



国立研究開発法人

海洋研究開発機構



東京大学
THE UNIVERSITY OF TOKYO



千葉工業大学
CHIBA INSTITUTE OF TECHNOLOGY

平成 28 年 8 月 26 日

国立研究開発法人海洋研究開発機構

国立大学法人東京大学

学校法人千葉工業大学

南鳥島沖の排他的経済水域内の深海底に広大なマンガンノジュール密集域を発見 ～三種の酸化物海底資源の包括的な成因解明のための手掛かり～

1. 概要

国立研究開発法人海洋研究開発機構（理事長 平 朝彦、以下「JAMSTEC」）、国立大学法人東京大学（総長 五神 真）および学校法人千葉工業大学（学長 小宮 一仁）などの研究グループは、平成 22 年度から平成 28 年 4 月にかけての複数の航海により、南鳥島周辺の排他的経済水域（以下「南鳥島 EEZ」）（図 1）の南部から東部にかけての深海底（水深 5,500-5,800 m）に広大なマンガンノジュール（※1）の密集域（図 2）を発見しました。これまで、我が国の EEZ では海山の緩斜面にコバルトリッチクラスト（※2）に伴って存在する小規模なマンガンノジュールの分布は知られていましたが、深海底に広大なマンガンノジュールの分布が見つかったのは初めてです。

また、この発見は、平成 22 年度の研究船を用いたマルチナロービーム音響測深機による海底の後方散乱強度（音波の反射強度）調査がきっかけです。平成 28 年 4 月に行った有人潜水調査船「しんかい 6500」の潜航調査によって、高い反射強度がマンガンノジュールの存在を示すことを確認し、反射強度分布（図 3）に基づいて上記のマンガンノジュール密集域の広がり方を推定しました。これにより、音波の反射強度調査（図 3）が効率的かつ安価にマンガンノジュールの分布を把握するうえで有効な手段の一つであることが分かりました。

さらに、南鳥島 EEZ のマンガンノジュールは、コバルトリッチクラストと共通の鉱物学的・化学的特徴を持ち（図 4 および図 5）、コバルト、ニッケル、銅、モリブデンなどのレアメタルおよびベースメタルが多く含まれること、およびレアアース泥（※3）と分布域が広範囲で重複することを明らかにしました。これは、マンガンノジュールが、化学組成の点でコバルトリッチクラストと関連があり、分布域が重複するという点でレアアース泥と関連があることを意味します。したがって、これまで個別に議論・検討されてきた酸化物を主体とする三種の海底鉱物資源（マンガンノジュール、コバルトリッチクラスト、レアアース泥）の成因が、マンガンノジュールを手掛かりとすることで包括的に解明できる可能性（図 6）があります。今後、採取したマンガンノジュール試料をさらに詳細に分析・解析することによって、日本周辺における三種の酸化物資源の成因解明に関する研究を進める予定です。

今回の発見のきっかけとなったこれまでの研究成果は、日本地球化学会が発行する学術雑誌「Geochemical Journal」特集号に 2 編の論文として掲載される予定であり、8 月 26 日付けで電子版に掲載されます。

タイトル：Geology and geochemistry of ferromanganese nodules in the Japanese Exclusive Economic Zone around Minamitorishima Island

著者：町田嗣樹^{1、2}、藤永公一郎^{2、3}、石井輝秋⁴、中村謙太郎⁵、平野直人⁶、加藤泰浩^{1、2、3、5}

1. 海洋研究開発機構 海底資源研究開発センター
2. 東京大学大学院工学系研究科 エネルギー・資源フロンティアセンター
3. 千葉工業大学 次世代海洋資源研究センター
4. 深田地質研究所
5. 東京大学大学院工学系研究科 システム創成学専攻
6. 東北大学東北アジア研究センター

タイトル：Acoustic characterization of pelagic sediments using sub-bottom profiler data: Implications for the distribution of REY-rich mud in the Minamitorishima EEZ, western Pacific

著者：中村謙太郎¹、町田嗣樹^{2、3}、沖野郷子⁴、正木裕香²、飯島耕一²、鈴木勝彦²、加藤泰浩^{1、2、3、5}

1. 東京大学大学院工学系研究科 システム創成学専攻
2. 海洋研究開発機構 海底資源研究開発センター
3. 東京大学大学院工学系研究科 エネルギー・資源フロンティアセンター
4. 東京大学大気海洋研究所 海洋底科学部門
5. 千葉工業大学 次世代海洋資源研究センター

2. 背景と経緯

世界の深海底には、マンガンノジュール、コバルトリッチクラスト、レアアース泥、海底熱水鉱床と呼ばれる海底鉱物資源が存在し、有用なベースメタル・レアメタルの供給源として注目されています。これらのうち、マンガンノジュール、コバルトリッチクラスト、レアアース泥は酸化物を主体としており、現在の酸素に満ちた（酸化的な）環境下で安定に存在する資源です。JAMSTEC などの本研究グループでは、これらの酸化物資源を対象とした科学的な研究を進めています。

今回の一連の発見は、平成 22 年に「しんかい 6500」の潜航調査（航海番号：YK10-05）を行い、南鳥島の東約 300 km の排他的経済水域（EEZ）内に位置する小海山（比高約 400 m、直径約 5,000 m）の斜面に大量のマンガンノジュールが密集して分布していることが発見されたことがきっかけです。YK10-05 航海の結果、「マンガンノジュールの高密集域では海底の後方散乱強度が高い（音波を強く反射する）」という知見が得られました（補足 1）。その後、平成 25 年以降、昨年度までに行われた、深海調査研究船「かいれい」および海洋地球研究船「みらい」による研究航海において、音響調査（マルチナロービーム音響測深機による海底地形・海底後方散乱強度調査（図 1）、サブボトムプロファイラーによる浅層地層構造調査（補足 2））を行い、EEZ 南部から南東部の深海底に広範に高い後方散乱強度域（強反射域）が広がっていることが判明しました（図 3b）。そこは、昨年度までの調査に基づいて、堆積物が 10 m 以上堆積し海底下の浅い深度にレアアース泥が存在することが確認された場所と重複します（補足 3）。このことから、EEZ 南部から南東部の広範な高い反射強度は、堆積物の上にマンガンノジュールが存在することが原因であろうと予想されました。そこで平成 28 年

4月に、音響データによって明らかとなったレアアース泥分布域において、「しんかい 6500」を用いた目視観察等で海底のマンガンノジュールの有無および分布状況を確認するとともに、マンガンノジュールおよびその直下の堆積物試料を合わせて採取するための調査（航海番号：YK16-01）を実施しました。

3. 成果

（1）マンガンノジュールの分布状況と密集域の面積

YK16-01 航海における「しんかい 6500」の潜航調査は、上記範囲の強反射域を網羅し、かつ地形的な特徴の異なる8地点（図1）で実施しました。その結果、7地点でマンガンノジュールが高い密集度（～130 個／m²）で分布していることを発見し（図2）、当初の予想通り、EEZ 南部から南東部にかけての強反射域がマンガンノジュール分布域に対応していることを確認しました。反射強度域の広がり（図3）に基づくと、EEZ 南部から東部の深海底の広域（図1）にマンガンノジュール密集域が存在すると考えられ、密集域の総面積は約 44,000 km²に及ぶと推定されます。従来、我が国の EEZ 内では、海山の斜面の一部に小規模に分布するマンガンノジュールは知られていましたが、今回のような海山のない深海底において、非常に広大な分布が発見されたのは初めてです。

（2）マンガンノジュールの分布と反射強度との関係

潜航調査では、マンガンノジュール分布と反射強度の強弱および地形の起伏との対応関係を目視により確認し、マンガンノジュールの分布の様子を映像・画像（※4）として記録しました。その結果、反射強度が周囲に比べ相対的に高い場所では、いずれもマンガンノジュールが分布していることが明らかとなりました（補足4および図3、※5）。これにより、マルチナロービーム音響測深機による反射強度調査が、海底にマンガンノジュールが分布するか否かの判別、および分布範囲の特定に有効な手段の一つであるということが分かりました。

（3）南鳥島 EEZ 内の他の酸化物質資源との関連性

YK10-05 航海および YK16-01 航海において発見・採取されたマンガンノジュールは、その鉱物学的および化学組成の特徴が南鳥島 EEZ 内の海山（例えば拓洋第5海山）の斜面に形成されているコバルトリッチクラストと共通していることが判明しました。つまり、南鳥島周辺のマンガンノジュールは、コバルトリッチクラストと同様にコバルト、ニッケル、銅、モリブデンなどのベースメタルおよびレアメタルを多く含んでいることが特徴です。以前から存在が確認されているハワイ沖のマンガンノジュール密集域のものとは、特にコバルト、ニッケル、銅の濃度の違いにより明瞭に区別されます（図4）。

その他に、X線CT等を用いて系統的にマンガンノジュールの内部構造を観察すると、南鳥島沖のマンガンノジュールは大まかに三層構造を成しており（図5）、このような内部構造の特徴もまた、周囲の海山に形成されているコバルトリッチクラストと同様であることがわかりました。このような鉱物学的および化学組成の特徴の類似性は、南鳥島沖海域に分布するマンガンノジュールとコバルトリッチクラストの成因として、共通の物質や機構などが関与している可能性を示唆します。

一方、南鳥島 EEZ 内のマンガンノジュールの分布域は、サブボトムプロファイラーによる浅層地

層構造調査により判明したレアアース泥の分布と、よく一致することが明らかとなりました（補足2および3）。このことは、マンガンノジュールがレアアース泥とも両者の生成に共通する機構や地質学的条件など成因的な関連があることを示していると考えられます。

4. 今後の展望

今回、南鳥島周辺の EEZ 内にこれまでの認識を遥かに上回る規模でマンガンノジュールが分布していることを発見したことにより、将来の開発につながることでより一層期待されます。また、本航海によって示されたマルチナロービーム音響測深機による反射強度調査の有効性は、今後、他海域の広大な深海底において、効率的かつ安価にマンガンノジュールを探索するための指針を構築するうえで重要な視点です。

今回発見されたマンガンノジュールは、コバルトリッチクラストとは鉱物学的・化学的特徴という点で、レアアース泥とは分布域という点でそれぞれ共通性があります。したがって、南鳥島海域に存在するこれら三つの海底鉱物資源には、成因的に何らかの密接な関連性があると考えられ（図6）、マンガンノジュールが、これまで個別に議論・検討されてきた三種の酸化物資源の成因を包括的に解明するための重要な手掛かりとなる海底鉱物資源であると考えられます。今後は、今回の航海で採取したマンガンノジュール試料について、内側から外側へ細かい空間スケールで化学組成および同位体組成を分析し、マンガンノジュールの詳細な成長履歴を把握したうえで、元素濃集メカニズムを解明します。同時に、コバルトリッチクラストおよびレアアース泥に対する同一同精度の化学分析によって得られる形成年代および化学組成データと照らし合わせ、包括的に解析することにより、三者の成因関係や生成の時間的な前後関係を検証します。

今回明らかになった海域毎のマンガンノジュールの形や大きさの違いは、核となる物質やその形状の違いを反映していると考えられ、マンガンノジュール密集域の地質環境の差異を表していると予想されます。このことは、マンガンノジュールのみならず、直下に存在するレアアース泥および周囲の海山に分布するコバルトリッチクラストの成因解明のための重要な視点です。さらに、核の種類や形状の違いが、その場所の海底の反射強度にまで影響を与えていると考えられ、探索指針の構築にとっても重要な制約となり得ます。今後、X線CTの計測結果を詳細に解析して核の3次元構造を把握すると同時に、核の化学組成分析も進め、マンガンノジュールの分布を支配する地質学的背景を解明します。

※1 マンガンノジュール

鉄およびマンガンの水酸化物または酸化物が、核（何らかの固いもの、例えば固結した堆積物や岩石の破片、魚の歯など）を中心として同心円状に沈着したもの。海水から鉄およびマンガンが沈着してできる場合と、堆積物の間隙水中に溶けている主にマンガンが沈着してできる場合があると考えられている。マンガン団塊とも呼ばれる。

※2 コバルトリッチクラスト

マンガンノジュールと同様に、鉄およびマンガン水酸化物または酸化物が、海底の露岩（火山岩

や堆積岩など）の表面に沈着したもの。海水から鉄およびマンガンが沈着してできると考えられている。一般的な名称はマンガンクラストであるが、コバルトに富むことから資源的価値の高さに重きを置き、コバルトリッチクラストと呼ばれている。

※3 レアアース^{でい}泥

レアアースを豊富に含んだ暗褐色の泥質遠洋性堆積物。魚類の骨片や歯、微小な鉄マンガン酸化水酸化物が堆積物としての主な構成物であり、それらに海水中のレアアースが濃集していると考えられている。

※4 映像・画像

潜航調査では、4K ビデオカメラ（補足 5）を「しんかい 6500」の左右 2 つのサンプルバスケットの間（根元部）に取り付けて海底の様子を撮影した。着底時には海底面上の約 20 cm という至近距離から撮影し、海底に敷き詰められたマンガンノジュールやその表面の付着物、さらにノジュールの下に堆積物（泥）の表面の様子（細かな穴が多数空いている）など、サンプリング時やその後船上に上げるまでの間に乱されて証拠が残らない海底の様子を、極めて鮮明な映像として記録することに成功した（補足 4e）。これらの情報は、マンガンノジュールの成長過程を理解するうえで重要な記録といえる。

※5 海底後方散乱強度とマンガンノジュールの分布の関係について

今回の潜航調査において、地形の起伏と後方散乱強度（反射強度）との関係性が低いことが以下の 3 つの観察事実により考えられる。①地形的高まりは、マンガンノジュール密集域であることが多い（第 1207, 1459, 1460, 1465 潜航地点など；補足 1e, 1f, 4a, 4c, 4g）。②地形的高まりの中でも、反射強度の低下に伴ってマンガンノジュールの分布密度が低下する（第 1459 潜航地点など；補足 1c, 1d および補足 4a, 4b）。③窪地であっても、強い反射強度の場所はマンガンノジュールが密集している（第 1463 および 1464 潜航地点；図 2 および補足 4e）。

以上に加えて、反射強度がさほど高くなくても（図 3b に示すデータの場合 5.0-5.5 dB 程度）高い密集度でマンガンノジュールが分布している場合があることも確認できた。そのような場所のノジュールは紡錘形や偏平な形をしている（第 1462 および第 1465 潜航地点；補足 4d, 4g）。一方、真球のノジュールが密集する場所（第 1207, 1459, 1464 潜航地点；補足 1e および図 2）は非常に高い反射強度を示す（図 3b に示すデータの場合 6.0 dB 以上）。

これらの観察結果から、反射強度が非常に弱い場所（図 3b に示すデータの場合 4.0 dB 以下）（例えば第 1465 潜航地点；補足 4f）を除き、それ以上の反射が認められれば、その他の探査データとともに総合的に判断することでマンガンノジュールの密集域であると判断することができる。また、3. 成果（1）で示したように反射強度データに基づきマンガンノジュール密集域の範囲を推定することが可能となる。

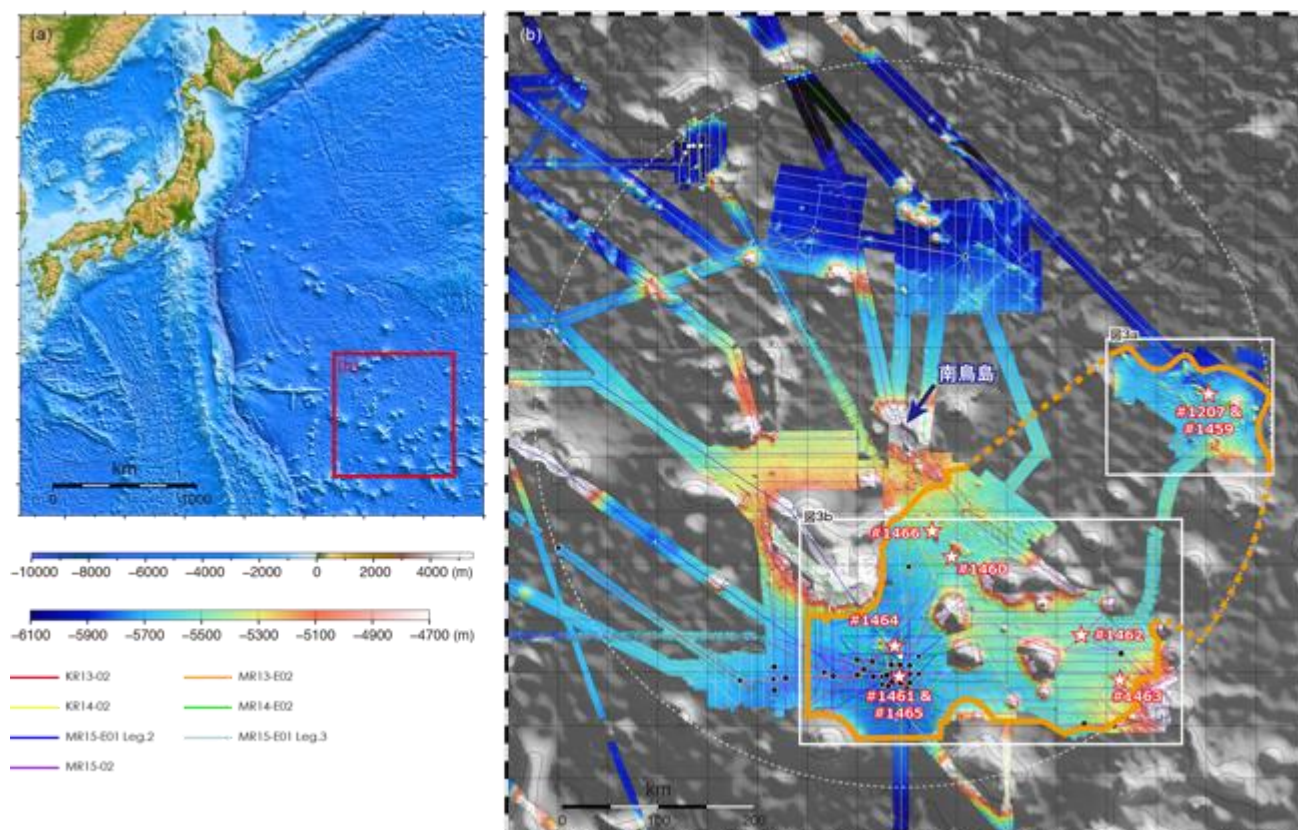


図 1: 南鳥島の位置(a)、および本航海においてマンガンノジュールの分布調査を実施した南鳥島 EEZ 周辺(b)の海底地形図。星印は「しんかい 6500」の潜航調査を実施した地点（4 ケタの数字は潜航番号を付したもの。ただし第 1207 潜航（#1207）のみ YK10-05 航海、その他は YK16-01 航海における潜航調査地点である）。オレンジ色の線は、今回の調査によってマンガンノジュール密集域が発見された範囲を示す（第 1207、1459、1460、1461、1462、1463、1464、および 1465 潜航において分布を確認）。ただし、以下に述べる音響探査を実施していない（マンガンノジュールの分布を確認していない）部分は点線で結んでいる。レアアース泥成因研究のために昨年度までに実施した航海（KR は深海調査研究船「かいれい」、MR は海洋地球研究船「みらい」による航海）の測線をそれぞれの色で、また、それらの航海において実施したピストンコアによる採泥点を黒または白の点で示す。白い点線は EEZ の範囲。

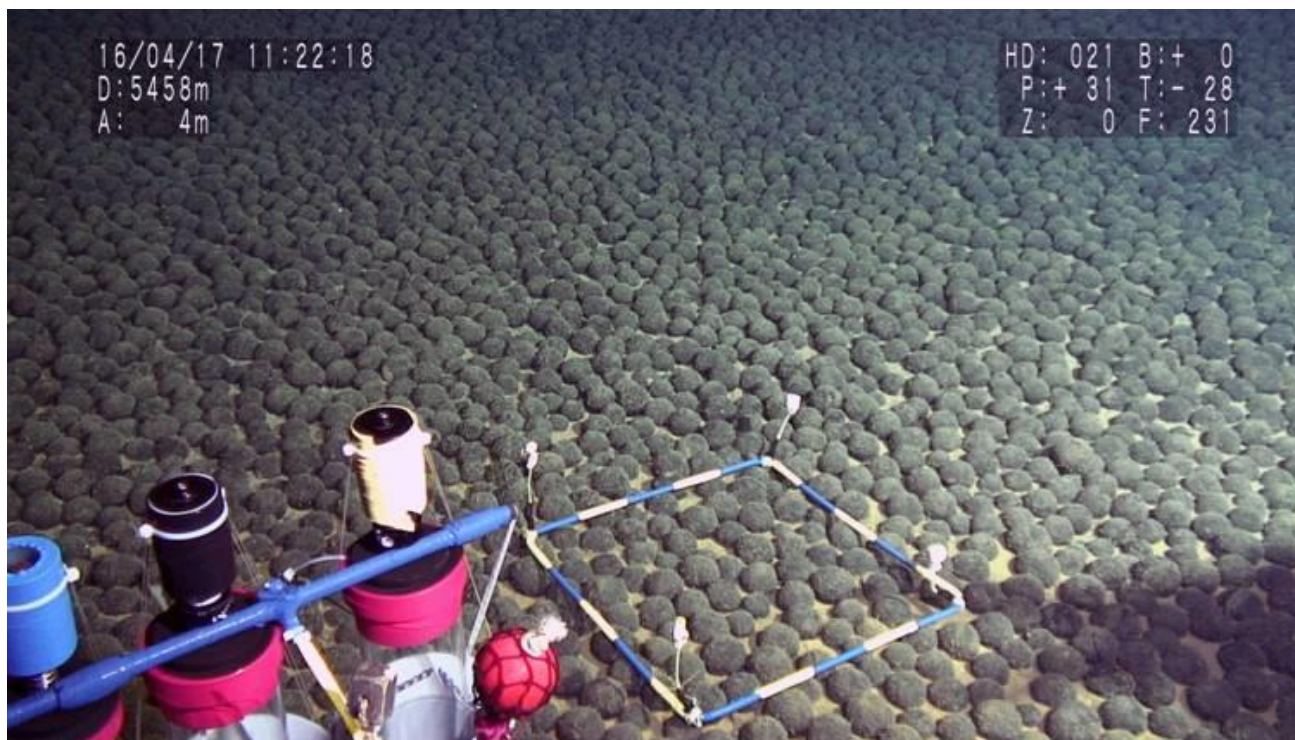


図 2：今回発見されたマンガンノジュール密集域の様子（第 1463 潜航において、「しんかい 6500」に搭載された No. 2 稼働式ビデオカメラにより撮影）。真球形のマンガンノジュールが海底をほぼ埋め尽くすように分布している様子が見える。

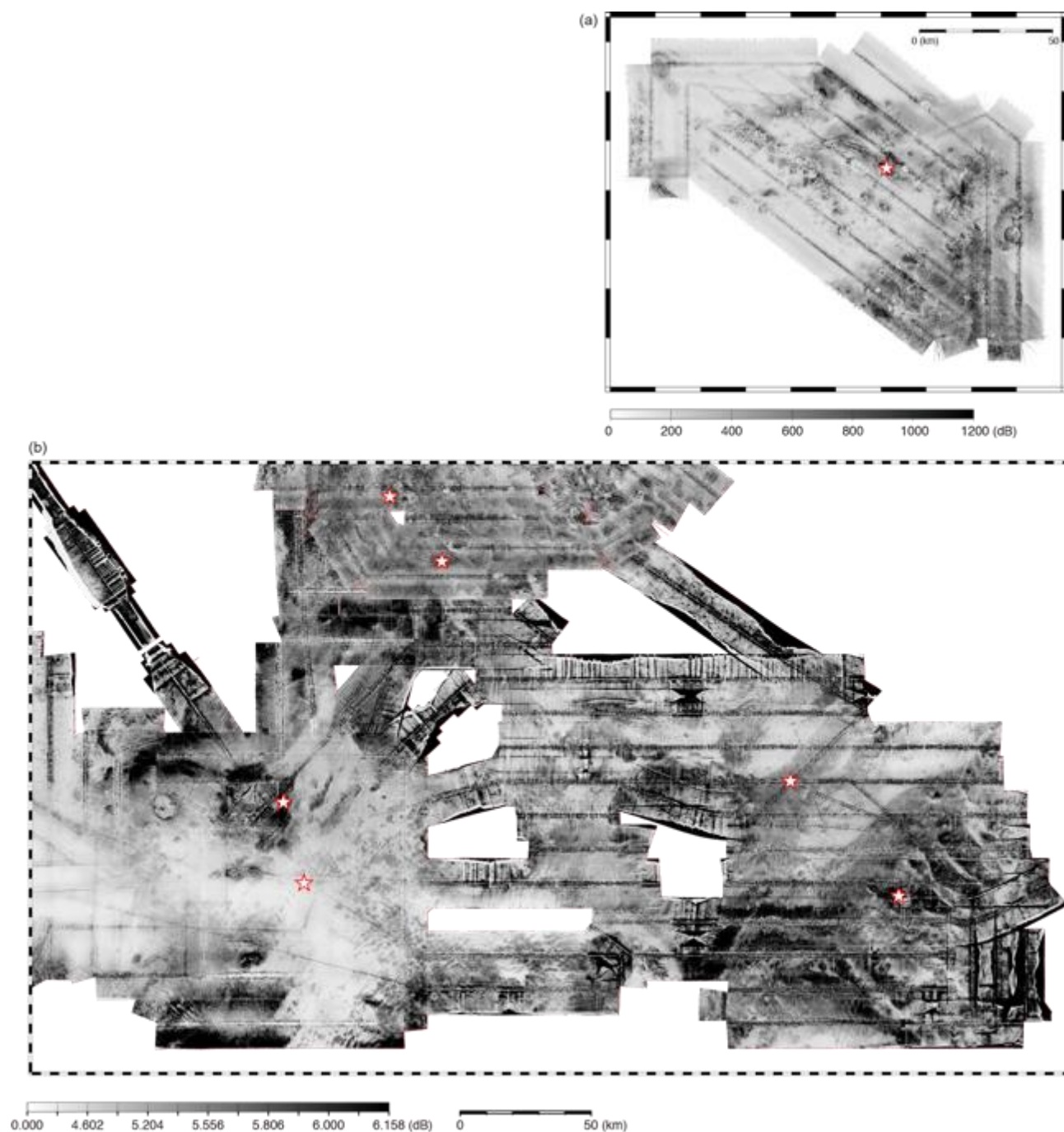


図3：南鳥島 EEZ 東部 (a) および南～南東部 (b) の海底の後方散乱強度（反射強度）分布。(a)は Machida et al. (2016) より引用・加筆。(b)は YK16-01 クルーズレポートより引用・加筆。赤星は YK10-05 および YK16-01 航海における「しんかい 6500」潜航調査地点（強度分布を見やすくするために潜航番号は省略している（潜航番号は図1を参照））。

マルチナロービーム音響測深機により得られる海底の後方散乱強度のデータは、底質を反映するが、その絶対値は測深機やデータの処理方法等で変化するので、注意が必要である。つまり、同一の測深機およびデータ処理の方法によって得られる強度は、絶対的な数値の直接比較が可能であるが、異なる場合は異なるもの同士の直接比較はできない（例えば、図 3a と 3b に示したデータは、それぞれ測深機およびデータ処理の方法が異なるためカラスケールの数値が異なる）。ただし、本

海域では、これまでの複数回の音響調査が行われ、同一地点から異なる測深機およびデータ処理法によって強度データを得た場合があるため、その地点が同程度の色合いになるようにカラースケールの配色を工夫し、反射強度分布を比較しやすく表示している。

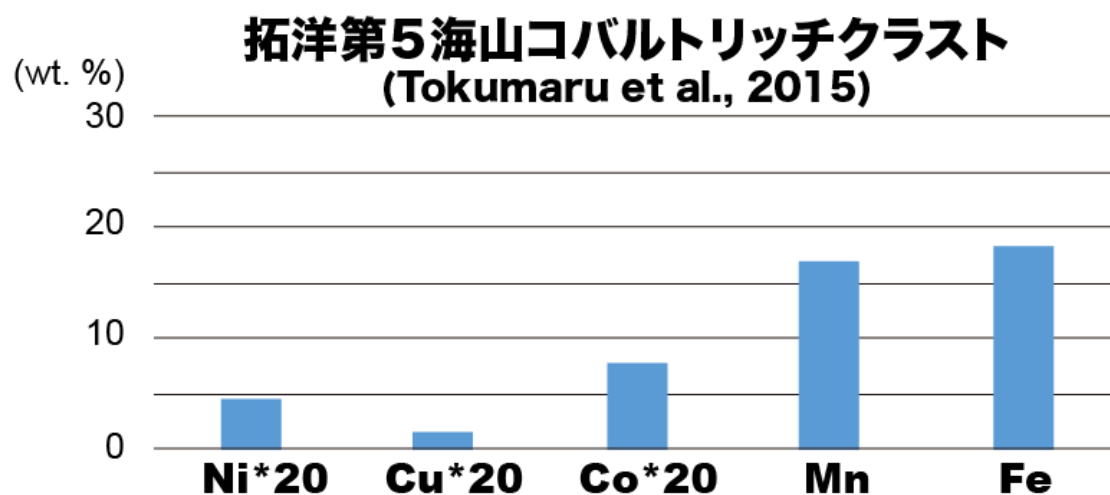
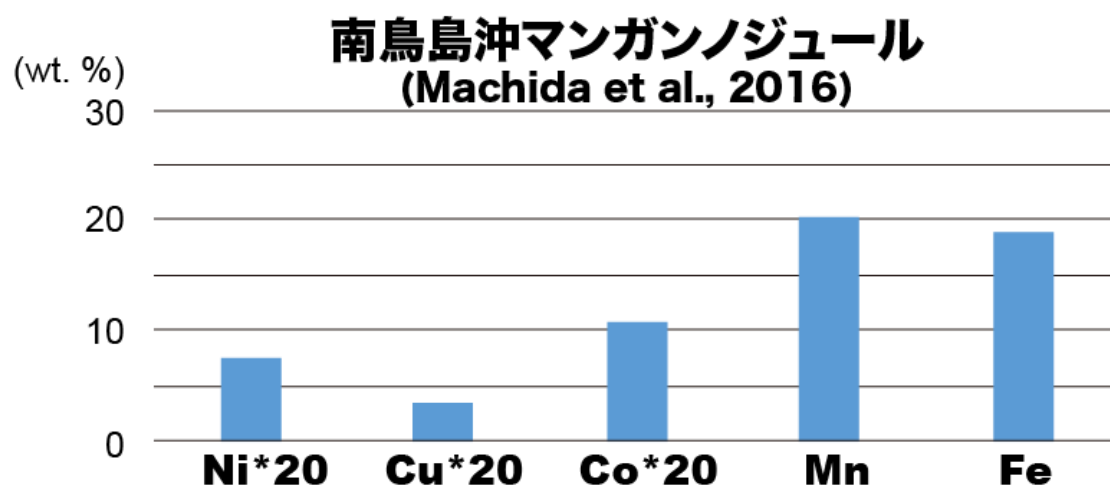
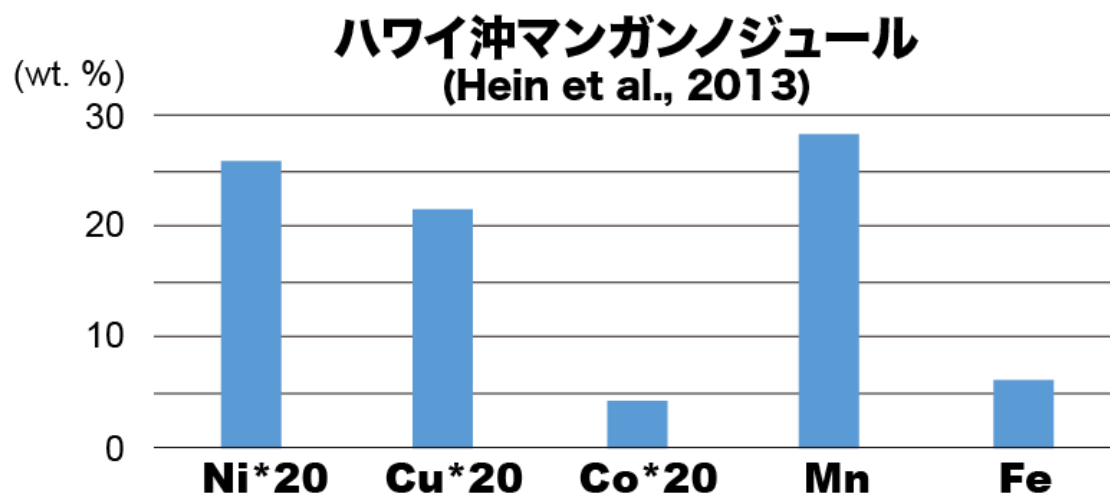


図4：南鳥島 EEZ 内のマンガンノジュールと、ハワイ沖のマンガンノジュールおよび拓洋第5海山のコバルトリッチクラストとの組成比較。ニッケル (Ni)、銅 (Cu)、およびコバルト (Co) は実際の濃度を 20 倍している。

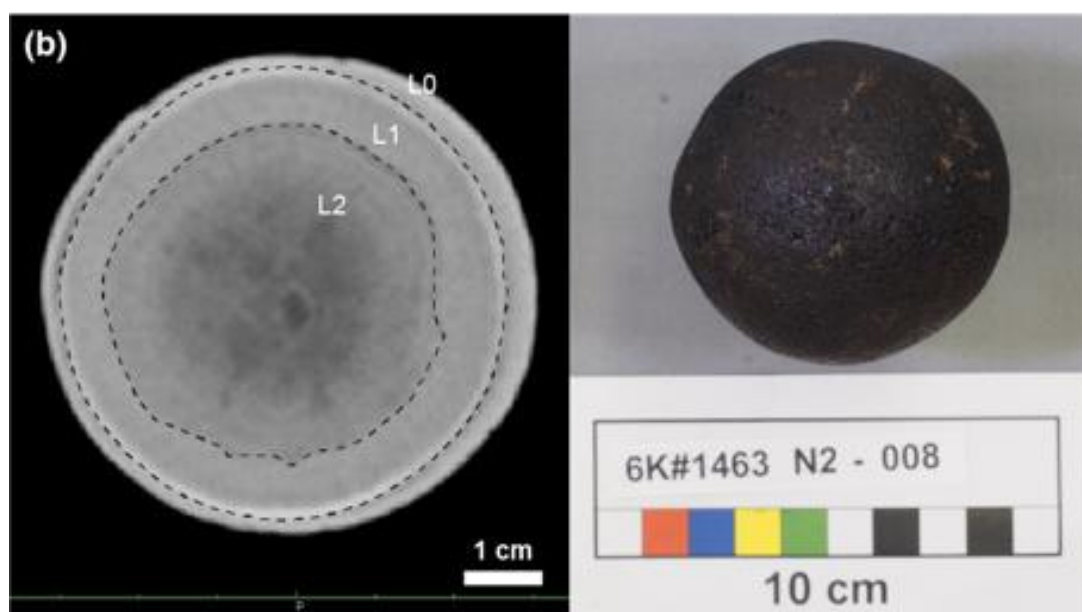
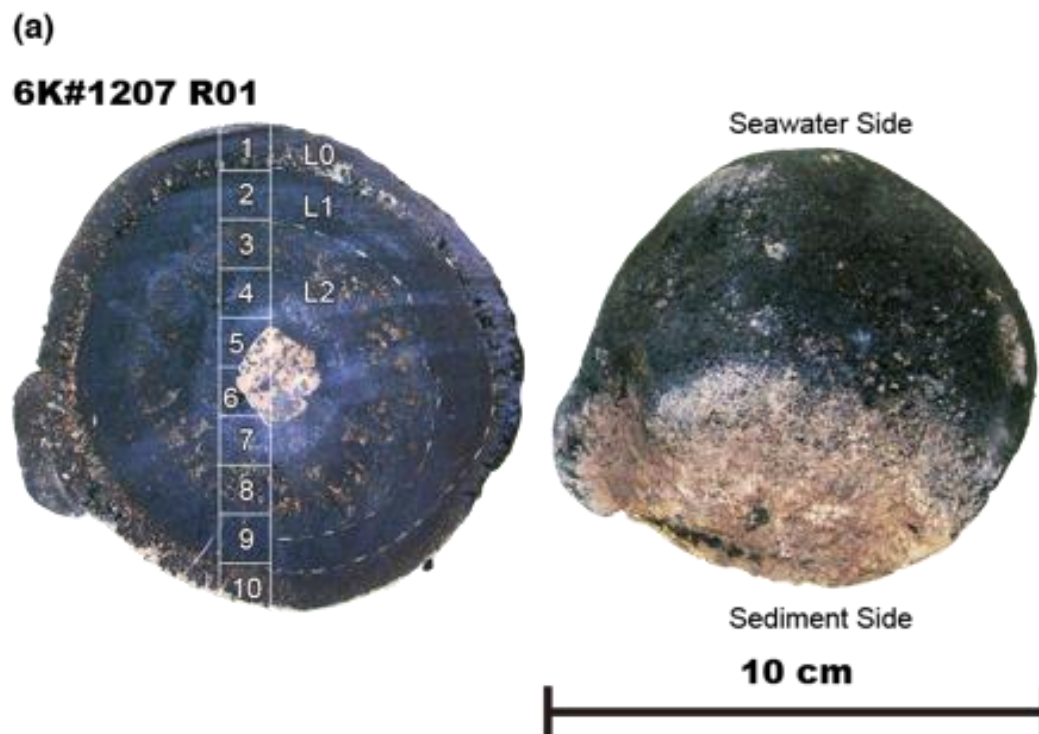


図 5 : YK10-05 航海(a)および YK16-01 航海(b)で採取されたマンガンノジュールの内部構造の比較。(a)は Machida et al. (2016)より引用。(b)左図は、右図に示した試料の X 線 CT により計測された内部構造断面。L0, L1, L2 は、Machida et al. (2016)によって定義されたノジュール内部の組織（疎密）の違いにもとづく層の番号である。

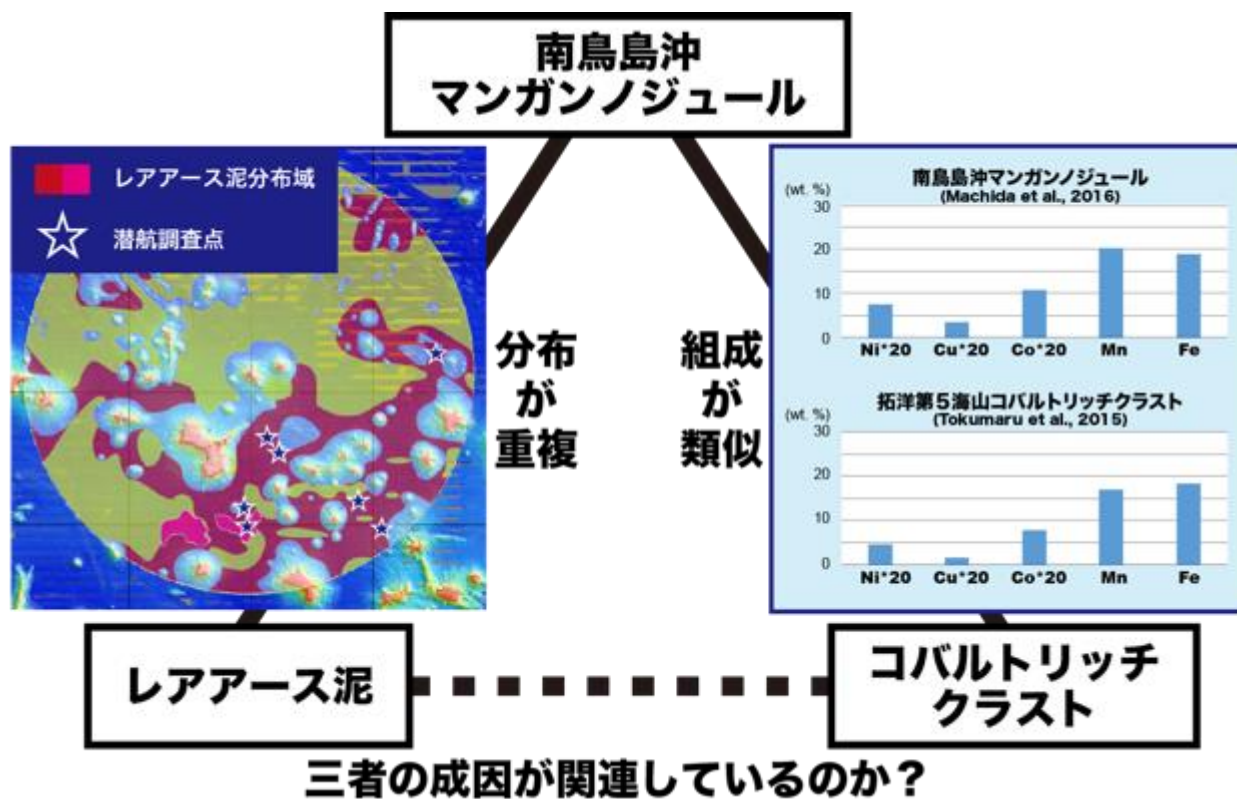
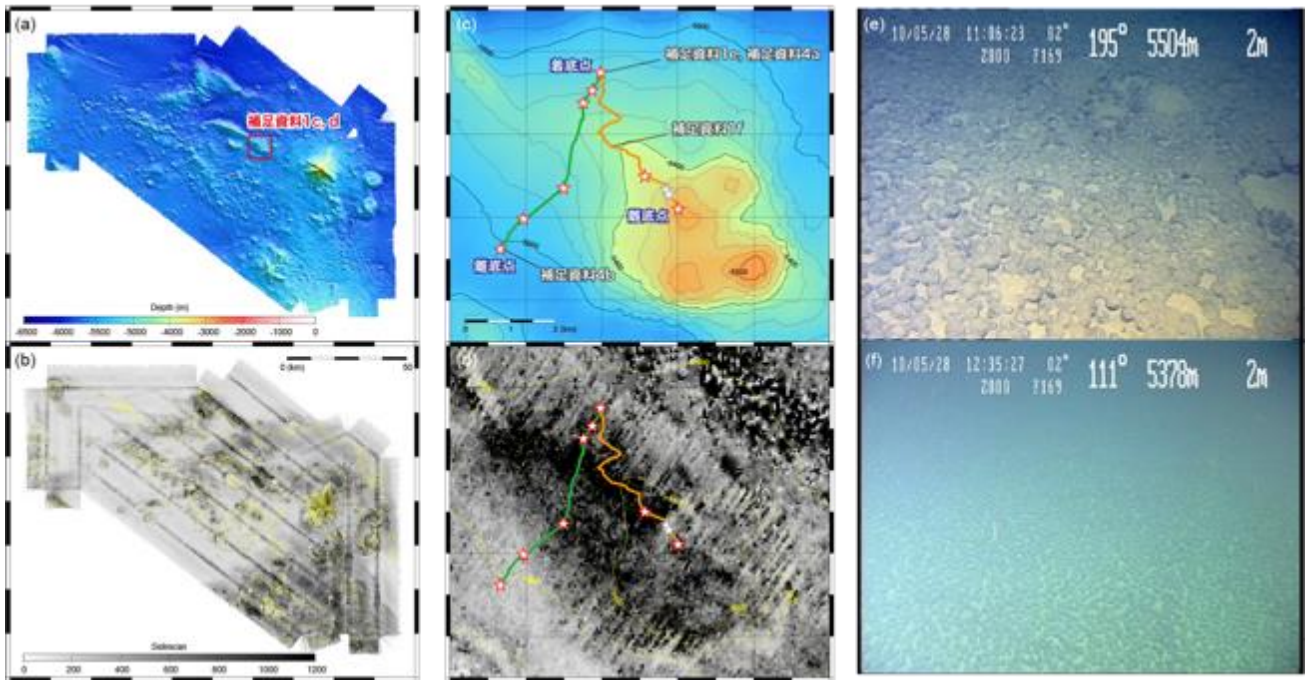
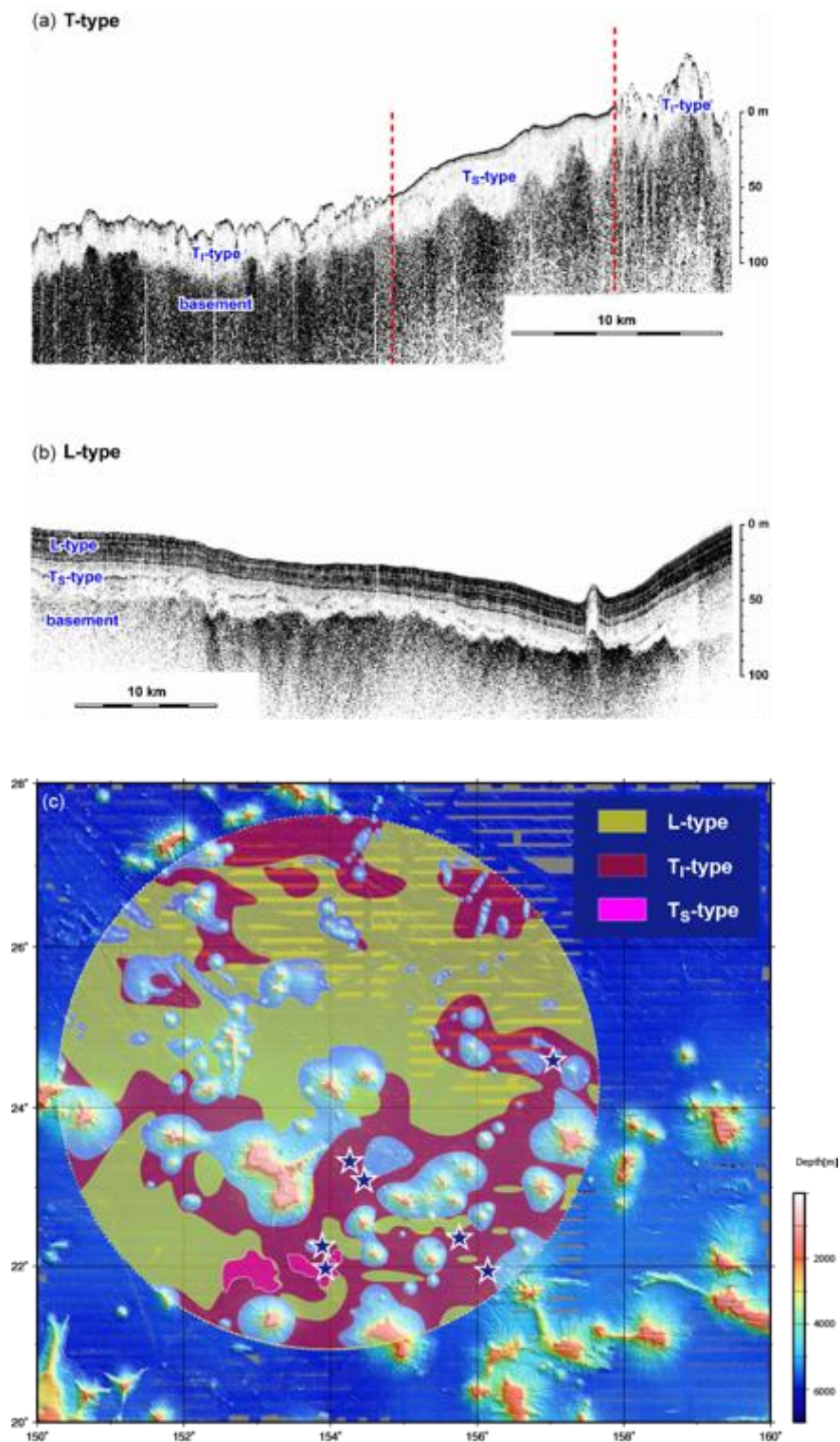


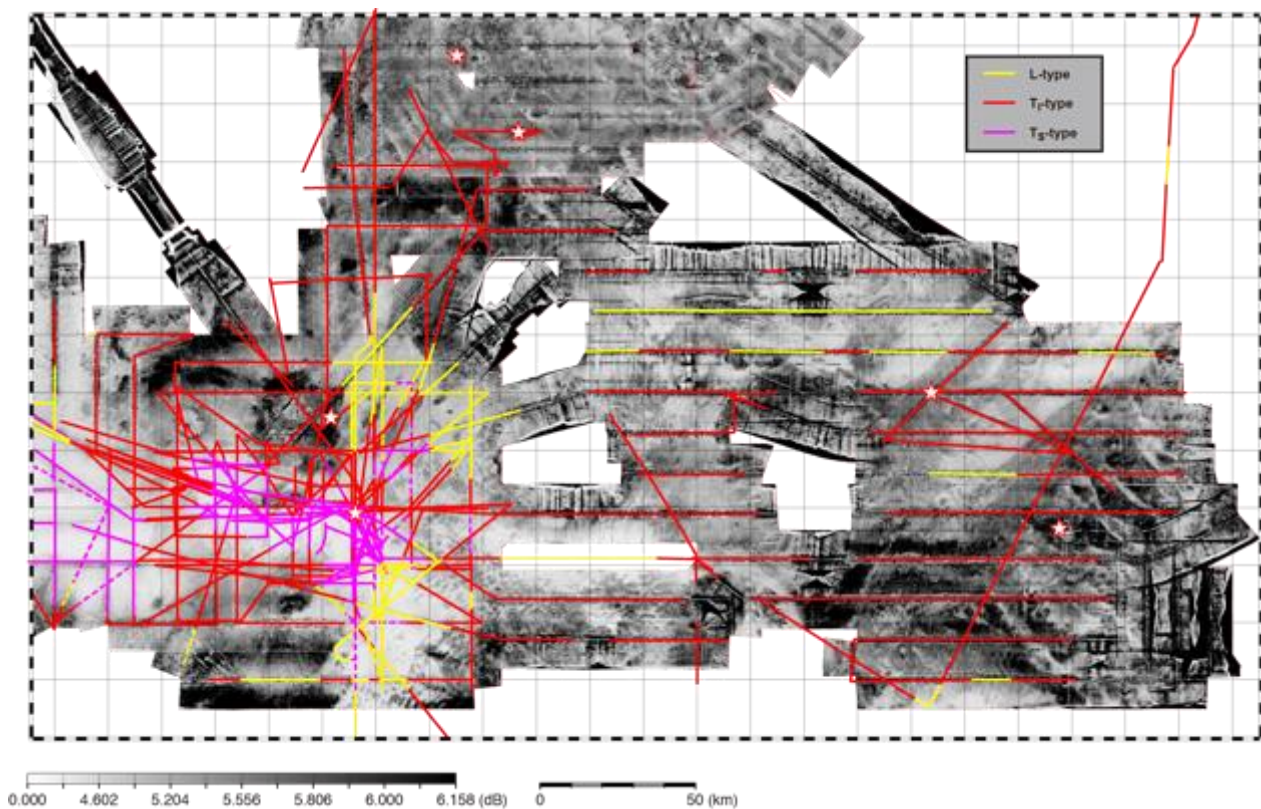
図 6 : 本研究の成果から示唆される、三種の酸化物海底資源の包括的な成因解明への展望。マンガンノジュールとコバルトリッチクラストとの関連性の詳細は図 4 に、マンガンノジュールとレアアース泥との関連性は補足 2 および 3 に示す。



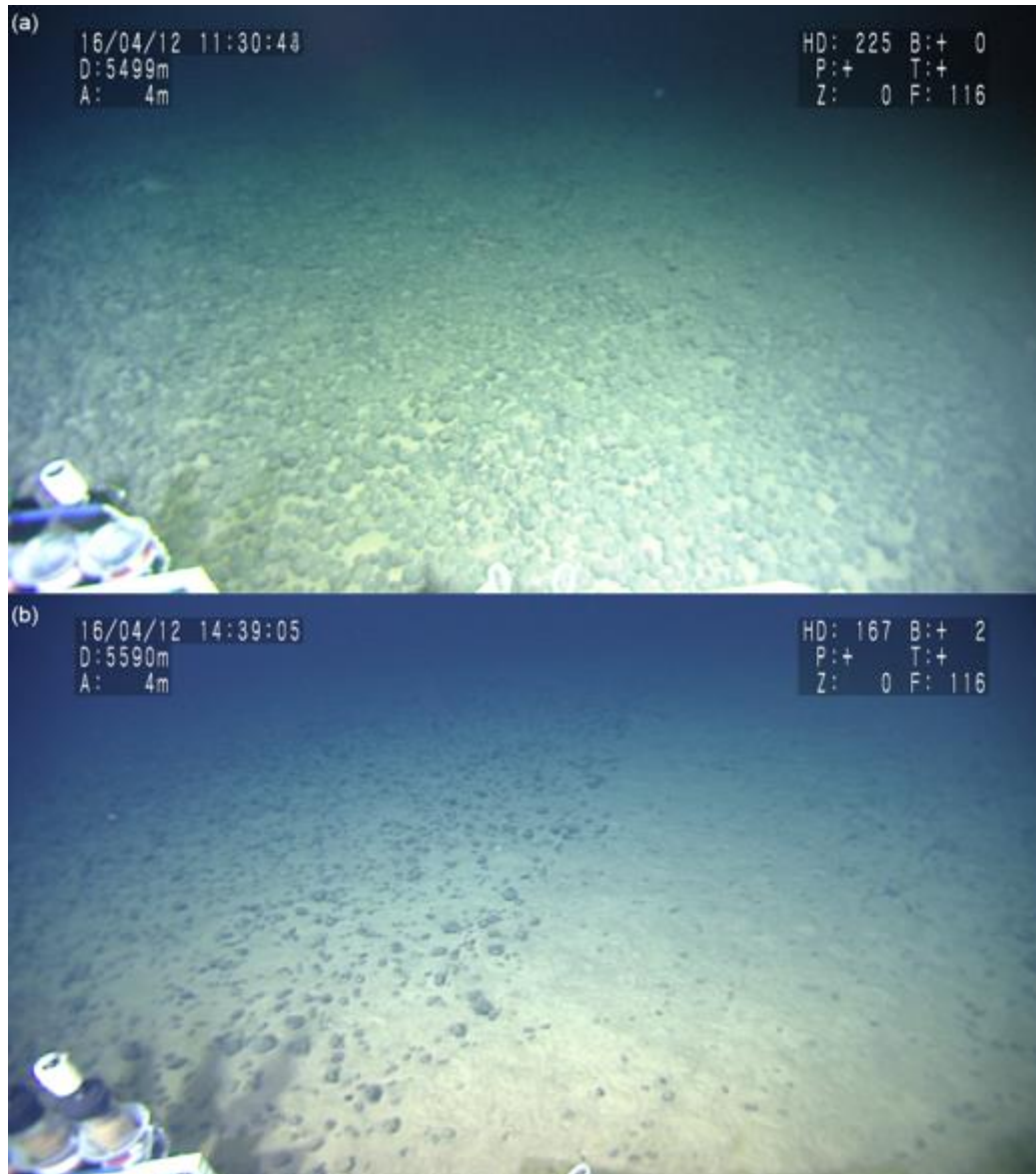
補足 1： YK10-05 航海において南鳥島東方沖で発見されたマンガンノジュールフィールドと周辺の海底地形 (a, c)、後方散乱強度分布 (b, d)、および海底の様子 (e, f) (図および写真は全て Machida et al. (2016) より引用・加筆)。オレンジ色の線は「しんかい 6500」第 1207 潜航 (YK10-05) の、緑色の線は第 1459 潜航 (YK16-01) の観測測線であり、赤い星はマンガンノジュール採取地点、グレーの星はコバルトリッチクラスト採取地点を示す。いずれの測線においても、測線に沿ってマンガンノジュールの分布が連続的に観察された。さらに第 1459 潜航では、反射強度の減少に対応してマンガンノジュールの分布密度も減少する様子 (補足 4a および 4b) が観察された。(d) のカラースケールは (b) のものと同様。



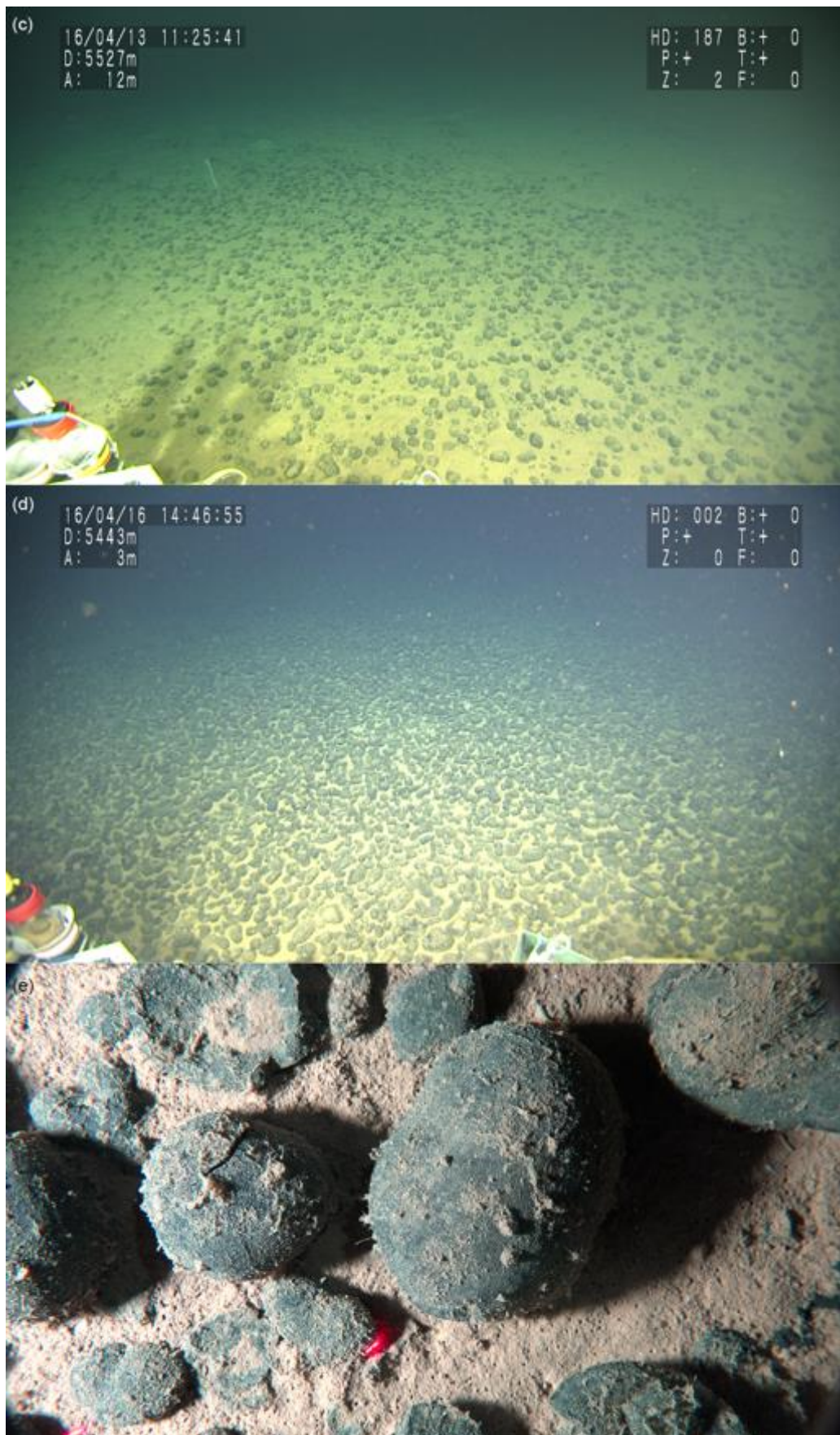
補足 2: サブボトムプロファイラーにより明らかになった南鳥島周辺の代表的な地質構造断面 ((a) : T-type および (b) : L-type) と、南鳥島 EEZ 内の海底表層に分布する堆積物の分布域区分図 (c) (Nakamura et al. (2016) より引用・加筆)。黄色 (L-type) はレアアース濃度の低い遠洋性堆積物 (表層泥) が分布する領域を、赤およびピンク色 (T-type) は海底下の浅い深度にレアアース泥が分布する領域を示している。レアアース泥分布域は地形が起伏に富む T_I-type と地形が平坦な T_S-type に細分される。星印は「しんかい 6500」の潜航調査を実施した地点。



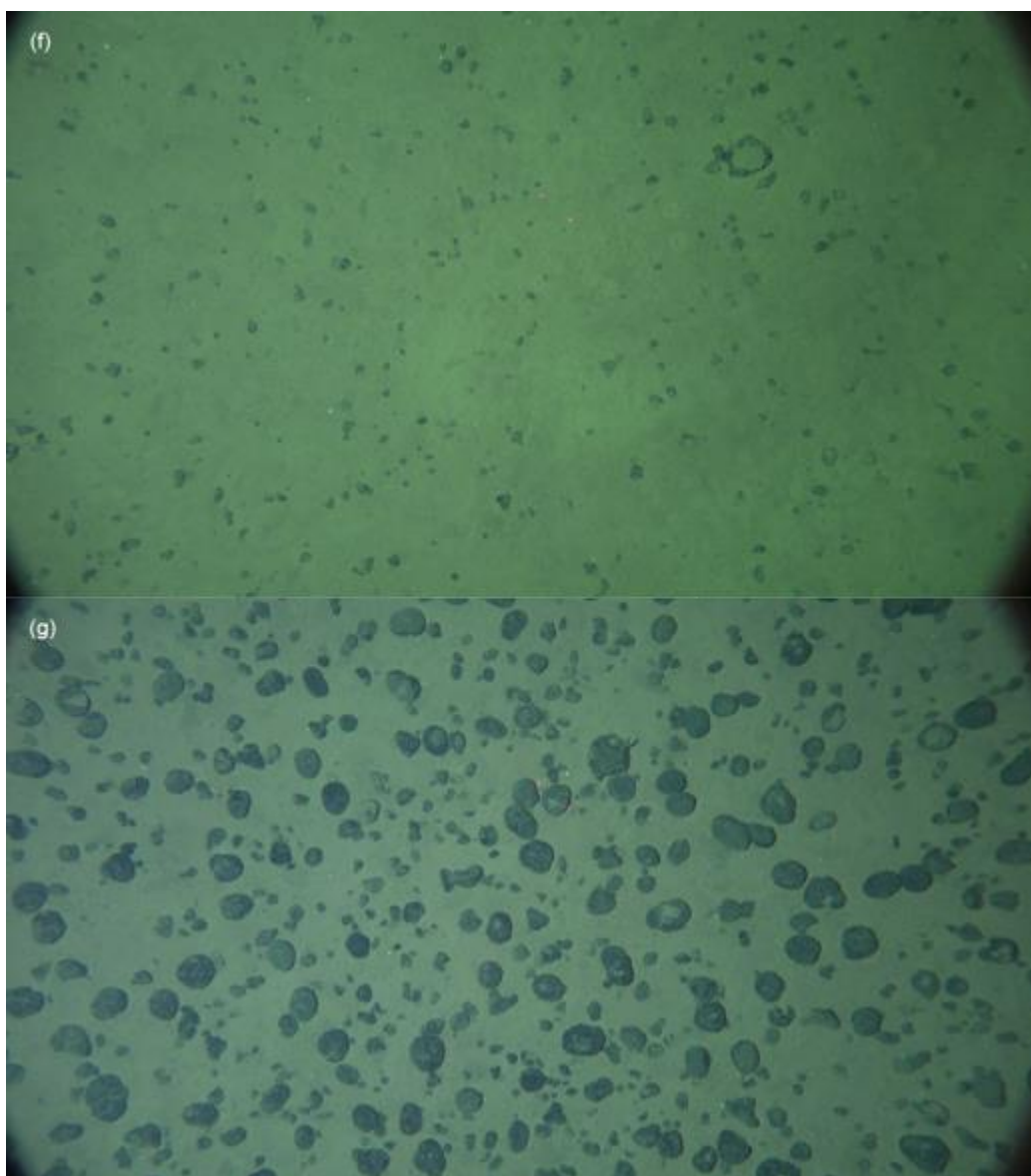
補足 3： 南鳥島 EEZ 南部から南東部にかけての後方散乱強度分布とサブボトムプロファイラーに基づく表層堆積物の分布区分との対応。後方散乱強度分布は、YK16-01 クルーズレポートより引用・加筆。赤星は YK16-01 航海における「しんかい 6500」潜航調査地点（強度分布を見やすくするために潜航番号は省略している（潜航番号は図 1 を参照））。サブボトムプロファイラーに基づく表層堆積物の分布区分は、レアアース泥成因研究のために昨年度までに実施した航海の測線に沿ったものである。



補足 4：「しんかい 6500」潜航時の海底の様子。(a)第 1459 潜航の強反射域（しんかい 6500 に搭載された No. 1 固定式ビデオカメラ（No. 1 カメラ）映像より）。この地点では、真球形のノジュールが分布している。(b) 第 1459 潜航の弱反射域（No. 1 カメラ映像より）。この地点では、不規則な形状のノジュールが分布している。(c) 第 1460 潜航（No. 1 カメラ映像より）。この地点では、球形のノジュールが分布している。(d) 第 1462 潜航（No. 1 カメラ映像より）。この地点では、紡錘形のノジュールが分布している。(e) 第 1464 潜航（4K 深海カメラ映像より）。着底時の様子。この地点では、球形から紡錘形のノジュールが分布している。(f) 第 1465 潜航の弱反射域（4K 深海カメラ映像より）。(g) 第 1465 潜航の強反射域（4K 深海カメラ映像より）。この地点では、扁平な形のノジュールが分布している。4K 深海カメラ映像に映っている赤い 2 点のレーザーポイントの間隔は約 10 cm。



補足 4 (続き)



補足 4（続き）



補足 5：「しんかい 6500」に取り付けた 4K 深海カメラ（耐圧容器内に格納されている）と光源。吊り上げられた「しんかい 6500」を正面下から撮影。