

海底重力計見学記

—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—

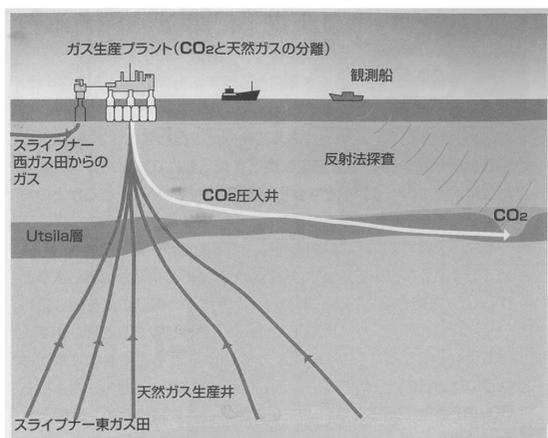
杉原光彦¹⁾

1. はじめに

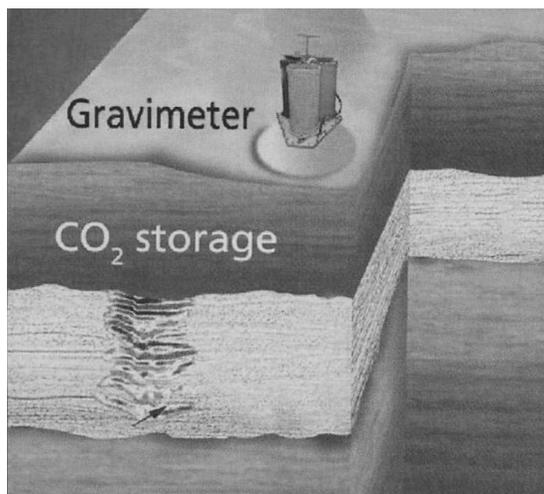
地球温暖化対策のためにCO₂排出削減の19%を担う技術として、CO₂の分離・回収・貯留(CCS)技術開発が期待されている(IEA, 2009)。このうち貯留に関しては地中貯留が現実的な方法として検討されている(産総研, 2008)。油田・ガス田では生産時に、ほぼ必ずCO₂も伴うが、それを分離して再び地下に戻すことで岩石中に残留する石油・ガスを置換して追いつ出す、という生産にフィードバックする増進回収法がすでに実用化されている。一方ノルウェー沖、北海油田のスライプナー海域では天然ガスを生産するスタットオイル社がガス生産層とは別の海底下1,000mの砂岩層(ウッチラ層)に年間100万トン貯留する事業を1996年から実施している。ここではCO₂貯留開始前の1994年から約2年毎に3次元反射法地震探査を行って貯留状況をモニタリングしている(第1図)。こうした現状認識を含めCO₂に関する全般について奥山

(2010)が簡潔明快に解説している。

日本でも大規模なCO₂地中貯留実験の実施を検討する時期にきている。日本ではまとまったCO₂排出源が沿岸地域に多いので、輸送コスト抑制および輸送に伴うCO₂排出抑制の観点から沿岸での地中貯留実施が検討されている(薛・中尾, 2008)。モニタリング手法としては反射法地震探査が基本的とされるが、私たちは重力モニタリングも検討している。スライプナーでは反射法地震探査とほぼ同時期に海底重力計を使った重力モニタリングも実施されている(Alnes *et al.*, 2008など; 第2図)。反射法地震探査は地中に注入したCO₂の貯留領域の形を細かく描き出す。一方、重力調査は貯留領域と測定点の間で遮蔽されることなく質量分布の積分量を測定する。分解能の点では反射法よりも鈍いが全体量を把握しやすいという特



第1図 スライプナーでのCO₂地中貯留の概要(奥山, 2010)。



第2図 スライプナーガス田でのCO₂地中貯留に関連して実施されている重力モニタリングのイメージ図(Reisewitz, 2008を改変)。反射法探査によって検出された貯留状態も示されている。

1) 産総研 地圏資源環境研究部門

キーワード: 海底重力計, CO₂地中貯留, 重力モニタリング, 火山モニタリング, ROV



写真1

スクリプス海洋研究所地球物理研究室がある建物の外観。歩道橋を渡ったところが4階。

徴があり、反射法地震探査と補完し合うことができる。また、想定されるCO₂貯留域の直上で測定するために海底重力計を用いたとしても海域での反射法に比べれば実施コストは小さい(Zumberge *et al.*, 2008など)。

最近、私は2箇所では海底重力計を見学する機会があった。見学場所の1つはスライプナーで使用された海底重力計システムを開発した米国スクリプス海洋研究所の研究室、もう1つは産総研が新たに導入した海底重力計の東京湾での実海域試験である。その2箇所での見学と文献を通して得た知見に基づいて、海底重力計によるCO₂地中貯留モニタリング実施の可能性について考えてみた。

2. スクリプス海洋研究所での見学

スクリプス海洋研究所はカリフォルニア大学サンディエゴ校に属し、米国カリフォルニア州南端の大都市サンディエゴ郊外のラホーヤ市の海岸近くにある。海底重力計開発チームの代表者ザンバージさんに見学希望を伝えたところ、すぐに承諾していただいた。返信には研究室がある建物はGoogleストリートの映像で確認できるので間違えることはないだろうとのコメントがあったが、特徴的なその建物はすぐにわかった(写真1)。歩道からの入口へは吊橋風の歩道橋を渡るのだが、建物の向こうには雄大な太平洋が広がっていて海洋研究所に相応しかった。建物本体に外付けしたようなエレベータで階を移動して研究室に入った。ザンバージさんの居室には太平洋を望む大きな窓があって、その窓を背にしたザンバージさんに向か

い合う席を勧められた。間もなく同じ研究グループのハワイ出身の日系人だが日本語は全く話せないというササガワさんも加わった。Geophysics誌の重力モニタリング特集号には彼らのグループによるスライプナー関連の論文4つ(Zumberge *et al.*, 2008など)と一緒に私たちの地熱地域での重力モニタリングの論文(Sugihara and Ishido, 2008)が掲載されていたが、そのことに関する自己紹介から話は始まった。私たちのモニタリングで大きい役割を果たしたFG5絶対重力計の開発に2人とも大きく貢献していた。FG5の開発過程をまとめたFaller (2002)には、大学院生当時のザンバージさんが「Zumbergeの装置」と呼ばれた開発途上モデル器を調整作業中の写真が掲載されている。一方、FG5の測定精度を評価したSasagawa *et al.* (1995)も良く引用される論文だ。彼らが以前手掛けていた海底絶対重力計(Zumberge and Canuteson, 1995)の続報が気になっていたので尋ねた。ザンバージさんは、スタットオイル社から、実際に現場で使える重力計を早く作るように催促されたので海底絶対重力計の開発は断念して、現在の装置開発に専念したと答え、このあたりから本題に移った。Sasagawa *et al.* (2003)からZumberge *et al.* (2008)までのわずかの間に海底重力計測の精度が格段に良くなった理由を問うと、2人とも丁寧なゆっくりと詳しく話してくれた。私が聞き取れるようにという配慮を感じた。

実際の装置を実験室で見ながら説明しよう、ということで実験室に移動した。実験室の壁は木肌がむき出しで吹き抜けになっており大きい木造船室内にいるような趣があった。そこには海底重力計本体がクレーンのフックに掛かった状態でテーブルに載っていた



写真2 スクリプス海洋研究所が開発した海底重力計の外観。3台の重力計ユニットが組み込まれている。

(写真2)、写真撮影の可否を尋ねると何を写しても良いとのことだった。スライプナーの現場では、海底重力計はこの状態で母船から測定地点までROV(遠隔操作型無人探査機)で運ばれる(写真3)。海底重力計は同型の3台の円筒型の重力計ユニットをフレームに収めた形になっている。そのフレームが移動時の衝撃の影響を抑え、また移動時の安定な姿勢維持に効果的で測定精度の向上にも貢献したということだった。少し奥まった場所にはユニットの中が見える状態で置かれていた(写真4)。ユニットの最下部には測定点の位置(水深)を計測するための水圧計がセットされている。その上部に陸上で常用される可搬型重力計(シントレクスCG3MまたはシントレクスCG5)の中味が組み入れられた構造になっていた。元は1枚の基板を円筒型ケースに収められるように2つに分けた基板に作り変えたものをシントレクス社が提供してくれたそうだ。2台のユニットから伸びたケーブルが隣の機のPCに接続されていた。2台のディスプレイに同じような制御画面が表示されていた。1つの重力計ユニットが1つの画面で制御されるので、スライプナーの

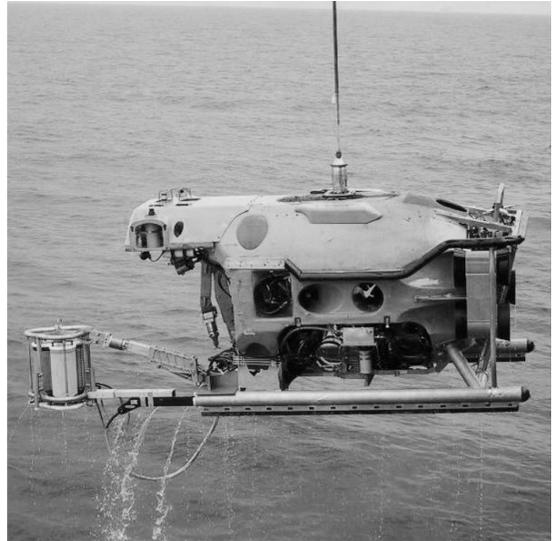


写真3 スライプナーで使用されている海底重力計とROV(遠隔操作型無人探査機) (Nooner et al., 2007)。母船から有線を介して制御される。

現場では3つのユニットを制御するために3つの制御画面が母船に置かれたPC画面に表示されるそうだ。CG3M重力計の後継機がCG5重力計で私たちも陸上での重力モニタリングに使用している(写真5)。両者の大きさはかなり違うのだが、海底重力計用ユニットでは同じ円筒ケースに再構成して使用するので、3台のユニットをフレームに組み込む際にはCG3M重力計とCG5重力計を混在させることもあるそうだ。シントレクス重力計の性能の個体差が大きいことを見聞きしていたので、そのことを尋ねると、大きくうなずき、全部で7台購入して、状態の良いユニットを3台選んで母船上でフレームに収めて使用していると答えた。7台という数字に驚くと、1日の航海に必要な費用に比べれば陸上用可搬型重力計1台の購入費用(千数百万円)は高くはない、船の調査時間を無駄にしないことが何より重要だと言った。3台のユニットを組み込むという設計も、その理由によるのだろう。

ザンバージさんの居室に戻って、日本沿岸域でのCO₂地中貯留に関して重力モニタリングする場合について参考意見を求めた。仮定の多い話にも丁寧に答えてくれた。途中、彼らが海底に設置している測定台は瀬川・藤本(1988)を参考にして改良したもので良い結果につながったという話も出た。見学終了後、ササガワさんが自家用車でホテルまで送ってくれた。



写真4 スクリプス海洋研究所が開発した海底重力計の1つのユニットの内部。CG3M重力計を使用したものもCG5重力計を使用したものも同形。一番底に水圧計が装着してある。



写真5 陸上用可搬型重力計、CG3M重力計(左)とCG5重力計(右)。

車内でササガワさんは海底絶対重力計については試したいアイデアがあると話した... ように聞こえた。運転中ということもあって聞き返すのは躊躇した。内容の詳細を確認できぬままササガワさんの話の穏やかなリズムに合わせてうなずいていた。

3. 東京湾での海底重力計の実地試験

日本国内ではラコスト重力計のセンサーを使用した海底重力計による調査が時々行われていた(駒澤ほか, 1996など)が, 2000年頃までにその重力計は利用不可能となった。一方, シントレクスCG3M重力計を使った海底重力計を藤本ほか(1998)が開発し, 産総研が関係する調査でも使われた(上嶋ほか, 2006)。最近, 藤本ほか(2009)が改良器を発表したが, CG3M重力計の代わりにCG5重力計を使用した川崎地質製の海底重力計を産総研で導入することとなり(大熊ほか, 2010), 2010年2月22日に実海域試験が行われた。その際に同乗して見学した。

横須賀基地入口を右折して三笠公園に入り海岸に到着したところに横須賀新港の門があった。門の奥

の道路上に球形の計測器が見えた。それが、この日、東京湾で実地試験を行う海底重力計だった。岸壁での調整作業が終わりユニック車のクレーンで、すぐ横に接岸していた調査船に載せた。調査船はヴェルニーⅢ号19トン。一見、映画ジョーズに登場するポートに似ていると感じ、頭の中で不気味なテーマ曲が鳴って、不安の小波が立った。しかし本日は天気晴朗で波も穏やか、調査航海にはもってこいの日だ。甲板のベンチに座った私の眼前で海底重力計を甲板上にロープで固定する作業が行われた。海底重力計の向こうには三笠公園に設置されている日本海海戦ゆかりの戦艦三笠が見えた。そのマストにはZ旗がへんぼんと翻っていた(写真6)。出港から約1時間で目的地の三浦半島金田湾沖に到着した。アンカーを投入し、船の向きが安定したところで重力計を海底に降ろす作業が始まった。甲板に固定していたロープをはずし、最終的には12φ編みロープ1本が繋がった状態(写真7)で海面下に降りていった。ウインチから繰り出されたロープの張力で海底到着を判断し、その後はロープの動きに合わせて時々エンジンを作動させて船を動かし、海底重力計の静置状態を数分間維持した。その間、GPSによる船位置確認、測深器計測等を行った。その後、重力計を引き上げ始めた。海中に重力計の白い姿が現れて海面に近づいてくるのを見て、予定通りとはいえ、皆、安堵した。重力計を甲板に引き上げてロープで固定した後で、球型耐圧



写真6 調査船ヴェルニーⅢ号の甲板に固定した海底重力計。後に見えるのはZ旗を掲げた戦艦三笠。

容器の水中用コネクタにケーブルを接続し、ノートPCに転送したデータを確認した。一通りの作業を見た駒澤正夫さんは、ラコスト型を使用した時(駒澤ほか, 1996)に比べるとクランプ不要のシントレクス重力計を使用した装置はかなり取り扱いやすいとコメントした。同様の作業を3箇所で行って、実海域試験は無事に予定を終えた。

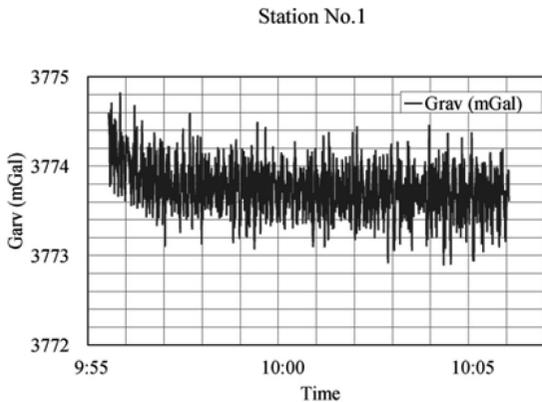
横須賀新港に戻る途中、藤本ほか(1998, 2009)の海底重力計の開発に携わり、今回の製作も担当したメーカーの方から興味深い話を聞くことができた。CG5の改造についてはシントレクス社から認められた作業内容はかなり制約されていた。球型耐圧ケース内には2軸のジンバルを置いて、そこに陸上用可搬型CG5重力計が、そのままの形で取り付けられているが、耐圧容器内に設置されたデータロガーにオフライン記録される機構になっている(大熊ほか, 2010)。CG3M重力計を陸上で使用する時は、6Hz内部信号



写真7 調査地点で海底重力計を海底に降ろす作業。

から内部処理された1秒毎の値について秒単位で指定した時間の平均値を指定した時間間隔で記録する。標準的な陸上測定では120秒間の平均値を評価して計測値とし、それを必要に応じて数回、繰り返す。CG5重力計による陸上の計測も同様に行われるが、CG5重力計には6Hz内部信号を記録する機能も提供されるようになった。その機能を私も利用していた(杉原, 2010)が、今回導入した海底重力計では、この機能を使って、ひたすら内部信号を連続記録するのである。CG3M重力計とCG5重力計の開発時期の違いによる逸話も聞いた。CG5重力計には普通のADコンバータが使われているが、CG3MではVF変換が行われているとのことだった。CG3M重力計は1980年代に構想・設計され(Hugill, 1988)、1990年代になって普及し始めた。1980年代に私は微小地震観測に関わっていたが、高周波サンプリングを予算内で実現するために同様の検討を行っていた(伊藤・杉原, 1987)ことを思い出した。

現場で得られた記録を第3図に示す。スライブナーでは数mGalを超える数秒の卓越周期のノイズがあったそうだが、そのような成分は認められない。外洋と内湾の違い、深度の違い、海況の違いのためだろう。シントレクス重力計に特徴的な短期ドリフトは認められる。これはスライブナーでも確認された。そして、この短期ドリフトの評価方法を変更したことがSasagawa *et al.* (2003)からZumberge *et al.* (2008)の精度向上の理由の1つでもあった。陸上の重力モニタリングで数 μ Galの精度を追求する場合にも同様の短期ドリフトの評価方法が問題になることは私たちも経験し



第3図 東京湾内金田湾沖で行った海底重力計の実地試験記録例(大熊ほか, 2010)。

(Sugihara and Ishido, 2008), CG5重力計とCG3M重力計の比較に関連して杉原(2010)でも検討した。Zumberge *et al.* (2008)では地熱モニタリングにおいてAllis *et al.* (2000)が行ったのと同様に20分間、静置して観測し、初めの10分間の記録を除いて評価することで解決した。

今回見学した海底重力計については、同一の測定台に繰り返し設置する方法は用意されていないので、今すぐに、これを重力モニタリングに使用するのは難しい。しかし良好な記録を確認できたことにより、将来的にはAOV(自立型無人探査機)やROV(遠隔操作型無人探査機)との組合せで使用する可能性はあると言えるだろう。最近になって、シントレクス社自身が海底重力計を開発していることを知った。それはCG5重力計1台分を球形の耐圧容器に納めたもので、形状と性能は産総研が導入したものに近い。日本の開発担当者への対応がスクリプスに対するのと比べて不親切に感じたのは、自社開発の時期と重なったためかもしれないと思った。

4. おわりに

海底重力計については、海底絶対重力計のような新たな技術開発の可能性はあるだろうが、近い将来に開始が予想される日本におけるCO₂地中貯留の実証試験に適用するならば、単体の精度としては実用レベルであることが確認されている既存の海底重力計の利用を前提にするのが現実的と思われる。特にスクリプス海洋研究所の装置はモニタリングの現場で

実績があり、陸上計測と同等の測定精度を実現しているの、技術的にはそのまま適用可能であろう。但し、海底重力計を実際に使用するためにはROVや調査船を含めたシステムが必要であり、現在稼働中のシステムをそのまま日本周辺で適用するとすると、北海からはるばる回航するコストが膨大となり、現実的ではない。日本での調査用にROVかAOVを用意してシステムを組みなおす必要があるだろう。その場合、スクリプス海洋研究所の海底重力計ではなく球形の海底重力台を利用する可能性もあるだろう。もしも日本でCO₂圧入を実施する場所が沿岸ならば母船は使わずに港を基地とする可能性もあるかもしれない。重力計以外の問題解決の検討も重要である。スライプナーでは、海底に設置した測定台がトロール漁船によって大きく動かされたり、ナマズに似た底生魚が測定台の下に棲みついて測定台が微妙に動いてしまったことがあったようだ。日本でも同様の事象への対策が必要だろうし、測定台に動きがあったかどうか、確認するシステムが必要かもしれない。例えば近接して複数地点の測定台を設け、互いの位置を計測し合うとともに1台が失われても残りの測定台で維持する、というような運用も考えられる。

藤本ほか(2009)は海底重力計の用途の1つとして地震・火山噴火予知のための重力モニタリングをあげている。重力モニタリングが火山活動の把握に貢献した事例は多い(Brown *et al.*, 1987; 古屋ほか, 2001など)が、カルデラ火山など活動的な火山地域では大半が海や湖などの水域で占められている場合もあるので、そこでの海底重力計の利用が期待される。私たちは、以前、ニュージーランドのカルデラ湖でGPSによる湖面起伏計測を行って重力異常を推定しようとした。その時、共同研究者のIGNSのスコットさんに、この方法はモニタリングに使えるのかと聞かれたことがあった(杉原ほか, 1996)。水域での重力モニタリングの必要性は多くの火山関係者が認めるだろう。

JVGRの略称で知られる火山研究関連の代表的な論文誌に表題が「死亡」で始まる論文が掲載されたことがある(Baxter and Gresham, 1997)。重力モニタリング実施中に、この分野を先導していたG.C. Brownたちが噴火に遭遇して発生した死亡事故が、熔けて破壊された重力計の写真入りで報告されている。活動的な火山であっても計測作業中は恐怖をそ

れほど感じないことは私も経験している(西・杉原, 1992)が, 活動的な火山での調査には危険性が厳然としてある。陸上の重力モニタリングでは高精度測定を実現するために1箇所毎に10分程度静置して測定後, 次の測定地点に移動, という作業を続けるため, 危険地帯での滞在時間も長くなりがちだ。この点, 遠隔操作できるROVやAOVを利用した海底重力計の導入は魅力的だ。

CO₂モニタリングのためにROVまたはAOVによる海底重力計利用技術の開発が進めば, 火山活動モニタリングにも役立つであろう。あるいは, 火山への適用研究が先行して, その恩恵をCO₂地中貯留モニタリングが享受することになるかもしれない。いずれにしても海底重力計によるモニタリング技術開発への期待は大きいと言えるだろう。

謝辞: 見学の便宜を図ってくださった大熊茂雄氏とZumberge氏, Sasagawa氏に感謝します。CO₂地中貯留への海底重力計の適用について一緒に検討した西 祐司氏に感謝します。CO₂地中貯留に関してご教示いただいた石戸経士氏, 中尾信典氏, 奥山康子氏に感謝します。

引用文献

- Allis, R.G., Gettings, P. and Chapman, D.S. (2000) : Precise gravimetry and geothermal reservoir management: 25th Workshop on Geothermal Reservoir Engineering, Stanford University, Proceedings, 179-188.
- Alnes, H., Eiken, O. and Stenvold, T. (2008) : Monitoring gas production and CO₂ injection at the Sleipner field using time-lapse gravimetry, *Geophysics*, 73, WA155-WA161.
- Baxter, P. J. and A. Gresham (1997) : Deaths and injuries in the eruption of Galeras volcano, Columbia, *J. volcanology and geothermal research*, 77, 325-338.
- Brown, G.C., H. Rymer and R.S. Thorpe (1987) : The evolution of andesite volcano structures: new evidence from gravity studies in Costa Rica, *Earth and Planetary Science Letters*, 82, 323-334.
- Faller, J. E. (2002) : Thirty years of progress in absolute gravimetry: a scientific capability implemented by technological advances, *Metrologia*, 39, 425-428.
- 藤本博己・押田 淳・古田俊夫・金沢敏彦 (1998) : 海底重力計の開発, *海洋調査技術*, 10, 25-38.
- 藤本博己・野崎京三・河野啓幸・伝法谷宣洋・押田 淳・小泉金一郎・三石 晋・岩本綱司・金沢敏彦 (2009) : 海底重力計の改造と沿岸域における海底重力測定, *測地学会誌*, 55, 325-339.
- 古屋正人・大久保修平・田中愛幸・孫 文科・渡辺秀文・及川純・前川徳光 (2001) : 重力の時空間変化でとらえた三宅島2000年火山活動におけるカルデラ形成過程, *地学雑誌*, 110, 217-225.
- Hugill, A. L. (1988) : The new Scintrex CG-3 automated gravity meter: description and test results, *proc. ASEG/SEG conference*.
- IEA (2009) : Technology roadmap-Carbon capture and storage. http://www.iea.org/papers/2009/CCS_Roadmap.pdf.
- 伊藤久男・杉原光彦 (1987) : 岩手県湯ノ上地域における微小地震観測システム, *地調月報*, 38, 247-264.
- 上嶋正人・石原丈実・小泉金一郎・島 伸和・押田 淳・藤本博己・金沢敏彦 (2006) : 瀬戸内海播磨灘での海底重力測定, *海洋調査技術*, 18, 17-27.
- 駒澤正夫・太田陽一・渋谷昭栄・熊井 基・村上 稔 (1996) : 大阪湾の海底重力調査とその構造, *物理探査*, 49, 459-473.
- 西 祐司・杉原光彦 (1992) : ニュージーランドホワイト島火山微小地震観測記, *地質ニュース*, 457, 34-49.
- Nooner, S. L., O. Eiken, C. Hermanrud, G.S. Sasagawa, T. Stenvolt and M.A. Zumberge (2007) : Constraints on the in situ density of CO₂ within the Utsira Formation from time-lapse seafloor gravity measurements, *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 1, 198-214.
- 奥山康子 (2010) : CO₂のきほん, 誠文堂新光社, 143p, 東京.
- 大熊茂雄・駒澤正夫・押田 淳 (2010) : 海底重力計の製作と実海域試験, 平成20年度沿岸域の地質・活断層調査研究報告, 地質調査総合センター速報 No.49
- Reisewitz, A. (2008) : Buried at sea, *Scripps institute of oceanography, explorations, the magazine of ocean and Earth sciences*, October 2008.
- 産総研 (2008) : 二酸化炭素地中貯留に関する研究報告書, 地質調査総合センター速報No.44, 255pp.
- Sasagawa, G. S., Klopping, F., Niebauer, T. M., Faller, J. E. and Hilt, R. L. (1995) : Intracomparison tests of the FG5 absolute gravity meters, *GRL*, 22, 461-464.
- Sasagawa, G.S., W. Crawford, O. Eiken, S. Nooner, T. Stenvolt and M.A. Zumberge (2003) : A new sea-floor gravimeter, *Geophysics*, 68, 544-553.
- 瀬川爾朗・藤本博己 (1988) : 相模湾に設置された海底ステーションの観察及び音響トランスポンダーの交換, *海洋科学技術センター試験研究報告*, 251-257.
- 杉原光彦 (2010) : シントレクス重力計CG5の特性評価, 広河原CO₂間欠泉での調査, *日本地熱学会誌*, 32, 21-30.
- Sugihara, M. and Ishido, T. (2008) : Geothermal reservoir monitoring with a combination of absolute and relative gravimetry, *Geophysics*, 73, no.6, WA37-WA47.
- 杉原光彦・宮崎純一・駒澤正夫 (1996) : 湖上GPS調査によるジオイド起伏計測, *ニュージーランド, タウポカルデラへの適用*, *地質ニュース*, 507, 33-44.
- 薛 自求・中尾信典 (2008) : CO₂地中貯留, *地学雑誌*, 117, 722-733.
- Zumberge, M. A. and E.L. Canuteson (1995) : An Ocean Bottom Absolute Gravity Meter, *IAG Symposia*, 113.
- Zumberge, M.A., H. Alnes, O. Eiken, G.S. Sasagawa and T. Stenvolt (2008) : Precision of seafloor gravity and pressure measurements for reservoir monitoring, *Geophysics*, 73.

SUGIHARA Mituhiko (2011) : A study of gravity monitoring using sea-floor gravimeter: field trips on sea-floor gravimeters.

<受付: 2010年8月3日>