

6. まとめ

6.1 磁気リコネクションはどこまで解明できたか

第2章から第5章まで、各分野における磁気リコネクション研究の現状を見てきたが、分野によってプラズマパラメータも計測手段も大きく異なっていることに気づかれたことと思う。各々で話題とするテーマは同じでも、解析手法が異なっているのはこのためである。まず、Table 1に対象としているプラズマのパラメータを太陽、地球磁気圏、実験室について比較してみよう。Table 1はあくまでスケールの違いを認識するためのもので厳密を期したものではない。ケースにより各々かなり広いパラメータ範囲を有することにご注意いただきたい。これによれば、磁場強度では、地球磁気圏 10 nT から実験室の 0.1 T まで大きく異なっており、時間スケールに至っては実験室のミリ秒以下から太陽の数時間までざっと 10^8 のスケールの違いがあることがわかる。ケースによっては10桁以上のパラメータ範囲をカバーしつつ、磁気リコネクションという一つの物理を追求していることは大きな特徴である。

では、これだけパラメータの離れた対象を比較する意味はどこにあるのだろうか？ 例えば、電流シート幅を見ていただきたい。実は実験室も地球磁気圏もシート幅

がほぼイオンラーモア半径、イオンスキン長付近になっていることに気づくはずである。これだけプラズマパラメータが異なっても、電流シート幅を決める物理機構は同一である可能性が高いのである。また、密度が低ければ磁場も低く、結果としてリコネクションのアウトフロー速度を決めるアルヴェン速度もお互いにかなり近い値となっている。また、太陽プラズマと実験室プラズマは、密度、温度、磁場等が意外と近く共通点も大きい。実験室も太陽も比較的近い大きさのイオンラーモア半径を有するので、ことによると電流シートのスケールは似通っているかもしれないのである。まだ議論はあるものの、磁場、密度の違いを越えて、フレアとサブストームのリコネクションの類似性を指摘する先駆的研究も現れている (T. Terasawa *et al.*, *Adv. Space Res.* 26, 572 (2000) 等)。4分野にはそこかしこに、いわば共通の物理があり、太陽観測、地球磁気圏、室内実験に計算機解析を加えた4者が協力することにより、磁気リコネクションの物理が広いパラメータ領域にわたって解明される可能性が高いと我々は考えている。

事実、この10年で太陽と地球磁気圏に実験室を加えた新しい磁気リコネクションの検証のスタイルが発生し、

Table 1 Comparison of plasma parameters.

	Solar Flare		Magnetosphere		Laboratory	
	Sheet	Bulk/Lobe	Sheet	Bulk/Lobe	Sheet	Bulk/Lobe
Magnetic Filed [T]	—	$10^{-3} - 10^{-2}$	$< 10^{-9}$	$1 - 2 \times 10^{-8}$	< 0.5	0.01 - 0.5
Electron Density [m^{-3}]	—	$10^{14} - 10^{15}$	$10^4 - 5 \times 10^6$	$< 10^4$	$10^{19} - 10^{21}$	$10^{19} - 10^{20}$
Ion Temperature [K]	—	—	$10^7 - 10^8$	$10^5 - 10^6$	$10^5 - 10^7$	$10^5 - 10^7$
Electron Temperature [K]	$10^7 - 10^8 ?$	10^6	$(0.2 - 2) \times 10^7$	$10^5 - 10^6$	$10^5 - 10^6$	$10^5 - 10^6$
Alfven Speed [m/sec]	$10^6 - 10^7$		2×10^6		$10^4 - 10^6$	
Plasma Beta	—	$10^{-3} - 10^{-2}$	> 10	$< 10^{-2}$	0.1 - 1	0.05 - 1
Magnetic Reynolds Number	—	$10^{12} - 10^{14}$	$10^2 - 10^4$	—	$1 - 10^2$	$10 - 10^4$
Ion Lamor Radius [m]	—	0.1 - 1	$> 7 \times 10^6$	2×10^4	0.01 - 0.1	0.003 - 0.2
Ion Skin Length [m]	—	1 - 10	2×10^5	2×10^6	0.01 - 0.1	0.01 - 0.03
Current Sheet Thickness [m]	$< 10^6$	—	$< 10^6 - 10^7$	—	0.01 - 0.1	—
Time Scale [sec]	$10^2 - 10^4$		$60 - 10^3$		$10^{-5} - 10^{-3}$	

リコネクションの解明のテンポが飛躍的に高まったことは確かである。例えば、磁気リコネクション機構として、シート幅のスケール、プラズモイドの発生や異常抵抗、縦磁場の効果やイオン異常加熱の物理が、太陽、磁気圏、実験、計算の多くで一致することが認識されつつあり、近年の大きな成果といえよう。具体的な進歩としてあげられる主要なもの、以下のとおりである。

1) リコネクション速度を決定する電流シート幅がほぼイオンラーモア半径、あるいはイオンスキニング長程度（これらの長さは電流シートの β (=シート内熱圧力/シート外磁気圧) が ≈ 1 であるとほぼ等しい) であるとのコンセンサスが得られたことは大きな進歩である。磁気圏衛星観測でも室内実験でも電流シート幅の計測結果はイオンラーモア半径程度であり、近年の粒子シミュレーションでも電流シート幅がイオンラーモア半径以下に圧縮されたときに拡散が増えて最終的にこの付近が安定なシート幅になるとの解析結果が得られている。これは第1章3節で基本問題に位置づけたシート幅を決めることになり、物理的にはマクロなリコネクションスケールとラーモア運動というミクロな物理が密接に関連していることを意味する。マクロ・ミクロの物理の関連は磁気圏観測で高時間分解の速度分布関数の直接観測をはじめとして、急速に理解が進んでいる。

2) MHD 理論モデルについては、「抵抗が一様ならば、Sweet-Parker model にしかならない」、「Petschek model に転移するのは異常抵抗が必要」とのコンセンサスが生まれたことも進展の一つである。これは Biskamp の指摘にはじまり、各種計算機シミュレーションの結果も一致し、MR2000 会議でも Kulsrud らの理論解析を通じてほぼ参加者すべての一致した見解が得られたといえよう。実験室でも電流シートの抵抗が一様に古典抵抗付近である時は、Sweet-Parker 的なシートが形成される傾向があり、モデルとの比較も行われている。1.3の問題1に対する現在までの解答である。

3) 太陽観測では、リコネクションの観測的証拠（カサブ、ループトップ硬 X 線源、プラズモイドやジェット噴出など）が続々と見つかり、あわせて計算機シミュレーションとの連携により、フレアのリコネクション説が確立したことも大切である。太陽大気のいたるところでリコネクションが発生していること、すなわち、太陽大気の静かな領域（活動領域の外）でさえも、マイクロフレア、ナノフレア、ジェット（すべてリコネクションが原因と推測される）が頻繁に発生していることがわかってきた。

4) プラズモイドの発生は、太陽、地球磁気圏、実験室、計算機解析のすべての分野で観測や解析が進んでいる課題である。プラズモイド放出が電流シートからの粒子排出を促進し、磁気リコネクションの高速化につながるものが太陽、実験室で認識されつつある。フレアにともなってプラズモイド（3次元的には helical flux rope）放出は普遍的に発生し、フレア開始前から噴出が始まっていることが明らかになり、リコネクションの単なる副産物でないことが明らかになった。実験室でも強いインフローが電流シートの間欠的放出を招き、放出時にリコネクション速度が急上昇する現象が認められている。プラズモイド放出が1.3の問題5の非定常リコネクションの一つの形態である可能性がある。

5) 1) にも関連する異常抵抗の原因解明についても磁気圏、実験、粒子シミュレーションの3者による解明が進んでいる。異常電気抵抗が Lower Hybrid Drift Instability (LHDI) 等のプラズマ不安定によって励起されたプラズマ波動と粒子の散乱過程に起因するか否かが粒子シミュレーションにより確認されつつあり、実験室や磁気圏衛星観測でも磁場、電場の揺動計測から LHDI 等が確認されつつある。異常抵抗の本質はまだ解明されていないが、1.3問題3へのアプローチは3分野を巻き込んだ新段階に入りつつある。

6) 1.3問題7のリコネクションのプラズマ加熱についても太陽、磁気圏、実験、計算のすべての分野で理解が進んでいる。わかってきたことは、電流シート内部の加熱エネルギーに比べて、アウトフローのエネルギーが極めて大きいことである。これは実験室や磁気圏で見られるイオン異常加熱現象 ($T_i > T_e$) をよく説明する。太陽は、電子温度の計測に限られるが、高速のアウトフロージェットがファーストショックを形成してプラズマを加熱していると推論される様子がとらえられており、実験室プラズマに良く一致する。ひょっとしたらコロナ加熱もリコネクション加熱かもしれないというアイデアが真剣に議論されるまでに状況は変化している。

7) 磁気圏、実験、計算を中心に電流シートに平行な縦磁場がリコネクションに及ぼす効果についても解明が進んでいる。一般に縦磁場はリコネクション速度を遅らせ、プラズマ加熱を抑制することが、粒子シミュレーションや実験室プラズマで報告されている。地球磁気圏の昼側のリコネクションと比較的良く一致し、再結合する磁力線同士との角度が大きい（縦磁場が小さい）ほど、リコネクション速度が大きくなる結果が得られている。

Table 2 Comparison of plasma diagnostics.

	Solar Flare	Magnetosphere	Laboratory
Magnetic Filed	Magnetograph (Photosphere surface, L, 2D)	Fluxgate Magnetometer (L,S) Search Coil Magnetometer (L,S)	Magnetic Probe (L,2D) (L, 3D) Motional Stark Effect (L,1D F)
Electron Density	X-ray Camera (I, 2D) (T, 2D, F)	3-D Distribution function measurement by Electrostatic Analyzer (L, S) (L, 3D, F)	Laser Interferometer (I, 1D) Electrostatic Probe (L, 1D) Thomson Scattering (L, 1D, F) Laser Induced Fluorescence (L, 2D)
Ion Temperature		3-D Distribution function measurement by Electrostatic Analyzer (L, S) (L, 3D, F)	Doppler Width (T, 2D) Ion Energy Analyzer (L, S)
Electron Temperature	X-ray Camera (I, 2D) (T, 2D, F)	3-D Distribution function measurement by Electrostatic Analyzer (L, S) (L, 3D, F)	Electrostatic Probe (L, 1D) Thomson Scattering (L, 1D, F) Soft-X Ray (T, 2D, F) Line-Pair Ratio (I, 1D)
Flow Velocity	Doppler Shift (I, 2D) (T, 2D, F)	Electrostatic Analyzer (L, S) (L, 3D, F)	Doppler Shift (I, 2D) Mach Probe (L, 1D)
Electric Field		Electrostatic Probe (L, 1D) Electron Beam of ExB (L, S)	Electrostatic Probe (L, 1D)

6.2 太陽・地球磁気圏・実験室・計算機解析の現状と課題

次に成果の背景にある4つの分野の現状と課題について見てみよう。太陽、磁気圏、実験室については、Table 2の計測手段とともにTable 3の観測される物理現象の一覧を見ていただくとその特徴を理解していただくとと思う。

まず、太陽衛星観測は、ほとんどすべての計測で、きれいな2次元の画像データが得られることが大きな特徴である (Fig. 1 参照)。また、太陽観測衛星「ようこう」をはじめとして空間・時間分解能の向上の充実がはかられたことは、各波長の電磁波によって観測された構造変化を映画として確認する新しい計測手段を提供することになった。太陽フレアの磁気リコネクション説が急速に普及し、ファーストショックなどプラズマ加熱の解明が進んだのは軟X線、硬X線画像の巨視的情報量の豊富さに起因する。しかし、反面、局所的な情報は極めて少ない。肝心の電流シート幅は小さすぎて見えず、対象とするコロナ等のスケールはXポイント領域に比べて極めて大きく、局所量の計測は不得手である。すべての計測が視線方向に積分されたデータで、局所量を考えるのは難しく、3次元構造を考えるには想像力を必要とする。磁場がコロナの足下の光球上でしかわからないことも肝心のX点付近の磁場データを欠くという大きな制約につながっている。したがって、Table 3で観測される現象は巨視的構造に関するものがほとんどで電流シートそのものについての情報はあまりないのが特徴である。今後の課

Table 3 Comparison of observed phenomena.

	Solar Flare	Magnetosphere	Laboratory
Topology Change	○	△	○
Current Sheet Thickness	×	○	○
Current Sheet Length	△	△	○
Inflow	△	○	○
Outflow Jet	△	○	○
Tearing Instability	×	○	○
Anomalous Resistivity (Micro Insta.)	×	○	○
Plasmoid	○	○	○
Non-Thermal Particle	○	○	○
Non-Steady Reconnection	○	○	○
Fast Shock	△	×	△
Slow Shock	△	○	×

題は1)複数衛星の運用によるトモグラフィ計測を多用した局所情報の計測と2)更なる分解能の向上によるX点構造の計測、3)不足するイオン温度・流速および磁場計測法の開発などである。現在、次期衛星プロジェクト：Solar B mission (2005年) および Stereo mission (2005年) がこうした課題を解決するものとして期待を集めている。前者では、リコネクションインフローやリコネクションジェット、プラズモイドのドップラー速度場測定が可能になるほか、X線・紫外線の計測やmagnetogram (ゼーマン効果を利用した磁場計測)の分解能も大幅に向上する。これによりスローショックやファーストショックの確かな同定も可能になるだろう。また、光球におけ

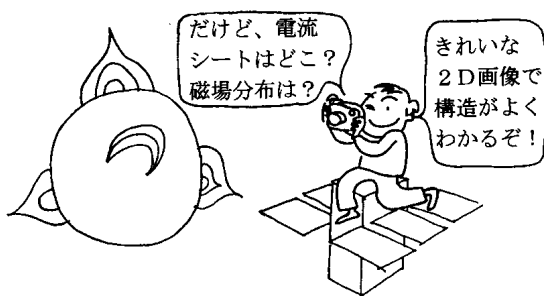


Fig. 1 Present status of solar satellite observations

る浮上磁場の速度場, 磁場測定からリコネクションの開始条件も判明すると期待される。後者では複数の衛星を用いたトモグラフィ計測を試み, フレア, コロナ質量放出 (CME) の3次元構造が解明し, 3次元リコネクションの観測データが飛躍的に増大することが期待される。

地球磁気圏衛星観測では, 太陽とは反対にすべてのプラズマパラメータが局所的に計測可能である (Fig. 2 参照)。しかも, イオン, 電子の速度分布関数が3次元で計測できることは極めて有用である。磁気圏のような無衝突プラズマ系では, 系の時間発展スケールに比べて熱化の時間スケールが遅い場合がしばしばあり, 観測される速度分布関数はマクスウェル分布からかなり外れている場合が多い。リコネクションはその例のひとつで, 非マクスウェル分布関数はそこに至るプラズマ輸送や加熱の「記憶」を留めており, 分布関数の複雑性を理解することでプラズマ輸送・加速加熱・混合の問題が大きく進展した。また, 電流シート内の不安定の各種計測ができることも電流シートの異常抵抗をはじめとする物理の解明に貢献している。反面, 衛星のデータは空間1点に限られ, 巨視的な構造の計測は不得手である。電流シートの計測は, 太陽風乱流などにより衛星が電流シートに対して相対的に100 km/sec程度の速さでゆらゆら動く現象に頼っている。現在, 計測の時間分解能は10秒前後であるので, イオンラーモア半径1,000 km程度の計測は可能であるが, ラーモア半径が1/40以下の電子の情報はまだ不明である。Table 3でも, フローの計測や不安定の解明など電流シートそのものの情報は豊富であるが, 一点観測の情報と空間的な広がりに関するいわゆる境界条件に関する情報を結びつけるのは難しく, 同じような領域を観測したデータを蓄積して統計的解析に頼るしかない。したがって, 課題は1) 複数衛星の同時運用による3次元空間分布の計測, 2) 計測器の時間分解能の向上 (秒以下)による電子スケールの現象の解明, 3) 低エネルギー

粒子 (~数 eV) から高エネルギー粒子 (~MeV) までの速度分布関数測定等である。これに対して, 日米双方で複数衛星の同時運用が計画されており, 期待を集めている。具体的には, 1) 電子スケールが計測可能な高時間分解能を有する速度分布関数測定器を搭載した衛星4つを組み合わせる, あるいは2) 従来どおりの時間分解能ではあるが50~100個の衛星を組み合わせる計画が進められている。こうした試みを通じて地球磁気圏の巨視的な磁力線構造の把握が進み, 本来電流シートの電気抵抗を決めているはずの電子のミクロな現象とマクロなりコネクションの構造との関連が解き明かされることになる。

実験室プラズマ実験は, 人為的に制御可能な丁度良い大きさのプラズマを生成するので, 計測には大きな自由度がある。ほとんどすべての量が計測可能であることが特徴である (Fig. 3 参照)。巨視的構造の計測からミクロな電流シートの不安定の計測まで幅広い貢献を行ってきた。クローズ系の磁気リコネクション実験の登場により, 温度, 密度をある程度確保しつつ, 境界条件に問題の少ないリコネクションの検証ができるようになり, 数年の内に実験装置数が急増するに至っている。具体的には, 駆動型リコネクション, 電流シートの異常抵抗, 縦磁場の効果, イオン異常加熱, ファーストショック, Sweet-Parker モデル, プラズモイド, 間欠リコネクションといった項目について8個の装置が特徴ある貢献を行ってきた。これまで太陽や地球磁気圏で見られた物理が実験室でも検証されるようになったことは現象解明のための大きな進歩である。反面, 小規模の装置でしかも閉じ込め特性の良くない配位を利用する場合, 電子の損失チャンネルが大きい欠点がある。中性粒子や放射損失やプローブ挿入等の原因のために電子は常に低温状態におかれる傾向にあり, エネルギーフローを明らかにする



Fig. 2 Present status of magnetosphere satellite observations.

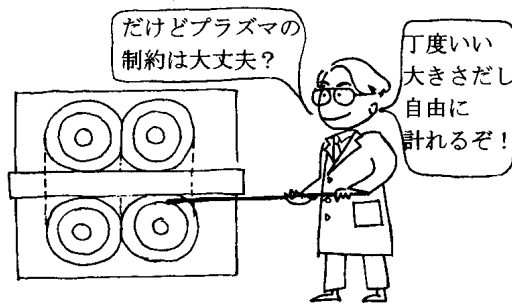


Fig. 3 Present status of laboratory reconnection experiments.

ことなしにプラズマ加熱を議論するのは危険である。また、磁場構造内部に中性粒子が存在する場合も多く、電子のエネルギー損失や、引いては低温のため異常抵抗の検証に影響する可能性がある。磁気レイノルズ数の上限も数千以下と他と比べて相当低い。これはバルクと電流シートのそれとの比較の問題でもあり、まだ重大視する向きは見られないが、将来は不明である。Table 3では測定自由度からほとんどの項目の検証がなされているが、上記の実験室プラズマの制約に配慮し、解釈に慎重さが求められる場合もある。今後の課題は、1) 電子損失チャンネルの低下による(本来の抵抗拡散を決める)電子のダイナミクスの解明、2) 中性粒子の除去、3) プラズマに影響を与えない多次元の微細磁場計測法の開発などである。

現在、VTFでは磁力線が導体をよこぎる境界条件を改め、低密度のプラズマを高周波加熱して高磁気レイノルズ数(低い電子損失)を達成する計画があり、TS-4ではトカマクの高い閉じ込めを利用した電子損失の小さな合体実験が進行中である。MRXでもレーザー蛍光誘起法を用いた非接触計測や超高精細な分解能プローブによる内部構造の精細計測が計画されている。

最後に計算機解析では、近年のメモリ容量の増加とCPUの高速化により、MHDシミュレーションに加え、粒子シミュレーションの進展が著しい(Fig. 4参照)。よりマクロな問題に粒子シミュレーションの適用が可能となり、従来の2次元のシミュレーションは3次元へと高まっている。近年の成果は多岐にわたっているが、例えば電流シート構造についてMHD、2流体、ハイブリッド、粒子シミュレーションの詳細な比較が行われるなど組織的な運用が図られていることは特筆できよう。イオン慣性項を考慮した計算では電流シート幅がイオンスキン長程度になるなど、イオンが磁化されるか否かが重要であることが明らかになったことは大きな成果であ

る。また従来は、リコネクションの発達と電気抵抗などの輸送係数をマイクロとマクロのスケールで分離できることを前提に、マイクロ理論から得られる輸送係数をマクロモデルに組み込んで研究が行われてきた。しかし、薄い電流シートでは、マイクロとマクロのスケール分離が困難であり、巨視的構造(MHD)とマイクロの非線形結合は本質的な問題となっている。また、中間周波数帯のLHD不安定に加えて、低周波領域のDrift Kink不安定などの電流シートの不安定と相互に影響し合っリコネクションが誘発されるモデルも提案されており、近い将来その本質が明らかになるものと思われる。長時間の巨視的構造変化がシミュレートできるようになり、リコネクションが休止期間と成長期を交互に繰り返す、非定常な間欠現象を引き起こすことが明らかになったことも大きな成果である。しかし大規模計算ができるようになったものの、いまだ計算機能力は限られている。3次元の粒子シミュレーションを用いた野心的研究も始まっているが、イオンと電子の質量比を大きくすると電子スキン長の物理まで正確に計算するのが困難になる。一方、MHD、2流体、ハイブリッドでは、磁場拡散を担う物理が自己無撞着に取り入れられない。ハリス平衡解のリコネクションの場合、どのミクロスケールまで組み込めばその本質が取り入れられるかについては、ホイッスラーダイナミクスを記述できるイオン慣性項まででよいという考えが出てきたものの、いまだ決着はついていない。また、計算機シミュレーションの境界条件の設定、MHDの場合は抵抗や粘性の仮定をはじめとする諸々の仮定で計算結果が異なってくることも留意するべきである。MHDではCPU時間の制約から計算可能な磁気レイノルズ数は、数千-数万程度にすぎない(実験室プラズマの磁気レイノルズ数と同程度なのはおもしろい)。今後は、プラズマ階層構造(デバイ長、電子スキン長、イオンスキン長、MHDスケール)と境界条件や空間2次元・3次



Fig. 4 Present status of numerical reconnection study.

元性の物理との関連を明確にすることが大切であると思われる。計算機能力としては、現在のスーパーコンピュータではまだ不十分であるが、計算機技術革新の進歩は著しく、近い将来リコネクションの物理が解き明かされるものと思われる。

6.3 おわりに

今回、MR2000 国際会議を記念して学会より特集をご依頼いただいたが、限られた時間の中で MR2000 幹事団が早急に取りまとめを行うこととなり、会議に貢献していただいた多くの方に執筆をお願いできなかったことを申し上げたい。ここに取り上げたりコネクション研究はまだそのエッセンスの一部であり、リコネクション研究自体はさらに多様な分野を展開しつつある。本小特集では述べることができなかったが、磁気リコネクションがキーとなって巨視的な磁場構造の再構成が行われたり、その過程での磁気ヘリシティをはじめとする多様な物理が幅広く議論されていることはご承知のとおりである。特に磁気リコネクション研究は、降着円盤の物理等、宇宙分野へも急速に広がっており、ただでさえ分野間でかけ離れたプラズマパラメータがさらに何桁も広がる状況にある。一方で、核融合プラズマをはじめとしてプラズ

マを加熱したり、電流駆動を行う試み、すなわち磁気リコネクションの応用が行われていることも述べる必要がある。

多くの分野間でプラズマパラメータが大きく異なっても、そこには共通の物理が確かに存在するようである。また、その物理がプラズマパラメータとともにどのように変化していくものを解き明かすことが磁気リコネクション物理の全体像を解き明かす上で極めて重要である。今後、予定されている太陽・磁気圏観測衛星の活躍も期待され、数を増してきた室内実験と粒子シミュレーション等で進展が著しい計算機解析など多様な分野間の関係により、磁気リコネクション研究はさらに加速されるものと考えられる。これまで30年以上の歴史を持つ磁気リコネクション研究であるが、今後10年でその主要な物理はほぼ解明されると期待している。

小野靖 (東京大学・高温プラズマ研究センター)

星野真弘 (東京大学・大学院理学系研究科)

柴田一成 (京都大学・花山天文台)

藤本正樹 (東京工業大学・大学院理工学系研究科)

寺沢敏夫 (東京大学・大学院理学系研究科)