

# 平成17年度科学研究費補助金（学術創成研究費）研究進捗状況報告書

ふりがな		みま くに おき				所属研究機関 ・ 部局 ・ 職	大阪大学レーザーエネルギー学 研究センター・センター長
研究代表者 氏 名		三間 囿興					
研究 課 題 名	和文	ペタワットレーザーによる高エネルギー密度プラズマの研究					
	英文	Research on high energy density plasmas produced by peta watt laser					
研究経費 (直接経費) 18年度以降は内約額 単位:千円	平成15年度	平成16年度	平成17年度	平成18年度	平成19年度	総 合 計	
	63,300	53,100	55,000	42,800	32,000	246,200	
研究組織 (研究代表者及び研究分担者)							
氏 名	所属研究機関・部局・職	現在の専門	役割分担 (研究実施計画に対する分担事項)				
三間囿興	大阪大学・レーザーエネルギー学 研究センター・教授	プラズマ物理	総括と統合シミュレーションコードのモデリング				
長友英夫	大阪大学・レーザーエネルギー学 研究センター・助手	電磁流体力学	高エネルギー密度プラズマ電磁流体シミュレーション コードの開発				
坂上仁志	核融合科学研究所・教授	電子情報	協調処理型シミュレーションシステムの構築				
兒玉了祐	大阪大学・大学院工学部・教授	プラズマ物理	固体ターゲットでの高エネルギー荷電粒子の輸送機構の研究				
西村博明	大阪大学・レーザーエネルギー学 研究センター・教授	プラズマX線診断	高エネルギー光量子の発生輸送の時一見的研究				
田口俊弘	摂南大学・工学部・教授	プラズマ物理	極限プラズマのハイブリット量子電磁力学シミュレーション による研究				
阪部周二	京都大学・化学研究所・教授	レーザープラズマ工学	クラスターターゲットと超高強度レーザーの相互作用				
ジェームズ・コーガ	日本原子力研究所関西研究所・光子 科学センター・副主任研究員	プラズマ物理	極限プラズマの量子電磁力学シミュレーションのモデ リングとコード開発				
中尾安幸	九州大学大学院工学研究院・教授	核融合プラズマ理工学	高エネルギー電子輸送のフォッカープランクシミュレーション コードによる研究				
山極満	日本原子力研究所関西研究所・光子 科学センター・主任研究員	プラズマ物理	粒子シミュレーションによるペタワットレーザー実験の 解析				
川田重夫	宇都宮大学工学部・教授	核融合工学	高エネルギー粒子加速に関する理論研究				
田中和夫	大阪大学大学院工学研究科・教授	プラズマ物理	相対論レーザープラズマ相互作用と高エネルギー粒子発 生の実験による研究				
北川米善	光産業創成大学院大学・教授	レーザープラズマ物理	高エネルギー粒子加速の実験的研究				
近藤公伯	大阪大学大学院工学研究科・助教授	レーザー工学	レーザー粒子加速における相対論的非線形過程の研究				
<p><b>当初の研究目的</b> ( 交付申請書に記載した研究目的を簡潔に記入してください。 )</p> <p>ペタワットレーザーを低 Z から高 Z の種々の原子種からなる多様なターゲットに照射することにより、密度 温度の相図上で空白の領域 ( 超高温、超高密度 ) の色々な原子核種を含む高エネルギー密度プラズマを発生し研究を行う。この分野では、実験及び理論・シミュレーションによる研究成果が蓄積されつつあり、高エネルギー密度相対論プラズマの動特性を体系的に明らかにする事が可能になっている。すなわち、レーザー出力はペタワットを超え、GeV に達する光子や荷電粒子を含む極限プラズマを実験室で実現し、宇宙物理学、高エネルギーレーザー加速器、レーザー核物理学や核融合の研究に新展開をもたらす学術の創成を目指す。具体的には以下の研究課題に挑戦する。</p> <p>ペタワットレーザーとプラズマの相互作用における自己収束、誘導ラマン散乱や高エネルギー電子の発生や超短パルスのテラヘルツ放射などの相対論的非線形現象の物理を実験及び計算機シミュレーションと理論により体系化する。</p> <p>数 10MA で数 10MeV の電子流やイオン流と高密度プラズマとの相互作用に伴う電磁乱流の発生や自己組織化・構造形成に関連するシミュレーションと実験による総合的理解。そのため、ペタワットレベルでのレーザープラズマ実験と理論・シミュレーションの比較検討により得られるデータベースにもとづき、高エネルギー密度相対論プラズマの統合計算機シミュレーションを可能にする。</p> <p>さらに英国 ( ラザフォード・アップルトン研究所等 ) や米国 ( ゼネラルアトミックス社、ネバダ大学等 ) との国際共同研究を一層充実させ、この分野の国際的研究ネットワークを構築する。</p>							

### これまでの研究経過

本研究は、学術創成研究費の趣旨の3つの観点のうち、どの観点到主眼を置いて研究を行っているかについてお書きください。

当該分野は新しいレーザー技術の革新により持たされた極限の物質状態の発生とダイナミックスの研究であり、プラズマ物理学、宇宙物理学、核融合科学、量子放射応用化学、等にまたがる革新的かつ学際的分野である。超高強度レーザーにより発生する相対論的プラズマでは、超高強度場が発生し今まで大型加速器によってのみ発生可能であった MeV から GeV の高エネルギー粒子やガンマ線が生成される。このような超高強度場や高エネルギー粒子の発生にかかわる研究は、レーザー加速器の開発研究や宇宙線の発生機構の解明につながる天体プラズマ物理研究に寄与するものである。また、超高強度レーザーや高密度の高エネルギー粒子ビームとプラズマの相互作用の研究は、相対論的非線形物理や非平衡統計力学の研究に寄与する。

研究の進捗状況について、必要に応じて図表等を用いながら、研究組織内の連携状況を含め、具体的に記入してください。

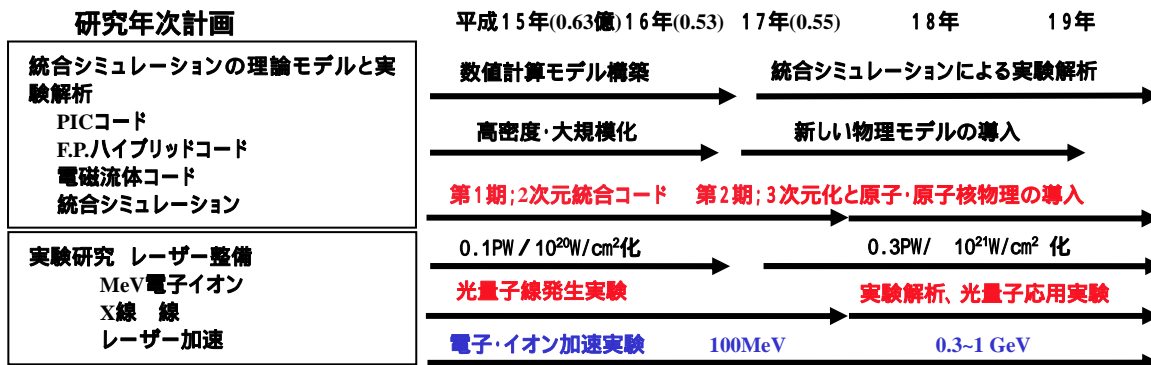
統合シミュレーションコードの開発による理論的研究、超短パルスレーザー装置の高度化、及び超高強度レーザープラズマの実験研究を平行して進めており、下図に示す年次計画に沿って研究を進めている。

本プロジェクトでは、超高強度短パルスレーザーとターゲットの相互作用で発生する高電流密度の相対論電子ビーム、イオンビーム、超短パルス X 線放射等の機構を解明するとともに、それを利用する高速プラズマ加熱等の核融合の基礎研究、高エネルギーレーザー粒子加速や超短パルス X 線応用の研究を、実験については大阪大学レーザーエネルギー学研究中心を中心に大阪大学大学院工学研究科、京都大学の研究分担者と協力して進め、シミュレーション研究では、核融合科学研究所、日本原子力研究所関西研究所、宇都宮大学、摂南大学の分担者との協力のもとに進めている。また、欧米や中国等海外の大学・研究所でも超短パルス超高強度レーザーが整備され、本研究に関連する超高強度レーザープラズマ物理の研究が進められており、実験研究では英国ラザフォード研究所、中国北京物理研究所、米国ローレンスリバモア研究所と協力している。また、シミュレーション研究に関して、粒子コードによる研究につきネバダ大学レノ校および北京物理研究所と研究協力を進めている。

**実験研究** 大阪大学における研究では、激光MII号レーザーを整備しコントラスト比の良いレーザーパルスの発生を実現し相対論レーザープラズマの基礎研究を行うとともに、ペタワットレーザーを利用して、コーン形状のターゲットでの電子の加速と伝播や高密度MeVイオンの発生研究を進めている。これらの研究では、英国ラザフォード研究所や米国ローレンスリバモア研究所及びジェネラルアトミックス社と共同実験を行った。また、激光MIIレーザーでは、超高強度レーザー技術として、組み合わせグレーティングの開発を進めている。京都大学との共同研究により、高繰り返し $T^6$ レーザーにより、固体ターゲットとの相互作用でK X線分光計測し異常輸送現象の物理の解明を進めるとともに、 $T^6$ レーザーとクラスタータargetを用いて高効率イオンの発生研究を行っている。

**理論シミュレーション研究** レーザープラズマ相互作用と固体ターゲット等の高密度プラズマ中の高エネルギー粒子の輸送や原子核過程を解明するため統合シミュレーションコードの第1次バージョンを完成させ、いくつかの実験結果の解析を進め現象を支配する物理機構の解明を進めている。また、摂南大学と協力でハイブリッドシミュレーションにより高エネルギー電子流の自己組織化を明らかにしつつある。宇都宮大学、原研関西研のグループは、超高強度レーザーによるプラズマ中での粒子加速や X線放射とそのリコイルに関する物理の研究を進めている。

#### 研究年次計画



#### その他

研究予算を重点的に激光 MII 号レーザーの高精度化に投入し質の良いデータを蓄積する準備を完了した。合わせて、相当の予算を割き積極的に国際会議で発表したり、海外の研究者を招聘し共同研究をする等、研究の国際化に務めた。その結果、相対論電子流の発生と異常輸送等に関する研究成果は、Nevada 大学の H.Ruhl, 千徳靖彦、及び北京物理研究所、Z.-M. Sheng, J.Zhang 等と Physical Review Letter 等に論文として発表された。また、平成 15 年、16 年の研究会に米国の統合シミュレーションコード LSP の研究を進めている R.Campbell (SNL), R.Town(LLNL)等を招待し我々の整備している統合コードとの比較を行い、より良い数値計算モデルを取り入れるための課題を明らかにした。

特別推進研究「相対論工学」(代表;原研関西研究所、田島俊樹)と特定領域研究「強レーザー光子場における分子制御」(代表;東京大学、山内薫)との共催で、LaserPhysics2005 国際セミナーを本年 7 月 4 日から 8 日まで、京都府精華町京阪奈プラザにおいて開催し、高強度場科学に関するセミナーを主催し本研究成果をまとめて発表し、国際的な評価を受ける。このセミナーにより、研究の国際的な位置づけが明確になり今後の研究の進め方を精査する。

## 特記事項

〔 これまでの研究において得られた、独創性・新規性を格段に発展させる結果あるいは可能性、新たな知見、学問的・学術的なインパクト等特記すべき事項があれば記入するとともに、推薦者の期待がどの程度達成されつつあるかについて記入してください。 〕

ペタワット級の超高強度レーザー技術の進歩によって発生可能となった高エネルギー密度相対論プラズマの物理を学術として体系化し、レーザー加速やレーザー核融合等多様な関連する応用分野を発展させるための基礎を確立することが求められている。この目標に対し、平成15年の本研究の開始以来、相対論プラズマの実験と理論・シミュレーション研究を有機的に結合して、超高強度レーザープラズマ物理の解明を進めている。

超高強度レーザー固体ターゲットに照射する事で発生する固体密度のプラズマは、レーザーにより生成される高密度相対論電子のダイナミクスにより支配される。すなわち、半径数十マイクロンの領域にペタワットに達するエネルギーが注入され相対論電子がそのエネルギー輸送を担う過程で、電磁プラズマ乱流や高エネルギーイオンやX線等の発生がプラズマの振る舞いを決定する。特に、電磁プラズマ乱流を伴う高密度相対論電子流の物理は、今までの実験室プラズマ研究の対象外で有り、天体プラズマ研究等で問題が指摘されていたところである。本研究を進める過程で、全電流がアルペン極限電流をはるかに超える電子の流れは電磁乱流を経て大規模な磁場発生を伴う等の自己組織化・構造形成する事が発見され、それがレーザー核融合に関連するプラズマ加熱や高エネルギーイオン・X線の発生特性に重要な役割を演じる事が明らかになった。

これらの研究を進めるため、超高強度レーザー整備とプラズマ実験研究では、 $10^{20}\text{W/cm}^2$ を超えるレーザープラズマ実験を、大阪大学レーザーエネルギー学研究センターの既存のレーザー装置(1)ペタワットレーザー(出力500J/パルス幅0.5ピコ秒)(2)GMIIレーザー(出力30J/0.3ピコ秒)及び京都大学の(3)チタンサファイアレーザー( $T^6$ レーザー)(出力0.5J、50フェムト秒)を用いて実施した。実験では、コーン形状のターゲットに沿って自己誘導磁界により数メガアンペアの電子流がガイドされ(文献11に掲載)、その結果、高密度プラズマが局所的に高効率に加熱される事が確認された(Physical Review Eに投稿)。また、メガアンペア超の相対論電子流がフィラメントに分裂しその構造がレーザー強度とともに大きくなる事(PRLに投稿)や、K X線計測によるプラズマの加熱分布計測から固体表面で熱流の異常減衰が起きる事が確認された(文献16)。これらのエネルギー輸送特性の実験結果は未だ定性的であり、支配している物理過程の特定にまで至っていない。より高精度の実験データを得るためいっそう制御性の良い超高強度レーザーによる実験の準備を進めている。すなわち、激光MII号レーザーを高性能化し100TW超の高精度のレーザーパルスを利用した実験を実施するべく準備が整っている。すでに、高性能化激光MII号レーザーではプレパルスレベルを $10^{-8}$ 以下にすることで、精密に制御された実験が可能になっている。この装置を利用する実験により、精度よく統合シミュレーションコードによる実験データの解析が可能になり相対論電子熱輸送の物理の高度化を図る事が出来ると期待される。この研究成果は、高輝度高エネルギープロトンの発生や高エネルギー電子加速の制御に役立てることが出来、100MeV超の高電流超短パルスの粒子ビームの発生への道を開く。すでに、コーンキャピラリターゲットやガスジェットターゲットにより100MeVを超える電子の発生に成功している(文献14)。

上記の実験研究と平行して、理論研究ではペタワットレーザープラズマを総合的に再現するため、複数の大学、研究機関で、種類の異なるシミュレーション(粒子シミュレーション、ハイブリッドシミュレーション、フォッカープランクシミュレーション等)による相対論レーザープラズマの研究進めるとともに、それらを結合した統合計算機シミュレーションをこの分野で初めて可能にした。すなわち、粒子シミュレーションとフォッカープランクシミュレーション及び輻射流体シミュレーション(文献2)をプロトコルで結合したシミュレーションを実施し高密度プラズマの加熱による核融合反応の増加に関する実験結果の再現を試みている(文献3)、PRL(文献4)。これらのシミュレーション研究により、高密度電子流に伴う静電的、及び電磁的2流体不安定性が非常に重要であり、これらの不安定性に伴って電磁プラズマ乱流が生じる。その結果として、相対論電子流がフィラメントに分裂したり、大規模磁界の発生に到る自己組織化・構造形成や異常エネルギー緩和による異常プラズマ加熱が起きる事が明らかになった(文献6, 19, 20), パリティー(2004, K.Mima)。しかしながら、これらのシミュレーション結果と実験との比較は、定性的にはある程度的一致を見ているものの、定量性において不十分であり、上記の現象を支配する物理を特定するまでには至っていない。そのためには、新しい物理過程を含める等シミュレーションモデルを改良するとともに、3次元効果を如何にモデル化するかが今後の検討課題である。

このようなシミュレーションシステムが完成し、ペタワットレーザー実験結果を精度よく再現出来れば、宇宙物理、新しいレーザー核融合方式の「高速点火」及び高エネルギー電子、イオンやX線の発生の研究が飛躍的に進歩すると期待される。例えば、コーンターゲット裏面のプラズマ中への電子の侵入の密度依存性を明らかにする事は、高エネルギーイオンの発生や高速点火の加熱の制御に関わる重要な発見になると期待される。

最後に、これらの研究成果は、ペタワットレーザーで生成する高エネルギー粒子線を利用する治療・診断などの医療応用に寄与するものであり、粒子線によるがん治療のための大型で高価な加速器を小型化するために寄与することも期待される。

## 研究成果の発表状況

〔 この研究費による成果の発表に限り、学術誌等に発表した論文（掲載が確定しているものを含む。）の全著者名、論文名、学協会誌名、巻（号） 最初と最後のページ、発表年（西暦） 及び国際会議、学会等における発表状況について記入してください。 〕

### 主な論文

1. K. Mima, Present status and future prospects of IFE and high power laser research in Asia, *Nucl. Fusion*, **44**, S129 (2004).
2. H. Nagatomo, T. Johzaki, H. Sakagami, K. Mima, Y. Nakao, T. Taguchi, T. Yokota, A. Sunahara, K. Nishihara and Y. Izawa, Development of Fast Ignition Integrated Interconnecting Code (FI<sup>3</sup>) for Fast Ignition Scheme, IAEA-CSP-20/CD, IFP/29, (2004).
3. H.Sakagami, and K.Mima, Interconnection Between Hybrid and PIC Codes for Fast Ignition Simulations, *Laser and Particle Beams*, Jan. 41-44, (2004).
4. T. Nakamura, S. Kato, H. Nagatomo and K. Mima, Surface-Magnetic-Field and Fast-Electron Current-Layer Formation by Ultraintense Laser Irradiation, *Physical Review Letters*, **93**, 265002 (2004).
5. Y. Nakao, T. Yokota, T. Johzaki, H. Nagatomo, H. Sakagami and K. Mima, Two-Dimensional Fokker-Planck Analysis of Core Plasma Heating by Relativistic Electrons, to be published in Proc. of 20<sup>th</sup> IAEA Fusion Energy Conf. (Vilamoura, 2004), IAEA-CSP-20/CD, IF/1-5 (2005).
6. T. Taguchi and T. M. Antonsen Jr, Resonant Heating of a Cluster Plasma by Intense Laser Light, *Physical Review Letters*, **92**, 205003-1 (2004).
7. T. Johzaki, H. Nagatomo, K. Mima, H. Sakagami and Y. Nakao, Integrated Simulations for Fast Ignition Targets, *J. Plasma Fusion Res. SEREIS*, **6**, 341-344, (2004).
8. J. Koga, Integration of the Lorentz-Dirac equation: Interaction of an intense laser pulse with high-energy electrons, *Physical Review E*, **70**, 046502-1 (2004).
9. T. Utsumi, T. Yabe, T. Aoki, J. Koga and M.Yamagiwa, Solutions of Hyperbolic Equations with the CIP-BS Method, *JSME International Journal Series B*, **47**, No 4, 768 (2004).
10. Takashi Nakamura and Shigeo Kawata, Origin of protons accelerated by an intense laser and the dependence of their energy on the plasma density, *Physical Review E*, **67**, 026403 (2003).
11. R. Kodama, Y. Sentoku, Z. L. Chen, G. R. Kumar, S.P. Hatchett, Y. Toyama, T.E. Cowan, R.R. Freeman, J. Fuchs, Y. Izawa, M.H. Key, Y. Kitagawa, K. Kondo, T. Matsuoka, H. Nakamura, M. Nakatsutsumi, P.A. Norreys, T. Norimatsu, R.A. Snavely, R.B. Stephens, M. Tampo, K.A.Tanaka and T. Yabuuchi, Plasma devices to guide and collimate a high density of MeV electrons, *Nature*, **432**, 7020, 1005 (2004).
12. R. Kodama, H. Azechi, H. Fujita, H. Habara, Y. Izawa, T. Jitsuno, T. Johzaki, Y. Kitagawa, K. Krushelnick, T. Matsuoka, K. Mima, N. Miyanaga, K. Nagai, H. Nagatomo, M. Nakai, H. Nishimura, T. Norimatsu, P. Norreys, K. Shigemori, H. Shiraga, A. Sunahara, K.A. Tanaka, M. Tampo, Y. Toyoma, K. Tsubakimoto, T. Yamanaka and M. Zepf., Fast plasma heating in a cone-attached geometry-towards fusion ignition, *Nucl. Fusion*, **44**, S276 (2004).
13. K. Tanaka, R. Kodama, Y. Kitagawa, K. Kondo, K. Mima, H. Azechi, Z. Chen, S. Fujioka, H. Fujita, T. Johzaki, A. Lei, T. Matsuoka, N. Miyanaga, K. Nagai, H. Nagatomo, H. Nishimura, T. Norimatsu, K. Shigemori, H. Shiraga, M. Tampo, Y. Tohyama, T. Yabuuchi, J. Zheng, Y. Izawa, P. A. Norreys, R. Stephens and S. Hatchett, Progress and perspectives of fast ignition, *Plasma Phys. Control. Fusion*, **46**, B41 (2004).
14. Y. Kitagawa, Y. Sentoku, S. Akamatsu, W. Sakamoto, R. Kodama, K.A. Tanaka, K. Azumi, T. Norimatsu, T. Matsuoka, H. Fujita and H. Yoshida, Electron Acceleration in an Ultraintense-Laser-Illuminated Capillary, *Physical Review Letters*, **92**, 20, 205002-1 (2004).
15. Y. Kitagawa, Y. Sentoku, S. Akamatsu, W. Sakamoto, K. A. Tanaka, R. Kodama, H. Nishimura, Y. Inubushi, M. Nakai, T. Watari, T. Norimatsu and A. Sunahara, Petawatt-laser direct heating of uniformly imploded deuterated-polystyrene shell target, *Physical Review E*, **71**, 016403 (2005).
16. T.Kawamura, T.Schlegel, H. Nishimura, F.Koike, Y. Ochi, R.Matsui, S. Okihara, S. Sakabe, T. Johzaki, H. Nagatomo, K.Mima, I. Vschmann, E. Forster, D. Hoffmann., Numerical study of K emission from partially ionized chlorine, H.Nishimura, et al *Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer*, 81 237-246 (2003).
17. Y. Inubushi, H. Nishimura, M. Ochiai, S. Fujioka, Y. Izawa, T. Kawamura, S. Shimizu, M. Hashida and S. Sakabe, X-ray polarization spectroscopy for measurement of anisotropy of hot electrons generated with ultraintense laser pulse, *Review of Scientific Instruments*, **75**, No10, 3699 (2004).
18. M. Hirokane, S. Shimizu, M. Hashida, S. Okada, S.Okihara, F.Sato, T. Iida and S. Sakabe Energy distributions of ions emitted from argon clusters Coulomb-exploded by intense femtosecond laser pulses, *Physical Review A*, **69**, 063201 (2004).
19. Y.Sentoku, K.Mima, P. Kaw and K.Nishikawa, Anomalous Resistivity Resulting from MeV-Electron Transport in Overdense Plasma, *Physical Review Letters*, **90**, 15 (2003).
20. Y. Sentoku, K. Mima, H. Ruhl, Y. Toyama, R. Kodama, and T. E. Cowan, Laser light and hot electron micro focusing using a conical target *Phys. Plasmas* **11**, 3083 (2004)

**主な国際会議での発表** 国際原子力機関核融合エネルギー会議(IAEA/FEC, Vilamoura, 2004) 3 件, レーザー核融合科学とその応用に関する会議 (IFSA, Monterey, 2003) 11 件, 第 42 回米国物理学会プラズマ部会 (APS/DPP, Albuquerque, 2003) 3 件, 第 43 回米国物理学会プラズマ部会 (APS/DPP, Savannah, 2004) 4 件.

**国内学会での発表** 日本物理学会, プラズマ・核融合学会, レーザー学会、日本原子力学会、日本機械学会等