

太陽内部の熱対流と磁場生成

堀田 英之

〈千葉大学大学院理学研究院 〒263-8522 千葉県千葉市稲毛区 1-33〉

e-mail: hotta@chiba-u.jp



太陽は11年周期を持って変動していることは有名な事実ですが、その周期維持のための物理メカニズムはいまだに理解されておらず、太陽ダイナモ問題と呼ばれています。太陽ダイナモ問題を理解するためには、太陽内部の乱流と磁場を精密に理解することが必要です。太陽内部は、物理量が精密に測定された比較的単純な系という特徴を持ちながら、数値シミュレーションと観測の間に大きな隔たりがあります。近年の大規模数値シミュレーションで、徐々にこの謎の解明に近づいていますが、完全な解決までにはまだ長い時間が必要と予想されます。本稿では、筆者のグループの取り組みを中心にこれまでの成果を振り返りながら、今後の太陽内部研究の展望を示します。

1. 太陽物理学との出会い

15年ほど前の、学部2年生の進学振り分け時にさかのぼります。小さな頃から雲の動きや水の流れなどに興味を持っていて、大学でもそのようなことを研究してみたいと思っていた私は、地球惑星物理学科の説明に大変惹かれました。この学科の扱う大気や海洋の研究では、流体の最先端の物理学を理解しつつ、しっかり観測と合わせるができるため面白そうと思ったのです。その後、地球惑星物理学科に進学した私は、のちの指導教員となる横山央明准教授（当時）に「流体現象は磁場があるともっと面白くなる」と教えてもらいました。磁場と流体が相互作用することで、黒点のような複雑な構造を形成しうるので、そのうえで、当時世界の最先端の計算を行っていたMatthias Rempel博士の黒点の計算動画を見せてもらいました（図1は同様の計算の一例）。これはすごく面白そうと思いました。地球上では起こり得ないことを理論的に再現しつつ、その詳細は観測によって確認するという点に強い興味を持ち、この学問を深く勉強してみたいと思いました。遠く

の天文学のように現象は極端に地球のパラメタから離れているが、その詳細は観測できない、また一方、地球物理のように非常に精密に観測ができるが、現象は地球にありふれたもの、というどち

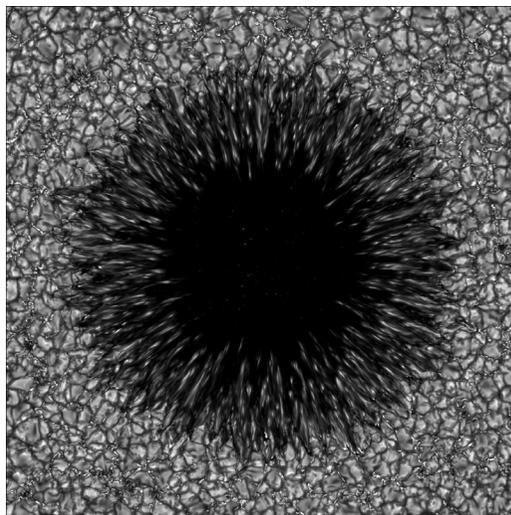


図1 数値シミュレーションによる太陽黒点の再現の様子。太陽表面から放射される光の強さを表しています。学部の時に見せてもらったのは、Rempel博士の計算ですが、この記事のために筆者のR2D2コードで計算し直しました。

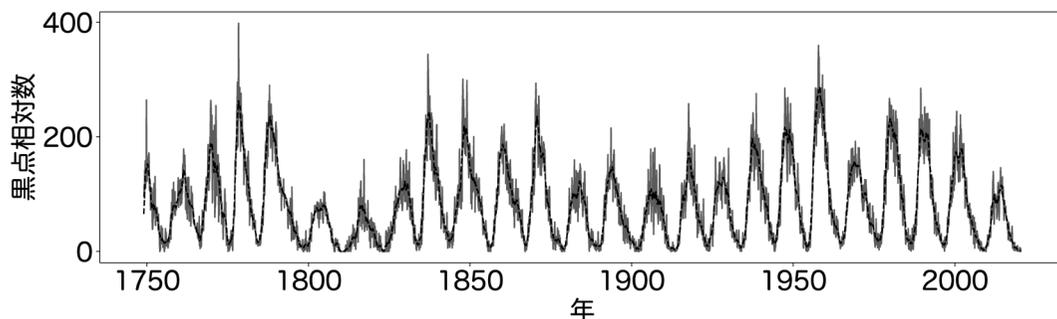


図2 黒点相対数の時系列データ。実線は月ごとの値、破線は一年平均を表します。データはベルギー王立天文台提供。
<http://sidc.be/silso/home>

らも中間のところを扱う太陽物理学が自分に合っていると考えました。

2. 太陽黒点11年周期の問題と太陽ダイナモ

学部4年時に指導教員に与えられたテーマは、「太陽ダイナモ」というものでした。太陽表面に現れる黒点相対数（≒面積）は、11年の周期をもって変動することが400年以上にわたる観測からわかっています（図2）。しかし、この周期維持のための物理メカニズムはいまだに明らかになっておらず、太陽物理学最古にして、最大の問題となっています。黒点は太陽表面の中でも、磁場の強い領域に対応しますので、黒点11年周期の問題はダイナモ（磁場生成）の問題と考えられ、太陽ダイナモ問題と呼ばれます。

太陽ダイナモ問題を理解するうえで重要なのは、太陽内部を理解することです（図3）。太陽はその中心付近で、核融合によりエネルギーを生成し続けています。そこで生成されたエネルギーは、半径の70%までは光の輻射により、外側30%ではお風呂を沸かしたように熱対流により外側に輸送されており、対流層と呼ばれます。太陽内部は、高温ですので、太陽の構成要素のほとんどを占める水素とヘリウムはほぼ完全に電離したプラズマという状態になっています。プラズマが動くことにより、磁場が変化する、磁場がある

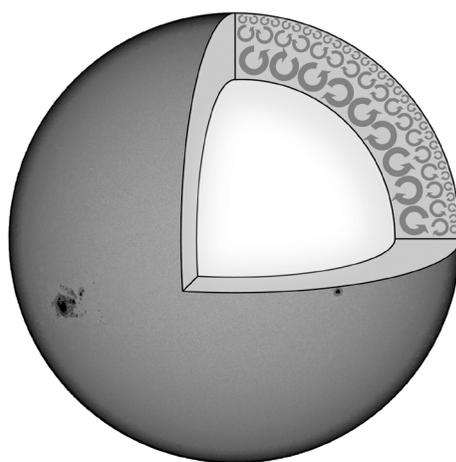


図3 太陽内部の概観図。太陽表面の画像は、SDO/HMIの観測結果を利用しています。

ことによりプラズマの運動が影響されるというようにプラズマと磁場は直接相互作用可能です。よって、太陽内部の乱流的な熱対流・磁場を精密に理解することができれば、どのように磁場が生成されるかを解明することが可能で、太陽ダイナモ問題を解決できると考えられます。このようなカオスから11年周期という秩序だった特徴が生まれるのは、物理的にも面白いところです。

3. 太陽内部の数値シミュレーション

3.1 平均場モデル

学部4年生の時に、指導教員から言われたのは「ダイナモコードを作ってきてくれ」ということ

されます。太陽の円周440万kmを包括しながら、1cmの渦までを分解しなければいけないことが「正しい」太陽の計算を実行することを難しくしています。今後の100年程度の未来では、このスケールをすべて分解することは難しいと考えられるのですが、できるだけ大規模で高解像度な計算を実行し、太陽の状況に近づくことが太陽内部をよく理解するために重要と考えられます。

もう一つの太陽数値シミュレーションの困難は成層の強さです。太陽対流層の熱対流と似た状況の系として、よく地球の金属コアが挙げられます。どちらも乱流を持ち、磁場と相互作用しながら、大局的な磁場を維持しているのですが、大きな違いは密度分布です。地球の金属コアはその中で密度が数十%しか変動しないのですが、太陽では対流層の底から太陽表面までで密度が 10^6 倍も変化します。また、温度も400倍ほど変化します。密度と温度変化は、熱対流の典型的な時間スケールを大きく変えます。例えば、対流層の底では20万km・1ヵ月ほどの空間・時間スケールを持つ熱対流が存在するのですが、太陽表面では1000km・数分ほどの熱対流が存在しており、これらを包括した数値計算は困難です。重要なことは、このスケールの変化は熱対流の「典型的な」スケールの変化であり、最小のスケールは前段落の議論のようにもっと小さいところにあります。普通のアプローチでは、太陽内部の典型的なスケールさえ解くことができないことが、太陽内部の包括的な理解を阻害しています。一般には、太陽深部モデル[9]と太陽表面モデル[10]に分けられて別々のグループが別々に計算しています。Rempel博士の黒点計算はこのうち太陽表面モデルでした[11]。いずれは、黒点の研究をやりたいと思ってはいたのですが、まともに取り組ん

では後追いの私はとても敵わないと思いました。太陽内部から始めて、いつか太陽表面まで辿り着ければ黒点の起源から発生までを包括的に取り扱うことができるようになるので、まずは太陽深部モデルから始めることにしました。

3.3 アネラスティック近似と音速抑制法

太陽深部モデルを始めた当時、コロラドのグループが世界の研究をリードしており、彼らに追いつき、追い越すためには何らかの戦略が必要だと考えました。そこで注目したのが、その当時太陽対流層計算で使われていた計算手法です。太陽深部の状況の一つの特徴は低いマッハ数を持つこと、つまり音速が熱対流速度に比べてとても速いことにあります。例えば、対流層の底では、熱対流速度は 50 m s^{-1} ほどと考えられていますが、音速は 200 km s^{-1} ほどです。太陽内部を数値シミュレーションするときには、空間・時間のある有限の幅 $\Delta x, \Delta t$ で区切り方程式の微分・積分を数値的に実行していきます。陽的な時間積分手法においては、設定した時間幅 Δt の間に、流れや音速によって伝播する長さ（流れと音速の合計の速さを c とすると $c\Delta t$ ）が格子点幅 Δx を超えてはならないというCFL (Courant-Friedrichs-Lewy) 条件があります*3 (図4)。この条件を破ると数値解が不安定となり、発散してしまいます。この条件を太陽内部計算に適用すると問題が起きます。太陽内部研究では、乱流と磁場の相互作用を知りたいのですが、その数千倍速い音速が時間幅 Δt を制約してしまい、音波がない時と比べて数千倍多くの積分をしなければいけなくなります。これではとても科学的に意味のある計算はできないので、世界的に広くアネラスティック近似という手法が使われています。アネラスティック近似では、音速を無限大と仮定し、音波に関する情報は

*3 厳密な意味では正しくない説明なのですが、わかりやすさのために厳密さを排除しました。また、陽的な積分とは積分の数値スキームの一つと考えてください。陰的な積分をするとCFL条件の制約はないのですが、現代的な並列計算機では性能を引き出すことが難しいことが知られています。

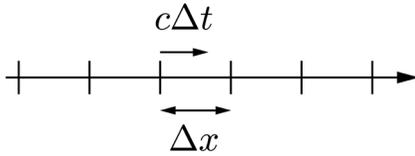


図4 CFL条件を表す図. 流れ・波動が時間幅 Δt の間に伝播する長さ $c\Delta t$ が格子点幅 Δx を超えないように Δt を決めなければいけません.

瞬時に伝わるとして、計算を簡単化します。音波の伝搬を陽に解かないので、音速に関する CFL 条件から解放されます。この手法を用いて非常に多くの太陽内部計算が行われています。

このアネラスティック近似は、太陽内部では物理的・数学的には妥当なのですが、現代的な並列計算機では問題があることが指摘されています。並列計算機では、太陽対流層の各領域を別々の CPU が担当し、並列に計算を実行することで計算を高速化します。計算を効率的に高速化するためには、各領域 (CPU) の間の通信をなるべく抑えることが重要です。アネラスティック近似では、音速を無限大と仮定しているために、一つの CPU にある情報を毎回すべての CPU に伝えてしまいます。これでは、通信が多くなりすぎて、現代的な並列計算機をうまく使うことができません。一方、先に説明したように太陽内部をできるだけ現実に近い状況にするためには、多くの格子点をつぎ込んで小さな渦を分解する必要があるために、並列計算機を有効に使うことは必須です。

この状況を打破するために、筆者が採用した計算手法が音速抑制法です [12]。音速抑制法では、質量保存則に修正を加えることで実効的な音速を抑えます。この手法ならば音速による厳しい CFL 条件を回避しつつ、並列計算においても局所的な通信 (隣の CPU のみとの通信) が必要なので、並列計算機の規模に応じた数値計算規模の大規模化が期待できます。また、副産物的ではあったのですが、この手法を使えば将来的に太陽深部モデルと太陽表面モデルを接続することが可能なこと

にも気づきました。アネラスティック近似は、太陽深部では妥当なのですが、太陽表面では対流速度が 3 km s^{-1} 、音速が 8 km s^{-1} ほどとなるので、音速無限大の仮定は使えなくなります。よって、アネラスティック近似を使っているのは二つの領域を接続することはできません。一方、音速抑制法では、抑制率に空間分布を持たせることもできます。そこで、対流層深部では大きな抑制率を使い、太陽表面では音速を抑制しないという手法を用いれば、包括的な計算を実行できる可能性が出てきました。

音速抑制法を開発した当時、ちょうど京が運用を始めていたので、世界最大の計算をいくつか行い大きな成果を出すことができました。その中でも特筆すべきものは、太陽表面付近に存在する表面勾配層を再現しその生成の物理機構を解明したこと [13]、小スケールの磁場生成が大スケールの磁場生成に重要な作用を持っていることを発見したこと [14] になります。特に後者は、Science 誌から出版され大きな注目を浴びました。

3.4 熱対流の難問

このように音速抑制法と日本のフラグシップスーパーコンピュータを有効に使うことによって、太陽対流層の高解像度計算を革新的に進めることができたのですが、実は数値シミュレーションと観測には誰もが見てわかる大きな隔りがあることが知られていました。この問題は、多くの観測から示唆されており熱対流の難問 (convective conundrum) と呼ばれ、太陽物理学の最重要問題の一つと認識されています。多くの観測事実の中からここでは差動回転の問題について触れます (残りの問題は 4.1 節で紹介します)。

太陽の差動回転は、古くは 1600 年代から黒点追跡によって知られており、赤道が速く、極地方が遅く自転しています。1990 年代からは日震学によって、太陽内部の差動回転分布も解明されており、太陽対流層のほとんどの領域で 1% 程度の誤差で角速度を求めることが可能になっていま

す[8]。太陽の差動回転はこれまでに説明してきた太陽の熱対流によって維持されていると考えられています。乱流的な熱対流が自転の影響を受けることにより、非等方的になり、角運動量のある特定の方向に輸送するようになります。この角運動量輸送によって差動回転が形成されると考えられていました。この機構では、乱流と自転スケールの比が重要となります。自転の時間スケールが乱流の時間スケールよりも短ければ乱流に大きな影響を与え、より非等方的になることができます。一方、差動回転や乱流の非等方性は、太陽の大規模磁場を形成するのにも重要です。そのため、数値シミュレーションにより乱流から差動回転を再現できるかどうかは、太陽内部の乱流理解度のチェック、太陽ダイナモ問題解決に大きな一歩となります。

しかし、2008年ごろから問題が出てきました。スーパーコンピュータは大規模化し、多くの格子点をつぎ込んだ数値シミュレーションが可能になってきたのですが、シミュレーションの高解像度化に伴い、実際の太陽とは逆の極が速く回る自転が実現されるようになってきました(図5)。高解像度化によって、小スケールの乱流が実現し、乱流の時間スケールが実効的に短くなることで赤道加速に必要な非等方性を維持できなくなったことが極加速の原因とは理解されています。しかし、なぜ太陽のようによくパラメタが定まった数値シミュレーションで、観測を再現できないのかは大きな謎となっていました。太陽のような赤道が速い差動回転を実現するためには、乱流の時間スケールを長くする必要があります。そのためには粘性などの拡散パラメタの大きくなる低い解像度で計算する必要があります。現在でも多くの太陽内部数値シミュレーションは、現代のスーパーコンピュータ性能からは考えられないほどの低い解像度で計算されています。実際の太陽には1cmまでの乱流が存在すると考えられている中、低解像度で計算せざるを得ないという期間が10年ほ

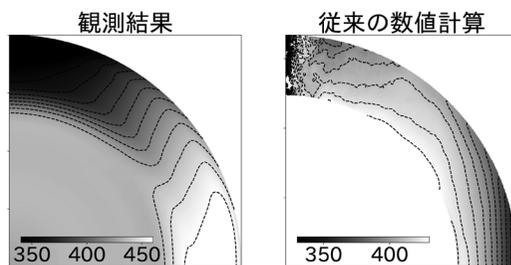


図5 日震学による観測[15]と従来の数値シミュレーションの差動回転分布(それぞれ左と右)。角速度を Ω として、 $\Omega/(2\pi)$ の分布をnHzで示してあります。

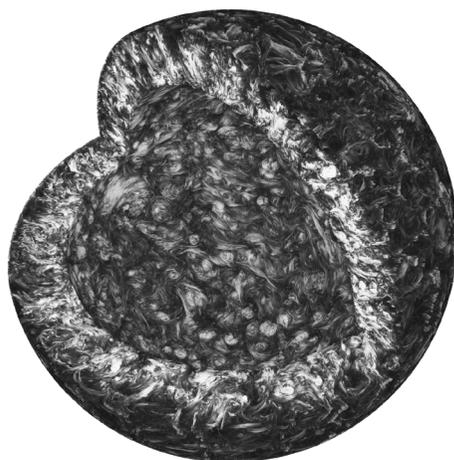


図6 富岳を用いて達成した2022年現在、世界最高解像度の数値シミュレーションです。太陽内部の磁場強度を表しています。

ど続いていました。当然、熱対流を正しく記述できているとは考えられないので、太陽ダイナモ問題解決に挑むこともできません。

筆者は、この問題をどうにか解決しようと京の時代から高解像度計算を続けてきましたが、どうも京の計算資源では問題を解決することはできませんでした。契機が訪れたのは、2020年に富岳が運用を開始してからです。富岳成果創出加速課題の一員として一般運用に先んじて富岳の資源を使うことができた筆者は、11月頃には開発するR2D2コードの富岳向けのチューニングを終えることができました。熱対流の難問に関する取り

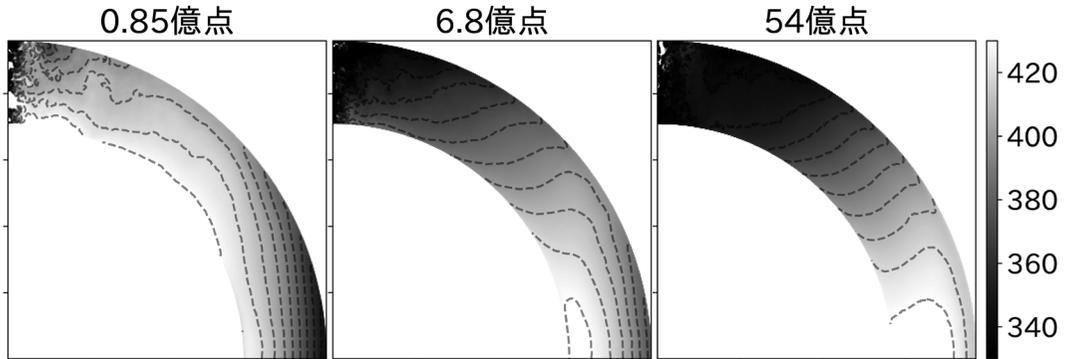


図7 数値シミュレーションで実現した差動回転の解像度への依存性. 低解像度では、極が加速してしまっていたのが、54億点を費やしたシミュレーションでは、観測をよく再現する差動回転を達成できました. 図5と同じく $\Omega/(2\pi)$ を単位nHzで示しています.

組みは徒労に終わる可能性が高く、大規模シミュレーションを実行することは覚悟のいることなのですが、せつかく最新の計算機である程度満足に行くコードが開発できたので、問題解決に挑戦することにしました.

数週間ほどの計算で結果はすぐに出ました. その結果を図6に示します. 京の時代は、長期間の磁場の時間発展を追うためには、太陽全球を2億点程度で分解する計算が限界だったのですが、この計算では50億点以上の格子点で分解することに成功しており、非常に細かい磁場分布を再現できていることがわかります.

この計算によって得られた差動回転の分布を図7に示します. これまでの低解像度計算では、極が加速してしまっていたパラメタでも、多くの格子点を用いることで観測されるような赤道が速く、極が遅く自転する差動回転分布を再現することに成功しています. 熱対流の難問のうち差動回転に関する部分については、この研究で解決したと言ってよい成果です [16].

この計算の中では、多岐に渉る新しい物理過程が働いていることがわかったのですが、このシミュレーションでの赤道加速の物理機構について簡単に説明します [17]. 達成できた高解像度シミュレーションでは、小スケールの渦・磁場を解

像することにより散逸を低く抑えることができるようになっていきます. その結果、乱流によって生成される磁場が非常に強くなり、平均的にも流れのエネルギーの2倍を超えるような磁場エネルギーが維持されています. その結果、乱流による角運動量輸送よりも、磁場によるものが強く働くようになります. 磁気流体力学の方程式を見るとわかりますが、移流と磁場による運動量輸送は逆符号を持っているために、流れ場と磁場が統計的に同じような傾きを持つてると、角運動量を反対方向に運ぶようになります. その結果として、乱流では赤道が加速できなかつたとしても、磁場による輸送で赤道を加速できるようになったのです. これまですべての研究者が乱流が差動回転を駆動しているものと信じ、乱流を低く抑える方法を検討してきました. しかし、大規模な数値シミュレーションにより発見した磁場による輸送の効率化は、太陽内部のダイナミクスの理解を大きく変更するものでした.

3.5 全太陽対流層包括計算

上記のように太陽深部モデルはこの10年で大きく進展し、観測を再現するようなシミュレーションが可能になってきました. 一方で解決しなければならぬのが、太陽深部モデルと太陽表面モデルの接続です. 詳細な観測は、太陽の表面で

のみ可能であるため、観測によるシミュレーションの検証のためには、接続モデルが必要になります。また、太陽11年周期は、黒点の周期であるため、太陽内部で生成された磁場が最終的に太陽表面で黒点として生成しうるのかを証明しなければいけません。太陽深部モデルのみでは、この部分を明らかにすることができません。先に説明したように音速抑制法にはこの二つのモデル接続の可能性がありますが、輻射輸送、状態方程式、物理量の変動、必要とする多量の計算資源など困難な障壁がいくつもありました。我々のグループでは一つ一つの物理過程について、接続のために必要なアルゴリズムを検討しました。これらを統合し、対流層の底から太陽表面までの 10^6 の密度差を包括することに成功しました[18]。その結果を図8に示します。太陽表面付近で発生した1000 kmほどの小さな熱対流が深部に向かうにつれて大規模な流れとなり最終的に20万 km程度の流れを作っていることがわかります。

この成果を拡張し、我々のグループでは対流層の深部を出発した磁束が熱対流の変形を受けながら、太陽表面に黒点を形成するところまでの再現に成功しています[19]。学部4年生の時に見せていただいたRempel博士の黒点の計算をより包括的な視点から再現することができました。

4. 今後の課題

これまで順調に研究を進めてきましたが、太陽内部には、まだまだ解決すべき課題が多くあります。本章では、今後の課題と太陽ダイナモ問題解決に向けた課題について示します。

4.1 残された熱対流の難問

熱対流の難問のうち、差動回転については、我々の取り組みにより、ほぼ解決することができましたが、まだ理解しきれていない側面がいくつかあります。特に重要なものは数値シミュレーションと観測の熱対流速度の乖離です。

図9にその比較を示します。Shravan M. Hanasoge

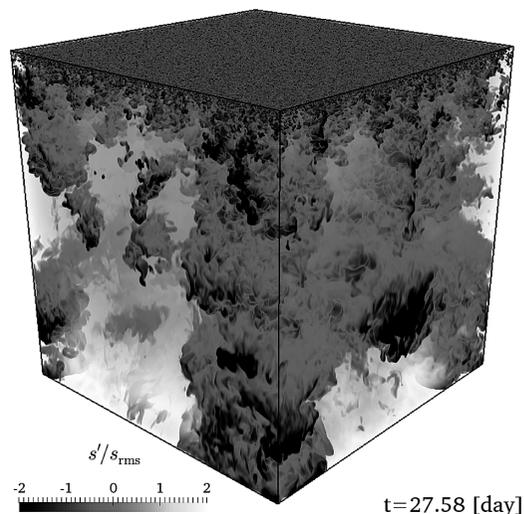


図8 太陽の対流層底から表面までを包括した初めての計算。各高さで規格化したエントロピーを示しています。

らの局所の日震学を用いた熱対流測定[21]では特に大きなスケールで、数値シミュレーションよりも数桁小さい熱対流のエネルギーを示しています。これが一般に、日震学と数値シミュレーションの乖離と言われるのもです。星の内部の熱対流は大雑把には混合距離理論に従うものと考えられており、数値シミュレーションは当然混合距離理論と調和的なのですが、観測とは大きく違っているという衝撃的な結果でした。一方、Greerらの別手法で求めた熱対流速度は数値シミュレーションと調和的だったり[22]、どちらの手法も修正が施され差異が小さくなってきたり[23]と日震学の中でも議論が収束していません。しかし、信頼がおける太陽表面の観測とも大スケールでは数値シミュレーションが不調和な結果を示しており[24]、数値シミュレーションにも不具合があることは間違いないようです。太陽シミュレーションで残る改良の余地は、解像度と成層の効果です。このどちらも計算機の発展と共に改良されていくことが期待されます。今後ますます世界各国の研究開発・競争が活発化すると予想されます。

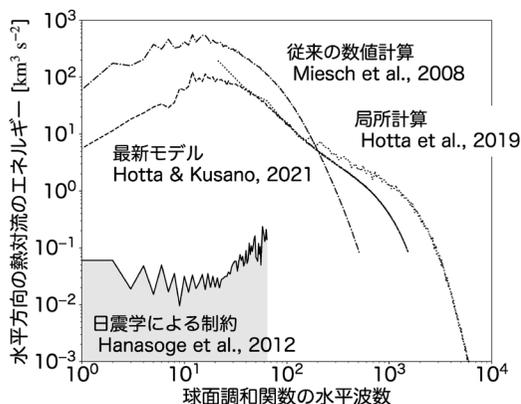


図9 数値シミュレーション [16, 18, 20] と局所の日震学による熱対流測定 [21]. の比較. 特に大きなスケールで, 数値シミュレーションと日震学の間大きな乖離があることがわかります.

4.2 極域ミッション (Solar-D) へ

太陽内部のダイナミクス・太陽ダイナモを観測的に進めるためには, やはり局所の日震学を発展させることが重要です. 局所の日震学では, 太陽表面場の二点での振動を観測し, その二点間を伝わる波動の伝播時間を見積もることで内部の流れや温度擾乱などの情報を得ます. 太陽ダイナモ問題を解決するためには, 特に太陽深部の流れを測定することが重要で, 近年の我々の数値シミュレーション [17] から子午面内の平均的な流れを観測することが理解の鍵となることがわかってきました. 一方, 局所の日震学を用いて, 例えば対流層の底の状況を知るためには, 太陽表面上で緯度にして 45° 程度離れた二点の振動を観測する必要があります. 振動はドップラー効果を用いて測るのですが, 太陽表面上の振動はほぼ動径方向を向いていることや, 高緯度の実効的空間解像度が落ちることから地球軌道からの局所の日震学では太陽対流層の底付近の擾乱を捉えることができるほど精度の高い観測をすることができていません. そこで検討されているのが, 極域ミッション (Solar-D) です. 黄道面を離れて, 太陽の極域軌道へ到達することにより, 極からの観測を行い太

陽深部の様子を明らかにしようとしています. これはもともと10年ほど前にSolar-Cミッション検討時にPlan-Aとして提案されていましたが, 技術的要素が未成熟ということで, Solar-CはPlan-Bが選択されました. その後, Solar-CはEUVSTとして2020年代中頃に打ち上げ予定となっています. その一方で, 太陽内部研究はこの10年で理論面で大きな進展があったため, Solar-C Plan-Aのサイエンスタargetを明確化する準備は十分に整いました. 今こそSolar-Dとして, 極域ミッションを再検討し, 太陽内部の理解を大きく進める時期にきていると考えます.

謝辞

この度は, 日本天文学会研究奨励賞という荣誉ある賞をくださり誠にありがとうございました. 学生時代の指導教員の横山央明教授, 海外滞在時の受け入れ教員Matthias Rempel博士には長年にわたって研究人生を勇気づけていただきました. 感謝を申し上げます. 京の戦略課題, ポスト京萌芽課題, 富岳成果創出課題と計算資源確保のためのプロジェクトの参加者のみなさま, 特に代表者としてプロジェクトを牽引された牧野淳一郎教授に感謝いたします. また, 千葉大学の所属研究室の松元亮治教授, 花輪知幸教授, 松本洋介准教授, さらにはこれまでの共同研究者の草野完也教授, 飯島陽久博士, 飯田佑輔准教授, 鳥海森准教授にも感謝したいと思います. 編集委員として丁寧に本稿へのコメントを下された西塚直人博士にも感謝します. 本稿の図を作るためにデータを提供していただいたR. Howe博士, S. Hanasoge博士, M. Miesch博士に感謝します.

参考文献

- [1] Dikpati, M., & Charbonneau, P., 1999, ApJ, 518, 508
- [2] Dikpati, M., et al., 2004, ApJ, 601, 1136
- [3] Hotta, H., & Yokoyama, T., 2010, ApJ, 714, L308
- [4] Christensen-Dalsgaard, J., et al., 1996, Science, 272, 1286

- [5] Basu, S., & Antia, H. M., 1997, MNRAS, 287, 189
- [6] Asplund, M., et al., 2009, ARA&A, 47, 481
- [7] Howard, R., et al., 1984, ApJ, 283, 373
- [8] Schou, J., et al., 1998, ApJ, 505, 390
- [9] Miesch, M. S., et al., 2000, ApJ, 532, 593
- [10] Stein, R. F., & Nordlund, A., 1998, ApJ, 499, 914
- [11] Rempel, M., et al., 2009, Science, 325, 171
- [12] Hotta, H., et al., 2012, A&A, 539, A30
- [13] Hotta, H., et al., 2015, ApJ, 798, 51
- [14] Hotta, H., et al., 2016, Science, 351, 1427
- [15] Howe, R., et al., 2011, J. Phy. Conf. Ser., 271, 012061
- [16] Hotta, H., & Kusano, K., 2021, Nat. Astron., 5, 1100
- [17] Hotta, H., et al., 2022, arXiv e-prints, arXiv:2202.04183
- [18] Hotta, H., et al., 2019, Sci. Adv., 5, 2307
- [19] Hotta, H., & Iijima, H., 2020, MNRAS, 494, 2523
- [20] Miesch, M. S., et al., 2008, ApJ, 673, 557
- [21] Hanasoge, S. M., et al., 2012, Proc. Nat. Acad. Sci. U.S.A., 109, 11928
- [22] Greer, B. J., et al., 2015, ApJ, 803, L17
- [23] Proxauf, B., 2021, arXiv e-prints, arXiv:2106.07251
- [24] Lord, J. W., et al., 2014, ApJ, 793, 24

Thermal Convection and Magnetic Field Generation in Solar Interior

Hideyuki Hotta

Chiba University, Faculty of Science, 1-33 Inage, Chiba 263-8522, Japan

Abstract: Although the 11-year solar activity cycle is well known, the physical mechanism has not been understood. The problem is called the solar dynamo problem. To solve the problem, we need to understand the turbulence and the magnetic field in the solar interior precisely. While the solar interior is a simple system with well-evaluated physical quantities, there are significant discrepancies between numerical simulations and observations. Recently the mystery becomes solved thanks to large-scale numerical simulations, but we would still need a long time to reach the “perfect solution.” This paper reviews recent achievements, especially from our group, and shows the future prospects.