

孔内重力計測の疑似体験

杉原光彦¹⁾

1. はじめに

地下500m展示室行きのエレベータに乗り込んで早くシントレクス重力計CG5をセットした。約10秒後にエレベータのドアが閉まって降下し始めた。エレベータ特有の加速度はスタート直後には感じられたが、その後は意外なほど感じない。等速度運動中なのだろうか、まるで静止しているようだ。重力計の表示も予想以上に安定している。エレベータでは重力計はどのような記録を示すのかという軽い好奇心で計測を始めたが面白い記録がとれるかもしれないと期待がふくらむ。時々、窓から灯りに照らされた地下の途中階の様子が見える。ふと、もしも今ロープが切れて自由落下し始めたら何秒で地底に着くのだろうかと思った。静止状態から一定加速度 g (m/s^2)で t 秒間に進む距離は $gt^2/2$ 。地表付近の重力加速度は約 10 m/s^2 (1,000Gal)だから500mの坑底に激突するのは約10秒後だ。「これが無重力状態か」と認識して重力計の表示を見たとしても相対重力計だから0を表示するわけでもないし、そもそもロープが切れた衝撃で重力計はバランスを失っているだろう... などと考えていると、「あと50秒で到着します」というアナウンスが耳に入った。少し揺れを感じた後、ついに到着した。重力連続記録を停止しようとして目に入った数値に一瞬、手が止まった。変だな、予想した重力値よりかなり小さい。地下施設の効果か、局所的な重力異常があるのか、それとも“地下500m展示室”は実は浅

い所にあるのだろうか？

2. 地下での初めての重力計測体験

私が初めて地下での重力測定を意識したのは日本各地の重力基準点(国土地理院測地部, 1997)を利用してシントレクス重力計CG3Mの検定を試みた時だった(杉原・野崎, 1998)。同行した野崎京三さんの助言に従って各測定点では重力鉛直勾配も実測した。重力計の検定では重力値が知られていて、かつ重力差のある複数地点で重力計測を行い、重力計の変換係数を評価する。重力計検定のデータ処理は通常は重力データ処理手順(駒澤, 1998など)を一部入れ替えて行うが、器械高補正(器械高に重力鉛直勾配を乗じた値を差し引く)も必要である。通常は重力鉛直勾配値としてはフリーエア勾配を使うが、精密評価のためには実測値が望ましいということだった。訪れた重力基準点では通常通り専用三脚に重力計を静置して測定した後で、専用三脚に延長脚を接続して約50cm高い位置でも計測した。異なる高さでの2つの重力測定値の差から重力鉛直勾配を評価するためだ。得られた結果は興味深いものだった。那覇以外の羽田、千歳、札幌、鹿児島では通常のフリーエア勾配(0.3086mGal/m)とほぼ一致した(第1表)。那覇重力基準点と羽田重力基準点は地下1階で、他の3地点は地上にあった。地上の測定点での結果はわかりやすい。重力鉛直勾配の実測値が地球上の平均値に近

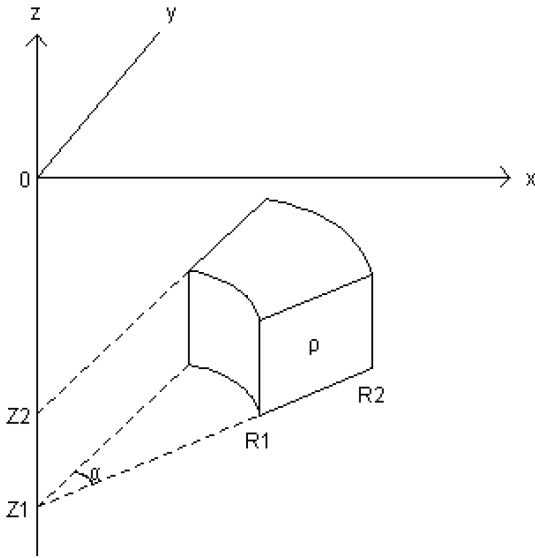
第1表 5か所の重力基準点での重力鉛直勾配測定値(杉原・野崎, 1998)。

重力基準点名	SapporoGS	ChitoseGS	HanedaGS	KagoshimaGS	NahaGS
重力鉛直勾配	0.30	0.31	0.30	0.31	0.26

(mGal/m)

1) 産総研 地圏資源環境研究部門

キーワード: 孔内重力計, エレベータ, CO₂地中貯留, 重力モニタリング, 重力鉛直勾配



第1図 (1)式に $\alpha/2\pi$ を乗じて扇型要素に適用する場合のパラメタ対応。ここで $z_1=0$, $z_2=H$, $\alpha=2\pi/N$ とすれば、駒澤(1998)で与えられた測定点の周囲の地形効果補正式になる。

ということだ。那覇と羽田の値はどのように解釈すれば良いか？

密度 ρ の中空円筒によって円筒軸の位置で生じる引力 Δg は次式で与えられる(Torge, 1989の4.27式を改変)。

$$\Delta g = 2\pi G\rho \left(\sqrt{r_2^2 + z_1^2} + \sqrt{r_1^2 + z_2^2} + \sqrt{r_2^2 + z_2^2} + \sqrt{r_1^2 + z_1^2} \right) \dots \dots \dots (1)$$

ここでGは万有引力定数、 r_1 は中空円筒の内径、 r_2 は外径、測定点から中空円筒下端までの高度差を z_1 、上端までの高度差を z_2 とした。この式の導出は地球物理学入門時に練習問題として試されることも多い。変形すればいくつかの有用な式が得られる。扇形に適用するならば 2π を頂角 α に置き換えれば良い(第1図)。また $r_1=0$ とすれば円柱の場合の式になるし、さらに r_2 を無限遠にすれば厚さ $\Delta z=(z_2-z_1)$ の無限平板(プーゲープレート)の式

$$\Delta g = 2\pi G\rho \Delta z \dots \dots \dots (2)$$

が得られる。計測位置と平板の間の距離に依存しないことが著しい特徴だ。この無限平板の上面では(2)式の引力が下向きに、下面では同じ大きさが上向きに働く。無限平板が水平ならば上面と下面での重力差は $-4\pi G\rho \Delta z$ となる。さらに地球全体の質量からの重力が地球重心からの距離で変化する効果も加えて、

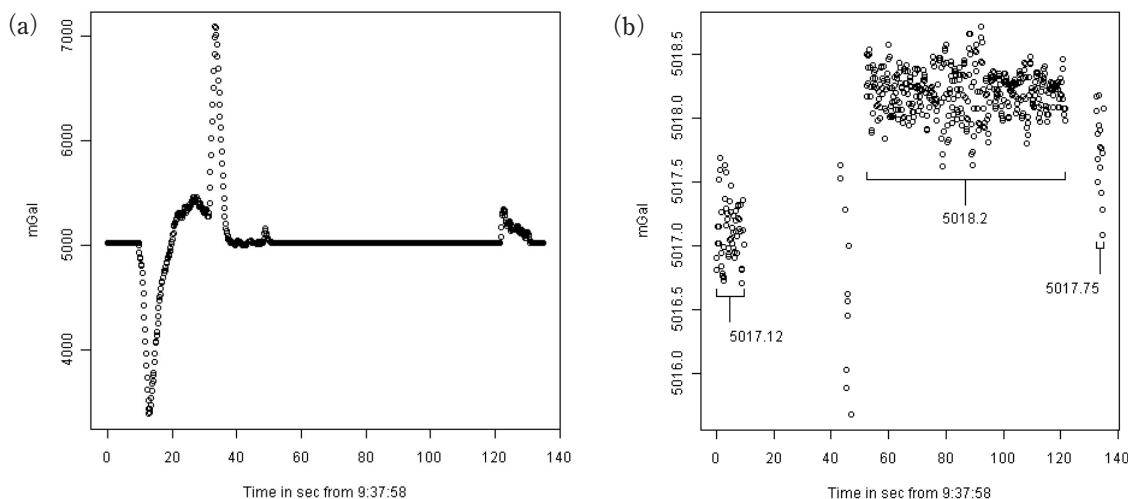
$$\Delta g = (F - 4\pi G\rho) \Delta z \dots \dots \dots (3)$$

が地表と地下 Δz での重力差となる。ここでFはフリーエア勾配である。

ここで再び那覇基準点と羽田基準点での重力鉛直勾配の測定値の解釈に戻る。仮に(3)式で表層密度を $2g/cm^3$ ($2,000Kg/m^3$)とすれば、地下での重力勾配は $0.14Gal/m$ となり実測値と異なる。この違いは仮定した表層密度が大きすぎた、あるいは無限平板近似がきつすぎたということだろう。実際には測定点の周囲には地下空間が広がっている。羽田基準点は地下1階とは言っても大規模な空港ビルの中心部にあるため、(3)式の密度 ρ がほぼ0なのでフリーエア勾配に近い値になるのだろう。那覇基準点については建物の詳しい構造は不明だが、羽田空港ビルほどの地下空間の広がりはない。測定点近傍に10数m径の空間の広がりを想定すると、実測値は説明可能である。

3. 地中エレベータでの重力計測記録

冒頭に紹介した「地中エレベータ」内での重力計測は久しぶりに地下での重力計測を意識する機会となった。測定場所は北海道幌延町にある幌延深地層研究センターPR施設、ゆめ地創館。外観は地上50mの展望台が目立つが、より興味深いのは地下500mの世界を体感できる展示室だ。見学順路に従って、ゆめ地創館の玄関を入りエスカレーターで2階に上がってからバーチカルトランスポーター500(VT-500)と名付けられたエレベータで“地下500m展示室”に向かう。この展示室が実際に何メートルの深度に位置するかは見学者には知らされない。私も知らずに重力計を携えてVT-500に乗り込んだ。その時に実際に得られた記録を第2図に示す。使用したCG5重力計は可搬型



第2図 地中エレベータでの重力計の記録. (a) 地上1階から“地下500m展示室”に到着するまでの記録. (b) 地上1階と“地下500m展示室”の深度で静止していた時の重力を詳しく見るために重力スケールを拡大して表示した.

自動重力計として普及しているシントレクス重力計の最新型で、前節で使用していたCG3M重力計をアップグレードしたものである。CG5重力計はオプションで6Hzの内部信号も記録することができる。第2図には、この6Hzの記録を変換して示した。CG5重力計は相対重力計なので絶対値には意味はない。第2図(a)で時間軸に沿って重力変化を追ってみよう。記録開始10秒後から重力値が急速に小さくなり、約15秒後には初期値に比べて約2Gal小さい最小値を記録した後、重力値は増加している。35秒後から今度は急に大きい重力値になった後、40秒後には、ほぼ初期値に近い重力値となって、その状態が120秒後まで続く。これがまるで静止しているような等速度運動と感じた時間帯だろう。その後一瞬わずかに増加した後、135秒後には再びほぼ初期値で一定となっている。CG5重力計は移動中の計測は想定していないので第2図(a)の解釈は慎重であるべきだが、エレベータの挙動を概ね対応付けられる。

出発前と到着後のエレベータが停止していた時間帯の重力値を良く見るために、重力の表示スケールを拡大してみる(第2図(b))。出発前と到着後のエレベータが停止していた時間帯の重力差は約0.6mGalであったことがわかる。これは(3)式に $\rho = 2.5\text{g/cm}^3$ 、 $\Delta z = 500\text{m}$ を代入して得られる $\Delta g = 49.5\text{mGal}$ に比べると非常に小さい。前節で見たような地下空間の効果だろうか？(3)式に $\Delta g = 0.6\text{mGal}$ 、 $\Delta z = 500\text{m}$

を代入すると $\rho = 3.67\text{g/cm}^3$ になるので、むしろ地下空間があることで見かけの密度が低下するのは逆の傾向だ。金属のような重い物が詰まっているのだろうか？(3)式に $\Delta g = 0.6\text{mGal}$ 、 $\rho = 2.5\text{g/cm}^3$ を代入すると $\Delta z = 6.1\text{m}$ になる。“地下500m展示室”は地下500mに位置するとは限らない。地下1階に再現されているのだとすれば深度6mで辻褃は合う。

それでは等速度運動中かと思われた時間帯の記録はどうだろうか？第2図(b)を見ると出発前の静止状態にあった時と同程度に安定しており、重力値は一定であったと思われる。つまりエレベータは等速度運動していたのではなく静止していたということだ。この間の重力値と出発前の重力差 Δg は約1.1mGal。前述と同様に評価すれば、(3)式で $\Delta g = 1.1\text{mGal}$ 、 $\rho = 2.5\text{g/cm}^3$ を代入すれば、 $\Delta z = 11.1\text{m}$ となる。“地下500m展示室”はかなりの広がりがあるので、見かけ密度はもっと小さくなると思われる。仮に $\rho = 1\text{g/cm}^3$ とすれば $\Delta z = 4.9\text{m}$ となる。従って“等速度運動状態と思われた時間帯”は地下1階相当の深度で停止していたと考えるのが妥当であろう。前述で、到着後の重力値は出発前との差 $\Delta g = 0.6\text{mGal}$ とした。第2図(b)からわかるように、“等速度運動と思われた時間帯”に比べて重力が減少しているように見えるが、この部分の記録は3秒弱、わずか16サンプルしかなく、それが有意とは言えない。地下1階に停止した状態を維持してドアが開いたか、あるいは、最後に少

し上昇してからドアが開いたかのいずれかであるだろう。“地下500m展示室”の深度はせいぜい地下1階くらいだろうということは経済合理性から容易に推定できるが、実際の測定とその考察は楽しい経験だった。

4. 孔内重力計測の特徴

前節の「地中エレベータ」内の重力記録から密度構造を推定する議論は実際の物理探査でも行われている。地上で使われる可搬型相対重力計を坑井に入れられるような細長い形状に組み立てた孔内重力計が使用され、(3)式を利用して重力差から密度 ρ を推定する(Smith, 1950など)。孔内重力計測による密度推定は石油探査の現場での実績がある。放射線を使う密度検層に比べて坑井極近傍の影響を受けにくく、より平均的な密度を反映する(遠藤, 1998)。日本国内では伊豆大島で行われたことがある(渡辺, 1998)。この時は筆者も見学に出かけたが、機器調整のために予定変更となり実際の測定を見ることは残念ながらできなかった。

これまで多くの種類の孔内重力計が提案された(Chapin, 1998など)。(3)式からわかるように重力差の測定精度と同程度に測定深度差の精度も重要である。そのために2つの重力計を組み込んだ孔内重力計を使って常に一定の深度間隔で重力差を測定する方式もある。最初の孔内重力計は弦の振動数変化として重力差を計測するものであった(Gilbert, 1952)。その後、ラコスト重力計を利用して作られた孔内重力計が主に使われてきた(Schmoker, 1978など)。最近になって、シントレクス重力計を利用した孔内重力計も登場し(Seigel *et al.*, 2009)、現場の状況に合わせて選択できるようになった。また重力偏差計による孔内計測も提案されていて試作機も発表されている(Golden *et al.*, 2007)。

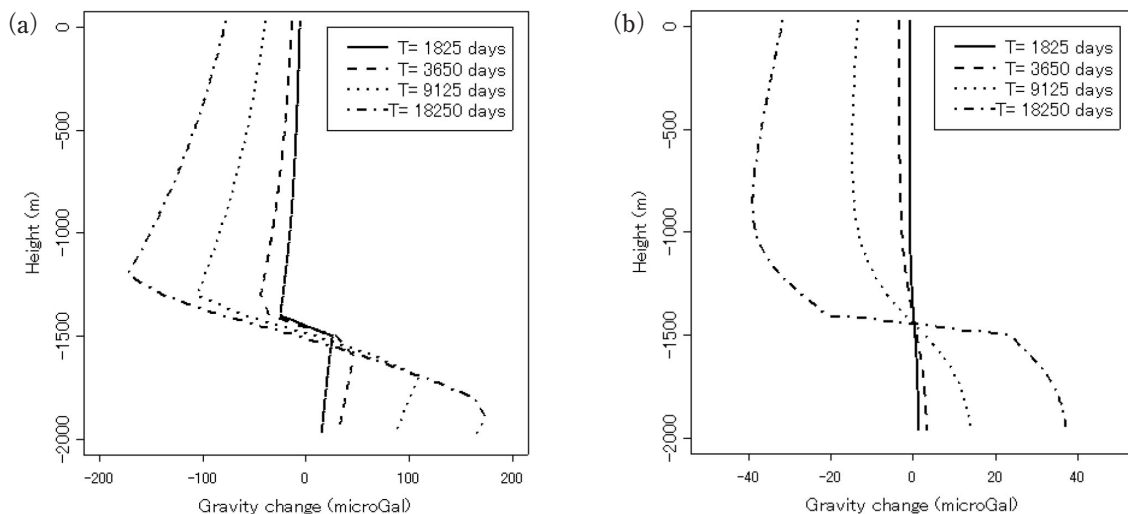
孔内重力計による重力モニタリングも提案され(Schultz, 1989)、油田開発現場での適用例もある(Alixant and Mann, 1995など)。重力モニタリングでは時間をおいて同一地点で重力測定を繰り返し、重力時間変化を評価する。このためには重力測定自体の精度以上に、いかに高精度で同一深度での再測定を行えるか、ということが重要である。現在は1cm以内の精度は実現している。かつて地熱貯留層変動探査(石戸・當舎, 2010)への適用が検討されたこともあ

る。耐熱性を工夫した孔内重力計は開発されているのだが(Hearst *et al.*, 1978)、2台の重力計を組み込んだ耐熱孔内重力計はないことで適用は見送られた(NEDO, 2000)。

孔内重力計の基本式(3)の ρ は見かけの密度と呼ばれる。一様密度の平板が積み重なった地下構造ならば(3)式の ρ は正しい密度を与えるが、そうでない場合は ρ は一種の重み付き平均値である。一般に地下構造は不明なことが多いので、このような単純化した取り扱いは便利であるが、前節での地下空間の効果を考慮する場合のように、坑井付近と遠方を区別してより詳しく解析したいこともある。その場合は(3)式ではなく、(1)式のように円筒で区分して解析すれば良い。1本の孔内重力計測データだけでは、方位により異なる構造(例えば水平方向にC字型をしているかO字型をしているか)は識別できない。地上で測定した重力データと孔内重力データを合わせて解析すれば3次元構造も解析できる(Lines *et al.*, 1988)。この場合は(1)式をさらに方位毎に区分した扇形(第1図)の集合で表現して計算値を足し合わせて評価することになる。孔内重力計をモニタリングに活用する場合は、ある程度の情報に基づいて地下構造モデルを想定し、シミュレーションを行って観測値と計算値を比較するので、簡略な(3)式を使うことは少ないであろう。

5. 孔内重力計によるモニタリング; CO₂地中貯留への適用可能性

地球温暖化対策の中でもCO₂地中貯留は具体的な対応策の1つとして実現に向けて検討が進んでいる(薛・中尾, 2008; 奥山, 2010など)。CO₂地中貯留が実行された場合、CO₂の地下における貯留状況を確認するために、どのようにモニタリングするかが重要な課題となる。最も有効な方法と考えられているのは反射法地震探査によるモニタリングであるが、重力モニタリングも有力な手法の1つとして注目されている。北海油田のスライプナーでは実際に海底重力計によるモニタリングが実施されている(Alnes *et al.*, 2008など)し、現場を想定した孔内重力計測の数値的な予測研究も行われている(Sherlock *et al.*, 2006; Gasperikova and Hoversten, 2008)。重力モニタリングは質量分布という反射法地震探査と別の側面から



第3図 東京湾岸を模したモデルによるCO₂地中貯留シミュレーションによる孔内重力計測結果予測(杉原・石戸, 2010). 年間1,000万トンのCO₂を1,400mの深度を中心に注入した場合に, 注入開始前を基準に半年後, 1年後, 2年後, 5年後に重力がどのように変化するかを示す. (a)は観測井が注入井と同位置にある場合, (b)は観測井が注入井から3km離れている場合.

CO₂の地中貯留状況を見られるので反射法を補完するモニタリング手法と考えられる。反射法地震探査のように地中に注入したCO₂の貯留領域の形を細かく描き出すことはできないが, 重力は貯留域と測定点の間の物質で遮蔽されることなく質量分布の積分効果を測定できる。分解能の点では鈍いけれども堅実なモニタリング手法と言えるかもしれない。また経済性にも注目されている。普段, 陸上で可搬型重力計により重力モニタリングを行っている私たちから見れば孔内重力計測はかなり高価な手法に思えるが, それでも反射法地震探査に比べると十分安価な手法と言えるようだ。

私たちが地熱分野の「貯留層変動探査法開発」(石戸・當舎, 2010など)で検討してきた重力モニタリング法をCO₂地中貯留に適用する研究を進めている(石戸ほか, 2006)。CO₂生産源に近い東京湾岸において既存データに基づいて地下構造を数値モデル化し, この数値モデルに対してCO₂地中貯留を行った場合について数値シミュレーションで評価してみた(西ほか, 2009)。年間1,000万トンのCO₂を1,400mの深度を中心に注入した場合に孔内重力計で計測される重力変化を計算した結果が第3図である(杉原・石戸, 2010)。孔内重力測定を行う計測井が注入井とほぼ同位置の場合と水平に3km離れている場合につい

での計算結果を示した。計測井と注入井がほぼ同位置の場合には孔内重力計測の特徴が良く現れている(第3図(a))。注入深度を境に重力変化の極性が逆転しており, 注入深度では重力変化量はゼロに近い。重力は引力の鉛直成分なので大きい質量変化があっても真横には影響が出ないためである。それでも通常, 重力計測が行われる地表に比べれば, 信号源に近い効果で地下での信号レベルは大きい。孔内重力計は地上計測で常用される可搬型相対重力計とセンサー本体は同じなので分解能も測定精度も同等の数 μ Galになりうる。従って信号レベルが大きい坑内で計測を行うことは, より明確に地下の状態を把握できることになる。また, 地上での測定だけでは深度方向の状態変化に対しては鈍感になるが, 孔内重力計で計測される深度方向の変化のコントラストは明瞭であるため, CO₂地中貯留のモニタリング手法として極めて魅力的である。同様の特徴は水平に3km離れた場合の計算例でも確認できる(第3図(b))。

2010年度から米国の調査地で日米共同研究が行われることになった。米国には, 油田の増進回収手段の1つとしてCO₂地中注入が既に事業化されている所や既に大規模な実証試験のためのテストサイトになっている所が多く, 地中に注入するために使用されるCO₂用のパイプラインも相当な総延長距離がある。こ

の原稿執筆時点では日米共同研究の調査地は未定だが、大規模なCO₂地中貯留実験が実施される場所でいくつかの手法にて試験的なモニタリングを行う予定である。その際に、前述のように効果的なモニタリング手法となりうる孔内重力計測もぜひ実施してみたいと考えている。現在、テストサイトとして候補にあがっている場所では、石油・ガス等の生産を既に行っており、現在の生産対象としている地層よりもさらに深部にCO₂が注入されることになる。その深度は2,000mを超える可能性がある。このような深部への貯留実験では、地上での重力観測だけでは研究期間中に十分な解析は難しいかもしれない。しかし、孔内重力計を導入すれば、この場合でも十分な解析を期待できる。このような有効性の他に、孔内重力計測を米国のテストサイトで実施するメリットがさらに2つある。1つは、想定されるテストサイトが陸上の既存開発地域であるため、多くの利用可能な既存井が期待できることである。新規掘削することなく孔内重力計測を行える可能性があること、さらに複数坑井での測定の可能性さえもあることは魅力的だ。もう1つのメリットは、孔内重力計測を行う会社が米国にあることで、これはコストの点も含めて都合が良い。米国のテストサイトは既存開発地域であるために地下情報が多いのでモニタリングの精度向上も期待できる。例えば産総研が今までSPモニタリングを実施してきたAneth地域(西ほか, 2010)では3次元地下構造モデルに基づいた孔内重力計測値が試算されている(Fausset and Butler, 1979)。重力モニタリングでは構造自体は時間変化には影響しないが、注入したCO₂が構造に規制されて3次的に動くことは考えられるので、このような既存データを取り込んで高精度の解析を行うことが期待できる。

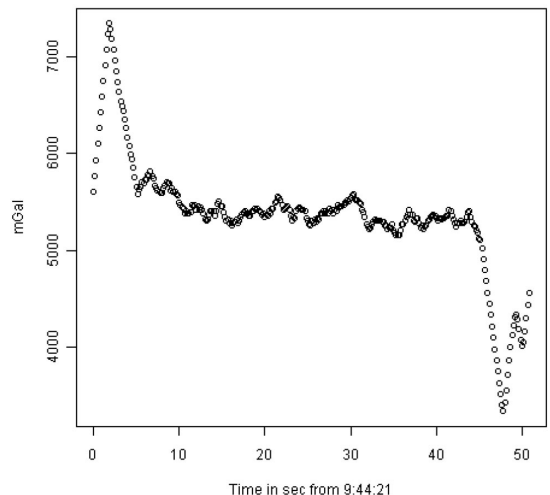
オーストラリアの実証試験地Otway(奥山ほか, 2008)での仮想計算(Sherlock *et al.*, 2006)、米国の油田・炭田を想定した仮想計算(Gasperikova and Hoversten, 2008)、そして私たちの仮想計算(杉原・石戸, 2010)など孔内重力計を想定したシミュレーション評価例は蓄積されており、また利用可能な孔内重力計の種類も増え、今や実際に孔内重力計測を行う段階にきていると思われる。地熱プロジェクトでは高温対応への不安から孔内重力計によるモニタリングを断念することとなったが、CO₂を圧入する地層では、そこまでの高温環境ではないことが予想されるので、実

現可能性があると期待している。

6. おわりに

最初のきっかけは塔を利用した重力計検定の報告(Romaides and Sands, 1988)だった。重力計検定に必要な重力差を塔の高低差に求めるのである。重力差は必ずしも十分な大きさでなくても手軽に測定できそうだし、ラコスト重力計で見いだされたような測定レンジの中での周期的な変換係数の変化を調べるには役立ちそうに思えた。また重力鉛直勾配値には、地中での計測ほどではないが、地下構造の情報も見込まれる。その後、シントレクス自動重力計による連続測定に親しむようになってからは(杉原・西, 2010など)、塔の中のエレベータに重力計をセットして連続記録すれば、どのような記録がとれるだろうか、と思うようになった。長らくつくば市のランドマークになっていた高層気象台の鉄塔を見上げては、また最近では、世界一の試験用エレベータが茨城県内に完成したというニュースを聞いた時、高さを増していくスカイツリーを目にした時に同じことを思った。

最後に幌延の「地中エレベータ」での重力記録について補足する。見学順路では“地下500m展示室”から別のエレベータで地上50mの展望台に登った後、地上2階に戻る。実は“地下500m展示室”から展望台へのエレベータの中でも重力連続測定を行った



第4図 幌延の“地下500m展示室”から“地上50m展望台”への上りのエレベータ内での重力連続記録。

(第4図)．出発前と到着後の静止状態は記録しそびれたが出発直後と到着直前の大きい加速は記録されていた．出発前の静止状態を基準にすれば、まず、上り始めた直後に正の力が強く働いた後、ゼロレベルに近い状態が続き、到着直前に負の力が強く働いてから展望台に到着する．これに対して第2図(a)からわかるように地下行きエレベータでは下がり始めた直後に大きい力が働き、その後、逆向きの大きい力が働くまでは上りエレベータと同様の動きだ(極性は逆だが、これは上りと下りの違いに対応する)．従って地中エレベータでは記録開始から40秒までで最終目的地の深度に到着し、あとは事実上停止していたのではないかと思われる．地下500m展示室到着直前の重力記録にやや加速度増加を示す部分があるので地中エレベータのドアが開く直前に少し上昇した可能性は残る．6Hz記録には傾斜2成分も含まれている．CG5重力計の内部ソフトが古いバージョンの時に見られた不自然なトビ(杉原, 2010)は認められず、良好な記録が得られていたが、到着時には傾斜は100秒角を超えていた．この傾斜データはさらなる考察の手がかりになるが、あまり深入りするのは避けるべきだろう．CG5重力計は静置して計測することを想定した測定機だ．クランプ機構がなく、移動中も記録は可能だが、その品質は保証されていない．第2図(a)や第4図に示されるエレベータの挙動は定性的には理解できるが定量的解析の対象にはならない．第2図(a)はエレベータが静止状態から下降して静止するまでの全期間の加速度記録なので、試しに積分してエレベータの位置を計算してみた．最終位置は重力基準値の仮定に大きく依存するが、記録開始後30秒前後に約1m降下するまではほぼ一致していた．しかし、この値は実際の降下量としては小さすぎる．人の重力感度は1Gal程度と言われるが、第2図(a)や第4図の振幅値は体感に比べて小さすぎるように思われた．移動中の加速度の大きい変化記録はあくまでも定性的な参照にとどめるべきなのだ．実は第2図(b)に関して考察した“静止状態”の記録も定量的解釈には注意を要する．CG5重力計は通常の測定では静置して120秒間の平均値を評価することが推奨されている．数 μ Galの測定精度を追求する重力モニタリングの場合には10分から20分間、静置して評価する(杉原, 2010など)．これに対して、第2図(b)に示した時間ははるかに短い．従って今回のエレベータの場合

には“静止状態”時でさえも参考記録扱いとなるが、静止状態を十分な時間維持できれば定量的解釈の対象となる．実際の孔内重力計測はそのように行われている．その意味でエレベータでの重力連続計測は孔内重力計測の疑似体験だったと言えるだろう．

謝辞：CO₂地中貯留に関してご教示いただいた石戸経士氏と西 祐司氏に感謝します．駒澤正夫氏と野崎京三氏の助言に感謝します．野崎氏の示唆(鉛直勾配ゼロ地点の存在；地表計測からは困難な水平成層構造の推定が孔内計測で可能となるメリット)で、(3)式の面白さと価値を再認識しました．孔内重力計の文献を紹介していただいた松本則夫氏と志賀信彦氏に感謝します．

引用文献

- Alixant, J. and E. Mann (1995) : In-situ residual oil saturation to gas from time-lapse borehole gravity, SPE annual technical conference and exhibition, SPE30609.
- 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.
- Chapin, D. (1998) : Gravity instruments; past, present, future, *The leading edge*, 17, 100-112.
- 遠藤 猛 (1998) : 坑井重力測定, 物理探査ハンドブック677-678, 物理探査学会.
- Fausset, N. E. and Butler, D. (1979) : Computer modeling of the theoretical borehole gravity response in the vicinity of the Aneth field, Paradoc basin, *Geophysics*, 44, 370.
- Gasperikova, E. and Hoversten, G. M. (2008) : Gravity monitoring of CO₂ movement during sequestration: Model studies, *Geophysics*, 73, WA105-WA112.
- Gilbert, R. L. G. (1952) : Gravity observations in a borehole, *Nature*, 170, 424-425.
- Golden, H., McRae, W. and Veryaskin, A. (2007) : Description of and results from a Novel borehole gravity gradiometer, Proc. ASEG2007.
- Hearst, J. R., P. W. Kasameyer and L. B. Owen (1978) : Potential uses for a high-temperature borehole gravimeter, Univ. of California, Lawrence Livermore Laboratory, Technical Information, CRL-52421.
- 石戸恒雄・杉原光彦・當舎利行 (2006) : 帯水層CO₂地中貯留の物理探査モニタリング, 地質ニュース, 621, 38-44.
- 石戸経士・當舎利行 (2010) : 貯留層変動探査法のめざしたこと, 地質ニュース, 665, 7-11.
- 国土地理院測地部 (1997) : JGSN96. 国土地理院時報, 87, 13-20.
- 駒澤正夫 (1998) : 重力探査, 物理探査ハンドブック, 433-471.
- Lines, L. R., Schultz, A. K. and Treitel, S. (1988) : Cooperative inversion of geophysical data, *Geophysics*, 53, 8-20.
- NEDO (2000) : 平成11年度地熱探査技術等検証調査貯留層変動探査法開発テーマ2重力探査法開発 報告書(要約)
- 西 祐司・石戸経士・當舎利行 (2009) : CO₂帯水層貯留における物

- 理探査モニタリング, 資源地質学会平成21年度春季大会講演予稿集, A1.
- 西 祐司・天満則夫・石戸経士・當舎利行 (2010): 米国Anethにおける実証試験とSPモニタリング, 資源素材学会平成22年度春季大会, 1702.
- 奥山康子・當舎利行・相馬宣和・徂徠正夫・石戸恒雄 (2008): オーストラリアの二酸化炭素対策研究開発-CO₂CRCのOtway実証試験とAPP/CDC技術フォーラムより, 地質ニュース650, 48-56.
- 奥山康子 (2010): CO₂のきほん, 誠文堂新光社, 143p, 東京.
- Romaides, A. J. and R. W. Sands (1988): The methodology for performing gravimetric measurements on a television transmitting tower, Bull. d'Information, 64, 41-58.
- Schmoker, J. W. (1978): Accuracy of borehole gravity data, Geophysics, 43, 538-542.
- Schultz, A. K. (1989): Monitoring fluid movement with the borehole gravity meter, Geophysics, 54, 1267-1273.
- Seigel, H. O., Nind, C. J. M., Milanovic, A. and MacQueen, J. (2009): Results from the initial field trials of a borehole gravity meter for mining and geotechnical applications, Proc. 11th SAGA biennial technical meeting and exhibition Swaziland, 92-96.
- Sherlock, D., A. Toomey, M. Hoversten, E. Gasperikova and K. Dodds (2006): Gravity monitoring of CO₂ storage in a depleted gas field: A sensitivity study, Exploration Geophysics, 37, 37-43.
- Smith, N. J. (1950): The case for gravity data from boreholes, Geophysics, 15, 605-636.
- 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.
- 杉原光彦・石戸経士 (2010): CO₂帯水層貯留の重力モニタリングについて(続報), 資源素材学会平成22年度春季大会, 1704.
- 杉原光彦・西 祐司 (2010): ニュージーランドの間欠泉での重力連続測定, 地質ニュース, 673, 37-45.
- 杉原光彦・野崎京三 (1998): シントレクス重力計CG-3Mの検定, 物理探査学会第98回学術講演会論文集, 333-337.
- Torge, W. (1989): Gravimetry, Walter de Gruyter, 465p.
- 薛 自求・中尾信典 (2008): CO₂地中貯留, 地学雑誌, 117, 722-733.
- 渡辺秀文 (1998): 伊豆大島火山カルデラ内での掘削成果 (1) 全体計画と物理検層結果, 日本火山学会1998年秋季大会講演予稿集, B21.
-
- SUGIHARA Mituhiko (2011): Pseudo-experience of borehole gravimetry.
-
- <受付: 2010年7月29日>