件によっても堅坑施工の難度が異なってくるので、まず第一ステップとして、小径の調査ボーリングを行い、実際の石灰岩と玄武岩の境界、岩石強度などの物性値や地層圧力、地層温度、流体の流れ等の基礎情報を収集し、次のステップの検討に移るのが適切と考える。

参考文献

トンネル工学委員会 編：2016年制定 トンネル標準示方書〔山岳工法編〕・同解説，土木学会，2016.

4.2 水平坑道施工技術

一般的に、坑道はその傾斜によって、豎坑、斜坑、水平坑に分類される。一般的に勾配が12～15%程度までは水平坑道と同様の施工機械で施工できるが、これ以上になると、安全設備などを装備した特殊な機械設備が必要となる。掘削土（ずり）の運搬方式を例に挙げると、勾配が12%程度まではダンプトラックを用いたタイヤ方式の採用が可能であるが、12%を超えるとインクライン方式やベルトコンベヤ方式、25%程度を超えると鋼車巻き上げ方式などに限定される。ここでは、水平坑道の施工技術について概説する。

4.2.1 掘削技術

岩盤を対象とする水平坑道は、削孔・装薬→発破・ずり運搬→支保工（吹付けコンクリート・ロックボルト・鋼製支保工）の順序で施工される。図4-2-1に掘削幅5m程度の断面での施工法の例を示す。

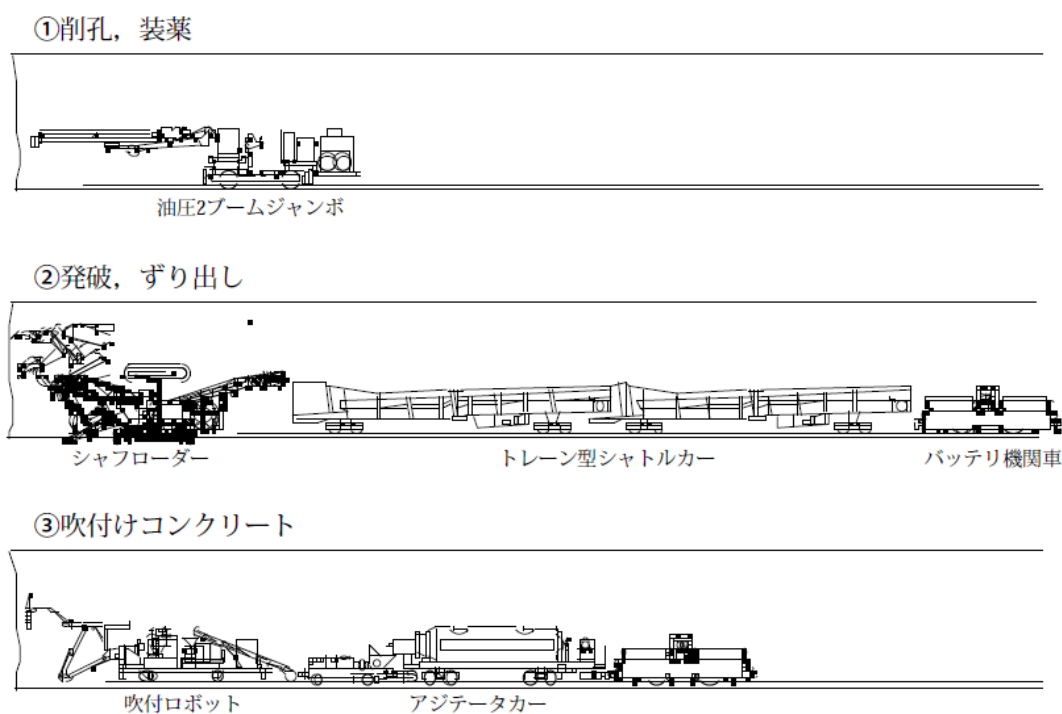


図 4-2-1 掘削幅 5m 程度の断面での施工法の例（わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性；地層処分研究開発第 2 次取りまとめ，分冊 2，JNC-TN1400 99-022，1999. 11，JAEA）

(1) 削孔・装薬・発破

掘削方式には発破掘削，機械掘削があり，発破掘削はおもに硬岩から中硬岩の地山に適用され，機械掘削はおもに中硬岩から軟岩および未固結地山に適用される。掘削工法は，全断面工法，補助ベンチ付全断面工法，ベンチカット工法，等があり，掘削幅 5m 程度であれば，全

断面工法が一般的に用いられる。発破掘削では、まず油圧削岩機（通称ジャンボ）で切羽を穿孔しそこに火薬を詰め（削孔、装薬）、その後発破する。

(2) ずり運搬

坑内でのおもなずり運搬方式としては、ダンプトラック、シャトルカー、連続ベルトコンベヤー方式等がある。

(3) 支保工

支保工は周辺地山を安定させることを目的として設置され、一般的に地山条件が良好な場合には、①吹付けコンクリート、②ロックボルトの順、地山条件が悪い場合には、①一次吹付けコンクリート、②鋼製支保工、③二次吹付けコンクリート、④ロックボルトの順に施工される。

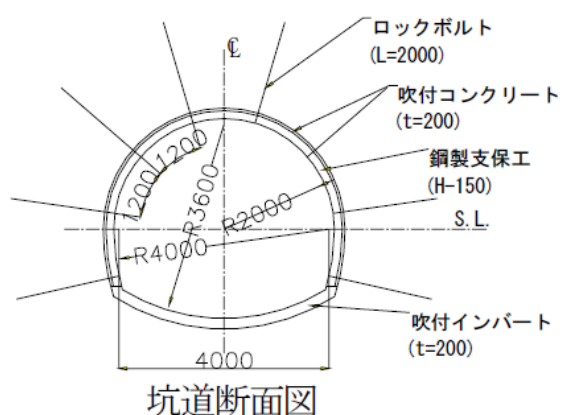


図 4-2-2 幅 5m 程度の支保パターン例（幌延深地層研究計画 平成 14 年度調査研究成果報告, JNC TN5400 2003-001, 平成 15 年 6 月, 核燃料サイクル開発機構 幌延深地層研究センター）

4.2.2 不良地山, 湧水対策技術

岩盤掘削中に断層などの不良地山が出現したり、高水圧の湧水が発生する場合は、状況に応じた対策工が講じられる。特に海底下においては、通常の上岳トンネルのように水を抜くということが現実的でないため、周辺を止水改良し透水係数をできるだけ小さくする方法を採用することになる。

(1) 不良地山対策

山岳工法は、切羽が安定していることが前提で、天端、鏡面、脚部の安定に分けて考え、それぞれに適した対策工を選定する。天端の安定対策は、掘削に先立ち切羽前方のアーチ部を補強するフォアポーリングや長尺フォアパイリング等がある。鏡面の安定対策としては、鏡吹付けコンクリート、鏡ボルトならびに注入工法等がある。脚部の安定対策は、仮インバートの施工、補強パイル、ウイングリブ等がある。

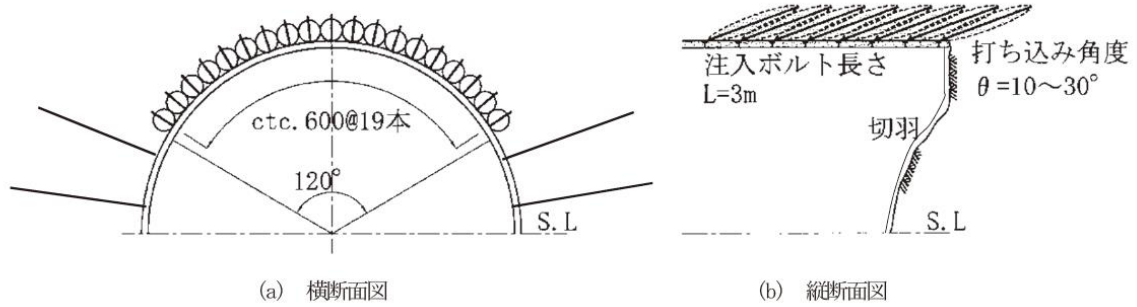


図 4-2-3 フォアポーリングの例（トンネル標準示方書山岳工法編，2016，土木学会）

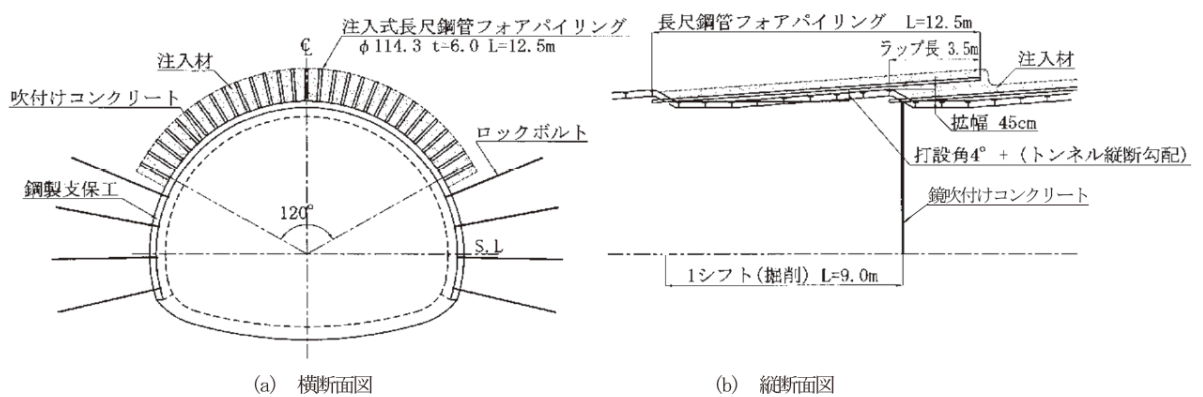


図 4-2-4 長尺フォアパイリングの例（トンネル標準示方書山岳工法編，2016，土木学会，）

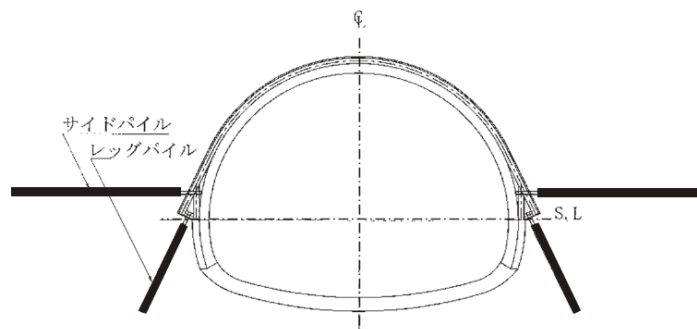


図 4-2-5 脚部補強パイルの例（トンネル標準示方書山岳工法編，2016，土木学会）

(2) 湧水対策

トンネルの掘削にあたって、湧水が多い場合には切羽の安定性が低下し、掘削が困難となるため、対策を講じる必要がある。湧水対策には排水工法と止水工法があるが、海底下においては、水を抜くということは現実的でないため、坑道前方並びに周辺を止水改良し透水係数をできるだけ小さくする方法が採用される。止水改良の材料は一般的には超微粒子タイプのセメント系が

用いられ、削岩機にてボーリングし、その孔を利用して注入ポンプにて注入を行う。

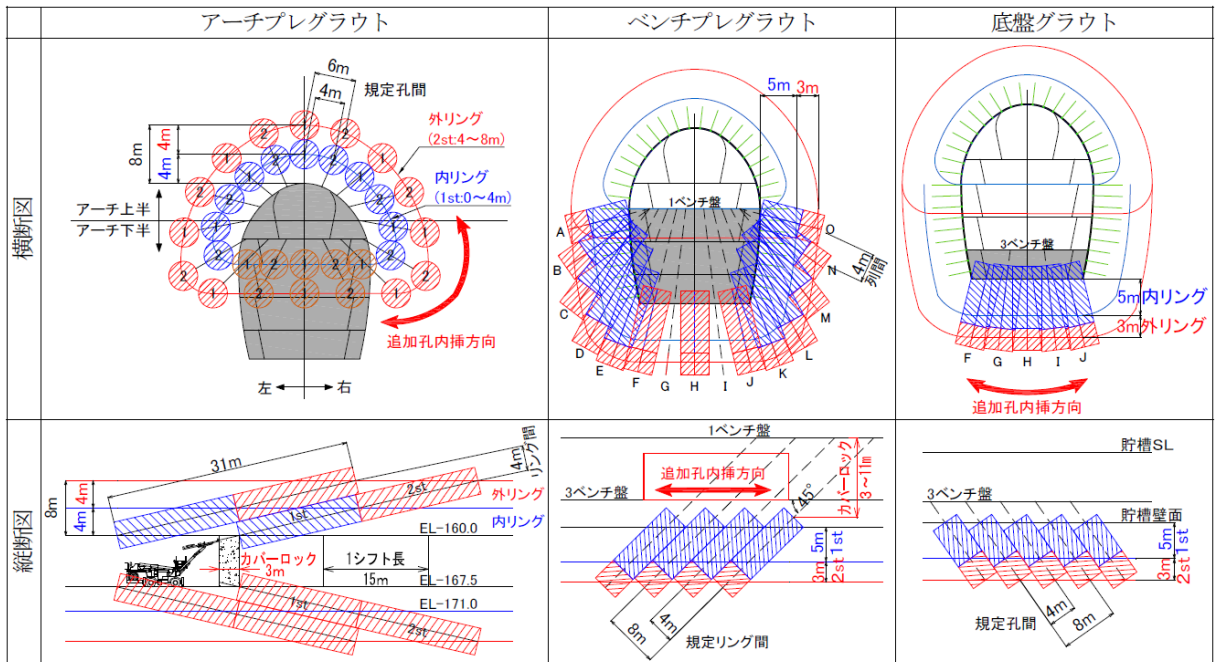


図 4-2-6 海底下での止水改良事例（倉敷基地 L P G 岩盤貯槽における高水圧下のグラウト施工実績と改良効果の評価について、小林，宮嶋他，第 42 回岩盤力学に関するシンポジウム，2014）

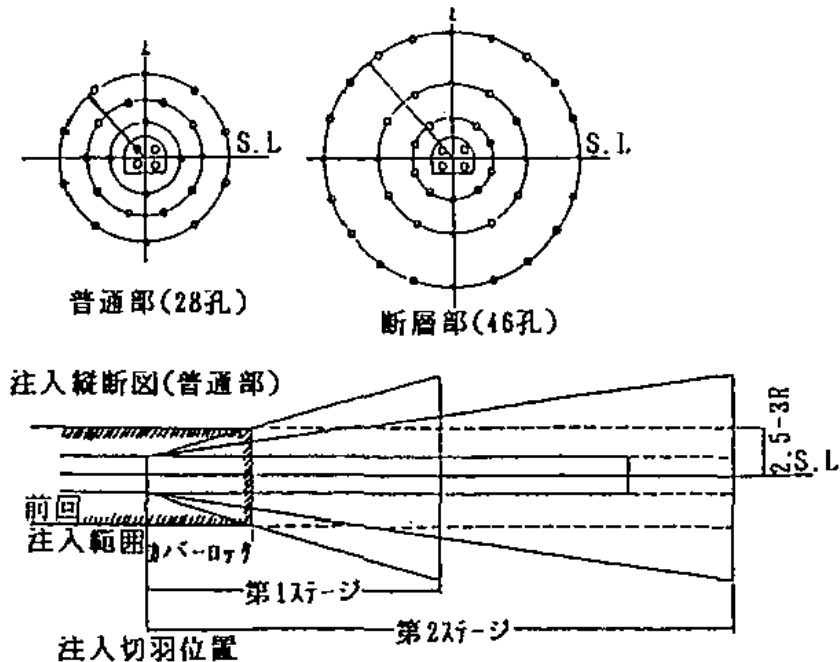


図 4-2-7 海底下での止水改良事例（青函トンネル技術のすべて第 5 章，鉄道界図書出版株式会社，昭和 61 年）

4.2.3 遠隔離島における坑道施工技術の課題と展望

ここでは、遠隔離島において坑道を施工する際の課題やその解決策の展望について述べる。

(1) 地質リスク

遠隔離島の地質は玄武岩や石灰岩であることが多い。玄武岩と石灰岩の境界が脆弱化したり、石灰岩の中に粘土化した地質を含む空洞が点在している可能性が高いことから、計画段階で十分な地質調査を行い地質や湧水の有無を把握しておく必要がある。遠隔離島の場合は海底下、大深度になることから、船上からの大深度高速ボーリングや、ボーリング孔、あるいは、ボーリング孔間を利用した各種物理探査などの精度向上が求められる。また、陸上からのコントロールボーリングも今後期待できる技術である。もちろん、施工前の調査には限度があるため、各施工段階で得られる地質情報や各段階で行われる計測管理によって、各段階で生じた現象の分析を行いながら、適切な対策工の選択あるいは組み合わせによって対応していくことも必要である。

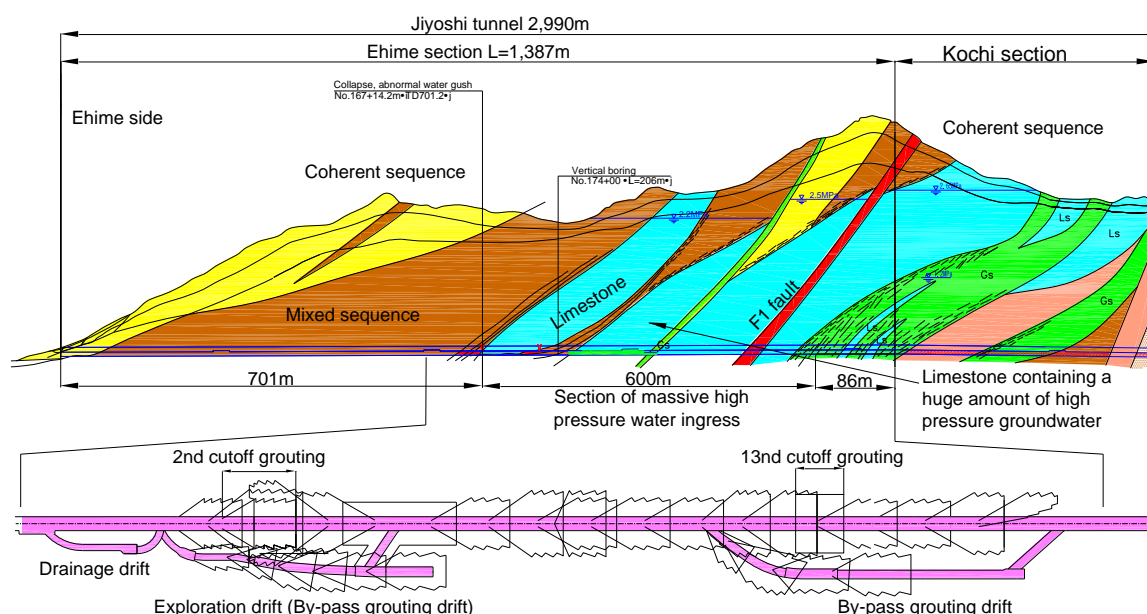


図 4-2-8 玄武岩，石灰岩が混在しているトンネルの事例 (Penetration Through a Tough Aquifer Directly Under The Shikoku Karst Plateau -Jiyoshi Tunnel, National Highway , Tamamura etc, ITA Congress, 2010)

(2) 水圧対策

海底下のトンネルでは、高い水圧が作用するため水圧対策が必須となる。シールドトンネルは水圧下でも施工可能な技術であるが、現段階の海底トンネルの実績では最大水圧は1 Mpa であり、大深度海底下で施工する際には、カッター交換技術、シールド材の耐久性、セグメントの耐久性など多くの課題を解決する必要がある。山岳工法の場合は、切羽前方を止水改良しながら施工するが、国内の実績では最大水圧 3.3MPa であり、更なる大深度での施工実現には、高圧注入ポンプの

開発，高水圧における注入材の長期耐久性の検証などの課題がある。

(3) 坑内環境

トンネル施工の機械化が進んでいるとは言え，現状は作業員が切羽まで行き機械を操作している。特に大深度では高い坑内温度への対策，適切な排水設備や換気設備が重要となる。また，事故発生時の待避所，避難ルートの確保も重要である。坑道断面やレイアウト設計の段階でこれらの環境設備については十分余裕をもった計画が必要となる。

(4) 物流

遠隔離島の場合，建設資材の搬入・仮置き，掘削土砂の仮置き・搬出について十分な計画をしておかねばならない。特に搬出入は天候に左右されるので十分な仮置きスペースと余裕をもった搬出入計画を立案しておく必要がある。最も大きなスペースを要するのが掘削土砂の仮置き場所になる。計画時には掘削土砂の数量予測はもちろん，土砂の性状に応じた仮置き方法を考えたうえでそのスペースを計画する必要がある。陸上の用地は限られるので，海上での設備構築を考える必要もある。その場合，水深が深いので，着底式ではなく浮遊式になると思われ，揺れにくい構造もしくは揺れを制御できるものの開発が必要となる。坑内運搬についても，施工ステップに応じた詳細な坑内運搬計画を立案する必要がある。遠隔離島の地下空間の有効活用のため，坑道を水平・横断に空間的に配置する場合は，施工時だけでなく完成時も合理的な物流システムを構築する必要がある。コンクリートについては，施工時には大量に使用し，完成後も局所的な維持管理や設備の増設などで断続的に使用することになるため，現地で製造するのが望ましく，その際には，十分な製造能力をもったコンクリートプラント設備を構築する必要がある。

(5) 通信インフラ

遠隔離島での大深度施工の場合，坑内と地上での通信はもちろん，離島と本土での通信もリアルタイムで双方向通信できる環境を整備する必要がある。各施工段階から得られる情報を整理・統合，分析し各種対策を意思決定するためには，多くの組織が関与することになり，通信インフラの整備は極めて重要である。

(6) 作業員の住環境

現地で作業する職員の住環境の整備については，衣食住はもちろん，適度な娯楽設備，定期的に帰宅できる仕組みの整備など，長期滞在可能な環境整備が必要である。

(7) 耐震設計等の設計指針

いくつかの遠隔離島は基盤地質の安定性から，耐震設計をする必要がない，あるいは，耐震設計をするとしても設計地震動は通常よりも軽微な想定でよいと考えられる。従来の設計指針にとられることなく，その地域の特性を最大限に活かした設計条件を設定することで，より合理的

な施工が可能になると思われる。

参考文献

トンネル工学委員会 編：2016 年制定 トンネル標準示方書〔山岳工法編〕・同解説，土木学会，2016.

4.3 鋼材の腐食

鋼材の腐食劣化特性、防食法、及び遠隔離島や実海域での長期暴露試験について資料を収集し調査した。

4.3.1 腐食劣化特性と腐食因子

港湾における鋼構造物は、海水に接し、また潮位の変動や波しぶきを受けることから、一般の陸上環境とは異なる厳しい腐食環境となる。港湾域では、表 4-3-1 に示すように、海上大気中、飛沫帯、干満帯、海水中等の位置ごとの環境で腐食特性が異なる³⁾。これらの腐食特性を考慮して、無防食の鋼管杭については、図 4-3-1 に示すような模式的な板厚減少のプロフィールが示されている¹⁾。

この他、鉄道施設では、直流電気鉄道においてレール等からの漏れ電流により、レールや沿線の埋設鋼管が腐食する電食が見られることがある²⁾。また、原子力プラントでは、劣化要因として、中性子照射により原子力圧力容器の破壊靱性の経年劣化（中性子照射脆化）、応力腐食割れ、及び疲労（温度変化、圧力変化、振動などによる疲労）などが挙げられている^{3),4)}。

表 4-3-1 港湾域における代表的な腐食環境の特徴（参考文献 1)を基に作成）

環境	環境の特徴	腐食特性
海上大気中	風が微細な海塩粒子を運ぶ。海面からの距離により環境の腐食性は変化する。また風速、風向、降雨、気温、日射量、埃、季節、汚染等の腐食因子が影響する。	日陰で降雨洗浄されない部位は、湿潤、高付着塩分となり、腐食速度が大きい。
飛沫帯	鋼材表面は、十分に酸素を含む薄い水膜で濡れている。生物付着はない。	腐食速度は、最も大きい。
干満帯	海水の潮汐により乾湿が繰り返される。	干満帯から海水中に連続している構造物では、M.S.L.（平均水面）付近が酸素濃淡電池のカソードとして作用し、腐食速度は小さくなる。防食被覆を施した鋼材では、被覆の損傷部での腐食速度は大きい。
海水中	生物付着、流速などが付着因子として作用する。	干満帯から海水中に連続している構造物では、M.L.W.L.（平均干潮面）の直下付近が酸素濃淡電池のアノードとして作用し、腐食速度が大きい。
海底土中部	硫酸還元バクテリアなどが存在することもある。	硫化物は、鋼材の腐食や電気防食特性に影響を及ぼす。
背面土中部	残留水位より上では一般陸上の土壌環境とほぼ同じ。	一般陸上の土壌環境に類似している。
	残留水位より下では海底土中部とほぼ同じ。	海底土中部に類似している。

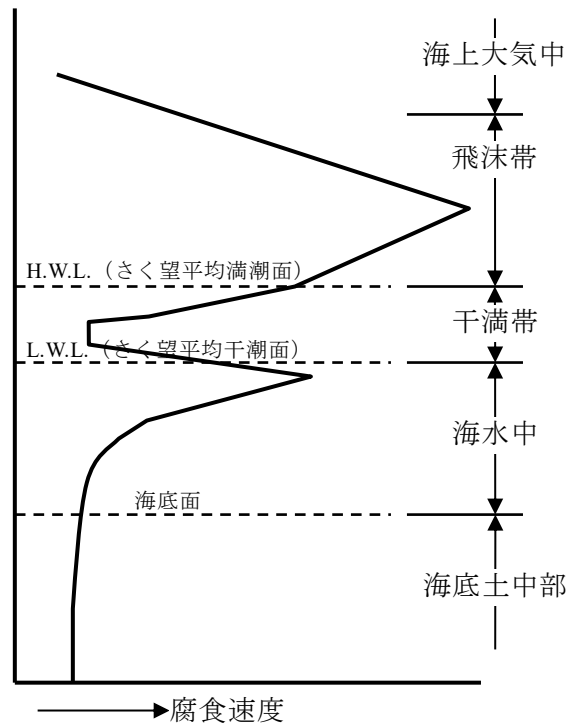


図 4-3-1 鋼管杭の板厚減少プロフィール (参考文献 1)を基に作成)

鋼材の腐食は、鋼材の設置される状態の影響を受ける。鋼材の腐食因子で、環境に関する因子及び材料に関する因子の代表的なものを以下に示す⁵⁾。

- ・環境に関する因子：pH，温度，溶解成分，溶存酸素，流速，微生物など
- ・材料に関する因子：異種金属接触腐食など

環境に関する因子のうち、pHについては、低 pH 領域では腐食速度が著しく増加、高 pH 領域では腐食速度が減少する傾向にある。また、溶存酸素については、増大すると腐食速度は大きくなる。温度については、温度上昇に伴って鋼材表面への酸素の拡散速度が増大し、同時に鋼材表面における反応速度も増すので腐食速度は大きくなる。これによって給水配管内等の密閉系では、温度上昇によって腐食速度が増加していくが、開放系では温度の上昇に伴って溶存酸素量が減少するため、ある温度以上から腐食速度は急激に減少する傾向にある⁵⁾。

材料に関する因子で挙げた異種金属接触腐食は、異なる金属が海水、淡水及び飽和土中等の連続した電解質中で接触している場合、両者の腐食電位の違いにより、卑な電位の金属の腐食がより促進される腐食である。例えば、普通鋼とステンレス鋼を接触させて海水中で使用すると、普通鋼の腐食は単独で使用するよりも加速される⁵⁾。

4.3.2 鋼材の防食法

鋼材の防食法には、鋼材に被覆を施して水分、酸素及び塩化物イオンなどの腐食因子の透過を抑制・遮断するものと、電気化学的に腐食反応を抑制するものがある。

港湾鋼構造物には様々な防食法が適用されており、図 4-3-2 のような分類が示されている⁶⁾。また、被覆防食法には工場での被覆施工あるいは現地での被覆施工に適したものがあり、これまでの実績では、塗装、重防食被覆、超厚膜形被覆及び耐食性金属被覆などは工場被覆、水中硬化形被覆、ペトロラタム被覆及びモルタル被覆などは現地被覆にそれぞれ適しているとされている⁷⁾。被覆防食法は、基本的には、L.W.L. - 1.0m（さく望平均干潮面から 1m 下がった位置）から上に適用され、被覆によって腐食因子の透過を抑制・遮断するものである。ただし、被覆防食法に分類されているもののうち、電着工法の適用範囲は海水中であり、金属溶射、めっきは、現状、海上大気中での適用がほとんどである。また、金属溶射、めっきは、亜鉛、アルミニウムまたはアルミニウム合金などが先に腐食して鋼材の腐食を抑制する電気化学的な作用も有している。

電気防食法は、鋼材表面から流れ出す腐食電流を抑制・防止するために外部から電流を流して防食するものであり、M.L.W.L.（平均干潮面）以下に適用される。鋼材よりも卑な電位の金属または合金による陽極を鋼材に取り付けて防食のための電流を流す流電陽極方式と、直流電源装置によって強制的に防食のための電流を流す外部電源方式がある。

港湾構造物の防食は、環境の腐食性及びそれぞれの防食法の特性などを十分に考慮して選定しなければならない⁷⁾。

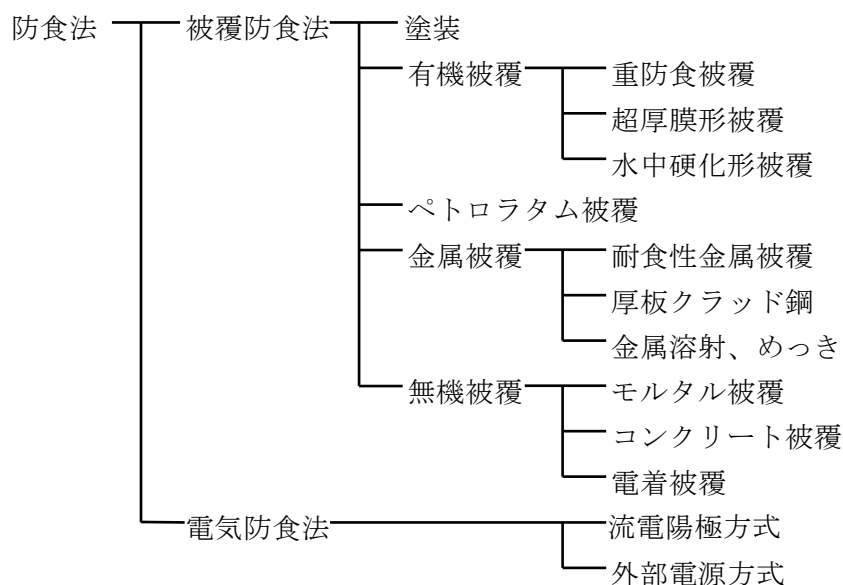


図 4-3-2 港湾鋼構造物の防食法の分類（参考文献 6）を基に作成）

また、鉄道施設の電食の防食対策には流電陽極方式、外部電源方式の他に排流法などもある。排流法にはレールと埋設管を電氣的に接続して電流が分流流出するのを防止する選択排流法や強制排流法がある²⁾。

4.3.3 遠隔離島（沖ノ鳥島）での長期暴露試験

海洋構造物を対象とした建設材料の長期暴露試験が、日本の最南端に位置する沖ノ鳥島で実施され、19.5年間にわたる暴露試験の結果が報告されている^{8),9),10),11)}。この暴露試験は、1982年より建設省土木研究所（当時）と鋼材倶楽部（当時）海洋防食・耐久性研究会とが共同で開始したものである。遠隔離島の実環境での長期暴露試験データは貴重であり、腐食特性の把握や防食技術の耐久性評価に直結する有益なデータである。暴露試験体は、普通鋼、ステンレス鋼 14 種、非鉄金属 3 種（チタン、銅、アルミ合金）、被覆鋼板 10 種（金属被覆、有機ライニング、重防食塗装）の合計 28 種であり、海上高さ約 15m の位置での大気暴露が実施された。また、沖ノ鳥島は本土周辺と比べてはるかに厳しい腐食環境であり、その影響を評価するために、駿河湾の海洋技術総合研究施設でも同一の暴露試験体を用いて 24 年間の大気暴露試験が実施されており、沖ノ鳥島と駿河湾の両者の結果が比較されている。例えば、参考文献 11)では、概略、以下のような報告がなされている。

- ・沖ノ鳥島の環境は、駿河湾に比較し、平均気温が高く、また 濡れ時間（※）が長く、腐食環境が厳しい。

※濡れ時間：0℃よりも高い気温のときに相対湿度が 80%以上であるときの時間（ISO9223）

- ・普通鋼（炭素鋼）の平均腐食速度は、約 12 倍程度沖ノ鳥島が大きかった。
- ・ステンレス鋼は、軽微な孔食、隙間腐食が発生し、隙間部の最大腐食深さは沖ノ鳥島の方が大きかった。また、PREN（※）の大きな試験体では最大局部腐食深さは小さく抑えられていた。

※PREN：Pitting Resistance Equivalent Number, 孔食指数,

$$\text{PREN}=\text{Cr}+3\text{Mo}+16\text{N} : \text{Cr,Mo,N はいずれも mass\%}$$

- ・チタン、銅、アルミ合金の腐食は小さく、さらにチタンは局部腐食もなく高耐食性を示した。
- ・亜鉛アルミ溶射、アルミ溶射は溶射層が残存していた。
- ・溶融亜鉛めっきは駿河湾ではめっき層が残存するも、沖ノ鳥島ではめっき層が概ね消失していた。
- ・有機ライニングの絶縁抵抗は高値で防食機能を保持していたが、絶縁抵抗は低下傾向にあり、低下量は沖ノ鳥島の方が大きかった。

4.3.4 各種防食法の長期暴露試験

被覆防食法及び電気防食法を含めた各種防食法の長期暴露試験が波崎海洋研究施設砕波帯総合観測用栈橋（茨城県）にて実施されており、30年間にわたる暴露試験の結果が報告されている¹²⁾。この暴露試験は、1984年度に運輸省港湾技術研究所（当時）、（財）沿岸開発技術研究センター（当時）及び鋼管杭協会（当時）が共同で開始し、47本の鋼管杭に、有機被覆、ペトロラタム被覆、無機被覆、電気防食、塗装の様々な防食方法が適用されている。この暴露試験から貴重で有益なデータが得られており、各種防食法の長期耐久性の評価及び維持管理での防食性能評価の際の指標となり得るパラメータの提案などがなされている¹²⁾。

4.3.5 まとめ

鋼材の腐食に関する調査結果を以下にまとめる。

- ・鋼材の腐食は温度や pH 等の影響を受け、港湾域や鉄道施設等の鋼材が適用される環境によっても腐食特性は異なってくる。
- ・鋼材の防食法は、被覆防食法や電気防食法等で様々な防食法が実用に供されている。
- ・遠隔離島では、沖ノ鳥島にて海洋構造物を対象とした 19.5 年間にわたる長期暴露試験によって腐食特性や耐久性等に関するデータが示されている。

参考文献

- 1) (財) 沿岸技術研究センター：港湾構造物防食・補修マニュアル(2009 年版), pp.11-14, 2009.11
- 2) 奥井明伸：ワンポイント基礎知識[14-1]電食, Railway Research Review, Vol.65, No.6, p.38, 2008.6
- 3) 原子力安全・保安院, (独) 原子力安全基盤機構：主要経年劣化事象の性状とこれに対する高経年化対策について, p.1, 2005.6
- 4) (一財) 電力中央研究所：原子力圧力容器鋼の中性子照射脆化と健全性評価, Business i. ENECO, p.5, 2013.3
- 5) (一社) 鋼管杭・鋼矢板技術協会：防食ハンドブック, pp.2-3 - 2-9, 2011.3
- 6) (財) 沿岸技術研究センター：港湾構造物防食・補修マニュアル(2009 年版), p.36, 2009.11
- 7) (財) 沿岸技術研究センター：港湾構造物防食・補修マニュアル(2009 年版), pp.52-65, 2009.11
- 8) (独) 土木研究所 材料資源研究グループ(新材料)：沖ノ鳥島における建設材料耐久性試験 ー 第Ⅱ期メタル系材料の暴露 19 年の結果ー, 土木研究所資料 第 4214 号, 2012.11
- 9) (国研) 土木研究所, (一社) 日本鉄鋼連盟：海洋構造物の耐久性向上技術に関する共同研究報告書(飛沫部及び干満部における鋼構造物の防食技術に関する研究 第 1 分科会) ー 暴露期間 30 年の研究成果ー, 共同研究報告書整理番号 480 号, 2016.3
- 10) (一社) 日本鉄鋼連盟 海洋防食・耐久性研究会, (国研) 土木研究所ほか：沖ノ鳥島および駿河湾における建設材料の長期暴露試験による耐久性評価(沖ノ鳥島および駿河湾暴露試験結果の比較), 材料と環境講演大会予稿集, B-304, 2018
- 11) (一社) 日本ウエザリングテストセンター：駿河湾および沖ノ鳥島における長期暴露試験による耐久性評価 ー (国研) 土木研究所, (一社) 日本鉄鋼連盟による共同研究ー, ウェザリング技術研究成果発表会テキスト, pp.103-114, 2018.11
- 12) 山路ほか：長期海洋暴露試験に基づく鋼管杭の防食工法の耐久性評価に関する研究(30 年経過時の報告), 港湾空港技術研究所資料, No.1324, 2016.6

4.4 遠隔離島のインフラ整備

遠隔離島の地下空間を何らかの目的で利用した場合、これを運営（操業）する際に必要な地上インフラについて述べる。

4.4.1 各種施設

(1) 受入れ・貯蔵・払出し施設

例えば、地下空間を重要物の貯蔵施設に利用する場合は、①受入れ・検査施設、②貯蔵施設、③坑内搬入準備施設、④搬出後仮置き施設、⑤払出し準備施設等が必要となりこれらの施設を繋ぐ運搬路が必要となる。

(2) 管理施設

受入れから払出しまでの一連の管理や、坑内状況のモニタリング等を実施する施設。

(3) 坑道換気施設

坑道内の換気を維持する施設。

(4) 坑道排水処理施設

坑道内で発生する湧水を集水し排水する施設。

(5) 保安施設

防災、消火などを担当する防消火施設やセキュリティ確保のための守衛施設。

(6) 電力・水供給施設

各施設に必要な電力や上水、工業用水を供給する施設。

(7) コンクリート供給施設

操業中の増設や補修に伴って必要となるコンクリートを供給する施設。

(8) 居住施設

各種施設内で勤務する人々や外部からの訪問者のための居住施設。

4.4.2 遠隔離島におけるインフラ整備の課題と展望

遠隔離島にて上述の施設を構築・運営するための課題と将来の展望について述べる。

(1) 港湾整備

物資運搬や調査のための船舶の係留、接岸、荷さばき等が可能となる岸壁や、クレーン等の揚重設備や運搬設備などの整備が必要となる。激波浪かつ気温が高い海洋環境下であるため、コンクリートや鋼材の耐久性の向上に関する研究開発が望まれる。また、荷役作業時間も限られることから、安全かつ効率的な荷役作業を可能とする新技術も望まれる。



写真 4-4-1 北大東島における船舶の係留状況。防波堤がなく波が直接来襲するため、船体の損傷を避けるために岸壁から一定の距離を置いて係船し、乗船客の乗り降りや貨物の荷役は移動式クレーンによって行われている。(笹川平和財団 HP より https://www.spf.org/_opri/newsletter/410_2.html)

(2) 船舶運航状況管理，気象観測

地下空間の有効利用時には多数の船舶が往来することが予想され，これらに関わる船舶の運航状況を的確に把握する必要がある。また，台風などが頻繁に発生する地域でもあるため，精度の高い気象予測が必要となる。気象衛星やレーダーを用いた気象情報ならびに船舶の運航状況の管理精度の向上が望まれる。

(3) 海上活用

遠隔離島の限られた面積では各種施設を配置することは困難であることが予想され，海上の積極的な利用を考える必要がある。

(4) 国土保全

遠隔離島はサンゴ礁に囲まれている場合が多く，国土保全の観点から，サンゴ礁生態系を破壊しない，或いは，サンゴを増殖させるための技術開発が必要となる。

(5) エネルギー確保

施設運営には多くの電力が必要である。ガソリンを利用した発電機だけでなく，風力，波力，潮汐，温度差などの自然エネルギーを利用した発電施設についても検討されるべきであり，そのためには，厳しい風力，波浪環境での発電技術の開発が必要となる。

(6) 地域特性に合わせた設計

第2章でも述べたが，いくつかの遠隔離島は基盤地質の安定性から，耐震設計をする必要がない，あるいは，耐震設計をするとしても設計地震動は通常よりも軽微な想定でよいと考えられる。従来の設計指針にとらわれることなく，その地域の特性を最大限に活かした設計条件を設定することで，より合理的なインフラ整備が可能になるとと思われる。

第5章 まとめ

我が国の国土の大宗はプレート境界域に近接しているため、火山噴火や地震等地殻変動が活発である。一方で我が国の南方海域には、沖ノ鳥島、沖大東島、南鳥島等いわゆる遠隔離島が存在する。これら遠隔離島は火山島として誕生したものであるが、火山活動が終焉してから一千万年以上が経過している。またプレート境界から離れており、プレート運動を考慮しても向後数百万年は地殻変動に巻き込まれないことが予想される。(1.1)

遠隔離島の一例として挙げられる南鳥島は、東京より南東へ約1860kmの位置にある、太平洋プレート上のサンゴ礁でできた小さな島である。島は、一辺約1500mの三角形をなしており、最高地点の標高9m、島の面積は約1.9km²である。南鳥島は、陸上部の利活用において、気象・海象データが整っていること、大きな津波の脅威が少ないこと、長期の地盤安定性等、多くのメリットがあると言えるが、台風などの荒天時の自然災害に対する対策が必要である。

南鳥島の地質は、音波探査記録の音響的層相の特徴に基づけば、下部は火山岩類、上部は炭酸塩岩類である。ただし、火山岩類には礫岩があるだけでなく、炭酸塩岩類には碎屑物が含まれることから、どの内部構造には多くの隙間が存在することが示唆され、南鳥島の地下空間利用における障害となる。

遠隔離島の活用は遠隔離島の安定性が前提となるが、山体崩壊やプチスポットのような地域的な火山活動は遠隔離島の安定性に影響を及ぼしうる。このため、遠隔離島の海底地形・地質情報を取得し、過去における山体崩壊の歴史と原因を把握しておく必要がある。また、プレートの移動に伴いプチスポットによる火山噴火に遭遇する可能性の有無を把握しておく必要がある。

(2.1.2)

遠隔離島の地下空間を活用する場合、地下水の存在及び流動を把握することが必要である。海底地形・地質を把握することで地下水の流動性の情報が得られる。また、遠隔離島における地下水流動を引き起こす駆動力が多様で、流動が複雑かつ活発でありうることが知られている。境界条件、物性情報が適切に設定できるならば、数値モデルで地下水の挙動が把握できる状況にある。(2.2.3)

遠隔離島の安定性や地下水の状況を把握するためには、遠隔離島での地表からの調査や船舶を用いた調査（ボーリングを含む）が必要になる。遠隔離島での調査には、人員・資材の運搬、調査員の生活基盤確保、荒天時の退避、ボーリング等掘削に伴う廃泥等の処理等、多くの検討事項があることに留意する必要がある。(3.2.6)

遠隔離島に限らず、大深度での地下空間の利用を検討する場合、坑井掘削における深度限界は重要な問題である。空間利用の目的で大径の坑を大深度まで掘削する場合、大径ケーシングパイプの圧潰耐力とリグの吊り能力による制約が大きい。前提条件によって異なるが、

- 外径 36 inch (91.4 cm) のケーシングパイプで 最大 2,000 m 程度
- 外径 24 inch (61.0 cm) のケーシングパイプで 最大 3,500 m 程度

まで降下できる可能性がある。

大径かつ大深度の堅坑を施工することを考えた場合、ロータリー掘削法が最も有力な選択肢になるが実績は皆無であり、大深度への大径ケーシング降下とセメンチングに関する手法や装置、長い時間スケールでの腐食防止対策や坑の保全方法といった課題の検討が必要になる。また、大荷重対応の大型エレベーター、ドリルフロアでケーシングを保持するスリップ等のハンドリング機器を新たに開発する必要性が生じる可能性が高く、十分に時間を掛けて準備を進める必要がある。(4.1.2.3)

坑井掘削技術に関して、今後望まれる技術革新や技術検討が必要な項目として以下が挙げられる。

- ① 軽量、高圧潰耐力の大径ケーシング・コネクションの開発
- ② 掘削リグの吊り能力向上、大径大荷重ケーシングハンドリング機器の開発
- ③ 3軸設計ソフトウェアでのベンディングストレスを含めたストリング挙動の検証

遠隔離島の表層を生成する石灰岩は内部に大きな空洞を有することがあり、泥水を用いるロータリー掘削では逸泥の危険がある。さらに、石灰岩中の空洞のなかに高圧ガスが存在した場合には、大逸泥の後にガスの噴出が発生するリスクがあり、遠隔離島での大径かつ大深度の掘削は容易ではない。また深部の玄武岩の掘削では、硬質の場合はビットの摩耗が早く、崩壊し易い岩質の場合は坑壁が不安定になるといった理由から掘削作業の進捗スピードは大きく低下する可能性が高い。(4.1.3)

大径かつ大深度の掘削の第一ステップとして、小径の調査ボーリングを行い、実際の石灰岩と玄武岩の境界、岩石強度などの物性値や地層圧力、地層温度、流体の流れ等の基礎情報を収集し、設計条件の精度を向上させてリスク評価を行い、詳細計画を作成した上で、次のステップの検討に移るのが適当である。なお、掘り屑や余剰泥水の廃棄処理についてもしっかりと準備する必要がある。(4.1.3)

遠隔離島において地下空間を利用するための坑道を施工する場合、玄武岩と石灰岩の境界が脆弱化したり、石灰岩の中に粘土化した地質を含む空洞が点在したりしている可能性が高く、事前の調査が不可欠である。この場合、対象が海底下、大深度となるため、船上からのボーリングやボーリング孔を利用した物理探査が有効な手段となる。また、海底下の地下空間の利用に当たっては水圧対策だけでなく、建設資材の搬入、掘削土砂の搬出等について十分な計画が必要である。土砂の仮置きには相当なスペースが必要となることにも留意すべきである。コンクリートプラントの現地設置が必要かもしれない。(4.2.3)

遠隔離島において地下空間の利用を目的とした大型の施設を構築・運営するためには、港湾の整備、エネルギー確保等が不可欠であり、いずれも研究開発すべき事項がある。(4.4.2)

別紙

遠隔離島における地下空間利用のための調査研究検討委員会
開催概要

委員長

東京理科大学 理工学部 土木学科 教授 菊池 喜昭

委員

山口大学 大学院創成科学研究科 地球圏生物物質科学系専攻
准教授 川村 喜一郎

応用地質株式会社 エネルギー事業部 計測探査部 上級専門職 坂下 晋
エスケイエンジニアリング株式会社 代表取締役 社長 武村 貢

(第6回より中村委員に代わり参加)

東洋建設株式会社 顧問 谷 伸

東京大学 大学院 新領域創成科学研究科 環境学研究系系長
教授 徳永 朋祥

秋田大学 国際資源学研究科 資源開発環境学専攻
教授 長縄 成実 (第4回より参加)

エスケイエンジニアリング株式会社 常務取締役 中村 常太 (第4回より参
加)

新日鐵住金株式会社 建材事業部 建材開発技術部 土木基礎建材技術第二室
室長 原田 典佳

基礎地盤コンサルタンツ株式会社 取締役 事業本部長兼技術本部長 柳浦 良
行

鹿島建設株式会社 土木管理本部 土木技術部 担当部長 横尾 敦

事務局

国立研究開発法人海洋研究開発機構 理事 阪口 秀

国立研究開発法人海洋研究開発機構 イノベーション・事業推進部
企画調整統括 山田 康夫 (第4回より参加)

1. 第1回委員会

(1) 日時 ; 2016年12月27日(火) 10:00~12:00

(2) 場所 : 社団法人 地盤工学会 会議室

(3) 出席者 :

(委員) 菊池 (委員長) , 柳浦, 谷, 原田, 川村, 坂下, 横尾

(事務局) 阪口

- (4) 議題：
本委員会設置の趣旨説明，本委員会での検討事項

2. 第2回委員会

(1) 日時；2017年3月14日（火） 14：00～16：00

(2) 場所：社団法人 地盤工学会 3階 会議室

(3) 出席者：

(委員)

菊池（委員長），柳浦，谷，原田，徳永，川村，坂下，横尾
(事務局)

阪口

(4) 検討事項：

遠隔離島における地下空間利用に関する技術的課題，問題点の抽出

話題提供1 川村委員

話題提供2 原田委員

話題提供3 横尾委員

3. 第3回委員会

(1) 日時；2017年5月29日（月） 10：00～12：00

(2) 場所：社団法人 地盤工学会 3階 会議室

(3) 出席者：

(委員)

菊池（委員長），柳浦，谷，原田，徳永，川村，坂下，横尾
(事務局)

阪口

(4) 検討事項：

遠隔離島の地質学的，水理学的特性について

話題提供1 川村委員

4. 第4回委員会

(1) 日時；2017年7月25日（火） 10：00～12：15

(2) 場所：社団法人 地盤工学会 3階 会議室

(3) 出席者：

(委員)

菊池（委員長），柳浦，谷，原田，徳永，川村，坂下，横尾
(ゲスト)

長縄, 中村

(事務局)

阪口, 山田

(4) 検討事項:

遠隔離島周辺海底下の地下環境の特性

地下空間利用のための工学的課題 (土木工学, 材料工学等)

話題提供 1 川村委員

話題提供 2 横尾委員

話題提供 3 中村委員

話題提供 4 原田委員

5. 第5回委員会

(1) 日時; 2017年10月30日(月) 10:00~12:00

(2) 場所: 社団法人 地盤工学会 地階 A会議室

(3) 出席者:

(委員)

菊池(委員長), 谷, 原田, 徳永, 川村, 坂下, 横尾, 長縄, 中村

(事務局)

阪口, 山田

(4) 検討事項:

大深度掘削に関する技術的課題

遠隔離島周辺の地下空間利用に関わる法的要件

話題提供 1 中村委員

話題提供 2 山田(事務局)

6. 第6回委員会

(1) 日時; 2018年1月22日(月) 10:00~12:10

(2) 場所: 社団法人 地盤工学会 地階 A会議室

(3) 出席者:

(委員)

菊池(委員長), 川村, 坂下, 武村, 谷, 徳永, 長縄, 原田, 柳浦, 横尾

(事務局)

阪口, 山田

(4) 検討事項:

遠隔離島周辺海域での科学調査

遠隔離島周辺での過去の火山活動

話題提供 1 坂下委員

話題提供 2 川村委員

話題提供 3 国立研究開発法人海洋研究開発機構 海洋掘削科学研究センター
海洋・リソスフェア研究グループ グループリーダー 田村 芳彦

彦

7. 第7回委員会

(1) 日時；2018年5月22日（火） 9：00～11：00

(2) 場所：社団法人 地盤工学会 地階 A会議室

(3) 出席者：

(委員)

菊池（委員長），川村，武村，谷，柳浦，横尾

(事務局)

阪口，山田

(4) 検討事項：

中間報告書（案）について

次回以降の検討課題について

8. 第8回委員会

(1) 日時；2018年7月30日（月） 14：00～16：00

(2) 場所：社団法人 地盤工学会 地階 A会議室

(3) 出席者：

(委員)

菊池（委員長），川村，坂下，武村，谷，徳永，長縄，原田，柳浦，横尾

(事務局)

阪口，山田

(4) 検討事項：

遠隔離島周辺での過去の地下空間利用の事例

大深度坑道施工に関する技術的課題

話題提供 1 川村委員，谷委員

話題提供 2 横尾委員

9. 第9回委員会

(1) 日時；2018年11月2日（金） 10：00～12：00

(2) 場所：社団法人 地盤工学会 地階 A会議室

(3) 出席者：

(委員)

菊池（委員長），川村，坂下，武村，谷，徳永，長縄，原田，柳浦，横尾
(事務局)

山田

(4) 検討事項：

遠隔離島の地質環境評価のための調査計画

遠隔離島を対象とした地下水流動モデリング

話題提供 1 柳浦委員，坂下委員

話題提供 2 徳永委員

10. 第10回委員会

(1) 日時；2019年1月28日（月） 15：00～17：00

(2) 場所：社団法人 地盤工学会 地階 A会議室

(3) 出席者：

(委員)

菊池（委員長），川村，坂下，武村，谷，徳永，長縄，原田，柳浦，横尾
(事務局)

阪口，山田

(4) 検討事項：

最終報告書（案）について