

天体活動現象の仮想空間実験

Virtual Space Experiments of Astrophysical Active Phenomena

内田 豊*、廣瀬 重信*

*東京理科大学 理学部 物理学科

Yutaka Uchida, Shigenobu Hirose

*Department of Physics, Tokyo University of Science

E-mail: shirose@rs.kagu.tus.ac.jp

内田豊先生を偲んで

去る 8 月 17 日、東京理科大学理学部教授内田豊先生が急逝されました。享年 68 歳でした。電磁流体力学を用いて太陽表面での爆発現象から天体ジェット現象に至るまでの幅広い天体活動現象の機構解明に活躍し、一方でそのお人柄と強いリーダーシップで国内外の研究者から厚い人望を集めていた内田先生の突然の死は、天文学界における大きな損失であり、まことに痛惜の念に耐えません。

内田先生は、天体活動現象が強い非線形電磁流体现象であること、そしてそれらに対する数値シミュレーションの有効性にいち早く気づき、1980 年代はじめから柴田一成現京都大学教授らとともに電磁流体シミュレーションによる新しい天体物理の解明に取り組んでこられました。その中でも、天体ジェット現象を降着円盤とそれを貫く磁場の非線形相互作用として説明する「内田・柴田モデル」はあまりにも有名です。また、理論家である一方、常に新しい観測に興味を持たれて、自ら電波望遠鏡での観測や観測衛星のデータ解析に携わり（太陽 X 線観測衛星「ようこう」ではサイエンスプロジェクトリーダーを務められました）、理論モデルの観測による検証を重視されてきました。

東京大学を定年退官した後に移られた東京理科大学では、工学部教授（当時）の川井忠彦先生らとともに計算科学フロンティア研究センターの設立に力を尽くされ、そこでは天体電磁流体シミュレーションとヴァーチャルリアリティを融合させた「仮想空間天体物理実験室」を提唱されました。

本稿は、もともと内田先生が依頼を受けた天体電磁流体シミュレーションの解説原稿でした。内田先生が亡くなられたことで、私が「内田先生を偲んで」というタイトルで原稿依頼を受けたのですが、先日、内田先生が「天体活動現象の仮想空間実験」というタイトルでまとめていた未発表原稿が見つかりました。こちらの会誌からの依頼を受けていたものに相応しい内容でしたので、私が加筆（一部修正）して完成させたものを発表させて頂くことにしました。

ここに、内田先生のご功績とご人徳と偲び、謹んでご冥福をお祈り致します。

（廣瀬）

1 序

人類の「宇宙を見る眼」が電波、X線等の広い電磁波帯に開け始めた 1960 年代以降、人類が有史以来初めて見たものは、それまで見えていた星々とその集団、銀河、が静かに光っていた宇宙像からは想像もつかない、激しい、超高温、高エネルギー現象が起こっている宇宙であった。それまで人類の眼からこれらを隠して来たものは「暗黒のベール」、地球大気、であり、人類はこの「暗黒のベール」に開いた狭い「光の窓」(振動数でいって $10^{14.5} \sim 10^{15}$ Hz の帯域。これは太陽からの放射強度最大の「光」の領域で、この「光」が暗黒のベールを透過して地上に達しており、その中で進化した人類の目やその拡大形である望遠鏡にはこのあたりの放射のみが見えていた) だけを通して宇宙を覗いていたので、宇宙の全貌は見えていなかったのである。より広い「電波の窓」($10^5 \sim 10^{11}$ Hz) の発見、そして電波技術の発展により 1960 年代から急速に発展した電波天文学、更に、人工衛星打ち上げ技術の発展の上に 1970 年代には「暗黒のベール」の外に観測器を飛ばせて、宇宙で起こっている事を X 線などで探るスペース天文学が大発展を遂げるが、これに伴って人類は宇宙で起こっている事の全貌をようやく目にする事が出来るようになったのである。

それ以前から見えていた星は「自己重力の穴に落ち込んで溜まっているガス塊」であり、自重で押し潰された中心の温度密度が高く熱核融合反応が起こってエネルギーを出して光っているとは言え、基本的に静的なものである。ところが、これまで全く見えていなかったこれらの星の周辺や、星の大集団「銀河」の周辺の空間は、電磁力学的プロセスが介在して、エネルギー溜め込みと急激な解放のために発生する、極めて激しい超高温、高エネルギー現象の舞台となっている事が分かって来たのである。

2 天体電磁プラズマ動力学と「計算機仮想空間実験」

このような激しい現象が見えて来ると、当然、これらがどのようにして起こっているのが問題となる。これらの高エネルギー、超高温現象を理論的に調べる手段が電磁流体プラズマ物理であるが、これは典型的な非線形物理であり、特殊な仮定を置いたケース以外は一般的には解を得る事は難しかった。これが特殊な仮定を置かない現実的な場合について扱う事が出来るようになったのは、1980 年代になって計算機の著しい発達によって微分方程式系を差分方程式化して数値的に解く「数値シミュレーション」という手段が開けて来た事によって。数値シミュレーションなら非線形方程式系でも取り扱う事が出来る。我々のグループもこの領域では世界でも先発組で 1982 年頃から天体ジェットの問題をこの方法で扱い始め、1990 年後半頃からは更に高性能化した電子計算機で、それまでは取り扱いが難しかったフル 3 次元の問題も扱えるようになって来た。

このように 3 次元電磁流体プラズマ力学過程が扱えるようになると、これをもう一歩進めれば、3 次元可視化を用いて計算機内にシミュレーションの結果を表示しながら、あたかも通常の実験室実験において対象を見ながら実験を進めるように、「マジックハンド」で対象を扱う「計算機仮想空間内実験」が可能となる。我々は 1995 年にこれに着目して「仮想空間天体物理実験室」として提唱した。従来、一般に自然科学の研究は「理論」と「実験」の二本柱で進んで来たが、天体宇宙では対象が実験室には収まらず、しかも極限状況であって再現

実験など不可能であるため、進化の異なったフェーズにあると思われる同種天体を比較観測する事によって時間発展を把握する「観測」研究が「実験」に代わって行われて来た。従って天体宇宙関係では、このような実験的アプローチは、極めて有効な新しい手段を提供するものであった。

この「実験室」の中には天体宇宙の巨大なスケールでも、極限的物理状況でも持ち込める。また、全く任意の投影角度で見えている 3 次元的宇宙現象と比較して理論モデルの正しさを検討するために理論モデルを様々な角度から比較する事が必要となるが、このような事にも適している。さらに、そのようにして観測との比較検証を経て選ばれたモデルを用いてその現象の時間発展の全貌を再現して把握するなどの事もこれにより初めて可能となって来るだろう。これは殊に磁場や速度場のようなベクトル量の分布などについてのモデルからの予言と観測を比較する事が必要（或いは有効）な場合に威力を発揮する。我々が 1995 年頃から（少なくとも我々の分野では世界に先駆けて）これを提唱したのは、我々の研究対象である天体における電磁プラズマ現象にこれが極めて有効であったためである。

数値シミュレーションはいろいろな分野で様々なものがあるが、我々の扱う電磁プラズマ力学シミュレーションは、時間空間依存の電磁プラズマ力学の 8 本の基本偏微分方程式系を差分方程式化して、それをスーパーコンピュータで数値的に解く。この数値解の手法については数多くのものがあるが、我々は Lax-Wendroff 法から始めて TVD scheme、その他様々な手法によって解を求めている。この場合、解は、従属変数の数に、空間を細かいメッシュに分けた総数を掛け、更に時間発展のために取るタイムステップ（これは空間メッシュ数に応じて細かくとらなければならない）の数を掛けた膨大なものになるが、計算機の急速な発展に伴って上がった速度とメモリー量によりこれらの扱いが可能となって来た。

この解について、時間発展する物理量分布の場を 3 次元等値面の変化、磁場や速度場の場合は変化する力線（磁力線）や準ラグランジュ粒子の運動など用いて 3 次元的に表す。我々は、やはり発展の著しい「仮想現実技術」を採用して virtual reality space を計算機内に構成して、そこにこれらの結果を持ち込んで表す事にした。これによってシミュレーション結果を「実験」の対象を扱うように 3 次元で取り扱う事が可能になる：まず、スーパーコンピュータで得た方程式系の解の全データを一旦メモリー内に持ち込んで、それから実験者が virtual reality space 内の実験室で任意の視点から見た立体像として構成する。これには、左右眼視差を与えて計算した二つのイメージから立体像を眼前に作る Head Mount Display を用いる。勿論、時間依存解を扱った立体ムービーも大いに活用する。また、実験者は virtual reality space 内に置い

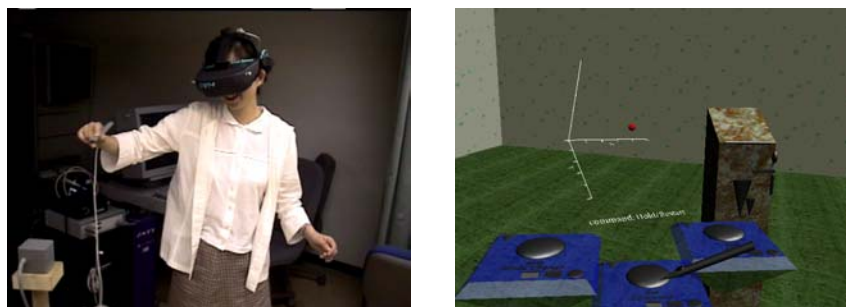


図 1 VR デバイスを装着した実験者と仮想空間実験室

たボタン、ダイヤル等にペンデバイスなどを用いてアクセスすることでコマンドを可視化サーバに伝え、任意に被検体の位置、角度、大きさなどだけでなく、等値面を変えたり、磁力線等を任意に引いたり、任意のカット面での任意の変数のコントラスト図などを取り出したり、その他様々な解析をインタラクティブに行う (図 1)。近い将来、GRID コンピューティング等が実現すれば、このシステムを外部の高速計算機とで組む事によって、小規模のシミュレーションについては計算を行いながらリアルタイムで上記のインタラクティブな解析を行い、さらにそれをシミュレーションにフィードバックするといった、まさに「仮想実験」が可能になるであろう。

3 扱った天体活動の諸問題

仮想空間天体物理実験室では、電波天文学、X 線天文学等がそれらについての情報をもたらした激しい天体活動のうち、活動銀河核からの高速ジェット発生の問題、これに関連して星形成などにも伴う天体ジェット形成の問題、回転中性子星であるパルサーの磁気圏の問題、活動星大気中の爆発現象フレアの問題、等々について扱って来たが、ここではその中から二、三、の例を挙げてみたい。

3.1 活動銀河核ジェットの問題

活動銀河核ジェットは長さ数百 kpc から Mpc におよび、活動銀河核中心部の太陽の 1 億倍程度の質量を持つブラックホール周辺から噴出しているものと考えられているが、まだそのメカニズムは確立されていない。我々はこの問題に対し、弱い大局磁場を含み角運動量を持つ原初ガスが重力収縮して中心ブラックホールとその回りの降着円盤を作る時、円盤に引き込まれて強化された磁場が円盤回転で捻じ上げられ、磁場がテンションにより円盤物質に磁気制動を掛けて更に重力収縮を可能とするという基本過程を考えた。そして、この時発生する捻れアルフベン波が磁場に沿って伝播して「動的ピンチ効果」で細いジェットを作っていくと考え、この電磁流体動力学過程を数値シミュレーションで示す事によって提唱した (Uchida and Shibata 1985, 1986, Shibata and Uchida 1986)。当時はまだこの分野では世界でもまだ本格的数値シミュレーションでこのような天体活動の問題を扱っている所はなく、Caltech のグループが相似解を用いてこの問題を扱い始めていた (Blandford and Payne 1982) が、それでは境界条件は意識しない一つの解という事で現実の現象には遠く、我々の解が最もリアリティに近いものであった。

Blandford 達の考えに沿った研究が主流を占めて曲折を経るが、最近電波の Faraday Rotation の観測で我々のモデルの予言した特徴が見え始め、脚光を浴び始めている (図 2 は昨年 2001 年 1 月 5 日

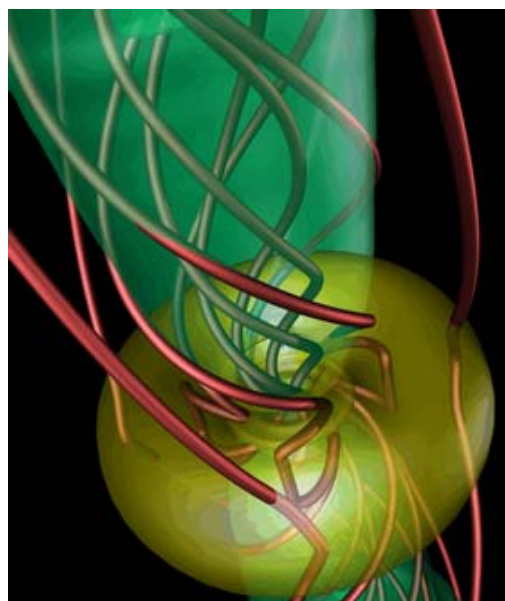


図 2 降着円盤と磁場の相互作用によって発生するジェット

号の Science 誌の表紙となった我々のモデル)。図 3 は活動銀河核 3C449 のジェット of Faraday Rotation Measure 分布 (Feretti et al. 1999) で、これは従来考えられて来たように Faraday Rotation Measure は対象と我々の間の磁場を持ったガス雲によるものばかりでなく対象たるジェット内の磁場からの寄与もある事を明らかにし、我々のモデルの予言するものがこの分布の特徴を良く説明する (これまでの他のモデルでは説明が難しい) 事が分かったのである。

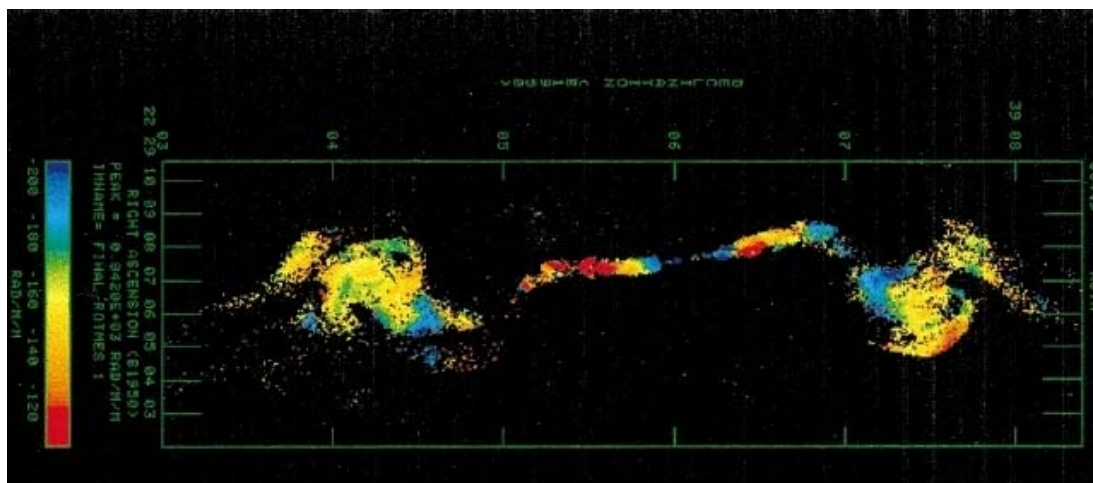


図 3 活動銀河核 3C449 のジェットの FRM 分布 (Feretti et al. 1999 より)

このような検証によってジェットに見られる「くねくね構造」が磁気ヘリカル不安定による 3 次元ヘリックスである事が明らかになると、それを可能とする中心核から捻れアルフベン波を供給するという我々のモデルが支持され、電波ローブ、ホットスポット等の出している膨大なエネルギーを中心核から運んでいるものも捻れアルフベン波であるという事になる (Uchida et al. in preparation)。図 4 は我々のモデルで、大局的くねくね構造がヘリカル不安定で説明がつく事を示した Nakamura et al. (2001) の結果、図 5 はこのようなモデルから Faraday Rotation Measure の観測結果の特徴が説明される事を示した Kigure et al. (in preparation) の結果である。

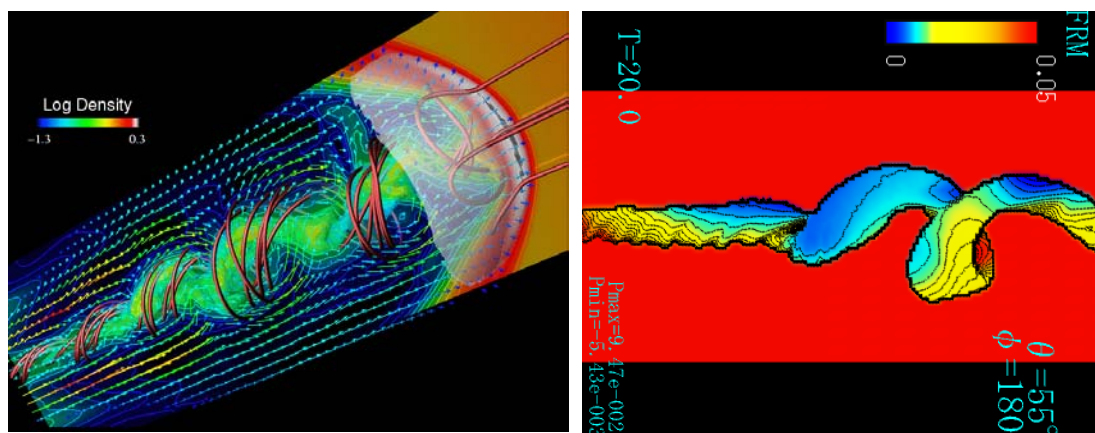


図 4 (左) ジェットの「くねくね構造」を説明するヘリカルキンク不安定

図 5 (右) 図 4 の結果をもとに算出した FRM 分布 (図 3 の右端の部分に相当する)

3.2 恒星大気中のフレア爆発と質量放出

恒星大気中の激しい爆発現象フレアの代表的な例は我々の太陽においても見られる。他の恒星は点としてしか見えず、太陽でこれらを詳細に検証しようとする我々の提案が宇宙科学研究所で実現して頂く事が出来たのが X 線衛星「ようこう」で、これによる観測によってフレアの発生機構の詳細が分かって来た。これについては 1960 年代から Sturrock (1967) 等による光学観測を説明する理論モデルが出され、30 年近くそれが信じられて来たが X 線衛星「ようこう」はこれに対し、新しい情報を与えた。

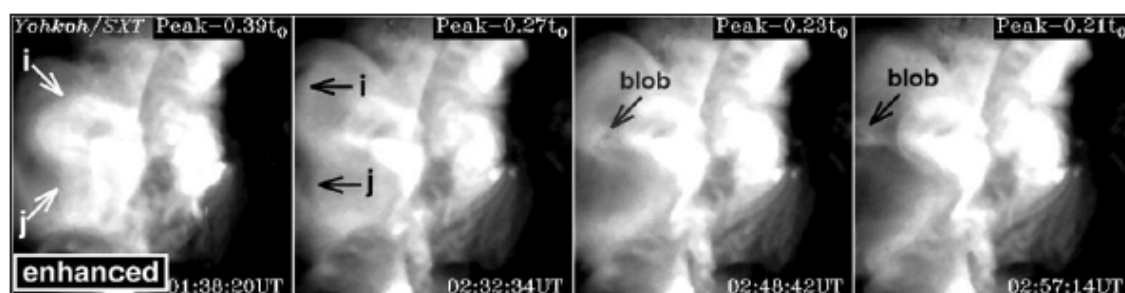


図 6 軟 X 線望遠鏡による太陽表面爆発現象（フレア現象）の観測例

図 6 は「ようこう」軟 X 線望遠鏡によるフレアであり、この詳細解析はこれまでのモデルでは説明出来ない事が起こっている事を明らかにした (Uchida 1996, Morita et al. 2001)。起こっていた事は従来のモデルが 2 極の磁場しか想定していなかったのに、実際は 4 つの磁極が関わっており、「ダークフィラメントと呼ばれるものが磁気ループを破って飛び去ってその開いた磁場のエネルギーが磁場再結合で解放される」と考えた Sturrock の model とは逆に「磁気ループが膨張してダークフィラメントを引っ張って行く」事が分かった。

これは実は Uchida (1980) が Sturrock model のエネルギー的矛盾を指摘し、代わりに提唱した、4 重極モデルを支持するものであった。またそれは後に米国の極紫外線衛星 TRACE でも再確認された (Uchida et al. 2002)。この 4 重極モデルは「仮想空間実験室」での取り扱いによって詳細に調べられた (Hirose et al. 2001) (図 7)。

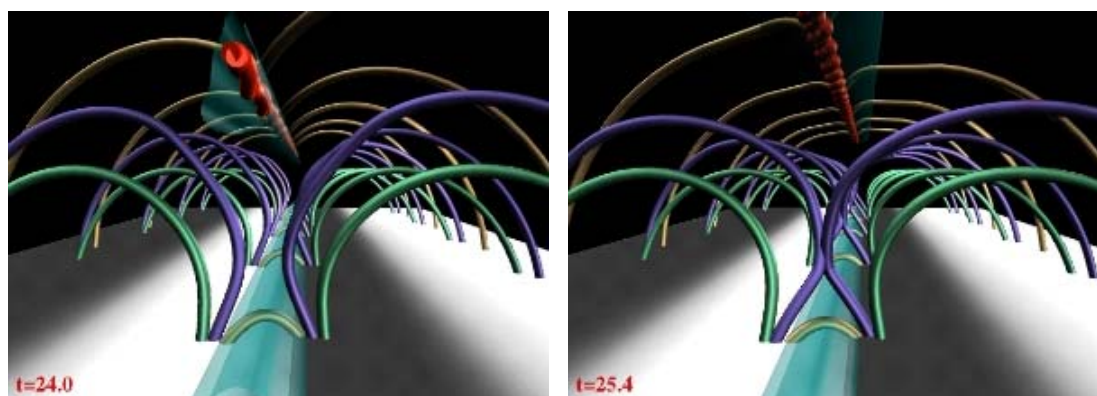


図 7 磁気再結合によって加速されるダークフィラメント

また、これに伴って太陽系空間に飛び出すループ型大質量放出現象 (Coronal Mass Ejection = CME) については、我々は磁気ループの足元からのアルフベン波の伝播として説明するモデルを提案している。図 8 は欧米による多目的衛星 SoHO/LASCO によるループ型 CME であり、図 9 はそれに対応する Kuwabara et al. (in preparation) による仮想空間天体物理実験室による扱いの結果である。

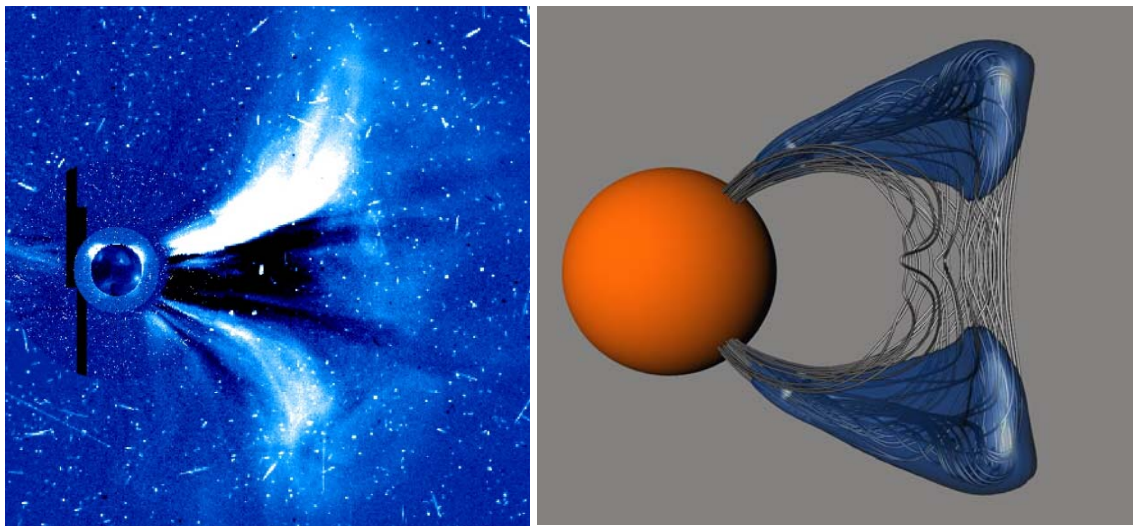


図 8 (左) SoHO/LASCO 衛星による、太陽からの大規模質量放出現象の観測例

図 9 (右) 磁気ループ中を伝播する大振幅振れアルフベン波とそれに伴う質量放出

謝辞

始めに「仮想空間天体物理実験室」のアイディアをサポートして下さった川井忠彦教授や、その他同僚の方々、このアイディアの実現に力を貸してくれた元院生の上村周平君、小林忠人君、理論シミュレーションおよび観測的検証サイドの研究を一緒に進めてくれた中村雅徳、森田諭君を初めとする院生諸君、ポスドクの Samuel Cable, Robert Cameron 君の鮮烈な興味と力強い協力に深く感謝したい。またこの期間に国際協力を行った Nigel Weiss 教授 (Cambridge 大学)、Don Melrose 教授 (Sydney 大学) およびそのグループメンバーの方々にも謝意を表したい。

参考文献

- Blandford, R. D., Payne, D. G., Hydromagnetic flows from accretion discs and the production of radio jets, MNRAS, 199, 883, 1982
- Feretti, L., Perley, R., Giovannini, G., and Andernach, H., VLA observations of the giant radio galaxy 3C 449, Astron. and Astrophys., 41, 29, 1999
- Hirose, S., Uchida, Y., Uemura, S., Yamaguchi, T., and Cable, S., A Quadruple Magnetic Source Model for Arcade Flares and X-ray Arcade Formations Outside Active Regions. II. Dark Filament Eruption and the Associated Arcade Flare, Astrophys.

- J., 551, 586, 2001
- Morita, S., Uchida, Y., Hirose, S., Uemura, S., and Yamaguchi, T., 3D Structure of Arcade Type Flares Derived from the Homologous Flare Series of 1992 February 21, 24, and 27, *Solar Phys.*, 200, 137, 2001
 - Nakamura, M., Uchida, Y., and Hirose, S., Production of the Wiggled Structure of AGN Radio Jets in the Sweeping Magnetic Twist Mechanism, *New Astronomy*, 6, 61, 2001
 - Uchida, Y., in *Skylab Workshop, Solar Flares*, ed. P. A. Sturrock (Colorado Associated University Press), 67 and 110, 1980
 - Uchida, Y., and Shibata, K., A Magnetodynamic Mechanism for the Formation of Astrophysical Jets I. Dynamical Effects of the Relaxation of non-linear Magnetic twists, *Publ.Astron.Soc.Japan*, 37, 31, 1985
 - Uchida, Y., and Shibata, K., Magnetodynamical Acceleration of Cosmic Jets -- Sweeping Magnetic Twist Mechanism, *Can.J.Phys.*, 64, 507, 1986
 - Uchida, Y., Title, A., Kubo, M., Tanaka, T., Morita, S., and Hirose, S., TRACE Observation of an Arcade Flare Showing Evidence Supporting Quadruple Magnetic Source Model of Arcade Flares, *Publ. Astron. Soc. Japan*, submitted, 2002
 - Shibata, K., and Uchida, Y., A Magnetodynamic Mechanism for the Formation of Astrophysical Jets II. Production and Release of the Magnetic Twist by Accretion Disks, *Publ.Astron.Soc.Japan*, 38, 631-660, 1986
 - Sturrock, P. A., Gilvarry, J. J., Solar Oblateness and Magnetic Field, *Nature*, 216, 1280, 1967