

深海泥のレアアース資源として開発の可能性

西村 昭¹⁾

1. はじめに

レアアース（希土類元素；以下，REE）を多く含む深海泥が太平洋の広範囲に分布し，資源的な価値を持っているという論文発表（Kato *et al.*, 2011）が2011年7月にあり，日本の多くのメディアで取り上げられた（国立大学法人東京大学，2011）．REEの寡占産出国である中国の取引規制などの動きと相まって，日本の工業材料の資源確保のための新たなREE供給源として深海泥が期待されている．ここでは，新たな海洋資源と期待される深海泥とはどのようなものかを概説し，資源として開発への展望や課題について記述する．

筆者はかつて深海堆積物やマンガン団塊について研究した経験から，REEの存在パターンや同位体組成が岩石や堆積物の起源や形成プロセスの検討に大いに役立つものであるということは認識していた．しかし，今回の加藤らの論文は膨大なデータの蓄積に基づきREEの量的な評価を行い，資源としての可能性の指摘に至った「発想の転換」に感銘を受けた．しかし，深海の海洋鉱物資源はその総量の膨大なことから未来への大きな夢を与えてくれるものであるが，これまでは開発になかなか至らないできた現実がある．そこで，他の海底鉱物資源との比較も含め検討を試みた．資源の問題は，科学の問題だけでなく社会・経済の動向の理解がなくては，核心に迫ることができない．特に後者に関する十分な検討をできる能力もないので，その点を含め，ご意見ご批判をいただければ幸いである．

2. レアアースとは

レアアースとは，周期律表の第III族のランタノイド（LaからLuの15元素）にScとYを加えた17元素である．強力磁石など様々な先端技術での材料として工業利用されている．近年その需要が飛躍的に大きくなっており，2009年の全世界での生産量は約13.3万トンである．そのほとんどが中国で生産される寡占状態となっており，中国バヤンオボー鉱床が世界の産出量の95%を担っている．

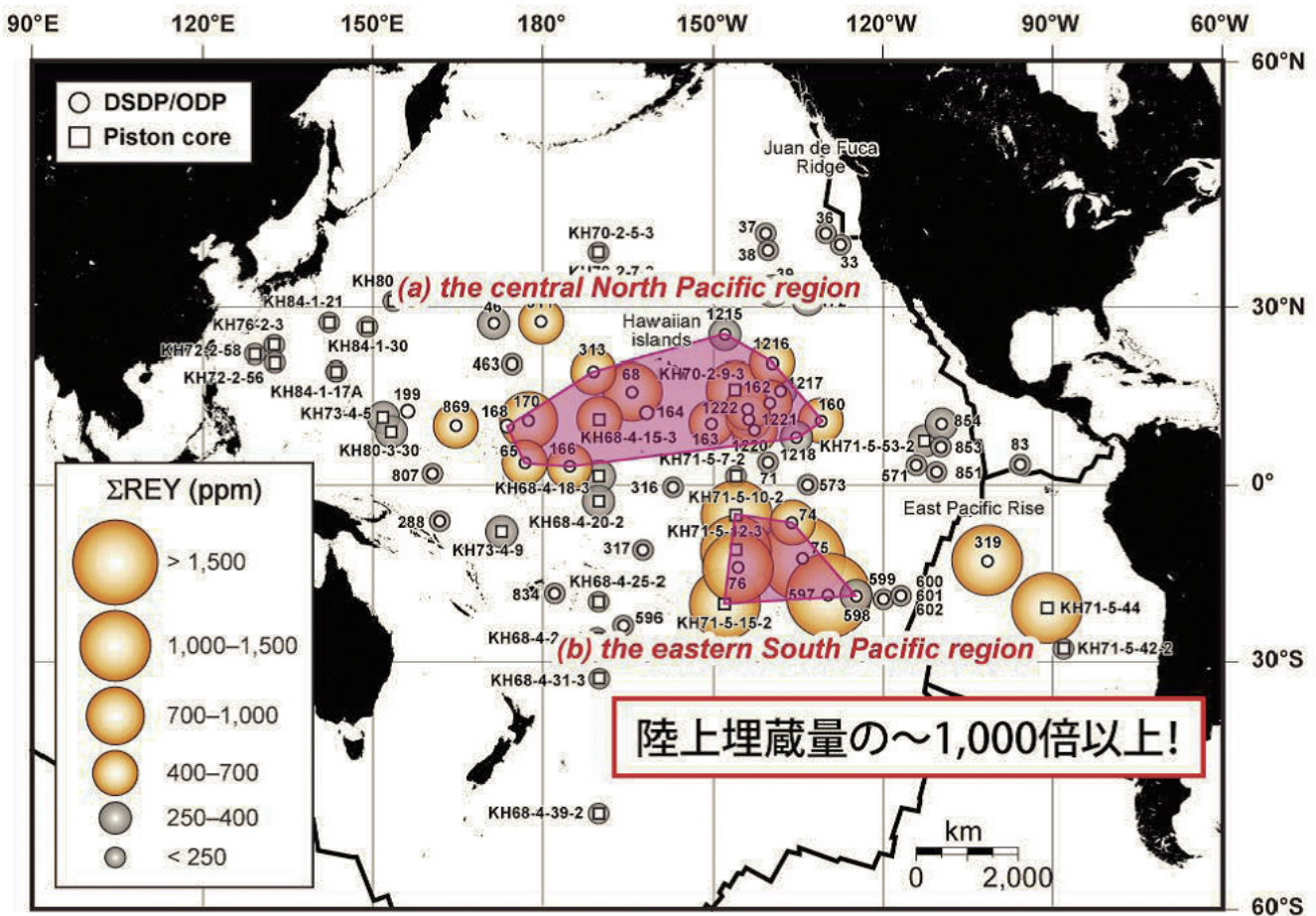
REEの陸上鉱床の資源量は少ないのではなく偏在していることが問題であり，世界的に枯渇している訳ではなく，中国の輸出規制等により不安定になることが最大の問題であるとの指摘もある．海域がREEの資源供給源となりえるかは，海域における資源の実態の科学的解明や技術開発の課題というよりは，陸域資源の開発や分配の情勢の方が大きい決定要因であるかもしれない．また，REEは様々な鉱石に含まれているものであり，REE鉱山からの生産に限らず，REE以外の元素の利用のために選鉱や精錬された残渣からも得られる可能性もある．例えば，世界で主として肥料生産のために精錬をされる燐灰石からREEを取り出せば，世界の年間必要量を賄えるとの試算もある（渡辺，2008）．

REE元素はイオン半径が系統的に変化し，CeとEuを除くと化学的性質が同様であるため，マグマの分化や岩石の溶解，溶液からの沈殿などの反応やプロセスでの変化をその量比や相対的な変化で明らかにできることから地球科学での研究手法として広く応用されている（太田，2011）．REEの工業での重要性や生産などの様々な問題は，多くの解説が出版されており，詳細はそれらを参照していただきたい（例えば，石原・村上，2005；阿部ほか，2011；渡辺，2008）．

3. レアアース資源泥とは

2011年の論文では，東京大学海洋研究所のピストンコアや国際深海掘削で採取された深海盆の78地点のコアからの2037試料の堆積物の分析データを基に，レアアース（ランタノイドとイットリウム）の含有量が高い深海泥（deep-sea REY-rich mud）が太平洋に広く分布していることが示された（第1図）．ここではそれを，論文著者らがホームページやプレス発表で用いている「レアアース資源泥」と呼ぶことにする．資源泥といわれる所以は，まずは開発への期待を持てるほどの高濃度であることで，REE総量として2000ppmを超えるものがあること，高濃度の泥が海底近くの深さ数10mの範囲内に存在し，広域に分布が期

1) 産総研 地質情報研究部門



第1図 深海底泥のレアアースの分布（分析地点と濃度）（国立大学法人東京大学, 2011）.
東太平洋の赤道をはさんで2つのREE濃集帯が存在。

待できることである。その結果、REEの資源総量は、膨大なものとなる。高濃度域において4 km²の10m程度の深さまで採掘利用すれば、日本での年間消費量の約1年分に及ぶと試算されている（文部科学省, 2011）。

さらに重要な点は、REEの溶解抽出が容易なことである。深海の泥はもともと非常に細粒であり、この深海泥を室温状態（25℃）において希硫酸（0.2mol/l）と反応させることにより短時間（1時間程度）にCeを除く含有REEのほとんど（80%以上）が抽出されることが室内実験レベルで確認されている。鉍石の粉碎の必要がなく、選鉍のプロセスもなしに抽出できることは製品化にとってコスト面で有利である。

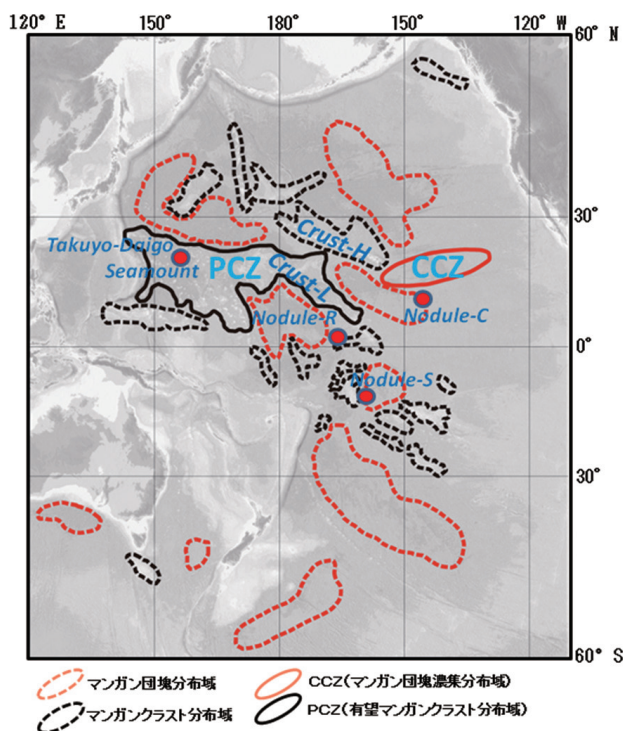
そのほか、以下のような点からも、開発への期待が高まるものである。

1. レアアース資源泥の総資源量の膨大さ。2. 太平洋全域でのREE濃度分布の概要の傾向が限られた深海掘削やコア試料で明らかになっており、開発候補点の選定を行う際にも比較的少数のコア試料で探査できる可能性が高いこと。3. REEのなかでも、現在工業材料として重要性の

大きい重希土類の含有量が多いこと。4. 陸上鉍床で精錬残渣の処分のコスト高になっている放射性核種を含むThの含有量が少ないこと。5. 深海で採掘後の揚鉍（海底資源では採取した鉍石を海底から海洋表層の船まで引き上げる作業）には、これまでに開発された技術の高度化により実現可能と考えられること。

一方、開発への問題点もある。（1）レアアース資源泥の産出する深海盆は陸から遠い遠洋域である。深い深海盆から海面まで深海泥を運び揚げることに加え、精錬などを陸上で行うには長い距離を輸送する必要がある。（2）REE含有量はトータルでも堆積物の乾燥重量の0.3%以下であるので、処理堆積物の総重量の99%以上をREE回収後に処分する必要がある。その量は1万トンのREE生産の際には数100万トンといった多量の残土になる。その2つの不利な点を解消するために、資源泥を採取する現場の洋上において弱酸と反応させてREEを回収し、処理後の残土を海洋投棄するといったアイデアも出されている（文部科学省, 2011）。

レアアース資源泥の成因については、その太平洋での分



第2図 太平洋のマンガン団塊とマンガンクラストの分布(Hein, 2011). 本文中の分析値を示した地点・地域を示す.

布状況やREEと他の元素成分の相関関係などから、東太平洋の拡大軸の熱水噴出に伴って放出された鉄質懸濁物質と海底で生成されるゼオライト鉱物のフィリップサイトによる海水中のREEの吸着により形成されたと推定されている。レアアース資源泥にはバナジウム・コバルト・ニッケル・モリブデンなどのレアメタルも高濃度であるとの指摘もなされている (Kato *et al.*, 2011)。

論文には、堆積速度が0.5 cm/1000年より小さい堆積

物に500ppmを超える高い濃度のREEが存在することが示されている。中部太平洋でマンガン団塊の海底表面での成長可能な条件として限定した堆積速度(0.5cm/1000年以下)(Nishimura, 1992)と同様の値であることは注目される。深海における堆積速度の大きさは、海洋表層からの供給物質の種類と量、及び炭酸カルシウムやオパールシリカの溶解を支配する水深により規制されており、堆積速度が小さいことは生物源や陸源の物質による希釈効果が小さいことを意味する。そのことがREEの濃度を高くする重要な要因であることを示している。

4. 海底資源としてのレアアース資源泥

これまで、深海域の海底鉱物資源として、マンガン団塊・コバルトリッチクラスト・海底熱水鉱床の3つに関して調査や開発に向けた検討が活発になされてきた。マンガン団塊・マンガンクラストについて、その起源や成因の検討のため、REEの分析例が数多く報告されてきた。最近、その含有量に注目してREE資源になりうるかの検討も始まっている。その紹介も含めて、マンガン団塊やマンガンクラストのREE資源としての実態と可能性について検討してみたい。

東太平洋のマンガン団塊の濃集帯(CCZ: Clarion-Cliperton nodule zone)(第2図)においては、REE品位0.1%(1000ppm)のマンガン団塊が 211×10^8 トン存在する。また、西太平洋のマンガンクラスト分布域(PCZ: Prime Crust Zone)(第2図)には、同じく0.3%(3000ppm)のクラストが 75×10^8 トン存在する。合わせたREE賦存量は 4.4×10^7 トンで陸上の大鉱床のパヤンオーバー鉱床

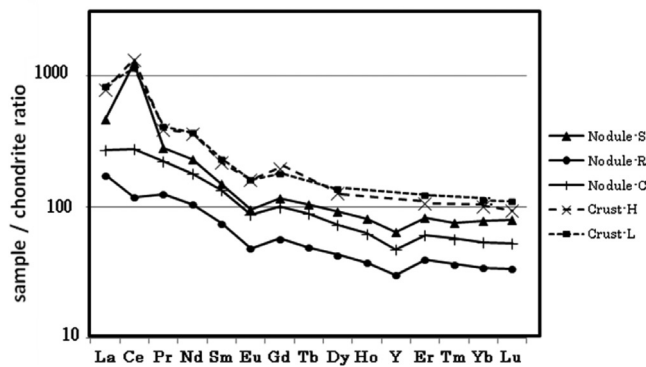
第1表 マンガン団塊とマンガンクラストのレアアース含有量(ppm)。

	Pacific Manganese Nodules						Pacific Manganese Crusts			
	Nodule-S: D535 (4)		Nodule-R: D513 (6)		Nodule-C: HW(16)		Crust-H (32)		Crust-L (19)	
	ave.	s.d.	ave.	s.d.	ave.	s.d.	ave.	s.d.	ave.	s.d.
Y	135.90	8.49	64.14	8.13	99.27	9.29				
La	172.25	22.11	64.34	7.24	99.64	9.30	287	60	307	77
Ce	1208.68	112.33	114.54	27.77	264.41	36.74	1277	273	1100	575
Pr	38.61	5.90	17.22	1.75	30.52	2.55	53.7	13.5	56	16
Nd	163.63	25.84	74.97	8.78	128.80	11.49	260	61	261	73
Sm	34.55	5.85	17.37	2.11	31.30	2.66	50.5	17.6	54	17
Eu	8.32	1.35	4.21	0.51	7.68	0.65	14.0	2.7	14	4
Gd	35.91	5.16	17.56	2.01	30.71	2.70	60.8	13.7	55	15
Tb	6.10	0.94	2.88	0.33	5.15	0.44				
Dy	35.05	4.68	16.43	1.84	27.88	2.43	48.7	10.4	52	12
Ho	6.98	0.83	3.19	0.38	5.36	0.49				
Er	20.69	2.06	9.86	1.26	15.31	1.38	26.5	4.8	31	5
Tm	2.69	0.26	1.31	0.14	2.05	0.16				
Yb	19.49	1.51	8.52	1.01	13.46	1.05	25.3	4.0	28	4
Lu	3.04	0.19	1.29	0.15	2.01	0.15	3.57	0.64	4.2	0.6
total YRE	1891.86	195.61	417.82	55.43	763.54	74.90	2107.07*		1962.2*	

データの出典:

Nodule-R, -S, and -C: Ohta *et al.* (1999), Crust-H: DeCarlo and McMurry (1992), and Crust-L: Aplin (1984)

()内は分析試料数 * : この表に分析値が示されている元素の平均値の合計



第3図 マンガン団塊とマンガンクラストのコンドライト規格化REEパターン。
コンドライトのREE値はTaylor and McLennan (1985)を用いた。

の賦存量 (4.9×10^7 トン) に匹敵する (Hein, 2011)。

マンガン団塊について、太平洋の3地点のREE報告例を示す(第1表, 第3図; 試料採取点は第2図参照)。海底鉱物資源でのマンガン酸化物には、海水起源と続成起源の2種があり、構成鉱物や成分に特徴があることが知られている(第2表; 白井, 2010)。Nodule-SとNodule-Rは中部太平洋で地質調査所(現在の産総研)がマンガン団塊の地質学的な研究を行った海域での試料である。マンガン団塊の生成過程の違いを反映した2タイプの内、Nodule-Sは海水起源のもので、海水中の鉄マンガンコロイドから直接酸化的な海水に接した状態において生成した表面の平滑な団塊である。一方、Nodule-Rは続成起源で、海底表層の堆積物に覆われたやや還元的な環境で、マンガンがイオンとして移動して生成した表面が粗いものである。REEの総量は、平均でそれぞれ、約1890ppmと約420ppmであり、Nodule-SがREE全成分で濃度が高い。

Nodule-Sでは、Ceが高濃度であり、REE-パターン図において大きなCe正異常を示し、酸化状態での形成を示す(第3図)。2タイプのマンガン団塊は、マンガン団塊の開発対象の金属成分の濃集に違いがある。Nodule-RはCuやNiが濃集しており、それぞれ平均で約1.2%、約1.3%含まれる。REEの濃度の高いNodule-Sは、両成分とも0.3%を超えていない。マンガン団塊の高濃集域としてすでに日本を含む7つの鉱区が設定されているCCZの付近から採取されたNodule-Cは、基本的にはNodule-Rと同様の続成起源であり、Nodule-SよりはREEは低いが、REEの総量は約760ppmと中部太平洋のものよりは濃度が高い。海盆底のマンガン団塊は、主としてCuやNiが高濃度で団塊の濃集域のCCZが太平洋での鉱区対象域になっている。REE資源としてのマンガン団塊の開発のためには、Nodule-Sのような海水起源の団塊分布域が開発対象になるかもしれない。

マンガン団塊は海底表層に存在しその周辺や下位は深海泥である。マンガン団塊と同地点の深海泥のREEのデータのセットは、上記のマンガン団塊にはないが、他の報告がある。それによると、マンガン団塊と深海泥ではマンガン団塊の方がREEの含有量は2~3倍大きいのが一般的である(第3表)。また、深海泥を粒径により区分し、0.6 μ m以下という深海泥の粘土粒子と0.5mm~1mmのマンガンマイクロジュールのみのREE分析値の比較によると、マンガンマイクロジュールのREE濃度が2.5倍程度も高く(Duliu *et al.*, 2009)、深海泥のREE成分は比較的大きなマンガンや鉄酸化物粒子がより寄与していると考えられる。

マンガンクラストについては、北太平洋のハワイの島列~海山列とPCZ(Prime Crust Zone: 有望クラスト分布

第2表 海底マンガン鉱床のタイプ(白井, 2010)。

タイプ	海水起源 (hydrogenetic)	続成起源 (diagenetic)	熱水起源 (hydrothermal)
起源	海水から直接沈殿	海底表層での溶解・再沈殿	熱水や温泉水から析出
形態	クラスト、団塊	団塊	細脈、均質層、盤層など
形成環境	深海盆、海山	深海盆	火山、リフト
鉱物名	vernadite	buserite	todorokite, buserite
結晶構造	層構造	層構造	トンネル構造、層構造
化学組成(主成分)	Mn, Fe	Mn	Mn
化学組成(副成分)	Co	Ni, Cu	Mg, Ba, Ca
化学組成(希土類Ce異常)	正	負	負
結晶サイズ(μ m)	0.01以下	0.01以下	0.1~100
色	黒褐色	黒色	灰黒色
光沢	無し	無し	亜金属

第3表 マンガン団塊と堆積物のレアアース含有量 (ppm) .

	Pacific Ocean				Indian Ocean	
	Clarion-Clipperton zone (CCZ) Nodules (9)	Sediments (3)	Peru Basin Nodules (12)	sediments (2)	Nodules (9)	Sediments (9)
Y						
La	93 ± 10	69 ± 44	55 ± 13	37 ± 9	103.1 ± 28.0	32.9 ± 7.6
Ce	344 ± 76	75 ± 15	112 ± 36	40 ± 9	334.9 ± 128.2	84.3 ± 8.2
Pr						
Nd	134 ± 33	69 ± 47	46 ± 11	33 ± 1	125.7 ± 27.7	36.9 ± 8.0
Sm	33.3 ± 6.2	17.6 ± 9.3	12.3 ± 2.8	8.1 ± 1.6	27.6 ± 5.5	9.4 ± 2.0
Eu	7.8 ± 1.4	4.5 ± 2.6	3.0 ± 0.7	2.0 ± 0.5	6.7 ± 1.2	2.2 ± 0.5
Gd					26.1 ± 7.7	8.7 ± 1.9
Tb	4.0 ± 0.9	2.8 ± 1.9	1.9 ± 0.4	1.4 ± 0.4		
Dy					22.2 ± 5.6	8.3 ± 2.1
Ho					4.2 ± 1.1	1.6 ± 0.4
Er					11.2 ± 3.1	4.7 ± 1.3
Tm						
Yb	12.9 ± 2.1	9.0 ± 5.2	8.7 ± 1.9	5.7 ± 1.2	9.8 ± 2.4	4.2 ± 1.1
Lu	1.8 ± 0.4	1.5 ± 0.8	1.4 ± 0.3	1.0 ± 0.2	1.7 ± 0.4	0.7 ± 0.2
total YRE	630.8	248.4	240.3	128.2	673.2	193.9

データの出典:

Pacific Ocean: Glasby et al. (1987); Indian Ocean: Pattan et al. (2001)

()内は分析試料数 total YREは、表に分析値が示されている元素の平均値の合計

域; Hein, 2011) に含まれるライン諸島列の2地域について示す(第1表; 試料採取点は第2図参照)。これらのクラスタの分析データは、REEの全元素の分析値のデータではないが、数10~数100ppm存在するであろうYと数ppmのTb・Ho・Tmを除いたREEの総量で約2110ppmと1960ppmの高い値を示す。REEの分布パターンは、マンガン団塊と同様なものであり、Nodule-Sと同じくCeの正異常が見られる(第3図)。PCZはいわゆる「コバルトリッチクラスタ」としてマンガングラスタに含まれるCoが開発対象として期待される海域であり、この分析試料の中にもCoが1.1%含まれるものもある(Aplin, 1984)。日本周辺の海域のデータとしては、南鳥島近傍の排他的経済水域(EEZ)内の拓洋第5海山(第2図)の水深965~2987mにおけるマンガングラスタからは、REE(La-Lu)が1267~2168ppm(平均1660ppm)含まれていることが報告(得丸ほか, 2011)されており、高い濃度であることが注目される。

深海底のマンガン団塊と海山の頂部から斜面にかけて基盤上に形成されているマンガングラスタは、どちらもREEがかなりの高濃度で含まれており、含有量は、レアアース資源泥と同等かそれ以上のものもある。どちらもこれまで、REEでなく、Cu・Ni・Coが資源評価の対象で、調査や採掘・揚鉱・精錬などの技術開発が進められ、採掘に伴う環境影響評価についても検討されている。REE単独比較でレ

アース資源泥と競合する資源であるか、Cu・Ni・Coといったこれまで開発対象としてきた成分に加えREEも含めて開発対象とした場合に経済的価値がどのように評価されるかの検討が必要である。

REEの抽出は、レアアース資源泥の場合、細粒の堆積物から弱酸でREEが容易に取り出せるということであるが、マンガン団塊・マンガングラスタの場合もREEは基本的にはレアアース資源泥の形成と類似の過程で濃集しており、粉碎の必要はあるが、レアアース資源泥と同じような製品化のプロセスが想定される。

海底熱水鉱床におけるREEについてのデータも、熱水の起源やチムニーの成因のために分析値の報告がある。基本的に、チムニーなど熱水鉱床の金属硫化物のREE含有量は極めて小さい(Mills and Elderfield, 1995)。これは、形成される環境が還元的で急速な結晶の形成により成長することによると考えられる。熱水活動の産物で、鉄酸化物や鉄酸化物-バライトの集合体がマウンドを形成しているようなところでは、REEの含有量が高い可能性があるかもしれないが、検討できる分析例を見出していない。

5. 海底のREE資源開発における問題

資源開発においては、資源量の評価(存在形態等も含め)がなされ、それに適用できる採掘・揚鉱・精錬技術の確立

が次のステップである。海底鉱物資源の場合にはどの資源の開発においても深海という高圧・水中という特殊な環境下での採鉱となるための困難さはある。しかし、レアアース資源泥について考えれば、事前調査で海底下のどの深度までの泥を開発対象にするかさえ決定すれば、無選別で採掘すれば良く、未固結の深海底堆積物の採掘技術の開発は比較的容易であると考えられる。揚鉱は泥水のような状態でパイプ中を移動させるマンガング塊の揚鉱で検討されたエアリフトのシステムなどが改良されれば実現できるのかもしれない。

深海底（国連海洋法条約に規定されている The Area）の海底資源については、国際海底機構が国際的な機関として管理に関与し、開発のために定められたマイニングコードに従い鉱区の申請・許可を経て、開発への道筋が開ける。マンガング塊については日本は 1987 年に鉱区を申請・取得した。熱水鉱床は 2010 年マイニングコードの設定がなされ、マンガングクラストは間もなく設定される見込みである。もし、レアアース資源泥を同様のプロセスで国際的な枠組みに新たな海底鉱物資源として設定するものとする、長い議論が行われるのかもしれない。深海底での開発は、国際的な調整など多くの困難性を持っていることを覚悟しなければならない。

資源開発においては、開発に先立って採掘等に伴う環境影響評価（環境アセスメント）を行わなければならない。熱水噴出をする活動的な熱水活動域では、化学合成生態系の特異な生物群集が非常に密集して分布している。熱水環境という非常に偏在し局所的な環境に適応・依存した生物群集を海底熱水鉱床の開発とどのように調和させて維持させていくかが開発への大きな課題となっている。マンガング塊の分布域については、深海底という比較的一様性を持った環境であり、生物群集は局所的な特異性は少ないと考えられ、開発域の規模と配置、採掘法の検討によって生態系の大きな破壊をしない開発の可能性もあるのではないかと考えられる。しかし、現状では深海生物群集の構成やその生態系については未知な部分が多く、開発による環境影響の評価や影響予測は十分にできていない現状といえる。レアアース資源泥は、その分布域がマンガング塊と同じような場所であるため、マンガング塊の開発に向けて検討されてきた環境影響評価技術を利用し、採掘方法の違いを考慮しながらレアアース資源泥の開発時の環境影響評価が比較的容易に行われることが期待される。

先に述べたように、レアアース資源の開発の際に、REE を抽出した後の泥の残渣が採掘量の 99% 以上であること

と陸から長距離離れたところでの採掘のために、採掘現場の洋上で泥から溶出させて、残渣の泥は海洋投棄（例えば水深 500 ~ 1000 m の海中に放出）するといった議論もされているようである（文部科学省、2011）。

海洋への産業廃棄物等の投棄に関しては、1972 年に採択され、その後 1995 年に改定されたロンドン条約と呼ばれる「廃棄物その他の物の投棄による海洋汚染の防止に関する条約」に禁止や制限事項が規定されている（環境省、2003）。海域に廃棄可能な物質については、条約の付属書 I に定められている。それに従って現在海洋に投棄されているもので、レアアース資源泥の REE 抽出後の処理泥に近いものとしては、ボーキサイトからアルミナの生産を行う際にその残渣として残る「赤泥」がある。

ボーキサイトは熱帯気候のもとで形成された酸化鉄や酸化アルミからなる鉱石である。粉碎後、高温高压化で水酸化ナトリウムとの反応で生成したアルミン酸ソーダ溶液を経て、加水分解で生じた水酸化アルミニウムを焼成してアルミナを生産している。日本国内で生産される高品質のアルミナは携帯電話などの電子機器の基板を始め工業用材料として重要なものである。その過程で残渣として生み出される赤泥はかつては年間 100 万トンを超えていて、四国沖や八丈島沖に投棄されてきた。残渣の有効利用や陸上処分による縮減や投棄廃止の方向での検討が進められてきて、アルミナ生産工場の海外移転等により日本国内でのアルミナ生産は終了し、2015 年までには海洋投棄は行われなくなるようである（日本経済新聞、2008）。

赤泥の海洋投棄はロンドン条約に基づく国内法が制定されて、日本の管轄の海域（EEZ 内）において環境省の許可により行われている（環境省地球環境局環境保全対策課、2006）。REE 抽出後の泥質物は、海底にあった泥を薄い酸処理をしたものであり、もとの海底環境に戻され海水と接する環境において、金属成分等の有害物質を環境に付加する可能性は少ないと考えられる。それでも、これまで海洋投棄を極力減少するように進んできた趨勢の中で、付属書 I における「不活性な無機性の地質学的物質」にあたるものとして、海洋投棄できるものとして許可を出すかについては、多くの議論が必要であると予想される。国内法で許可されてきた赤泥と異なり、レアアース資源泥の処理残渣の投棄を公海（国連海洋法条約に規定されている High Seas）で行うとなれば、コンセンサスを得ることが困難なように思われる。海上での処理ができない場合には、大量の残渣の泥を消費できる有効利用の方法や陸上処分場の検討が必要である。

6. 現状の課題と海域のREE資源の開発へ向けて

先にも述べたように、現在公表された論文によるレアアース資源泥として高濃度の物が確認されている有望な海域は、東太平洋にある。しかし、現実の開発を進めるにあたり、開発許可の問題、洋上精錬で残土の海洋投棄の困難性などを考えると、日本近海のEEZ内での開発ができることが望ましい。日本近海におけるレアアース資源泥の賦存については、現状で十分な評価データはない。昨年発表された論文のREE濃度分布の太平洋全域の大まかな傾向の中で、日本近海の海底表層近くにレアアース資源泥が存在する可能性を類推できない。しかし、先の論文を公表した加藤氏の「太平洋プレートのジュラ紀～白亜紀の古い地殻の上の堆積物にレアアース資源泥の可能性が期待できる」と文部科学省の会合での発言もある（文部科学省、2011）。海域の資源の開発における大きな問題は水深にある。日本近海の古い海洋地殻の上の堆積物の開発ということになると東太平洋の海域に比べて深い5000 mを超える水深が技術的・コスト的な困難性を生じる可能性もある。

熱水活動に関連して放出された鉄酸化物がREEの濃集に大きな役割を果たしているということからすると、日本南方海域において漸新世～中新世に拡大した四国海盆やパレスバ海盆などフィリピン海プレート上の深海盆でのレアアース資源泥の探査を検討するべきである。その際には、堆積速度の遅い堆積物ということでマンガン団塊の分布する海域をまずはターゲットとして調査するのも効率的であろう。

我が国がREE資源確保のために海底からのREE開発を目指すなら、先にも述べた日本EEZ内の海山のマンガンクラスト、すでに鉱区を取得しているCCZのマンガン団塊の開発を検討することが重要である。そして、日本近海でのレアアース資源泥の開発可能性と経済性の観点から評価・比較検討しなければならない。マンガンクラストやマンガン団塊の開発はREEとともにレアメタルも共に得られるので、合わせた経済性の評価が必要である。

2007年の「海洋基本法」の制定以来、日本は「海洋に眠る資源」の大国として、「海洋基本計画」（2008年）や「海洋資源・エネルギー開発計画」（2009年）を策定し、海底鉱物資源の開発へ大きな前進を始めている。レアアース資源泥はこの開発計画のスキームには含まれていなかった新たな検討対象である。そのために、不足しているデータを整備し評価することも必要であるが、日本が目指す海底鉱物資源開発の展望・戦略の中で、REEの確保のための海

洋鉱物資源の開発をどのように位置づけ、その開発対象としてレアアース資源泥・マンガン団塊・マンガンクラストの評価を明確にして進めていくことが必要であると思われる。

7. おわりに

本報告は、昨年の夏に発表された論文とその後の報道に関連して、産総研顧問の石原舜三氏から感想を求められて、その回答を文字にして確認しておくために記述したものである。石原舜三氏には、本報告の契機を作っていただき、また、本文に目を通していただいた。地質情報研究部門の岸本清行氏には、図の作成にあたり助力いただくとともに、初期の原稿にご意見をいただいた。GSJ地質ニュース編集委員会の金井 豊氏には重要なコメントをいただき、本報告が大いに改善された。以上の方々に感謝する。

文 献

- 阿部英樹・有賀克彦・岡部 徹・柿本雅明・竹本真紹・宝野和博・細野秀雄・渡辺 寧（協力）（2011）産業の生命線レアメタルとレアアース なぜ必要？なぜ希少？. ニュートン, 31, no. 3, 16-53.
- Aplin, A. C. (1984) Rare earth element geochemistry of Central Pacific ferromanganese encrustations. *Earth and Planetary Science Letters*, 71, 13-22.
- De Carlo, E. H. and McMurtry, G. M. (1992) Rare-earth element geochemistry of ferromanganese crusts from the Hawaii Archipelago, central Pacific. *Chemical Geology*, 95, 235-250.
- Duliu, O. G., Alexe, V., Moutte, J. and Szobotca, S. A. (2009) Major and trace element distributions in manganese nodules and micronodules as well as abyssal clay from the Clarion-Clipperton abyssal plain. Northeast Pacific. *Geo-Marine Letters*, 29, 71-83.
- Glasby, G. P., Gwozdz, R., Kunzendorf, H., Friedrich, G. and Thussen, T. (1987) The distribution of rare earth and minor elements in manganese nodules and sediments from the equatorial and S. W. Pacific. *Lithos*, 20, 97-113.
- Hein J. R. (2011) Rare metals and rare-earth elements in deep-ocean mineral deposits. SPC/SOPAC-ISA International Workshop on Environmental Needs

- for Deep Seabed Minerals Nadi, Fiji, 29 November–2 December 2011, http://www.isa.org.jm/files/documents/EN/Workshops/2011/Presentations/3_JHein.pdf (2012/02/10 確認)
- 石原舜三・村上浩康 (2005) いまレアアースが面白い—イオン吸着型鉱床は将来の高度先端産業を支えられるか?. 地質ニュース, no. 609, 4–18.
- 環境省 (2003) 「今後の廃棄物の海洋投入処分等の在り方について」に係る中央環境審議会答申について (平成15年12月22日), <http://www.env.go.jp/press/press.php?serial=4597> (2012/02/10 確認)
- 環境省地球環境局環境保全対策課 (2006) 赤泥の海洋投入処分申請の進め方に係る指針, http://www.env.go.jp/water/kaiyo/ocean_disp/1hourei/pdf/t6_sekidei_sisin.pdf (2012/02/10 確認)
- Kato, Y., Fujinaga, K., Nakamura, K., Takaya, Y., Kitamura, K., Ohta, J., Tada, R., Nakashima, T. and Iwamori, H. (2011) Deep-sea mud in the Pacific Ocean as a potential resource for rare-earth elements. *Nature Geoscience*, **4**, 535–539.
- 国立大学法人東京大学 (2011) まったく新しいタイプのレアアースの大鉱床を太平洋で発見 (プレス発表資料), <http://www.u-tokyo.ac.jp/public/pdf/20110704.pdf> (2012/02/10 確認)
- Mills, R. A. and Elderfield, H. (1995) Rare earth element geochemistry of hydrothermal deposits from the active TAG Mound, 26° N Mid-Atlantic Ridge. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, **59**, 3511–3524.
- 文部科学省 (2011) 海洋鉱物委員会 (第14回) 議事録, http://www.mext.go.jp/b_menu/shingi/gijyutu/gijyutu5/012/gijiroku/1311949.htm (2012/02/10 確認)
- 日本経済新聞 (2008) ポーサイト国内精製会社が撤退—昭和電工など海外拠点新設も. 環境問題に配慮. (2008/03/07 朝刊)
- Nishimura, A. (1992) Sedimentation and hiatuses in the Central Pacific Basin: their relationship to manganese nodule formation. In Keating, B. H. and Bolton, B. R., eds., *Geology and offshore mineral resources of the central Pacific basin* (Circum-Pacific Council for Energy and Mineral Resources Earth Science, **14**), 179–203.
- Ohta, A., Ishii, S., Sakakibara, M., Mizuno, A. and Kawabe, I. (1999) Systematic correlation of the Ce anomaly with the Co/(Ni+Cu) ratio and Y fractionation from Ho in distinct types of Pacific deep-sea nodules. *Geochemical Journal*, **33**, 399–417.
- 太田充恒 (2011) 希土類元素の地球化学, <http://staff.aist.go.jp/a.ohta/japanese/study/REE.htm> (2012/02/10 確認)
- Pattan, J. N., Rao, Ch. M., Migdsov, A. A., Colley, S., Higgs, N. C. and Demidnko, L. (2008) Ferromanganese nodules and their associated sediments from the Central Indian Ocean Basin: rare earth element geochemistry. *Marine Georesources and Geotechnology*, **19**, no. 3, 155–165.
- Taylor, S. R. and McLennan, S. M. (1985) *The continental crust: its composition and evolution*. Blackwell, Oxford, U. K., 312p.
- 得丸絢加・浦辺徹郎・白井 朗・野崎達生・鈴木勝彦 NT09-02 乗船者一同 (2011) 拓洋第5 海山に分布するマンガクラストの地球化学的特徴およびレアメタル資源ポテンシャル評価. 日本地球惑星科学連合予稿集, SRD043-P01, <http://www2.jpgu.org/meeting/2011/yokou/SRD043-P01.pdf> (2012/02/10 確認)
- 白井 朗 (2010) 海底鉱物資源—未利用レアメタルの探査と開発—. オーム社, 東京, 198p.
- 渡辺 寧 (2008) 希土類: 資源調査および資源開発, レアメタル. 産総研TODAY, **8**, no. 5, 18–19.
-
- NISHIMURA Akira (2012) Is there a resource potential of rare earth elements in deep-ocean?.
-

(受付: 2012年2月13日)