

GSJ 地質ニュース

GSJ CHISHITSU NEWS

— 地球をよく知り、地球と共生する —

2016

3

Vol.5 No.3



特集：超伝導重力計のフィールドでの活用

3月号

特集 超伝導重力計のフィールドでの活用

口絵 67-68

第4世代超伝導重力計が日本に初登場, 苫小牧で計測開始
池田 博・杉原光彦・名和一成・西 祐司

口絵 69-70

世界でいちばん海に近い超伝導重力計で海面変動をみる
名和一成・杉原光彦・池田 博

口絵 71

フェリーからの風景, 苫小牧と本州最東端の鮭ヶ崎
杉原光彦・山口 靖

72-75

高感度重力モニタリングのための超伝導重力計の導入
杉原光彦・西 祐司・名和一成・宮川歩夢・
石戸恒雄・相馬宣和

76-79

重力モニタリングの要諦 杉原光彦

80-83

絶対重力計測の現場から—屋外計測・輸送編— 杉原光彦

84-94

堆積物の磁化を測ってわかる(知りたい)こと
—旧石油公団が「南極地域石油天然ガス基礎地質調査」
(FY1980-1999)で取得した海底堆積物コアの再測定から—
森尻理恵・中井睦美・上野直子・荻島智子

95 新刊紹介「地球惑星科学入門 第2版」

96 GSJ 交差点

Cover Page



Rausu Volcano and Keramui Peninsula in Kunashiri Island
seen from Notsuke Peninsula, eastern Hokkaido.
(Photograph and caption by
Futoshi NANAYAMA and Kazuaki WATANABE)

野付半島から見た国後島の羅白山とケラムイ崎

国後島は根室海峡に面し、野付半島から僅か17 kmの距離しかなく、幕末以来、日本固有の領土とされてきた。しかし第二次世界大戦後は、ソビエト連邦およびロシアの実行支配下であり、未だ返還の目途は立っていない。この島には複数の活火山が存在しており、特に羅白山(標高888 m; 写真中央背後)は島の中央部に位置し、明治時代に2度にわたり噴火したことが知られている。一方、島の南西端にあるケラムイ崎(写真中央右)は野付半島同様に明瞭な複合砂嘴の形状を示す。この間の海峡は水深10~30 m以浅と浅く、マンモスの臼歯化石が泥炭の塊と共にしばしば漁師の網によって引き上げられており、最終氷期には湿原であったと考えられている。

(写真・文: 七山 太¹・渡辺和明²)

¹産総研 地質調査総合センター 地質情報研究部門, ²同 地質情報基盤センター)

第4世代超伝導重力計が日本に初登場， 苫小牧で計測開始

池田 博¹⁾・杉原光彦²⁾・名和一成³⁾・西 祐司²⁾

産総研が2014年からテキサス州ファンズワースで使用していた小型超伝導重力計 iGrav17 (iGrav はモデル名，17 はシリアル番号) は2015年2月に筑波大学研究基盤総合センター低温部門に搬入された (第1図)．4KタイプGM冷凍機を装備して液体ヘリウム再凝縮型となった第三世代超伝導重力計に対して，計測系と超伝導センサーが一体化されて，さらにコンパクト化された第四世代超伝導重力計の日本初登場だった．調整作業 (池田ほか，2015) のあと，2015年3月に北海道苫小牧 CCS テストサイトに設置された (第2図～第4図)．屋外観測点で簡易収納

庫 (エンクロージャ) 内に設置する方式はテキサスでの直近2か月の場合と同じである．苫小牧観測点は海岸から約50mという厳しい条件であるが，必要な対策を講じつつ連続観測を継続している (第5図～第9図)．

文献：

池田 博・森 稜太・杉原光彦・名和一成・西 祐司 (2015) 野外観測対応超伝導重力計の設置．2015年度春季低温工学・超伝導学会．



第1図 筑波大学研究基盤総合センター低温部門にあった第一世代超伝導重力計 TT-70 の200リットルのヘリウム容器 (左手前) の横に置かれた第四世代超伝導重力計 iGrav17 本体．iGrav 本体は16リットルのヘリウム容器の上に計測系が載っている．両者ともセンサー部分はヘリウム容器内にある．超伝導コイルの作る極めて安定な磁場で浮上した1インチのニオブ球の位置変化を検出することで重力の変化を測定する装置である．装置のセンサー部は液体ヘリウム温度 (4K) で使用しているため熱的ノイズの影響が無いことで，他の重力計に比べて3桁以上高い1 nGal (10^{-11}m/sec^2) の高感度の測定が可能である．



第2図

苫小牧の設置地点は海岸から約50m．(地理院地図 <http://maps.gsi.go.jp> に加筆)



第3図 屋外観測点で簡易収納庫 (エンクロージャ) 内に設置する方式をとった．



第4図

設置完了状態．海岸での強風の影響を緩和するために防風柵に囲われている．

1) 筑波大学 研究基盤総合センター低温部門 2) 産総研 地質調査総合センター地圏資源環境研究部門 3) 産総研 地質調査総合センター地質情報研究部門



第5図 (左) 4K 冷凍機はエンクロージャの外壁で支えている。iGrav 本体と冷凍機の間には隔膜 (ダイヤフラム) が組み込まれ、冷凍機の振動が超伝導重力センサーに伝わらないように抑制している。(右) 冷凍機を取り出す。



第6図 iGrav 制御系トラブルにより過冷却になり負圧のためにダイヤフラムが見えない状態 (左)。正常時は容器内の内圧によりダイヤフラムが膨らんで見える (右)。



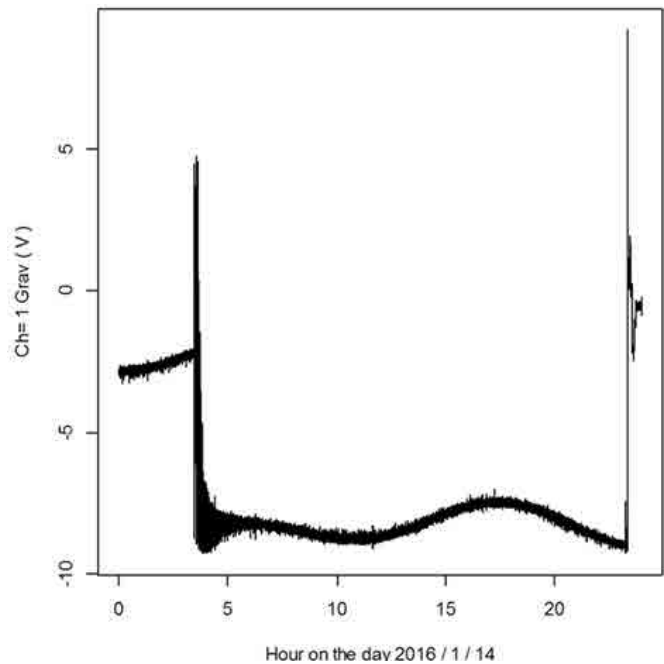
第7図 容器内底部に白い固体空気が存在する (左) とノイズレベルが大きくなる。4K 冷凍機を取り出して容器内をヘリウムガスでクリーニングした。クリーニング後に、固体空気が消えて、底部がクリアになった (右)。



第8図 塩害腐食を受けた空調機。塩害腐食に強い素材の空調機と交換し、さらに外箱で覆った。

第9図 (→)

2016年1月14日北海道浦河沖でMn=6.7の地震があり観測地点では震度4であったと推測される。そのため超伝導重力計の重力値に-2Vから-8Vにステップが生じた。その後、図の右側に示すようにガード調整により0V付近に復旧した。震度の大きい地震時の対応が日本では必要になる。



IKEDA Hiroshi, SUGIHARA Mituhiko, NAWA Kazunari and NISHI Yuji (2016) A 4th generation of superconducting gravimeter, launched in Japan.

世界でいちばん海に近い超伝導重力計で 海面変動をみる

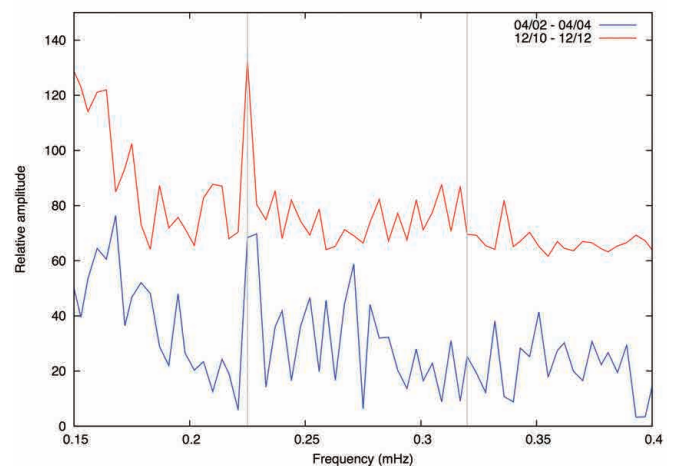
名和一成¹⁾・杉原光彦²⁾・池田 博³⁾

超伝導重力計を海岸近くに設置した時、海面変動を起源とする振動が検出できることがある。例えば、筆者の一人(名和)は、南極・昭和基地に設置された超伝導重力計のデータ解析から昭和基地があるオングル島周辺のリュツォ・ホルム湾のセイシュ(副振動)起源の地面振動を見出した(Nawa *et al.*, 2003)。その振動は海水の引力や荷重による地面の変形によるものと解釈される(Nawa *et al.*, 2007)。私たちは2015年3月に北海道の苫小牧で観測を開始した超伝導重力計(池田ほか, 2016; 杉原ほか, 2016: 本特集号)のデータを解析し、海面変動起源の信号の抽出を試みた。その結果、低気圧通過時には周期74分の海面変動に対応した信号を検出することができた。潮位変化とそれに伴う重力応答の観測は、地下モニタリングにおけるノイズの低減とともに、観測点周辺の地下構造/物性を知る基礎データを得る観点からも重要である。

Loading and Gravitational Effects of the 2004 Indian Ocean Tsunami at Syowa Station, Antarctica. *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 97 (1A), S271-S278.

杉原光彦・西 祐司・名和一成・宮川歩夢・石戸恒雄・相馬宣和(2016) 高感度重力モニタリングのための超伝導重力計の導入. *GSJ地質ニュース*, 5, 72-75.

和田耕造・梅沢信敏・小谷野喜二・桑原伸司(1988) 苫小牧海域における長周期波特性について. 第35回海岸工学講演会論文集, 247-251.



第1図 苫小牧の超伝導重力計データのスペクトル。2015年4月と12月に取得したサンプリング間隔1秒で3日長の重力計データから計算した。凡例の日付は計算に用いたデータの期間を示す。灰色の縦線は、苫小牧西港周辺の潮位観測で古くから知られている陸棚起源のセイシュ(例えば、和田ほか, 1988)に対応する周波数(左側: 周波数0.225 mHz, 周期74分)と苫小牧西港起源のセイシュの基本周波数(右側, 周波数0.32 mHz, 周期52分)を示している。

文献:

池田 博・杉原光彦・名和一成・西 祐司(2016) 第4世代超伝導重力計が日本に初登場、苫小牧で計測開始. *GSJ地質ニュース*, 5, 67-68.

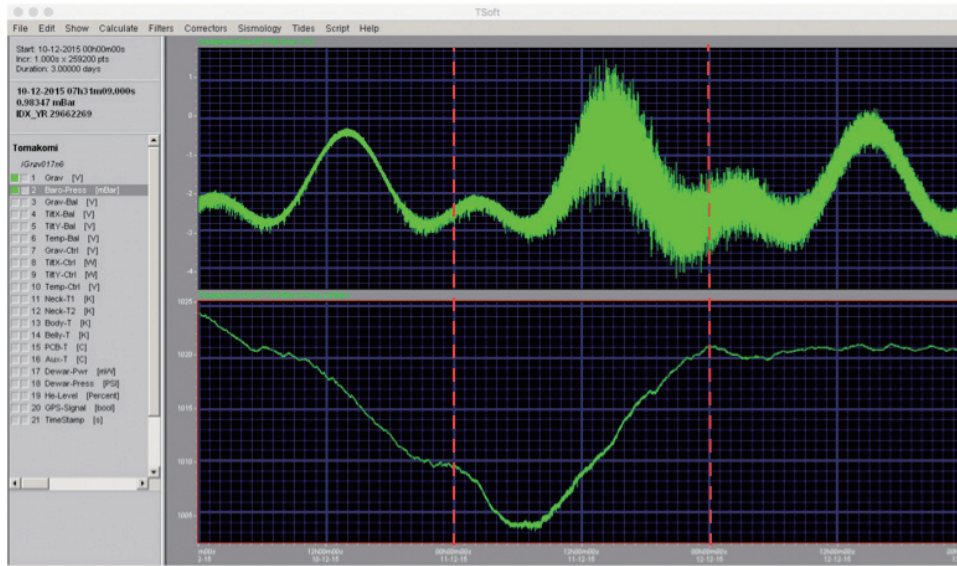
Nawa, K., Suda, N., Aoki, S., Shibuya, K., Sato, T. and Fukao, Y. (2003) Sea level variation in seismic normal mode band observed with on-ice GPS and on-land SG at Syowa Station, Antarctica. *Geophys. Res. Lett.*, 30 (7), 1402, doi:10.1029/2003GL016919.

Nawa, K., Suda, N., Satake, K., Fujii, Y., Sato, T., Doi, K., Kanao, M. and Shibuya, K. (2007)

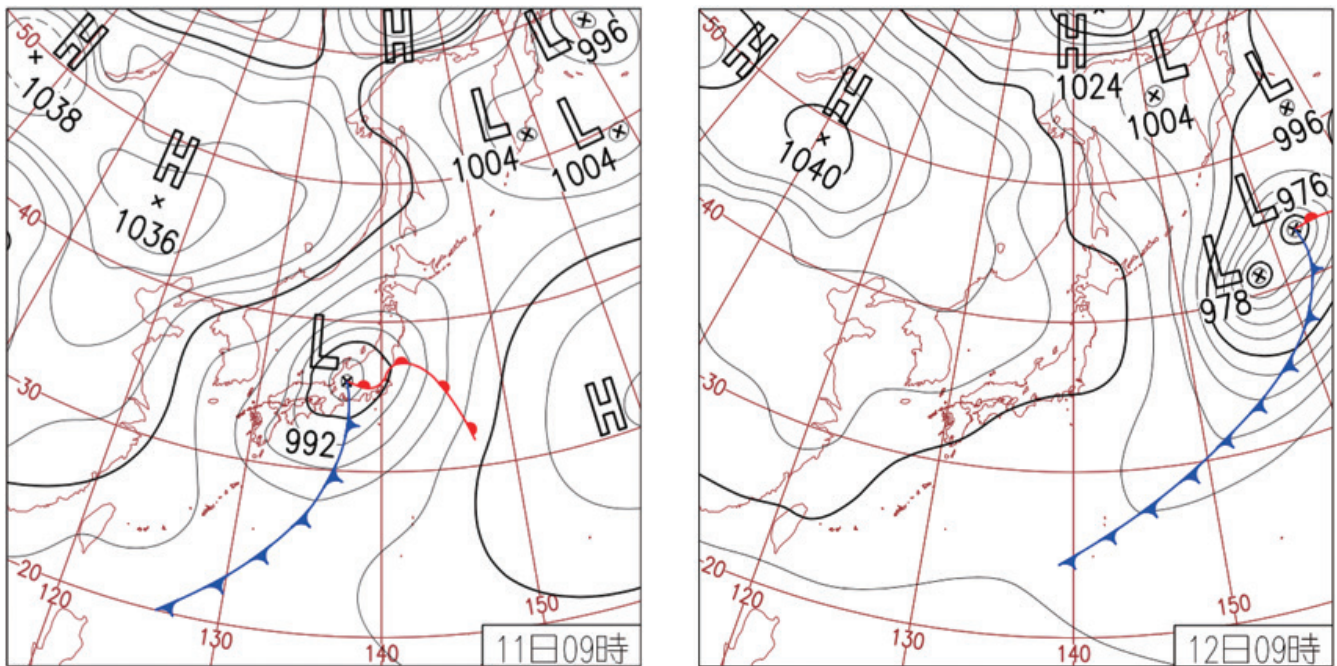


写真 苫小牧の超伝導重力計観測点周辺の状況(2015年11月9日, 日本時間12時頃撮影)。写真の左が南(太平洋)方向, 右が石油コンテナと苫小牧西港がある北方向を示す。挿入図は重力観測点から撮影したパノラマ写真を地面を中心に表示したもの(左)と空を中心に表示したもの(右)。

1) 産総研 地質調査総合センター地質情報研究部門 2) 産総研 地質調査総合センター地圏資源環境研究部門 3) 筑波大学 研究基盤総合センター低温部門



第2図 重力計収録システムの標準フォーマットデータが扱える解析ソフトウェア Tsoft の表示画面のスナップショット。2015年12月10日0時から12月13日0時（それぞれ世界時）まで3日間の苫小牧の超伝導重力計で得た重力変化（上段）と気圧変化（下段）の記録を表示。第3図に示した地上天気図の時刻を示す赤線を加筆。



第3図 2015年12月11日9時と12月12日9時（それぞれ日本時間で、世界時の同日0時に対応）の「日々の天気図」（気象庁ホームページより）。気圧（第2図下段）が下がっている期間中、北海道の観測点の太平洋側を低気圧が通過したことがわかる。セイシュは気象擾乱などによって顕著に励起されることが知られており、第1図にスペクトルを示した4月3日前後も北海道周辺の低気圧の通過時期に対応している。

NAWA Kazunari, SUGIHARA Mituhiko and IKEDA Hiroshi (2016) Sea level variation observed with an iGrav SG at Tomakomai, Hokkaido, Japan.

フェリーからの風景, 苦小牧と本州最東端の鯨ヶ崎

杉原光彦¹⁾・山口 靖²⁾

苦小牧市は北海道を代表する港湾都市です。本州各地との間にフェリーが運航しています。大洗を夕方に出る便は翌日昼過ぎに苦小牧に入港します。左側には樽前火山を背景にした苦小牧市街が見えます。右側には石油化学コンビナートがあり、その一角にCO₂地中貯留圧入井のリグも見えました。重力モニタリング観測点は、圧入井の外海側にあります。

苦小牧を深夜に出発すると夜明けには三陸海岸沖を航行しています。宮古沖を過ぎると本州最東端の地、鯨ヶ崎が見えてきます。この付近を境に、三陸海岸の北部は海岸段丘が発達しています。20万分の1地質図「盛岡」によれば、鯨ヶ崎は原地山層です。原地山層は、前期白亜紀の火山活動を示す地層です。層序は、溶岩、凝灰岩を主体として、ところどころに砂岩や泥岩を挟み、下部から上部に

向かって次第にフェルシックになるようです（山口ほか、1979）。この前期白亜紀の火成活動を示す地層は、北は北海道の樺戸山地から苦小牧沖・三陸沿岸を経て、福島の新通まで南北に細長く分布していて、一部は空中磁気図にも明瞭な磁気異常として現れています（大澤ほか、2002）。

文献：

大澤正博・中西 敏・棚橋 学・小田 浩（2002）三陸～日高沖前弧堆積盆の地質構造・構造発達史とガス鉱床ポテンシャル。石油技術協会誌, 67, 38-51.

山口 靖・津島春秋・北村 信（1979）北上山地“田老帯”および“岩泉帯”南部の地質構造発達史。東北大理地質古生物研報, no. 80, 99-117.

吉田 尚・大沢 穠・片田正人（1984）20万分の1地質図「盛岡」。地質調査所。



第1図 苦小牧港から本州各地への航路。（地理院地図 <http://maps.gsi.go.jp> に加筆）



第2図 苦小牧西港の西側の風景。樽前火山を背景にして苦小牧港が広がる。



第3図 苦小牧西港の東側の風景。石油コンビナートの一角にCO₂地中貯留圧入井がある。2015年6月までは掘削リグがあった。圧入井と外海の間重力観測点がある。



第4図 本州最東端の鯨ヶ崎の眺め。（上図）宮古沖をすぎて本州最東端の鯨ヶ崎が見えてきた。（中図）海岸段丘に建てられた鯨ヶ崎灯台。（下図）鯨ヶ崎沖を過ぎて重茂半島全体が見える。

SUGIHARA Mituhiko and YAMAGUCHI Yasushi (2016) View of ferry boat, Tomakomai and Todogasaki, the easternmost tip of the main island of Japan.

1) 産総研 地質調査総合センター地圏資源環境研究部門 2) 名古屋大学環境学研究所

高感度重力モニタリングのための 超伝導重力計の導入

杉原光彦¹⁾・西 祐司¹⁾・名和一成²⁾・宮川歩夢²⁾・石戸恒雄¹⁾・相馬宣和³⁾

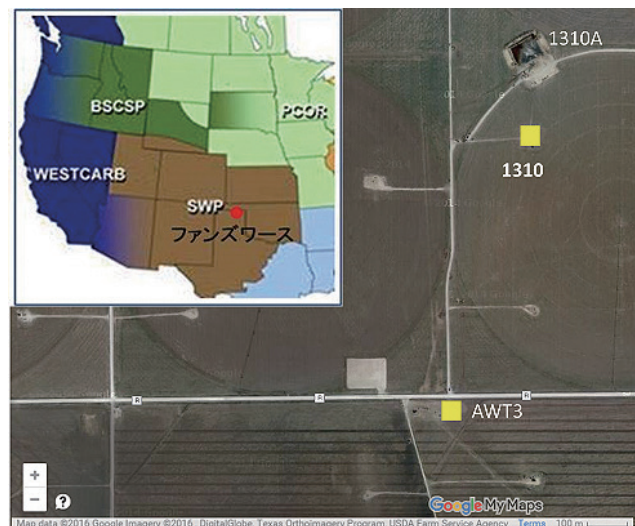
1. 緒言

超伝導重力計による CCS（二酸化炭素の回収と貯留）モニタリング技術開発は極めて研究要素が高く、国際的な成果発信が期待される。一方、本モニタリング技術は CCS だけでなく地震や火山等、さまざまな研究分野での活用が期待できるため、地質分野全体における本装置の活用方法ならびに研究計画を検討していく必要がある。以上の理由により、高感度重力モニタリングのための超伝導重力計の導入が認められ、2014年5月に納入された。導入にあたっては、(1) 本装置を活用した CCS からの研究展開についてロードマップを設定すること、(2) アウトプットについて定量的目標を設定すること、(3) 導入後は CCS に限定せず広い範囲での活用を目指すことという課題が示された。まずは CCS の現場に導入して成果を得た後で、広い範囲への活用を目指すこととした。導入から2年目を経過しようとしている今、これまでの経過について報告する。

2. 米国への搬入と計測開始

超伝導重力計 iGrav は 2014 年 5 月 30 日に米国テキサス州ファンズワース CCS テスト・サイト（第 1 図）に納品された。すでに現地では 2012 年 12 月から別の iGrav による重力連続測定を実施していた（相馬ほか，2014；Sugihara *et al.*, 2014）。すでに連続観測中だった iGrav15 に隣接する基台に、納入された超伝導重力計を設置して並行測定を開始した。超伝導重力計は他の重力計に比べて桁違いの性能を有するために、その性能は超伝導重力計同士による比較測定でしか評価できないという側面がある。並行測定の記録によって、性能上の問題点が見出されたため 2014 年 7 月に機器を入れ替えることになった。その後も並行計測を継続し（第 2 図）、ドリフト特性を評価する一方で 2 台に共通するトレンドに加えて微小な日周変化成

分も見出された（名和ほか，2014）。重力計測室は 2 台の超伝導重力計が稼働しても十分な環境性能を持つはずであったが、夏季の調査地は直射日光が強く、観測室の南側は空調効果が十分には効かないことがあると判断されたのでサーキュレータを設置して改善を試みた。この発見を契機に、機器上部の制御装置部分も温度コントロールする機能が付加されることになった。



第 1 図 テキサス州ファンズワース観測点の位置（Google マップに加筆）。左上に米国内でのファンズワースの位置を示した（DOE/NETL（2010）に加筆）。



第 2 図 観測室内での SG-SG 並行測定。手前のサーキュレータは空調補助のために追加した。設置位置は第 1 図の AWT3。

1) 産総研 地質調査総合センター地圏資源環境研究部門

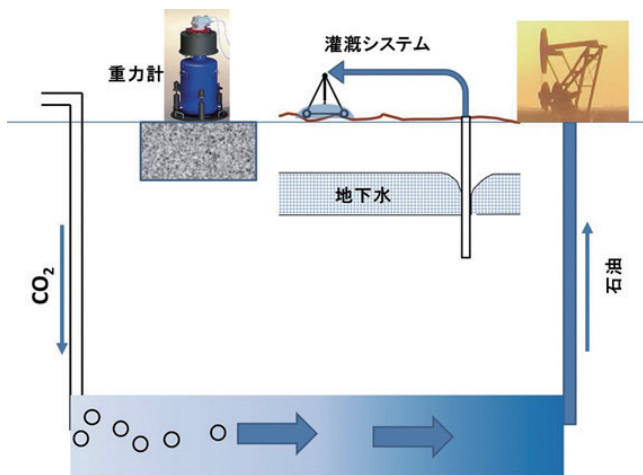
2) 産総研 地質調査総合センター地質情報研究部門

3) 産総研 再生可能エネルギー研究センター

キーワード：超伝導重力計、高感度重力モニタリング、苦小牧

3. 屋外計測の試み

重力の時間変化は様々な要因が重なって観測される。ファンズワースでは、圧入されたCO₂の影響のほかに、石油生産、灌漑、降雨等の影響が重なって現れると考えられる（第3図）。異なる領域で生じる密度分布変化の影響を評価するには、2台の超伝導重力計の設置距離をかえて並行測定を行うことが効果的と考えられる（Kennedy *et al.*, 2014）ことから、iGrav17を約600 m離れた地点に移設して並行測定を行った（第4図）。計測期間は2か月弱であったが、特徴的な降雨応答・融雪応答の記録が得られた（杉原・西, 2015）。なお、この計測では屋外の観測点だったので簡易収納庫（エンクロージャ）を用いた。



第3図 ファンズワースでの重力変動模式図（杉原, 2015）。



第4図 テキサス州ファンズワースではエンクロージャを活用した屋外観測点での設置。広帯域地震計による並行測定も試みた。設置位置は第1図の1310。

4. 苫小牧での計測

苫小牧では2016年から圧入が予定されている。圧入開始前にベースライン調査を実施しておく必要からiGrav17による計測を2015年3月に開始した（第5図）。現地は海岸に近く、計測器設置環境としては非常に厳しい条件だが、ファンズワースでも試行したエンクロージャを活用して、適宜トラブル対応を行いつつ連続計測を維持している（池田ほか, 2016）。また海岸近傍に特有の信号解析評価もすすめている（名和ほか, 2016）。2016年秋頃までは今の体制で観測を継続して、別途用意される観測体制に引き継ぐ予定である。

5. 今後の展開

iGrav17は2016年度中にCCS現場から撤収して、他の調査地での適用を検討中である。地熱地帯に適用する可能性については活用のイメージを提起した（Sugihara *et al.*, 2015）が、地熱地帯以外での活用も検討中である。

世の中に重力計と呼ばれるものは数多くある。最も一般的なのは可搬型相対重力計で、ラコスト重力計やシントレクス重力計がよく使われる。可搬型相対重力計のセンサー部を組み込んで海底での計測に使用する海底重力計や孔内重力計も開発され、CCSの現場でも活用を検討され（杉原, 2011など）、実際に使われている（Jenkins *et al.*, 2015）。絶対重力計は相対重力計が持つ機械的ドリフトの欠点を解消し、重力の時間変化を把握するために使われている。可搬型相対重力計と絶対重力計と組み合わせて、ある調査領域に設定した重力観測網でスナップショット的な計測を繰り返し行うハイブリッド重力モニタリングは広く活用され



第5図 右の柵内が苫小牧の重力観測点。テキサス州ファンズワースと同じエンクロージャが見える。左後方に見えるのは二酸化炭素圧入井の掘削リグ。

る手法であるが、超伝導重力計による高感度重力連続観測とは相補的である。一方、各種の重力衛星によって広域の重力変化を把握できる（大久保，2004 など）。こうした各種の重力計測技術には一長一短があり、お互いの長所を生かして総合的に活用することが効果的である。重力衛星については公開されたデータを利用することになるが、それ以外は、重力計を取得・開発・借用して運用する必要があり、その際に費用対効果の検討が重要である。各種重力計の価格比較の公開情報は少ないが、最近では可搬型相対重力計の購入価格が増大傾向にあるのに対して超伝導重力計の価格は低下している。これによって超伝導重力計による並行測定が現実的になってきた。我々もすでに並行測定を試行したが、垂直的な並行測定や多点観測の可能性の検討など、超伝導重力計の活用にはまだ研究要素がある。苫小牧での計測経験から、日本の CCS 現場への適用を広げるためには、超伝導重力計による計測の場を坑内そして浅海に広げることが有効である（杉原ほか，2015）。

6. 結語

すでに、米国と苫小牧の調査地での計測によって、超伝導重力計の特性評価を行い、各種重力変化を検出し、計測上の課題も抽出している。その成果は順次、口頭発表と誌上発表を行ってきた。iGrav は近年導入例が多くなり、国内においても 2016 年に 2 台搬入が予定されているし、CCS モニタリングにおいても、別途、導入予定である。さらなる成果発信に努めたい。

なお実施にあたっては筑波大学研究基盤総合センターの池田 博 准教授に外来研究員としてご協力を得た。池田氏は低温工学の専門家で、南極昭和基地での超伝導重力計の設置に係った（池田ほか，2004；池田，2010）ほか、ほぼ全ての国内の超伝導重力観測にも貢献している。我々の超伝導重力計の導入についても重要な役割を担っていただいた（池田ほか，2016）。

謝 辞

本研究は、経済産業省からの委託研究「二酸化炭素回収・貯蔵安全性評価技術開発事業（弾性波探査を補完する CO₂ 挙動評価技術の開発）」と関連して実施してきた。また、米国テストサイトにおける実証試験は、米国エネルギー省（DOE）国立エネルギー技術研究所（NETL）の予算（Award No. DE-FC26-05NT42591）により、SWP（Southwest Partnership on Carbon Sequestration）が実施

している。調査の実施には、米国 Chaparral Energy 社、ユタ大学、ニューメキシコ工科大学、日本 CCS 調査株式会社、苫小牧市、苫小牧港管理組合などの協力が不可欠であった。また調査実施にあたっては GWR 社の E. Brinton 氏から多大な助言を得た。記して謝意を表する。

文 献

- DOE/NETL (2010) 2010 Carbon sequestration Atlas of the United States and Canada – third Edition (Atlas III).
- 池田 博 (2010) 南極昭和基地での超伝導重力計による精密重力連続観測。物理探査ニュース, No.7, 1–4.
- 池田 博・土井浩一郎・福田洋一・野口隆志・中嶋俊哉・飯村 憲・渋谷和雄 (2004) 南極における超伝導重力計の設置とその除震及び監視技術の開発。低温工学, 39, 348–353.
- 池田 博・森 稜太・杉原光彦・名和一成・西 祐司 (2015) 野外観測対応超伝導重力計の設置。2015 年度春季低温工学・超伝導学会。
- 池田 博・杉原光彦・名和一成・西 祐司 (2016) 第 4 世代超伝導重力計が日本に初登場、苫小牧で計測開始。GSJ 地質ニュース, 5, 67–68.
- Jenkins, C., Chadwick, A. and Hovorka, S.D. (2015) The state of the art in monitoring and verification—Ten years on. *JGGC*, 40, 312–349.
- Kennedy J, Ferre PA, Abe M, and Güntner A. (2014) Direct measurement of subsurface mass change using the variable baseline gravity gradient method. *Geophysical Research Letters*, 41, Issue. 8, 2827–2834.
- 名和一成・杉原光彦・宮川歩夢・西 祐司 (2014) 米国テキサス州ファンズワースにおける 2 台の iGrav 型超伝導重力計の並行観測。122 回測地学会。
- 名和一成・杉原光彦・池田 博 (2016) 世界でいちばん海に近い超伝導重力計で海面変動をみる。GSJ 地質ニュース, 5, 69–70.
- 大久保修平 (2004) 地球が丸いってほんとうですか？。朝日新聞社，東京，279p
- 相馬宣和・杉原光彦・石戸経士・名和一成・西 祐司 (2014) CO₂ 地中貯留のための多面的モニタリング技術の検討。GSJ 地質ニュース, 3, 137–142.
- 杉原光彦 (2011) 海底重力計見学記 ー海底重力計による CO₂ 地中貯留モニタリングの可能性の検討ー。地

- 質ニュース, no. 679, 40-46.
- 杉原光彦 (2015) テキサス州ファンズワースでの重力計測の手記. GSJ 地質ニュース, 4, 251-258.
- 杉原光彦・西 祐司 (2015) テキサス州での超伝導重力計による連続観測と土壌水分変化 (続報). Proceedings of Soil Moisture Workshop 2015.
- Sugihara, M., Nawa, K., Soma, N., Ishido, T., Miyakawa, A. and Nishi, Y. (2014) Continuous gravity monitoring for CO₂ geo-sequestration (2) a case study at the Farnsworth CO₂-EOR field. *Energy Procedia*, 63, 4404-4410.
- Sugihara, M., Nawa, K., Ishido, T., Soma, N. and Nishi, Y. (2015) Potentiality of continuous measurements using a small-sized superconducting gravimeter for geothermal reservoir monitoring. Proceedings, Geothermal Resources Council, 2015.
- 杉原光彦・池田 博・名和一成・石戸経士・西 祐司 (2015) 苫小牧 CO₂ 地中貯留サイトでのポータブル超伝導重力計システムによる観測. 日本測地学会第 124 回講演会予稿集.
-
- SUGIHARA Mituhiko, NISHI Yuji, NAWA Kazunari, MIYAKAWA Ayumu, ISHIDO Tsuneo and SOMA Nobukazui (2016) Introduction of a superconducting gravimeter for high sensitivity gravity monitoring.
-

(受付：2016 年 2 月 5 日)

重力モニタリングの要諦

杉原光彦¹⁾

1. はじめに

重力の時間変化を計測して監視する重力モニタリングは様々な分野で活用されている。重力の教科書や啓蒙書（大久保，2004 など）でも相当のページを割いて説明されている。Geophysics 誌の重力モニタリング特集号には私たちの地熱地域での研究報告（Sugihara and Ishido, 2008）のほかに地下水・火山活動・CCS（二酸化炭素の回収と貯留）等，様々な重力モニタリングについての研究報告が掲載されている。私は地熱や CCS の重力モニタリングに長く関与してきた。実用上の課題について解説し（杉原，1998），地熱での応用については一般向けの簡潔な解説も試みた（杉原，2013）。しかし未だに重力モニタリングの存在意義を疑うような質問を受けて愕然とすることがある。典型的な質問は次の2つである。①「重力時間変化は要因が多すぎて役立たないのでは？」，②「地下構造調査をしてからでないと重力変動調査はできないのでは？」。この疑問に回答することで重力モニタリングの要諦を示すことにしたい。

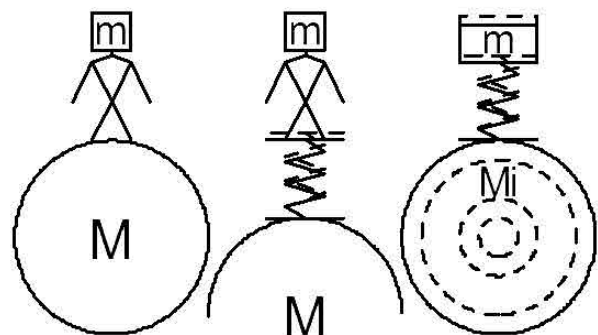
2. 重力変動測定は体重測定と似ている

「重力時間変化は要因が多すぎて役立たないのでは？」に対しては「安心してください。重力モニタリングは原理的にも活用法としても体重測定によく似ているのです」と答える。

確かに重力変化を引き起こす要因は多い。では体重測定はどうだろうか？体重変化の要因も様々だが，気軽に健康管理に役立っているのではないだろうか？気になる体重変化があれば病院を受診して病気がわかる場合もあるだろう。一方，人気番組「ためしてガッテン」では最も有効なダイエット法として，毎日体重測定して記録することを提案し（NHK 科学・環境番組部，2010），その効果については大きい反響があったようだ。我々は二酸化炭素地中貯留で高感度重力計による連続測定を提案している。予測と異なる重力変化が検出されたら，そこで反射法探査など本格的な調査を行いましょうという構図である（相馬ほか，2014）。

原理的な類似性も見てみよう（第1図）。地球（質量 M ）と地球表面に立っている人（質量 m ）の間に働く万有引力は， GMm/R^2 である。ここで G は万有引力係数， R は地球中心から人までの距離（地球半径）である。 $GM/R^2 = g$ が重力である。地球表面に置かれた体重計の上に人が立っていたとすると，バネの伸び縮み量 x に比例した力 kx が働き，体重計はバネの復元力で人にかかる万有引力を支える。したがって，人の質量 m は，計測値 x によって kx/g と評価される。実は最も広く使われている重力計はバネ秤の一種である。今度は人ではなく重力計を地球と対峙させる。重力計自体の質量を m とすれば，重力計と地球の間の万有引力は $GMm/R^2 = mg$ 。これが重力計のバネの力 kx と釣り合うので，計測値 x によって重力を $g = kx/m$ と評価できる。ここで k/m は重力計毎に決まった定数である。第1図右では地球を4層構造で示した。重力は，この4層の部分からの寄与が合計されて働く。更なる不均質構造を考慮する場合は，より細かく区分して合計する。

今までの議論では，万有引力を重力としてきた。地球物理学では，地球回転による遠心力と万有引力の合力を重力と定義して扱う。その場合は多少表現が変わるが議論の主旨は変わらない。



第1図 重力測定と体重測定の関係。人に働く万有引力（左），体重計（中央），重力計（右）。

1) 産総研 地質調査総合センター地圏資源環境研究部門

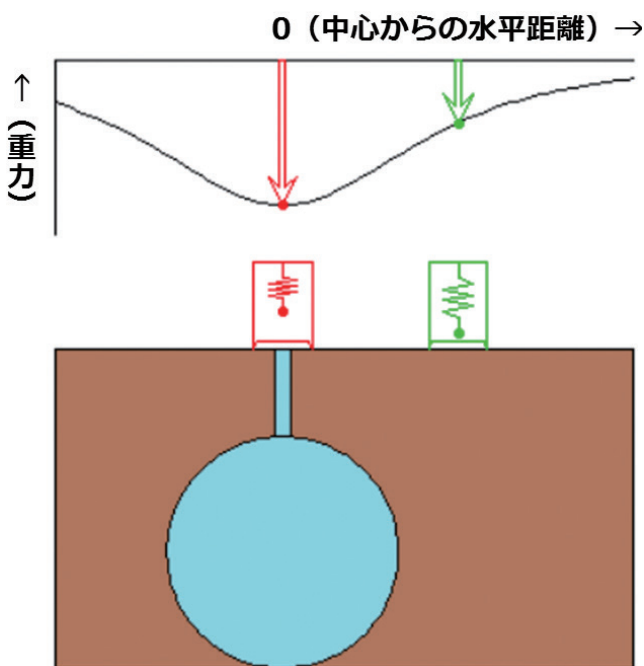
キーワード：重力モニタリング，超伝導重力計，間欠泉モデル

3. 重力変動観測では重力構造調査では得られない情報も

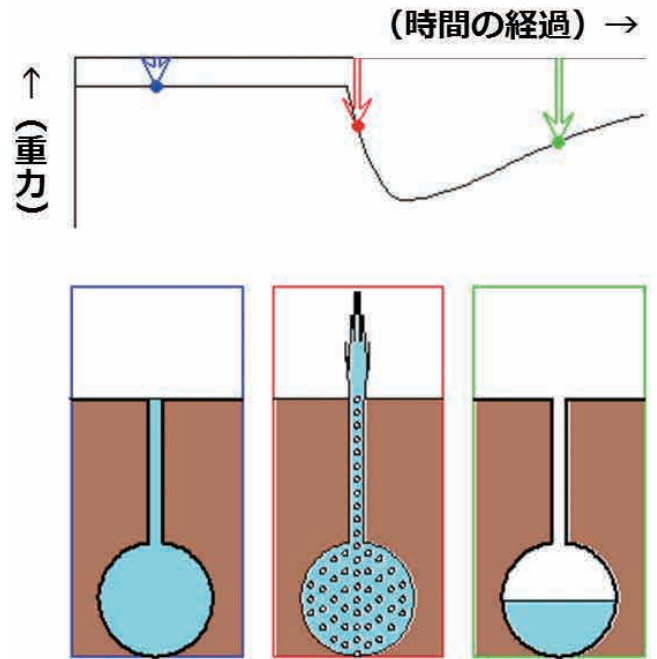
「地下構造調査をしてからでないと重力変動調査はできないのでは？」という疑問には、「重力変動調査によってしか得られない構造の情報もある。」と答える。

以前、地熱開発では、重力構造調査も重力モニタリングも探査手法として利用されることを解説した(杉原, 2013)。それを利用すると今の質問に対しても、わかりやすく説明できる。やや長くなるが、一部変更しつつ引用する。「地下にある岩石などの物質が重いか軽い、といったことや、地下の熱水や蒸気の増減を調べることができるのが重力探査です。地下の密度分布によって地表での重力値には微小な差異が生じることを利用して調べます。地熱地域では重力の微小な時間変化にも注目して活用します。単純な間欠泉モデルで説明しましょう。間欠泉を横切って地表で重力測定すると間欠泉直上では重力が小さくなります(第2図)。これは熱水たまりの密度が周囲の岩石より小さいことによります。間欠泉活動は地下の熱水が沸騰して噴出したあと、熱水がたまる周期的現象ですが(第3図)、それに対応して噴出時に重力が低下し、熱水がたまると重力が回復する時間変化がみられます(第4図)。」

重力構造解析するというのは第2図で重力の空間分布から貯留層の形を推定することである。地下の密度が一樣



第2図 重力構造調査のイメージ(間欠泉の貯留構造の場合)。間欠泉貯留構造モデル断面と横断測線上での重力分布。杉原(2013)を改変。



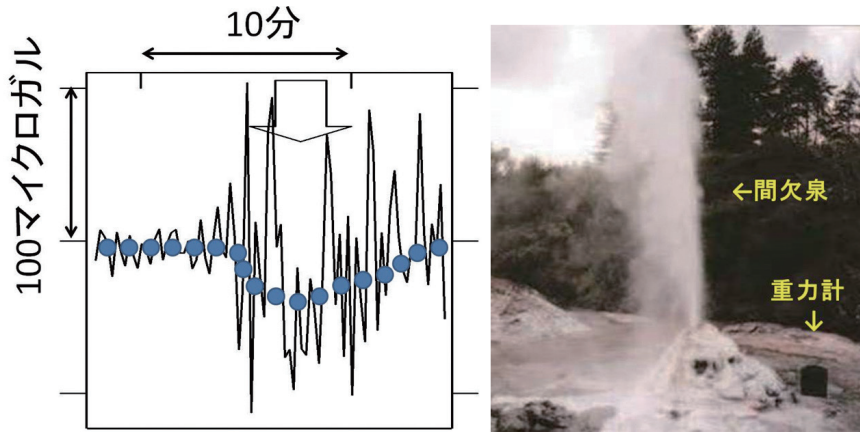
第3図 間欠泉活動に伴う重力時間変化モデル。杉原(2013)を改変。

ならば貯留層の構造推定は簡単そうに見えるが、密度の不均質構造の可能性を考慮すると貯留層の形状の推定は結構難問である。一方、重力の時間変化は、地下の密度が不均質であったとしても、その影響は受けない。第4図のような重力時間変化の計測データは貯留層構造を推定する手掛かりになる。

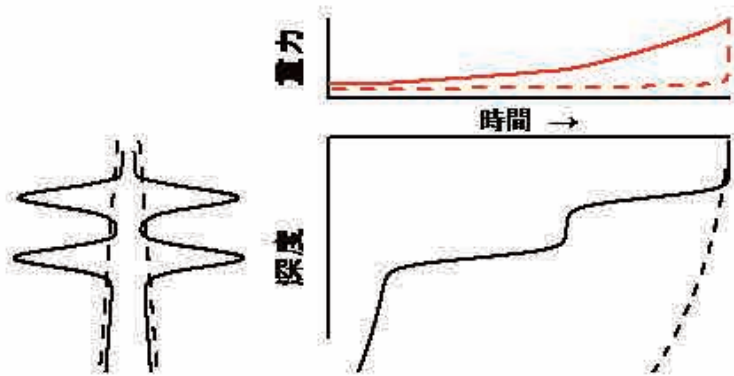
具体的に数値をあてはめて考えてみるとわかりやすい(第5図)。間欠泉の貯留構造モデルを想定して水が一定速度で供給される場合の水位と重力の時間変化を評価した。貯留構造によって重力変化のパターンは異なるので、重力変化の観測データから構造の手掛かりも得られる。

4. さまざまな重力計, 特に超伝導重力計

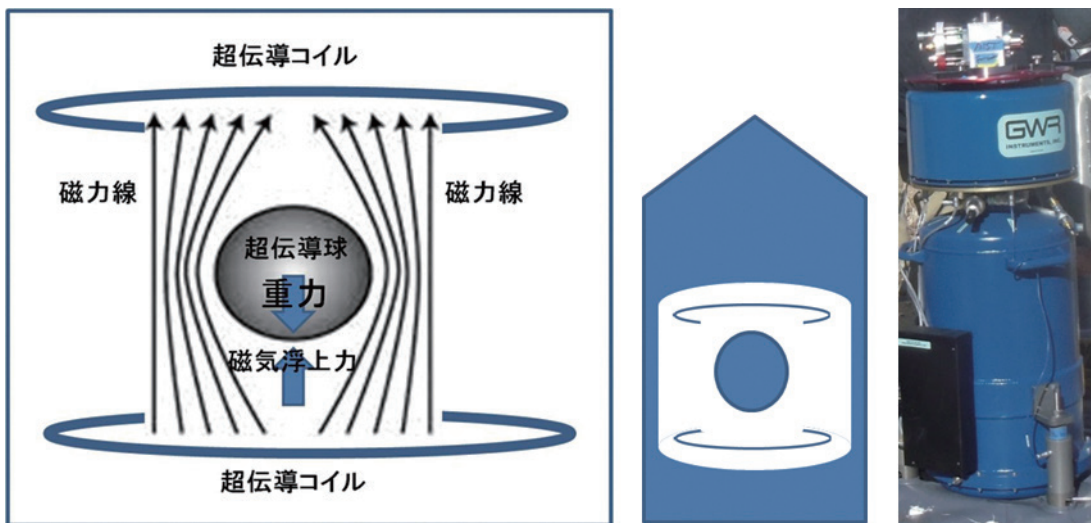
我々が最近、興味をもって使っている重力計は超伝導重力計である。超伝導重力計は相対重力計だがバネ秤ではない。重力とバランスするのは超伝導状態の安定な磁場による磁気浮上力である(第6図)。磁気浮上力が安定であることに加え、極低温によって熱雑音が無いために通常の重力計に比べて圧倒的な高感度である。高感度であるというのは第5図のような重力変化を細かい目盛で識別できるということである。また安定な磁気浮上力によって、重力計のドリフトがきわめて小さい。バネ秤式重力計では、バネ定数は実は温度などによって変化する。こうした影響は機器のドリフトとなって第5図のような重力時間変化の計



第4図 ニュージーランドのレディノックス間欠泉での重力観測風景(右図)と重力時間変化記録例(左図). 実際の観測では地面振動の影響も受けるが, ●印列のような重力時間変化を認識できる. 杉原(2013)を改変.



第5図 間欠泉モデルの計算例. 空になった貯留層部分に湯が一定速度で供給される過程での重力変化(上図)と水面深度変化(下図). 左図に示した2つのモデルについて示した.



第6図 超伝導重力計の原理(杉原ほか(2014)を改変)と構造と実物写真.

測データに重なるので、誤差要因になる。

重力モニタリング法として一般的なものは可搬型相対重力計による繰り返し測定である。第2図に示した空間分布測定を期間をおいて繰り返す。CO₂地中貯留のモニタリング手法でも、可搬型相対重力計のセンサーを組み込んだ海底重力計や孔内重力計を使って繰り返し計測する手法が現場で適用されている。一方、我々は超伝導重力計による高感度重力連続測定を第3図のように試行してきた。両者によって各々独立な情報が得られるので、両者を並行して行うことをスーパーハイブリッド重力モニタリングと称している。

5. むすび

重力モニタリングは体重測定と似た活用ができると説明した。異常が気になったら詳しい診察を受ければ良いと。自力で解析をすすめることもできる。さまざまな時間変化のデータや構造モデルを考慮すれば、変動要因がたくさんあっても、原因を解釈することができる。重力データ解析には原理的に解の非一意性という問題がある（大久保, 1995）ので、解釈の任意性を狭めると言う方が適切かもしれない。モデル計算値と観測値と比較し、観測とモデルの食い違いが見出されたらモデルを修正するという手順で正解に近づける。その手続きは重力構造解析でも重力変動解析でも似ているが、重力変動解析ではダイナミックなモデルを扱うし、構造に関しては簡略化した構造モデルを想定する。第2図の例では、間欠泉とつながっていない空洞があった場合に、構造解析では、それも解析しなければならないが、変動解析用構造モデルには含める必要がない。重力変動解析が適切ならばダイナミクスを規定するパラメータとともに簡単な構造モデルのパラメータも評価できる。

文 献

- NHK 科学・環境番組部 (2010) NHKためしてガッテン 計るだけダイエット新装版 効果倍増7日間健康レシピ. アスコム, 東京, 77p.
- 大久保修平 (1995) 重力のインバージョン. 地学雑誌, **104**, 1047-1062.
- 大久保修平 (2004) 地球が丸いってほんとうですか?. 朝日新聞社, 東京, 279p.
- 相馬宣和・杉原光彦・石戸経士・名和一成・西 祐司 (2014) CO₂地中貯留のための多面的モニタリング技術の検討. GSJ地質ニュース, **3**, 137-142.
- 杉原光彦 (1998) 重力モニタリング実用上の課題. 物理探査, **51**, 602-612.
- 杉原光彦 (2013) 地熱資源の調査: 重力探査. 地質調査総合センター研究資料集, no. 584, 7.
- Sugihara, M. and Ishido, T. (2008) Geothermal reservoir monitoring with a combination of absolute and relative gravimetry. *Geophysics*, **73**, WA37-WA47.
- 杉原光彦・名和一成・相馬宣和・石戸経士・西 祐司 (2014) テキサス州ファーンズワース CO₂地中貯留調査サイトでの超伝導重力計の導入. GSJ地質ニュース, **3**, 129-132.

SUGIHARA Mituhiko (2016) Essence of gravity monitoring.
(受付: 2016年2月5日)

絶対重力計測の現場から 一屋外計測・輸送編一

杉原光彦¹⁾

1. はじめに

我々が所有している絶対重力計 FG5/217 による計測現場について、これまでに 2 回、報告した(杉原, 2010; 杉原, 2016)。今回は CCS (二酸化炭素の回収と貯留) プロジェクト現場での計測経験から屋外計測と機材輸送の話題について述べる。二酸化炭素地中貯留のモニタリング手法の一つとして重力モニタリング法がある。私たちは高感度重力連続測定を提案して試行してきた。連続測定に使用する超伝導重力計は相対重力計であるため、ドリフトと感度を定期的に検定しておくことが望ましい。そのためには超伝導重力計と絶対重力計を隣接した状態で並行測定するのが標準的な手法である。CCS 現場への適用は、まず米国での共同研究に加わる形で米国の調査地(第 1 図)で行い(相馬ほか, 2014)、その後、国内の実証試験地の苫小牧での適用を開始した。長期間にわたる重力変化を評価するためには絶対重力測定データ自体も有効な情報となる。

2. 米国 CCS テストサイトでの計測

米国での共同研究では当初計画された調査地はユタ州ゴードンクリークだった。スケジュールが米国内の事情で



第 1 図 米国の計測点位置図。スコットランド CCS の Web サイト (<http://www.sccs.org.uk/expertise/global-ccs-map>) による CCS プロジェクト進行状況マップに加筆した。風船印はプロジェクト位置。ユタ州ゴードンクリーク(中止・休止)とテキサス州ファンズワース(実施中)で計測した。

遅れる中で我々は年次計画に従って計測準備を進めたところ、重力計測用基台の設置、観測小屋の設置、超伝導重力計の搬入、重力計測開始という手順の途中で、基台設置段階で一度、絶対重力計測を行うことになった。観測小屋が設営される前なので屋外計測になること、コロラド州デンバー近郊にある絶対重力計の製造会社から現場が近いことから、屋外計測用絶対重力計 A10 による計測(Kazama et al., 2013 など)を製造会社に外注して行った(第 2 図)。重力計を輸送してきた車は計測室も兼ねていた(第 3 図)。計測当日は降雪だったが計測車の使用によって良好な計測環境が維持された。重力計本体は小型で耐環境性を有するが、防風防雪のためにテントで囲って行った。

その後に米国側の政策変更に伴い、調査地がテキサス州ファンズワースに変更となった。我々もユタ州ゴードンクリークから観測点を移設した。ファンズワースに観測小屋を設置して 2012 年 12 月に超伝導重力計を搬入して計測を開始した。絶対重力計による最初の並行測定は 2013 年 1 月に行った。屋内計測環境が整っていたので、我々が所有する絶対重力計 FG5/217 を使用した。

FG5/217 は 2001 年に導入して以来、基本的に毎年 1 回はコロラド州にある製造会社で点検を行っている。機材輸送直後に微調整が必要となる事態が時々発生していたので、その煩わしさを避けるために製造会社からファンズワースまでの輸送と最初の立ち上げは製造会社に外注した。製造会社からファンズワースまでが 1 日行程で移動経費が大きくないことも費用対効果に有利だった。製造会社の熟練者による輸送と設置作業を見学して今後の測定に役立てたいという思惑もあった。到着した輸送車は恐らくゴードンクリークでは計測用に使用していた車と同種の車両であったが、A10 使用時のような計測用車両には見えなかった。A10 使用時には A10 用収納ケース等も活用して車内に計測器を配置していたが、それが無ければ特殊車両というわけではない。しかし機材を固定したり給電する便はあった。機材をベルトで固定したり、機材の間に緩衝剤をはさむなどして精密機器に輸送中のダメージを与えない配慮も窺えた(第 4 図)。

1) 産総研 地質調査総合センター地圏資源環境研究部門

キーワード: 絶対重力計測, 野外計測, 機材輸送, CCS, 重力モニタリング



第2図 ユタ州ゴードンクリークでの可搬型絶対重力計 A10 による計測風景。



第3図 ユタ州ゴードンクリークでの絶対重力計測時、車両を計測基地として使用。



第4図 テキサス州ファンズワースでの絶対重力計の積込状況。

3. 苦小牧での計測

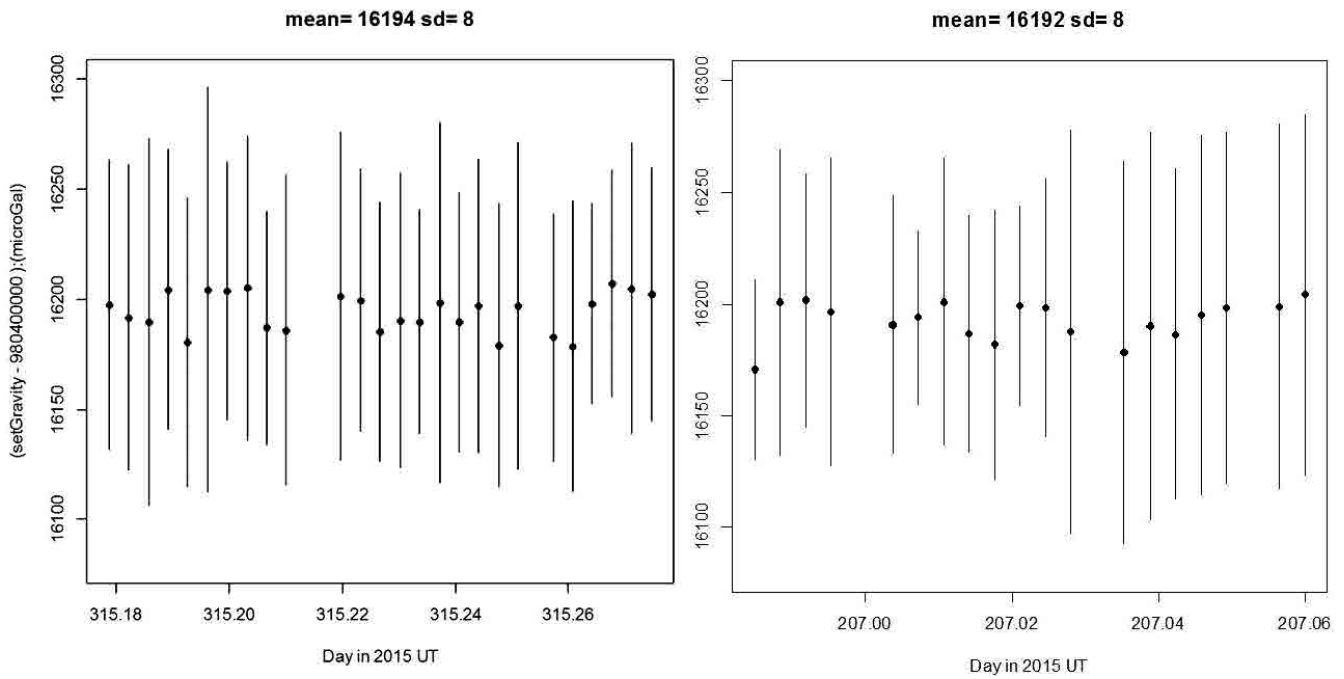
苦小牧の計測点は屋外に設けた計測用基台である。様々な理由で観測小屋の設置あるいは既存建屋の利用は困難だった。我々が所有する絶対重力計 FG5/217 は屋内用の精密機器なので、本来はユタ州ゴードンクリークでのように屋外用絶対重力計 A10 を測定には使用すべきである。しかし A10 による日本での計測を外注すると米国内での計測に比べて費用が格段にかさむ。並行測定の主目的は、超伝導重力計のドリフト評価である。超伝導重力計は1か月のドリフトが0.5マイクロガル以下と極めて小さい。これに対して絶対重力計 FG5 の公称精度が2マイクロガルなので、超伝導重力計のドリフトを評価するための並行測定は半年に1回、実施できればよいことになる。冬期間でなければ屋外でも計測可能温度条件は保たれる。苦小

牧の計測点は海岸に近いので海岸特有の風の影響も懸念材料だが、条件の良い時を選べば実施できる可能性はある。ということで、当面は FG5/217 を使うことにした。無風か微風で降雨の恐れがない時に計測を試みたが計測値は大きくばらついた。テントを張って、その中で実施したら(第5図)、安定的に使える計測値が得られた(第6図)。1日のうちに設置撤収して日中だけ計測するのでは評価のために十分な計測回数には達しないが、日数をかければ十分なデータが得られる見通しが立った。

産総研から苦小牧への絶対重力計の輸送には大洗港からのフェリーを利用している。約1時間の運転で大洗港に到着できるのは有難い。しかし関東から北海道までの絶対重力計の輸送の際に仙台港からのフェリー、または八戸港からのフェリーを利用する機関もある。運転リスクと航行中のリスク評価の判断の違いだろうか、いずれのルートでも太平洋を航行するフェリーは使うのだから荒天による欠航の可能性の差は小さい。自動車とフェリーでは輸送中の振動条件は異なるが、フェリー輸送の方が事故の危険は少ないように思える。運転時間と航行時間の長さのバランスの判断の違いだろうか。航送中に一つ気になるのは給電の問題だ。絶対重力計で安定な計測を行うためには真空を維持して輸送するのだが、イオンポンプコントローラへの給電が必要である。外部電池との接続が緩み、内部電池の容量が不足するとアラームが鳴る。航行中は車両デッキには立ち入ることができないので、航行中は電源チェックができない。しかし接続と電池容量を確認していれば電源消失の危険性は少ないので運転時間を最小にするルートとして大洗-苦小牧フェリーを私は選択している。



第5図 苫小牧での計測風景。テント未使用時（上）と使用時（下）。



第6図 絶対重力計測結果。左は2015年7月26日、右は11月11日。各々1 Set ごとに28Dropと29Drop ずつのSet 値を示した。1 日のSet 値の標準偏差はいずれも8マイクロガルで、両者の平均値の差は2マイクロガル。11 月にもテントを使用することで7月の好条件時と同等の計測を行うことができた。

4. むすび

大洗 - 苫小牧間は夕方便と深夜便がほぼ毎日1便ずつあり、合計4隻のフェリー船が就航している。2015年7月に深夜便で火災が発生し乗員の方1名が殉職された。被災船修理中は変則的に夕方便が隔日運航となったので夜行便を利用する機会が生じ、夕方便とは違う風景を見られた。早朝、本州最東端のトドヶ崎に近づいたので、よりよく景色を眺めるために船室から甲板に向かった。移動途中で目に入った新しい掲示の発信者には火災後復旧修理中の船の名前もあった。フロントで聞くと復旧にはまだ時間がかかるということだったが、4船名併記の掲示に連帯感を感じた。トドヶ崎は鮭ヶ崎と漢字表記する。見慣れない文字だが、大型海棲哺乳類ではなく魚の名前だ。出世魚ボラの最後の名前で「トドのつまり」のトドだ。海岸段丘に建てられた白い灯台が印象的だった。トドヶ崎沖を過ぎて、半島の南側には入り江が見えた(杉原・山口, 2016)。奥には姉吉地区があるはずだ。姉吉地区は2011年の大津波の際に死者がなかったことが有名だ。明治・昭和と2回の大津波で非常に多くの犠牲者を出した後、その教訓を刻んだ石碑の教えに従い、住居を高台に設けていたからだ。しかし生産の場は海岸なので、津波の被害を受けて復興中だという(松本, 2012)。フェリーの航跡の先に小さく見えるトドヶ崎灯台を眺めていると古歌を思い出した。「世の中を何にたとへん朝ぼらけ漕ぎゆく舟の跡のしら浪」。振り返って進行方向を見ると太陽は高く上がっていた。振り返り見すれば^{ひはまたのぼる}三陸海岸での津波被災からの復興、そしてフェリー火災後の復旧への思いを胸に刻んだ。

文献

- Kazama, T., Hayakawa, H., Higashi, T., Ohsono, S., Iwanami, S., Hanyu, T., Ohto, H., Doi, K., Aoyama, Y., Fukuda, Y., Nishijima, J. and Shibuya, K. (2013) Gravity measurements with a portable absolute gravimeter A10 in Syowa Station and Langhovde. East Antarctica, *Polar Science*, 7, 260-277.
- 松本健一 (2012) 海岸線は語る。ミシマ社, 東京, 224p
- 相馬宣和・杉原光彦・石戸経士・名和一成・西 祐司 (2014) CO₂ 地中貯留のための多面的モニタリング技術の検討。GSJ地質ニュース, 3, 137-142.
- 杉原光彦 (2010) 絶対重力計測の現場から。地質ニュース, no. 665, 53-62.
- 杉原光彦 (2015) テキサス州ファンズワースでの重力計測の手記。GSJ地質ニュース, 4, 251-258.
- 杉原光彦 (2016) 絶対重力計測の現場から 一神岡編一。GSJ地質ニュース, 5, 9-20.
- 杉原光彦・山口 靖 (2016) フェリーからの風景, 苫小牧と本州最東端の鮭ヶ崎。GSJ地質ニュース, 5, 71.

SUGIHARA Mituhiko (2016) A field report of absolute gravity measurements, Episode III, outdoor measurement and transportation.

(受付: 2016年2月5日)

堆積物の磁化を測ってわかる (知りたい) こと

— 旧石油公団が「南極地域石油天然ガス基礎地質調査」(FY1980–1999) で取得した海底堆積物コアの再測定から —

森尻理恵¹⁾・中井睦美²⁾・上野直子³⁾・荻島智子⁴⁾

1. はじめに

堆積物コアの岩石磁気研究は、1980年代末ころから測定技術の進歩とともに急速に発展してきた。例えば、磁化率測定は現在では必須項目としてルーチン化されているが、1980年代末までは堆積物について測定されることはほとんどなかった(山崎, 2000)。「南極地域石油天然ガス基礎地質調査 (FY1980–FY1999)」というプロジェクトは、当時の通商産業省から石油公団石油開発技術センターへの委託事業であった。地質調査総合センター(以下GSJ; 当時は地質調査所)はこのプロジェクトに深く関わり(村上, 2000)、多くの研究成果をあげてきた(例えばNishimura *et al.*, 1998)。ただし、堆積物の磁性の研究について言えば、石油公団のプロジェクトにおいて採取されたコアのほぼ全部について磁気データが公開されているのは、自然残留磁化(NRM)がTH84航海(1984年度)から、磁化率はTH93航海(1993年度)からである。

プロジェクト終了後の2002年4月に、堆積物コアが石油公団からGSJへ移管され、所定の手続きを経て利用可能となった(ただし、石油公団では冷蔵保存されていたが、GSJでは常温保存となっている)。また、石油公団報告書も閲覧可能となった(藤本ほか, 2003)。そこで、筆者の1人である中井が代表となって科研費(課題番号15540442)を得て、GSJへ移管された堆積物コアを利用して、4人で磁気パラメーターの追加測定、再測定を行った。実質的には、私立大学の教員である中井が京都大学へ1年間国内留学する権利を得た時期に合わせて共同研究を行ったものである。測定の大部分は京都大学、同志社大学と高知大学海洋コア総合研究センター(共同利用研究04B006)で行われた。具体的な測定方法と主な測定結果は、森尻ほか(2005)と中井ほか(2006)で既に報告済

である。

その後、南極海では統合国際深海掘削計画(Integrated Ocean Drilling Program, IODP)の第318次航海が実施され、新しい研究成果も公表されつつある(例えばPatterson *et al.*, 2014; Tauxe *et al.*, 2015)。

本稿では、自分たちが測定したコア21本分のBanergee-King plotを作成し公開するものである。このプロットはあとで簡単に説明するが、磁性鉱物の粒子の大きさを推定するためのものである。環境磁気学的研究では、試料中の微量・微細磁性鉱物の種類、量、大きさなどの情報を得ることを目的とする。粒子の大きさのバリエーションを面的に知ることができれば、南極海域の堆積環境の推定につながる情報となる。もちろん、これだけで解ってしまうわけでは決してない。そもそも、南極海域は環境が過酷なためデータが少ない。また、堆積学の研究において有力なデータとなる微化石が少ないらしい。そこで、この石油公団のプロジェクトで得られたコアは、南極大陸を一周する海域で系統的に採取されている上に、その他の地球物理学的なデータも同時に得られている大変貴重なものである。ところが実際には、公開された堆積物コアは古いものでは採取から20年以上経っているので、保存状態が良いと言っても鮮度が大事な(?)化学的な研究の試料とするには難しいという話を聞いた。もちろん基本的なものは石油公団のプロジェクトでデータが出ているので、それ以上のものを知りたいとなると、このコアは残念ながら引く手数多というわけではないらしい。その中で、磁気的な研究は、保存されていたコアを使った研究でも比較的安定したデータが報告されていた(Matsuoka and Funaki, 2003)。

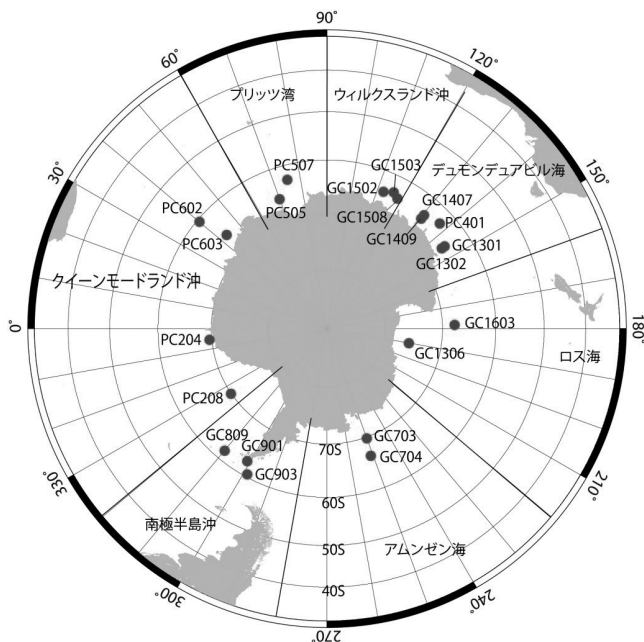
実は、私たちが当初の目論見はいくつかあったのだが、実験の進め方がまずかった部分もあり、目標に対して思うようなデータが出せなかったものもあった。そのため、

1) 産総研 地質調査総合センター地質情報基盤センター
2) 大東文化大学
3) 元・東洋大学
4) 目白研心中学・高等学校

キーワード: 磁性鉱物, 南極海, 海底堆積物コア, 再測定, Banergee-King plot, GSJ, JNOG

前述の2本の論文も測定データの公開を主目的としており、だからどうしたということまでは言っていない。地球科学のように研究対象が大きくなると、個人または1つのグループでできることはたかが知れているので、研究の節目節目にはデータを抱え込まずに論文を書くようにと言われてきた (そう言われても簡単なことではないが・・・)。著者の1人の上野は既に定年退職し、研究の中心だった中井も地球科学から離れた立場に学内で異動したことから、これ以上は自分達では無理だと判断した。そこで論文ではないが、堆積物コアの磁気的な研究の一端を紹介する目的で、森尻が整理して預かっている分のデータの追加公開することにした。

環境磁気学の基礎的な部分については鳥居 (2005) のレビュー等を参考にして頂きたい。ただし、鳥居 (2005) も言っているように、微量・微細磁性鉱物の種類、量、大きさなどを推定するのに必要な磁気的な情報は、多くの場合複合的であり、独立に評価できることはほとんどない。よって、特に1種類のデータだけで考察を行うのは避けたいと思う。

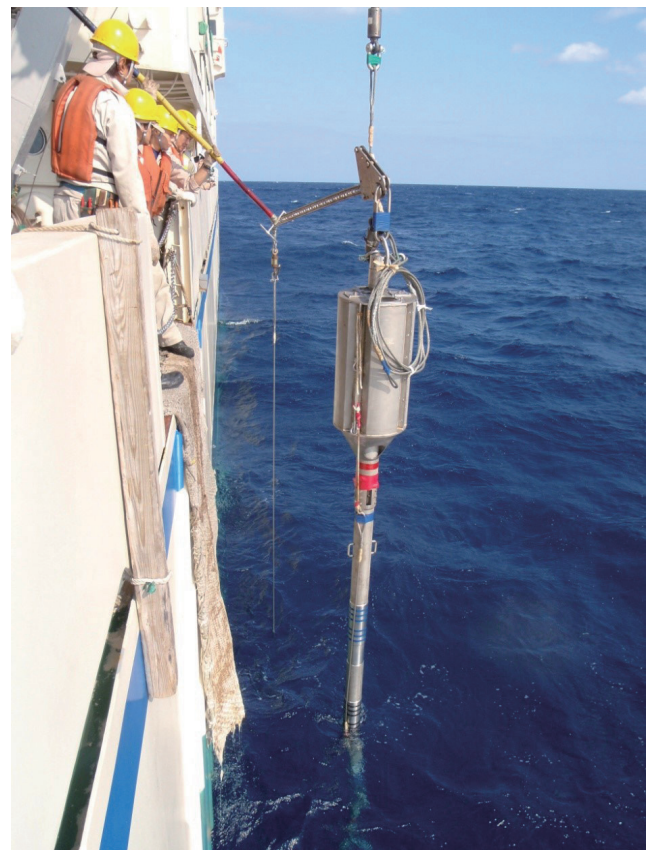


第1図 使用したコアの採取点分布図。経度は東回りが正である。GCはグラビティーコア、PCはピストンコアを示す。クイーンモードランド沖 (Off Queen Maud Land), プリッツ湾 (Prydz Bay), ウィルクスランド沖 (Off Wilkes Land), デュモンデュアビル海 (Dumont d'Urville Sea), ロス海 (Ross Sea), アムンゼン海 (Amundsen Sea), 南極半島沖 (Off Antarctic Peninsula) の海域ごとの区切り線は旧石油公団の報告書 (藤本ほか, 2003) に従った。

2. 海洋底堆積物コアの採取方法

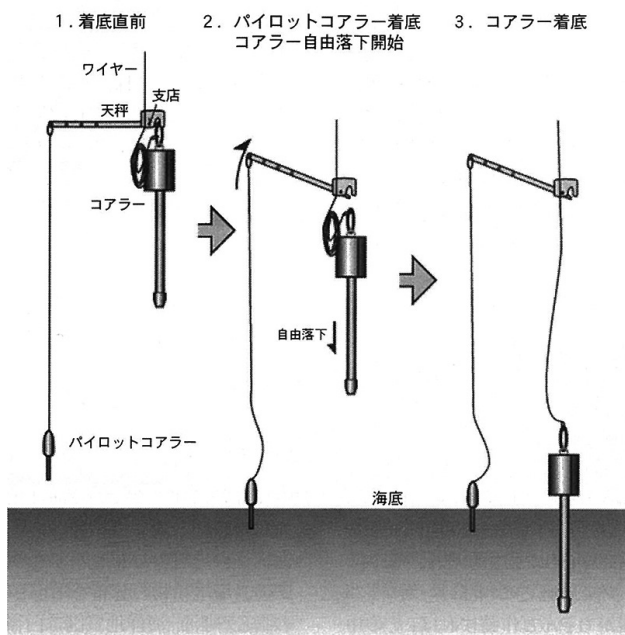
使用したコアの採取位置を第1図に示す。ここでPCと記されているものはピストンコアラーによって採取され、GCと記されているものはグラビティーコアラーによって採取されている。磁気パラメーターの測定について述べる前に、海底堆積物コアの採取方法について簡単に触れる。

海底堆積物は、調査船の脇からワイヤーでコアラーと呼ばれる採泥器を下ろしていき、海底にパイプを突き刺して表層堆積物を柱状に抜き取る。石油公団のプロジェクトで用いられたものはピストンコアラーとグラビティーコアラーの2種類である。第2図は、海域は違うがグラビティーコアラーの投入風景 (片山, 私信) である。地質情報研究部門海洋地質研究グループのウェブサイト (<https://unit.aist.go.jp/igg/mgl-rg/ja/photo/index.html>, 2015年12月25日確認) に、海域は違うが、数種類の採泥器の写真、投入風景、堆積物採取後の処理風景の写真が公開されているので参照されたい。ピストンコアラーとグラビティーコアラーの違いは海底に突き刺すパイプの長さや口径と堆積物の採取方法である。ピストンコアラーはパイプ内にピストンがあることによって、パイプを堆積物に押し込む力とピストンが堆積物を吸い上げる力のバランスを取



第2図 グラビティーコアラー投入の様子 (片山, 私信)。

り、効果的に採泥しようとするものである。パイプの長さは12 m程度のもので多く使われている。ただし、長いコアを採取可能であるが吸引に失敗すると、上部の構造を乱してしまうことが多い。一方、グラビティーコアラは自由落下によって堆積物に二重構造のパイプを突き刺し採取する方法である。採取できる長さは5 m程度とピストンコアラに比べて短い、パイプの口径が大きく堆積物を比較的乱さずに採取できるという特徴がある。具体的には、第3図(辻野ほか, 2005)に示すように、グラビティーコアラはおもり(ヘッド)の下にパイプ(バレル)をつけた構造になっており、これとパイロットコアラを、バランスを取るように天秤で吊る。採取地点の水深や海況にもよるが、ワイヤーの張力をモニターしながら毎分60 m位ずつ繰り出して、コアラを海底下に下ろしていく。水深の30~40 m上方になったら、ワイヤーのスピードを緩めて毎分30 mずつ繰り出していき、まずパイロットコアラを着底させる。そうすると天秤のバランスがくずれ、天秤が傾きコアラ本体が落下するというものである。自由落下する海底面からの高さは堆積物をたくさん採取できるかどうかにかつてくる重要なパラメーターで通常は2~3 mである。これはパイロットコアラを吊すロープの長さで調整できる。自由落下の勢いで、バレルが海底に刺さり堆積物を柱状に採取する。揚収するときは、ワイヤーを毎分60 mのスピードで慎重に巻き上げていく。海には流れがあり、波によって船体が揺らされるために、投入と揚収作業には技術と経験が必要である。



第3図 グラビティーコアラの動作原理。辻野ほか(2005)より転載。

3. 磁気パラメーターの測定

このようにしてパイプの中に入った堆積物は、船上で内側のパイプごと縦に半割りにされ、研究者によって切断面の記載が行われる。そののち研究目的に応じて実験や分析に用いられる試料が抜き取られ、各種の研究が行われる。通常、パイプに残った堆積物は乱さないように、試料を抜いた後にスチロール片を詰めて、きっちり蓋をして冷蔵または常温で保存される。筆者らが使用させて頂いたのは、このようにして冷蔵(GSJに移管されてからは常温)保存されていた堆積物コアである。磁気パラメーターに関する測定項目は第1表に示した。1~4の結果は森尻ほか(2005)で、5~8の結果のうちウィルクスランド沖とデュモンデュアビル海のものの中井ほか(2006)で報告されている。森尻ほか(2005)では、第1図に示した21本のコアについて、磁化率、自然残留磁化(NRM)強度、NRM伏角、非履歴性残留磁化(ARM)を加えた直流磁場で規格化したARM磁化率、飽和等温残留磁化(SIRM)、ARM/SIRM、S比を深さに沿って示している。ここでのS比は $S_{0.3T} = [1 - IRM_{0.3T} / SIRM] / 2$ (Bloemendal *et al.*, 1992)を採用した。IRM_{0.3T}とはSIRMとは逆向きに大部分のマグネタイトの等温残留磁化(IRM)が飽和する磁場0.3 Tをかけて獲得させた磁化である。ウィルクスランド沖で得られたPC404は都合によりARM着磁実験を行っていないので、磁化率、自然残留磁化(NRM)強度、NRM伏角、飽和等温残留磁化(SIRM)、S比のみを深さに沿って示している。また、中井ほか(2006)では、このPC404も含めたウィルクスランド沖とデュモンデュアビル海で得られたコア8本について、パイロット試料の段階交流消磁結果、パルス磁化装置で段階的に着磁したIRMの付加曲線、高温熱磁化曲線、低温磁化曲線、ヒステリシスパラメータを示した。それらのデータから、主として磁化を担っている磁性鉱物はマグネタイトを含むマグヘマイトと推定され、安定した自然残留磁化を持っていると報告している。

磁化を担っている磁性鉱物の粒子サイズを推定するのにDay plotと呼ばれるダイヤグラム(Day *et al.*, 1977; Dunlop, 2002)がしばしば用いられる。これは、磁化を担っている鉱物が主としてマグネタイトである場合、磁気ヒステリシスループの解析から得られる飽和磁化(Ms)、飽和残留磁化(Mrs)、保磁力(Bc)、残留磁化の直流消磁によって求められる残留保磁力(Bcr)から、Bcr/Bcを横軸に、Mrs/Msを縦軸とするグラフを作成するというものである。そこで、試料がどの範囲にプロットされるかによって磁区構造を推定する。単磁区(SD)構造は粒子が

第1表 測定項目.

1. 自然残留磁化(NRM)
2. 初期磁化率
3. 段階交流消磁を伴うNRM
4. ARMを獲得させたのち段階交流消磁
5. 飽和等温残留磁化(SIRM)獲得実験と逆等温残留磁化(BIRM)獲得実験
6. ヒステリシス測定
7. 高温熱磁化分析(キュリー点)
8. 低温熱磁化分析(フェルペー点)

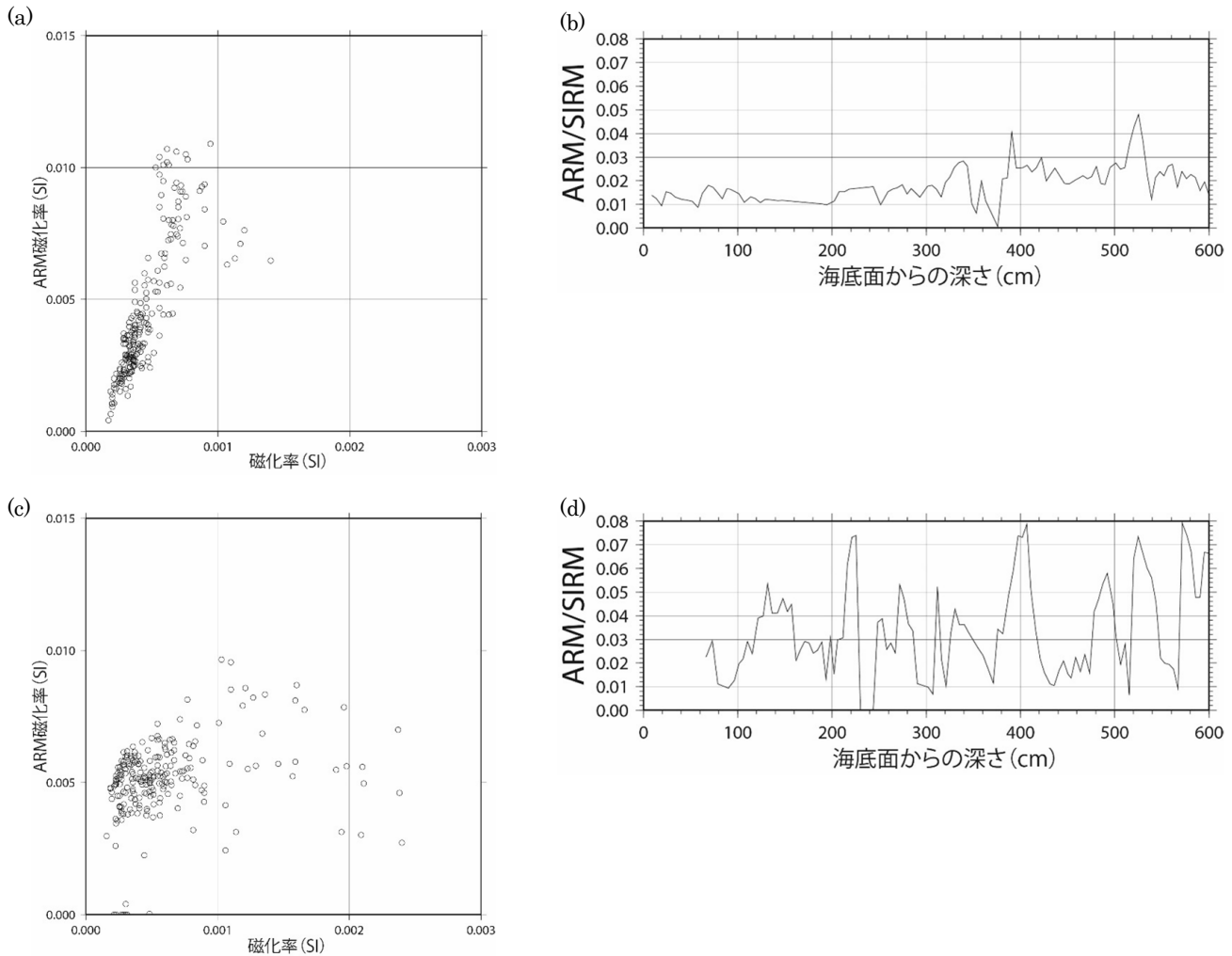
細かく、多磁区(MD)構造は粒子が大きい。それとは別に、ここで紹介する Banerjee-King plot は、横軸に初期磁化率、縦軸に ARM 磁化率をプロットするものである。初期磁化率や ARM はヒステリシスパラメータに比べ、測定が容易なので、多量の試料について適用されている。ARM は交流磁場の振幅を徐々に減少させながら同時に直流磁場を加える過程で獲得される磁化を言う。近年、多くの研究機関に導入されているパルス型磁力計測装置・非履歴残留磁化器(2G Enterprises 760R など <http://www.kochi-core.jp/institution/magnetism.html#2>; 2015年12月25日確認)では、段階交流消磁による NRM の測定に加えて ARM の獲得実験も一連の作業として自動で行うことができる。ARM の獲得効率は、単磁区領域では初期磁化率よりも高いので、Banerjee *et al.* (1981) は横軸に初期磁化率、縦軸に ARM というグラフを作成し、勾配が大きいほどマグネタイトの粒径が小さくなっていることを見出した。それを受けて King *et al.* (1982) が、縦軸を ARM 磁化率として比が無名数となるよう改良を行った。森尻ほか(2005)では、磁化率も ARM 磁化率も公表しているが、Banerjee-King plot を作成していなかった。その代わりに、マグネタイトの粒子サイズの深さ方向の変動データとして、ARM/SIRM を示している。これは、ARM は単磁区領域で獲得効率が非常に高いが、SIRM は粒子サイズに依存しないことより、ARM/SIRM が大きいと粒子サイズが小さくなることを示す。ただし、ARM は磁性鉱物間の磁気相互作用の大きさに敏感なので(Sugiura, 1979; Yamazaki, 2008)、解釈はそう簡単ではない。近年では、FORC(First order reversal curves)ダイアグラムという方法(Pike *et al.*, 1999)が盛んに行われていて、保磁力ごとの磁気的な相互作用の大きさを示すことで、どのような粒径分布をしているのか推定されている。

4. Banerjee-King plot

Banerjee-King plot については、原著論文(Banerjee

et al., 1981; King *et al.*, 1982) または『Environmental Magnetism (Evans and Heller, 2003)』のような教科書を参考にして頂きたい。さらに、King *et al.* (1982) や Evans and Heller (2003) では、磁性鉱物がマグネタイトであるとしたときの粒子サイズの目安のラインが引いてあるが、自分たちのデータではきっちりとした岩石磁気学的な検討を行っていないので、おおまかに「傾きが大きい方は粒子が細かい」程度の解釈にとどめたい。森尻ほか(2005)に示したコアごとに ARM/SIRM を深さ方向にプロットした図を見ると、一様ではなくそれなりに変動しているものも多い。Banerjee-King plot にいくつかの傾きのグループが見られるのは、コアの堆積物が一様ではないためと推察される。例えばクイーンモードランド沖で得られた PC208 と PC602 (第1図)について ARM/SIRM を第4図に示す。PC208 の Banerjee-King plot は比較的データが直線に集まっているが、PC602 は分散している。これは深さ方向の粒子の大きさの変動が PC208 は比較的少なく、PC602 は大きいためと考えられる。

各コアの採取点情報は第2表に示した。第5図から第11図が海域ごとのプロットになっている。傾きが見やすいように、図の軸は統一してある。例えば、デュモンデュアビル海で得られた GC1409 (第8図c) とアムンゼン海で採取された GC704 (第10図b) を比べると、明らかに GC704 の方が GC1409 よりも勾配が大きく、粒子が細かいと言える。第1図に示された21本のコアについて、Evans and Heller (2003) に示されている粒子サイズが $0.1 \mu\text{m}$ に相当するラインより傾きが大きいもの(粒子が細かい)と傾きが小さいもの(粒子が粗い)とに分けてみた。ちなみに $1 \mu\text{m}$ のラインよりも傾きが小さい(粒子が粗い)コアはなかったもので、全般的に粒子が細かいといえるだろう。第12図の■で示したものは粒子がやや粗く、●で示したものは粒子が細かいということになるが、いかがだろうか。



第4図 クイーンモードランド沖で得られたPC208とPC603のBanerjee-King plotと深さに対するARM/SIRM曲線。森尻ほか(2005)のデータによる。(a) PC208のBanerjee-King plot。第5図(a)と同じ。(b) PC208のARM/SIRMの深さ方向の変化。(c) PC602のBanerjee-King plot。第5図(c)と同じ。(d) PC602のARM/SIRMの深さ方向の変化。

5. おわりに

本稿の目的は、海底堆積物の研究で行われている磁気的な手法の一つを紹介したものであって、南極海の堆積環境について議論するものではない。実際の粒子の大きさの推定には、他の様々な要素を考えあわせてうえで慎重に進めることが不可欠である。しかしながら、貴重な試料を使わせて頂いたのだから、測定結果はできるだけ公表するのが義務だと考えていた。本来は論文という形できちんと議論に乗せるのが理想的なのだが、力不足もあってなかなかきれいにまとまらず、放置していた。何の気なしに地質情報研究部門海洋地質研究グループの片山 肇氏に Banerjee-King plot を見せたところ、「面白い」と言われ、そう言ってもらえるならば出すだけは出そうと思いついたのだった。ただ、さすがに論文にするにはデータが足りないのと、メンバーの都合もあって、海底堆積物の磁気的な研究

の一端を紹介する記事の一部として公開することにした。グラビティーコアラの写真を使わせて頂き、背中を押してくださった片山氏に感謝いたします。また、東京大学大気海洋研究所の山崎俊嗣教授には原稿に目を通して頂き、有益なご意見、ご教示を頂いた。さらに、地質情報研究部門地球変動史研究グループの七山 太氏にも有意義なご指摘を頂いた。特にこの御三方に謝意を表します。なお、図の多くは GMT の ver.3 (Wessel and Smith, 1998) を用いて作成した。

文 献

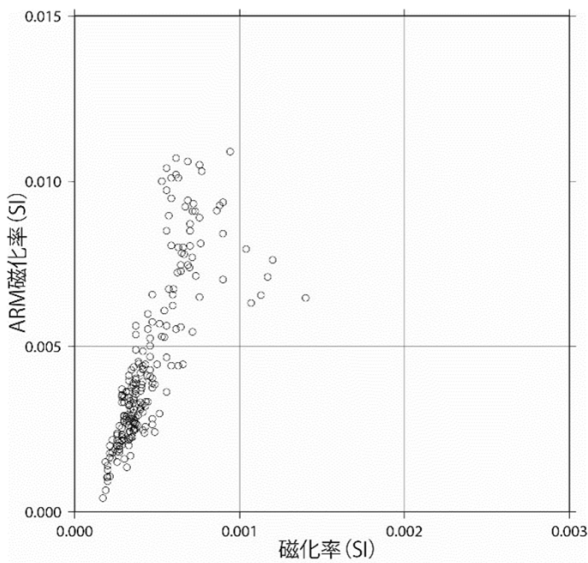
Banerjee, S.K., King, J. and Marvin, J. (1981) A rapid method for magnetic granulometry with applications to environmental studies. *Geophys. Res. Lett.*, **8**, 333-336.

第2表 コアの採取点情報 (森尻ほか, 2005 より抜粋). PC:ピストンコア, GC:グラビティーコア.

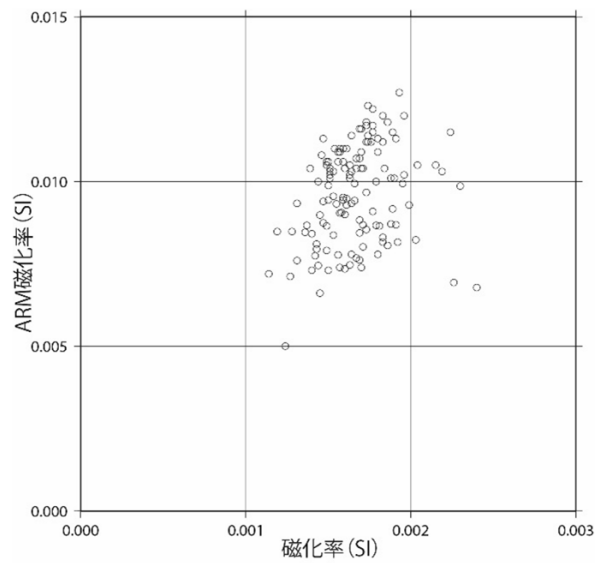
航海名	コア	海域	緯度・経度 (度)	水深(m)
TH81	PC204	クイーンモードランド沖	05.343W, 69.570S	1844
TH81	PC208	クイーンモードランド沖	34.215W, 69.906S	4360
TH83	PC401	デュモンデュアビル海	137.018E, 62.831S	3816
TH84	PC505	ブリッツ湾	69.876E, 65.863S	2481
TH84	PC507	ブリッツ湾	75.123E, 62.817S	3805
TH85	PC602	クイーンモードランド沖	40.008E, 60.442S	4639
TH85	PC603	クイーンモードランド沖	43.080E, 66.001S	3157
TH86	GC703	アムンゼン海	109.979W, 69.765S	3710
TH86	GC704	アムンゼン海	109.027W, 66.536S	4524
TH87	GC809	南極半島沖	49.986W, 61.851S	3315
TH88	GC901	南極半島沖	58.994W, 62.744S	1455
TH88	GC903	南極半島沖	61.3089W, 60.534S	3639
TH92	GC1301	デュモンデュアビル海	145.017E, 64.829S	3341
TH92	GC1302	デュモンデュアビル海	144.992E, 65.485S	2537
TH92	GC1306	ロス海	169.993W, 75.770S	1450
TH93	GC1407	デュモンデュアビル海	130.518E, 63.749S	3687
TH93	GC1409	デュモンデュアビル海	130.498E, 64.583S	1318
TH94	GC1502	ウィルクスランド沖	112.340E, 63.990S	2656
TH94	GC1503	ウィルクスランド沖	115.995E, 63.292S	3368
TH94	GC1508	ウィルクスランド沖	118.438E, 63.999S	3232
TH95	GC1603	ロス海	178.283E, 67.821S	3326

- Bloemendal, J., King, J.W., Hall, F.R. and Doh, S.J. (1992) Rock magnetism of Late Neogene and Oligocene deep-sea sediments: relationship to sediment source, diagenetic process, and sediment lithology. *J. Geophys. Res.*, **97**, 4361–4375.
- Day, R., Fuller, M. and Schmidt, V.A. (1977) Hysteresis properties of titanomagnetites: grain-size and compositional dependence. *Phys. Earth Planet. Inter.* **13**, 260–267.
- Dunlop, D.J. (2002) Theory and application of the Day plot (Mrs/Ms versus Hcr/Hc) 1. Theoretical curves and tests using titanomagnetite data. *J. Geophys. R.* **107**, EPM4 1–22.
- Evans, M. E. and Heller, F. (2003) Environmental Magnetism: Principles and Applications of Environmental Magnetism. *Academic Press, USA*, 299p.
- 藤本正道・林 雅雄・佐藤春香・辻 喜弘 (2003) 南極地域石油天然ガス基礎地質調査—既往成果のまとめと保管について—。石油開発技術センター年報 2002, 255–257.
- King, J. W., Banerjee, S. K., Marvin, J. and Oezdermir, Oe. (1982) A comparison of different magnetic methods for determining the relative grain size of magnetite in natural material: some results from lake sediments. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **59**, 404–419.
- Matsuoka, H. and Funaki, M. (2003) Characteristics of the natural remanent magnetization (NRM) of a core collected from offshore Wilkes Land, East Antarctica. *Antarctic Record*, **47**, 315–327.
- 森尻理恵・中井睦美・上野直子・荻島智子 (2005) 南極地域石油天然ガス基礎地質調査 (FY1980–FY1999) によって得られた海底堆積物コアの古地磁気・岩石磁気測定。地質調査研究報告, **56**, 341–373.
- 村上文敏 (2000) 白嶺丸による南極調査。地質ニュース, no. 551, 51–56.
- 中井睦美・森尻理恵・上野直子・荻島智子 (2006) 南極ウィルクスランド沖とデュモンデュアビル海の海底堆積物コア試料中の磁性鉱物について。大東文化大学紀要, **44**, 1–16.
- Nishimura, A., Nakasone, T., Hiramatsu, C. and Tanahashi,

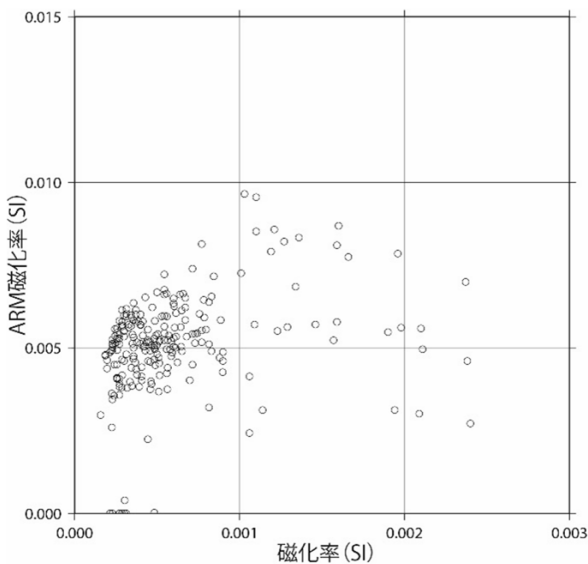
(a)PC208 (4360 m)



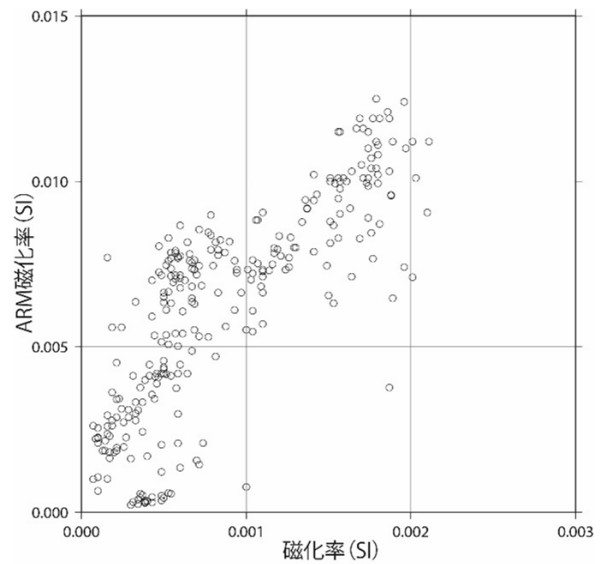
(b)PC204 (1844 m)



(c)PC602 (4639 m)



(d)PC603 (3157 m)



第5図 クイーンモードランド沖で得られたコア(PC208, PC204, PC602, PC603)のBanerjee-King plot. 横軸は磁化率(magnetic susceptibility), 縦軸はARM磁化率(ARM-susceptibility). コア名の隣の()は水深.

M. (1998) Late Quaternary paleoenvironment of the Ross Sea continental shelf, Antarctica. *Annals of Glaciology*, **27**, 275–280.

Patterson, M.O., McKay, R., Naish, T., Escutia, C., Jimenez-Espejo, F.J., Raymo, M.E., Meyers, S.R., Tauxe, L., Brinkhuis, H. and IODP Expedition 318 Scientists (2014) Orbital forcing of the East Antarctic ice sheet during the Pliocene and Early Pleistocene. *Nature Geoscience*, **7**, 841–847.

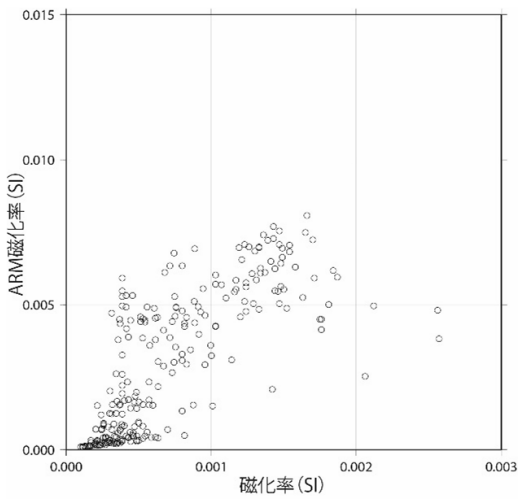
Pike, C.R., Roberts, A.P. and Verosub, K.L. (1999)

Characterizing interactions in fine magnetic particle systems using first reversal curves. *J.Appl.Phys.*, **85**, 6660–6667.

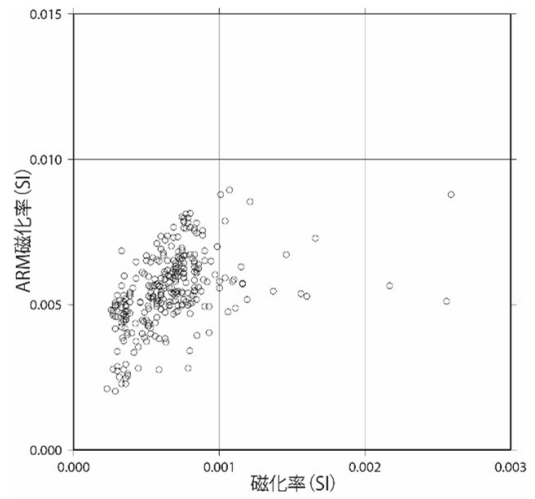
Sugiura, N. (1979) ARM, TRM and magnetic interactions: Concentration dependence. *Earth and Planetary Science Letters*, **42**, 451–455.

Tauxe, L., Sugisaki, S., Jimenez-Espejo, F., Escutia, C., Cook, C.P., van de Fleirdt, T. and Iwai, M. (2015) Geology of the Wilkes land sub-basin and stability of the East Antarctic Ice Sheet: Insights from rock magnetism

(a) PC505 (2481 m)

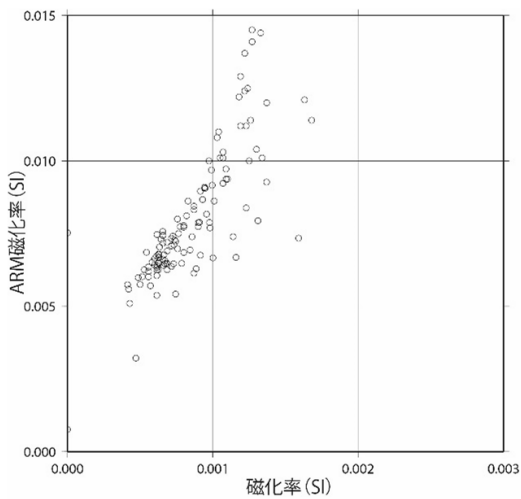


(b) PC507 (3805 m)

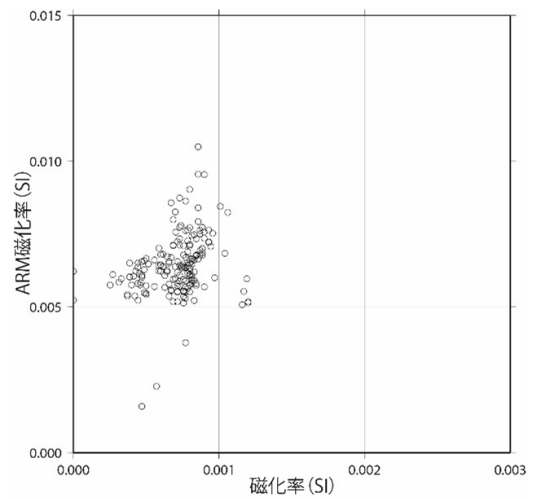


第6図 プリッツ湾で得られたコア (PC505, PC507) の Banerjee-King plot. 横軸は磁化率 (magnetic susceptibility), 縦軸は ARM 磁化率 (ARM-susceptibility). コア名の隣の () は水深.

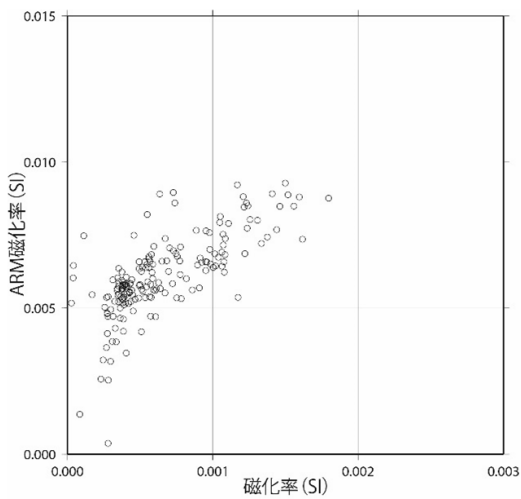
(a) GC1502 (2656 m)



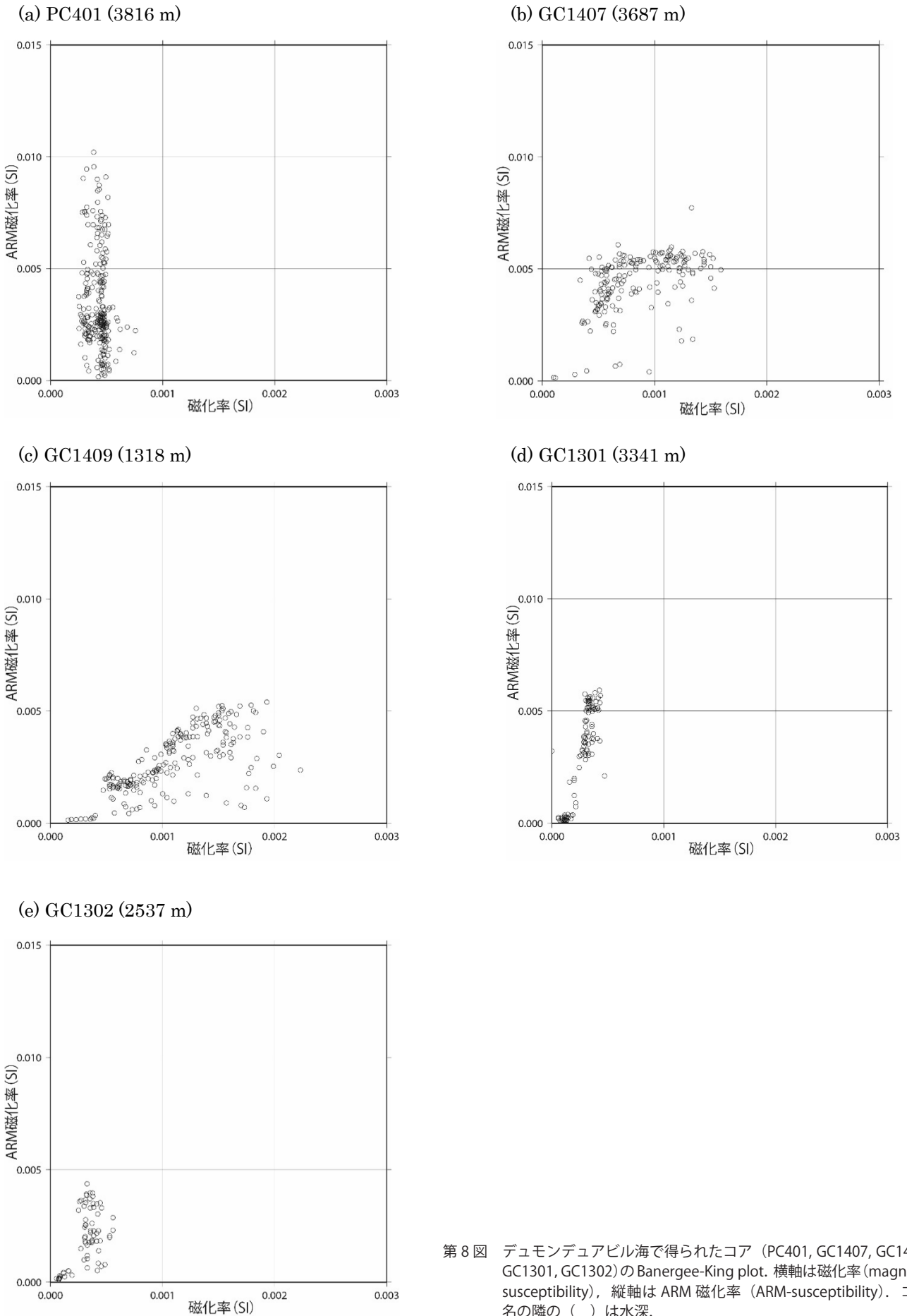
(b) GC1503 (3368 m)



(c) GC1508 (3232 m)

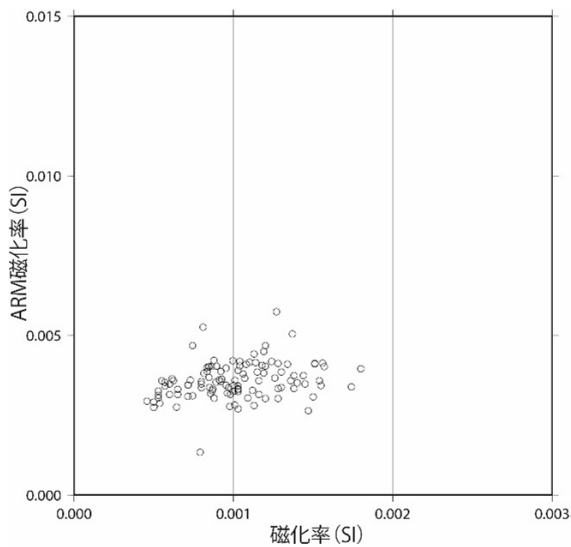


第7図 ウィルクスランド沖で得られたコア (GC1502, GC1503, GC1508) の Banerjee-King plot. 横軸は磁化率 (magnetic susceptibility), 縦軸は ARM 磁化率 (ARM-susceptibility). PC404 は ARM 着磁実験を行わなかったため除外. コア名の隣の () は水深.

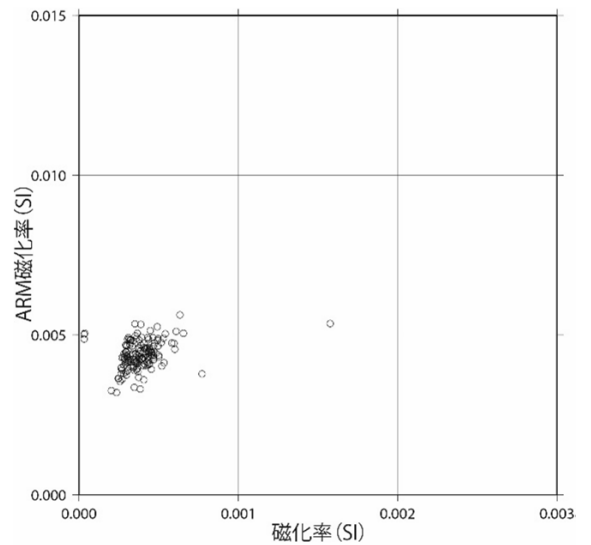


第 8 図 デュモンデュアビル海で得られたコア (PC401, GC1407, GC1409, GC1301, GC1302) の Banerjee-King plot. 横軸は磁化率 (magnetic susceptibility), 縦軸は ARM 磁化率 (ARM-susceptibility). コア名の隣の () は水深.

(a) GC1306 (1450 m)

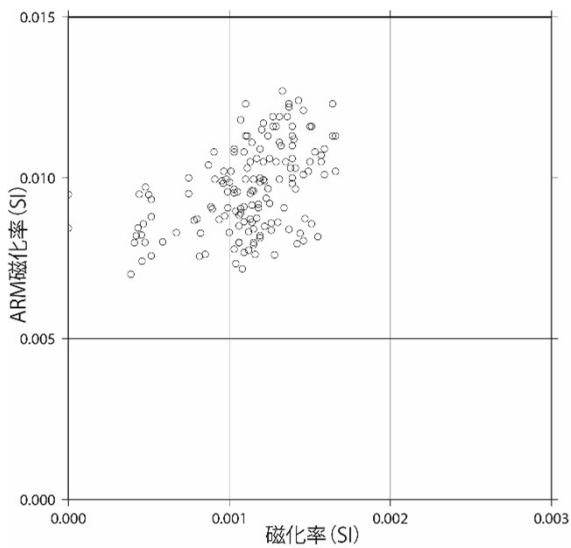


(b) GC1603 (3326 m)

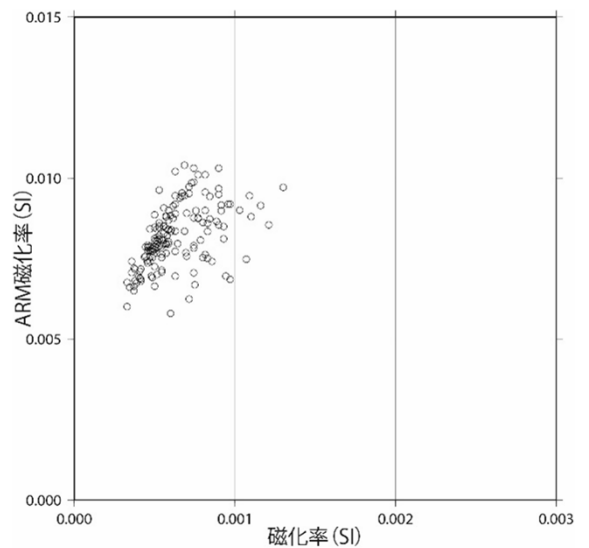


第9図 ロス海で得られたコア (GC1306, GC1603) の Banerjee-King plot. 横軸は磁化率 (magnetic susceptibility), 縦軸は ARM 磁化率 (ARM-susceptibility). コア名の隣の () は水深.

(a) GC703 (3710 m)



(b) GC704 (4524 m)



第10図 アムンゼン海で得られたコア (GC703, GC704) の Banerjee-King plot. 横軸は磁化率 (magnetic susceptibility), 縦軸は ARM 磁化率 (ARM-susceptibility). コア名の隣の () は水深.

at IODP Site U1361. *Earth and Planetary Science Letters*, **412**, 61–69.

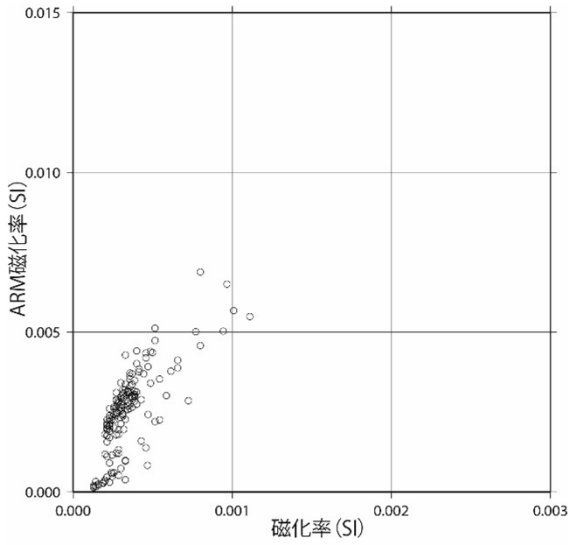
鳥居雅之 (2005) 環境磁気学—レビュー—. 地学雑誌, **114**, 284–295.

辻野 匠・山本博文・片山 肇・村上文敏・荒井晃作・野田 篤・田村 亨・菅沼悠介 (2005) 海洋地質調査法と成果: 京都府北方. 地質ニュース, no. 615, 54–59.

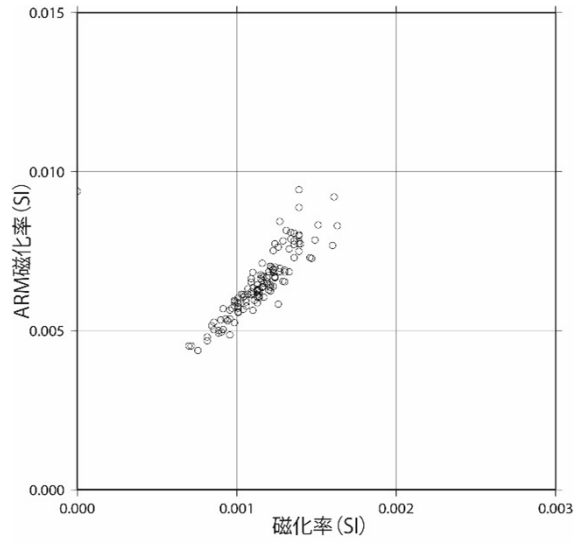
山崎俊嗣 (2000) 古地磁気・岩石磁気研究の進展—白嶺丸が採取した堆積物の重要な役割—. 地質ニュース, no. 549, 54–57.

Yamazaki, T. (2008) Magnetostatic interactions in deep-sea sediments inferred from first-order reversal curve diagrams: Implications for relative paleointensity normalization. *Geochem. Geophys. Geosyst.*, **9**, Q02005, doi:10.1029/2007GC001797.

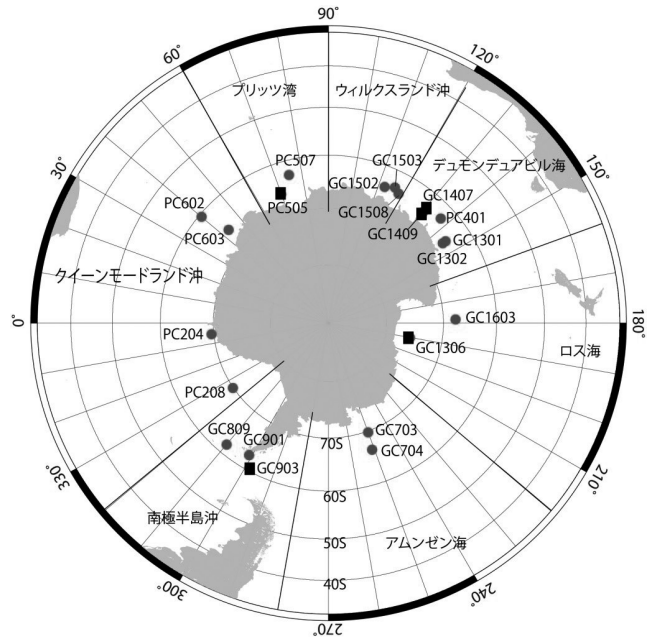
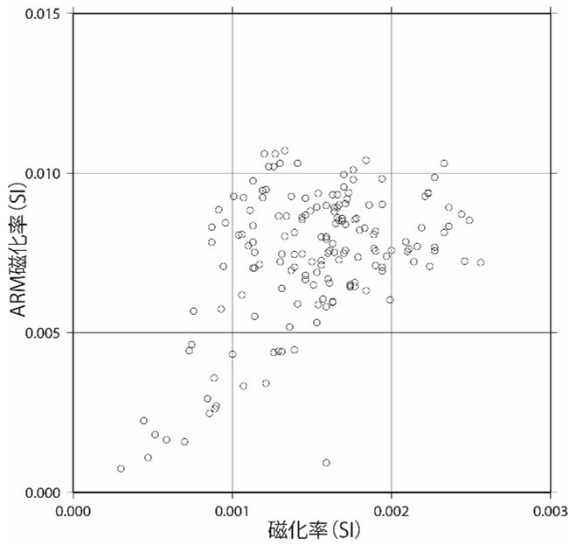
(a) GC809 (3315 m)



(b) GC901 (1455 m)



(c) GC903 (3639 m)



第 11 図 南極半島沖で得られたコア (GC809, GC901, GC903) の Banerjee-King plot.
横軸は磁化率 (magnetic susceptibility), 縦軸は ARM 磁化率 (ARM-susceptibility). コア名の隣の () は水深.

第 12 図 採取点分布図. 経度は東回りが正である. ●は粒子がとも細かいと示唆されるコア. ■は●よりは粒子が粗いと示唆されるコア. 第 1 図に加筆.

Wessel, P. and Smith, W.H.F. (1998) New, improved version of the Generic Mapping Tools released, *EOS Trans. AGU*, **79**, 579.

MORIJI RIE, NAKAI MUTSUMI, UENO NAOKO and OGISHIMA TOMOKO (2016) An example of magnetic measurements on marine sediment core samples taken by the Antarctic Geological and Geophysical Research Project of Japan National Oil Corporation (FY1980-1999).

(受付: 2016 年 1 月 5 日)

地球惑星科学入門 第2版

在田一則・竹下 徹・見延庄士郎・渡部重十

[編著]

北海道大学出版会
発売日：2015年3月
定価：3,000円＋税
ISBN：978-4-832982192
A5判，447ページ，ソフトカバー



2010年11月に“地球惑星科学入門”初版が発行された。在田一則氏からのご指名があり、私がGSJ地質ニュース誌上にその紹介記事を寄稿させて頂いた経緯がある(七山, 2012)。その年、2010年6月13日には、宇宙航空研究開発機構(JAXA)が打ち上げた小惑星探査機「はやぶさ」が60億kmの宇宙の旅を終え、地球に帰還した。地球重力圏外にある天体の地表面に着陸してのサンプルリターンに世界で初めて成功した瞬間であった。そのビッグニュースに多くの日本人が歓喜に酔いしれたことは記憶に新しい。そして、2014年12月3日には小惑星探査機「はやぶさ2」が再び地球を飛び立ったっていった。これら一連のはやぶさ計画の探査機は、惑星の起源物質である小惑星や彗星を調べることにより、太陽系の起源や進化過程を解明するとともに、地球を作る鉱物や海水、生命の原材料物質を探ることをミッションとして設計されていることは、皆様もご承知かと思う。

一方、2011年3月11日14時46分には、東北地方太平洋沖地震(Mw9.0)やそれに伴う大津波が、東北地方から関東地方を襲い、死者15,889名、行方不明者2,598名に達する我が国の史上最悪の大災害となった。これにより我々の職場である産総研つくばセンター第7事業所も大きな被害を受け、最近ようやくその復旧工事を終えたところである。また、その二次災害として福島第一原子力発電所のメルトダウンによる放射能汚染という我が国にとっては未曾有の大災害が発生した。その後も2014年8月20日広島土砂災害(死者・行方不明者74名)、同年9月27日には御嶽山噴火災害(死者・行方不明者57名)

と立て続けに大規模自然災害が我が国を襲ったが、これらの被災地域は現在もまだ完全復興には至っていないのが実情である。

これらは全て、本書“地球惑星科学入門”に関わる大事件である。当初、大学の基礎教育・教養教育向けの地球惑星科学の教科書として企画された本書の編纂目的は、我々が生活する地球および太陽系・宇宙の物質や構造、その変遷過程や成り立ちを正しく理解することであったとされる。たとえば、「はやぶさ2」が無事帰還できれば、太陽系の起源がさらに明確になるのであろう。それは地球の起源、太気・海洋の起源、大陸の起源、さらには生命の起源の理解に結びつくのである。本書のもう一つの目的は、様々な自然災害問題とともに、資源・環境問題など人類の生存に深く関わっている地球惑星科学的バックグラウンドを正しく理解することにある。

本書は北海道大学の地球科学関連分野の教員49名がそれぞれの専門的立場から執筆を分担しており、これを4名の編著者によって1冊で完結した教科書としてとりまとめられている。本書は大きく4部構成(全34章)となっており、第I部は「固体地球の構造と変動」、第II部は「地球の歴史と環境の変遷」、第III部は「大気・海洋・陸水」、第IV部は「宇宙と惑星」と、ほぼ地球惑星科学全般の項目を幅広く網羅している。

第I部は全8章からなり、地球深部から表層部までの構造とその構成物質およびプレート運動にともなう火山活動・地震活動や造山運動などの地殻変動について学ぶことができる。第II部は全9章からなり、地球創世記にお



ける原始大気・海洋の誕生から第四紀までの時間の流れをたどり、地球表層部の形成と変遷および生物進化、さらに自然災害や地球資源について学ぶことができる。第Ⅲ部は12章からなり、大気、地球表面積の7割を占める海洋、そして陸域の水や氷河を扱っている。地球の自転に伴う大気と海洋の独特の振る舞いや両者の相互作用、人為的な地球環境変動について学ぶことができる。第Ⅳ部は5章からなり、最新の観測成果により飛躍的に理解が深まった宇宙とその進化、地球周辺の宇宙空間から太陽系および太陽系惑星の構成とそれらの成り立ちについて学ぶことができる。

この他にも巻頭にはカラー版のグラビアが11ページ分掲載されており、また、表紙や裏表紙の裏の誌面も地質年代表、元素周期表等の図表によって埋められており、本文の内容の理解をサポートするように企画されている。

特に、初版以降、4年経過した後改訂された第2版では、第Ⅳ部に新たに第31章「銀河と恒星」が付け加えられた。各章にも適宜修正や新しい知見などが書き加えられ

ている。また、章末に添付されたBox記事も最新の内容に更新されるとともに、新たなBox記事も追加されている。たとえばBox 7.1には、2011年3月11日東北地方太平洋沖地震について詳しく言及されている。その結果、初版より24ページ増加し、また内容的にもより充実したものに進化している。カバーと扉には楢木佑佳さんによる46億年の地球史をイメージした独創的なイラストが描かれており、これも初版のものより大幅に進化を遂げている。

上述したとおり、本書は当初大学初学年における全学教育や一般教育の教科書として企画されたものであり、著者らは、専門用語を減らし極力平易な文章を使って丁寧に解説するよう心がけて執筆されている。それ故に、地球惑星科学に広く関心を持つ一般社会人、特に中学校や高等学校の理科教員の皆様には、その入門書としてご一読をお勧めできる内容ともなっている。

(産総研 地質調査総合センター地質情報研究部門 七山 太)

GSJ

交差点

(2016年2月25日確認)

☆地質図・地球科学図新刊案内

<https://www.gsj.jp/Map/JP/newmaps.html>

【最新刊】

- ・地球化学図「関東の地球化学図」

【既刊】

- ・5万分の1地質図幅10 [金沢]-68「冠山」
(福井県・滋賀県・岐阜県)
- ・20万分の1地質図幅「大分(第2版)」
(大分県・宮崎県・熊本県)
- ・火山地質図No.19「九重火山地質図」(大分県)
- ・空中磁気図No.46「養老断層地域高分解能空中磁気異常図」
(岐阜県・滋賀県・愛知県)
- ・重力図(ブーゲー異常)No.31「京都地域重力図」
(京都府・大阪府・兵庫県・奈良県・滋賀県・福井県)
- ・海洋地質図 No.86 室蘭沖表層堆積図
- ・海陸シームレス地質図S-4 海陸シームレス地質情報集
「石狩低地帯南部沿岸域」
- ・燃料資源図3「関東地方」
- ・水文環境図8「石狩平野(札幌)」
- ・土壌評価図6「茨城県地域」

☆活断層・火山研究部門(隔月刊)

IEVG ニュースレター (2016年2月号)

https://unit.aist.go.jp/ievg/katsudo/ievg_news/index.html

目次

1. 室内岩石試験の将来性について / 高橋 学
2. 新人研究紹介 産総研特別研究員としての二年間～反射法音波探査記録の地質学的解釈に基づく地下構造へのアプローチ～ / 森 宏
3. オレゴンから在外研究報告～帰国編 / 東宮昭彦
4. 2015年12-2016年1月外部委員会

GSJ 地質ニュース編集委員会

委員長 森 尻 理 恵
副委員長 下 川 浩 一
委員 丸 山 正
竹 田 幹 郎
杉 原 光 彦
中 嶋 健
七 山 太
小 松 原 純 子
伏 島 祐 一 郎

事務局

国立研究開発法人 産業技術総合研究所
地質調査総合センター
地質情報基盤センター 出版室
E-mail : g-news-ml@aist.go.jp

GSJ 地質ニュース 第 5 巻 第 3 号
平成 28 年 3 月 15 日 発行

国立研究開発法人 産業技術総合研究所
地質調査総合センター

〒 305-8567 茨城県つくば市東 1-1-1 中央第 7

印刷所 前田印刷株式会社

GSJ Chishitsu News Editorial Board

Chief Editor : Rie Morijiri
Deputy Chief Editor : Koichi Shimokawa
Editors : Tadashi Maruyama
Mikio Takeda
Mituhiko Sugihara
Takeshi Nakajima
Futoshi Nanayama
Junko Komatsubara
Yuichiro Fusejima

Secretariat Office

National Institute of Advanced Industrial Science and Technology
Geological Survey of Japan
Geoinformation Service Center Publication Office
E-mail : g-news-ml@aist.go.jp

GSJ Chishitsu News Vol. 5 No. 3
Mar. 15, 2016

Geological Survey of Japan, AIST

AIST Tsukuba Central 7, 1-1-1, Higashi, Tsukuba,
Ibaraki 305-8567, Japan

Maeda Printing Co., Ltd

