

チャンドラーウォブルの消失発見と原因解明へ

～地球回転の予測精度向上と下部マンツルの理解への貢献に期待～

ポイント

- ・ 自転軸の極付近での運動「チャンドラーウォブル」が 2015 年から消失していたことを発見。
- ・ 全球大気角運動量の寄与が 2015 年以降になって減少していることを初めて指摘。
- ・ 減衰時定数が従来の推定より短く、下部マンツルの変形特性の理解に貢献。

概要

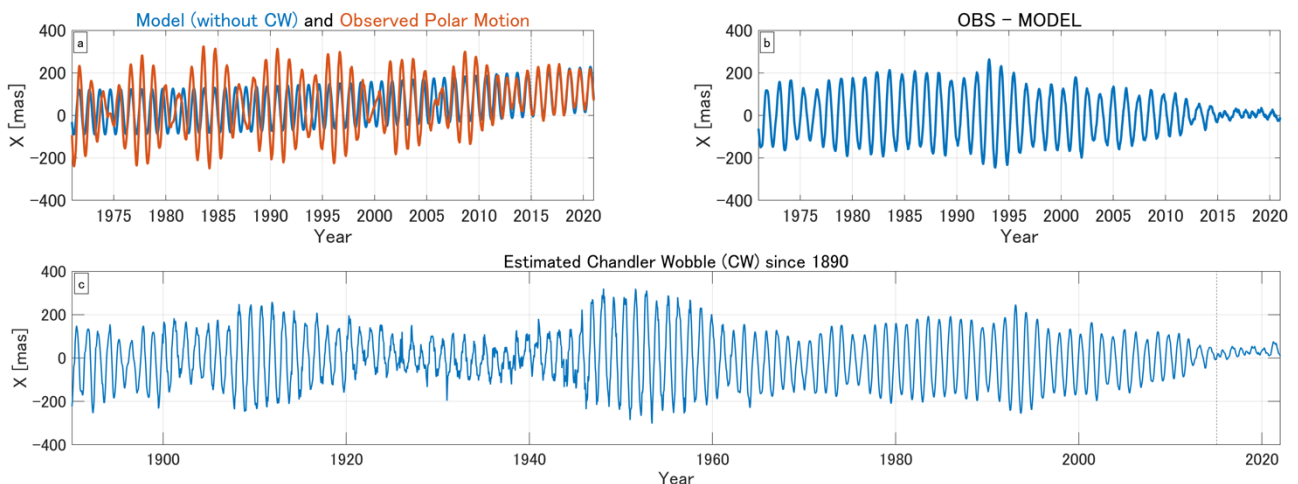
北海道大学大学院理学研究院の古屋正人教授と同大学大学院理学院博士後期課程 1 年の山口竜史氏は、19 世紀末以来観測され続けてきた自転軸の揺らぎの一種「チャンドラーウォブル(Chandler wobble, 以下 CW)」が観測史上初めて 2015 年以降に消失していたことを発見しました。

CW は地球の固有振動の一つで、何らかの励起源が無いと観測されません。1990 年代末まではその励起源が謎でしたが、2000 年代初め以降には大気と海洋の全球的な変動が励起源であると認識されてきました。

なぜ観測史上初めて励起されていないのかを、大気、海洋、陸水の全球データを用いて調べました。気象庁とヨーロッパ中期気象予測センター(ECMWF)の独立な全球大気データに基づいて推定した大気の寄与が、ほぼ同様に 2015 年以降に小さくなっていることが判明しました。CW の励起過程はランダムなものと考えられてきましたが、これは大気水圏変動の総和が偶然打ち消しあったわけではないことを示します。詳細は今後の研究が待たれます。

また、CW は常に観測されてきたため固有周期(約 1.2 年)は精密に測定されてきましたが、固有振動であれば一定の減衰時定数(Q 値)を持つはずですが、しかし Q 値の推定値は 2000 年以降でも研究者によって 3 倍以上異なっていました。マンツルは速い時間スケールの外力に対しては弾性体(バネ)として振る舞い、地震学からは Q 値は 200-300 程度と推定されています。今回の発見は CW の Q 値が 100 以下であることを示し、下部マンツルは弾性体からのズレが顕著であることを示しています。

なお本研究成果は 2024 年 1 月 2 日(火)公開の Earth Planets and Space 誌に掲載されました。



(a)極運動(X成分)の観測値(赤)と年周成分の推定値(青)。(b)図(a)の観測値と推定値の差はチャンドラーウォブル(X成分)を示す。(c)1890年以降のチャンドラーウォブルのX成分。

【背景】

地球の自転軸は北極付近を貫いていて、その位置は常に一定ではなく変化しています。この動きのうち、月や太陽からの潮汐力を原因とする「歳差・章動」を除いて1日以上長い時間スケールを持った動きを「極運動」と呼びます。極の動きはランダムではありません。極付近の固定点で観測すると、1年周期と1.2年周期の東回りの動きが重なり合った二次元運動を示し(図1)、最大振幅で半径約10mになります。各成分の時系列を見ると二つの運動による約6年の「うなり」が特徴的で、19世紀末以来観測されてきました。極の位置は地球の向きや姿勢に関わるため、人工衛星の軌道決定や予測のためにも精密に観測し続ける必要があります。また固体地球の「動き」の一つとして、地震波動、潮汐による変形といった短い時間スケール、マントル対流に伴うプレート運動や造山運動などの長い時間スケールの中間にある独自の「動き」として位置付けられます。

1年周期(年周極運動/年周ウォブル)は地表の流体の季節変動が原因となって起こる「強制振動」です。一方の1.2年周期とは、地球の扁平率、弾性、流体核とマントルの結合度など様々な地球に固有の性質を反映して決まる「固有周期」であると考えられています。もともと、1700年代にオイラーが305日周期の極運動を理論的に予言していましたが、これは地球全体が全く変形しない「剛体」である場合の予測値です。1891年にアメリカのチャンドラー(S. C. Chandler)氏が発見したことをうけて、チャンドラーウォブル(Chandler wobble;以下CW)と呼ばれていて、地球の固有振動(自由振動)の一つと考えられています。19世紀末の極運動の開始以来、約6年の「うなり」が観測され続けてきたため、その周期(1.2年)はよく分かっています。一方、固有振動であるからには固有の周期の他に固有の減衰定数(その逆数に比例する値をQ値と呼びます)も持ちます。実際の地球は完全弾性体でも無いので有限のQ値があり、下部マントルの非弾性で減衰すると考えられています。そもそも励起源がないとCWは観測されませんが、その励起源が地震説、大気説、流体核説など百家争鳴の時期もありました。しかし2000年代初期には大気と海洋が重要らしいと認識されました。それでも、CWは発見以来励起され続けてきたため、Q値はよくわかっていませんでした。

【研究手法】

19世紀末のCW発見の頃から1970年代まで、極運動は光学的な天文観測に依っていました。1970年代に入ってから超長期線電波干渉法(Very Long Baseline Interferometry)や衛星レーザー測距(Satellite Laser Ranging)、1990年代以降は全球衛星測位システム(Global Navigation Satellite System)といった宇宙測地技術によって、毎日の極の位置が求められています。極運動の観測データが高精度化する一方で、地球表層流体に関する観測データも充実してきました。今回の研究ではドイツの地球科学センター(GFZ)で算出、アーカイブされている大気、海洋、陸水の全球角運動量の推定値に加えて、研究グループ独自に日本の気象庁による全球大気再解析プロジェクトJRA-55のデータも用いて大気角運動量を計算しました。極運動の力学は古典的な線形力学系とみなされており、今回の研究でもその考え方を踏襲しています。データ解析では励起源データを調べるのではなく、極運動データを調べています。これによって、CWへの大気・海洋・陸水の効果を感度よく調べることができそうですが、本研究論文ではそのための複数の注意点についても述べています。

【研究成果】

宇宙測地技術に基づく最近約50年の極運動データを見ると、2015年以降に「うなり」が弱いことは視覚的にも明らかで、最近6年間について年周ウォブルだけであると仮定して振幅と位相を最小二乗法的に推定すると実際にほぼ年周ウォブルだけで説明できます。年周ウォブルはその振幅変化は小さく、位相は変わらないので、元々の極運動データから年周ウォブルと長期的な極移動成分を多項式で近似して除去すると、過去約50年のCWの変化が分かります。また19世紀末以降のデータに対してもここで推定した年周ウォブルを取り除くと、従来から知られていた1930-40年代のCWの極小が再現されました(1ページ目の図)。

欧州のECMWF、米国の国立環境予測センター(NCEP)の全球大気客観解析データに基づく2種の大

気角運動量データ、それぞれの気データで駆動された海洋の解析データに基づく2種の海洋角運動量データ、GFZで推定された陸水の質量再分配の効果を示す陸水角運動量データは、地球回転の予測のためにGFZでアーカイブされ、フリーで公開されています。本研究では、気象庁のJRA-55の気データも用いて独自に気角運動量を算出したところ、ECMWFの気角運動量と極めて整合性の高い結果が得られました(図2a,c)。一方で2種の海洋角運動量のCW励起への寄与は大きすぎる上に整合的でもありません(図2d,e)。陸水角運動量の効果も大き過ぎであり(図2f)、気以外の表層流体データの推定値はまだデータ品質そのものに改善の余地があることが示唆されます。

一般に減衰振動の時定数は Q (あるいは Q^{-1})という無次元の数値で表され、一般に Q が小さいほど速く減衰することを示します。CWでは $0.19 \times Q$ (年)が特徴的な減衰時間を表します。これまでCWの Q は100程度と考えられてきましたが、図1xを見る限り2005年頃からCWの振幅は小さくなっているので、19年では減衰の時定数としては長すぎることは明らかです。CWのエネルギーがどこで散逸するかについては下部マントルの非弾性が有力な考えですが、従来考えられていたよりも弾性体からズレが大きいたことが示唆されます。

【今後への期待】

極の位置は地球の向き/姿勢の変化そのもので、人工衛星の軌道決定や予測のためにも精密に観測し続ける必要があり、地球の回転変動そのものを予測する研究も行われてきました。今回発見された「CWの消失」は誰も予測出来ていませんでした。このことは我々のCWの理解に限らず、地球表層流体への理解もまだ不完全であることを示します。2000年代前半に励起源は解明されたかのように思われましたが、今回の研究が示すように海洋や陸水の寄与については不確定な部分が大きいたことが明らかになりました。また気データの寄与がなぜ2015年以降に小さくなったのか、どのような気大循環場の変化と関連づけられるかは今後の詳細な研究が必要です。

今回の研究で Q 値の上限を推定することは出来ましたが、下限値を推定するためにはより高精度高確度な表層流体データが必要で、気候変動予測のための表層流体の研究と宇宙測地の研究は表裏一体で発展していくことが期待されます。

【謝辞】

山口竜史氏が支援を受けている北海道大学アンビシャス博士人材フェローシップは、国立研究開発法人科学技術振興機構(JST)の「科学技術イノベーション創出に向けた大学フェローシップ創設事業」「次世代研究者挑戦的研究プログラム」(JPMJFS2101)によって実施されているものです。

論文情報

論文名	Can we explain the post-2015 absence of the Chandler wobble? (2015年以降の Chandler wobbleの消失は説明できるか?)
著者名	山口竜史 ¹ 、古屋正人 ^{2,3} (¹ 北海道大学大学院理学学院自然史科学専攻、 ² 北海道大学大学院理学研究院地球惑星科学部門、 ³ 北海道大学北極域研究センター)
雑誌名	Earth, Planets and Space (地球物理学の国際学術誌)
DOI	10.1186/s40623-023-01944-y
公表日	2024年1月2日(火)(オンライン公開)

お問い合わせ先

北海道大学大学院理学研究院 教授 古屋正人(ふるやまさと)
TEL 011-706-2759 メール furuya@sci.hokudai.ac.jp
URL <https://researchmap.jp/masatofuruya>

配信元

北海道大学社会共創部広報課(〒060-0808 札幌市北区北8条西5丁目)
TEL 011-706-2610 FAX 011-706-2092 メール jp-press@general.hokudai.ac.jp

【参考図】

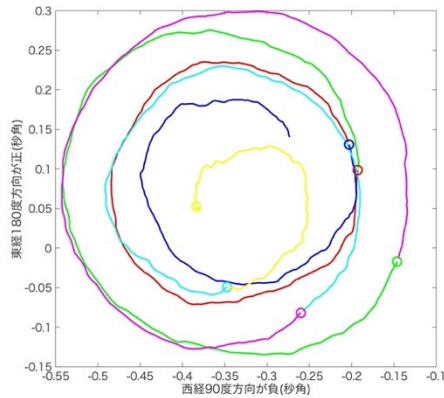


図 1. 極運動とは自転軸が北極付近を貫く位置の変化を示す：1日よりも短い時間スケールの変化は除かれている。0.1秒角が地表の約3メートルに当たる。縦軸がX成分、横軸がY成分。左の図は2006年1月から2011年12月までの極運動を年ごとに黄色、水色、紫色、緑色、赤色、青色の順に示してある。丸印は各年の1月1日を示す。X成分の1970年以降の時系列データを示したのが1ページ目の図aの赤線。

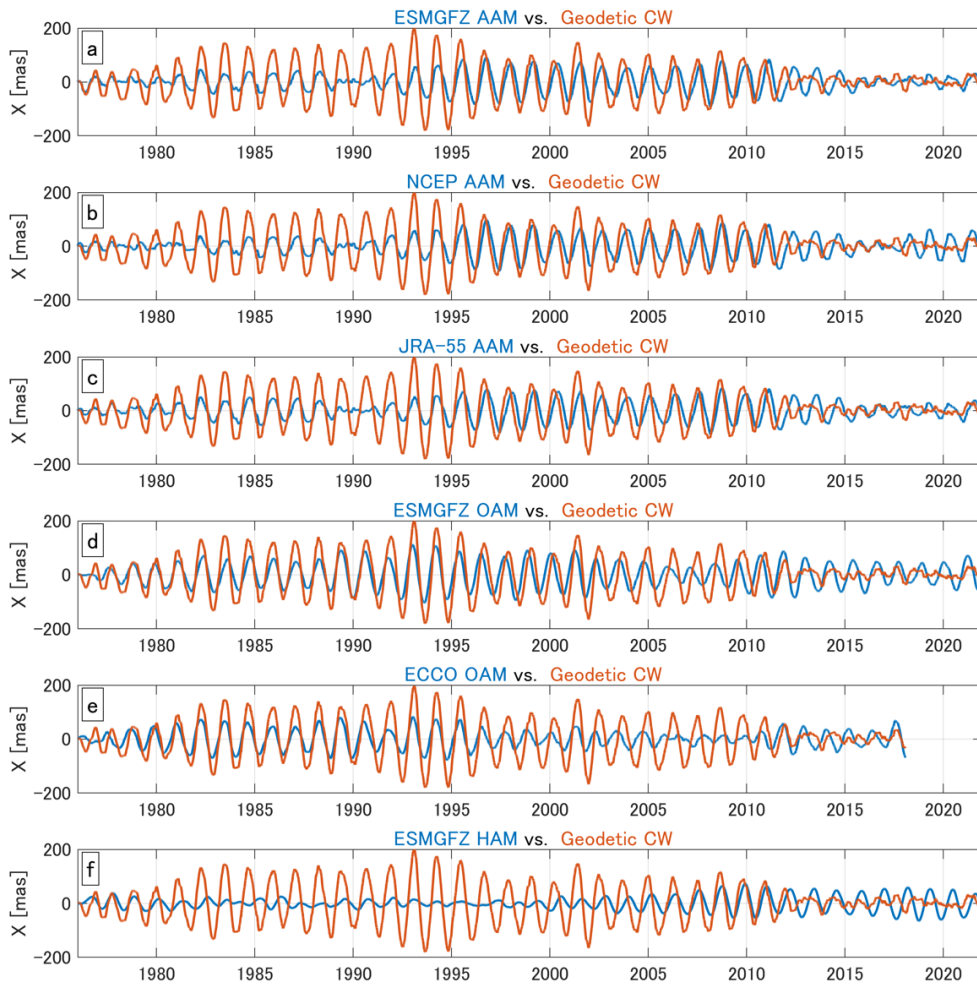


図 2. 測地的に推定された CW 成分(赤)と大気角運動量(AAM*¹)、海洋角運動量(OAM*¹)、陸水角運動量(HAM*¹)の寄与の推定値(青)。(a)GFZ(ECMWF)の AAM、(b)NCEP の AAM、(c)JRA-55 の AAM、(d) GFZ(ECMWF の大気で駆動された)OAM、(d)ECCO(NCEP の大気で駆動された) OAM、(e) GFZ(LSM*²)による HAM。Y 成分についてもほぼ同様の結果が得られる。

※AAM は Atmospheric Angular Momentum、OAM は Oceanic Angular Momentum、HAM は Hydrological Angular Momentum、LSM は Land Surface Model のことを指す。