

電磁石方式によるマンガノジュールの開発に関する基礎的研究

愛媛大学工学部 正会員 稲 田 善 紀

愛媛大学工学部 正会員 横 田 公 忠

1. 緒 言

現在、深海底のマンガノジュールの開発に際し、実用的な方法と目されている方式は、連続バケット方式（CLB方式）とサクシオン方式（流体ドレッジ方式）がある。しかし、いずれの方式も海底の泥土をかき乱して採取したり、あるいは泥土とともに揚鉱し、船上でスクリーンを通じて選別し、泥土のみ再び海中に捨てるので海中汚染の原因となる。すなわち、泥土が潮流や波浪の影響を受けながら数千メートルの海底に再び沈むには、長い時間を要し、海中に棲息する生物に及ぼす影響も少なくない。そこで集鉱の段階においてできるだけ泥土を乱さない方式が必要である。筆者らは、数年前からマンガノジュールが微量の鉄分を含むこと、磁選が可能であること、またマンガノジュールが海底の表面に存在していること等から考えて、集鉱に際し電磁石を利用する方式について基礎的な研究を行っている。本論文では電磁石の吸着に関する基礎的な資料を得るために、種々の模擬マンガノジュールを用いて空気中および水中で吸着実験を行い比較し考察した結果を述べ、次に実際のマンガノジュールを用いて吸着実験を行い、模擬マンガノジュールとの吸着機構の差異を考察した結果について述べる。

2. 実験に用いた試料および実験装置

実験に際しハワイ沖の水深約 5,000 m の海底から揚鉱されたマンガノジュールおよび模擬マンガノジュールを用いた。表－1 はこれまで発表された論文からマンガノジュールの主な成分の比較を行ったものである。

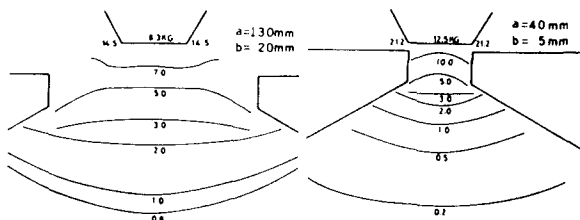
採取された海域によって各々の成分は異っているが、平均すると重量比で Mn 20.8%、Fe 11.7% が含まれていることになる。ただし、Fe が最大 39.7%、Mn が最小 7.6% 含まれていることを報告した例もある。一方 Mn と Fe の含有量がほぼ逆比例関係にあると考えるのが現在一般的であり、Mn と Ni または Cu とはさほど相関性がなく Ni と Cu の含有量はほぼよく似ている。¹⁾²⁾

以上のことから模擬マンガノジュールの各成分の混合割合を表－2 に示すようにとることにした。また各々について重量を変化させるため直径を 1, 2, 3 cm の 3 種の小球を 2 個ずつ作製した。

本実験に用いた電磁石装置は、住友重機械工業（株）製の LER 0205 型である。本体は水冷式になっており、鉄心部分は固定されているが、磁極部分は左右に任意の間隔に、上下は 5mm 間隔で調整が可能である。また起磁力は 48,000 AT である。図－1 (a), (b) は水平磁極間隔 a、および垂直磁極間隔 b を種々に変化させ、最大等磁束密度線図を求めたものの一例である。これらの図からわかるように、左右の磁極間隔 a を広げることによって垂直磁極ならびに中心線に沿う磁束密度は低下するが、磁束密度の範囲はより遠くまで及んでいることがうかがえる。以後、実験はすべて a = 130 mm、b = 20 mm の条件下で行った。

3. 模擬マンガノジュールを用いた実験結果と考察

図－2 (a), (b) は試料の重量が吸着最大距離に及ぼ



(a) a = 40 mm, b = 5 mm (b) a = 130 mm, b = 20 mm

図－1 最大等磁束密度線図の一例

表－1 マンガノジュールの成分比較

	Goldberg (1954)	Mero (1962)	Ahrens et al. (1967)	Fujinuki et al. (1977)	Moritani et al. (1979)	Shibata et al. (1981)	Ave.
Number of sample	11	54	11	68	118	17	
Mn(%)	19.0	24.2	22.3	23.5	17.8	18.1	20.8
Fe	13.8	14.0	13.4	7.5	11.1	10.1	11.7
Cu	0.55	0.5	0.33	0.95	0.47	0.49	0.55
Ni	0.46	0.99	0.62	0.97	0.59	0.87	0.75
Co	0.28	0.35	0.35	0.19	0.26	0.26	0.28
Pb(ppm)	—	900	1045	348	630	370	660
Zn(ppm)	—	470	627	1170	600	78	590
Mn/Fe	1.38	1.73	1.66	3.13	1.61	1.79	1.88

表－2 模擬マンガノジュールの組成

	Mn	Fe	Cu	Ni	Pb
A	23%	5%	0.5%	0.5%	600ppm
B	20	10	0.5	0.5	600
C	14	20	0.5	0.5	600
D	8	30	0.5	0.5	600
E	2	40	0.5	0.5	600

す影響を調べたものである。ただし吸着最大距離は、垂直磁極と試料間の吸着可能な限界距離をいう。以下Dmaxと称する。これらの図から試料の重量が大きいくほどDmaxの値が少しずつ低下していることがわかる。また重量が同じなら鉄の含有比率が多いほどDmaxの値が大きいくことがわかる。なお(b)の方がDmaxの値が全体に大きいのは、空気中も水中も透磁率はほとんど同じであるから、試料に働く浮力の影響によってみかけ上試料の重量が軽くなったためと思われる。図-3(a),(b)は垂直磁極からDmaxの距離だけ離れた場所での磁束密度と重量との関係を示している。これらの図から試料の重量が大きいくほどそれを吸着するのに必要な磁束密度の値が少しずつ上昇していることがわかる。また、同じ重量なら鉄の含有比率が高いほど吸着に必要な磁束密度の値が小さいくてすむことがわかる。重量という要因がDmaxに及ぼす影響のみを純粹に観察するために次のような実験を試みた。

すなわち、球の中心に大きさが同じで重量のみ異りしかも磁化されない物質(例えばガラス球、ゴム、発泡スチロール等)をおき、その周囲をパテと鉄粉とを混ぜ合わせて均質になるようにし、等厚に包み、同じ直径の球状に仕上げたものを実験に供した。

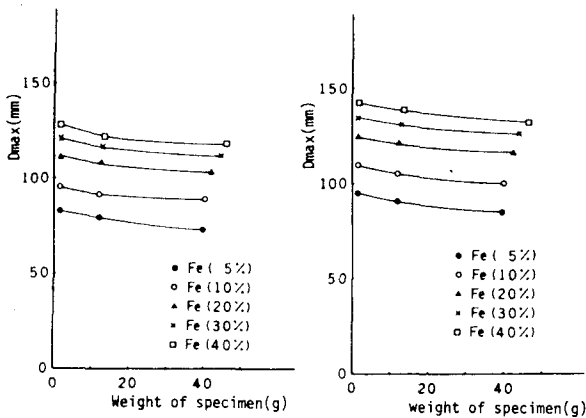
図-4(a),(b)はその結果をとりまとめたものである。ただし、図中No.1~No.6の核となっている物質はそれぞれ発泡スチロール(0.08g)、ゴム(2.25g)、石こう(2.84g)、ガラス(6.27g)、錫(16.39g)、鉛(25.57g)で、いずれも直径16.8mmのものである。これをパテと鉄粉とを均質に混ぜ合わせたもので包み、直径30mmに仕上がるようにした。

この図より、重量が増すにつれてDmaxの値はわずかつ低下していることがわかる。また鉄の量が増加するにつれてDmaxの値が上昇するのがわかる。

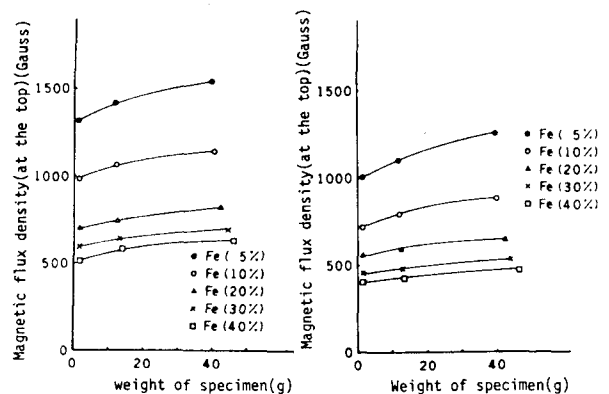
次に図-4(b)は垂直磁極よりDmaxだけ離れた位置での磁束密度と重量の関係である。重量が増すにつれて吸着により大きい磁束密度を必要とすることがわかり、また鉄の含有比率が増すにつれ吸着に必要な磁束密度は小さいくてすむことがわかる。

次に鉄の含有比率と吸着最大距離との関係を求めたものが図-5(a),(b)である。これらの図から同じ直径なら鉄の含有比率が高いほどDmaxの値が大きいくてゆくことがわかる。

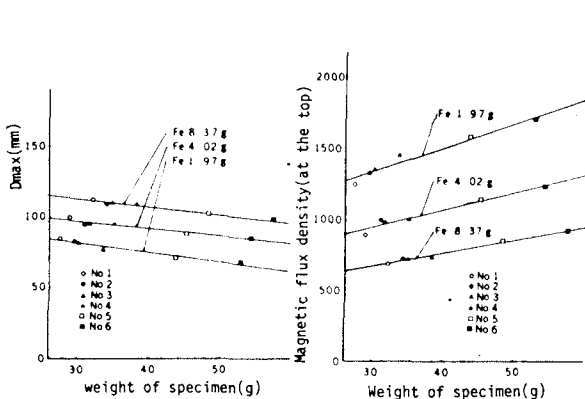
また図-6(a),(b)は垂直磁極よりDmaxだけ離れた位置での磁束密度と鉄の含有比率との関係を示している。これらの図から鉄の含有比率が増すにつれて吸着に必要な磁束密度が小さいくてよいのがわかる。



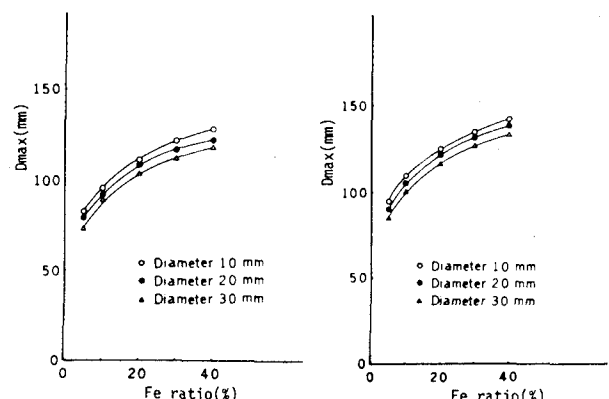
(a) 空气中 (b) 水中
図-2 試料の重量がDmaxに及ぼす影響



(a) 空气中 (b) 水中
図-3 試料の重量とDmaxの位置の磁束密度との関係



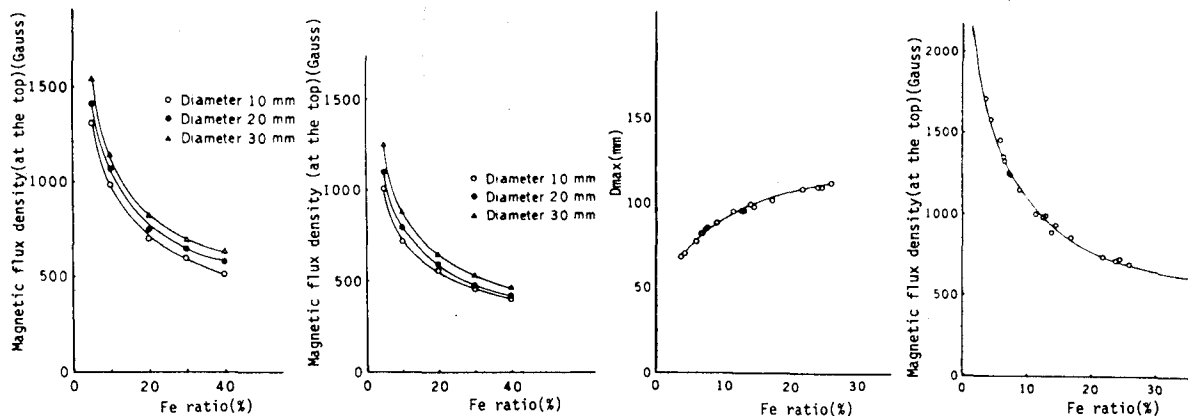
(a) 重量とDmaxとの関係 (b) 重量と磁束密度との関係
図-4 試料の重量, Dmax, および磁束密度の相互関係



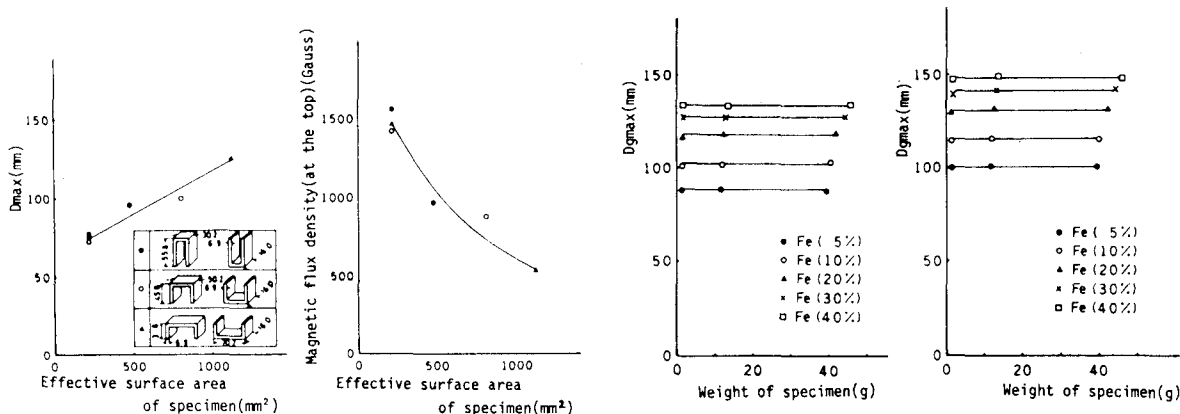
(a) 空气中 (b) 水中
図-5 鉄の含有量がDmaxに及ぼす影響

次に試料内の鉄の分布が D_{max} に及ぼす影響については別の実験により、鉄の含有量が同じであれば直径 33mm 程度の範囲ではどのように鉄が分布していても D_{max} にはほとんど影響を及ぼさないことがわかっている。³⁾そこで、鉄の含有比率のみに着目し、図-4の実験結果を D_{max} および磁束密度との関係にて示すと図-7(a),(b)となる。この図からも鉄の含有比率が増加するにつれて D_{max} も大きくなるのがわかり、また磁束密度は小さくなるのがわかる。

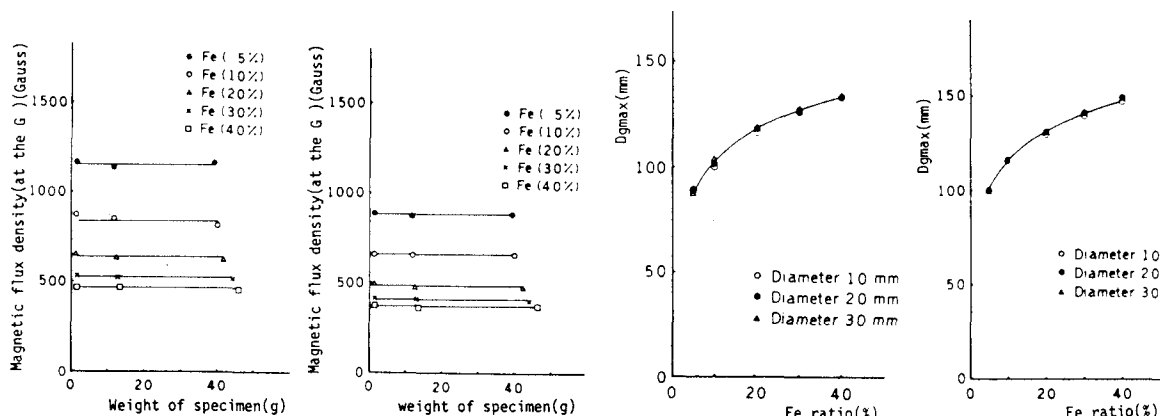
次に等磁束密度の磁場に含まれる表面積の大きさが吸着最大距離に及ぼす影響について調べるため、鉄の粉末とパテを均質に混ぜ合わせ座敷机のような形に成型し、上下を逆にすることによって等磁束密度線上に含まれる表面積を変化させて実験を行った。その結果を図-8(a)に示した。重量および表面積が同じであれば磁束密度の高い部分に含まれる表面積が大きいほど D_{max} の値が大きくなる。また、 D_{max} の位置での磁束密度と有効表面積の関係を図-8(b)に示した。有効表面積が大きいほど吸着に必要な磁束密度は小さくなる。以上述べてき



(a) 空气中 (b) 水中 (a)鉄の含有比率と D_{max} (b)鉄の含有比率と磁束密度
図-6 D_{max} での磁束密度と鉄の含有比率との関係 図-7 鉄の含有比率、 D_{max} および磁束密度の相互関係



(a) D_{max} と有効表面積 (b) 磁束密度と有効表面積 (a) 空气中 (b) 水中
図-8 有効表面積、 D_{max} および磁束密度との関係 図-9 試料の重量が D_{Gmax} に及ぼす影響



(a) 空气中 (b) 水中 (a) 空气中 (b) 水中
図-10 重量と重心位置での磁束密度との関係 図-11 鉄の含有量が D_{Gmax} に及ぼす影響

たように、吸着には種々の要因が混在しておりこのままでは相関関係を評価することが困難であるのでDmaxのかわりにDGmaxという値を用いてみる。すなわち、Dmaxが垂直磁極と試料頂部間の吸着最大距離であったのに対してDGmaxはその時の試料の重心の位置と垂直磁極間の距離とする。

DGmaxと重量の関係を図-9 (a),(b)に示した。これらの図から、DGmaxは重量に関して何ら影響を受けないことがわかる。また、DGmaxの位置での磁束密度と重量の関係を図-10 (a),(b)に示した。DGmaxの値がほぼ同じであることから吸着に必要な磁束密度は重量に関係しないことがわかる。

次にDGmaxと鉄の含有比率の関係を示したものが図-11 (a),(b)である。ここでも鉄の含有比率が増加するにつれてDGmaxの値が増加しているが試料の直径には影響されないことがわかる。DGmaxの位置における磁束密度と鉄の含有比率の関係を示したものが図-12 (a),(b)である。鉄の含有比率が増加するにつれて吸着に必要な磁束密度の値は減少している。

次に鉄の含有比率のみに着目し、図-4の実験結果をDGmaxおよび磁束密度との関係にて示すと図-13 (a),(b)となる。ここで図-11(a)と図-13(a)、また、図-12(a)と図-13(b)とを比較してみると、どちらも非常に高い相関性を示している。鉄の含有比率をR〔%〕、DGmaxの位置での磁束密度をB〔Gauss〕とし、前述の2つの実験結果に最小二乗法にてこれらの関係を求めると次式のようなになる。

$$R(B-414)=3648 \tag{1}$$

(1)式は鉄の含有比率がある程度わかっている場合に吸着が可能な最大距離における磁束密度を求めるための式である。ここで重心での位置を基準にとれば重量や表面積の影響を受けず、なぜ鉄の含有比率のみが吸着に高い相関性を示すのかについて考察してみる。

ある磁場が与えられた場合、模擬マンガノジュール中に含まれる鉄の粒子1個あたりは、飽和に至るまではその磁束密度にみあう磁化を受け吸着力を持つはずである。この吸着力が鉄の粒子1個自身の重さに加えて粒子1個が受け持たねばならない試料の重さ(単位重量)を上回るとき吸着するものと考えられる。すなわち、同じ磁束密度が与えられた場合、単位重量当りの吸着力が等しくなるので、試料の直径にかかわらず鉄の含有比率が同じであれば同じ距離で吸着するものと思われる。その際、試料が球形であるので重心を中心にして上部と下部は対称であり、上部へ

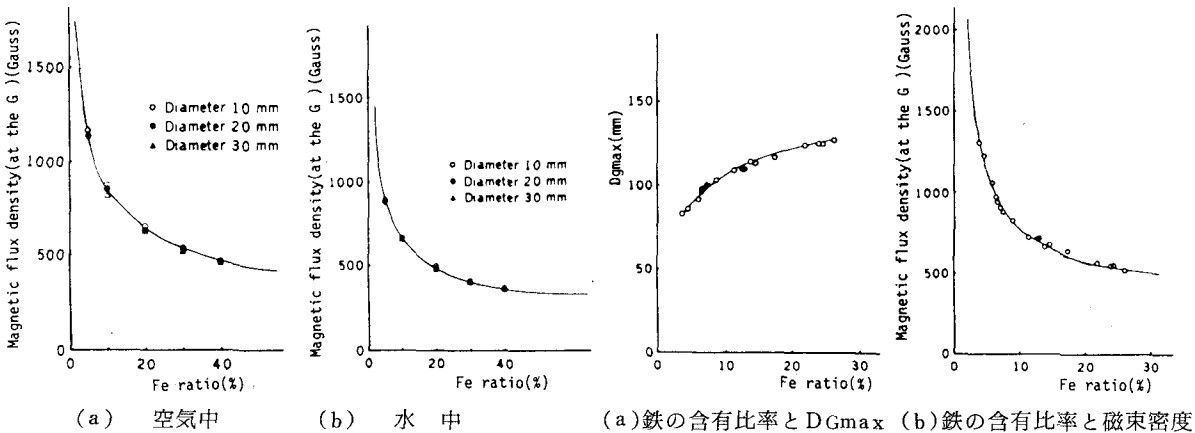


図-12 DGmaxでの磁束密度と鉄の含有比率との関係 図-13 鉄の含有比率, DGmaxおよび磁束密度の相互関係

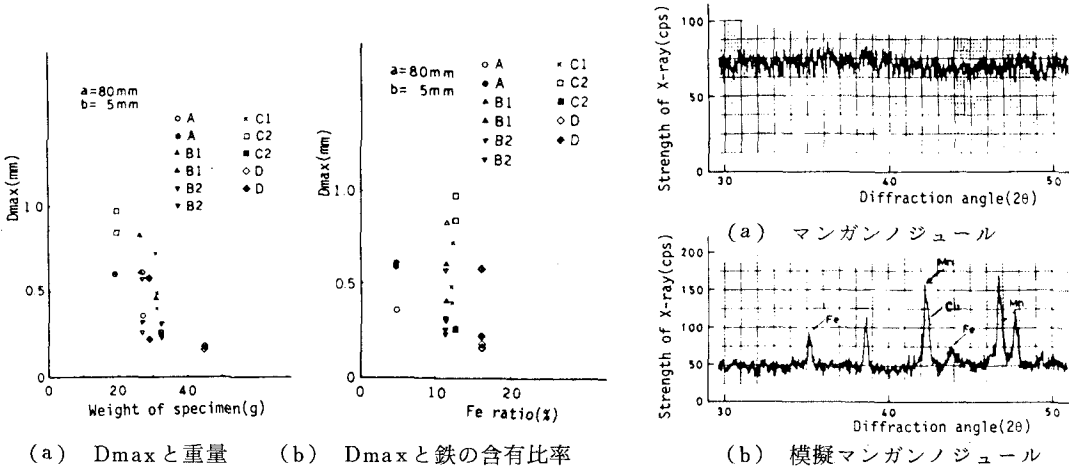


図-14 鉄の含有比率, 重量およびDmaxの相互関係 図-15 X線回折による分析結果

向う磁束密度の増加の割合と、下部に向う磁束密度の減少の割合が互に相殺するので結局重心における位置を基準にとることの妥当性があるものと思われる。以上のことから、ほぼ球形のマングノジュールを吸着する際に、鉄が均質に分布している場合には重心の位置で評価すれば、表面積や重量の影響を受けず、鉄の含有比率のみを考慮すればよいことになる。

4. マングノジュールを用いた実験結果および考察

前述と同様の実験をマングノジュールを用いて水中にて行った。ここでは大きな磁束密度を得るため、磁極間隔を $a=80\text{mm}$, $b=5\text{mm}$ として実験を行っている。

試料の形状が複雑であり重心の位置が決定し難いのでとりあえず頂部と垂直磁極間距離すなわち、 D_{max} にて評価することとする。 D_{max} と重量および鉄の含有比率の関係を求めたものが図-14 (a), (b) である。

これらの図からは、重量の増加に伴う D_{max} の減少や鉄の含有比率の増加に伴う D_{max} の増加の傾向がうかがえない。同一試料の方向を変化させても D_{max} の値はまちまちになっていることがわかる。これには次のような理由が考えられる。まず形状が複雑であるので等磁束密度の磁場に含まれる表面積の割合がそれぞれ異なることになる。従って同一の試料においても比較的平らな部分が上部に位置すれば等磁束密度の磁場に含まれる表面積も大きく、その結果 D_{max} の値も大きくなる。逆に角ばった部分が上部に位置すると等磁束密度の磁場に含まれる表面積は小さくなり、 D_{max} も小さくなる。

また、サンプルは同一の地域で採取されたものであっても多少成分が異っている可能性もある。従って分析サンプルと同一のグループであっても必ずしも鉄の含有比率は一致するとは限らない。さらに試料内の鉄の分布が必ずしも一様であるとは言い難く、鉄分を多く含む部分が上部に位置すれば D_{max} は大きいことになる。

次に図-14 (a), (b) から D_{max} の値がこれまで求めてきた模擬マングノジュールに比して著しく小さい。この理由について考察してみる。

まず、マングノジュールおよび模擬マングノジュールをX線回折装置を用いて解析し比較した結果の一部を図-15 (a), (b) に示した。これらの図からわかるように、マングノジュールのような結果は、一般に熔融状態にある金属か又は結晶という形ではなく非晶質の状態にみられるものである。従ってマングノジュール中の鉄分は粒子

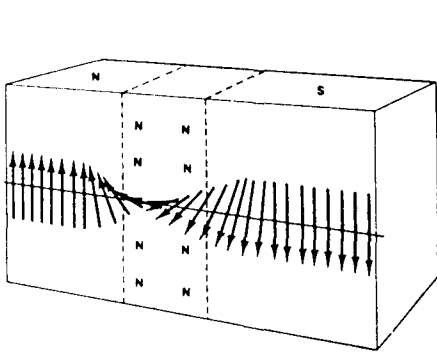
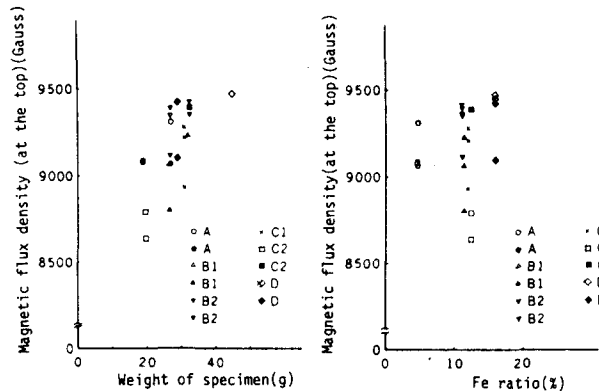
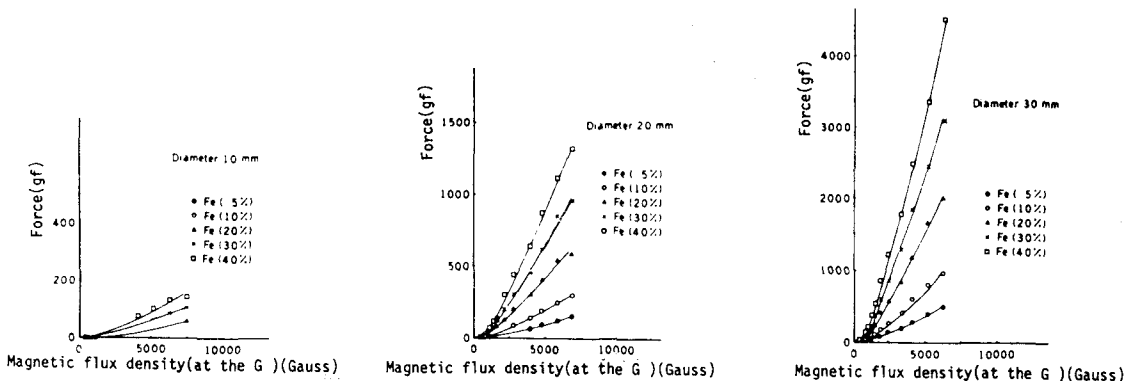


図-16 磁壁の模式図



(a) 磁束密度と重量 (b) 鉄の含有比率と磁束密度

図-17 鉄の含有比率、重量および磁束密度の相互関係



(a) 直径10mm (b) 直径20mm (c) 直径30mm

図-18 模擬マングノジュールの重心の位置における磁束密度と吸着力との関係

としての形態をとっていないことになる。すなわち、一般に磁化においてはそれぞれの磁区内の磁壁の移動が大きな役割を演じている。^{4) 5)} 磁壁の移動を概念的に示したものが図-16である。この移動によりスピンのすべてが磁場の方向に向けば強い吸着力を持つことになる。一方磁壁以下の小さな磁区では磁壁が存在せずこれを単磁区と称している。この場合には磁化されにくいことが知られている。

ちなみに鉄の磁壁幅は $6.5 \times 10^{-5} \text{ mm} (0.065 \mu)$ ⁴⁾ である。本実験に用いた模擬マンガノジュール中の鉄は前述のとおり 100# (0.147 mm) であるので磁壁は十分に存在している。

一方、マンガノジュール中の鉄は前述のとおり非常に小さく磁壁は存在しないと考えられる。いわゆる単磁区の状態であり、容易には磁化されない結果吸着しにくく、Dmax の値も著しく小さくなったものと考えられる。

5. 本方式の現場への適応に関する一考察

図-17 (a), (b) はマンガノジュールが吸着した際の Dmax の位置における磁束密度と試料の重量および鉄の含有比率の関係を示したものである。相関性はみられないが、磁束密度が 8,500~9,500 (G) 程度で吸着が可能であることがわかる。これは試料頂部での値であるから、重心部にこれだけの値が与えられれば十分に吸着すると考えられる。

次に図-18 (a), (b), (c) は参考までに模擬マンガノジュールの重心の位置における磁束密度と吸着力との関係を示したものである。ただし今回は吸着力をバネ秤で測定した。

鉄の量が多いほど吸着力が強いことがわかり、このことは前章で述べた考察結果と一致する。また、磁束密度のわずかな増加に伴い吸着力が飛躍的に増加していることがうかがえる。

以上のことから、実際にマンガノジュールを吸着する際には、もし磁極から重心までの距離が同じであれば、海底の泥土のせん断力に打ち勝って吸着しやすいのは磁極に向っての表面積が大きいマンガノジュールであり、磁束密度のわずかの増加により吸着力が飛躍的に増加することから 10,000 (G) 程度の磁束密度が得られれば容易にマンガノジュールを採取することができるものと思われる。

6. 結 言

本論文では種々の模擬マンガノジュールおよびマンガノジュールを用いて電磁石による吸着特性を実験によって求め、吸着機構の差異を考察した結果について述べた。得られた結果を要約すると次のとおりである。

- (1) 垂直磁極から試料頂部までの最大吸着距離 (Dmax) で評価すれば試料の重量が大きいほど Dmax は小さくなり鉄の含有比率が多いほど Dmax は大きくなる。一方、試料の重心までの最大吸着距離 (DGmax) で評価すれば、試料中の鉄の含有比率が同じでかつ均質に分布している球状のものでは DGmax は試料の重量や大きさ (表面積) には影響を受けない。
- (2) 鉄の含有比率が増加するにつれ吸着に必要な磁束密度の値は減少する。
- (3) 水中では空気中と同じ透磁率と考えてよく、同じ磁束密度分布を成す。また浮力が働くので単位鉄重量当たりの吸着力の負担が少なくなる。従って吸着に必要な磁束密度の値は少なくてすむ。
- (4) マンガンジュールの最大吸着距離と模擬マンガノジュールのそれとを比較した場合、前者はその値が著しく小さい。この理由としてマンガノジュールは X 線回折による解析の結果、非晶質のような形で鉄分が結合しており、いわゆる単磁区を形成し、磁化されにくいことが原因であると考えられる。
- (5) 磁束密度のわずかの増加により吸着力が飛躍的に増加する。従って 10,000 (G) 程度の磁束密度が得られれば容易にマンガノジュールの採取が可能であると思われる。

参 考 文 献

- 1) Tadashi Fujinuki, Tunekazu Mochizuki and Tomoyuki Moritani; Chemical Composition of Manganese Nodules, Cruise Report No 8, Geological Survey of Japan, PP. 162~176, 1977.
- 2) Tomoyuki Moritani, Tsunekazu Mochizuki, Shigeru Terashima and Shuji Maruyama, Cruise Report, No12, PP. 206~217, 1979.
- 3) 稲田善紀; 電磁石方式によるマンガノジュールの開発に関する基礎的研究 (I), 愛媛大学工学部紀要, 10, 2, PP. 395~403, 1983.
- 4) 近角聰信; 磁性物理の進歩, PP. 10~16, アグネ, 1964.
- 5) J. Crangle 著, 白鳥紀一, 溝口正共訳; 固体の磁気的性質, PP. 129~133, 丸善, 1979.