

平成22年 4月22日現在

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2007～2009

課題番号：19540528

研究課題名（和文） 高エネルギー密度シミュレーションモデルの確立

研究課題名（英文） Simulation Model Development for High Energy Density Physics

研究代表者

坂上 仁志（SAKAGAMI HITOSHI）

核融合科学研究所・シミュレーション科学研究部・教授

研究者番号：30254452

研究成果の概要（和文）：近年の超高強度レーザー技術の劇的進展によって、高エネルギー密度プラズマが生成できるようになり、基礎物理から産業応用まで幅広い領域への展開が期待されている。このため、高エネルギー密度科学領域の物理を総合的に理解できる統合シミュレーションモデルを確立することが重要となってきた。そこで、新しい統計的衝突モデルやシミュレーションコードを開発して統合シミュレーションを実現し、高速点火レーザー核融合における現象を解析した結果、その全体的な物理機構の解明が大いに進んだ。

研究成果の概要（英文）：Recent drastic progress in ultrahigh intensity laser technology can produce high energy density plasmas, and their developments are expected in various fields, including fundamental physics and industrial applications. Thus integrated simulation modeling for high energy density physics is required, and a statistical collision model and simulation codes have been developed for it. As a result of analyses of fast ignition laser fusion with the use of the integrated simulations, the elucidation of overall physical mechanisms has greatly progressed.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	1,300,000	390,000	1,690,000
2008年度	1,200,000	360,000	1,560,000
2009年度	900,000	270,000	1,170,000
年度			
年度			
総計	3,400,000	1,020,000	4,420,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：プラズマ科学・プラズマ物理

キーワード：レーザー核融合、高速点火、統合シミュレーション、衝突モデル

## 1. 研究開始当初の背景

近年、超高強度レーザーの技術が劇的に進展しており、このレーザーにより相対論的プラズマが容易に生成でき、相対論的高エネルギーの電子やイオンの生成、X線およびγ線の

放射、光核反応等が実現している。そして、高速点火方式レーザー核融合、レーザー加速器、リソグラフィ、医療応用等、基礎物理から産業応用まで幅広い領域への展開が期待されている。このため、レーザーとプラズ

マの強い非線形相互作用, 相対論的プラズマの運動論的な相互作用, 高エネルギー光・量子の発生機構, その輸送機構および緩和機構を明らかにすることは, 高エネルギー密度科学として急務になっている。

## 2. 研究の目的

このような高エネルギー密度科学領域の物理を総合的に理解するため, レーザーを用いた実験により加速粒子の観測や物質の加熱状態等が調べられているが, その物理機構の詳細な解明には至っておらず, 大規模シミュレーションによる研究が不可欠である。しかし, 多数の現象が相互に絡み合った極限状態の複雑現象を解明するためには, 空間・時間スケールが大きく異なる複数の現象を同時に取り扱う必要がある。これらすべての物理現象を単一のコードでシミュレーションすることは, 極めて困難であるため, 結局, 連結階層的に積み上げられた多数のコードから成る統合されたシステムの構築が必須となる。そこで, このような複数コードによる統合シミュレーションを実現するため, 個別の要素技術だけではなく全体を統合できるシミュレーションシステムを開発し, 高エネルギー密度科学分野の一つである高速点火レーザー核融合における物理機構を総合的に解析することを目指す。

## 3. 研究の方法

高エネルギー密度プラズマにおける高速電子の輸送過程シミュレーションでは, 高エネルギー電子の電流を中性化するために流れる帰還電流が衝突項により大きな影響を受け, 間接的に高エネルギー電子の流れを抑制すると考えられている。そこで, 計算量が現実的なレベルに収まる統計的衝突モデルを開発して相対論的電磁粒子コードに導入し, 超高強度レーザーと高密度プラズマの相互作用における衝突効果について調べ, 高速電子の生成特性を明らかにする。そして, 統合シミュレーションによりコアの加熱特性を評価する。また, カットオフ密度付近で発生した大量の高速電子が, 高密度領域を通過して燃料領域に十分なエネルギーを与えうるかどうかは高速点火の成否の鍵である。そこで, 高速電子は粒子的手法で, 背景プラズマは流体的手法で解くハイブリッドコードを新たに開発し, 高密度領域における高速電子伝播を効率良く解析する。更に, 高速点火用ターゲットのコーン材質がコア加熱に与える影響をフォッカー・プランクシミュレーションにより詳細に解析し, 最適な材質について評価する。一方, 統合シミュレーションシステムにおける複数コード間のデータ交換には, インターネットの通信技術を用いて専用のプロトコルを開発する。

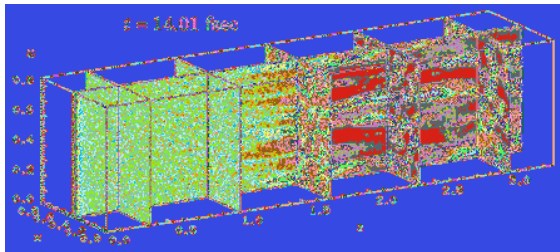
## 4. 研究成果

(1) Antonsen 法によって修正されたランジュバン方程式に基づき, 衝突効果を減衰項と揺動項の和で表現する粒子コード用の統計的衝突モデルを開発した。この衝突モデルの特性は, 衝突周波数と平衡温度のみで決定され, 減衰項は衝突周波数を減衰率として計算し, 揺動項は衝突周波数と平衡温度で決まる確率分布を持つランダム力を用いて計算する。そして, 背景電子とビーム電子を判別し, 全エネルギーと全運動量が保存するように背景電子の計算に補正項を追加して, モデルを改良した。この結果, 高速点火レーザー核融合で重要な超高強度レーザーと高密度プラズマの相互作用における衝突効果の影響を, 相対論的電磁粒子コードにより比較的短い計算時間でシミュレーションできるようになった。

(2) 統合シミュレーションに必要なコード間通信は単機能であることに着目し, TCP/IP の上位プロトコルとして軽装な専用の通信プロトコルを設計・開発した。このプロトコルは, 統合して動作する複数のコードを実行管理するためのアービトレータと各コード間での通信を実際に行うコミュニケータで実装した。各コードはそれぞれが属するコミュニケータと通信するだけで, コード間では直接通信しない。コミュニケータ情報およびそのコミュニケータに属するコードの情報は, アービトレータが一括管理しており, ユーザはどのコードがどのサイトのどのコンピュータで起動しているか等について特別な配慮をしなくても, 送信側のコミュニケータが受信すべき相手側のコミュニケータをアービトレータに照会し, 適切なコミュニケータ間で自動的にデータ通信が行われる。また, 送受信を行うコードは, 同時に起動していなくてもかまわない。データを受信すべきコードがまだ起動していない場合でも, 送信されたデータはコミュニケータのハードディスク上にいったん保存され, 送信側コードは正常に送信処理を終了する。その後, 受信側のコードが起動すると, アービトレータはデータを保存していたコミュニケータにデータ送信を依頼し, データはハードディスクから復元されて, 自動的にコミュニケータを介して受信側のコードに転送される。この結果, LAN 内だけではなく, インターネットを利用したサイト間に及ぶ階層連結的な統合シミュレーションが可能になった。

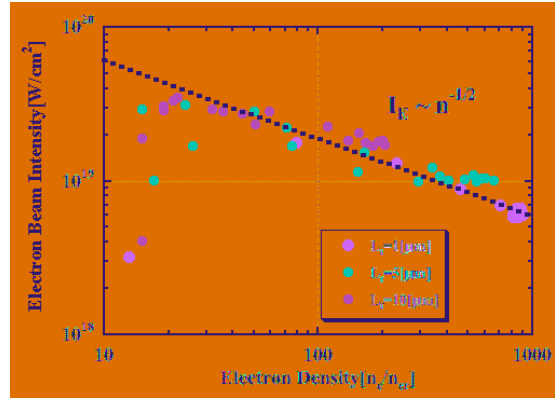
(3) 空間 3 次元のハイブリッドコードにより, 高密度領域におけるワイベル不安定性に対する抵抗の効果を調べた。解析結果の一例を下図に示す。このシミュレーションでは, 背景プラズマの電子・イオン間衝突を考慮し

ている。対向に流れる電流が流れと垂直に変動したときに磁場が生成されて元の電流の変動を増加させるため、ワイベル不安定性が起こる。電流は、抵抗の大きさに制限されるため、ワイベル不安定性も抵抗の影響を受けると考えられる。特に、高密度領域では抵抗の効果が大きいため、抵抗性ワイベル不安定性が重要となる。シミュレーションは、電子ビームを高密度プラズマ領域に注入する手法で行った。シミュレーションの結果、抵抗のない場合より、抵抗のある場合の方が、ビーム伝播に垂直な方向の変動が速く成長することがわかった。これは、抵抗がない場合には、注入された電子ビームを打ち消すような背景帰還電流が流れるために、総電流がほぼ0となってワイベル不安定性の成長が遅い。しかし、抵抗の増加に伴い、背景帰還電流が電子ビーム電流を打ち消すことができなくなり、ワイベル不安定性の成長が速くなるためであると考えられる。



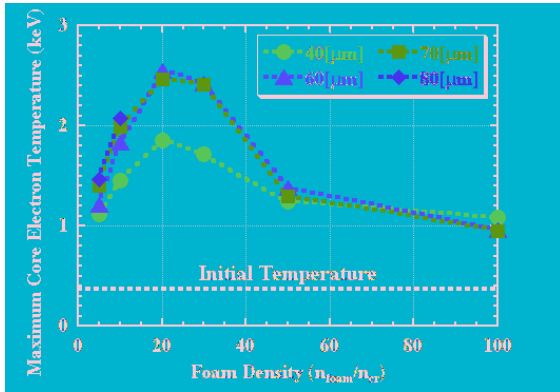
(4) 大阪大学レーザーエネルギー学研究中心で開始された高速点火実験 FIREX-I で用いられる加熱用レーザーは、パルス長が10ps程度に設計されている。このような長いパルス長における高速電子生成の様子を調べた研究は、皆無であった。そこで、このような長いパルス長における高速電子生成の様子を異なったスケール長の密度プロファイルのプレプラズマを用いた一連の粒子シミュレーションにより調べた。その結果、レーザーの強度が十分大きいと、高速電子は、いわゆる振動ポンドラモーティブ力により生成されるが、この力の大きさは  $c/\omega_{pe}$  に比例すると考えられる。このため、高速電子のビーム強度も  $c/\omega_{pe}$ 、つまり、電子密度の  $-(1/2)$  乗に比例することになる。このスケール則を下図に示す。プレプラズマのスケール長に依存せず、高速電子ビーム強度は、電子密度の  $-(1/2)$  乗によくスケールされていることがわかった。このため、高速電子ビーム強度の減少は、レーザー先端部における電子密度の増加が原因であることが明らかになった。次に、統合シミュレーションによりコア加熱を評価した。その結果、加熱レーザーのパルス長が1ps程度のときは、プレプラズマのスケール長が  $1.5\mu\text{m}$  と比較的短い場合にコアが最も加熱されたが、加熱用レーザーのパルス長が10psと長い場合には、プレプ

ラズマのスケール長が短いとポンドラモーティブ力により電子が掃き集められて相互作用領域の密度が増加して高速電子ビーム強度の低下に結びつき、コアが十分に加熱されないことがわかった。この結果は、実験条件と同等な条件による統合シミュレーションの重要性を示しており、世界に先駆けて高速点火実験のポイントデザインに踏み出せた意義は非常に大きい。

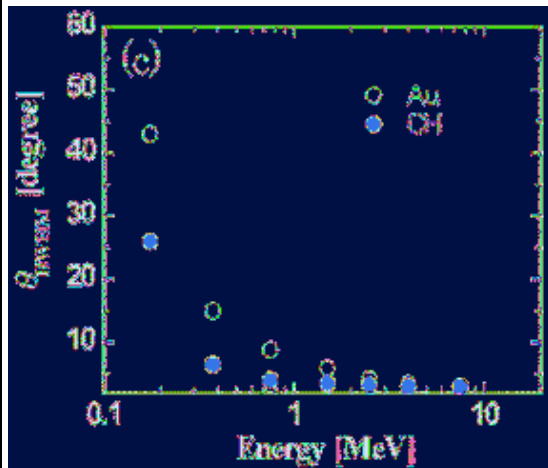
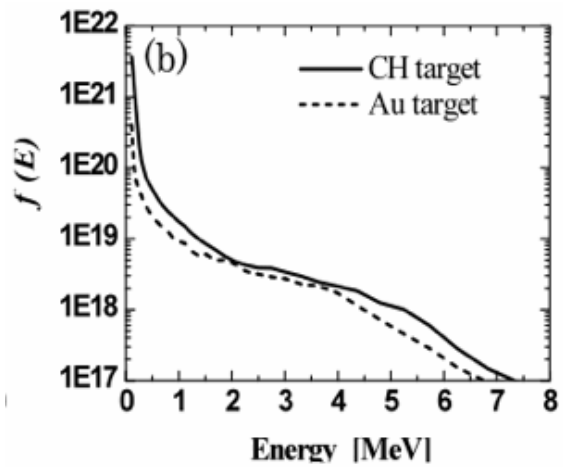
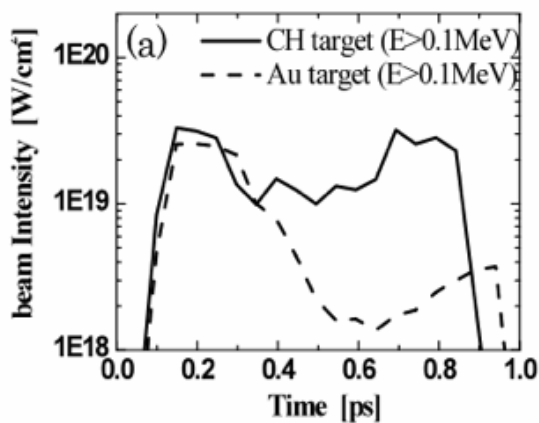


(5) 高速点火実験 FIREX-I で計画されている10ps程度のロングパルスでは、ポンドラモーティブ力により電子が掃き集められて相互作用領域の密度が増加し、高速電子のビーム強度が減少する。そこで、コーン内面に低密度フォームをコーティングし、加熱レーザーの照射中に電子密度が増加しないように制御するターゲット設計を提案しており、その効果をシミュレーションにより調べた。フォーム密度が相対論的な臨界密度より低いと、レーザーはフォーム中に異常侵入し、高密度のAuプラズマと直接相互作用するので、高速電子生成には不利となる。このため、最適なフォームの最小密度は相対論的な臨界密度である。一方、フォームの前面は、ポンドラモーティブ力により速度  $u_p$  で押し込まれる。フォームが高密度の場合、 $u_p$  は音速より十分に速く、明確な衝撃波が形成・維持されてフォームは圧縮される。このため、照射面の電子密度は大きくなり、フォームの厚さには関係なく、高速電子ビーム強度は小さい。フォームが比較的low密度の場合、フォームは生成される高速電子により急速に加熱されるため、音速が  $u_p$  と同程度にまで速くなり、衝撃波は形成されなくなる。このため、フォームは圧縮されず、密度は比較的low状態のまま保たれ、高速電子ビーム強度も維持される。現行のパラメータの範囲内では、この最適なフォーム密度の閾値は  $40n_{cr}$  であることがわかった。最後にフォームの厚さを考えると、フォームは、薄いほど、高速電子の生成場所とコアが近接するため好ましい。しかし、薄過ぎると、押し込みにより、加熱レーザー照射中に喪失してしまうため、フォームの最

適厚さは、 $(u_p \times \text{パルス長})$  であると考えられる。これらの最適なフォーム密度と厚さの評価は、得られたシミュレーション結果とよく一致していることがわかった。下図に統合シミュレーションにより加熱計算したコアの最大電子温度を示す。生成される高速電子のエネルギー分布も加味すると、 $20n_{cr}$ 、 $60 \mu\text{m}$  のフォームがコア加熱に最適であることがわかった。

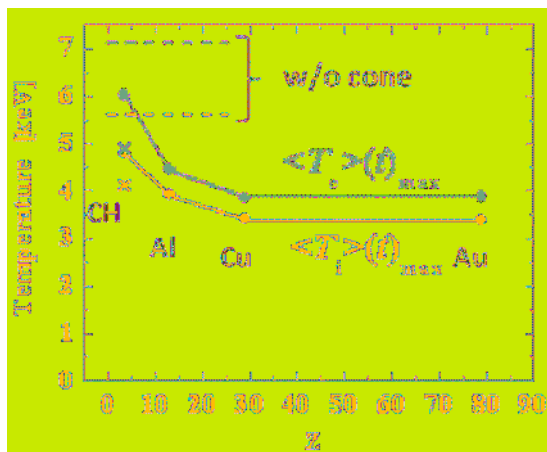


(6) 高速点火実験 FIREX-I では、コーン付きターゲットのコーン材質として、質量密度が大きく成形しやすい金 (Au) が用いられているが、コアを  $5 \sim 10 \text{keV}$  まで加熱するとコーン材は高電離度に達する。このため、コーン材に高  $Z$  物質を用いた場合は、高電離状態に達したイオンによる散乱の影響が高速電子の発生およびコーン内での輸送に大きく影響することが予測される。そこで、1次元の粒子コードとフォッカープランクコードを用いた統合シミュレーションによりコーン材質の影響を調べた。1次元粒子シミュレーションにより得られた固体密度の Au および CH に高強度レーザーを照射した場合に発生する高速電子の特性 (a) 電子ビーム強度の時間発展、(b) エネルギー分布、(c) 各エネルギー領域における高速電子の角度広がりを下図に示す。Au コーンを用いた場合、レーザー照射面のイオン化が急激に進み、数百 fs でほぼ完全電離状態に達する。その結果、照



射面の  $Z/A$  が大きくなりレーザー光圧による密度プロファイルの急峻化が急速に進む。また、帰還電流を担う背景電子流が高電離状態のイオンにより散乱され、照射領域への電子供給が低下する。このため、レーザーから高速電子へのエネルギー結合効率が急激に低下する。また、衝突により電子ビームの角度広がりも大きくなる。CH の場合は衝突の影響が小さく、密度プロファイルの急峻化後も帰還電流により照射領域に電子が供給され続けるため、高強度の高速電子ビームの発生が継続する。以上の結果から、コア加熱特性のコーン材質依存性を評価し、衝突散乱効果の小さい、低  $Z$  物質がコーンチップ材に適していることが示された。実際の加熱過程においては、磁場の発生や電子ビームの収束・発散等の多次元効果が重要となる。これらを考慮して、より実際的な評価を行うために、次に多次元解析を行った。まず、高速電子の輸送過程に着目し、その過程を介しての加熱に対するコーンチップ材質の影響を2次元フォッカープランクシミュレーションにより評価した。球状に爆縮された CD コアを中心から  $50 \mu\text{m}$  離れたところにコーンチップを置き、チップ表面から  $10 \mu\text{m}$  内側に一樣な高速電子ビームを入射した。シミュレーションは、コーンチップの材質として現在用いられている Au と低  $Z$  の CD だけではなく、中間的な  $Z$

を持つアルミ (Al) と銅 (Cu) についても考慮した。加熱されたコア温度のコーンチップ材質依存性を示すため、空間平均した電子温度 (赤線) およびイオン温度 (黒線) の最大値を下図に示す。高Z物質をコーンに用いた場合、高速電子ビームは、高電離したイオンによる散乱や背景電子との衝突により減速する。また、コーン材と爆縮プラズマ間で抵抗率の空間勾配が大きくなるため、数千Tに達する強い磁場が生成される。高速電子ビームは、この磁場によっても散乱されるため、コーンチップ内のわずか10 $\mu$ m程度の輸送でも、高速電子のビーム特性 (強度・角度広がり) は急激に悪化し、加熱効率が低くなることがわかった。一方、低Z材の場合は、衝突の効果やチップ・爆縮プラズマ間の低効率ギャップも小さいため、高速電子輸送への影響は小さい。しかし、低ZのCHの場合、Auに比べて密度が低いため、爆縮コアからのプラズマ流によって、チップが容易に破壊される恐れがある。爆縮シミュレーションによる評価では、FIREX-IクラスでCHをコーンチップとして用いる場合は、40 $\mu$ m程度の厚さが要求される。図中の「X」は、コーンチップの厚さを40 $\mu$ mとして計算した結果である。CHチップが仮に40 $\mu$ mの場合でも、10 $\mu$ mのAuより加熱効率が良いことがわかる。これらの多次元輸送計算の結果より、加熱の観点からは、コーンチップ内での衝突の効果や物質間の抵抗率ギャップにより発生する強磁場の影響を小さくするために、低Z材が好ましいことがわかった。



## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 17 件)

- ① T.Taguchi, T.M.Antonsen Jr., J.Palastro, H.Milchberg, and K.Mima, Particle in cell analysis of a laser-cluster interaction including collision and ionization processes, Optics Express, Vol.18, No.3, pp.2380-2388, 2010. (査読有り)
- ② H.Sakagami, T.Johzaki, H.Nagatomo, and K.Mima, Generation control of fast electron beam by low density foam for FIREX-I, Nucl.Fusion, Vol.49, No.075026, 2009. (査読有り)
- ③ T.Johzaki, Y.Nakao, and K.Mima, Fokker-Planck simulations for core heating in subignition cone-guiding fast ignition targets, Phys.Plasmas, Vol.16, No.062706, 2009. (査読有り)
- ④ T.Johzaki, Y.Sentoku, H.Nagatomo, H.Sakagami, Y.Nakao, and K.Mima, Core heating properties in FIREX-I - influence of cone tip, Plasma Phys.Control.Fusion, Vol.54, No.014002, 2009. (査読有り)
- ⑤ H.Sakagami, T.Johzaki, H.Nagatomo, T.Nakamura, and K.Mima, Scaling Law for Fast Electron Beam Intensity in Fast Ignition, J.Physics: Conf.Series, Vol.112, No.022070, 2008. (査読有り)
- ⑥ T.Johzaki, Y.Nakao, and K.Mima, Implosion and core heating requirements in sub-ignition experiments FIREX-I, Phys.Plasmas, Vol.15, No.062702, 2008. (査読有り)
- ⑦ 田口俊弘, 長友英夫, 城崎知至, 中村龍史, 坂上仁志, 三間圀興, レーザープラズマのシミュレーション, 放電研究, Vol.50, No.2, pp.15-20, 2007. (査読なし)
- ⑧ T.Nakamura, H.Sakagami, T.Johzaki, H.Nagatomo, K.Mima, and J.Koga, Optimization of cone target geometry for fast ignition Phys.Plasmas, Vol.14, No.103105, 2007. (査読有り)
- ⑨ T.Johzaki, H.Sakagami, H.Nagatomo, and K.Mima, Holistic Simulation for FIREX Project with FI<sup>3</sup>, Laser Part. Beams, Vol.25, pp.621-629, 2007. (査読有り)

〔学会発表〕(計 41 件)

- ① T. Taguchi, T. M. Antonsen Jr., H. Milchberg and M Inoue, An interaction between strong laser field and carbon nanotubes, 51st Annual Meeting of the Division of Plasma Physics, APS meeting 2009年11月5日, Atlanta, US
- ② H. Sakagami, Y. Kaseda, T. Taguchi, and T. Johzaki, Collisional Effect on Fast Electron Generation and Transport in Fast Ignition, 6th International Conference on Inertial Fusion Sciences and Applications, 2009年9月8日, San Francisco, US
- ③ T. Johzaki, H. Nagatomo, S. Sunahara, H. Sakagami, Y. Nakao, and K. Mima, Integrated simulations of core heating in FIREX-I, 36th European Physical Society Conference on Plasma Physics, 2009年6月30日, Sofia, Bulgaria
- ④ H. Sakagami, T. Johzaki, H. Nagatomo, and K. Mima, Optimum Density and Thickness of Low-Density Foam Coating on Cone Tip for FIREX-I, 36th European Physical Society Conference on Plasma Physics, 2009年6月30日, Sofia, Bulgaria
- ⑤ T. Taguchi, T. M. Antonsen Jr. and H. Milchberg, Anisotropic energy spectra of fast ions generated by a laser-cluster interaction analyzed by a collisional PIC code, 50th Annual Meeting of the Division of Plasma Physics, APS meeting, 2008年11月19日, Dallas, US
- ⑥ H. Sakagami, T. Nakamura, T. Johzaki, H. Nagatomo, Y. Nakao, T. Taguchi and K. Mima, Integrated Simulations and Respective Simulation Modeling for FIREX-I, 22nd IAEA Fusion Energy Conference, 2008年10月14日, Geneva, Switzerland
- ⑦ T. Johzaki, M. Murakami, H. Azechi, K. Mima, Ignition and Burn Dynamics of DT fuels in Impact Fast Ignition, International Congress on Plasma Physics 2008 2008年9月10日, Fukuoka, Japan
- ⑧ H. Sakagami, T. Johzaki, H. Nagatomo, T. Nakamura, and K. Mima, Generation Control for Fast Electron Beam in Fast Ignition, 35th European Physical Society Conference on Plasma Physics, 2008年6月12日, Sofia, Bulgaria
- ⑨ T. Taguchi and T. M. Antonsen Jr., Development of a collisional PIC code for an analysis of cluster plasmas, 49th Annual Meeting of the Division of Plasma

Physics, APS meeting, 2007年11月13日, Orlando, US

- ⑩ H. Sakagami, T. Johzaki, H. Nagatomo, T. Nakamura, and K. Mima, Scaling Law for Fast Electron Beam Intensity in Fast Ignition, 5th International Conference on Inertial Fusion Sciences and Applications, 2007年9月14日, Kobe, Japan
- ⑪ T. Johzaki, H. Nagatomo, T. Nakamura, H. Sakagami, K. Mima, and R. Kodama, Integrated simulations for transport of laser-produced relativistic electrons in solid targets, 5th International Conference on Inertial Fusion Sciences and Applications 2007年9月14日, Kobe, Japan
- ⑫ T. Nakamura, H. Nagatomo, T. Johzaki, H. Sakagami, and K. Mima, Optimization of cone targets for fast ignition, 5th International Conference on Inertial Fusion Sciences and Applications, 2007年9月12日, Kobe, Japan
- ⑬ H. Sakagami, T. Johzaki, T. Nakamura, H. Nagatomo, and K. Mima, Fast Electron Generation by Long Pulse Laser, 34th European Physical Society Conference on Plasma Physics 2007年7月3日, Warsaw, Poland
- ⑭ T. Nakamura, K. Mima, H. Sakagami, T. Johzaki, and H. Nagatomo, Electron Surface Acceleration by Using Capillary Targets, 34th European Physical Society Conference on Plasma Physics, 2007年7月4日, Warsaw, Poland

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

坂上 仁志 (SAKAGAMI HITOSHI)

核融合科学研究所・

シミュレーション科学研究部・教授

研究者番号：3 0 2 5 4 4 5 2

### (2) 研究分担者

田口 俊弘 (TAGUCHI TOSHIHIRO)

摂南大学・工学部・教授

研究者番号：9 0 1 7 1 5 9 5

(H20→H21：連携研究者)

城崎 知至 (JOHZAKI TOMOYUKI)

大阪大学・レーザーエネルギー学

研究センター・特任研究員

研究者番号：1 0 3 9 7 6 8 0

(H20→H21：連携研究者)

中村 龍史 (NAKAMURA TATSUFUMI)

大阪大学・レーザーエネルギー学

研究センター・特任研究員

研究者番号：4 0 3 1 8 7 9 6

(H19→H20：研究分担者除外)