



The Canon Institute for Global Studies

CIGS Working Paper Series No. 19-001J

宇宙からの準周期的外力を受ける 結合振動系としての地球の気候システム

The Earth Climate System as the Coupled Oscillators under the
Quasi-Periodical Forcing from the Space

杉山大志 (Taishi Sugiyama)

キャノングローバル戦略研究所

(The Canon Institute for Global Studies)

2019.11

Revised 2020.1

※Opinions expressed or implied in the CIGS Working Paper Series are solely those of the author, and do not necessarily represent the views of the CIGS or its sponsor.
※CIGS Working Paper Series is circulated in order to stimulate lively discussion and comments.
※Copyright belongs to the author(s) of each paper unless stated otherwise.

General Incorporated Foundation

The Canon Institute for Global Studies

一般財団法人 キャノングローバル戦略研究所

Phone: +81-3-6213-0550 <http://www.canon-igs.org>

目次

1	はじめに.....	3
2	温室効果ガス.....	3
3	Scafetta 理論： 地球の温度変化のスペクトル分解.....	3
4	Tsonis 理論： 振動の結合としての気候変動.....	5
5	蔵本モデル： 相互作用をする振動子系.....	6
6	気候システム： 周期的な宇宙からの外力の下での結合した非線形振動.....	8
	文献.....	10

1 はじめに

地球の温度は温室効果ガスによって変動する(①)が、エルニーニョ等の地球のシステムの内部振動(②)や、太陽光強度変化等の宇宙からの影響による変動(③)もある。先行研究では①と②を合わせて考察したもの、また①と③を合わせて考察したものがあつたが、①②③を全て総合的に理解したものは無かつた。本稿ではそれを試みる仮説を提示する。

以下の構成であるが、2章で①を、3章で③を、4章で②を紹介する。⑤で簡単な定量的モデルを紹介し、⑥で定性的ではあるが①②③の統合化を試みる。

2 温室効果ガス

CO₂等の温室効果ガスは、一定の温度の変化をもたらす。しかし、これによって地球規模の温度変化の全てが説明できる訳では無い(IPCC, 2013)。

3 Scafetta 理論：地球の温度変化のスペクトル分解

Scafetta(Scafetta, 2019)(Scafetta, 2016)(Scafetta, 2013)は、1850年以降の地球の年平均気温を、6つの正弦波の和および温室効果ガスによる温暖化項として再現する式を提案した：

$$H(t) = h_{983}(t) + h_{115}(t) + h_{60}(t) + h_{20}(t) + h_{10.4}(t) + h_{9.1}(t) + \beta * m(t) + const, \quad (\text{式1})$$

ここで、 $H(t)$ は地球の温度である。 $h_n(t)$ は周期 n 年の正弦関数であり、例えば $n=115$ の項は

$$h_{115}(t) = 0.05 \cos(2\pi(t-1980)/115). \quad (\text{式2})$$

となっている。 $h_n(t)$ は何れも宇宙からの地球への影響の変動と周期が一致しているとしている。例えば、太陽のエネルギー強度は約11年周期で変動し、これは黒点数の増減を伴うことはよく知られている。他の振動周期は、太陽、惑星、月と地球の重力相互作用による潮汐力等に由来しているという。

$\beta * m(t)$ は、CMIPによって算出された温室効果ガスおよび火山噴火によるエアロゾル等のネットの温室効果 $m(t)$ に対して、係数 β をかけたものである。Scafetta は $\beta = 0.5$ と推計した。つまりこの間の地球温暖化の半分は温室効果ガスとエアロゾルによるネットの温室効果に由来するものであるが、残りの半分は宇宙から地球に及ぶ影響の変化に起源がある、という結論になる。

Scafetta は、式1のモデルは過去の実測データと合致し(図1)、特にハイエイタスとも

整合性があり、また過去にさかのぼって調べると、IPCCでまとめた大循環モデルによる予測よりも、より現実に近い予測を示すことに成功してきた、とした(図2)。

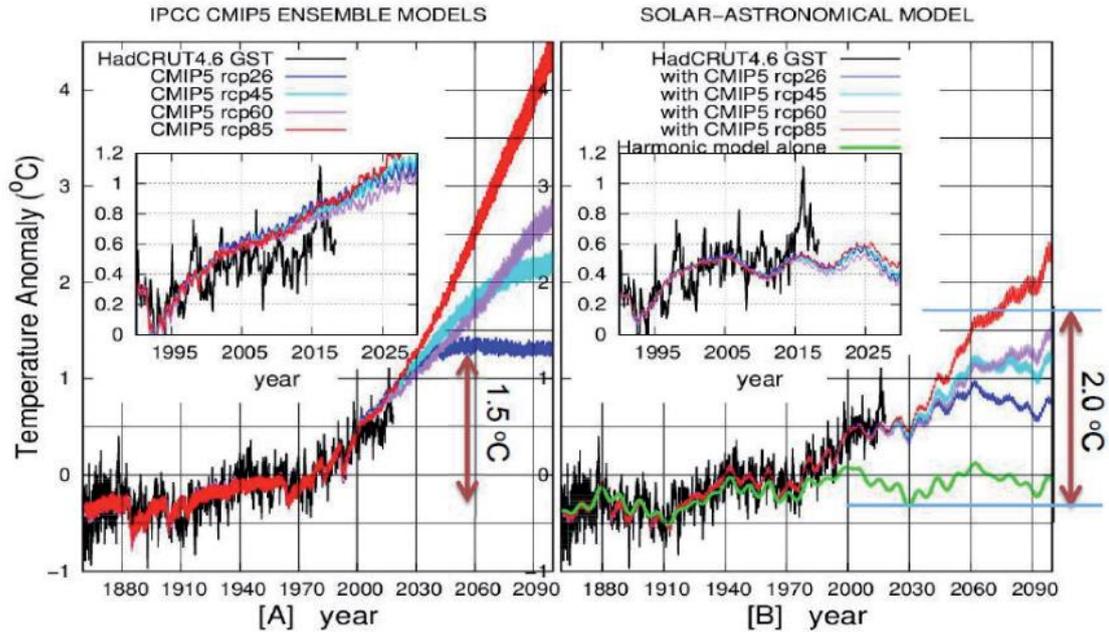


Fig. 18 - [A] The four CMIP5 ensemble average projections versus the HadCRUT4 GST record. [B] The solar-astronomical semi-empirical model. Updated from SCAFETTA (2013a)

図1 IPCC で用いた大循環モデル (CMIP5) の予測 (左) と Scafetta のモデルの予測 (右)。(Scafetta, 2019)より転載。

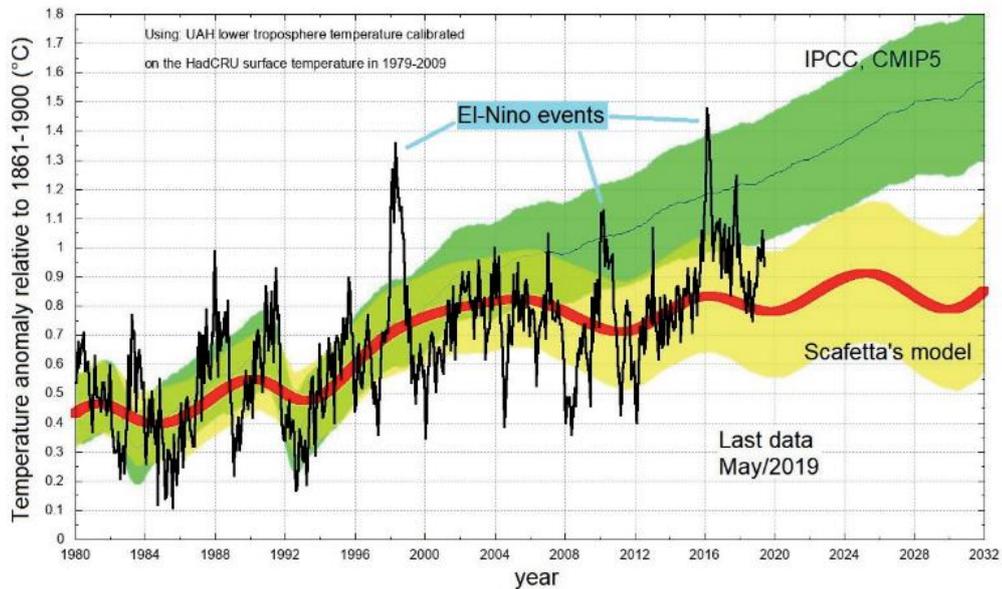


Fig. 19 - The global monthly average lower troposphere temperature since 1979 according to the University of Alabama at Huntsville (UAH), USA (black) up to May 2019 versus the CMIP5 ensemble average projections (green) versus the solar-astronomical semi-empirical model (yellow). The green and yellow areas have an equivalent 1-s uncertainty. Updated from SCAFETTA (2013a)

図2 IPCC で用いた大循環モデル (CMIP5) の予測 (緑色) と Scafetta のモデルの予測 (赤線及び黄色)。(Scafetta, 2019)より転載。

ただし Scafetta の議論の難点は、自身も認めているように、どのようなメカニズムで宇宙からの影響が地球規模の温度変化に帰結しているかは現時点で解っていないことである。

例えば太陽光のエネルギー強度が約 11 年周期で変動していることは知られているが、その変動は小さくて約 0.2W/m^2 程度に過ぎない。単なるエネルギーの変化ではなく、太陽磁場の変化によって地球へ注ぐ銀河宇宙線の量が増減し、これが雲の生成に影響を与えることで気候変動をもたらすというスベンスマルク仮説もあり、これによって 1.0 ないし 1.5W/m^2 程度まで増大するという意見もある (Svensmark, 2018)。しかし、これについてはその是非を巡って議論が続いている。太陽が地球に及ぼす放射や磁場の変化だけでは、今のところはさほど大きな気候変動は説明できそうにない。

4 Tsonis 理論： 振動の結合としての気候変動

1880 年以降の自然変動を説明する試みとして、Tsonis は、複数の振動の結合としての気候システムを考察している。

Tsonis は、地球の温度変化を以下の区分に分け、変化要因を検討した (図 3)。(A. Tsonis, 2017) (Anastasios A Tsonis, 2012)

- 第 1 期：1880 年から 1910 年迄： 寒冷化
- 第 2 期：1910 年から 1943 年迄： 急激な温暖化
- 第 3 期：1943 年から 1976 年迄： 緩慢な寒冷化
- 第 4 期：1976 年から 1998 年迄： 急激な温暖化
- 第 5 期：1998 年以降： ほぼ停滞 (ハイエイタス)

図 3 を見ると、平滑化された地球の温度 (実線) に比較して、地球の温度 (棒線) が、数年規模で上下していることが分かる。これはエルニーニョ及び南方振動 (El Nino and Southern Oscillation, ENSO) 等の非線形振動の影響によるものであるが、Tsonis は、これら非線形振動の相互作用の結果として、第 1 期から第 5 期に渡る数十年規模の温度変動が起きた、とする仮説を提唱した。考慮された非線形振動とは、ENSO に加えて、Pacific Decadal Oscillation (PDO), North Atlantic Oscillation (NAO), North Pacific Index (NPI) である。Tsonis は、これらの非線形振動は相互作用しており、同期しかつ結合が強化する時期には、それまでの同期状態が壊れ、新たな非線形振動のパターンに変わることによって、温度のトレンドが大きく変わった (図中緑線部) としている。この仮説が正しいとすると、近年の温度上昇も、その多くの部分が GHG 以外の要因による可能性が出てくる。

Tsonis は、気候システムには 1000 年以下の周期の自然変動が多く含まれることは古気候データから読み取れるとしている (Anastasios A. Tsonis & Madsen, 2018)¹。そして、気

¹ 1000 年以上の周期の自然振動についても存在の可能性は高いが、データの制約からはっきりしたことは言えないとしている。

候システムを非線形振動の結合状態と理解することは、CMIP等の大循環モデルでは出来ておらず、モデル化する過程において自然界とは異なる偽の安定的な気候状態が出現しているという(Essex & Tsonis, 2018)。

このTsonisの提案する機構のどこまでが正確かは別としても、図から分かるように数年から数十年規模の振動の振幅は結構大きく、それらが更に相互作用することによって数十年規模でかなりの温度変動が、GHGによる温室効果とは別の機構によって起きうであろう、という指摘はもっともらしく思える。仮にこの説を棄却するにしても、それではこの第1期から第5期に渡る数十年規模の振動、特にまだ温室効果ガス排出が少なかった第2期の急激な温暖化の原因は何なのか、という疑問は相変わらず残ることになる。

Tsonisは、気候変動を起こす原因には3つあり、上述の非線形振動等の自然変動、人為的な地球温暖化、太陽強度変化や宇宙線等の宇宙からの影響の3つを挙げている。そして、これらを精度よく定量化することは現在の科学的知見では出来ないとしている(Anastasios A Tsonis, 2020)。

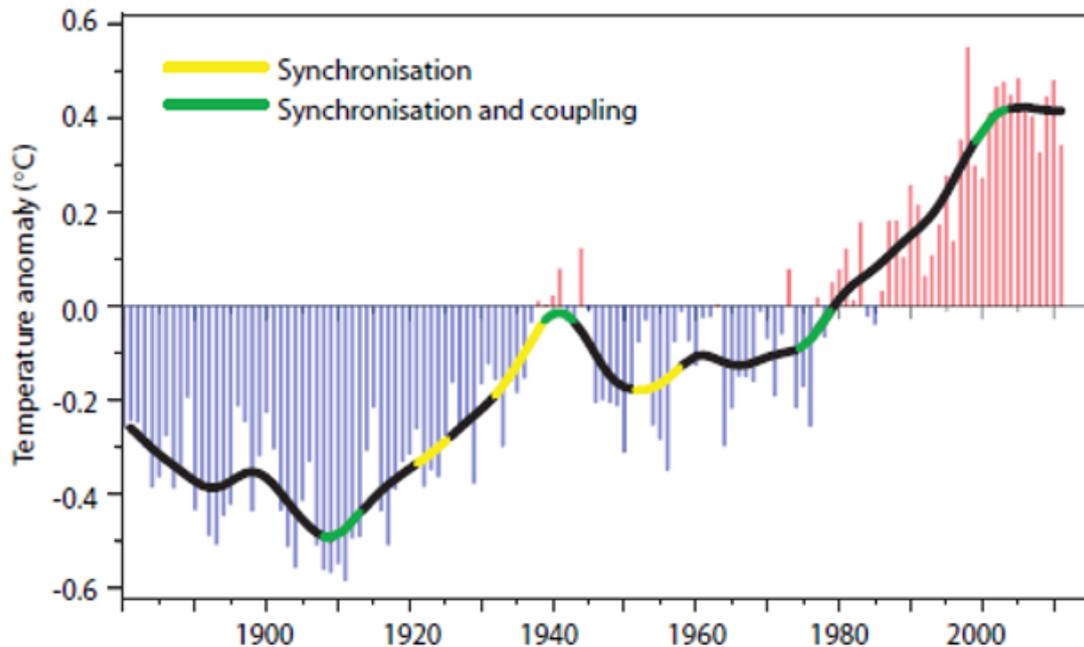


図3 20世紀を通じた地球の温度変化を説明する試み。

縦軸は温度(相対値)。青・赤線:観測値、黒・黄・緑の実線:観測値を平滑化したもの。
黄色:振動が同期した時期。緑色:振動が同期し、かつ結合が強化された時期。

(A. Tsonis, 2017)(Anastasios A Tsonis, 2012)

5 蔵本モデル: 相互作用をする振動子系

Tsonisの理論は、地球の気候システムが複数の相互作用をする振動からなるシステムで

あることを示唆する。これへの洞察を得るために、簡略化されたモデルを考える(蔵本由紀, 2014)p103 :

$$\dot{\theta}_i = \omega_i - \frac{K}{N} \sum_{j=1}^N \sin(\theta_i - \theta_j), \quad i=1,2,\dots,N \quad (\text{式3})$$

これは蔵本モデルと呼ばれる。 N は集団に含まれる振動子の総数、 θ_i は*i*番目の振動子の位相、 $\dot{\theta}_i$ はその変化速度を表す。 ω_i はこの振動子の自然周波数を表し、その値は釣鐘型の統計分布(正規分布、ローレンツ分布など)からランダムに抽出される。 K は振動子間の結合強度を表す。二つの振動子間に働く相互作用は位相差の正弦関数 $\sin(\theta_i - \theta_j)$ に比例し、総和気号 Σ からわかるように、どの振動子にも他のすべての振動子による相互作用力の総和が働いている。 K がある値以下では集団振動は存在せず、その値を超えると集団振動が発生することが数学的に示される。

式3の地球の気候システムとの対応は(あくまでもイメージであるが)、 θ_i が ENSO、AMO などの諸振動の位相、 $\sin(\theta_i - \theta_j)$ がその結合、 ω_i が各振動の固有周期である。

この式3は蔵本モデルと呼ばれ、その振る舞いがよく研究されている。このモデルは相転移を起こすことが知られている。すなわち、秩序変数として図4のように全ての粒子の重心と円の中心の距離 R が存在し、それは結合の強さ K の関数としてみると図5のような相転移を起こす。この相転移は動画で見るとイメージがよく掴める。<http://idken.net/posts/2017-08-02-kuramoto/>。(なお蔵本モデルおよびカオス理論についてさらに詳しくは(ストロガッツ, 2014)(蔵本由紀, 2016)(蔵本由紀、河村洋文, 2017)(ストロガッツ, 2015)。

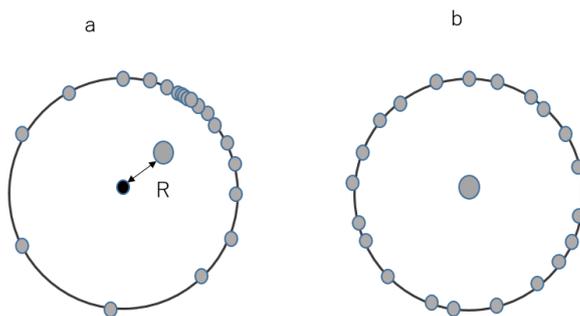


図4 蔵本モデルの秩序変数と集団振動の幾何学的イメージ(蔵本由紀, 2014)p103。 aのように分布に偏りができると集団振動が存在するが、bのように一様にばらつくと集団振動は存在しない。 R は粒子群の重心と円の中心との間の距離を示し、集団振動の振幅の目安をあたえる。

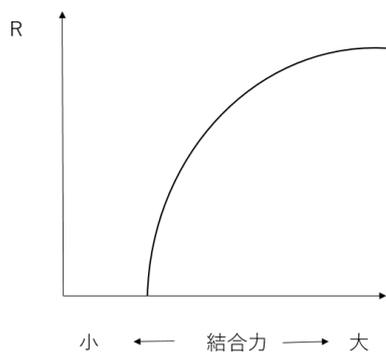


図5 蔵本モデルの相転移(蔵本由紀, 2014)p104。 転移現象としての集団同期の発生。 結合力がある値以上になると、集団振動の振幅の目安となる量 R(図 18 参照)がゼロから急に立ち上がる。すなわち、突然集団振動が現れる。

6 気候システム： 周期的な宇宙からの外力の下での結合した非線形振動

蔵本モデルでは振動子への外力が存在しないが、Scafetta の理論は、太陽活動変化等の宇宙からの影響が準周期的な外力として作用することを示唆している。周期的な外力の下では、カオスの振る舞いはそれへの整数比を以て同期する傾向があることが知られている(蔵本由紀, 2014)p154。なお現実の気候システムは調和振動子ではなく、それ自体カオス的なふるまいをする準周期的な振動をするものであるが、このようなカオス間でも同期現象が存在することが知られている(ストロガッツ, 2014) 7 章。

本稿でのここまでの考察から、地球の気候システムについての以下のような描像を仮説として提示する：

- ① 気候システムは、一定の太陽輻射以外に宇宙からの外力が無い場合、短期間から数百年規模までの、無数の準周期的な振動を内在する。
- ② このうち、幾つかの振動が励起されて、気候システムの数年から数百年スケールの振動をもたらす。
- ③ この励起への外力としては、太陽光強度の約 11 年程度の準周期的振動を始めとした、宇宙から地球に及ぼす影響の準周期的変化が存在する。
- ④ 以上の描像の利点は、太陽活動の変化自体は、地球の準周期的気候変動を直接引き

² 用語に関する注。本稿では、準周期的という言葉を用いる。その意味は概ね周期的に見えるが、厳密には周期的ではないということである。このような用語法は気候システムの研究者によるものである。他方で数学では準周期的という言葉は別の意味で用いることがあるので注意されたい。

起こすほど大きくなくてよいことである³。

最後の点について補足すると、これは例えば、ブランコをこぐときに、1回ずつは小さく足を振るだけでも、やがて大きくブランコが揺れるのに似ている。

太陽活動の変化等の宇宙から地球への影響が気候変動の準周期的振動を駆動するという Scafetta や Svensmark の議論のこれまでの難点は、太陽光強度や、太陽磁場変化による銀河宇宙線強度の効果は、それ単独では、観察されている気候変動を引き起こすには小さすぎるといった点であった。しかし、直接の効果は少なくとも、それが振動の駆動力となるという解釈であれば、それ自体は小さくてもよい。

太陽光強度の変動はあまり大きくないと述べたが、それでも、地球の気候システムのあちこちに明確な影響が顕れる程度には存在する。例えば北海道の年平均気温は 0.5 度も上下しているが、これは太陽黒点の 11 年周期変動に同期しているとの指摘がある(近藤 純正, 2010)。なおこの変動が可視光の変化によるのか、磁場の変化によるのか、紫外線の変化によるのか、そのメカニズムはいくつかありうるが今のところよく解っていない。

温室効果について付言する。ここで提示した気候システムの描像は、CO₂ 等の温室効果ガスによる温暖化を否定するものではない。温室効果ガスはこの気候システムに対して非周期的な外力として作用する。例えば CO₂ はまず直接的な効果として概ねその濃度の対数関数で温室効果を及ぼす。ただしその間接的な効果である水蒸気・雲等によるフィードバックの大きさについては不確実性があって、気候感度は(IPCC, 2013)によれば 66%以上の信頼区間で 1.5°Cと 4.5°Cの間、と専門家判断されている。

もしも過去に観察された温暖化の多くが温室効果とは無関係な振動によるならば気候感度は低めの値が正しいことが示唆される。Scafetta はこの立場である。だが理論的な可能性としてはこの逆もある。つまり過去の温室効果が、それとは無関係な振動で打ち消されていたのであれば、気候感度は高めであることが示唆される。

なお 100 年以上かかるような長期的なトレンドとしての温暖化はそれが長周期の振動 (Scafetta の理論で言えば $h_{983}(t)$, $h_{115}(t)$, $h_{60}(t)$ の 3 つの項が該当) なのか温室効果ガスの効果なのか切り分けるのは本質的に難しい。例えば 1850 年以降の現在までの温暖化のどの程度が小氷期からの戻りの振動なのか、あるいは温室効果ガスのせいなのか、といったことである。

今後の研究の方向性について付言する。まず解析的な扱いには限度がある。蔵本モデルのような分析はカオス研究の専門家によって多く行われているが本稿 6 章で提示した気候システムの複雑さには程遠い。GCM で本稿を検証することはしばらくの間は無理であろう。というのは、分解能力も観測データも限られているためである。衛星等による様々な観測や

³ このことは(Scafetta, 2010)によっても指摘されている。

古気候の調査は強化する価値がある。海洋や大気での熱の移動等が詳しく分かると示唆は大であろう。実験としてはオペアンプやプラズマなどを使って、準周期振動をするカオス系を作り出して連結し、その振る舞いを調べる方法がある。これはこれまでもカオス研究でなされてきたやり方である。上記何れの方法をとるにせよ、6章で立てた仮説を念頭に置いて研究することを望みたい（もちろんその結果、仮説が棄却されることもありうる）。枠組みとしての理論は邪魔になることもあるが、観測や実験の指針づくりや解釈を助けることもある。「存在を信じないならば見ることが出来ない(if you don't believe that it exists, you can't see it)」⁴からである。

文献

- Essex, C., & Tsonis, A. A. (2018). Model falsifiability and climate slow modes. *Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications*, 502, 554–562. <https://doi.org/10.1016/j.physa.2018.02.090>
- IPCC. (2013). *Climate Change 2013: The Physical Science Basis*. Retrieved from <https://www.ipcc.ch/report/ar5/wg1/>
- Scafetta, N. (2010). Empirical evidence for a celestial origin of the climate oscillations and its implications. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 72(13), 951–970. <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2010.04.015>
- Scafetta, N. (2013). Discussion on climate oscillations: CMIP5 general circulation models versus a semi-empirical harmonic model based on astronomical cycles. *Earth-Science Reviews*, 126, 321–357. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2013.08.008>
- Scafetta, N. (2016). Problems in modeling and forecasting climate change: Cmpip5 general circulation models versus a semi-empirical model based on natural oscillations. *International Journal of Heat and Technology*, 34(Special Issue 2), S435–S442. <https://doi.org/10.18280/ijht.34S235>
- Scafetta, N. (2019). On the reliability of computer-based climate models. *Italian Journal of Engineering Geology and Environment*, 1, 50–70. <https://doi.org/10.4408/IJEGE.2019-01.O-05>
- Svensmark, H. (2018). *Force Majeure The Sun's Role in Climate Change*. Retrieved from <https://www.thegwpc.org/content/uploads/2019/03/SvensmarkSolar2019-1.pdf>
- Tsonis, A. (2017). *The Little Boy El Niño and natural climate change*. Retrieved from <https://www.thegwpc.org/content/uploads/2017/09/Tsonis-17.pdf>
- Tsonis, Anastasios A. (2012). Climate Subsystems: Pacemakers of Decadal Climate

⁴ 理論物理学者と実験物理学者の対話： Mark Levinson and cast: "Particle Fever" | Talks at Google <https://www.youtube.com/watch?v=eMHsG3r8JDE>

Variability. In *Extreme Events and Natural Hazards: The Complexity Perspective Geophysical Monograph Series 196*. American Geophysical Union.

<https://doi.org/10.1029/2011GM001053>

Tsonis, Anastasios A. (2020). Do You Believe in Global Warming?

<https://doi.org/10.1002/9781118444054.ch9>

Tsonis, Anastasios A., & Madsen, M. D. (2018). On the Range of Frequencies of Intrinsic Climate Oscillations. In A.A.Tsonis (Ed.), *Advances in Nonlinear Geosciences*. Springer.

ストロガッツ. (2014). *SYNC なぜ自然はシンクロしたがるのか*. 早川書房.

ストロガッツ. (2015). *非線形ダイナミクスとカオス*. 丸善出版.

蔵本由紀、河村洋文. (2017). *同期現象の科学*. 京都大学学術出版会.

蔵本由紀. (2014). *非線形科学 同期する世界*. 集英社.

蔵本由紀. (2016). *新しい自然学 非線形科学の可能性*. 筑摩書房.

近藤 純正. (2010). 日本における温暖化と気温の正確な観測 Long-term warming in Japan and accurate measurement of air temperature. *伝熱 Journal of the Heat Transfer Society of Japan*, 49巻(208号), 58–67.

以上