

海の中では時の進みが遅くなる？ 光格子時計の測地応用の展望

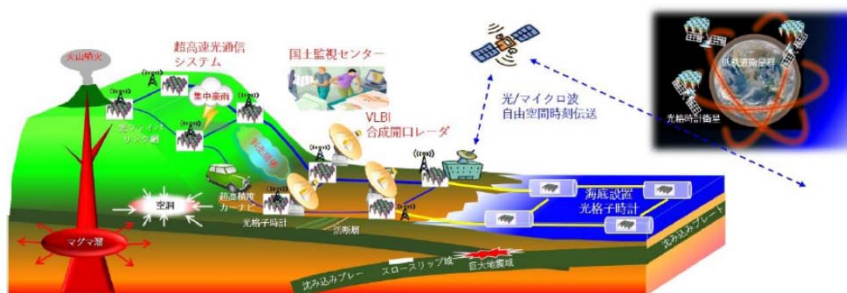
1. 現代社会における時計と光格子時計
2. 相対性理論と時計の進み
3. 時計で地殻変動を測る

東京大学大学院 理学系研究科
地球惑星科学専攻 准教授
田中 愛幸

はじめに



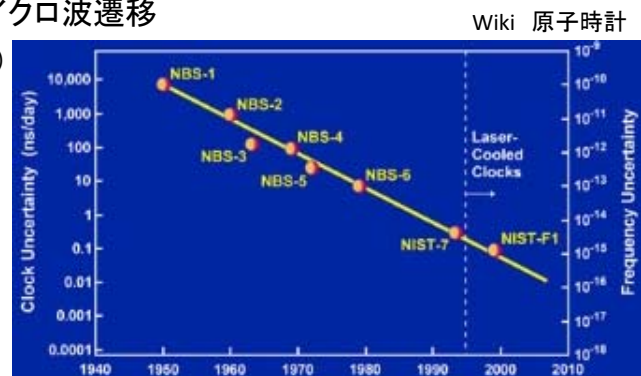
- JST未来社会創造事業「クラウド光格子時計による時空間情報基盤の構築」
2018-2027 https://www.katori-project.t.u-tokyo.ac.jp/index_j.html
- 時計の開発、光ファイバー技術開発、時計の社会応用の3つのグループからなる
- 講演者は「相対論測地応用グループ」の代表、地球物理学(測地学)を専門
- 地殻変動計測への応用を主目標。海でも使える？



1. 現代社会における時計と光格子時計

現代社会を支える正確な時計

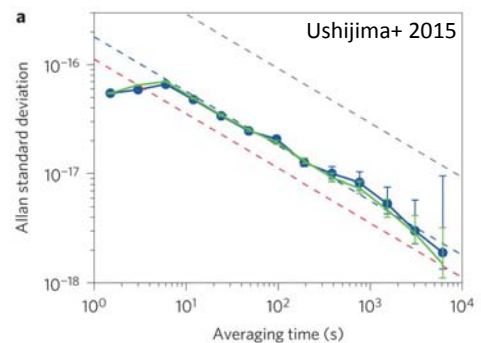
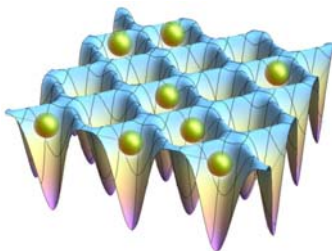
- 高速通信やナビゲーション(GPS)には、**正確な時間の目盛り**が必要
- **規則正しく振動**するものを時間の物差しとする＝時計
- 現在の1秒の長さは**原子時計**を用いて定義
 - セシウム原子の超微細構造準位間のマイクロ波遷移
(91億9263万1770回振動する時間＝1秒)
 - 実現される周波数の相対精度は 10^{-15}
1日あたり0.1ナノ秒
(約3千万年で1秒)の誤差



1. 現代社会における時計と光格子時計

光格子時計



- マイクロ波より振動数の高い「**光**」を用いる時計開発が進行
- **光格子時計**は国際標準を3桁上回る**18桁**の精度(300億年に1秒)を極めて**短時間**の計測で実現
- 常識的なアイデアを覆す
 - 原子1個で多数回測定 → 多数の原子をまとめて測定
 - 擾乱をできるだけなくす → 外から擾乱を与えトラップ
 - 18桁精度達成に10日 → たった数時間！



香取秀俊 研究室 https://www.u-tokyo.ac.jp/focus/ja/features/f_00063.html

相対性理論

- 物体の速度が速い/**重力の強い**場所では、**時の進みが遅くなる**
- 地表付近に置かれた2つの静止した時計の進みと標高の関係

$\frac{dt_{high}}{dt_{low}} = 1 + \Delta W/c^2$	t_{high}, t_{low}	原子時計が示す時刻	重力が弱い
	dt_{high}, dt_{low}	一目盛り(波)の間の経過時間	 dt_{high}
	ΔW	位置エネルギーの差	∇
$\Delta W = g\Delta H$		$g \cong 9.8 \text{ ms}^{-2}$	 dt_{low}
$\Delta W/c^2 \approx 1.1 \times 10^{-18} \Delta H [\text{cm}]$			重力が強い

- 標高が1 cm低くなると 1.1×10^{-18} だけ、時の進みが遅くなる
- 光格子時計は、**約3時間で1 cm相当の変化を検出**できる

光格子時計による時の進みの計測とは？

- 標高が低いところは高いところ比べて時の進みが遅くなる
- 2つの時計の相対的關係しか分からない(光ファイバーで**2つを接続したときに初めて** 10^{-18} の精度で比が分かる)
- 玉手箱を開く＝竜宮城の時計と地上の時計をファイバー接続
→ 時の進みのちがいが判明

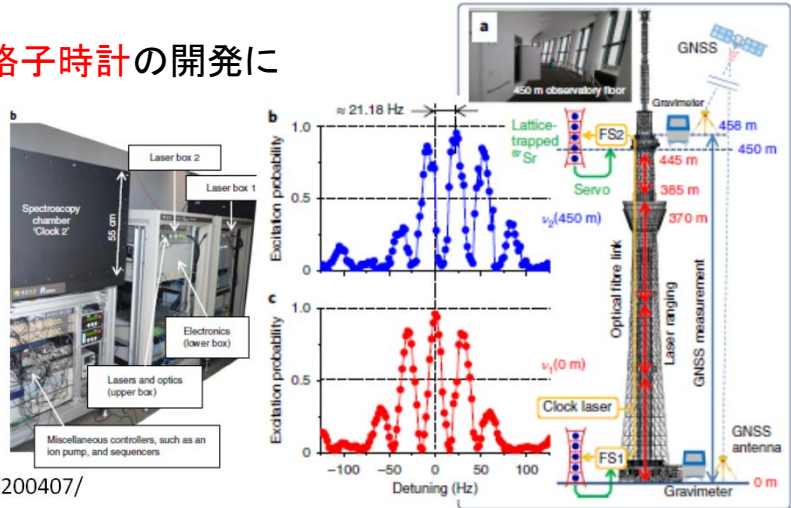


2. 相対性理論と時計の進み

スカイツリー実験

- 2018年秋に実施、測量による標高差と時計の進みの差がcm精度で整合
相対論を検証
- 18桁精度を持つ可搬型光格子時計の開発に
世界で初めて成功
- 実験室外運転の実証は、
光格子時計の社会実装に
向けた大きな一歩
- 小型化をJSTで継続中

Takamoto+ (2020)

<https://www.jst.go.jp/pr/announce/20200407/>

3. 時計で地殻変動を測る

地殻変動計測への応用

- 標高が異なる → 時計の進み方が変わる
- 時計の進み方が異なる → 標高の差が分かる
 - 欧州では標高ゼロである平均海面の定義が国や時期により異なり、国際的な標高基準統一には効率的な標高測定が必要（水準測量→時計測量）
 - 17桁（10 cm）精度の時計で十分らしい...
- 時計の進み方が時間的に変化 → 標高差の時間変化が分かる
 - 本邦は標高基準は十分な精度で決定済
 - 欧州と異なり不安定な地殻
 - 18桁（1 cm）精度を短時間で達成できる光格子時計ならGPSより高い精度で地殻の隆起・沈降を捉えられるかも！

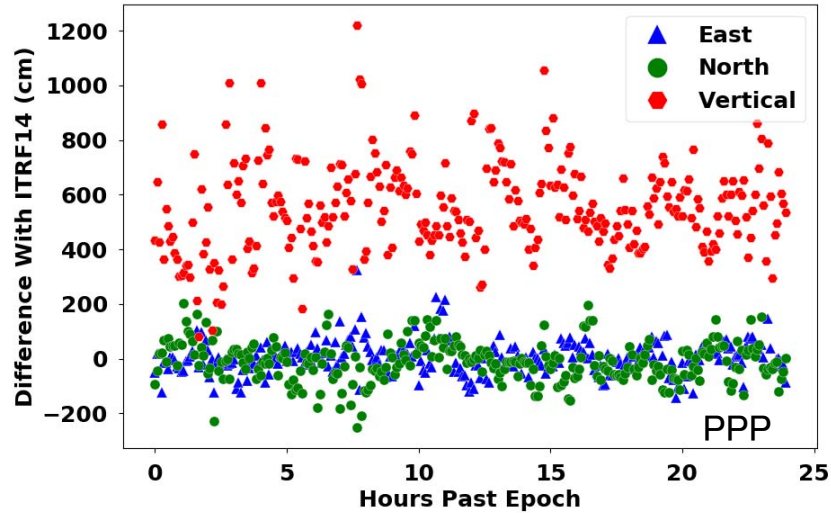


国土地理院WEB、NHK

3. 時計で地殻変動を測る

GPSの苦手な上下変動検出

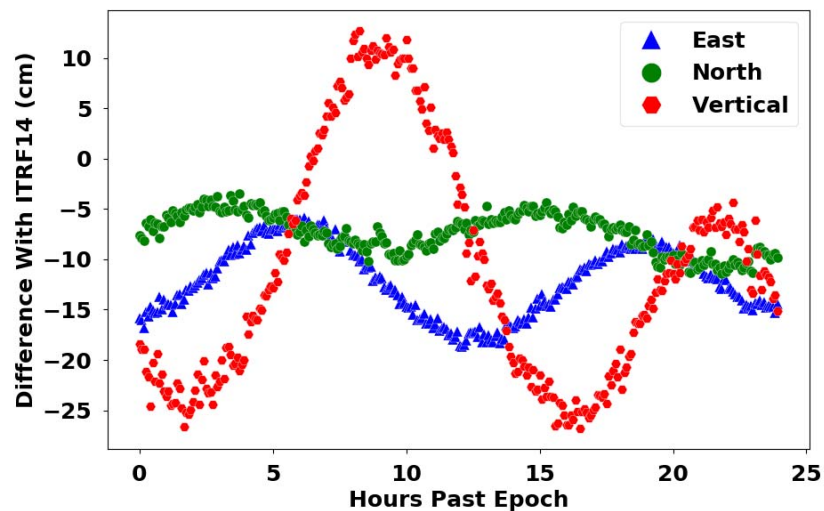
- 座標値データの例(5分平均値) 対流圏遅延補正前



3. 時計で地殻変動を測る

GPSの苦手な上下変動検出

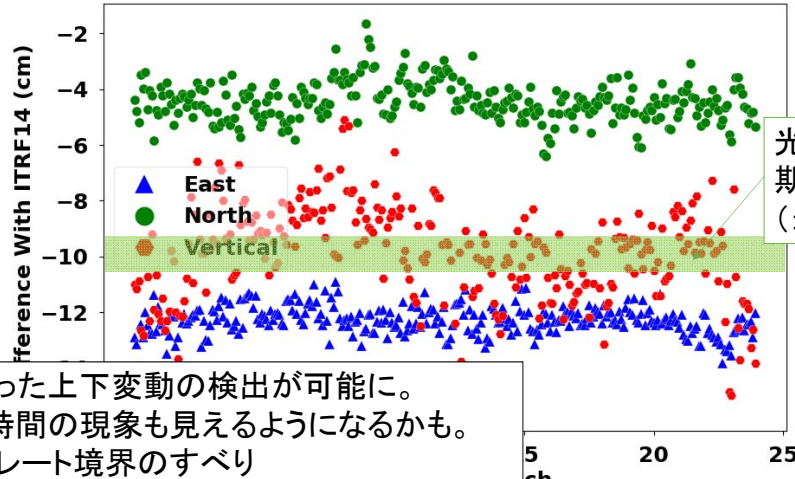
- 座標値データの例(5分平均値) 対流圏遅延補正後



3. 時計で地殻変動を測る

GPSの苦手な上下変動検出

• 座標値データの例(5分平均値) 潮汐補正後



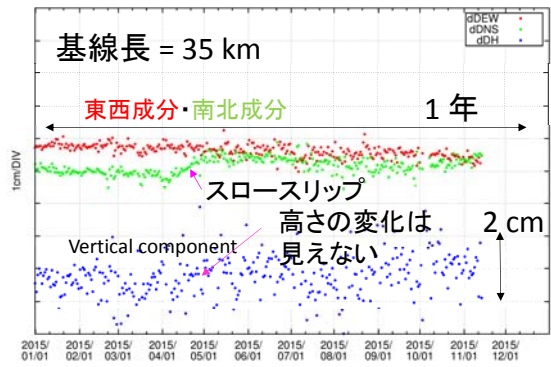
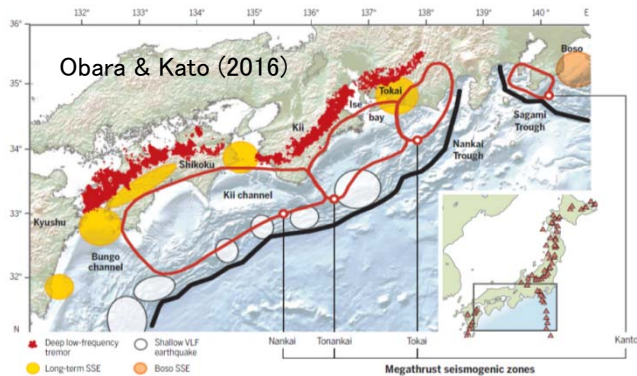
GPSで見えなかった上下変動の検出が可能に。
1日よりも短い時間の現象も見えるようになるかも。
・地震直前のプレート境界のすべり
・火山体の急速な膨張

JSTで研究中

3. 時計で地殻変動を測る

スロースリップ

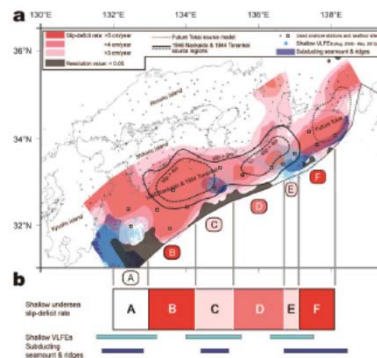
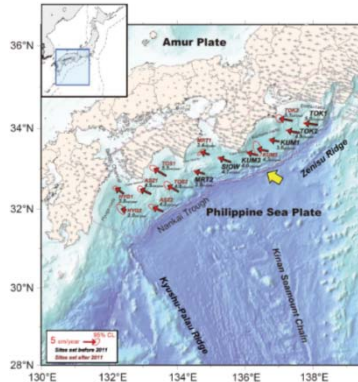
- 新学術領域研究「スロー地震学」2016-2020
- 通常の地震とプレート深部すべりの中間の性質をもち、頻繁に発生
- 巨大地震発生域周辺で起き、スロースリップが最後の一押しとなって巨大地震を誘発する例がある



3. 時計で地殻変動を測る

海底地殻変動

- 3.11地震では海溝の浅いところが地震前に固着していた
- 浅いところがどう振る舞うかの特定は、巨大地震や津波のリスク評価に重要
- 海底に置かれた光格子時計は、上下変動の改善に役立つ(GPS-音響測距・海底圧力・重力観測と組み合わせて用いる)



Yokota+ (2018)

まとめ

- 光ファイバー接続された光格子時計は、極めて短時間に18桁精度で時の進みを計測する。
- 相対論によれば、時の進みは標高が低いほど遅くなる。原子時計を用いた観測で、この事実が確かめられている。
- 光格子時計ネットワークを用いれば、GPSよりも短時間に地殻の上下変動を測ることができ、上下変動の苦手なGPSを補完できる。
- 海底における地殻変動の観測は、巨大地震や津波のリスク評価に重要な役割を果たしている。光格子時計の設置は原理的に可能で、他の手法とも組み合わせた観測の強化が望まれる。