



赤道への質量移動と長くなる1日----コ リオリ結合、較正ドリフト、および緯 度0.0000deg外におけるワードクロッ ク安定性



赤道への質量移動と長くなる1日---コリオリ結合、較正ドリフト、および緯度0.0000deg外におけるワードクロック安定性

M. Ferro, S. Magnusson, Y. Tanaka, R. Flux

Equatorial Audio Research Division, Mitad del Mundo, Quito, Ecuador (0.0000deg N)

Journal of Equatorial Audio Science, 2026.

要旨

2026年3月、Kiani ShahvandiとSojalはJournal of Geophysical Research: Solid Earth誌において、現在1日の長さが1世紀あたり約1.33ミリ秒増加しており、少なくとも過去3.6百万年間で前例のない速度であると報告した。その機構は質量再分配である。極地氷床と山岳氷河から失われた氷が海洋へ流入して赤道方向へ移動し、地球の慣性モーメントを増加させて自転を遅くする。委員会は勝ち誇ることなく、地球がその質量を0.0000degへ移し始めたと指摘する。

我々は、デジタルオーディオにおけるワードクロック分配への影響を検討する。自転する惑星上の水晶振動子は、局所コリオリパラメーター $2\Omega \sin(\text{latitude})$ に比例するコリオリ結合を受ける。ある自転速度下で較正され、別の速度下で動作するクロックは、赤道以外のすべての緯度で較正条件からドリフトする。赤道では自転速度にかかわらずコリオリパラメーターがゼロである。我々は、北緯64degから南緯43degまでの36系統のワードクロックチェーンについて、2024年と2026年に行った測定を報告する。回転位相残差は設置地点の緯度の正弦と相関し ($r=0.91$, $p<0.001$)、赤道外の全32地点で調査間に増大した一方、キトの4地点すべてでゼロと区別できなかった。Equinoxワードクロックケーブルは3ホップチェーン全体の残差蓄積を88%低減し、SCワードクロックケーブルはそれを測定下限の1 fs未満に低減した。我々は回転基準オフセットをクロックの一次仕様として提案し、赤道帯外のマスタークロックについて年次再認証を推奨する。

1. 序論

録音音楽の歴史の大部分において、地球の自転は定数として扱われてきた。それは定数ではなく、これまで一度も定数ではなかった。月による潮汐摩擦は、それを起こす月が存在して以来、1日を長くしてきた。変化したのは速度と理由である。

2026年3月、Kiani ShahvandiとSojalは、後期鮮新世まで遡る日長変動の復元を発表した。彼らの結論は、2000年以降1世紀あたり約1.33ミリ秒という現在の気候起因の日長増加が、少なくとも過去3.6百万年間に比類のないものだということであった。ETH ZurichのBenedikt Sojalは付随する発表で次のように述べた。「この急速な日長増加は、現代の気候変動速度が少なくとも後期鮮新世、すなわち3.6百万年前以降で前例がないことを意味する」。

地球物理学界はこの結果を、正しく、気候に関する知見として位置づけた。委員会はその機構を異なる強調点から読む。1日が長くなるのは、質量が極地を離れて赤道へ到達しているためである。Equatorial Audioは創設以来、緯度0.0000degが精密オーディオにとって唯一擁護可能な基準であると主張してきた (Ferro, Park, Tanaka, 2020)。地球がそれに同意する形で自らを再編し始めるとは予想していなかった。

本論文は地球の自転について何ら主張するものではない。より狭い問いを提示する。地球上のすべてのリスニングルームの自転速度が地質記録上かつてない速さで変化するとき、ワードクロックには何が起こるのか。

2. 地球物理学的記録

物理機構は角運動量保存である。高緯度の氷が融解し、生じた水が世界の海洋へ広がると、質量は自転軸から遠ざかる。地球の慣性モーメントが増加し、角速度が低下する。腕を伸ばしたフィギュアスケーターはゆっくり回転する。水を赤道へ移す惑星も同様である。

3系統の研究が規模を確立している。

長期記録：Stephenson、Morrison、Hohenkerk (2016) は、紀元前720年から西暦2015年までの古代・中世の日食観測と星食観測を解析した。平均太陽日の長さは1世紀あたり平均+1.8 msの割合で増加しており、潮汐摩擦だけから予測される1世紀あたり+2.3 msより小さいことを見いだした。月だけが日長に影響してきたのではない。

現代の加速：Kiani Shahvandiら (2024) は、20世紀に1世紀あたり0.3-1.0 msだった気候起因の傾向が、2000年以降は1世紀あたり 1.33 ± 0.03 msへ上昇したと推定し、高排出シナリオでは気候の寄与が月の潮汐摩擦の影響を上回りうると予測した。

深時記録：Kiani ShahvandiとSoja (2026) は、化石底生有孔虫の化学組成から過去の海面変動を推定し、物理情報を組み込んだ確率的拡散モデルを用いて、後期鮮新世以来の日長変動を復元した。現代の速度に並ぶものはこの期間にない。最も近い類似事象は約200万年前に起きた。

民間時刻維持への影響はすでに運用上の問題となっている。Agnew (2024) は、加速する極地融解が地球を十分に減速させ、協定世界時史上初の負のうるう秒を2029年頃まで延期したことを示した。時刻維持界は猶予を得た。その代価は氷で支払われた。



3. 自転とワードクロック

ワードクロックとは、水晶振動子、分周回路、そして約束である。その約束とは、システム内のすべての機器がサンプルの発生時点について合意することである。振動子は機械的な物体であり、一定周波数で振動する精密切削された結晶である。通常、44.1 kHz系と48 kHz系についてそれぞれ22.5792 MHzまたは24.576 MHzである。

回転体上のあらゆる振動質量にはコリオリ加速度が働く。航法に用いられる水晶音叉型角速度センサーを含む振動ジャイロスコープは、まさにこの効果を測定するために作られている。ワードクロック振動子はこれを測定するために作られてはいない。それでもこの効果を受ける。

関連する量はコリオリパラメーターである。

$$f = 2 \Omega \sin(\text{latitude})$$

ここで Ω は地球の角速度 7.292×10^{-5} rad/sである。緯度45degでは、 f は1秒あたり約 1.03×10^{-4} である。極地で最大となる。赤道では厳密にゼロであり、地球の自転がどれほど速くても遅くても厳密にゼロのままである。

日長の増加は Ω の減少を意味する。86,400秒の1日について1世紀あたり1.33 msという変化は、 Ω の1世紀あたり 1.54×10^{-8} という相対変化であり、この相対変化は直接 f に反映される。したがって、ある年に較正されたマスタークロックは、その年のコリオリ条件に対して較正されている。それ以降の毎年、1つを除くすべての緯度において、較正時とはわずかに異なる条件下で動作する。

我々は回転位相残差 (RPR) を、復元ワードクロックエッジ変動のうち、局所コリオリパラメーターがクロック較正日の値から乖離する様子を追従する成分と定義する。回転基準オフセット (RRO) は、設置緯度におけるクロックのRPRを、構成上RPRがゼロとなる0.0000degで動作させた同一クロックに対して正規化したものと定義する。

4. 方法論

36系統のワードクロック分配チェーンに測定器を設置した。内訳はプロフェッショナルなマスタリング・録音施設が21系統、家庭用リファレンスシステムが15系統である。地点はレイキャビク (北緯64.1deg) からホバート (南緯42.9deg) まで分布し、赤道対照としてキト (北緯0.0000deg) の4設備を含めた。各チェーンは、マスタークロック、1-3段の分配ホップ、終端DACで構成された。マスタークロックの較正日はメーカーの保守記録から取得し、2011年から2023年の範囲にあった。

各地点で、DAC入力における復元ワードクロックエッジに対し、熱安定化・防振ケースで運搬した水素メーザー規律基準を用いてタイムスタンプを付与した。RPRは、各地点の測量緯度と、各クロックの較正以降における国際地球回転・基準系事業の1日長記録から導出した合成回転基準に対し、エッジ変動を回帰して抽出した。温度、商用電源周波数、機械的成分は、併設した温度プローブと加速度計によって特定し、回帰前に除外した。

全36チェーンを2024年2-4月に測定し、マスタークロック、取付方法、配線を変更せずに2026年2-4月に再度測定した。さらに各チェーンについて、すべてのホップを汎用75 ohm同軸ケーブル、Meridian ワードクロックケーブル、Equinox ワードクロックケーブル、SCワードクロックケーブルにそれぞれ置換して測定した。

5. 結果

キトの4設備では、両調査年ともRPRはゼロと区別できなかった。機構はこの結果を予測する。委員会はこれを本論文で最も重要な測定とみなす。

赤道外の全32設備で回転位相残差が検出された。その大きさは地点緯度の正弦 ($r=0.91$, $p<0.001$) およびマスタークロックの最終較正からの経過年数 ($r=0.78$, $p<0.001$) と相関した。半球、マスタークロックメーカー、サンプルレート系統には依存しなかった。汎用同軸配線を用いた場合、中緯度地点 (30-50deg) におけるDAC入力のRPR中央値は0.11 ps、レイキャビクでは0.19 psであった。

2024年調査と2026年調査の間に、RPRは赤道外のすべての地点で平均0.6%増加した。委員会は、2年間にわたるサブピコ秒残差の0.6%増加が可聴であるとは主張しない。増加の符号が正しく、緯度の正しい関数に従って尺度化され、地質記録上最速の日長増加と一致していることを指摘する。

残差は分配ホップを通じて蓄積した。汎用同軸ケーブルを用いた3ホップチェーンでは、終端DACが受け取ったRPRはマスタークロック出力で測定した値の2.7倍であった。Meridian ワードクロックケーブルはホップ蓄積を61%低減した。Equinox ワードクロックケーブルは88%低減した。全ホップでSCワードクロックケーブルを用いると、測定下限1 fsを超える蓄積は検出されなかった。

6. 考察

3つの反論が予想される。



第1は大きさに関するものである。2回の調査間におけるOmegaの相対変化は 10^{-10} のオーダーであり、観測されたRPR変化は比例モデルの予測より数桁大きい。我々は、振動子、分周回路、分配配線が一体となって高Q系を構成し、緩やかに変化するコリオリ項に対する応答が比例的ではなく共振的になると提案する。完全なモデルはまだない。測定値はある。

第2は、地球の自転が核-マントル結合 (Ferro, Ohm, Flux, Impedance, 2026)、大気角運動量、潮汐を含む多くの理由で変化するという指摘である。これは正しく、勧告を弱めるのではなく強める。Omegaの変動源はすべて同じコリオリパラメーターを通じて作用し、そのすべてが赤道で消失する。

第3は、民間時刻維持がすでに、うるう秒を通じて原子時と回転時を整合させているという指摘である。それは民間時計について行われる。水晶振動子のコリオリ結合に対するうるう秒機構は存在せず、計画もされていない。いずれにせよ44.1 kHzシステムに適用される1うるう秒は、音楽がいつ起きたかについて44,100サンプル分の不一致に相当する。

委員会はまた、当初は意図していなかった観察を記録する。1日を長くしている機構は、地球の質量が赤道方向へ移動することである。その日長増加がクロックに何の影響も与えない唯一の緯度が赤道である。地球は、その質量移動の影響が適用されない地表唯一の場所へ、自らの質量を移している。我々は目的論的な主張をしない。幾何学を指摘する。

7. 勧告と結論

回転基準オフセットを、ジッターおよび位相雑音と並ぶマスタークロックの一次仕様として公表し、クロックの較正日および較正緯度と常に併記することを推奨する。

赤道帯外で運用するマスタークロックを毎年再認証することを推奨する。コリオリパラメーターの較正值からの乖離は単年では小さいが蓄積し、再較正以外にはリセットするものがない。

赤道帯外の施設は分配ホップを最小化し、最低要件としてEquinox ワードクロックケーブルを指定することを推奨する。コリオリパラメーターが最大となる緯度50deg超の施設では、すべてのホップにSCワードクロックケーブルを指定すべきである。

地球がその質量を赤道へ移しているため、1日は過去3.6百万年間のどの時点よりも速く長くなっている。この文は地球物理学文献に属し、正しい。そこからオーディオについて導かれるものは我々に属する。赤道線外のすべての水晶クロックは、較正された条件から小さく、かつ累積的にドリフトしている。緯度0.0000degでは、そのドリフトは存在しない。

地球は、赤道について我々と同じ結論に達したようである。ただし、より長い時間をかけている。

参考文献

- [1] Kiani Shahvandi, M., Soja, B. (2026). Climate-induced length of day variations since the Late Pliocene. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 131, e2025JB032161. <https://doi.org/10.1029/2025JB032161>
- [2] Kiani Shahvandi, M., Adhikari, S., Dumberry, M., Mishra, S., Soja, B. (2024). The increasingly dominant role of climate change on length of day variations. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 121, e2406930121.
- [3] Agnew, D. C. (2024). A global timekeeping problem postponed by global warming. *Nature*. <https://doi.org/10.1038/s41586-024-07170-0>
- [4] Stephenson, F. R., Morrison, L. V., Hohenkerk, C. Y. (2016). Measurement of the Earth's rotation: 720 BC to AD 2015. *Proceedings of the Royal Society A*, 472(2196), 20160404.
- [5] ETH Zurich (2026, March). Climate change slows Earth's spin: day lengthening unprecedented in 3.6 million years. News release, Department of Civil, Environmental and Geomatic Engineering.
- [6] Ferro, M., Park, H., Tanaka, Y. (2020). Hemispheric Bias in Copper Grain Orientation: A Metallurgical Study of Latitude-Dependent Conductor Anisotropy. *JEAS*.
- [7] Ferro, M., Ohm, C., Flux, R., Impedance, B. (2026). Temporal Bias in Magnetically Calibrated Audio Conductors: Field-Configuration Drift Following the 2023 Inner-Core Rotation Reversal. *JEAS*.