

世界初、多重ミュオン粒子を用いたグローバル高精度時刻同期

1. 発表のポイント

- ◆ 多重ミュオン粒子（注 1-1）利用による時刻同期が 100 ナノ秒（10 億分の 1 秒: ns）を切る精度で可能であることを世界で初めて示した。
- ◆ 屋外、屋内、地下、水中環境問わず高精度な時刻同期が世界中でほぼ永久（注 2）に可能。
- ◆ GPS/GNSS（注 3）に頼らない高精度な時刻同期技術が実現できる。

2. 発表概要

東京大学国際ミュオグラフィ連携研究機構は高エネルギー1次宇宙線（注 4）が生成する Extended Air Shower（以下高エネルギーEAS）（注 1-2）に含まれる多重ミュオン粒子の時空間構造並びに Oven Controlled Crystal Oscillator（OCXO）（注 5）の時間特性を分析することにより、空間的に離れた時計をワイヤレスかつ、100 ns を切る精度で時刻同期させることが可能であることを世界で初めて示した。このような多重ミュオン粒子は地球上至るところで常時生成されているため、同時刻同期手法は世界中で実施可能である。また、高エネルギー1次宇宙線が生成するミュオン粒子は、強い透過性を持つことから、屋内、地下、水中環境でも屋外とほぼ同等な高精度な時刻同期が世界中で可能となる。更に、高エネルギーEASに含まれる多重ミュオン粒子の時空間構造は地球大気の密度分布が極端に大きく変化しない限り、大きくは変わらないので、ほぼ同精度の時刻同期精度を何百万年にも渡って実現することが期待できる。将来、本方式を広範囲に展開することにより、GPS/GNSS に頼らない高精度な時刻同期が可能となる。

3. 発表内容

<グローバル高精度時刻同期について>

私たちの社会・産業基盤を支える産業用オートメーション及び制御システム、金融における高頻度取引、5G ネットワークなどにおいて、時刻同期に求められる精度は年々高まっている。現在、最も一般的な方法として採用されているのが GPS/GNSS による時刻同期であるが、諸事情（注 6）により GPS に変わる、あるいは GPS をバックアップする高精度時刻同期技術が求められている。本研究開発によって提案された CTS モジュールアレイ（注 7）は GPS を用いない、長期にわたる高精度時刻同期を可能にするため、これらの社会的要求に答えることができると考えられる。

銀河系における超新星爆発などの高エネルギーイベントによって加速される非常に高いエネルギーを持つ1次宇宙線と地球大気が対流圏界面（注 8）付近で反応すると、多数の2次粒子が発生して、それらがシャワーのように地球上に降り注ぐ。これらの粒子の相対論的エネルギー（注 9）は非常に高いため、各粒子のエネルギーにばらつきがあっても飛行速度にほとんど違いは現れず、ほぼ真空中における光速（注 10）で大気中を飛行す

る。また、高エネルギーEASの軸と各粒子が成す角度が小さいため（従って、各粒子の飛行距離に大きな違いがないため）、これらの粒子は、ほぼ同時に地球上に到来する（図1）。2次粒子の中には電子やミュー粒子などの荷電粒子が含まれているが、それらについては、従来の粒子検出器を用いることで容易に測定することが可能である。本グローバル高精度時刻同期技術は、空間的に複数のCTSモジュールを一定の密度でアレイ配置することで、この2次荷電粒子の同時到達性を測定して、空間的に離れた時計を補正する技術である。

時刻の同期精度は高エネルギーEASの発生頻度による。例えば、1 PeV（注11）のエネルギーを持つ1次宇宙線の地球への到来頻度は、1 km²あたり1秒に3回程度である。一方、時計は、時刻をカウントしている周期のわずかなずれ（ドリフト）により、ある程度の時間が経過すると指し示す時間が異なってくるが、このドリフトがEASの発生頻度に対して、大きすぎると、最初の補正から次の補正の間までに時計の針が大きく変化してしまい、正確な時刻同期を担保することが難しい。逆に、ドリフトがEASの発生頻度に対して、十分小さければ、高い時刻同期精度を得ることが可能である。OCXOは安価で手に入る時計の中では非常に安定した時計であり、ドリフトレベルが小さい（図2）。図3に今回評価したOCXOに、(A) 5×10^{-5} 、(B) 1×10^{-4} 、(C) 2×10^{-4} の設置密度で配置したCTSモジュールアレイを組み合わせた場合に得られる時刻同期精度のシミュレーション結果を示す（例えば、 1×10^{-4} は土地1万平米あたりに1平米の検出器を一つ配置することを示す。）。結果、(A)、(B)、(C)のケースに対して、それぞれ98 ns, 56 ns, 42 ns（それぞれS.D.）の同期精度が得られ、従来のワイヤレス技術（注12）と比べて一桁以上高い同期精度が得られることがわかった。

<今後の展望>

将来、本技術は、地表においては、GPSに変わる、あるいはGPSをバックアップする高精度時刻同期技術としての活用が期待される。また、GPS信号が入りにくい山間部における地震計アレイ観測など、空間的に離れた位置における時刻同期が必要な観測実験にも応用可能である。更に、高エネルギーEASに含まれる成分のうち、多重ミュー粒子は強い透過性を持つことから、本技術を用いれば、屋内、地下、海中環境でも屋外とほぼ同等な高精度な時刻同期がワイヤレスで可能となる。将来セシウム発振器（注13）のようなより安定した時計を用いることができれば、到来頻度が低い、より高エネルギーのEASを利用できるようになるため、CTSモジュール配置密度を下げるができる（即ち、CTSモジュール間の距離を伸ばすことができる）。EASが地球上至るところで発生（注14）していることを考えると、同手法を用いることで地球上いたるところで時刻を同期させることが可能である。更に、一定の配置密度で存在するCTSモジュールを連鎖的に同期させることで数千キロを超える距離でも時刻同期（注15）をさせることが可能である。

4. 発表雑誌

雑誌名：Scientific Reports

論文タイトル：Cosmic time synchronizer (CTS) for wireless and precise time synchronization using extended air showers

著者：Hiroyuki K. M. Tanaka*

DOI番号：10.1038/s41598-022-11104-z

アブストラクト URL：https://doi.org/10.1038/s41598-022-11104-z

5. 問い合わせ先

東京大学国際ミュオグラフィ連携研究機構 機構長

教授 田中宏幸 (たなか ひろゆき)

〒113-0032 東京都文京区弥生 1 丁目 1-1

Email: ht"at"muographix.u-tokyo.ac.jp

ht"at"eri.u-tokyo.ac.jp

ht"at"virtual-muography-institute.org

※3つのアドレスすべてにお送りください。

国際ミュオグラフィ連携研究機構ウェブサイト: <https://www.muographix.u-tokyo.ac.jp/>

6. 用語解説

(注 1-1) 多重ミュオン粒子

Extended Air Shower (EAS) (注 1-2 参照) においては、1 次宇宙線が大気中の原子核と相互作用する事で、中間子が生成する。この中間子はすぐに崩壊するが、エネルギーが高いと崩壊する前に別の大気中の原子核と相互作用して別の中間子を生成する。やがてはこれらの中間子がミュオン粒子に崩壊するため、結果的にミュオン粒子数が多重化する。

(注 1-2) **Extended Air Shower** (以下高エネルギーEAS)

大気に入射した高エネルギーの 1 次宇宙線は大気中の原子核と相互作用する事で、対流圏界面付近で高エネルギーの 2 次粒子を発生する。この 2 次粒子もエネルギーが高いため、さらに別の 2 次粒子を生成する。このような反応が連鎖的に起きる事で、大気中では大量の 2 次粒子が発生する。この現象を **Extended Air Shower (EAS)** と呼ぶ。大気を進むにつれて 2 次粒子数は増加するが、それに伴って、1 粒子当たりのエネルギーは低くなっていく。

(注 2) 高精度な時刻同期が世界中でほぼ永久

地球大気密度構造が極端に変わらないことが条件。百万年における同期精度の低下レベルは同期世界最高精度原子時計で 30 ミリ秒/百万年、ストロンチウム光格子時計理論値で 30 マイクロ秒/百万年、本技術理論値で <100ns/百万年。(但、本技術によって、<100ns の時刻精度が引き続き保たれることを示すものであり、例えば、<1ns/1 万年を示すものではない。)

(注 3) **GPS/GNSS**

人工衛星から発射される信号を用いて位置測定・航法・時刻配信を行うシステムのことである。

(注 4) 高エネルギー1 次宇宙線

宇宙空間を飛び交う高エネルギー粒子のことである。地球の大気中で発生する 2 次宇宙線に対しての呼び名である。主な成分は陽子である。

(注 5) Oven Controlled Crystal Oscillator (OCXO)

恒温槽によって水晶発振器の温度を一定に保つことで、周囲の温度変化による出力周波数の変化が、少なくなるようにした水晶発振器のこと。恒温槽の稼働電力が必要なため、消費電流が数 W 程度と比較的高い。安価である。

(注 6) GPS/GNSS による時刻同期に伴う諸事情

(1) GPS 信号はジャミング（電波妨害）に弱い、(2) GPS 信号は「なりすまし攻撃」や時刻情報の改ざんが容易にできる、(3) GPS 専用アンテナが衛星を捕捉できない時間帯が存在する、(4) アンテナ設置が困難である、(5) 屋内、地下、海中などの環境下で使用できない、などの事情。

(注 7) CTS モジュールアレイ

Cosmic Time Synchronizer Module Array. OCXO (注 5 参照)、粒子検出器、Time to Digital Converter (TDC)、カウンターを組み合わせた時刻補正モジュール。OCXO の出力パルスを数えるカウンターの計測値を TDC に記録された粒子検出時間で補正するモジュールである。このモジュールをアレイ状に配置することで、EAS に含まれる空間気象に離れた位置の荷電粒子の同時イベントの検出タイミングをカウンターの補正に用いる。

(注 8) 対流圏界面

地球の対流圏と成層圏の境界領域である。高さの範囲は平均して両極では 6km、赤道では 17km 程度である。

(注 9) 相対論的エネルギー

静止質量 m_0 、速さ v で運動する自由粒子がもつ全エネルギー E を相対論的エネルギーという。粒子の相対論的エネルギーが大きいとは、その運動エネルギーが質量エネルギーと同等かそれ以上である事を言い、その場合、粒子の速度は、エネルギーにほとんど依らず、ほぼ真空中の光速 (注 11) となる。

(注 10) 真空中における光速

真空中における光速の値は 299792458 m/s (約 30 万 km/s) と定義されている。空気中の光速は真空中の光速より 0.03%程度遅く、粒子の相対論的エネルギーが非常に大きくなると空気中の光速を超える。

(注 11) PeV

ペタ電子ボルト。ペタとは、1000 兆 (10 の 15 乗) 倍を表す接頭辞であり、1 電子ボルトは電子 1 個の電荷をもつ荷電粒子が、真空中で 1V の電位差で加速された際に得るエネルギーである。

(注 12) 従来のワイヤレス技術

例えば、多数の産業用ロボットなどを高精度に連携させるために同期制御技術が必要になるが、機器の配置を容易にするために無線化が必要となる。ところが、通信用無線規

格では、諸事情により、通信に要する時間に不確実性が生じる。そのため、様々な技術が開発され、ワイヤレスによる時計同期精度を上げてきた。以下、一例を挙げる。

multi-hop time-slotted-channel-hopping (TSCH) network: 76 μ s

the temperature-assisted clock synchronization: 15 μ s

second order linear consensus algorithm: 1 μ s

dynamic stochastic time synchronization: 8 μ s

fine-grained network time synchronization: 6.29 μ s

(注 13) セシウム発振器

原子時計の一種。市販されているものは高価であるが、14 日間の運用によるドリフトレベルが 100 ns 以下と極めて高安定である。すなわち、100 ns 以下の精度であれば、14 日に一度 CTS による時刻補正をすれば良い。

(注 14) EAS が地球上至るところで発生

1 PeV 以上の 1 次宇宙線が生成する EAS が毎秒 14 億個 (10 PeV 以上の 1 次宇宙線が生成する EAS は毎秒 1400 万個) 地球上で発生している。

(注 15) 数千キロを超える距離でも時刻同期

仮に東京-大阪間 300 km を 300 m 間隔、1000 個の CTS モジュールで同期を連鎖させた場合、東京-大阪間の同期誤差は 3 マイクロ秒程度となる。

7. 添付資料

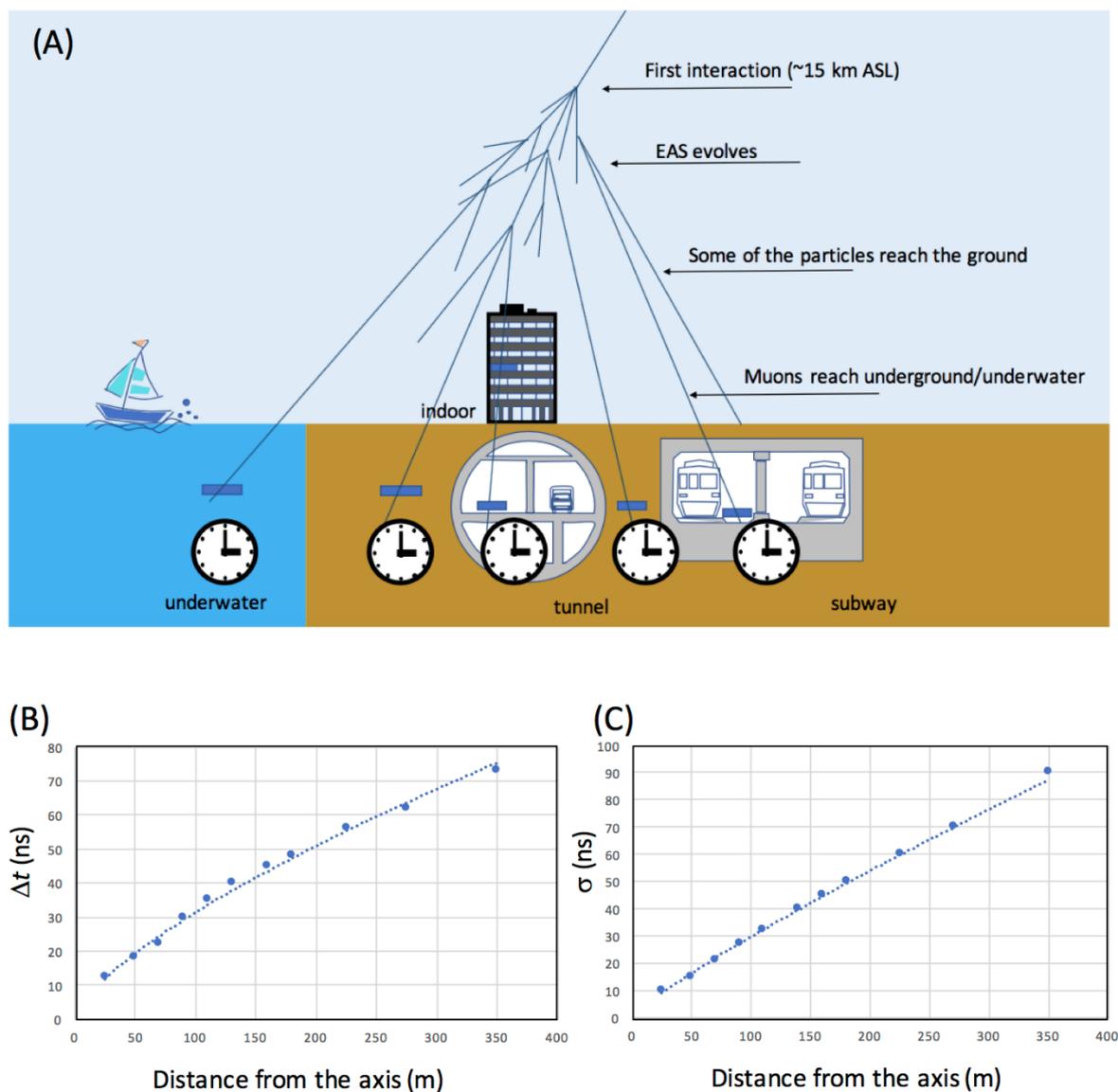


図1：多重ミュオン粒子を用いたグローバル高精度時刻同期の原理

© 2022 Hiroyuki Tanaka/Muographix

(A) は EAS と CTS モジュールの関係を模式的に示している。青色の長方形が CTS モジュールを示している。EAS の横方向の広がりとは約 10 倍に拡大されている。下段には 10 PeV のエネルギーを持つ 1 次宇宙線により生成された EAS の時空間構造を示す。(B) はミュオン粒子の到着時間、(C) にはミュオン粒子の到着時間に付随する時間揺らぎ (1 S.D.) を示す。

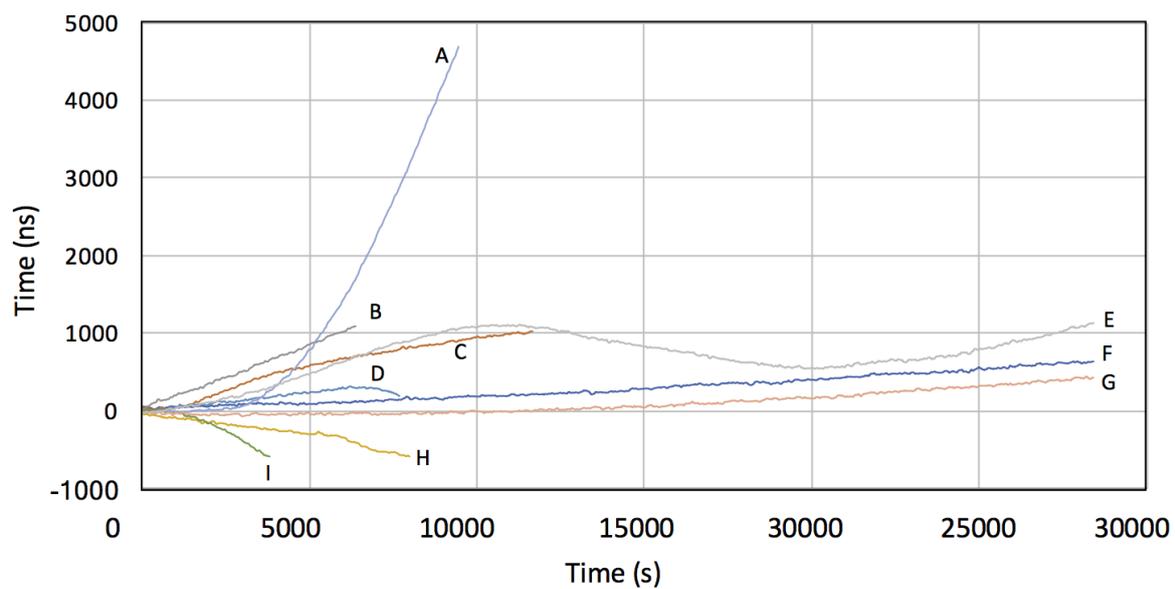


図 2 : OCXO の評価結果

© 2022 Hiroyuki Tanaka/Muographix

OCXO は先ず GPS アンテナに接続され、GPS 信号と同期が取られる。その後、その接続を切つてからの時間の関数として、様々な条件下で OCXO のドリフトレベルを測定した (A~I)。

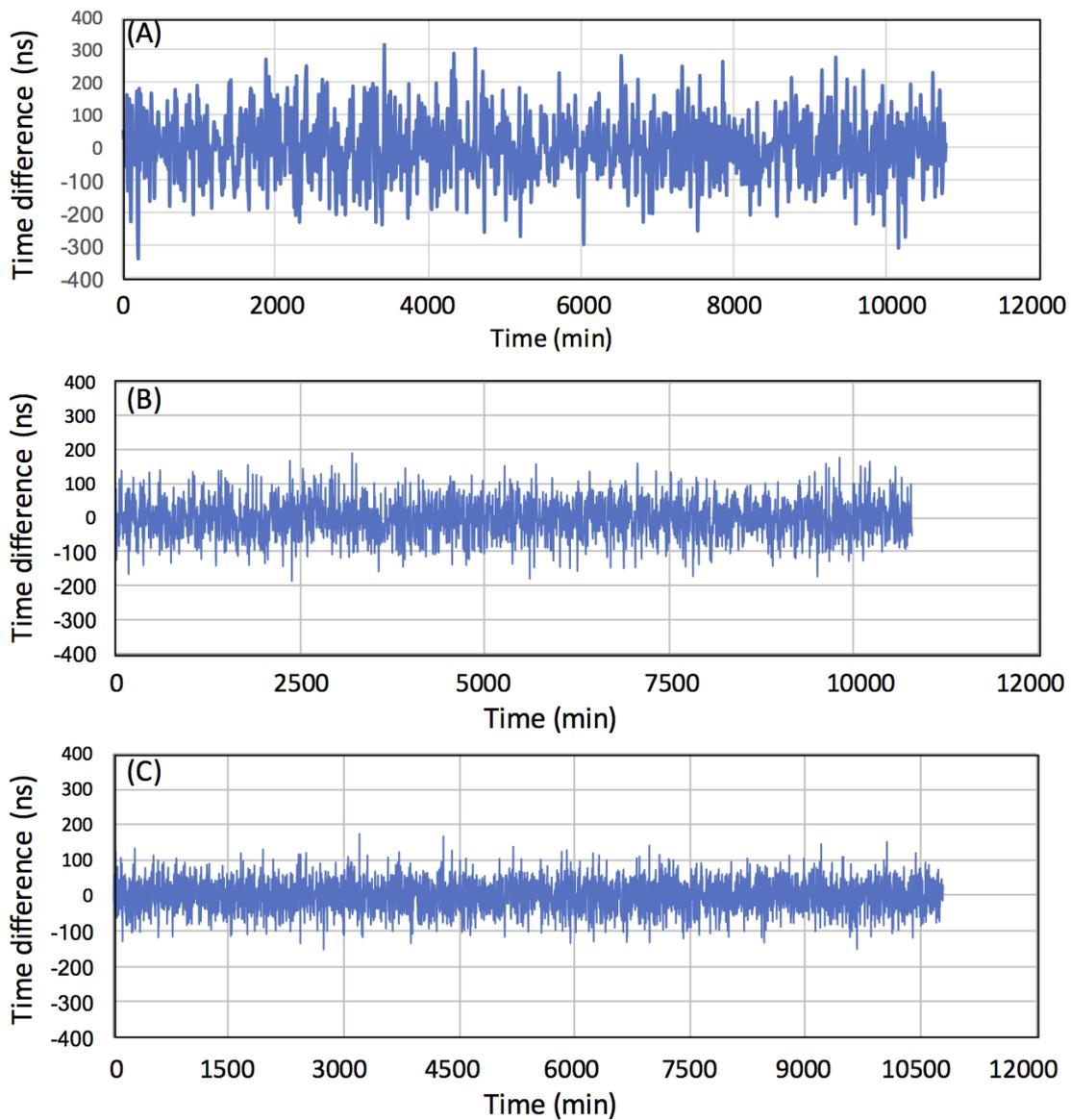


図3：1週間のCTSオペレーションプロファイル

© 2022 Hiroyuki Tanaka/Muographix

本結果は、今回評価された OCXO (図2) に(A) 5×10^{-5} 、(B) 1×10^{-4} 、(C) 2×10^{-4} の設置密度で組んだ CTS モジュールアレイを組み合わせた場合に得られる時刻同期精度をシミュレーションした結果である。