

原子時計をセンサーとした重力ポテンシャル計の構成の可能性

Possibility of constructing the gravity potential meter by using atomic clocks

野崎 京三^{1*}, 新谷 昌人²

Kyozo Nozaki^{1*}, Akito Araya²

¹応用地質, ²東大地震研

¹OYO, ²ERI

■はじめに: 重力ポテンシャルは, ニュートン(Newton, 1687)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, 一般相対性理論の出現(Einstein, 1915)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), 飛躍的に展望が開け, 現在のところ $10^{**}(-17)$ を上回る $10^{**}(-18)$ 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, 我々の住む地球上で約0.01m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の世界だけではなく, 我々のすぐ身近な世界にも応用される可能性, 言うなれば土木相対性理論Civil engineering relativityの可能性が現実味を帯びてきている.

本稿では, このような技術的背景に基づき, 一般相対性理論の地表付近における応用として重力ポテンシャル計(重力ポテンシャル差の直接的測定装置)の構成の可能性について検討した一つの結果を報告する.

■重力ポテンシャルセンサーとしての原子時計,及び,要求される精度: 一般相対性理論によると, 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 dt 進む間に, 重力場の中をその基準系に対して3次元速度 $v(\ll c)$ で運動している点Aの固有時 T が固有時間隔 dT だけ進んだとすれば,

$$dT = \text{SQRT}[1+(2U-v^{**2})/c^{**2}]dt \text{ ----- (1)}$$

の関係が成り立つ(例えば, 内山, 1977). ここで, U はニュートンの重力ポテンシャル, c は真空中の光のスピードである. 今, この関係式(1)を, A とは異なる点 B にも適用し, 添え字を付して区別して両辺の差をとることにより, 近似的に

$$(dT_B - dT_A)/dt = (W_B - W_A)/c^{**2} \text{ ----- (2)}$$

となる. ここで, W 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地球自転による遠心力ポテンシャルとの和)である. なお, (2)式では, A, B 両地点は自転している地球に対して静止していること, 及び, 両地点間の固有時の進み方 dT の差とポテンシャル W の差とはリニアな関係にあることに留意しておく.

原子時計に要求される精度の目安として, 例えば地点 A, B の高さの差1 mに対応するポテンシャル差を検出する場合を考える. (2)式を標準的な地球重力場 ($g=980 \text{ Gal}$, $dg/dz=0.3086 \text{ mGal/m}$) に適用することにより, 原子時計の周波数安定性: $|(2)式左辺| < 10^{**}(-16)$ が必要条件であることが分る.

■原子時計の現状: 原子時計の動作環境のbeat rateへの影響評価(例えば, Iijima et al., 1978)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水素メーザで $10^{**}(-16)$ の

オーダーの周波数安定性が達成されている。また、2000年代になってから香取秀俊(Katori, 2001)によりその概念が発表され注目されている光格子時計では現在のところ $10^{**(-18)}$ 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HP, Oct. 30, 2009)。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)。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踏まえた上で観測時間((2)式の座標時間隔 dt)を長くとするなどの工夫を加えることにより、|(2)式左辺| $< 10^{**(-17)} \sim 10^{**(-18)}$ 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(10 cm \sim 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の可能性が現実味を帯びてきていると言えよう。

■測地学的応用について： 重力ポテンシャル計を起潮力ポテンシャルやジオイド等の観測機器として物理測地学的に利用する観点から、[1]重力ポテンシャル測量、[2]重力ポテンシャル差の多点同時測定、[3]重力ポテンシャル・トモグラフィなどが考えられる。この際、ポテンシャル差の検出方法として、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([1],[3])、②共通の光源から発せられた光の振動数を各地点での時計(固有時)で測る方法([2])の2通りの方法が基本になる。

【謝辞】：AIST計測標準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。本研究の初期段階(1995年頃)には飯島重孝先生、東大地震研究所大久保修平教授、国立天文台福島登志夫教授からご教示をいただいた。ここに記し感謝の意を表します。

キーワード:重力ポテンシャル,一般相対性理論,原子時計,固有時,座標時

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