

5. 奨励共同研究 目次詳細

(所属・学年は平成30年3月現在)

研究代表者 Principal Investigator	所属機関 Affiliation	所属部局 Department	学年 Year	研究課題名 Project Title	頁 Page
金田和鷹	東北大学	大学院理学研究科	博士課程後期3年	多波長観測に基づく太陽電波放射過程の研究	238
辻根 成	富山大学	大学院理工学教育部 博士前期課程 知能情報工学専攻	博士前期課程2年	不連続構造のブラソフシミュレーション	240
中川美和	愛媛大学	大学院理工学研究科 先端科学特別コース 環境科学分野	博士後期課程3年	リモートセンシングによる黒潮および黒潮内側域における植物現存量の時空間変動解析	242

多波長観測に基づく太陽電波放射過程の研究
Study of the radiative processes of solar radio bursts based
on multiwavelength observations

金田和鷹、東北大学大学院・理学研究科・D3
三澤浩昭、東北大学大学院・理学研究科・准教授

【研究目的】

太陽の大気「コロナ」では、100万度を超える高温プラズマと磁場との相互作用により、様々な爆発現象が発生する。コロナでの爆発により加速されたプラズマ粒子は、周囲のプラズマ振動を引き起こし、強力な電波（電波バースト）を放射する。太陽フレアに伴って放射される電波バーストには、特異な時間・周波数変動を示す微細なスペクトル構造が多数存在することが知られている。これらの微細構造は電波放射過程におけるミクروسケールのプラズマ素過程を反映していると考えられており、フレア発生領域のプラズマ環境を理解するうえで強力なリモートセンシングのツールとなり得るものである。しかし、その放射過程に関しては未解明の問題が多く存在する。特にゼブラパターン（ZP）と呼ばれる微細構造については、数多くの放射モデルが提案されているが、結論は出ていない。このZPの放射過程を解明することが、本研究の目的である。今年度は、前年度に引き続きZPの発生条件に関するデータ解析とZPに見られる準周期的変動と太陽コロナ中の磁気流体波動の関係に関する解析を行った。

【研究結果】

(A) ZPの存否によるIV型バーストの出現特性の違い

ZPは全てのIV型バーストに出現するわけではなく、出現時間・周波数帯もさまざまである。このことはIV型バーストの出現のほかにZPの発生する条件があることを示唆している。前年度の研究では、ZPを伴うIV型バーストと伴わない現象の比較により、継続時間の長いフレアのピーク以降にZPの発生頻度が高くなっていることを明らかにした。今年度はさらに、ZPの縞の周波数間隔がどのような周波数変化を示すか、によって3種類に分類（Tan et al. 2014）し、それぞれの出現特性を統計的に調べた。しかし、各分類の出現特性に明確な違いは確認できなかった。この点に関しては、ZPの他のスペクトル特性（強度変化など）による分類が有効である可能性がある。

(B) ZPの準周期変動とコロナ中の磁気流体波動

近年、可視光や極紫外線波長における高分解撮像装置により、コロナ中で多様な磁気流体波動が観測されている。これらの波動はコロナ加熱やコロナプラズマ診断の観点から非常に重要視されている。電波波長帯では、準周期的な強度変動が磁気流体波動の兆候として知られている。本研究では、ZPの縞構造に見られる準周期的変動に関するデータ解析を行い、それが短周期の伝搬性磁気流体波動により生じていることを初めて明らかにした。この結果は、コロナ中の磁気流体波動研究に対する高分解電波スペクトル観測の有効性を示したものであり、今後、同様の観測によりコロナにおける短周期磁気流体波動の理解がさらに進むことが期待される。

【まとめ】

本研究では、ZPの放射過程を解明することを目的として、多波長観測データを用いた総合的なデータ解析を行った。上記の結果 (A, B) から、ZPが放射されているコロナ領域における背景プラズマの状況や、ZPと磁気流体波動との関係が明らかになった。また、ZPの発生機構に関しては、ZPの多様なスペクトル、偏波特性から複数の異なる発生機構により生じたZPが混在している可能性が考えられる。あるZPがどの機構により生じたものであるかを特定するためには、高空間分解能を持つ電波干渉計と高時間・周波数分解能の電波分光計との同時観測が必要である。

【成果発表】

(論文発表)

1. K. Kaneda, H. Misawa, K. Iwai, S. Masuda, F. Tsuchiya, Y. Katoh, and T. Obara, Detection of Propagating Fast Sausage Waves through Detailed Analysis of a Zebra-pattern Fine Structure in a Solar Radio Burst, *The Astrophysical Journal Letters*, 855, L29, 2018, doi: 10.3847/2041-8213/aab2a5
2. 金田和鷹、Study of Zebra Patterns in Solar Radio Bursts and Physical Processes in the Corona、博士論文、2017年

(学会発表)

3. 金田和鷹、三澤浩昭、岩井一正、増田智、土屋史紀、小原隆博、加藤雄人、太陽電波ゼブラパターンにおける縞構造の時間変動、JpGU-AGU Joint Meeting 2017、千葉、2017年5月24日
4. K. Kaneda, H. Misawa, K. Iwai, S. Masuda, F. Tsuchiya, T. Obara and Y. Katoh, Temporal Variation of Zebra Stripes in Type IV Solar Radio Bursts, AOGS 14th Annual Meeting, Singapore, 2017 August 8
5. 金田和鷹、三澤浩昭、岩井一正、増田智、土屋史紀、小原隆博、加藤雄人、太陽電波ゼブラパターンの準周期変動、日本天文学会2017年秋季年会、北海道、2017年9月11日
6. 金田和鷹、三澤浩昭、岩井一正、増田智、土屋史紀、加藤雄人、小原隆博、伝搬性ファストソーセージモード波動により変調された太陽電波ゼブラパターンの観測、第142回SGEPSS総会・講演会、京都、2017年10月16日
7. K. Kaneda, H. Misawa, K. Iwai, S. Masuda, F. Tsuchiya, Y. Katoh, and T. Obara, Detection of Propagating Fast Sausage Waves through a Detailed Analysis of a Zebra Pattern Fine Structure in a Solar Radio Burst, 2017 AGU Fall Meeting, New Orleans, 2017 December 13
8. 金田和鷹、太陽電波バースト中のゼブラパターンおよび太陽コロナにおける物理過程の研究、太陽研連シンポジウム「太陽研究の将来展望」、京都、2018年2月21日

不連続構造のブラソフシミュレーション
Vlasov simulation of discontinuous structures

辻根 成、富山大学大学院・理工学教育部・博士課程1年
佐藤 雅弘、富山大学大学院・理工学研究部・教授

【研究体制】

春木 孝之（富山大学大学院・理工学研究部・講師）
成行 泰裕（富山大学・人間発達科学部・准教授）
梅田 隆行（所内担当教員）

【研究目的】 プラズマ中の不連続構造である接触不連続は、不連続面を挟んだ領域 1 と 2 で磁場の変化とプラズマ流がなく、圧力が一様な密度の境界層である。しかし、その安定した存在については未だ議論されている。これまで、MHD 方程式から導かれる Rankine-Hugoniot 条件を用いて、Hybrid 法 (Wu *et al.* GRL, 1994) や Particle-In-Cell (PIC) 法 (Lapenta and Blackbill GRL, 1996) による数値シミュレーションが行われてきた。また、Tsai *et al.* は電子とイオンの 2 流体運動方程式から圧力の条件 $(p_{i1} - p_{i2})(p_{e1} - p_{e2}) < 0$ 、そして静電ポテンシャルを考慮した位相空間の構造より温度の条件 $(T_{i1} - T_{i2})(T_{e1} - T_{e2}) < 0$ を導き、Vlasov シミュレーションを用いて、電子ヒートフラックスがなくなるため接触不連続は安定であると結論付けた (Tsai *et al.* JGR, 2009)。その後、接触不連続の存在が観測データによって示唆され、その高数密度領域における電子とイオンの温度比は Tsai *et al.* が用いた初期条件よりも十分に小さいことが分かった (Hsieh *et al.* GRL, 2014)。

本研究の目的は、運動論的プラズマにおける接触不連続面の安定性を調べることである。今回は、観測データを基本モデルとして領域 1 と 2 の電子温度比を様々に変化させて 1 次元静電 Vlasov シミュレーションを行い、Tsai *et al.* が提案する条件が温度比の変化に依存するかどうかについて確認する。

【研究方法】 接触不連続における Tsai *et al.* の提案条件を検証するため、1D-1V Vlasov シミュレーションを行った。計算スキームは4次精度の保存型無振動スキーム (Umeda *et al.* CPC, 2012) である。システムサイズは空間 8000 メッシュ、速度空間 400 メッシュである。接触不連続のシア層、特にイオン密度の崩れ方に着目する。

表 1 に初期条件を示す。一番右の列の Tsai's は、Tsai *et al.* の提案条件を満足しているかどうかを表す。Run0 は観測データをベースにした初期値である。比較のため、電場の効果を計算しないフリーストリーミングのシミュレーションも行った。

表 1. シミュレーションの初期条件

	T_{e1}/T_{i1}	T_{e2}/T_{i2}	T_{e1}/T_{e2}	Tsai's
Run1	0.05	0.3	0.3	○
Run2	0.16	0.3	0.8	○
Run0	0.2	0.3	0.98	○
Run3	0.25	0.3	1.2	×
Run4	0.15	0.3	1.5	×
Run5	0.16	0.3	1.6	×
Run6	0.40	0.3	1.7	×
Run7	0.59	0.3	2.2	×
Run8	0.9	0.3	2.7	○

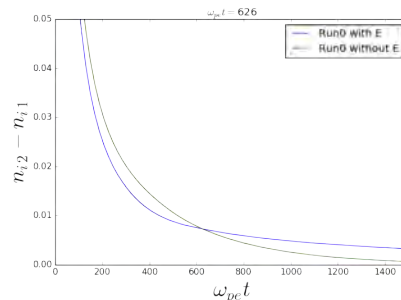


図 1. イオンの数密度の傾きの時間変化

【研究結果と考察】 図 1 は、Run0 の場合の境界層におけるイオン数密度の傾き（青線：電場あり，緑線：電場なし）の時間変化を示している。いずれも時間が経過すると、不連続面が滑らかになっている。時間 $\omega_{pe}t = 626$ 前までは、電場ありの方が不連続面は滑らかであるが、それ以降は電場なしの方が傾きの滑らかである（この時間を t_1 とする）。この傾向は全ての Run において確認することができた。

表 2. 時間 t_1 と t_2 における遷移層の長さ

	L_1/λ_D	L_2/λ_D	L_2/L_1	T_{e1}/T_{e2}
Run1	42	205	5	0.3
Run2	45	207	5	0.8
Run0	46	205	4	0.98
Run3	49	204	4	1.2
Run4	53	203	4	1.5
Run5	55	207	4	1.6
Run6	57	212	4	1.7
Run7	70	280	4	2.2
Run8	97	532	5	2.7

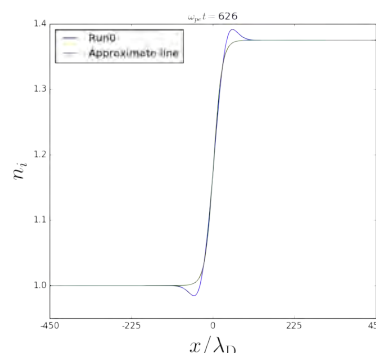


図 2. イオン数密度および $\tanh(x)$ による近似した線

次に、その t_1 から十分経過した時間を t_2 (t_1 の 5 倍) とする。それぞれの時刻で不連続面は $\tanh(x)$ で近似できるとして、遷移層の長さを見積もった。表 2 に、それぞれの遷移層の長さ L_1 および L_2 をまとめた。全ての Run において遷移層は時間とともに広がっている。つまり、初期条件が Tsai *et al.* の提案条件を満たしていたとしても、接触不連続の構造は安定ではないことが分かった。図 2 は Run0 の場合の t_1 におけるイオン数密度および $\tanh(x)$ による近似曲線をプロットしている。遷移層では両者はおおむね一致している。

数値シミュレーションによる接触不連続の構造は安定ではないことが分かったので、Tsai *et al.* の圧力および温度の条件を改めて確認した。第一に、圧力の条件は静電ポテンシャルの空間変化を考慮した 2 流体運動方程式からは導出できないが、Rankine-Hugoniot 条件から求まることが分かった。つまり、圧力の条件は MHD 方程式から導かれる。第二に、2 流体運動方程式と断熱変化の式から温度の条件が求まり、電子またはイオンの比熱比に依存することが分かった。つまり、温度の条件は比熱比に依存するが 2 流体方程式から導かれる。第三に、静電ポテンシャルの変化があったとしても、温度は変化しないことを確認した。そもそも、準中性を仮定すれば、Tsai *et al.* が示す静電ポテンシャルを記述できない。よって、温度ではなく数密度に着目する必要があることがわかった。

これらの成果をまとめ論文を執筆中である。この成果の一部は、研究成果[1,3]で発表した。また、保存型無振動スキーム中のパラメータの最適化についても発表を行った[2]

【研究成果】

- [1] 辻根成, 春木孝之, 成行泰裕, 梅田隆行, 接触不連続のVlasov シミュレーション, プラズマ科学のフロンティア2017研究会, 土岐, 2017年 8月 (ポスター)
- [2] N. Tsujine, T. Haruki, M. Sato, Y. Nariyuki and T. Umeda, Parameter tuning of a 5th order Conservative and Non-oscillatory Scheme for Vlasov simulations, 地球電磁気・地球惑星圏学会 第142回総会及び講演会 (2017年 秋学会), 宇治, 2017年 10月 (ポスター)
- [3] N. Tsujine, T. Haruki, M. Sato, Y. Nariyuki and T. Umeda, Temperature dependence of contact discontinuities in Vlasov simulations, Joint meeting of 26th International Toki Conference and 11th Asia Plasma & Fusion Association Conference, Toki, December 2017 (ポスター)

リモートセンシングによる黒潮および黒潮内側域における植物現存量の時空間変動解析

Analysis of the spatio-temporal variation of phytoplankton in the Kuroshio and Kuroshio inside regions by remote sensing techniques

中川美和、愛媛大学・理工学研究科先端科学特別コース・博士後期課程 3 年
郭新宇、愛媛大学・沿岸環境科学研究センター・教授

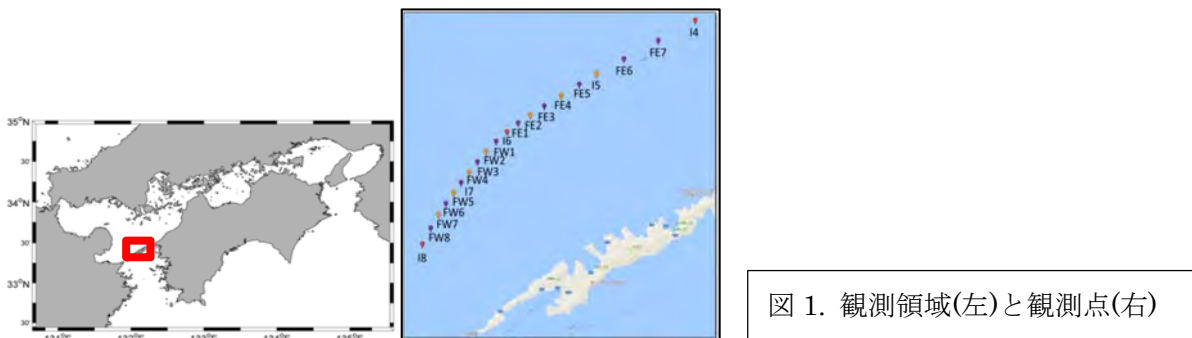
研究目的

申請者は昨年度、黒潮および黒潮内側域の影響を強く受ける西部瀬戸内海全域において、海表面の高解像度 Chl.a 濃度の時空間分布を観測し、衛星による Chl.a 濃度が季節ごとに推定精度が変動するかについて調べた。その結果、春季では比較的海表面濁度の海域において過大評価の傾向、夏季においては、強い潮汐による活発な鉛直混合層の発達している海域において過小評価であることが明らかとなった。しかし、この比較では衛星観測が海表面の Chl.a 濃度のみを捉えているという前提で行ったものであり、それ以深の Chl.a 濃度との比較は行っていなかった。そこで本研究では、先行研究のような海表面の高解像度観測に加え、鉛直断面観測も実施し、衛星がどの水深までの Chl.a 濃度を捉えているのかを調べることを目的とした。

研究方法

<研究船による高解像度観測の実施>

本研究では、愛媛大学沿岸環境科学研究センター所有の研究船「いさな」(巡航速度約 21kt)を用いて、伊予灘における約 30km のラインにおいて初夏の弱成層期(5/29-6/13、8 回)と盛夏の強成層期(7/24-8/03、7 回)の期間に 2 日間隔で現場観測を実施した(図 1)。



1. 表層海水の連続測定：航走中、水深 1m から連続的に汲み上げられる表層海水をクロロフィル濁度計・水温塩分計を設置した遮光コンテナに掛け流し、それぞれの項目を連続的に測定した。この連続測定に用いる各機器は、水平解像度が約 600m(20 ノット航走時)になるように設定した。
2. 鉛直断面観測：観測ラインにおいて 0.9~1.4km 間隔の測点(I4-I8)で RINKO-Profiler、硝酸塩センサーを用いて Chl.a 濃度、水温・塩分、硝酸塩濃度を測定した。

<衛星 Chl.a 濃度の精度評価>

本研究では、現場観測より得られた Chl.a 濃度データを用いて、弱成層期と強成層期の海色衛星センサー MODIS(JAXA)と弱成層期の静止衛星 GOCI(中田聡史氏(神戸大学)より提供)の Chl.a 濃度との推定精度評価を行った。

研究結果・考察

<表層観測による実測値と各衛星による観測値の比較>

まず、MODIS と現場実測値を比較すると、弱い成層期では衛星観測が過大評価の傾向を示した。それに対して強い成層期では衛星観測が過小評価であった。観測日ごとに RMSE を算出すると、特に強い成層期の観測衛星の誤差は大きく、RMSE の最大値は 0.59mg/m³ であった。

また、GOCI と現場実測値を比較すると、観測日ごとの RMSE については MODIS の結果と大きな違いはなかった。しかし、MODIS に比べて現場実測値から大きく外れた値は見られなかった。

<各衛星による観測値と現場観測による Chl.a の鉛直断面と鉛直平均濃度>

5 月 29 日の現場 Chl.a 濃度の鉛直断面では、伊予灘の東側(I4)の 17m 付近で SCM(垂表層クロロフィル極大)が見られた。一方、西側(SA)では鉛直混合が発達しており、Chl.a 濃度は鉛直一様であった(図 2 上段)。また、この日の衛星観測値と現場実測値から算出した鉛直平均 Chl.a 濃度を比較すると、MODIS と GOCI の両方で海面から 15m 付近の平均 Chl.a 濃度を捉えていた(図 2 中段および下段)。特に GOCI の方が現場 Chl.a 濃度の東西勾配を捉えていた(図 2 中段右)。

一方、6 月 3 日の SCM は伊予灘のフロント付近の 20-30m で見られた(図 3 上段)。また、南部(I8)では 15m 付近で Chl.a 濃度が高くなっていた。この日の衛星観測値と現場実測値から算出した鉛直平均 Chl.a 濃度を比較すると、MODIS は東西にほぼ一様で現場観測から得られた東西勾配やフロントを捉えていなかった(図 3 中段左)。それに対して、GOCI は東西勾配は捉えていたが SCM は捉えられていなかった。(図 3 中段右)

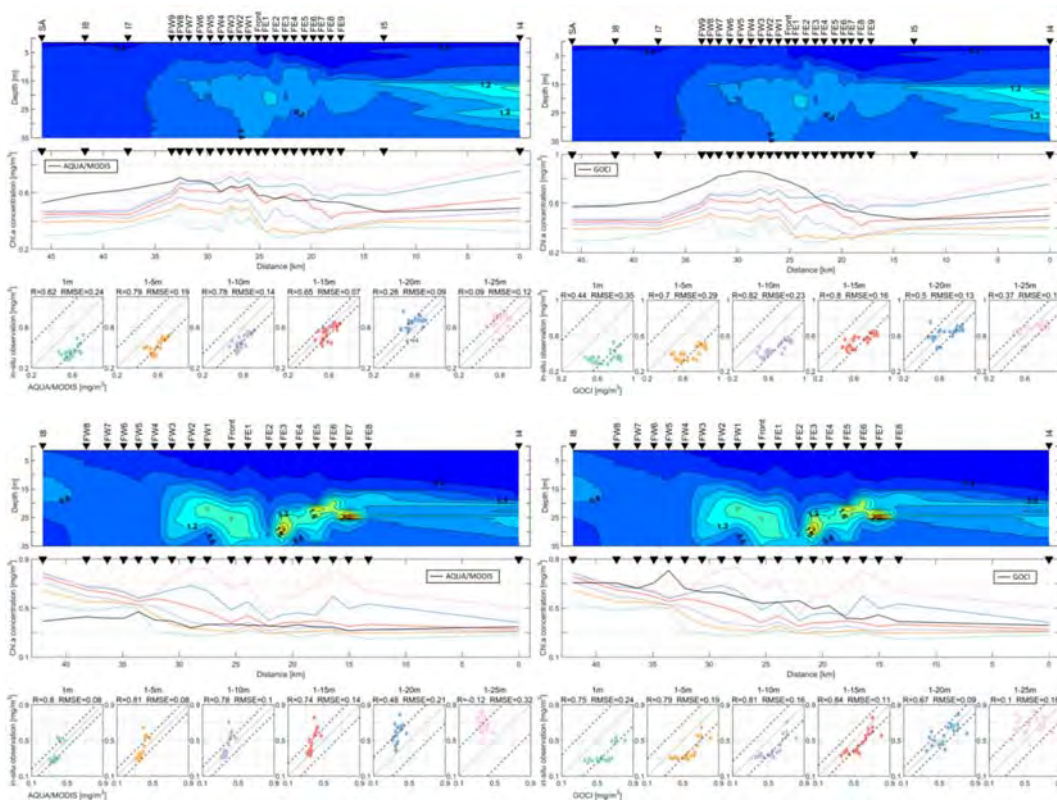


図 2. 2017 年 5 月 29 日における現場観測による Chl.a の鉛直断面図(上段)と積算水深別鉛直平均濃度(中段)、および MODIS(左)と GOCI(右)による観測値と積算水深別鉛直平均濃度との散布図(下段)

図 3. 2017 年 6 月 3 日における現場観測による Chl.a の鉛直断面図(上段)と積算水深別鉛直平均濃度(中段)、および MODIS(左)と GOCI(右)による観測値と積算水深別鉛直平均濃度との散布図(下段)

まとめ

本研究では、いくつかの水深層に分けて鉛直平均 Chl.a 濃度を算出し、その値と衛星 Chl.a 濃度との比較を行った。その結果、衛星観測では、海面から SCM の直上までの鉛直平均濃度を捉えていることが明らかとなった。