# 日本天文学会早川幸男基金による渡航報告書

## *From Stars to Planets II: Connecting our understanding of star and planet formation*

氏　名：森昇志（東京大学PD（渡航当時））
渡航先：スウェーデン王国・ヨーテボリ
期　間：2019年6月15～23日

今回私は，スウェーデンのヨーテボリにあるチャルマース工科大学（Chalmers University of Technology）で行われる国際会議「From Stars to Planets II: Connecting our understanding of star and planet formation」に参加し，“Inefficient Magnetic Accretion Heating in Protoplanetary Disks”という講演タイトルで口頭発表を行いました．

本研究会に参加した目的は，（1）今後の研究の指針とするために最新の研究の情報を収集し，（2）自らの研究内容を広く宣伝し，（3）他の研究者と研究議論を行い新たな共同研究の可能性を模索することでした．以下，私の研究概要と共に研究会を経て得られた成果について報告します．

自らの講演では，原始惑星系円盤の温度構造を，磁気流体数値シミュレーションを用いて調べた結果について報告しました．原始惑星系円盤は惑星が形成する現場であり，その物理構造を理解することが惑星形成過程の解明への第一歩となります．特に円盤の温度構造は形成後の惑星組成を決定づけるため非常に重要です．本研究では磁気流体数値シミュレーションの結果に基づいて新しい円盤の温度モデルを提案し，その円盤におけるスノーライン[*1]の時間進化を示しました．新たな温度モデルではスノーラインが早期に現在の地球軌道の内側に移動することと，地球は含水率が非常に小さいためにスノーライン内側で形成したことから，地球が非常に早期段階に形成したことを示唆する重要な結果です．

研究会は大きなホールで行われ，星・惑星形成に関する興味深い研究を数多く聞くことができました．中でも，A. Ziamprasらが示した「ガス惑星のたてる波による円盤の加熱機構」は新しく，早期段階の円盤の温度構造に影響を与える重要なものだと分かりました．彼の発表後，どういう条件でこの新たな加熱機構が効くかという議論をし，円盤早期段階のスノーラインの進化にも影響を与えうるという共通見解を得ました．他にも，若い円盤の進化を研究するB. Tabone氏や惑星の含水率進化を研究するT. Lichtenberg氏らと議論を行い知り合えたことは，新たな共同研究に繋がる成果であると言えます．

今回は口頭発表の機会を得ることができたことと，質問も豊富にいただいたことからも研究内容の宣伝という点は達成できたかと思います．また発表後もいくつかの研究者から直接質問をいただき，より詳細な議論をすることができました．

以上のように今回の渡航では，当初の目的を達成し，実りある渡航となりました．今回の渡航で得た知見・繋がりを生かし，今後も研究活動に励みたいと思います．

最後になりますが，今回の渡航に向けて多大なる援助をしてくださった，日本天文学会早川基金関係者の皆様に厚く御礼申し上げます．

[*1] 原始惑星系円盤内の水の昇華・凝結が起きる境界．

# 日本天文学会早川幸男基金による渡航報告書
## *Asia Oceania Geoscience Society 16th Annual Meeting*

氏　名：金子岳史（名古屋大学宇宙地球環境研究所研究員（渡航当時））
渡航先：シンガポール
期　間：2019年7月30日～31日

2019年7月30日から31日まで，シンガポールで開催されたAsia Oceania Geoscience Society 16th Annual MeetingのMagnetohydrodynamic Waves in Solar Magnetic Structure: Seismology and Heatingセッションに参加し，招待講演を行いました．本セッションは，太陽コロナの磁気流体波動に関するセッションで，基礎理論のレビューから始まり，磁気流体波動の散逸によるコロナ加熱の理論的研究や，モデルと観測の比較によってコロナ物理量を推定する応用研究まで，様々な研究成果が発表されました．研究対象も，黒点（強磁場領域）上空のコロナループ，プロミネンスと呼ばれるコロナ内の低温高密度プラズマ雲，静穏領域（弱磁場領域）の宇宙空間に開いた磁場など多岐にわたり，磁気流体波動が観測されるあらゆるコロナ領域がカバーされていました．私は，磁気流体波動現象の一つである位相混合に関する理論シミュレーション研究を発表しました．

太陽コロナは非常に高温（$10^6$ K）なプラズマ大気層ですが，その加熱メカニズムは完全には解明されていません．また，コロナでは大規模な爆発（フレア）に伴うプラズマ放出現象が発生し，大量の磁化プラズマが地球へ飛来することがあります．このような定常的な加熱や突発的な爆発現象は，コロナの磁気エネルギーが何らかのメカニズムにより散逸，解放されることで発生すると考えられています．コロナ加熱のメカニズム解明は太陽物理学の長年の課題であり，突発的な爆発現象の事前予測は宇宙天気の分野でも重要な課題となっています．これらの課題を達成するためには，コロナ磁場の情報が必要不可欠ですが，現在のところ，コロナ磁場を直接観測する手法はありません．そこで，コロナで観測される波動の物理量（伝播速度や減衰率）から，コロナ磁場のパラメータを導出するコロナサイスモロジーの研究が行われています．

本研究で着目した位相混合は，磁気流体波動の散逸メカニズムの一つであり，波の位相速度が空間的に（磁力線垂直方向に）急激に変化する領域で発生します．位相混合はエネルギー散逸メカニズムとしては注目されてきましたが，コロナサイスモロジーに対する有用性は議論されていませんでした．本研究では，位相混合の特殊な位相伝播特性（非線形非等方）を定式化し，伝播速度の物理量依存性を明らかにしました．次に，2次元磁気流体シミュレーションを実施し，プロミネンスとコロナの境界付近で位相混合が発生することを確認し，定式化した伝播特性から逆算することで，コロナの物理量を推定できることを示しました（Kaneko et al., 2015）．また，今回の発表では，より現実的なプロミネンスの3次元シミュレーション（Kaneko & Yokoyama, 2018）でも位相混合を確認し，物理量導出が可能であることを示しました．ただし，実際の観測では視線方向の積分効果が影響するため，磁場と視線方向の角度が重要になると考えられます．

本研究で明らかにした位相混合の伝播特性のうち，重要なのは，伝播方向が磁力線垂直方向であることと，伝播速度が時間に反比例して遅くなることです．通常，磁力線垂直方向に伝播する波は速い磁気音波と解釈されます．過去の観測では，磁力線垂直方向に非常にゆっくりと伝播する波動を速い磁気音波として解釈した結果，非常に弱い

磁場強度が導出されてしまい，謎とされている事例もあります．位相混合波はこのような非常に遅い伝播を明快に説明できます．

本セッションでは，プロミネンス内の磁気流体波動に関する観測研究も発表されました．Y. Zhang氏は，プロミネンスにしばしば見られる複数のトルネード構造の間に，波動によるエネルギー輸送の兆候があることを示しました．トルネード構造は，撮像観測ではあたかも回転しているように見えるのですが，本当に回転しているかは定かではなく，太陽研究者の間でも意見が対立しています．もし本当に回転しているならば，プロミネンスへ磁気エネルギー（ヘリシティ）を供給しているはずであり，重要な構造となります．発表後，Zhang氏が発見したケースについて位相混合モデルの適用が可能か議論を行い，共同研究を行うことにしました．

本セッションでは磁気流体波動の多種多様な物理的側面に焦点が当てられましたが，私自身の研究に関連して特に興味深かったのは，圧縮波の熱力学特性についてです．V. Nakariakov氏は，遅い磁気音波の密度擾乱が，放射冷却率（熱エネルギー損失）や加熱率（熱エネルギー獲得）を変動させるため，振幅が減衰，または増幅することを定量的に示しました．これはField（1965）で熱不安定の波動モードとして指摘されているものですが，コロナループモデル（磁束管モデル）に適用されたのは初めてです．P. F. Chen氏は，数値シミュレーションを用いて，コロナプラズマの放出に伴う磁気流体波動を議論しました．シミュレーションの結果として，速い磁気衝撃波からモードコンバージョンにより分離した遅い磁気音波が特定の磁場構造内で停滞し（伝播速度が非常に遅くなり），大きな密度上昇を生むことが示されました．私は現在，Chen氏とほぼ同様の設定で，放射冷却や熱伝導などの熱力学過程も含めたシミュレーションを行っていますが，彼の発表を聞いた後に自分のシミュレーションを見直すと，遅い磁気音波が停滞する高密度領域で熱不安定（凝縮モード）が発生していました．観測的にはコロナレインと呼ばれる低温高密度プラズマ塊の形成に似ています．衝撃波の通過に伴う熱不安定の励起は，星形成の理論モデルとしてよく登場しますが，太陽ではあまり議論されていません（太陽では彩層蒸発や磁場構造の変化が熱不安定を励起すると考えられています）．もし太陽大気中でも衝撃波起源の熱不安定が存在するならば，非常に興味深いです．本セッションは，自身の位相混合の研究を紹介するだけでなく，波動由来の熱不安定を再考する良い機会にもなりました．

最後になりましたが，このような貴重な機会を与えてくださった早川基金および関係者の方々に厚く御礼申し上げます．

# 日本天文学会早川幸男基金による渡航報告書
## *36th International Cosmic Ray Conference*（*ICRC2019*）

氏　名：横山将汰（東京大学M1（渡航当時））
渡航先：アメリカ・マディソン
期　間：2019年7月24日～8月3日

今回，私は第106回日本天文学会早川幸男基金の助成により，アメリカ合衆国・マディソンで開催された国際会議“36th International Cosmic Ray Conference（ICRC2019）”に参加させていただき，“Particle acceleration by shock waves propagating in a non-uniform medium”というタイトルで口

頭発表をしました．ICRCは2年に一度開催される，宇宙線をテーマとする伝統ある国際学会です．広範なトピックが扱われ，世界中から多くの研究者が集まり，口頭・ポスター含めておよそ1,000件もの発表があります．

このICRC2019で，私は「非一様媒質中の衝撃波による粒子加速」について発表しました．これは現在M1の私が学部時代から継続して研究しているテーマです．地上で観測される宇宙線のエネルギースペクトルはおよそ10桁にもわたって冪乗型の分布を持っていますが，このような冪型の分布は衝撃波統計加速と呼ばれるプロセスによって説明ができます．特に銀河宇宙線に関しては「超新星残骸中を伝播する衝撃波による衝撃波統計加速」によって生成されると広く信じられています．衝撃波統計加速ではスペクトルの冪指数は衝撃波上流と下流の速度比で決まりますが，超新星残骸で見られるような強い衝撃波に対しては必ず冪指数−2を予言します．しかし，超新星残骸の電波観測から求められるエネルギースペクトルの冪指数は，実際には−2から外れている天体も多く存在することが知られています．したがって，標準的な銀河宇宙線の加速シナリオには修正が必要であると考えられます．

私の研究では，修正案の一つとして星間空間の密度揺らぎの効果を取り入れました．標準的な理論では衝撃波の伝播する空間は一様であると仮定されていましたが，実際の媒質中には密度揺らぎが存在し，このような媒質中を衝撃波が伝わると衝撃波下流には渦的な擾乱や音波などが発生することが知られています．本研究では下流に発生した音波が速度場を変化させることに着目しました．つまり，媒質中の局所的な速度差により二次加速が起こり，粒子は衝撃波下流でもエネルギーを獲得してスペクトルの形が変化すると考えました．この効果を調べるために，モンテカルロ法を用いて粒子の運動を散乱過程として確率的に取り扱い，数値シミュレーションを行いました．

シミュレーションの結果，確かにスペクトルの形状は変化し，衝撃波近傍での加速に加えて下流でも加速が起きていることが確認できました．発表時点では理論的な見積もりの紹介にとどまりましたが，衝撃波面の往復中に二次加速が十分に効くことによってスペクトルの形状のみならず冪自体が変化することを，シミュレーションによって示すことが本研究の目標です．

今回の渡航では，現時点までの研究の成果を発表させていただきました．この発表は私にとって国内外を通して初の学会発表だったので非常に緊張しましたが，質疑応答も含め貴重な経験をすることができました．発表内容に関しても海外の研究者の方と議論し，宇宙線粒子自身が及ぼす効果により音波が増幅されて二次加速が効率化する可能性に気づくことができました．ICRCでは，宇宙線に関連してガンマ線，ニュートリノ，ダークマターなど幅広いトピックが扱われます．地球惑星プラズマの研究グループに所属する私にとって，このようなテーマはあまり馴染みがなく，非常に勉強になりました．宇宙線に関する最新の観測結果や新しい理論，シミュレーションなどを知ることができ，非常に有意義な学会参加であったと感じています．

最後になりましたが，このような素晴らしい学会参加の機会を提供いただいた日本天文学会早川幸男基金ならびにその関係者の皆様に心より感謝いたします．