



海洋科学掘削によるマントル到達への挑戦
—地球最大のフロンティアに挑む—

マントル掘削へ向けて —技術的検討：BLADE レポートから—

江口 暢久
澤田 郁郎

**Technical challenges to the Mantle, Summary
of the BLADE Report.**

Nobuhisa Eguchi • Ikuo Sawada

えぐちのぶひさ：国立研究開発法人海洋研究開発機構
研究プラットフォーム運用開発部門運用部
さわだいくお：国立研究開発法人海洋研究開発機構
研究プラットフォーム運用開発部門運用部

人類が初めて海洋底を科学目的で掘削し、コアサンプルを回収してから 60 年が過ぎた。その後、海洋科学掘削は、多くの謎を解き明かし、教科書を書き換える発見を見せてくれる。しかし、パイオニア達が目指した、海洋地殻を掘り抜いてマントルへ、というプロジェクトは実行されていない。本稿では、2013 年に出されたマントル掘削についての技術検討レポートの抄訳を紹介する。

1. はるか昔のこと

1957 年 4 月のある晴れた土曜日の朝、カリフォルニアはラ・ホヤの Walter Munk 博士の家では American Miscellaneous Society (AMSOC) の非公式会合が開かれていた。そこで話し合われたのが、マントルまで掘削をしてサンプルを採取する、というアイデアだった。日のさすパティオでの朝食会では、このアイデアはシンプルでかつ理論的に思われた^[1]。それから 4 年後、1961 年 3 月後半アメリカの文豪 John Steinbeck は、サンディエゴの南方 220 マイル、グアダループ島の 44 マイル東の海域にいた。LIFE 紙の特派員として、カメラマンの Fritz Goro と一緒に彼はモホール計画の最初の航海に乗船していた。彼が乗船していたのは、CUSS1 と呼ばれる海軍のバージを改造した掘削船だった^[2]。それまでの海洋での石油掘削は、大陸棚上の浅い海域で行われており、ジャッキアップやアンカーによる船体固定を行っていた。しかし、モホール計画では水深約 3,600m の海底を掘削することになる。これを実行するために、ダイナミックポジショニングシステムが CUSS 1 には搭載されていた^[1]。この試験航海ののち、AMSOC は深部掘削のツールや、ライザー管、そして掘削船の設計をも検討している^[1]。これらの議論がその後の DSDP から始まる海洋科学掘削の礎になったことは明らかである。

そして、3 月 28 日に人類史上初めての海洋科学掘削のコアが CUSS 1 の船上に上がってきた時に Steinbeck は、“All new. A lot of textbooks will have to be rewritten.” と船上の興奮を伝えた^[2]。

	ココスプレート	パハ・カリフォルニア	ハワイ沖
水深	3,650m	4,300m	4,050m
掘削深度	6,250m	6,100m	6,700m
総パイプ長	9,900m	10,400m	10,750m
地殻の年代	15 – 19 Ma	20 – 30 Ma	78 – 81 Ma
Moho面の推定温度	250°C 以上	200 – 250°C	150°C 程度
堆積物の厚さ	250 – 300m	80 – 130m	200m
緯度	67° – 87°N	25° – 33°N	22° – 23°N
経度	90° – 92°W	120° – 127°W	155° – 156°W
参照できる孔井	1256D	—	—
港までの距離	644km程度	800 – 1,000km程度	400km程度
有利な点	最も浅い水深 地質構造がわかっている これまでに掘削されている	Moho面の温度が中程度	Moho面の温度が最も低い 港までの距離が最も近い
不利な点	Moho面の温度が最も高い	事前調査データが最も少ない オフリッジ火山活動の影響最も深い水深	総パイプ長が最も長い ホットスポット火山活動の影響

表1 現在提案されているマントル掘削の候補地点の諸条件の比較。(本レポートのFig. 2を改変)

2. BLADE レポート

CUSS1の初めての航海から、50年以上が経った2013年、米国テキサスにあるBLADE Energy Partners (BLADE)はIODP-MI^{#1}とJAMSTECに対して、Implementation Plan for the BEAM – “Borehole into the Earth's Mantle” Program Final Reportというタイトルの報告書を提出した^[3](以降「本レポート」と表記する)。これは、2011年から2012年にBLADEによって行われた、地球深部探査船「ち

IODP-MI^{#1}: Integrated Ocean Drilling Program – Management International, Inc. 2003年から2013年におこなわれた統合国際深海掘削計画の中央管理組織。米国で設立された法人組織で、ワシントンD.C.と札幌に事務所を持ち、参加各国からの供出金から、各プラットフォームオペレーターへScience Operation Costと呼ばれる科学運用費を分配したり、プログラムを統合する役割を担っていた。

きゅう」を用いたマントル掘削計画のフィジビリティスタディ^[4]を再評価し、また、2013年に同じくBLADEによって行われた、High Impact Systems レポート^[5]と統合して、より詳細なBEAM (Borehole into the Earth's Mantle Program)の実行計画を示すものであった。

本レポートの要旨として示されたのは、「ちきゅう」によるマントルに至る科学掘削は、現在大水深で掘削を行なっている石油業界などの最新技術を用いることで、ほぼ実現可能である、ということであった。

本レポートでは、プロジェクトのバックグラウンドとしてフィジビリティスタディ^[4]を振り返り、各サイトにおける多様性のある掘削計画のオプションを提案している。さらに、ライザーのデザインについてライザー解析の結果を示し、フィジビリティスタディ^[4]よりも詳細なプロジェクトの

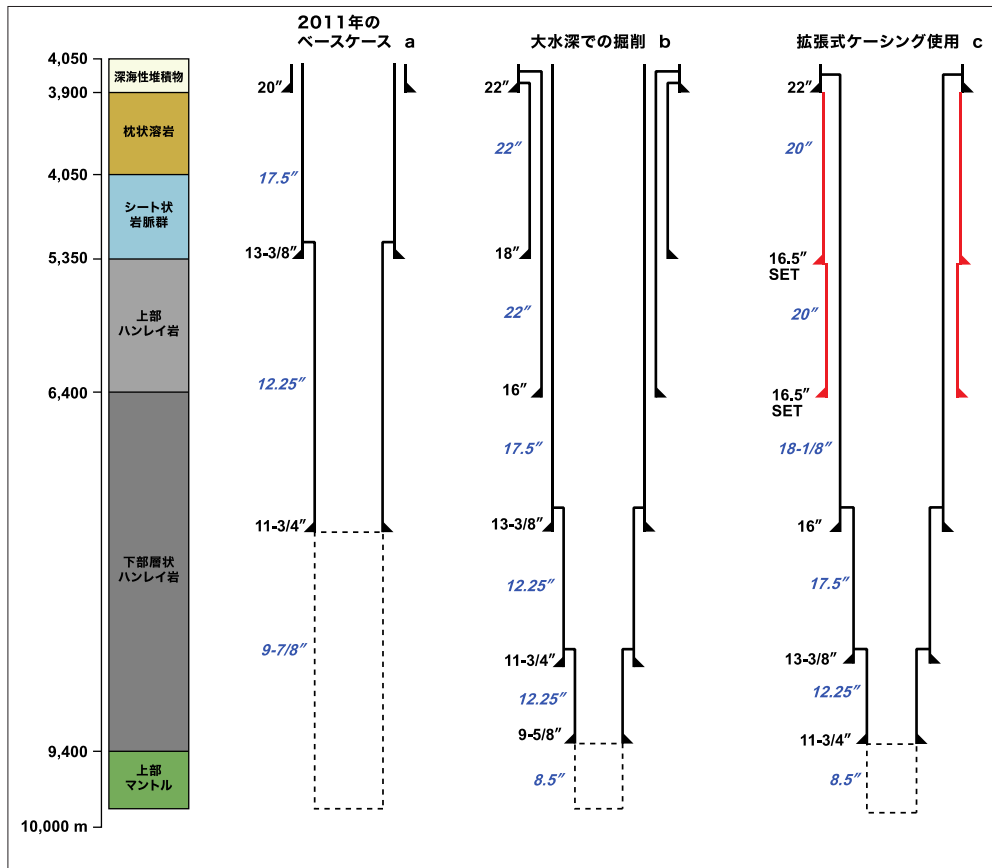


図1 本レポートで考察された3種類のケーシングプラン. a. 2011年のフィジビリティスタディ^[4]で扱われたベースケース, b. 石油・ガス業界の大水深での掘削で使われる一般的なケース, c. 拡張式ケーシングを用いたケース. (本レポート Fig. 25 を改変)

時間と予算について述べている。また、最後にはプロジェクトを実行するためのタイムラインについても言及している。以下で本レポートの各章についてまとめる。

2.1 掘削地点

本レポートで比較されたのは、現在科学コミュニティから提案されている、3カ所掘削候補地点であり、表1にその比較を示す。

2.2 孔井のデザイン

2011年のフィジビリティスタディ^[4]では、ベースケースとして非常にシンプルな孔井のデザイン

が提示されていた。このベースケースは、BOP（噴出防止装置）を支えるための36インチコンダクターパイプ及び20インチのケーシングを海底堆積物中にセットする。そこから、13-3/8及び11-3/4インチのケーシングを1,000m程度下部層状ハンレイ岩内にセットし、それ以深は裸孔でモホ面を貫き、マントルへ到達するというものであった。しかし、IODP Exp. 335で掘削した1256D孔井で起きた孔壁崩壊などのトラブルを受けて、本レポートではより多くのケーシングを使うプランも検討された。実際に何枚のケーシングを使う必要があるのかを現時点で決めるのは難しいものの、同程

度の深度の掘削を行う石油・ガス掘削の例から孔内の不安定さに対応するためのプランを検討した。図1に示すのが、ベースケース(a)も入れた、本レポートで考慮された3種類のケーシングプランである。ケーシングをセットしながら掘削を行う場合、通常はセットされるケーシングの径は、その前のケーシングの径より小さくなる。真ん中の一般的な大水深掘削の例(b)では、6枚のケーシングを使って、最終的には9-5/8インチのケーシングをセットするようになっている。これに対して、右側の拡張式ケーシングを使った例(c)では、同じ6枚のケーシングを使って、最終的に11-3/4インチのケーシングをセットする案となっている。これは一度セットしてから径を拡張することができる拡張式ケーシング(図中の赤いケーシング)を使うことで、ケーシングより深い部分の掘削孔のサイズを大きいまま掘削することが可能となり、掘削計画の冗長性が増すことになる。(この拡張式ケーシングは、「ちきゅう」による南海トラフ地震発生帯掘削でも使用された実績がある。)

次に、これらのケーシングプランの有利な点と不利な点についてみてみよう。

a. ベースケース

有利な点

- * シンプルな3枚ケーシングのプランであり、ほぼスタンダードなケーシングサイズ及び掘削孔のサイズである。
- * 最も安価で実施できるプランである。
- * 孔井の安定性が担保されるのなら、最も理想的なプランである。

不利な点

- * 掘削中のトラブルに対して、最も柔軟性がないプランである。
- * トラブルに対する緊急対策として2種類のケーシングしか対応の仕方がない。
- * ターゲットへの到達できない可能性が高い。

b. 一般的な大水深掘削のケース

有利な点

- * ベースケースの3枚に対して6枚のケーシングを使うので、掘削孔の大部分をケースすることができる。
- * 掘削中のトラブルに対して柔軟に対応できる。
- * 緊急対策として、もう一枚のケーシング(7インチ)を使うことが可能である(ただし、この場合は通常のワイヤーラインコアリングができなくなり、コアリングの時間が増加する)。
- * ターゲットに到達できる可能性が増す。

不利な点

- * スタンダードではないサイズのケーシング及び孔井のサイズになるので、掘削ビットや、掘削用のツールの選択が難しくなる。
- * 必要とする予算が増加する。

c. 拡張式ケーシングを使うケース

有利な点

- * 上記の一般的な大水深掘削のケースと同様である。
- * 掘削中のトラブルに対して、最も柔軟に対応できる。

不利な点

- * 上記の一般的な大水深掘削のケースと同様である。
- * 必要とする予算は3つのケースの中で最も高くなる。
- * ケーシングを広げるというプロセスの抱えるリスクを内包する。

リスクについて

ここでみてきた3つのケーシングプランは、端成分を例示したものである。実際の掘削プランを作る際は、これらのどれかを選ぶというよりは、最もシンプルでしかしリスクが大きい「ベースケース」と、複雑であり予算はかかるがリスクが小さい「一般的な大水深掘削」(もしくは「拡張式ケーシングを使うケース」)の間のどこかに設定されることになると考えられる。さまざまなリスクが本掘削には考えられるが、本レポートでは、二つの大きなリスクに関して議論されている。

リスク1：掘削孔の状態についての不確かさ

ガスや石油の商業的な掘削の場合、必要に応じてパイロット孔が掘られ、掘削を行う地質の確認がさまざまな観点から行われる。また、これまでに掘られた同様の孔井からの情報も、掘削計画を立てるために使うことができる。しかし、マントル掘削は人類がこれまで行ったことがない掘削であり（だからやる価値があるのであるが）、参照する孔井の情報が存在せず、極端な言い方をすれば、掘るまで何が起きるかわからないということになる。掘削計画を立てる上で考えなければいけないのは、たとえば、

- オーバープレッシャーの地層存在の可能性
- 地層の崩壊のリスク
- 掘削流体の逸脱の可能性
- 地温と圧力による孔井の変形
- 断層による孔井の変形

などが考えられる。しかし、これらのリスクがあるから掘削ができないということではなく、これらのリスクに対応するために、研究者とオペレータが協力して、可能な限り掘削する地層の状態を検討することで、最も適した掘削プランをつくることができるかと本レポートは報告している。

リスク2：時間と予算についての不確かさ

フィジビリティスタディでは、掘削にかかる日数が400から900日程度、予算が\$400Mから\$900Mと見積もられ、これは現実的な数字ではないと考えられた。その後のスタディによって、現在の石油・ガス掘削に使われている、硬岩用のビットを使うことなどで、この数字はより小さくすることができることが明らかになった^[5]。掘削に必要な日数にかかる予算（Day rate）が掘削費用の大部分を占めるため、この日数を減らすことが直接必要な予算を減らすことにつながる。掘削に必要な日数はまた、掘削（コアリング）用のビットの性能と掘削速度の不確かさに依存している。この不確かさを減少させるためには、掘削計画をつくる段階から、石油・ガス掘削業界のサービスカンパニーの協力を仰ぐことが大事だと本レポー

トは結論づけている。

2.3 超大水深ライザーについて

現在考えられている掘削候補地点の水深は、3,650 mから4,300 mにわたっている。現在の商業ライザーで対応できる最大水深は3,657 m (12,000 ft) であり、マントル掘削を目指すためには、超大水深ライザーシステムが不可欠である。本レポートではライザーシステムの対応水深を伸ばすための方策が異なる素材の提案や、それらの素材についてライザー解析を行うことで検討されている。

検討された素材は、1. 高硬度スチール、2. チタン、3. アルミニウム、4. 複合素材である。それぞれについての検討結果は下記ようになった。

1. 高硬度スチール：現在一般的に使われているスチールと比べ、ライザー管の肉厚を薄くすることができ、軽量化に貢献できる。これによって大水深化が可能かもしれない。
2. チタン：スチールよりも40%軽量かつ高強度なチタンを使うことで、大幅な軽量化が可能である。また、疲労に強いことによって、高潮流の海域や、長期にわたる掘削にもメリットがある。ただし、問題はスチールと比べて価格が高いことであり、ハイブリッドライザー管（メインはスチールとして、補助管をチタンにするなど）を考える方が良いかもしれない。
3. アルミニウム：スチールよりも60%軽い素材であり、ライザー管の大幅な軽量化が可能である。しかし、一般的には強度が小さいので、実際にはライザーメイン管として使うよりは、補助管として使用する方が、海水中での腐食の問題などがあるのでふさわしいと考える。
4. 複合素材：複数の石油・ガス会社が炭素繊維などの複合素材のライザー管あるいは、高硬度スチールに炭素繊維などを塗布したハイブリッドライザー管を研究し始めている。スチールに比べて相当軽量化ができることが見込まれており、大水深化という観点から、高硬度スチールやチタンのように使えるのではないかと考えられている。しかし、実際にテ

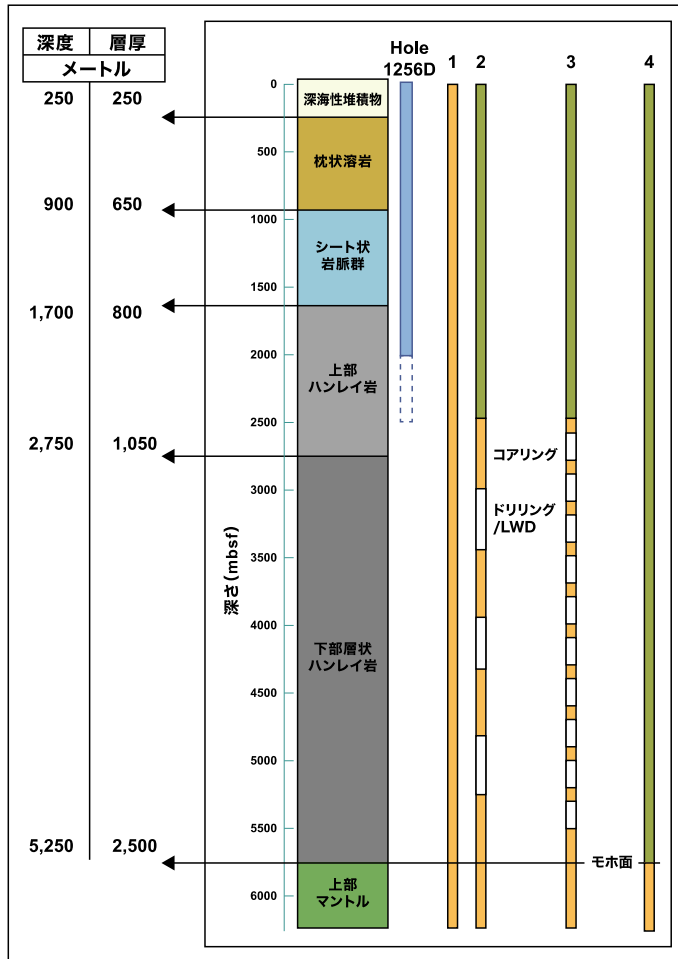


図2：海洋地殻の模式図と、異なる掘削/コアリング区間の比較。1は海洋表層からマントルまで全てでコアサンプルを回収する。4はモホ面までは掘り飛ばしてマントルのみコアサンプルを回収する。本レポートでは2と4のケースについて比較を行っている。(本レポート Fig 6 を改変)

ストしたケースはまだなく、その信頼性もまだ明らかではない。また、コネクタ部分の溶接という問題が残っている。

5. 浮力体：ライザー管を超大水深で使うためには、ライザー管に浮力を与えるために、大規模な浮力体が必要になる。しかし、近年浮力体の素材の性能が向上し、ライザー管と比較してこれまでよりも軽量で、なおかつ大きな径にならずとも超大水深に対応できる素材が存在している。

「ちきゅう」が使用している Cameron LoadKing 4.0 ライザーを 4,267 m (14,000 ft) に延長し、アルミニウム、チタン、複合素材の補助管をつけた

場合の重量を見てみると、現在の状態（スチールの補助管）では、50%が補助管の重さになっているが、これがアルミニウムなら26%、チタンでは37%、複合素材で19%という値となり、補助管の入れ替えで、超大水深対応ライザーの軽量化には大きく貢献できることがわかった。(ただし、単に重量を軽くすればよいわけでもなく、補助管と本管のバランスの検討は必要である。)

次に本レポートでは、ライザー解析を行なっている。この解析では、海況などの外部環境の影響、ライザー管の接続や切り離しの状況、様々な泥水比重でのライザー管にかかる張力の影響などを見積もっている。さらに、「ちきゅう」が洋上で

表2 海洋底からマントルへの掘削で予想される掘削速度. WLコアリング, コアリングなしの掘削, 商業的コアリング, および孔井を拡張する場合について, それぞれ, 最も速い場合, 最も遅い場合, 中間値を示している. 下部は予想されるビットの寿命. (本レポートFig.66を改変)

掘削速度 (m/時)	WLコアリング			掘削			商業的コアリング			拡張		
	Low	ML	High	Low	ML	High	Low	ML	High	Low	ML	High
堆積物	2.4	4.0	15.2	9.1	21.3	30.5	3.0	12.2	15.2	9.1	12.2	24.4
枕状溶岩	1.2	2.1	6.1	3.0	9.1	21.3	1.5	4.6	6.1	3.0	7.6	9.1
シート状岩脈群	1.2	2.1	6.1	3.0	9.1	21.3	1.5	4.6	6.1	3.0	7.6	9.1
塊状ハンレイ岩	1.2	2.1	6.1	3.0	9.1	21.3	1.5	4.6	6.1	3.0	7.6	9.1
面状ハンレイ岩	0.9	1.5	2.4	1.5	3.0	9.1	1.5	2.4	4.6	1.5	2.4	6.1
層状ハンレイ岩	0.9	1.5	2.4	1.5	3.0	9.1	1.5	2.4	4.6	1.5	2.4	6.1
マントル・カンラン岩	0.9	1.2	2.1	1.5	1.8	6.1	0.9	1.5	3.0	0.9	1.5	4.6

ビット寿命 (時間)	Low	ML	High
<=6,706m	30	110	150
>6,706m	20	70	110

動いた(オフセット)場合のライザー管にかかるストレスなどの動的な状態での分析も行われた。

このライザー解析の結果からは、水深 3,657 m までならば、(泥水比重や海況に制限はあるものの)現在のスチール製のライザー管での掘削は可能である。しかし、この水深よりも深い水深になると、ライザー管にかかるストレスや、一部のライザー管のパーツが、API 16Q の基準を超えることになることが明らかになった。この限界をスチール製のライザー管で高めるためには、独自の基準を作る必要がある。たとえば API 16Q が定めるライザー管降伏強度の 67% を許容応力としている作業限界規定を、67% より高い値に設定することでオペレーション許容限界を高めることができる。しかし、その場合は、ライザー管の疲労については注意深くモニターする必要があるが、「ちきゅう」にはすでにライザーモニタリングシステムが搭載されており、これを用いてのモニタリングができるとしている。

また、現在の API 16Q に準拠した状態で超大深度での掘削を行うためには、補助管をスチール以外にしたハイブリッドのライザー管やあるいはチタンあるいは複合材でできたライザー管を考える必要がある。ただし、チタンの値段の問題や、複合素材の実績のないことを考えると、まだ超える

べき技術的限界があるように思える。

2.4 プロジェクトの時間読み

次に本レポートは実際の掘削にかかる時間について検討を行っている。2011 年のフィジビリティスタディ^[4]で、ハワイのサイトについて示されたように、現存している技術を上手に使うことによって、オペレーションにかかる時間を削減できる。本レポートでは、3つのサイトにおいて図1で示した3種類の孔井のケーシングデザイン(a, b, c)および図2で示すドリリング/コアリングインターバルのうちケース2と4についての合計18パターンの掘削にかかる時間が検討された。

本レポートでは掘削時間を求めるための各層序での掘削速度(ROP)と掘削ビットの寿命は表2のように定義している。

この検討にはいくつかの仮定が設定された。

- * 掘削過程は比較を行うため、フィジビリティスタディ^[4]と同様とした。このため、最適化されていない部分がある。
- * サイトまでの動復員の日数は加えていない。
- * 計算を簡単にするために、ビット交換は地層が変化する深度で行うとした。
- * 掘削中の地層に起因する NPT (Non-productive time) を 5% としたが、気象海象およびメカニカルな NPT は考慮していない。

表3 3地点におけるケーシングプランとコアリング区間の組合せによる日数の予想. ケースの2および4は図2を参照, a, b, cは図1を参照. プロジェクトの日数はオンサイトの日数に日本と各地点間の動復員日数を加えてある. (本レポートFig. 68 改変)

ロケーション	水深(m)	総パイプ長(m)	ケース	本レポート		2011 レポート	
				オンサイト	プロジェクト	オンサイト	プロジェクト
ココス	3,650	9,900	2a	228	276	564	617
			2b	272	320		
			2c	289	337		
			4a	202	250	374	418
			4b	220	269		
ハワイ	4,050	10,750	2a	271	298	688	737
			2b	319	346		
			2c	341	368		
			4a	221	248	422	443
			4b	242	239		
パハ	4,300	10,400	2a	251	287	807	866
			2b	308	345		
			2c	327	363		
			4a	208	244	386	425
			4b	229	265		
			4c	231	267		

上の表3にフィジビリティスタディ^[4]で求められた予想時間との比較を示す.

ここでみるように、フィジビリティスタディ^[4]と比較して、大幅な日数の削減が可能であった。本レポートには、18パターンの掘削作業について、詳細の日数計算が掲載されている。

2.5 プロジェクトの予算

フィジビリティスタディ^[4]では、1日あたり\$1Mという大水深での石油・ガス開発のデイレートを当てはめてコスト計算を行っていたが、本レポートでは掘削時間と同様に18パターンの掘削作業について、コストが検討された。石油ガス業界では、このようなコスト計算を行うときに、大きく二つのカテゴリーで考える。一つはインタンジブル (intangible) コストで、これには船の運航費や燃料、人件費、各種のサービスなど一般的にデイレートで計算されるものが含まれる。これに

表4 3地点それぞれで6種類のケースにおける掘削費の比較. (本レポートFig. 148を改変)

ロケーション	水深(m)	総パイプ長(m)	プロジェクトの日数	ケース	想定されるトータルコスト (M\$)	2011試算 (M\$)
ココス	3,650	9,900	276	2a	\$226	\$617
				2b	\$253	
				2c	\$264	
				4a	\$212	\$418
				4b	\$226	
				4c	\$230	
ハワイ	4,050	10,750	298	2a	\$238	\$737
				2b	\$267	
				2c	\$282	
				4a	\$212	\$443
				4b	\$227	
				4c	\$231	
パハ	4,300	10,400	287	2a	\$232	\$866
				2b	\$266	
				2c	\$278	
				4a	\$209	\$425
				4b	\$224	
				4c	\$230	

対してもう一つは、タンジブル (tangible) コストで、これにはケーシングやウェルヘッドなど、一般的に孔井に残してくるものが含まれる。

この検討にもいくつかの仮定が設定された。

- * 海象の調査や事前調査の費用を\$3Mとした (これは以前の調査の結果から^[5])
- * サイトと日本の間の動復員費は、サイトまでの距離と燃料消費量および「ちきゅう」のデイレートから算出している。
- * 「ちきゅう」のデイレートは、1日あたり\$300Kで見積もっている (2012年当時の業界の掘削船のデイレートが\$438Kであり、このオペレーションが商業ベースではないことからの見積り)
- * 大水深に対応するためのライザー管の購入および改造の費用を一括で\$61Mと見積もっている (これは、以前の調査^[5]でNOVが見積もったもの)。
- * インタンジブルコストには15%、タンジブルコストには10%の予備費を計上した。

上の表4にフィジビリティスタディ^[4]で求められた予算予想との比較を示す。

ここでみるように、フィジビリティスタディ [4] と比較して、大幅なコストの削減が可能であった。

もっとも大きく全体予算に影響を及ぼすのは「ちぎゅう」のデイレートである。全体予算の 50% 以上を占めており、このことから掘削にかかる日数がプロジェクト全体の予算に大きな影響を与えることが明らかである。

ここで、掘削とコアリングが予算に及ぼす影響を見てみると、各地層境界前後でコア試料を採取するケース（ケース 2）と、掘削のみでマントルまで掘り進み、マントル試料を採取するケース（ケース 4）の違いは、ケーシングプランに関わらず平均値を見てみると、ココスのサイトで \$25M、ハワイで \$39M、パハで \$37M の違いが出ることが明らかになった。

本レポートでは、それぞれのサイトでコア試料採取の違い（ケース 2 と 4）およびケーシングデザインの違い（3 ケース）の 6 パターンについて、詳細の予算を計算している。ココスサイトの予算が他と比べて小さいのは、このサイトはすでに 1256D 孔のこれまでの掘削によって、海底表層の堆積物からシート状岩脈群までのコア試料はすでに採取されており、今回の掘削ではコア試料を採取しないという想定による。

2.6 プロジェクトの実施に向けて

本レポートの最後の章で、プロジェクト実施に向けたタイムラインが示された。ここでは、2018 年 1 月に掘削を開始するという前提でタイムラインが書かれており、それ自体は今となっては意味がないが、プロジェクト実施のための 5 つのフェーズが示されているので紹介する。

1. Front End Engineering-Well Objectives Definition

このプロセスでは、プロジェクトの利害関係者が、本孔井を掘る目的をきちんと理解して共有し、Statement of Requirements にきちんと書き込むことが重要である。プロジェクトが初期段階に目的が明らかにされないまま開始されると、不必要な混乱や労力の重複、不必要なコスト増につながることになる。このプロセスは Basis of Design (BOD) あるいは

Design Premise Document (DPD) に直結し、この先の全ての指針となる。

2. Front End Engineering-Initial Well Planning

このプロセスでは、参照できる孔井があればそのレビューを通して問題点を特定することから始まる。その情報をもとに、初期的な孔井計画を策定するが、可能ならばこの段階では目的を達成するための複数の選択肢があることが望ましい。それぞれの選択肢のコスト計算を行うとともに、リスクの比較も行う必要がある。これらの選択肢から、この先進むべきオプションを選ぶことになる。

3. Detailed Well Planning

選択したオプションが承認されたのち、より詳細な孔井計画・ロジスティック計画を作成ことになる。この段階になると技術的課題に関する詳細検討（ライザー解析、孔内安定性検討、泥水やセメンチングシステムデザイン等）を開始する。外部からの意見を聞き、HAZID 会議の開催や、孔井計画のピアレビューもこの段階で行われる。また、このプロセスで重要な点は、入札戦略の構築、必要な様々なサービスの作業内容の設定、そしてそれらのサービスの入札を行うことである。

4. Detailed Well planning-Finalize Well Plan

サービスカンパニーが入札によって決まると、彼らからのインプットを踏まえて、最終的な孔井計画と最終的なコストの見積りが作成される。リグの乗組員とサービスカンパニーの代表者とともに、"Drill well on paper" (DWOP) と呼ばれる演習を行い、そこから得られたフィードバックをもとに、最終的な掘削計画が作られる。

5. Operations Execution and Close Out

掘削が行われている間は、常に準備した掘削計画との差異を確認し、必要に応じていつでも掘削計画の変更ができるようにしておく必要がある。プロジェクトの終わりには、コストを含めて計画と実際の違いを明らかにし、最終的なレポートを作成することになる。

ここで示された5つのフェーズは、一般的に石油・ガス業界で行われているものであるが、科学掘削でここまでの段階を踏んで実施されるプロジェクトはほとんどない（南海トラフ地震発生帯掘削のIODP Exp. 358ではある程度このプロセスを行った）。マントル掘削プロジェクトは、最初のフェーズを部分的に行っており、また本レポートは、2番目のフェーズで重要な様々なオプションを示してくれた。ただし、次のフェーズからは、資金（予算）の裏打ちが必要となり、このハードルをどのように越えるのかが重要である。

2.7 まとめ

本レポートのまとめとアドバイスとして重要と思われるのは以下である。

- * フィジビリティスタディ^[4]で用いたベースケースのケーシングデザインは、1256D孔の掘削で見られた孔井の不安定さを考えると、楽観的すぎるかもしれない。本レポートでは、このベースケースを端成分として、エクスパングブルケーシングを使うオプションを反対側の端成分とした。
- * マントルに到達するという目的に対しての最大のリスクは、孔井の安定性である。このリスクを回避するためには、研究者、掘削業界の専門家などが協力して、最も確からしい孔井の状態を想定し、どの部分が最も不確実性が高いのかを明らかにする。そして、その結果を掘削計画に反映させる必要がある。
- * 掘削とコアリングの性能の不確実性と、それが掘削時間および予算に与える影響は、本プロジェクトを妥当な時間とコストで行う上で、最大のリスクとなりうる。この不確実性は、掘削ツールを提供するサービスカンパニーの豊富な経験とサービスを、ビットの選択や掘削そのものを最適化するために計画段階から活かすことによって、最小化されると考える。
- * プロジェクト全体の予算の半分以上は掘削にかかる日数であった。
- * マントルまで掘削してマントルの試料のみを

回収する場合と、海洋地殻内でもコア試料を採取する場合を比較すると、サイトにもよるが\$14Mから\$51Mの違いが明らかになった。

- * 追加のライザー管の購入には3年のリードタイムが必要であり、それ以前にプロジェクト推進の決定がなされている必要がある。

（ライザー管に関しては、本レポートでははっきりとした言及がなされなかった。現在のスチールライザー管を延長した場合は、限られた条件下で3,657 m水深までの掘削は可能とされたが、それよりも深い水深に関しては、基準の変更もしくは別素材での対応を示唆したのみであった。予算のところでみているライザー管の購入費\$61Mは現在のスチールライザー管の延長分の購入費である。）

3. おわりに

本稿の最初に紹介した、ジョン・スタインベックのLIFE紙の記事は、“And I hope I may be invited back when the new ship sails toward new wonders in about two years.”と結ばれている^[2]。米国はその後Deep Sea Drilling Project（DSDP）を1968年から開始するが、スタインベックがもう1度掘削船に乗れたのかは定かではない。みなさんご存知のように、DSDPから今までの海洋科学掘削の歴史は、さまざまなところ書かれており、また50年を超えて積み重ねられてきた科学成果は素晴らしいものである。しかし、1961年にAMSOCがCUSS Iで始めようとした海洋地殻を掘り抜いて上部マントルまでというプロジェクトはまだ実施されていない。技術的には手が届くところまで来ていると本稿で紹介したBEAMレポートは言っている。本誌を読めば科学的な意義も熟していることも明らかである。プロジェクトの実施に向けて、あと足りないのはなんだろうか？そのハードルを越えられれば、人類が初めて海洋地殻を掘り抜いてマントルの岩石を手に入れられる日が来ることになるのだろうか。

最初のモホール計画が議論されていた時期に、一つの孔をマントルまで掘って何がわかるのか？

という反対派の意見に対して、Harry Hess は
” Perhaps it is true that we won't find out as much
about the earth's interior from one hole as we hope.
To those who raise that objection I say, if there is not
a first hole, there cannot be a second or a tenth or a
hundredth hole. We must make a beginning.” と答え
た [1].

同じ会議で、莫大な予算がかかることを指摘さ
れた際に Roger Revelle は、” I imagine that an argu-
ment like that was used against Columbus when he
asked Queen Isabella for funds for his adventurous
project. One of the Queen's advisors probably stepped
forward and said, “Your Majesty, it won't be impor-
tant even if this crazy Italian does reach India by sail-
ing west. Why not put the same amount of money into
new sails and better rigging on all the other ships?
Then the whole fleet will be able to sail half a knot
faster!” と答えている [1].

50 年以上前に行われたこれらの質疑応答は、現
代のマントル掘削にも共通しているのではないだ
ろうか。

参考文献

- [1] Hole in the bottom of the sea, The story of the Mohole Project. Willard Bascom, Doubleday & Company, Inc. 1961.
- [2] High Drama of Bold Thrust through Ocean Floor. John Steinbeck, LIFE Magazine, 14 Apr. 1961, p. 110 - 122.
- [3] Implementation Plan for the BEAM - “Borehole into the Earth's Mantle” Program Final Report. BLADE Energy Partners. 14 July 2013.
- [4] Project Mohole Initial Feasibility Study for 2017 Drilling. BLADE Energy Partners. 30 June 2011.
- [5] High Impact System (Rock Bits, Coring & More) Technical Review & Risk Reduction Study for the BEAM - Borehole into Earth's Mantle Quest Drilling Project. BLADE Energy Partners. 7 February 2013.

