

原子時計をセンサーとした重力ポテンシャル計の可能性

野崎 京三*・新谷 昌人**

Possibility of constructing the gravity potential meter by using atomic clocks

Kyozo Nozaki* and Akito Araya**

Abstract

In the classical mechanics originated from the *Principia* (Newton, 1687), the gravitational potential has been, in a sense, '*a metaphysical concept*' that cannot be observed. However, since the advent of general relativity (Einstein, 1915), it has come to be '*the object of physical observation*'. In other words, the gravitational potential, which differs place to place, has come to be a function of time (namely, the proper time). This means that one can make direct observations of gravity potential field by using clocks (substantially, atomic clocks). With the recent development of the atomic clocks, particularly after the significant proposal of the notion of '*optical lattice clock*' (Katori, 2001), the precision of the atomic clock has been markedly improved aiming at the frequency stability of 10^{-17} - 10^{-18} . For instance, the stability of 10^{-18} is a quantity that can detect the gravity potential difference corresponding to the height difference of about 0.01 m on our Earth (i.e. the geopotential difference for the height difference of 0.01 m). The theory of general relativity is now in its dawning stage of application to more familiar fields on our Earth, daring to say, to the geosciences or civil engineering, as well as to such conventional fields as astrophysics or cosmology.

Under these technical backgrounds, the authors report the possibility of constructing the gravity potential meter: the apparatus for direct measurements of geopotential field as an application of the general relativity. The topics will be focused on the potential survey, multi-paths potential measurements, and so on.

Keywords : gravity potential meter, general relativity, atomic clock, proper time, coordinate time

(要 旨)

地球重力場の測定は、現状においては専ら重力計・重力偏差計によって行なわれているが、重力ポテンシャルについては計測機器もなく、これまで殆ど無関心のまま「物理計測の対象外」として放置されてきている。しかし、ごく最近になって原子時計の精度が向上しポテンシャル計測の可能性が現実味を帯びてきた。そこで、重力ポテンシャルの直接的測定装置（重力ポテンシャル計）の実現の可能性とその地球科学分野への応用の筋道を示す観点から検討した。

重力に関する3つの量（重力勾配、重力、重力ポテンシャル）のうち、重力勾配および重力についてはそれぞれ重力偏差計および重力計などとして計測機器が製作され既に実用に供されているが、重力ポテンシャルについては、計測機器そのものが現存していない。この理由は、ニュートン力学の枠組みにおいては、重力ポテンシャルは「物理学上の概念」であり計測される量ではないことによる。しかしながら、アインシュタイン（1915）の一般相対性理論の出現によって、重力ポテンシャルが時間（固有時）の進み方の関数として記述され、この考えの正しいことがその後の検証実験などによって実証されてきた。このことは、原子時計による固有時の精密な観測を介して重力ポテンシャルが「物理計測の対象」となり得ることを意味している。

本稿では、まず、重力ポテンシャルの検出原理とごく最近になって飛躍的に精度が向上しつつある原子時計の

* 応用地質(株)エンジニアリング本部

** 東京大学地震研究所

* OYO Corporation

** Earthquake Research Institute, University of Tokyo

現状について述べ、次に、原子時計をセンサーとする重力ポテンシャル差の検出方法として「固有時比較による方法」と「振動数比較による方法」との2つの方法が考えられることを提示する。最後に、重力ポテンシャル計の応用として、重力ポテンシャル測量、重力ポテンシャル差の多点同時測定について触れる。

キーワード：重力ポテンシャル計，一般相対性理論，原子時計，固有時，座標時

1. はじめに

重力ポテンシャルは、ニュートン(Newton(1687)¹⁾以来の古典物理学ではいわば「形而上の概念」であり観測される量ではなかったが、一般相対性理論(Einstein(1915)²⁾)の出現によって「物理計測の対象」となった。即ち、場所毎に異なる重力ポテンシャルが時間(固有時)の進み方の違いとして関連づけられることとなった。このことは、時計をセンサーとする重力ポテンシャル計が構成できることを意味している。時計(原子時計)の精度は、特に2000年代になってから光格子時計が提案され(Katori(2001)³⁾)、飛躍的に展望が開け、現在のところ 10^{-18} の周波数安定性を目標として開発が進められている。この 10^{-18} という安定性は、例えば、我々の住む地球上で約0.01 mの高さの差に相当する重力ポテンシャル差が検出できる精度である。相対性理論は、宇宙物理学や天文学/宇宙論の世界だけではなく、全地球測位システムGPS(一般および特殊相対論の効果の考慮)や超長基線電波干渉法VLBI(主に特殊相対論の効果の考慮)による幾何学的な位置測量技術(いわゆる宇宙測位技術)などとして既に我々のすぐ身近な世界にも応用されている。これらの宇宙測位技術に加え、重力ポテンシャルというエネルギーに関係した量の計測技術を手にすることは、この理論の地球科学や広い意味での土木工学civil engineeringへの応用の可能性、言うなれば土木相対性理論civil engineering relativityの可能性をさらに広げるものといえよう。

本稿では、このような技術的背景に基づき、冒頭に述べた一般相対論的な効果を測地学的/地球科学的に利用する観点から、2地点間の重力ポテンシャル差を直接的に測定する装置(重力ポテンシャル計)を構成する問題について考察した一つの結果を報告する。なお、ここでいう「直接的」とは、「いわゆる重力加速度測定/水準測量を介さない」という意味である。

2. 原子時計が重力ポテンシャルセンサーになり得る原理

原子時計(または、周波数標準器)は、ある特定の原子の持つ固有振動数を数えることによって時間を測っている。その原子の固有振動数は、一般相対性理論(以下ここでは、相対論などと略称)によると、重力ポテンシャルの関数として表現され、重力ポテンシャルが深い地点では、浅い地点よりもゆっくりと振

動しているように観測される。すなわち、重力ポテンシャルの深浅の違いによって各地点の固有時の進み方に遅れ進みの差異が生じる。この相対論的現象の地上付近における検証は、メスバウアー効果を利用したPound & Rebka(1959)⁴⁾の実験を皮切りに、国内においても既にセシウム原子時計を用いたIijima & Fujiwara(1978)⁵⁾の実験などにより肯定的になされている。また、近年においては、GPS時の構成にこのような相対論的效果に対する補正が考慮されていることはよく知られている(例えば、Ashby(1993)⁶⁾)。野崎(1995)⁷⁾は重力ポテンシャル計に関する初歩的な考察を行なっている。Brumberg & Groten(2002)⁸⁾は、GPSシグナルと地上の原子時計を用いた高さの決定に関する理論的な考察を行なっている。野崎・新谷(2009)⁹⁾は、原子時計によるポテンシャル計測の物理測地学への応用の可能性について議論している。

以上に述べたように、一般相対論は、その一面として、重力ポテンシャルを古典物理学上の概念から物理計測の対象へと引きずり降ろした、とみることができる。

一般相対論によると、重力の特異点から十分に離れたいわゆる弱い静的な場においては、ある基準系(ここでは、地心慣性系を考える)の座標時 t が座標時間隔 Δt 進む間に、重力場の中をその基準系に対して3次元速度 \mathbf{v} ($v = |\mathbf{v}| \ll c$)で運動している点Aの固有時 τ が固有時間隔 $\Delta\tau$ だけ進んだとすれば、

$$\Delta\tau = \left[1 + \frac{2\phi}{c^2} - \frac{v^2}{c^2} \right]^{1/2} \Delta t \quad (1)$$

の関係が成り立つ(例えば、内山(1977)¹⁰⁾, p. 159; Pauli(1956)¹¹⁾, p. 151など)。ここで、 c は、慣性系における電磁波の伝播速度を、 ϕ は、ニュートンの重力ポテンシャルを表わす。地球が球対称の構造を持つと仮定すれば、(1)式は、当然のことながらSchwarzschildの厳密解の近似になっている。弱い場においては、(1)式の[]^{1/2}内の第2項と第3項は1よりも十分に小さいとみなせるから、その2次以上の高次項を無視すれば、

$$\Delta\tau = \left(1 + \frac{\Phi}{c^2} \right) \Delta t \quad , \quad \Phi := \left[\phi - \frac{v^2}{2} \right], \quad (2)$$

(colon equal ':=' は、右辺で左辺を定義する意味で使用。以下同様)。ここで、地球中心から r の距離にあり余緯度 ψ の点Aを地表に固定された地点とし、地球の自転の角速度 ω を一定とみなせば、 $-v^2/2 = -(\omega r \sin\psi)^2/2$ は遠心力ポテンシャルそのものになるから、 Φ は、地球

重力ポテンシャル（地心慣性系を基準にした地球質量による万有引力ポテンシャルと自転による遠心力ポテンシャルとの和）を正確に表わし得ることが分かる（Figure 1参照）。

今、(2) 式を A とは異なる地点 B にも適用し、それぞれ添え字を付して区別して両辺の差をとると、

$$\frac{\delta\tau}{\Delta t} := \frac{\Delta\tau_B - \Delta\tau_A}{\Delta t} \approx \frac{\Phi_B - \Phi_A}{c^2}. \quad (3)$$

(3) 式は、特に新しいものではないが、A, B 両地点での固有時の進み方の差の時間変化率 ($\delta\tau/\Delta t$) を例えば原子時計を用いて知ることにより、両地点での地球重力ポテンシャル（静的な重力ポテンシャル）の差 $\Delta\Phi := \Phi_B - \Phi_A$ が求まることを示している。なお、地表付近においては、地球重力ポテンシャル Φ は、高さ r の 1 価関数であると考えてよい。

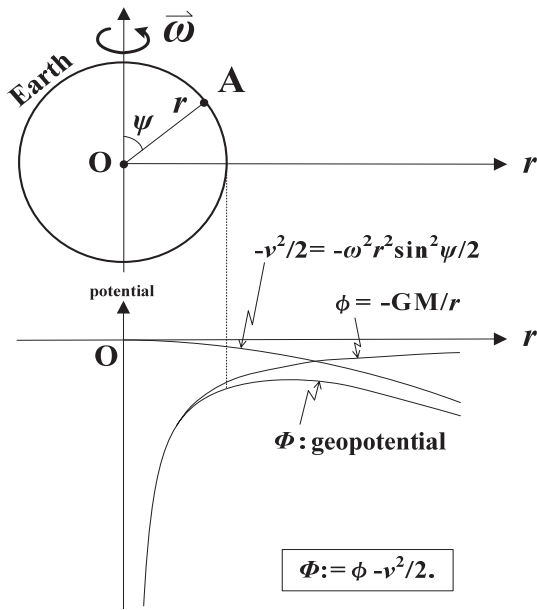


図-1 地球重力ポテンシャル場 Φ の説明

Fig. 1 Explanatory figure of the geopotential field. The radial distance of a station A is denoted by r . ψ and ω are the co-latitude of the station A and the angular velocity of the Earth's rotation, respectively. Φ denotes the geopotential at A. GM is the geocentric gravitational constant of the Earth.

3. 原子時計に要求される精度およびその現状

ここでは検討を単純化するために、地球重力場として、地表付近の標準的な重力場（重力加速度 $g = 980$ Gal, 重力鉛直勾配 $dg/dz = 0.3086$ mGal/m; $1 \text{ Gal} = 1 \times 10^{-2} \text{ m/s}^2$ ）について考える。

地球重力場において、地点 A, B の高さの差 $\Delta h = 1$ m に対応するポテンシャル差を検出するためには、(3) 式による簡単な計算により、

$$\left| \frac{\delta\tau}{\Delta t} \right| \leq 10^{-16} \quad (4)$$

の検出が要求される（Figure 2参照）。 $\delta\tau$ と $\Delta\Phi$ とは近似的に正比例の関係にある（(3) 式）ため、 $\Delta h = 0.01$ m ならば $|\delta\tau/\Delta t| \sim 10^{-18}$ の検出が要求される。この量の検出は、現在のところ必ずしも容易ではないが、例えば時計の精度（長期安定性、短期安定性）に応じて観測時間 Δt を長くすることなどのテクニック上の問題として検出がまったく不可能という訳でもないと思われる。

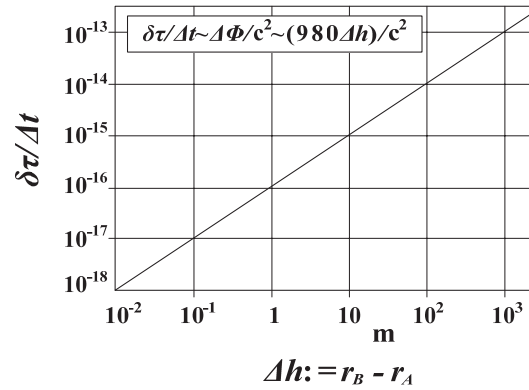


図-2 座標時に対する固有時の遅延率 ($\delta\tau/\Delta t$) と高さの差 (Δh) との関係

Fig. 2 Relation between the ratio of proper time delay to coordinate time ($\delta\tau/\Delta t$) and the height difference (Δh).

次節で述べる固有時比較、振動数比較のいずれの方法においても、原子時計の動作環境のビートレート beat rate への影響評価（例えば、Iijima et al. (1978)¹²⁾ など）を注意深く行なう必要はあるが、現在のところ、従来型のものとしてセシウム Cesium で 10^{-14} 、水素メーザ Hydrogen MASER で 10^{-16} のオーダーの周波数安定性が達成されており（例えば、赤松 (2011)¹³⁾）、後者は (4) 式の条件を一応満たしているといえる。また、2000年代になってから東京大学の香取秀俊によりその概念が発表され注目されている光格子時計 Optical lattice clock (Katori (2001)⁴⁾) では現在のところ 10^{-17} を上回る 10^{-18} の安定性を目標とした開発が進められている（香取研究室ホームページ(2011)¹⁴⁾；光格子時計の概要については、例えば、安田 (2006)¹⁵⁾；Kleppner (2006)¹⁶⁾ を参照）。特に光格子時計は、従来型に比べて短期安定性に優れており、例えば数秒間の計測により 10^{-16} 程度よりも良い安定性が期待できる（例えば、洪 (2008)¹⁷⁾；赤松 (2011)¹³⁾）。これらの周波数標準器の現状を考慮すれば、その長期および短期安定性を考慮した上で観測時間（(3) 式の座標時間隔 Δt ）を長くとするなどの工夫を加えることにより、 $|\delta\tau/\Delta t| < 10^{-16} - 10^{-18}$ の実現が不可能ではない状況にあると言えよう。言い換えれば、高低差換算でサブメートル（数10 cm ~ 1 cm 前後）の分解能で地球重力ポテンシャル差を直接的に測定することが現実味を帯びてきていると言えよう。

4. 原子時計を利用した重力ポテンシャルの測定方法

固有時の遅れ進みの検出方法には、大別して①時計自体がポテンシャル場を経由することによる固有時(時計の beat rate)の変化を検出する方法(以下ここでは、「固有時比較による方法」と呼ぶ)と、②共通のシグナル源(光源または電波源)から発せられたシグナル(光または電波)の振動数を各地点での固有時間で測る方法(以下ここでは、「振動数比較による方法」と呼ぶ)との2とおりの方法が基本となる。

4-1. 固有時比較による方法

今、静的な地球重力ポテンシャル場において、2個の原子時計C1、および、C2を用いて、2地点A、B間を往復する以下の過程を考える(Figure 3参照)：

- ①地点Aにおいて、C1、C2を地表に対して静止した状態で同時刻(例えばゼロ時)に調整しておく。
- ②往路は、C1、C2共に地点Aを出発して地点Bに到達する。
- ③C1は、Bから直ちに復路につき、Aに戻って静止する。
- ④C2は、Bで一定時間 Δt の間静止する。
- ⑤その後、C2は、C1の復路と同じ物理条件(同じ速さと

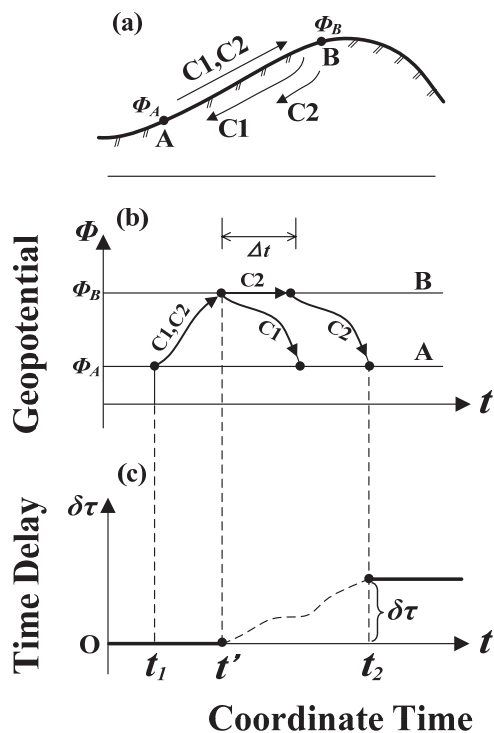


図-3 固有時遅延を検出するための最も単純な方法(固有時比較による方法)

Fig. 3 A primitive method for detecting the proper time delay $\delta\tau$. (a) Schematic illustration of the round trips of the clocks C1 and C2 between the reference station A and the observation station B. (b) Geopotential ϕ experienced by the clocks C1 and C2 with respect to the coordinate time t during the round trips. Δt is the substantial observation time at the station B by the clock C2. (c) Proper time delay $\delta\tau$ with respect to the coordinate time t .

同じ経路)で復路につき、Aに戻って静止する。

⑥Aにおいて、C1、C2の固有時の進み具合 $\Delta\tau_{C1}$ 、 $\Delta\tau_{C2}$ を比較する。

この時、(3)式の $\delta\tau/\Delta t$ は、

$$\frac{\delta\tau}{\Delta t} = \frac{\Delta\tau_{C2} - \Delta\tau_{C1}}{\Delta t}. \quad (5)$$

ここで、 $\delta\tau := \Delta\tau_{C2} - \Delta\tau_{C1} = \Delta\tau_B - \Delta\tau_A$ である。

固有時の進み方に関する相対論的效果としては、今考えている静的な場以外に、外力による移動時におけるC1、C2への地球の自転の影響(Sagnac効果)や、C1、C2の加速減速・振動に伴う慣性力の影響などが考えられる。しかし、上記の過程においては、C1とC2とは時間変動する起潮力ポテンシャルの影響以外は往路・復路ともほとんど同じ物理状態を経験している筈であるから、両者の固有時の進み方に有意な差は生じないと考えてよいであろう。起潮力ポテンシャルの影響は、相対的に小さいものであるが、必要に応じて正確な評価/補正が可能であると考えられる。地球の公転、或いは、銀河系の回転の影響は、地球および天体が自由落下状態にあり局所慣性系(Local Lorentz系)が成立していると考えられるため、今の場合無視してもよいであろう。仮に影響があったとしても、地点A、B双方に一律に効いてくるため、両者の固有時の進み方の差として有意に現われてこないと考えてよい。

(5)式において、実際の固有時の進み方の差 $\delta\tau$ は、今の場合、地点Aにおいて位相比較器 phase comparatorにより、C1とC2との出力シグナルの位相差として検出されることになる。この際、前述したように観測時間(Δt)を長くとることにより位相差($\delta\tau$ に相当)も大きくなり観測が有利になることは大変重要である。

4-2. 振動数比較による方法

この方法は、光または電波による遠隔通信によって重力赤方偏移/青方偏移 gravitational red or blue shiftを観測する方法である(ここでは、通信に使うシグナルとしての「光または電波」を総称して「光」を用いる)。例えば人工衛星に搭載した光源から発せられた光を共通光源として、地上付近の各観測地点での固有時(を刻んでいる原子時計)によって光の振動数を測ることにより、各地点間のポテンシャル差を同時に測定する方法がこれに相当する(Figure 4参照)。

今、地点Oを光源位置、地点Aを地表に固定された観測点位置とすると、振動数 ν とポテンシャル ϕ との関係は、近似的に、

$$\frac{\nu_O - \nu_A}{\nu_O} \approx \frac{\phi_A - \phi_O}{c^2}, \quad (6)$$

で与えられる(内山(1977)¹⁰⁾, p. 207参照)。ここで、添え字O、Aは地点を表す。この(6)式を、Aとは異

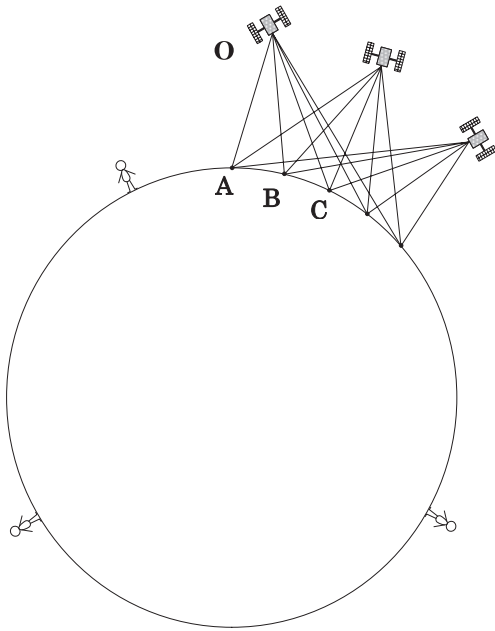


図-4 固有時遅延の多点同時観測模式図 (振動数比較による方法)

Fig. 4 Schematic illustration of the multi-paths observation for the simultaneous observation of the gravitational red shift. The symbol O indicates the signal source mounted on an orbital flying object. The symbols A, B, C, ... indicate the observation stations on the Earth's surface.

なる地点Bにも適用し、両辺の差をとることによって、

$$\frac{\delta v}{v_O} := \frac{v_A - v_B}{v_O} \approx \frac{\Phi_B - \Phi_A}{c^2}. \quad (7)$$

(7) 式は、A,B 両地点での振動数の差 ($\delta v := v_A - v_B$) を計測することにより、両地点の重力ポテンシャル差 ($\Delta\Phi := \Phi_B - \Phi_A$) が求まることを示している。(7) 式分母の v_O は、 δv に比べて十分大きいので、 v_A または v_B で代用しても実用上問題は無い。なお、(7) 式は本質的には (3) 式と同じものであるが、「振動数比較による方法」は、多点での同時観測をする場合に、前節の「固有時比較による方法」よりも有利であるとされる。ただし、光源が人工衛星のような移動体に搭載されている場合には、特殊相対論的な現象 (縦および横ドップラー効果 longitudinal and transverse Doppler effects) に対する補正を考慮する必要がある (例えば、内山 (1977)¹⁰⁾, p.29-31 参照)。

5. 地球科学分野への応用

ここでは、ジオイドをはじめとする等ポテンシャル面を重要な量として扱っている物理測地学、或いは、地球物理学、物理探査の分野、更には、土木工学分野などへの応用を意図し、若干の考察を行なう。この際、固有時の遅れ進みの検出方法として、固有時比較による方法 (4-1節, Figure 3参照) と振動数比較による方法 (4-2節, Figure 4参照) との2つの方法が

あることを思い起こしておこう。

5-1. 重力ポテンシャル測量

①固有時比較による方法は、最も原始的な方法であるが、これを重力/水準測量に替わる重力ポテンシャル測量に応用することが考えられる。例えば、ボーリング孔や斜坑などを利用することにより、特に陸域の要所において、重力測量 (重力加速度測定) / 水準測量に依存することなく、1m を切る精度でジオイド面など等ポテンシャル面の直接的な位置決定が可能になることなどはその一例であろう。

②ポテンシャル測量は、重力測量および水準測量という2つの測量を実施する必要がないため測地測量における野外作業の大幅な効率化が図れるものと考えられる。また、

③ポテンシャル測量は、重力測量や水準測量のように水準路線に沿った短距離間の測定を連結してゆく必要が必ずしもないため、離島間の重力結合や渡海/渡河水準測量などの遠隔地を結ぶ測量の代替手段として利用可能であろう。少なくとも、要所において重力および水準測量のコントロールデータとして利用可能である。

④さらに、ノイズ・フリーな条件下でいえる事項ではあるが、ポテンシャル場が判れば、方向微分演算により、重力の絶対値がベクトル量として計算されることは一考に値するものと考えられる (この際、ポテンシャルの絶対値を知る必要は必ずしもない)。

5-2. 重力ポテンシャル差の多点同時測定

固有時比較による方法よりももう少し能率を上げる方法として、振動数比較による方法が考えられる。

①例えば、人工衛星の共通の光源 (または電波源) から発せられた光 (または電波) の振動数を地上付近の各地点での固有時 (を刻んでいる各原子時計) によって測ることにより、各地点間のポテンシャル差を多点で同時に測定することが可能となり、重力ポテンシャルの面的/空間的分布のリアルタイム・モニタリングが実現するであろう (Figure 4参照)。この場合、大気中の水蒸気の分布などの厄介な問題があるが、この種の問題を回避する一方法として、双方向伝送方式による光ファイバーリンクによって各観測点の原子時計間の時刻比較 (振動数比較) を行う方法がある (例えば、鳥山・他 (2008)¹⁸⁾などを参照)。基本的には、(地点Oを光源/電波源位置、地点A, Bを観測点位置として) 以下の式の組み合わせを用いることになる (前出の (7) 式):

$$\frac{v_A - v_B}{v_A} = \frac{\Phi_B - \Phi_A}{c^2} \approx \frac{g_B H_B - g_A H_A}{c^2}.$$

ここで、 g_A および g_B は、それぞれ、地点AおよびBとジオイド間の平均重力加速度、 H_A および H_B は、それぞれ、AおよびBの標高である。

②原子時計の精度として 10^{-17} - 10^{-18} 程度の安定性が得られれば、地球潮汐が重力ポテンシャルの変化を反映した固有時の進み方の変化（ゆらぎ）として観測される筈である。

③重力ポテンシャルは、重力（加速度）に比べて距離減衰が小さいため、地球のより深部を調べる際に重力よりも有利であると考えられる。

このように重力ポテンシャルの面的／空間的分布がリアルタイムで把握されるようになると、ジオイドなど地球の幾何形状を主に問題とする測地学的活用法と併せて、地球の内部構造を主に問題とする地球物理学的活用法にも展望が開けてゆくであろう。

6. あとがき

世の中では、地震計、歪計、傾斜計、気圧計、温度計、湿度計、血圧計、体温計、水位計、匂いセンサー、糖度光センサー、レントゲン写真装置、X線CT装置、核磁気共鳴画像MRI装置、高度計、流速計、望遠鏡、顕微鏡、電圧計、電流計、磁力計等々、ありとあらゆる「センサー」が様々な分野の様々な局面で利用されている。これらのセンサーで大切なことは、「人間の五感の延長としてのセンサーである」という点ではないだろうか。センサーは、世の中の趨勢として至る所で自動化がなされているが、センサーを製作する部分とセンサーによる測定値を解釈する部分は人間あるいは人間の感性／理性によってなされなければならない、この部分まで自動化に任せていては、人間自体の存在を否定することになってしまう、このようなことを考えながら未だ現存していない重力ポテンシャル計についての考えを以上に述べた。山に登れば疲れるが、この疲れの程度は山の高さ（重力ポテンシャルの高さ）に関係していることを考えれば、人間一人々々も重力ポテンシャル計（ただし、器差が大きく感度と再現性の悪い重力ポテンシャル計）といえるかも知れない。少し大袈裟な表現にはなるが、理学 science は人間の世界観を拓げるもの、工学 engineering は人間の価値観を実現するものではないかと思う。この意味で、「人間の五感の延長としてのセンサー」の選択肢を増やすことは、科学・技術、あるいは、理学・工学、さらには社会科学をも含めた形で人間社会への貢献となるのではないかと思う。

現在のところ我々は、重力に関する3つの量のうち、重力加速度（差）および重力勾配を直接的に計測する器械として、それぞれ、絶対／相対重力計およびトーションバランスなどとして持ち合わせているが、重力ポテンシャル（差）を直接的に計測する器械（重力ポテンシャル計）は持ち合わせていない。したがって、以上のような重力ポテンシャルの比較測定装置を構成する試みは、それ自体に意味があり大変興味深いものである。

原子時計（周波数標準器）の開発は、現在、東京大

学香取研究室、産業技術総合研究所計測標準研究部門、情報通信研究機構時空標準研究室が世界の最先端で鎬を削っている。重力ポテンシャル計の実現には、これらの開発を通じた原子時計の精度の向上（安定性の向上と不確かさの低減）が不可欠であるほか、原子時計の動作環境の問題や装置の小型軽量化の問題など様々な課題や困難が予想されるが、今後の一つの方向性として、リアル・データを用いた実証的な重力ポテンシャル計の開発が望まれる。併せていろいろとご批判をいただければ幸いである。

謝辞

産業技術総合研究所計測標準研究部門の赤松大輔博士から原子時計に関する貴重なコメントをいただいた。情報通信研究機構時空標準研究室の井戸哲也博士からは、周波数標準器の最新情報についてご教示いただいた。本研究の初期段階（1995年頃）には飯島重孝先生からセシウム時計を用いた potential blue shift に関する実験についてのご教示をいただいた。また、東京大学地震研究所 大久保修平教授、ならびに、国立天文台 福島登志夫教授から有益なご教示をいただいた。査読をしていただいた応用地質株式会社 岡部幸彦氏のコメントは原稿を改善する上で大変有益であった。同技術研究所 谷元美奈子氏には図の清書をお願いした。ここに記し感謝の意を表します。

参考文献

- 1) Newton, I.(1687) : Philosophiae Naturalis Principia Mathematica, Londini, 1687, First edition.(プリンキピア日本語訳:『ニュートン』世界の名著 31(中公パックス), 1979, 河辺六男訳)
- 2) Einstein, A.(1915) : Die Feldgleichungen der Gravitation, Sitzung der physikalische - mathematischen Klasse, vom 25 November, 1915, pp. 844-847.
- 3) Katori, Hidetoshi(2001) : Proceedings 6th Symposium on Frequency Standards and Metrology(ed. P. Gill), pp. 323-330,(World Scientific, Singapore, 2002).
- 4) Pound, R. V. and G. A. Rebka(1959) : Red-shift in nuclear resonance, Physical Review Letters, Vol. 3, pp. 439-441.
- 5) Iijima, Shigetaka and Kiyoshi Fujiwara(1978) : An Experiment for the Potential Blue Shift at the Norikura Corona Station, Annals of the Tokyo Astronomical Observatory, Vol. XVII, No. 1, pp.68-78.
- 6) Ashby, Neil(1993) : Relativity and GPS, GPS World, Nov. 1993, pp. 42-47.
- 7) 野崎京三(1995) : 重力ポテンシャル差の直接的測定装置に関する一考察, 地球惑星科学関連学会 1995年合同大会予稿集, G12-02, p.388.

- 8) Brumberg, V. A. and E. Groten(2002) : On determination of heights by using terrestrial clocks and GPS signals, *J. Geodesy*, Vol. 76, pp. 49-54.
- 9) 野崎京三・新谷昌人(2009) : 一般相対性理論の物理測地学への応用の可能性 —重力ポテンシャル差の直接的測定装置に関する一考察—, 平成21年度東京大学地震研究所共同利用(研究集会)「重力観測・理論, その応用—陸上・海底から衛星観測まで—」講演集 No.24, 2009年12月, URL:<http://staff.aist.go.jp/k.nawa/h21eri/proceedings.htm>
- 10) 内山龍雄(1977) : 相対性理論, 岩波全書, 東京.
- 11) Pauli, Wolfgang(1956) : *Theory of relativity*, Dover Publications, Inc., New York, (Translation by G. Field, originally in German in 1921) .
- 12) Iijima, Shigetaka, Kiyoshi Fujiwara, Hiroshi Kobayashi, and Tadashi Kato(1978) : Effect of Environmental Conditions on the Rate of a Cesium Clock, *Annals of the Tokyo Astronomical Observatory*, Vol. XVII, No. 1, pp. 50-67.
- 13) 赤松大輔(2011) : 光格子時計の応用に関する調査研究, 産総研計量標準報告, Vol. 8, No.2, pp. 201-211.
- 14) 香取研究室ホームページ(2011) : Apr. 23, 2011 URL: <http://www.amo.t.u-tokyo.ac.jp/theme.html>
- 15) 安田正美(2006) : 光格子時計を用いた光周波数標準, 産総研計量標準報告, Vol. 4. No. 3, pp. 137-145.
- 16) Kleppner, D.(2006) : Time Too Good to Be True, *Physics Today*, March 2006, pp. 10-11.
- 17) 洪 鋒雷(2008) : 総括:光周波数標準とその発展, 日本工業出版「光アライアンス」, 第19巻, 第9号, pp. 3.
- 18) 鳥山裕史・町澤朗彦・岩間 司(2008) : 単一波長時分割双方向方式による1芯光ファイバ時刻伝送装置の開発, 電子情報通信学会論文誌 B, J 91-B, 第4号, pp. 431-439.