

光時計による超精密周波数計測と それを支える高安定レーザー技術

情報通信研究機構

<http://www.nict.go.jp>

電磁波計測研究所

<http://aer.nict.go.jp>

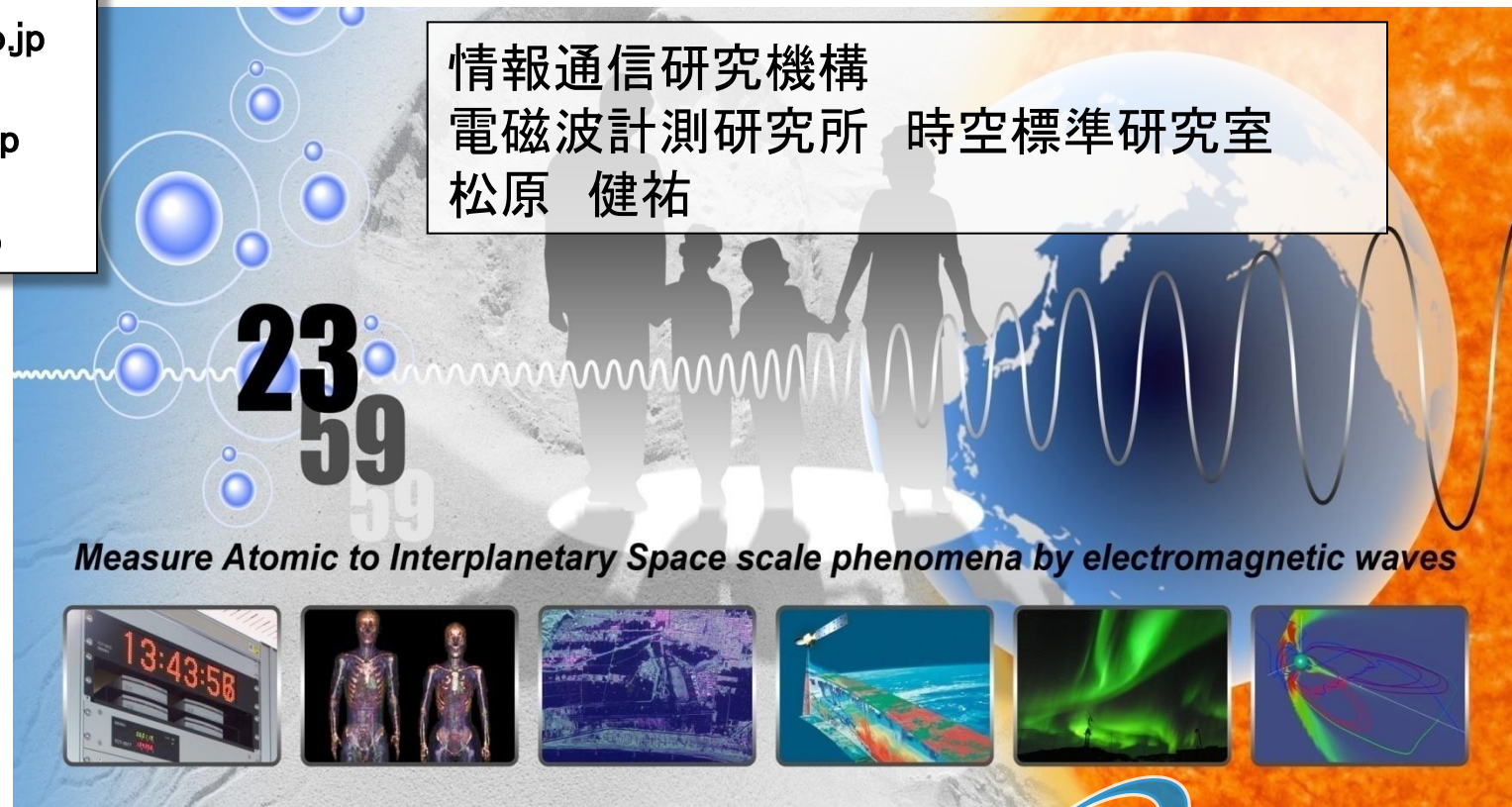
日本標準時

<http://jty.nict.go.jp>

情報通信研究機構

電磁波計測研究所 時空標準研究室

松原 健祐



講演内容

周波数の標準と時間

日本の標準時をつくるNICT

暮らしに役立つ時間と周波数

光の周波数で時間を決める

光時計とは、光時計のしくみとは

世界が競う精密時計の開発

NICTの光時計開発

カルシウムイオン光時計とインジウムイオン光時計

ストロンチウム光格子時計

光時計の周波数比較

高安定レーザー光源の開発

まとめ

日本の標準時をつくるNICT (NICT 2号館)

日本標準時(JST)システム



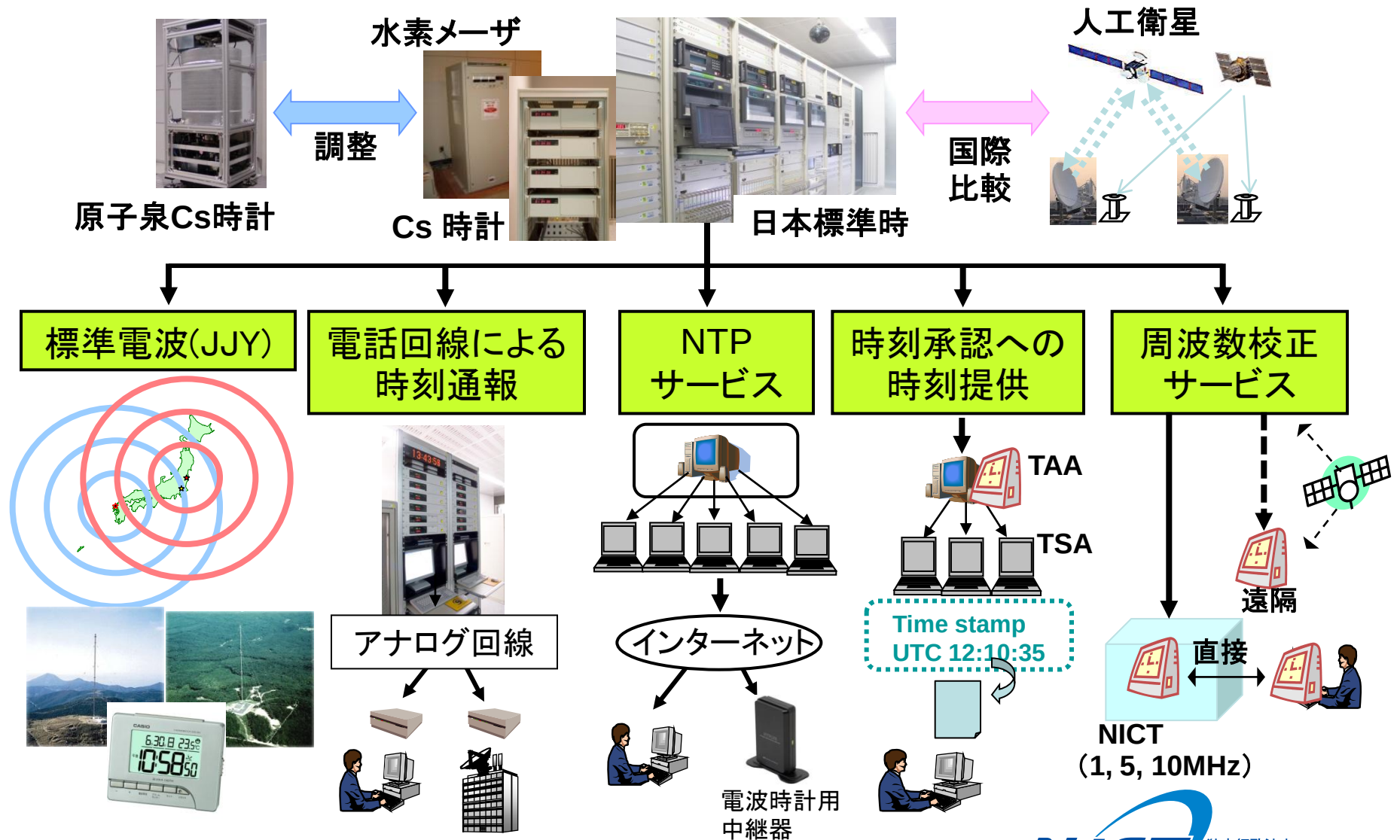
時計の神様「原子泉型Cs時計」



- ・高データ品質:
計22台(セシウム原子と水素メーザ)
の原子時計の高速演算・比較
- ・高精度: 協定世界時(UTC)からの偏差:
<±10ns
- ・高信頼: 3重バックアップと監視システム
- ・高耐災害: 免震、無停電、高いセキュリティ

- ・現在の「秒の定義」に基づく最高精度
の時間・周波数計測システム
- ・不確かさ 1.4×10^{-15} (2千万年に1秒)で
1秒を計測
- ・改良型NICT-CsF2を評価中

暮らしに役立つ時間と周波数



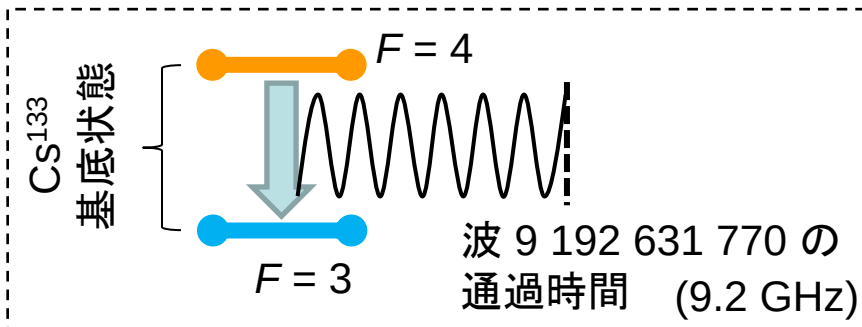
時計とは、1秒とは、光時計とは

時計とは



- この講演では「発振器」を「時計」と呼ぶ
- 高精度な発振器 = 周波数標準器

1秒の定義(1967年 国際度量衡総会)



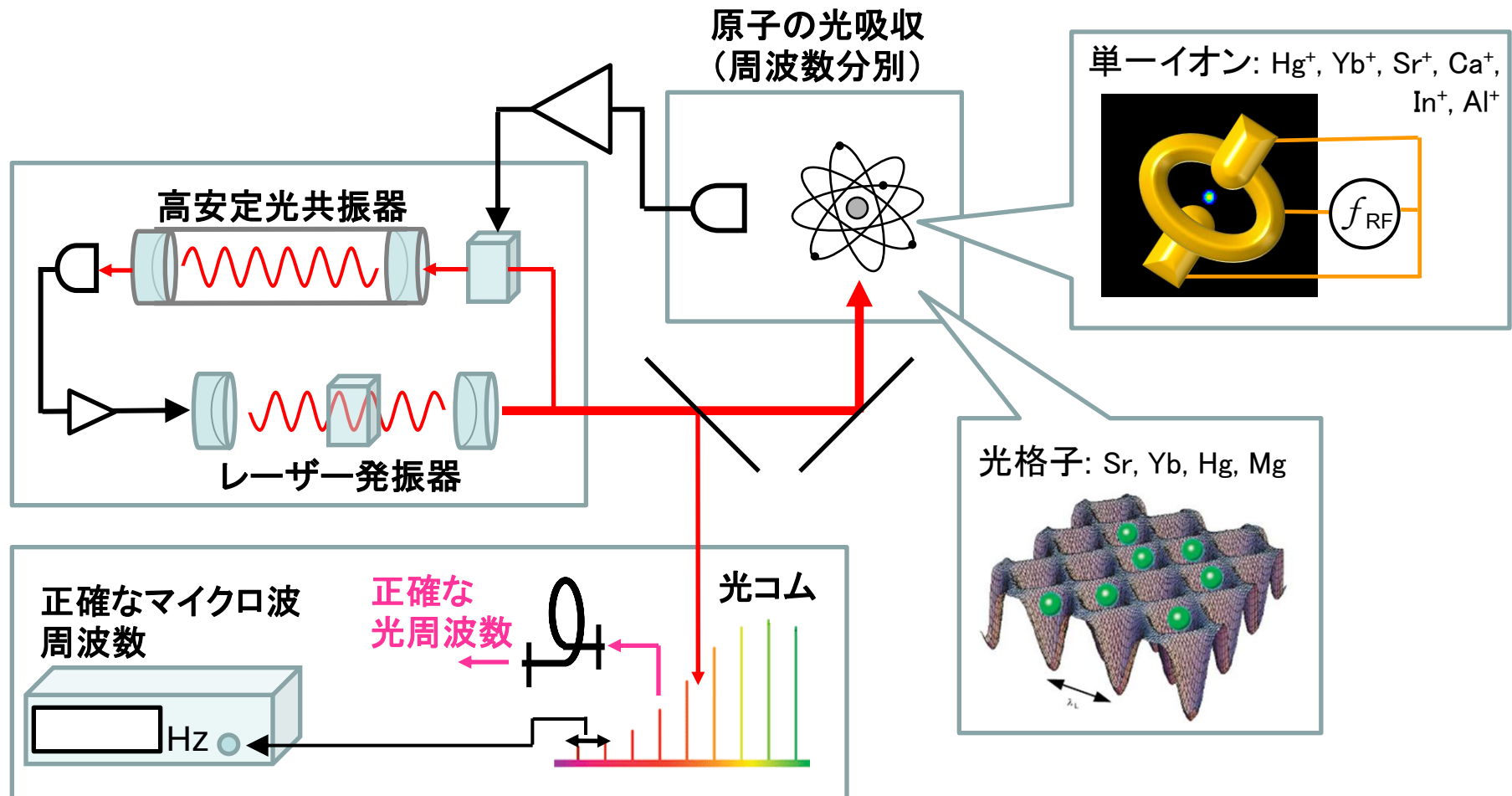
光時計とは

- 数百THz(光の周波数)を1秒の基準に用いた時計(周波数標準器)
- より高精度で1秒を計測できる
- 将来はCsに代わり、新しい「秒の定義」に利用される可能性

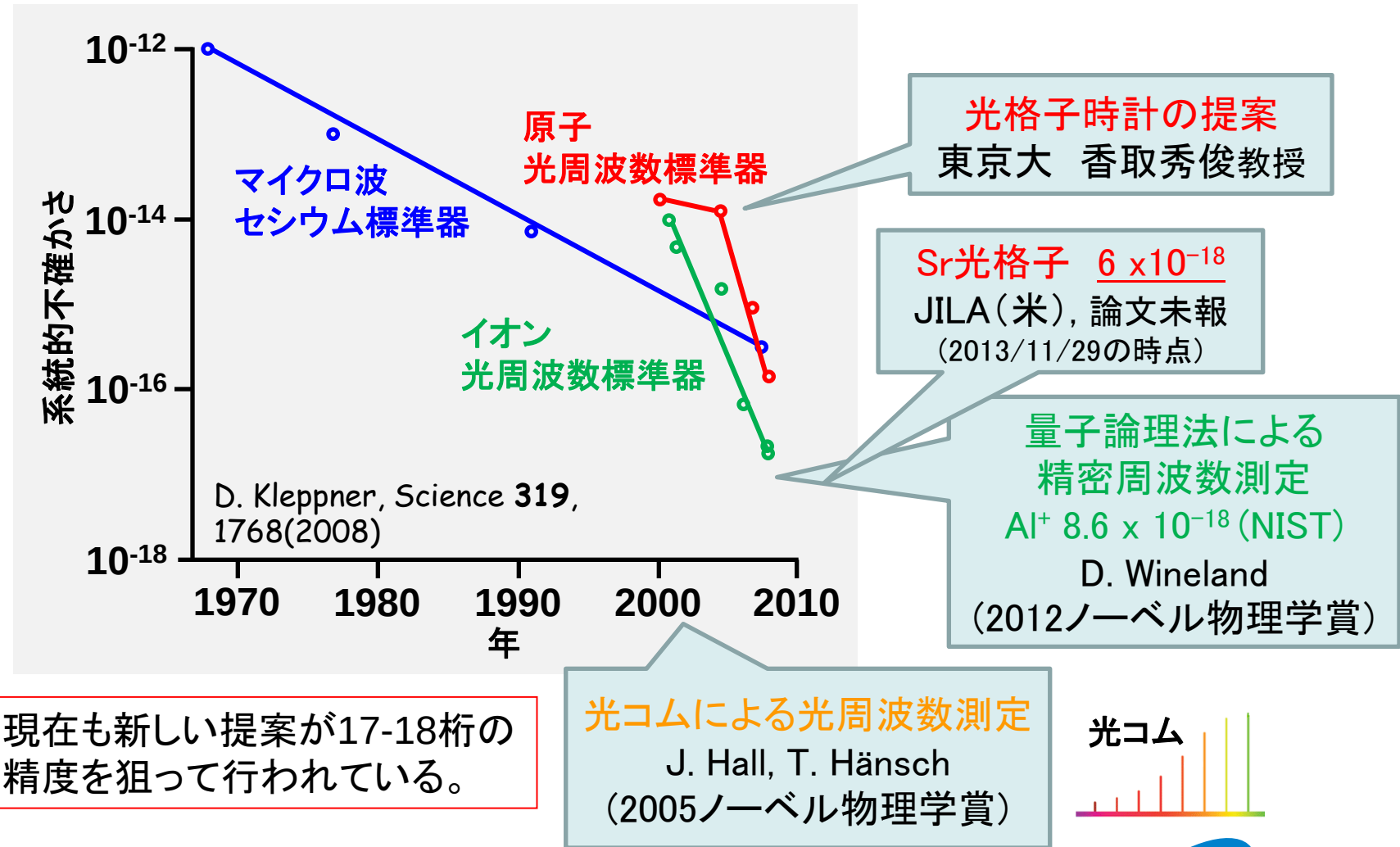
光時計の将来利用

- 古典的に不変と理論づけられている、極めて遅い物理的な変化の解明
- 地球上・宇宙の移動のナビゲーション
- 重力場などを含めた環境の精密計測

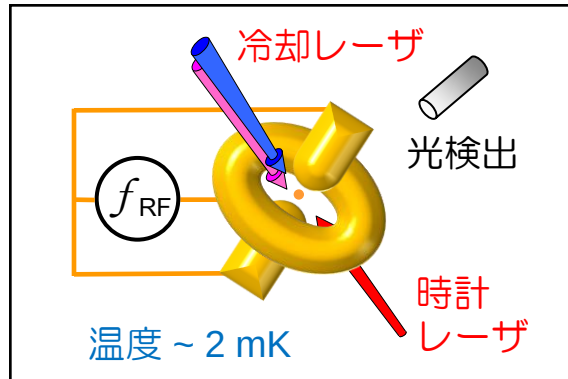
光時計のしくみ



世界が競う精密時計の開発



カルシウムイオン光時計とインジウムイオン光時計

カルシウムイオン時計^[1]

- ・ 簡易な装置で開発可能
- ・ 量子情報など広い応用
- ・ 黒体輻射シフトがやや大きい
 - オーストリア、中国でも開発

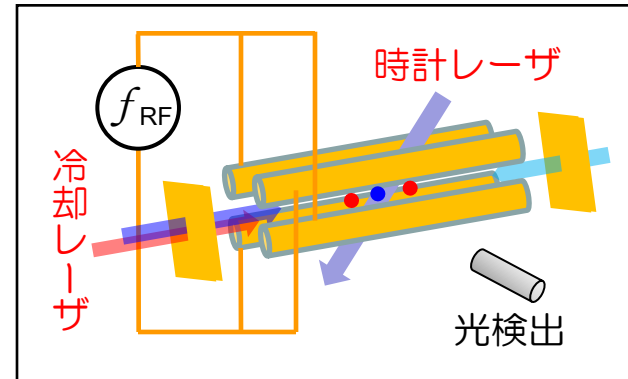
時計動作の周波数

411 042 129 776 398.4 (1.2) Hz

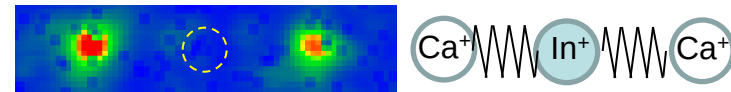
不確かさ: 3×10^{-15}

2013 年のCIPM時間周波数諮問委員会で、
「Ca⁺の推奨される周波数値」の更新に寄与。

インジウムイオン時計



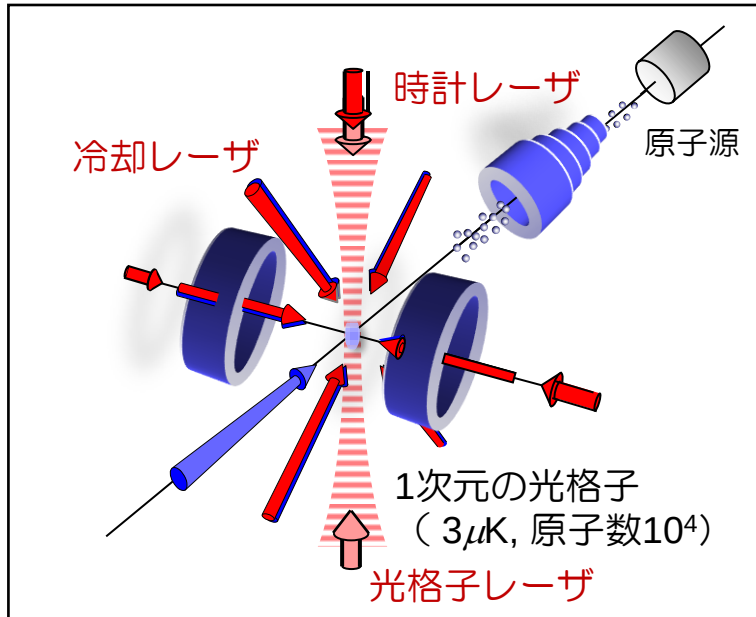
- ・ 黒体輻射シフトが小さいことから、世界最小レベルの不確かさの達成を狙える
- ・ 量子実験の応用 – 未来ICT研究所と連携
- ・ 紫外光技術への波及効果
 - ヨーロッパ、中国でも開発中



現在、時計動作に用いる光周波数の測定を目指して調整中。

ストロンチウム光格子時計

ストロンチウム光格子時計 [2]



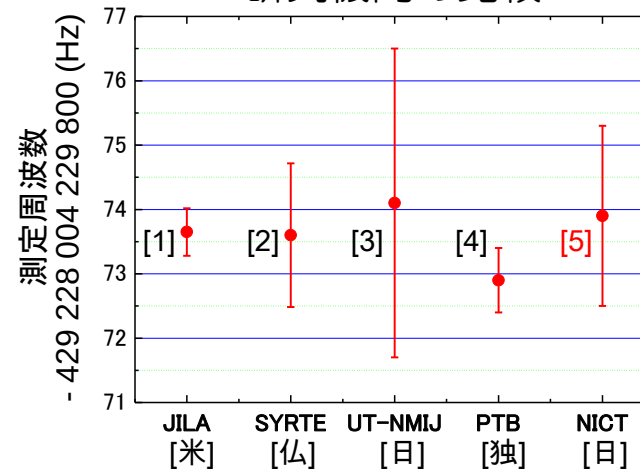
- ・ 原子をレーザーで冷却、十分に静止させる
- ・ 光格子レーザー(813nm)の光格子に捕獲
- ・ 時計レーザー(698nm)の光の吸収を観測
→ 最も吸収される時計レーザーの周波数を精密に計測して基準とする

429 228 004 229 873.9 (1.4) Hz
不確かさ: 3×10^{-15}

実験条件に依存する周波数の補正

シフトの要因	補正(Hz)	補正の不確かさ(Hz)
光格子レーザー光強度	0.10	0.10
698nmレーザー光強度	0.01	0.01
黒体輻射	2.26	0.10
ゼーマン効果 (2次)	0.23	0.10
重力の違い (標高)	-3.57	0.05
原子間の衝突	-0.04	0.12
サーボエラー	0.00	0.01
総和	-1.01	0.22 (相対値 5.1×10^{-16})

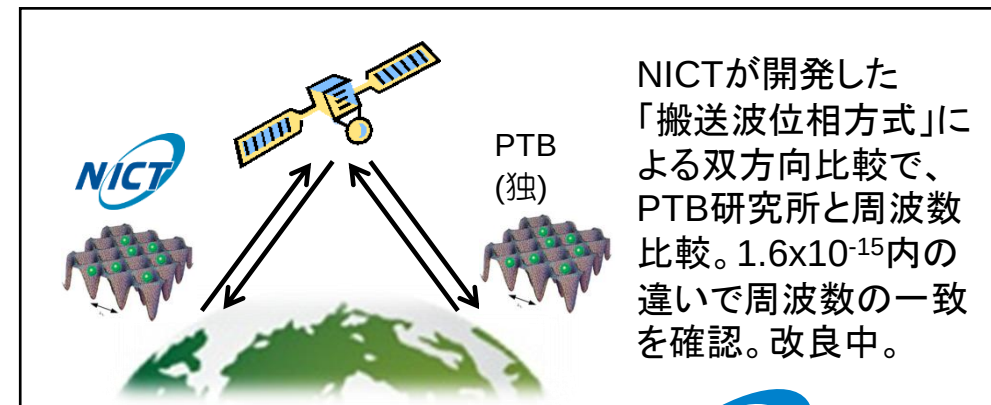
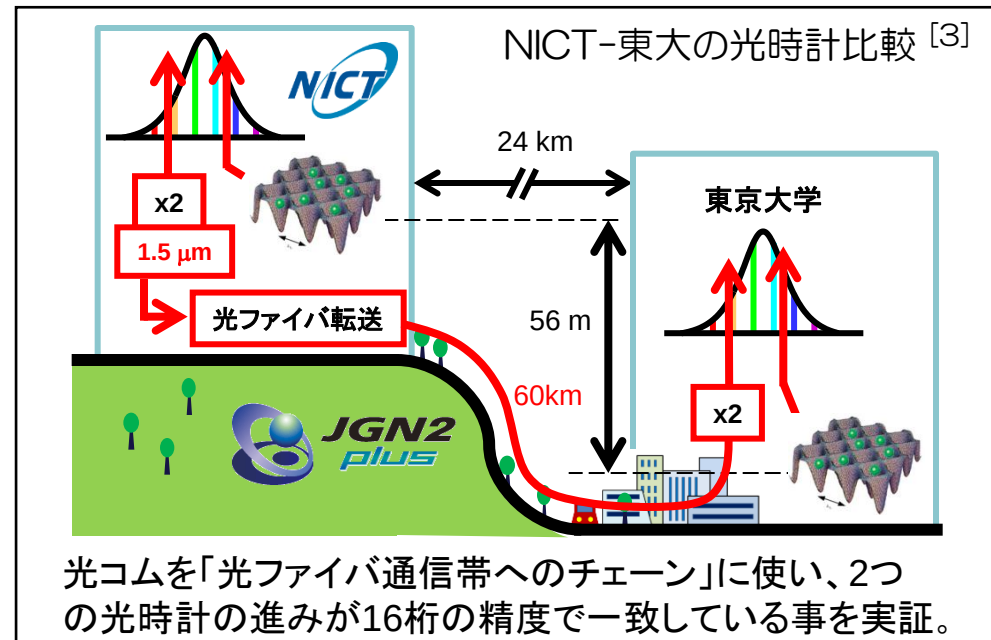
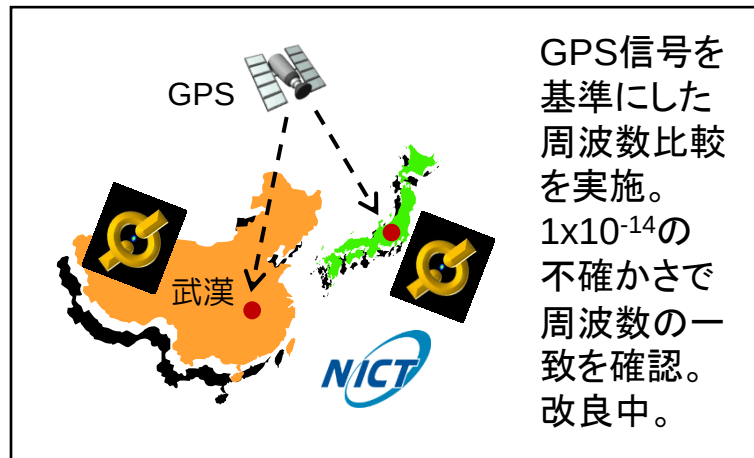
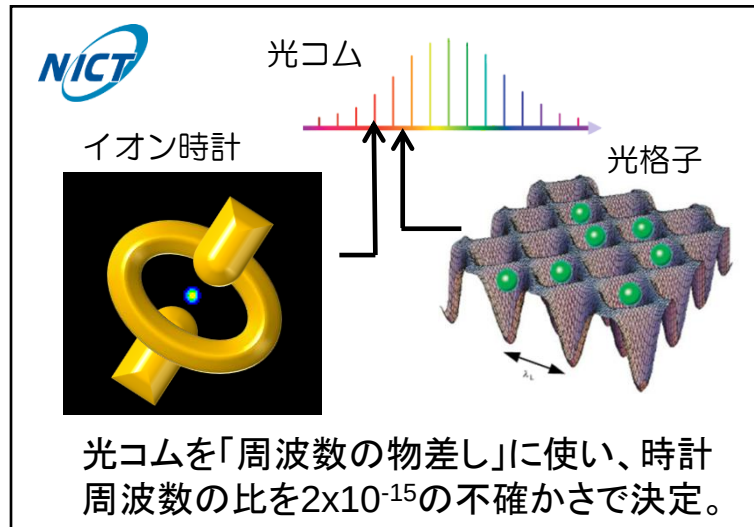
5研究機関の比較



- [1] Metrologia
45, 539 (2008).
[2] Eur. Phys. J. D
48, 11 (2008).
[3] Opt. Lett.
34, 692 (2009).
[4] Metrologia
48, 399 (2011).
[5] APEX
5, 022701 (2011).

2013年に「秒の2次
表現」の値の更新

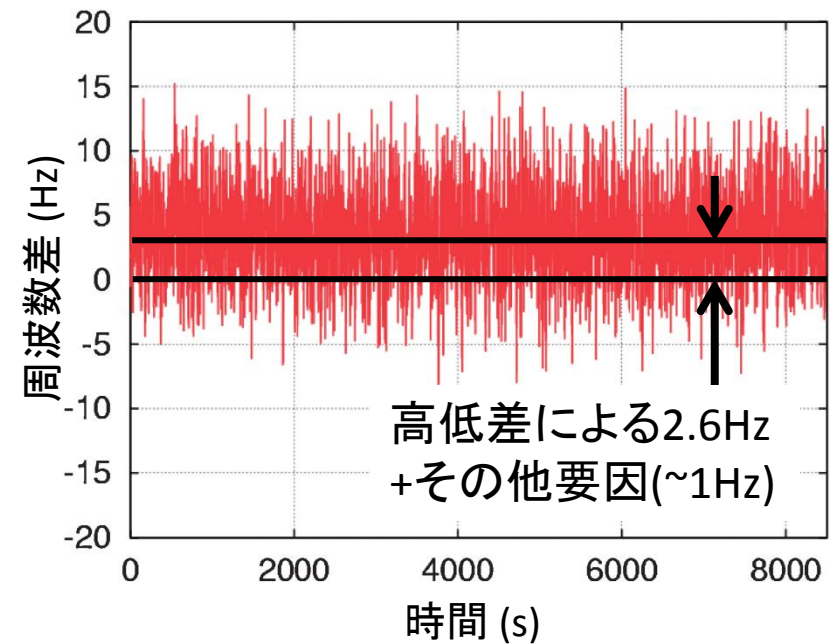
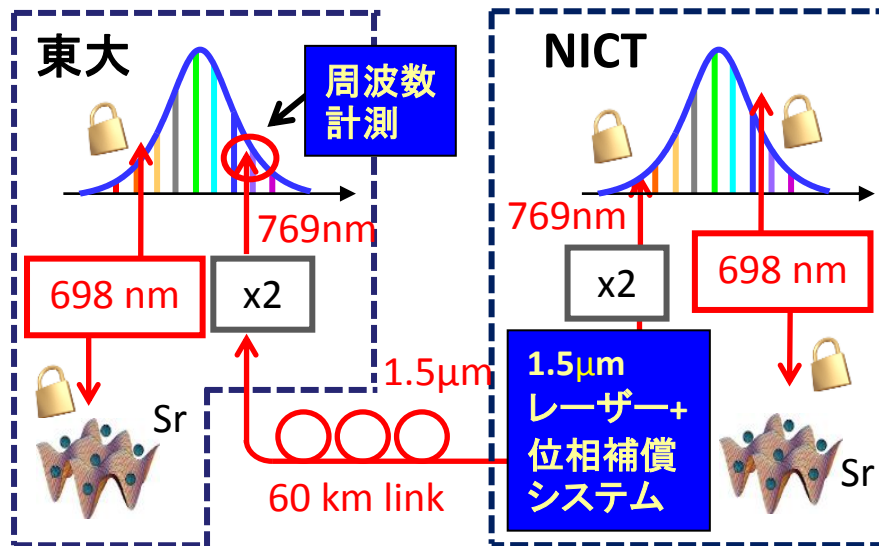
光時計の周波数比較 - Cs時計との比較による制限を超えて



光時計の周波数比較 – NICT-東大の光時計比較^[3] の詳細



- 光ファイバーリンクシステム
JGN2plus (現JGN-X)利用 安定度: 2×10^{-15} @1s
- 2台のストロンチウム光格子時計の比較
高低差56mによる2.6Hzの周波数差を観測し、
 $0.04 \pm 0.31 \text{ Hz}$ (7×10^{-16}) の誤差で周波数が一致。



高安定レーザー光源の開発

光時計での時計レーザーの役割

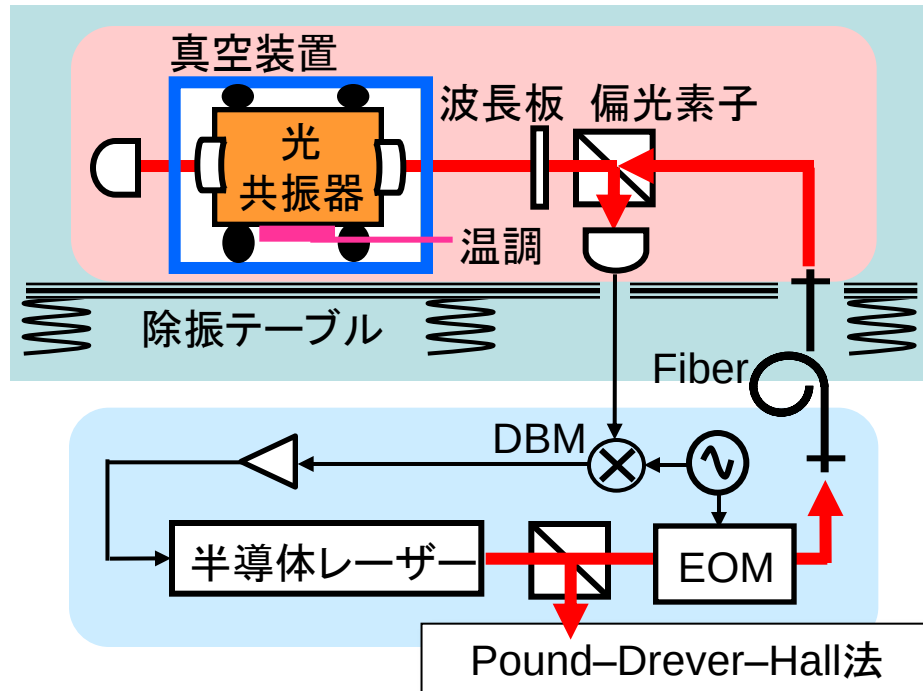
- ・ 原子が吸収する周波数を探るプローブ(探針)
- ・ 基準の周波数(秒)を伝える媒体



発振周波数の幅(広がり)が非常に狭く
短期的(<原子観測の時間)な周波数が特に一定

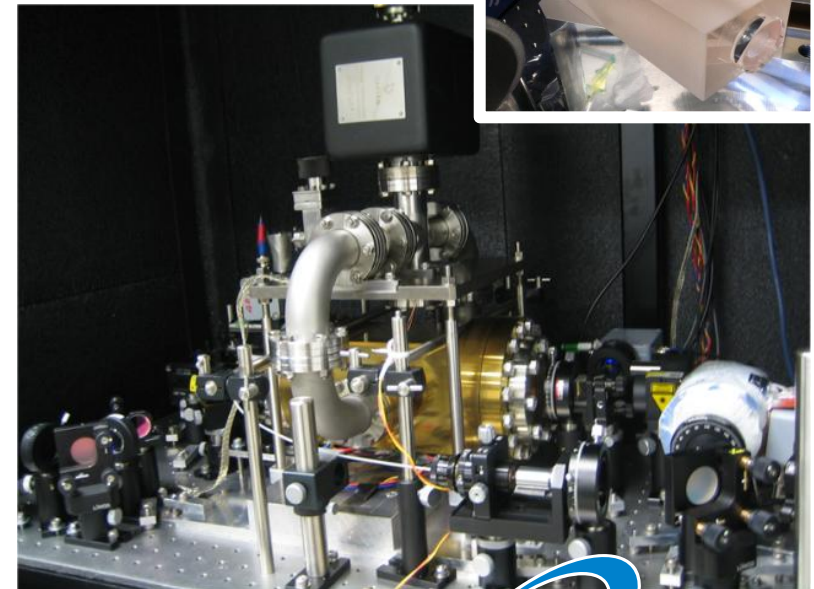
レーザー周波数を直接制御する「光共振器」を安定に保持して実現
不安定の要因: 空気振動、温度、気圧、床振動、その他

吸音箱



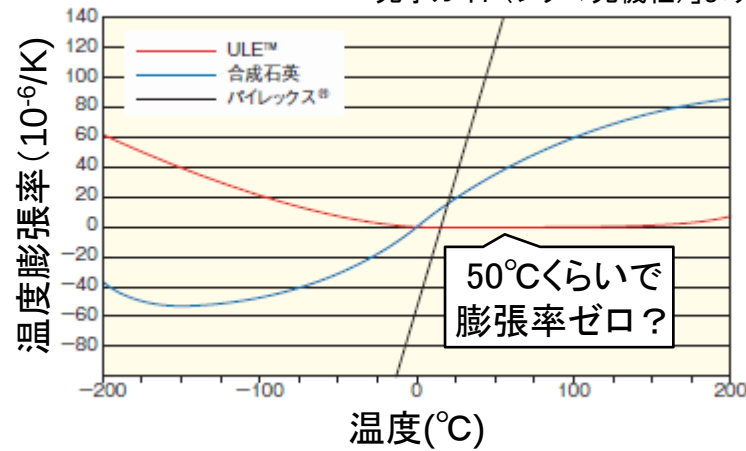
低膨張ガラス共振器

吸音箱の中

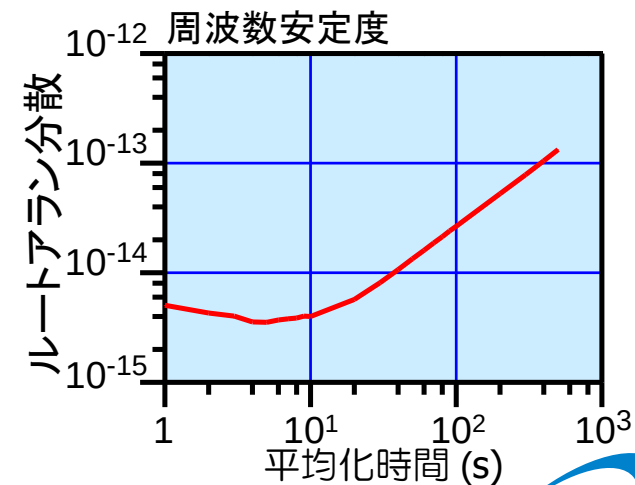
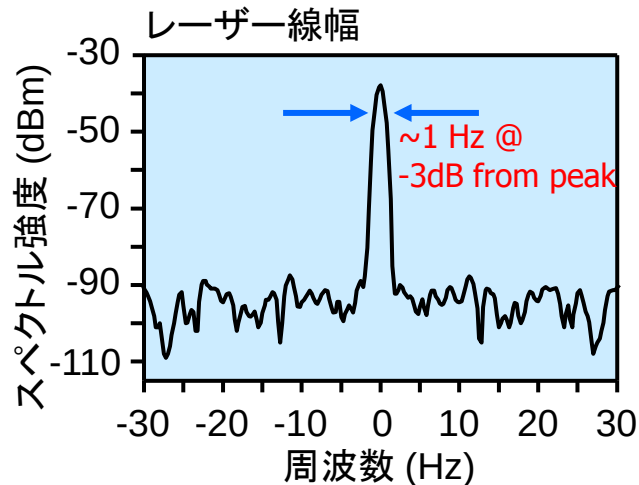
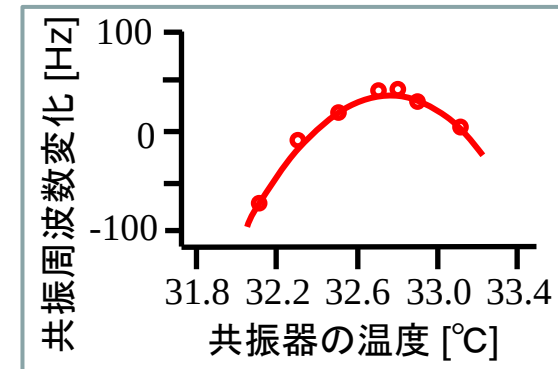


高安定レーザー光源の開発

共振器の材料: ガラス組成比で低い温度膨張率を実現
「光学ガイド(シグマ光機社)」より

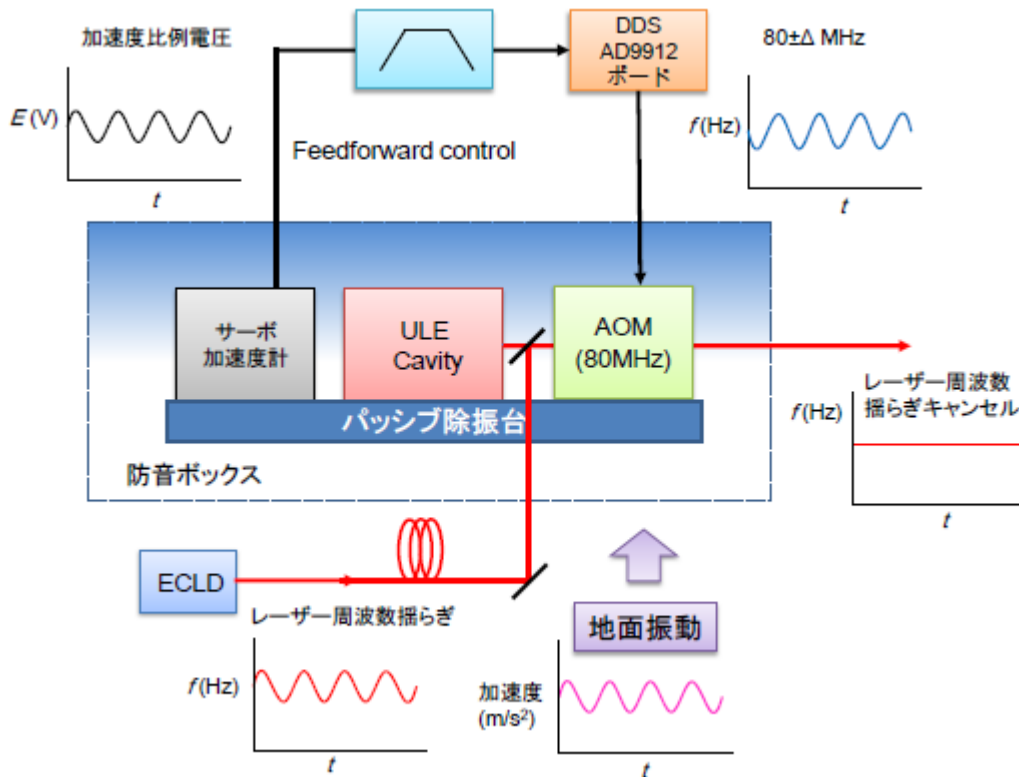


ゼロ膨張率の温度の個体調査

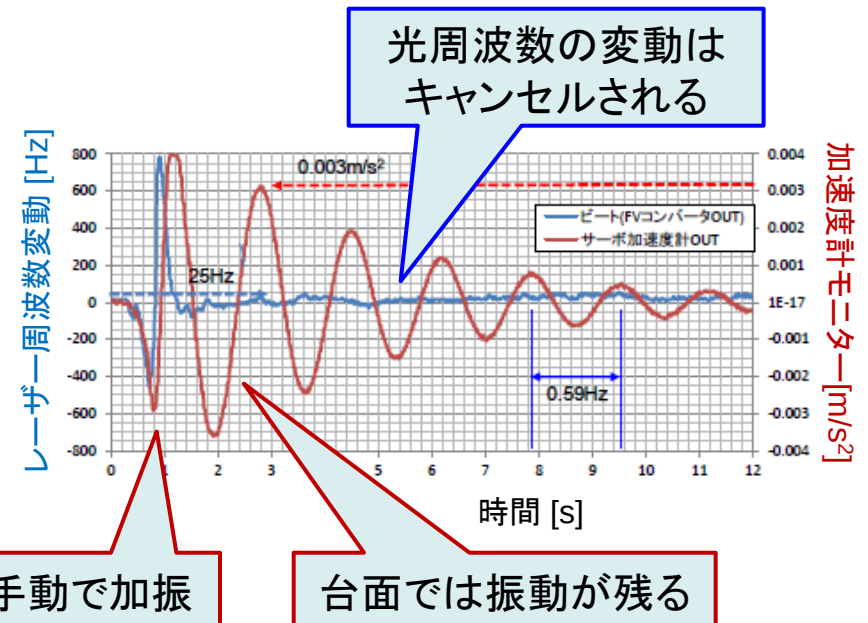


光周波数アクティブ除振

- ・光周波数アクティブ除振：振動情報を加速度計で得て、レーザー光の周波数変調に利用して、周波数変動を抑制する。
(NICT 蜂須他による開発)



この手法により、パッシブ除振台の固有振動数付近の周波数変動が大幅に改善された。



1Hz以下のレベルの周波数変動しかないレーザー開発を行っている

まとめ

- ・ 情報通信研究機構(NICT)は、標準周波数値を設定し、標準電波を発射し、さらに標準時を通報することを業務としており、標準電波と標準時が、電波時計など、様々な方法で国民に利用されることを目指している。
- ・ マイクロ波領域で「1秒」を正確に実現する従来のセシウム原子時計に対して、数百THzの光の領域で「1秒」を計測する光時計(光周波数標準器)が急速に開発されている。これにより、従来の1000倍程度の正確さをもつ時間の計測も可能になりつつある。
- ・ NICTでは、光格子型光時計とイオントラップ型光時計を共に開発している。それらの正確さは国際機関にも認められており、特にストロンチウム光時計は、2013年の「秒の二次表現」の改定に寄与した。今後は、光時計の精度向上と国内・国際比較に積極的に貢献する。
- ・ 光時計開発は、超高安定レーザー技術など周辺分野への波及が大きい。また光時計自身も、最先端分野の科学研究に利用されるなど、広く利用が期待されている。

ご清聴ありがとうございました。「2号館」に是非お立ち寄りください。