

5-6 関連研究成果

5-6 Applied Researches in T&F Fields

5-6-1 原子時計運搬による重力赤方偏移の検出

5-6-1 The Detection of Gravitational Red Shift by Transportation of Atomic Clocks

小竹 昇 清水義行 今村國康 金子明弘 栗原則幸 細川瑞彦
KOTAKE Noboru, SHIMIZU Yoshiyuki, IMAMURA Kuniyasu, KANEKO Akihiro,
KURIHARA Noriyuki, and HOSOKAWA Mizuhiko

要旨

一般相対性理論によると、高度差の異なる2地点間における時計は、高所では周波数が高く、低所では周波数が低くなる。この物理現象は、重力赤方偏移と呼ばれている。我々は、複数のセシウム原子時計（セシウム原子周波数標準器）を東京都内に位置する通信総合研究所（CRL）小金井本所から長波帯標準電波送信所（おおたかどや山送信所及びはがね山送信所）へ運搬を行い、時計の周波数変化を測定して、重力赤方偏移を観測した。周波数標準器の運搬前後によって期待される重力赤方偏移（周波数シフト）の理論値は、おおたかどや山送信所が $+7.8 \times 10^{-14}$ 、はがね山送信所が $+9.0 \times 10^{-14}$ である。測定値のデータの平均値は、それぞれ $+7.7 \times 10^{-14}$ と $+13.0 \times 10^{-14}$ となり、理論とほぼ一致した。

According to the theory of general relativity, the proper frequency of the clocks in lower altitude becomes lower than that in higher altitude, because of the effect of gravity. This phenomenon is called as gravitational red shift. We have transported some Cesium clocks from CRL Tokyo headquarters to two LF frequency standard stations, Mt. Ootakadoya and Mt. Hagane. The altitudes between the headquarters and the stations differ by several hundred meters. The frequencies of the clocks before and after the transportation were measured. Averages of the observed shifts for these two stations are about $+7.7 \times 10^{-14}$ and $+13.0 \times 10^{-14}$, respectively, which show the good agreement with the theoretically expected shifts of $+7.8 \times 10^{-14}$ and $+9.0 \times 10^{-14}$, respectively.

【キーワード】

重力赤方偏移, セシウム原子周波数標準器, 運搬時計, GPS コモンビュー法

Gravitational red shift, Cesium frequency standard, Portable clock, GPS (Global Positioning System) common view method

1 まえがき

一般相対性理論は様々な物理現象において重要な理論であり、現代における計測の精密時空計測の基本理論として不可欠となっている。相対論効果の現象の一つとして重力赤方偏移がある。この偏移の検出において、システムの正確

さと周波数安定度が重要な要素である。過去において、原子周波数標準器を使っての重力赤方偏移を含む相対論効果の検出としては、ロケットや航空機を用いた実験[1][2]が有名であり、日本では自動車による乗鞍岳への時計運搬に関して飯島氏ら[3]によって行われた例がある。この現象の理論的な詳細については、本特集号 **2-3**

「時間・周波数標準における相対論効果」を参照されたい[4]。

小金井本所では周波数安定度のよい時計であるセシウム原子周波数標準器とGPS時刻比較のコモンビュー法を利用することにより、 10^{14} 台の高安定周波数標準を発生し、 10^{15} 台の周波数比較を定期的に行っている。さらに近年、福島県おたかどや山及び福岡県、佐賀県の境に位置するはがね山の頂上付近に長波帯標準電波送信所を整備し[5]、ここにセシウム原子周波数標準器を設置した。これらの開局準備や施設の整備維持のために小金井本所から原子時計を運搬する機会を利用し、この際に得られたデータを解析することにより重力赤方偏移の観測を試みた[6][7]。これらのデータは、小金井本所の日本標準時の維持公表定常業務によって取得されたものである。

本稿では、このセシウム原子周波数標準器の重力赤方偏移(周波数シフト)計測の実測結果を報告する。2では原理を簡単に紹介し、期待される周波数変化の理論値を求める。3ではこの計測に用いた機器と施設、時計の運搬などの概要を述べる。得られたデータの解析を4で行い、5に簡単なまとめを記す。

2 重力赤方偏移の原理と理論値

一般相対性理論によれば、重力の強い低所に置かれた時計は、重力の弱い高所に置かれた時計よりも遅く進むという重力赤方偏移現象が起こる(図1)。言い換えれば、周波数標準器が発生する時刻は、場所に関する重力ポテンシャルの変化に影響する。これは本特集号2-3[4]で述べているように、重力ポテンシャルが時空を曲げ、計量テンソルの値を変えるためである。

地球表面付近での時計の移動における、重力による周波数シフトは、一般相対性理論より次式で表される。

$$\Delta f/f = 1.1 \times 10^{-16} \Delta h \quad (1)$$

$\Delta f/f$ は、周波数シフト、 Δh (単位はm)は、運搬前後の高度差である[8]。(1)式を用いて、ジオイ下面高84mの東京都小金井市内に位置する小金井本所の時計を保管している原器室と、各送信所の時計を保管している原器室との標高差から計算される重力赤方偏移の理論値を表1に示す。この結果から見られるように、期待される重力赤方偏移は 10^{-13} に近い値であり、十分検出が可能と考えられる。

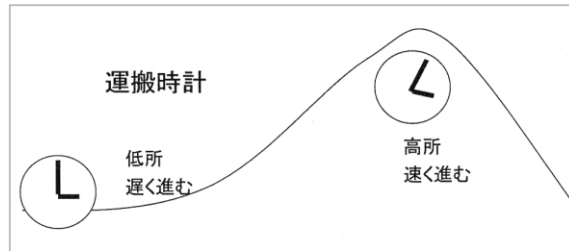


図1 高度差による時計への影響

3 実験の概要

3.1 測定原理

重力赤方偏移検出実験は以下のように行った。まず、小金井本所において運搬対象のセシウム周波数標準器の周波数 $f_{clock}(h_1, \tau_1)$ と基準周波数 $f_{ref}(\tau_1)$ との周波数差 Δf_1 を測定する。

$$\Delta f_1 = f_{clock}(h_1, \tau_1) - f_{ref}(\tau_1) \quad (2-1)$$

ただし、 h_1 は、小金井本所の高度、 τ_1 は計測期間である。次に、セシウム周波数標準器を長波帯標準電波送信所に運搬し同様の測定を行い、 Δf_2 を求める。

$$\Delta f_2 = f_{clock}(h_2, \tau_2) - f_{ref}(\tau_2) \quad (2-2)$$

ただし、 h_2 は、運搬後の送信所の高度、 τ_2 は計測期間である。基準周波数源には、後述するように、協定世界時UTCを採用した。

(2-1)、(2-2)式から重力赤方偏移 $\Delta f_{r,s}$ は次式で表される。

表1 重力赤方偏移の理論値

	おたかどや山送信所	はがね山送信所
CRL(84m)との高度差	710m	816m
重力赤方偏移(周波数シフト)	$+7.8 \times 10^{-14}$	$+9.0 \times 10^{-14}$

$$\Delta f_{r,s} = f_{clock}(h_2, \tau_2) - f_{clock}(h_1, \tau_2)$$

$$= \{\Delta f_2 - \Delta f_1\} + \{f_{clock}(h_2, \tau_2) - f_{clock}(h_1, \tau_2)\} + \{f_{ref}(\tau_2) - f_{ref}(\tau_1)\} \quad (3)$$

ただし、 $f_{clock}(h_1, \tau_2)$ は運搬対象のセシウム周波数標準器が測定期間 τ_2 に小金井本所にあったと仮定したときの周波数である。重力赤方偏移を検出するためには、(3) 式の右辺各項の測定誤差は想定される重力赤方偏移量 $\sim 10^{-13}$ に比べて十分小さいことが必要である。

3.2 測定誤差の見積り

3.2.1 計測システム

Δf_1 及び Δf_2 は以下のように測定した。

小金井本所では、12 台のセシウム原子周波数標準器などが発生する 1 秒信号の相互時刻差を、直接タイムインターバルカウンタによって 4 時間ごとに測定している。これらの時刻差データを基に UTC (CRL) を発生している。UTC (CRL) 発生システムについては、本特集号 **5-1**[9] を参照されたい。UTC (CRL) と 12 台のセシウム原子周波数標準器間の時刻差も 4 時間ごとに測定している。これらの時刻差の傾きから UTC (CRL) の周波数 $f_{UTC(CRL)}(\tau_1)$ を、また、国際度量衡局 BIPM の発行する Circular T と呼ばれるデータにより基準となる UTC の周波数 $f_{ref}(\tau_1)$ を算出している。

結局、次式に置き換えられる。

$$\Delta f_1 = \{f_{clock}(h_1, \tau_1) - f_{UTC(CRL)}(\tau_1)\} - \{f_{UTC(CRL)}(\tau_1) - f_{ref}(\tau_1)\} \quad (4)$$

(4) 式の右辺第 1 項の誤差は、1 秒信号測定のタイムインターバルカウンタ測定 (測定分解能 30ps) に依存し、その測定誤差は、0.1ns のオーダーである。測定期間を 20 日間に取り、周波数換算すると 0.6×10^{-16} となる。

また、(4) 式の右辺第 2 項の誤差は、UTC (CRL) と UTC の比較誤差である。BIPM の Circular T によれば国際的な周波数リンクの精度 [10] は 20 日平均で 1.5×10^{-15} 程度である。

一方、長波帯標準電波送信所において小金井本所とほぼ同様な計測を行うとともに、小金井本所 - 長波帯標準電波送信所間の GPS コモンビュー比較を行っている。より詳細に関しては、本特集号 **4-2-2** [11] を参照されたい。

両送信所内においてセシウム原子周波数標準

器の中の一つが長波標準電波の原振として使用されている。これらの原振を基に生成されたおたかどや山送信所及びはがね山送信所のそれぞれの協定世界時を、UTC (福島)、UTC (九州) と呼称している (表 2)。

運搬後のセシウム原子周波数標準器の周波数、UTC (福島) 又は UTC (九州) の周波数、UTC (CRL) の周波数、UTC の周波数をそれぞれ、 $f_{clock}(h_2, \tau_2)$ 、 $f_{UTC(LF)}(\tau_2)$ 、 $f_{UTC(CRL)}(\tau_2)$ 、 $f_{ref}(\tau_2)$ とすると、結局、 Δf_2 は、次式で表される。

$$\Delta f_2 = \{f_{clock}(h_2, \tau_2) - f_{UTC(LF)}(\tau_2)\} - \{f_{UTC(LF)}(\tau_2) - f_{UTC(CRL)}(\tau_2)\} - \{f_{UTC(CRL)}(\tau_2) - f_{ref}(\tau_2)\} \quad (5)$$

(5) 式の右辺第 1 項の誤差は、(4) 式同様、1 秒信号測定のタイムインターバルカウンタ測定に依存し、その測定誤差は、0.1ns のオーダーとなり、周波数換算値 0.6×10^{-16} (20 日間平均) となる。

また、(5) 式の右辺第 2 項は、小金井本所と長波帯標準電波送信所間の GPS コモンビュー比較結果である。その誤差は、国際的な周波数リンクの精度 20 日平均で 1.5×10^{-15} と比べ、短基線で電離層の影響などが少なくなることが期待されるため、同程度または、それ以上の精度と考えられる。ここでは、最大の不確かさとして 1.5×10^{-15} を用いる。

さらに、(5) 式の右辺第 3 項は、UTC (CRL) と UTC の比較誤差であり、(4) 式第 2 項と同様に、その誤差は、国際的な周波数リンクの精度 1.5×10^{-15} 程度 (20 日間平均) となる。

したがって、(3) 式の第 1 項の誤差は、(4) 式第 1、2 及び (5) 式第 1、2 及び 3 項の二乗和の平方根で表され、 2.6×10^{-15} となり、想定される重力赤方偏移量に比べて十分小さい。

3.2.2 セシウム周波数標準器

使用したセシウム原子周波数標準器はアジレントテクノロジー社製 5071A タイプである。このセシウム原子周波数標準器のビーム管には、高性能型と通常型のいずれかを装着できる。安定度は高性能型ビーム管の方が優れているが、経済性及び長寿命性については通常型ビーム管が勝っている。その周波数安定度のカタログ仕様値 [12] と実測値を図 2 に示す。通常型では 2 ~ 3

倍程度、高性能型に比べて安定度は劣るが、実測値からは20日以上平均化を行えば、十分 10^{-14} 程度の安定度が得られる。これは重力赤方偏移を検出するのに十分な安定度である。したがって、(3)式右辺第2項の誤差は十分小さい。

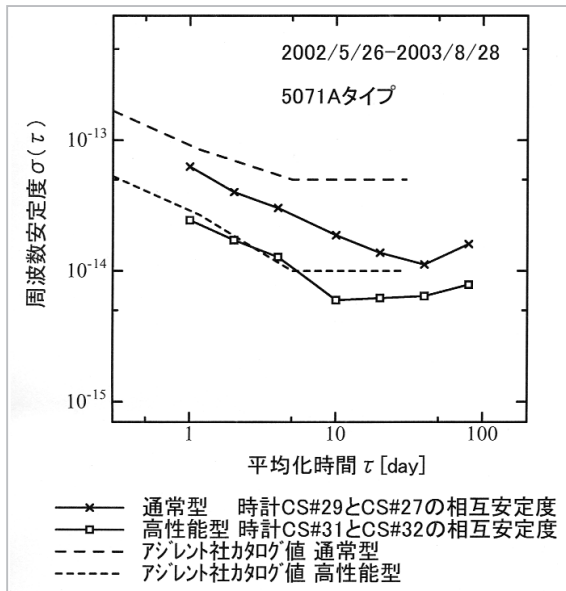


図2 周波数標準器の周波数安定度

小金井本所においては、12台の高性能型ビーム管セシウム原子周波数標準器を運用し、CRLの発生する標準時UTC(CRL)[9]を発生している。セシウム原子周波数標準器が保管されている時計原器室は、 $23 \pm 0.5^\circ\text{C}$ に温度管理され、電界シールドされ、電源も無停電の対策がなされている。

おたかどや山及びはがね山長波帯標準電波送信施設には3台の通常型セシウム原子周波数標準器を配備して、長波帯標準電波の時間・周波数の基準として用いている。時計原器室は $25 \pm 0.5^\circ\text{C}$ に温度管理され、電磁界シールドが施されている。

また、セシウム周波数標準器の温度特性のカタログ仕様値[12]は、温度範囲 $0 \sim 55^\circ\text{C}$ において通常型 $1.8 \times 10^{-15}/^\circ\text{C}$ 、高性能型 $1.5 \times 10^{-15}/^\circ\text{C}$ である。また、図3に通常型5071Aの温度特性測定の一例を示す。この測定より、温度係数は $-3 \times 10^{-15}/^\circ\text{C}$ である。運搬前後において周波数標準器周辺の温度変化は 2°C であるので、温度による影響は -6×10^{-15} と推定される。これは、想定される重力赤方偏移を検出する値より小さな値である。したがって、(3)式右辺第2項の誤差は十分小さい。

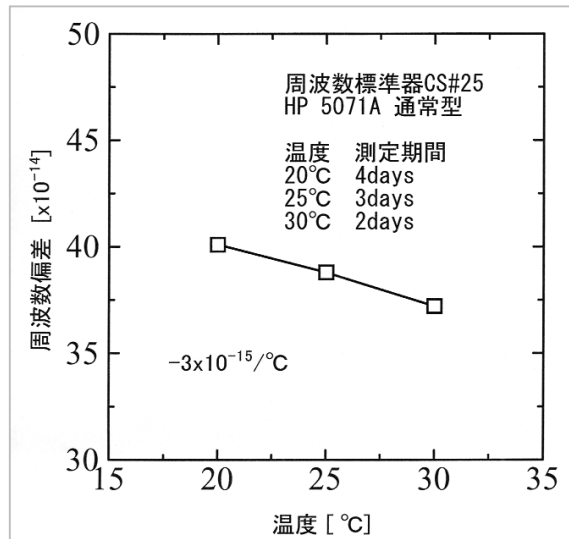


図3 周波数標準器の温度特性

3.2.3 基準周波数源

周波数変動の計測のためには、計測対象となる変動に対し、十分安定な周波数の基準を用いる必要がある。候補として、まずUTC(CRL)が考えられる。しかしながらUTC(CRL)は、周波数のみならず時刻の基準としても用いられており、UTCとの時刻差いかんによっては 10^{-14} 台での周波数調整を行う必要があり、必ずしもこのような測定の基準としては適していない。

そこで、UTC(CRL)を仲介する国際的な時間・周波数の標準であるUTCを用いることが考えられる。UTC自身は30日の平均化時間で、周波数安定度が 10^{-16} 台、その確度も各国の一次周波数標準器により 2×10^{-15} 程度が得られている高精度な標準である。しかし、5日置きにしか時刻データが得られないことと、前述で示したとおり国際的な周波数リンクの精度は5日平均で 6×10^{-15} 程度という点がやや問題である。しかし、20日平均では、 1.5×10^{-15} の安定度が期待できる。

もう一つ考えられるものとして、小金井本所の有するセシウム原子周波数標準器を平均化して、周波数だけを安定化して基準に用いる方法がある。この方法でも、単純に10~12台の原子周波数標準器の等価加重平均をとるアンサンブルを作ることによって、5日平均で 5×10^{-15} 程度の安定な周波数の基準が得られることが別の研究で分かっている[13]。20日平均では 2.5×10^{-15} の安定度が期待できる。このアンサンブル時系を、以後EWE(Equal Weight Ensemble)と呼ぶこと

表2 3地点の高度、緯度、経度のデータ

	東京都 小金井市内 CRL	福島県内 おおたかどや山送信所	佐賀・福岡県境 はがね山送信所
高度	84m	794m	900m
緯度	N35° 42' 24"	N37° 22' 10"	N33° 27' 56"
経度	E139° 29' 19"	E140° 51' 09"	E130° 10' 34"
直線距離	-----	238km	1066km
協定世界時	UTC (CRL)	UTC (福島)	UTC (九州)

表3 運搬の諸条件

呼称	ビーム管タイプ	運搬経路	所要時間	移動日
CS#28	通常型	東京→おおたかどや山	5hours	2000 April 27
CS#30	通常型	東京→はがね山	2days	2001 May 22
CS#25	通常型	東京→はがね山	2days	2001 July 21
CS#26	通常型	東京→はがね山	2days	2001 July 21
CS#31	高性能型	東京→おおたかどや山	5hours	2002 April 24
CS#31	高性能型	おおたかどや山→東京	3hours	2002 May 23

にする。

以上より、周波数基準源の誤差は、想定していた重力赤方偏移量 $\sim 10^{13}$ より十分小さい。したがって、ここでは計測のための周波数の基準として、特にUTCとEWEの両方をとって解析し、その結果を比べることとする。

3.2.4 その他の影響

前述の測定誤差以外に、セシウム周波数標準器の移動中における温度変化による誤差、磁場変化による誤差が予想される。移動中の温度、周波数標準器を保管する原器室の磁場のデータがないため誤差見積りはできなかったが、カタログ仕様値^[12]から誤差は十分小さいと考えられる。4.2において、実測定結果から統計的解析により、これらの影響の推定を行う。

3.3 運搬の概要

実験に関係した小金井本所、おおたかどや山、はがね山送信所の地理的諸元を表2に、また、運搬の概要(セシウムビーム管タイプ、運搬経路、所要時間、移動日)を表3に示す。

移動には、いずれもトラックを使用し、移動中はセシウム原子周波数標準器に電池を接続し、連続動作させた。トラックの速さは、距離的には大部分の範囲で有料高速道路を使用している

ので、その間は約100km/時であった。特に、小金井本所から、はがね山送信所への道のりは、高速道路のみで1100km以上あるため、実際のトラック車での運搬時間は2日間に及んだ。このように5071Aをトラックによる長距離の運搬をすることは、CRLではこれが初めての試みであった。

また、2002年に実施した小金井本所とおおたかどや山送信所間の運搬では二つの大きな特徴がある。一つは、高性能型ビーム管の5071A標準器の運搬であり、もう一つは、標準器の往復運搬である。このどちらも、やはりCRLでは初めての試みであった。

4 実験結果と理論との比較

4.1 運搬前後の周波数

表3に示された運搬の事例の中から、はがね山送信所運搬前後のCS#30とUTCの時刻差の変化を図4に、おおたかどや山運搬前後のCS#31とUTCの時刻差の変化を図5に表す。図4においては、メーカーテストにセシウム原子周波数標準器CS#30を貸し出したためと、はがね山送信所開局前の計測システム整備のため、約2か月の欠測となった。

図4、図5において、時刻差の変化率、つまり傾きが周波数偏差となる。はがね山送信所への

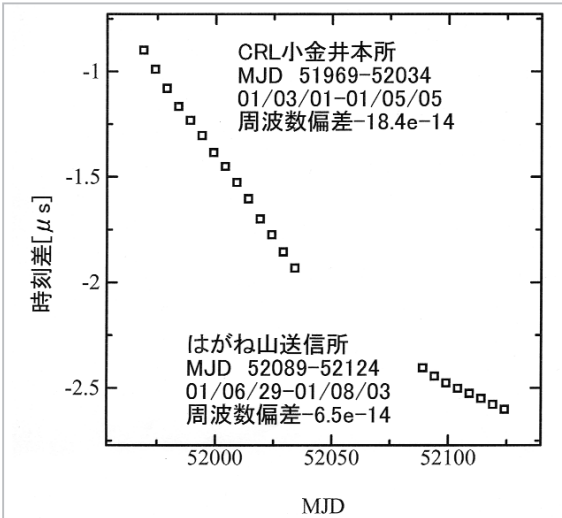


図4 CS#30とUTCの時刻差 (はがね山運搬)

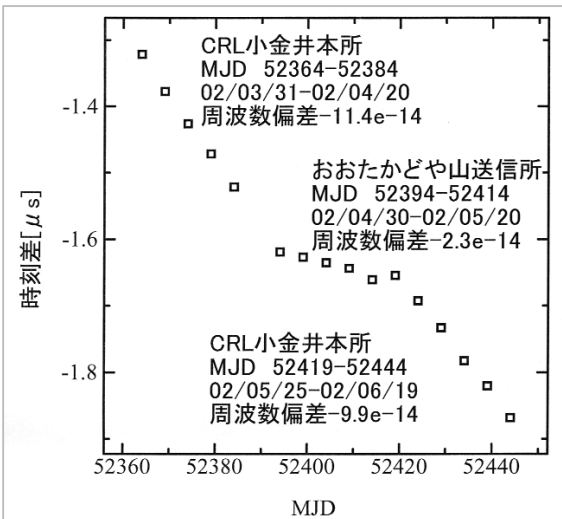


図5 CS#31とUTCの時刻差 (おおたかどや山運搬)

運搬前後のCS#30とUTC間の周波数偏差は、それぞれ -18.4×10^{-14} 、 -6.5×10^{-14} となり、 $+11.9 \times 10^{-14}$ の周波数シフトであった。また、おおたかどや山送信所の往路での運搬前後のCS#31とUTC

間の周波数偏差は、それぞれ、 -11.4×10^{-14} 、 -2.3×10^{-14} となり、 $+9.1 \times 10^{-14}$ の周波数シフトであった。さらに、復路での運搬前後の周波数偏差は、それぞれ、 -2.3×10^{-14} 、 -9.9×10^{-14} となり、 -7.6×10^{-14} の周波数シフトであった。これらの値から、運搬の前後において、基準UTCに対する周波数偏差が、はっきり変化していることが見て取れる。

4.2 理論値との比較

表4に、はがね山送信所及びおおたかどや山送信所の重力赤方偏移の理論値と測定値の比較を示す。各時刻差の基準については、先に述べたとおり、UTCとEWEの両方を使用した場合を示した。これら2種類の基準の違いによる差異は、 $\pm 0.9 \times 10^{-14}$ であった。これはそれぞれの周波数基準の安定度の評価値から予想される値とよく一致しており、どちらも同程度に良い基準となっていることが分かる。以降の解析では代表としてUTCを用いる。

はがね山送信所運搬における測定値(CS#30)と理論値との差は $+2.9 \times 10^{-14}$ であった。CS#25、CS#26においては、2001年6月送信所へ搬入前の自然災害が原因(道路不通)により、いったん、小金井本所へ戻り、7月に搬入した。この間の温度環境は、時計原器室とは比較できないくらい悪化していたと推測できる。理論値との誤差が大きい原因は、片道所要時間(東京都-福岡県)が2日間に及ぶ運搬時の温度環境が影響していると考えられる。表4のはがね山送信所のデータ6個の平均値は $+13.0 \times 10^{-14}$ となり、理論値との差は $+4.0 \times 10^{-14}$ であった。

おおたかどや山送信所における測定値(CS#31、往復の平均値 $+8.4 \times 10^{-14}$)と理論値との差は、

表4 理論値と測定値の周波数シフト値の比較 (単位 10^{-14})

時計ID	$\Delta f_{r,s}$ (EWE基準)	$\Delta f_{r,s}$ (UTC基準)	$\Delta f_{r,s}$ (理論値)
CS#25	19.7	20.2	はがね山送信所
CS#26	6.3	7.2	
CS#30	12.6	11.9 (図4参照)	
CS#28	6.4	6.2	おおたかどや山送信所
CS#31(往路)	8.8	9.1 (図5参照)	
CS#31(復路)	8.2	7.6 (図5参照)	

+ 0.6×10^{-14} であった。CS#31はセシウムビーム管に高性能型を使用しているため、通常型セシウムビーム管のCS#28より周波数安定度(1日)が約3倍優れている[12]。表4のおおたかどや山送信所のデータ6個の平均値は、 $+7.7 \times 10^{-14}$ となり理論値との差は、 -0.1×10^{-14} と、極めて良い一致が見られている。ここで、運搬先の違いによる測定値と理論値の差は、おおたかどや山送信所運搬の場合が、はがね山送信所運搬の場合より小さい結果となった。これは、運搬所要時間の違い(温度環境の差)が観測精度に影響を及ぼしていると考えられる。

また、移動中の温度、磁場、振動における誤差は、それぞれのデータがないため誤差の見積は不可能である。しかし、セシウム周波数標準器5071Aのカタログ仕様値と想定される環境変化の最大値から推測する限りでは、 $\sim 10^{-13}$ より小さい。特に、おおたかどや山送信所の誤差が、はがね山送信所の誤差の値より小さいのは、運搬距離が短く、比較的短時間で運搬可能な条件であったためと推測できる。測定結果もこの推測を支持している。

5 まとめ

我々は長波帯標準電波送信所への原子周波数標準器を運搬する機会を得て、取得されたデータから重力赤方偏移を検出することを試みた。得られた結果は、運搬の状況にも依存するが、

測定値と理論値は、移動が容易なおおたかどや山送信所運搬の場合ではほぼ一致し、移動距離が長いのはがね山送信所運搬の場合では、 4×10^{-14} 程度の差があり、この値は理論値の約半分であった。この結果によると、使用するセシウム原子周波数標準器によるばらつきが見受けられるが、この原因は、運搬途中の時計周囲の環境条件(温度、磁場)の変化、振動及び移動中の時刻差データ補間計算の基準の取り方などの影響が考えられ、更なる解析が必要と思われる。

以上より、日本標準時の発生、維持、供給のためのシステムは非常に高精度かつ安定なものであり、重力赤方偏移という 10^{-14} 台の周波数変化を検出するのに十分なものである、ということが示された。相対性理論が様々な実験において高精度で実証されている現在、我々の重力赤方偏移検出が科学的な新規性はさほどないが、40年ほど前にはこの効果の検出が至難であったことを考えると、改めて時間周波数標準技術の大きな進展に目を見開かされる。また、この研究を通じて時刻・周波数の比較計測と、そのデータ解析などで日ごろの業務を再確認し、それを利用した計測や解析の限界を見極めたことは非常に有意義であった。

今後も日本標準時システムの精度と信頼度を向上させていき、セシウム原子周波数標準器の運搬の機会があれば、その精度限界まで計測できるよう、測定とデータ解析の技術を向上させていきたい。

参考文献

- 1 J. C. Hafele and R. E. Keating, Science, 177, 166, 1972.
- 2 R. F. C. Vessot et al., Phys. Rev. Lett. 45, 26, 2081, 1980.
- 3 S. Iijima and K. Fujiwara, "An experiment for the potential blue shift at the Norikura corona station", Annals of the Tokyo Astronomical Observatory Second Series, XVII, 1, 68, 1978.
- 4 細川, "時間・周波数標準における相対論効果", 本特集.
- 5 栗原, "長波標準電波", 本特集.
- 6 Proceedings of Asia-Pacific Workshop on Time and Frequency 2000(ATF2000), 31 Oct. -2 Nov. 2000, CRL TOKYO.
- 7 Proceedings of Asia-Pacific Workshop on Time and Frequency 2002(ATF2002), 5 Nov. -8 Nov. 2002, KRISS KOREA.
- 8 B. Guinot, International Report: Application of general relativity to metrology, Metrologia, 34, 261-290, 1997.
- 9 花土ほか, "原子時計決定アルゴリズム", 本特集.

- 10 BIPM Circular T, 4.Duration of the TAI scale interval <ftp://62.161.69.5/pub/taipublication/>
- 11 後藤ほか, "GPS コモンビュー法", 本特集.
- 12 Agilent 5071A Primary Frequency Standard, Operating and Programming Manual, Dec.2000.
- 13 伊東宏之ほか, "一次周波数標準器用高精度参照標準の構築", 第50回応用物理学関係連合講演会, 28p-ZS-16, pp.203,2003.



小竹 昇

電磁波計測部門日本標準時グループ
研究員
周波数標準

清水 義行

電磁波計測部門日本標準時グループ特
別研究員



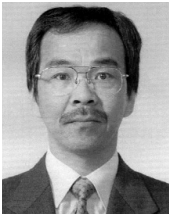
今村 國康

電磁波計測部門日本標準時グループ主
任研究員
周波数標準



金子 明弘

電磁波計測部門タイムスタンププラッ
トフォームグループ研究員
周波数標準



栗原 則幸

電磁波計測部門日本標準時グループ
リーダー
周波数標準、空間計測



細川 瑞彦

電磁波計測部門原子周波数標準グルー
プリーダー 理学博士
原子周波数標準、時空計測