

宮永 憲明

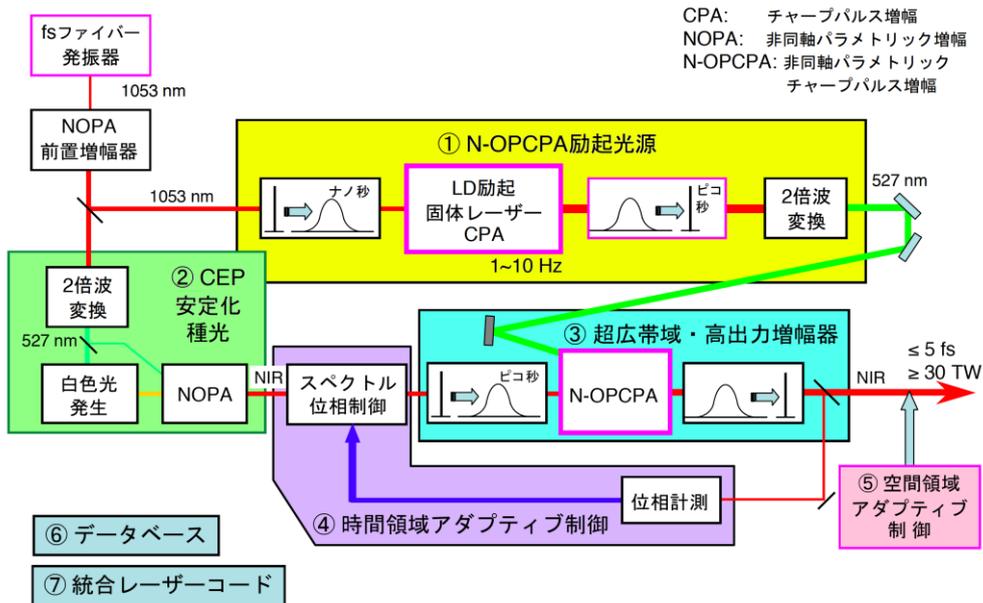
大阪大学レーザーエネルギー学  
研究センター・教授

アダプティブパワーフォトリクスの基盤技術

1. 研究実施の概要

全体計画概要

本研究では、レーザー光に空間的・時間的光波制御を加味することによって、物質との相互作用、特に非線形相互作用における新しい現象の研究を目指している。そのために、搬送波包絡線位相（光電場振動の絶対位相）を制御した数サイクル（ $\leq 5\text{fs}$ ）超短パルスと  $30\text{TW}$  のピークパワーを  $10\text{Hz}$  の繰り返しで実現するレーザー装置（基盤装置）を開発しつつ、併せて光波の空間的位相・偏光分布制御技術を開発している。



平成 19 年度までの成果の概要

平成 19 年度までに、超広帯域光（中心波長約  $800\text{nm}$ 、スペクトル幅  $200\sim 270\text{nm}$ ）の

発生とその搬送波包絡線位相の安定化技術、超広帯域増幅技術（中心波長 800~900nm、スペクトル幅約 300nm 及び中心波長 1000~1100nm、スペクトル幅 400~500nm の非同軸光パラメトリック増幅の最適化）、及び高出力光パラメトリック増幅に必要な励起レーザー（半導体レーザー（LD）励起 Nd:ガラスレーザーのチャープパルス増幅システム）の開発を開始した。

#### 平成 20 年度実施概要

- ①非同軸光パラメトリックチャープパルス（N-OPCPA）増幅の励起源開発  
LD 励起固体レーザーの増幅試験（ジュール級出力のチャープパルス増幅）を行い、高出力化を図っている。
- ②搬送波包絡線位相（CEP）安定化種光の開発  
昨年度開発した光パラメトリック増幅におけるアイドラー光を活用した CEP 安定化光源について、波長帯域の拡大に関する検討を行った。
- ③超広帯域・高出力増幅器  
中心波長 1000~1100nm における近縮退非同軸光パラメトリック増幅の高出力化に向けて、重水素置換率を最適化した DKDP 結晶を用いて広帯域パラメトリック増幅 (>250nm) を実証した。
- ④時間的アダプティブ制御  
CEP 評価及び制御のための MIIPS (Multiphoton Interpulse Interference Phase Scan) 法の開発を開始した。
- ⑤空間的アダプティブ制御  
数サイクル光の渦や軸対称偏光レーザーパルス発生のための素子に関して検討を開始した。
- ⑥データベース  
反射光除去用のファラデー素子に関して TGG 結晶の低温冷却特性を評価するとともに、誘電体多層膜回折格子のピコ秒レーザーによる損傷を評価した。
- ⑦統合レーザーコード  
①~③で用いられる第 2 高調波変換や非同軸パラメトリック増幅に関する計算機コードを整備している。

## 2. 研究実施内容(文中にある参照番号は 4.(1)に対応する)

- ①非同軸光パラメトリックチャープパルス（N-OPCPA）増幅の励起源開発（川嶋グループ、宮永グループ）  
非同軸光パラメトリック増幅(NOPA)の励起光源として、ファイバー発振器、ストレッチャーおよび光パラメトリック増幅（OPA）列からなるフロントエンド部と半導体レーザー（LD）励起 Nd:ガラスレーザー増幅器を組み合わせたシステムを構築中である。図 2 に示すように N-OPCPA 励起用のピコ秒パルスに必要なスペクトル幅 (3.7nm) を達成し、出力レベルとしては 2.4 J/パルスまでを実証した。

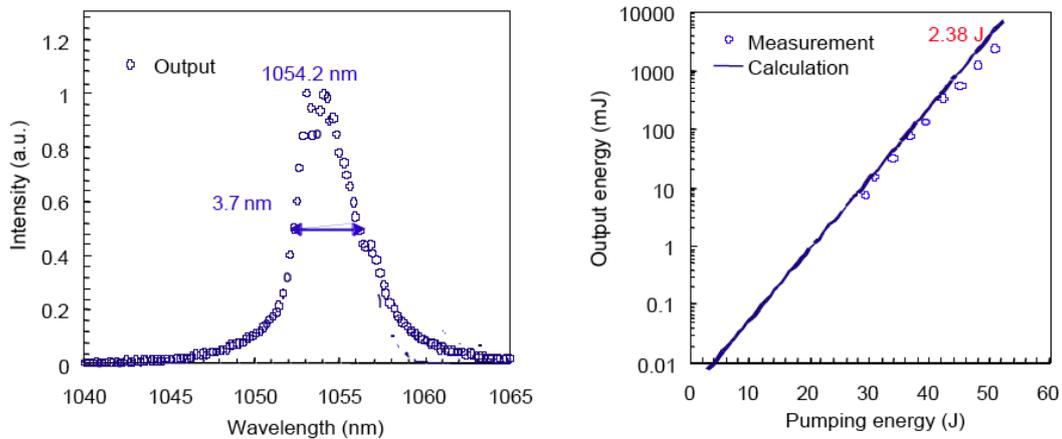
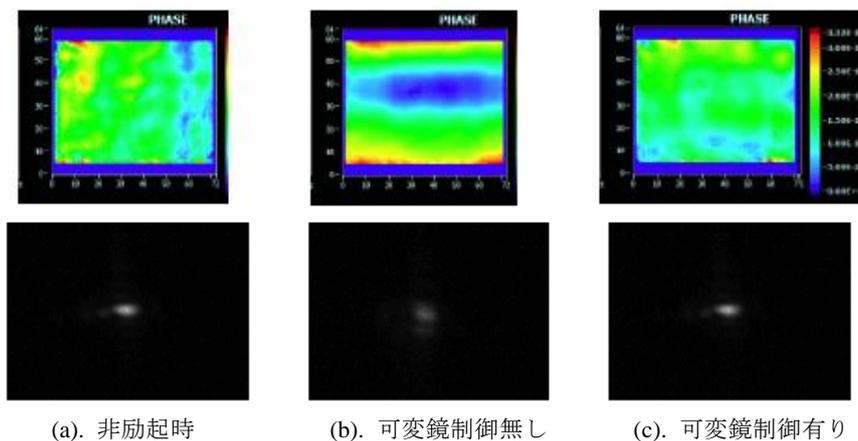


図2 .LD 励起 Nd:ガラス増幅器によるチャープパルス増幅特性

このチャープパルスを誘電体多層膜回折格子を用いたパルス圧縮器まで転送するための像転送テレスコープを構築するとともに、レーザー波面歪みを補正するための可変形鏡を導入し、その特性評価を開始した。図3にNd:ガラスレーザー増幅器を4回通過後の波面分布（上段）と遠視野像（下段）をそれぞれ示す。図3(a)は非励起時の波面データを示しており、P-V（Peak-Valley）値で $\lambda/4$ が得られ回折限界に近い遠視野像が得られた。ここにLDから平均パワー130Wで励起した場合、熱歪みによって図3(b)のように波面分布は $1\lambda$ （P-V）まで悪化し、遠視野像のピーク強度の低下が見られた。これに対して、図3(c)のように可変形鏡による制御を行うことによって、波面歪みは $\lambda/3$ （P-V）まで改善するとともに非励起時と同等の遠視野特性が得られ、高ビーム品質のNOPA励起用レーザー光を供給することが可能となった。



(a). 非励起時 (b). 可変鏡制御無し (c). 可変鏡制御有り

図3. 可変鏡による波面制御と遠視野像.

さらに今年度は、ピコ秒レーザーパルスを超広帯域パラメトリック増幅に適した波長に変換する実験を開始した。DKDP結晶への入力エネルギー（入力光強度）に対する出力エネルギー及び波長変換効率の計算結果を図4に示す。ここでの計算条件はビームのサイズを4cm角、パルス幅を10ps、繰り返し10Hz、入射角度ずれおよびビー

ム発散角をそれぞれ 0.2mrad とし、ビームサイズが十分大きいことからワークオフの影響を無視した。赤の実線が結晶長 7mm、青の実線が 5mm の場合であり、変換効率 80%（出力パルスエネルギー 2.4J）が得られことを示した。この計算結果に基づいて製作した第 2 高調波発生器の概観写真を図 5 示す。

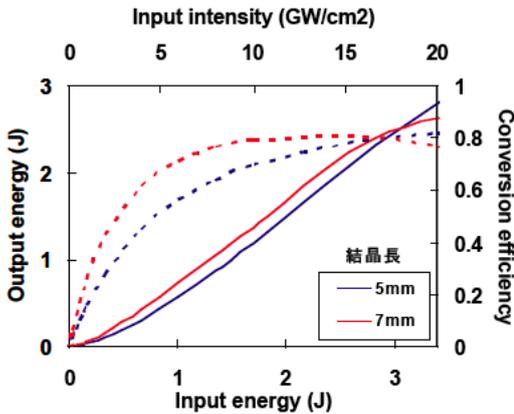


図 4 第 2 高調波の変換特性.

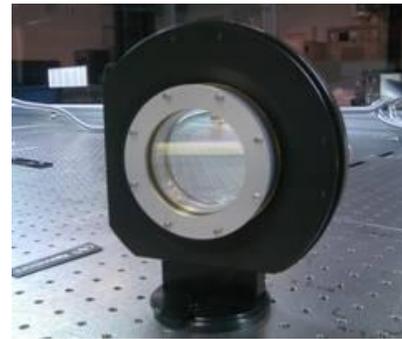


図 5 DKDP 第 2 高調波発生器の概観写真.

使用した DKDP 結晶は、サイズ  $\phi 65\text{mm}$ 、厚さ 5mm 及び 7mm、重水素置換率 98%、カット角度  $56.13^\circ$ （位相整合角度は  $53.13^\circ$ ）である。

②搬送波包絡線位相（CEP）安定化種光の開発（宮永グループ）

昨年度開発した光パラメトリック増幅におけるアイドラー光を活用した CEP 安定化光源について、波長帯域の拡大に関する検討を行った。

③超広帯域・高出力増幅器（山川グループ、宮永グループ）

数サイクルに対応するスペクトル幅を有するパルスを TW の出力まで増幅するのに必要な BBO 結晶の仕様の最適化を行い、150mJ 出力エネルギーを得るための 3 段の N-OPCPA を設計した。図 6 に示すように 3 段目の増幅段において 5fs まで圧縮可能な 300nm 以上のスペクトルが得られ、結晶厚さ 3mm において損傷閾値以下で十分な利得が得られることを確認した。

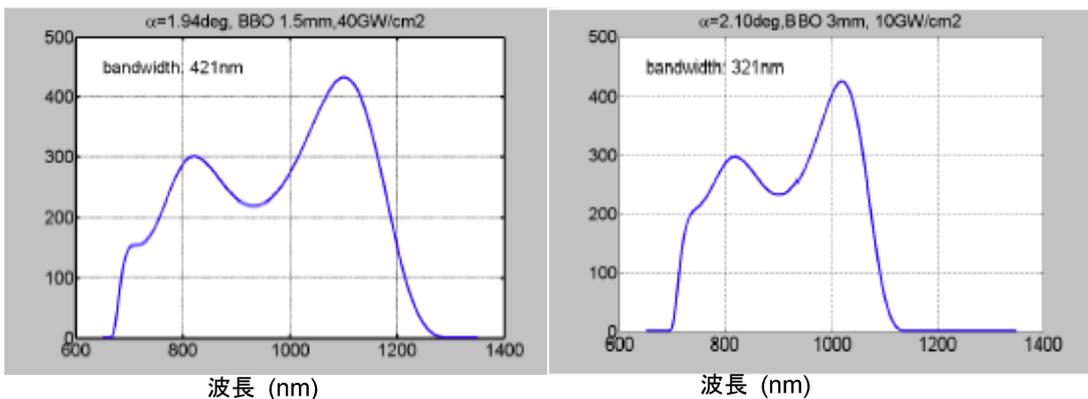


図 6 N-OPCPA 最終段の最適化. BBO 結晶の厚さは 1.5mm (左) と 3mm (右) .

さらに、現在広く用いられている BBO 結晶に比べて大口径化が可能である LBO 結晶（2軸性の非線形光学結晶）を用いて NOPA 増幅試験を行った。図7に示すように最大の増幅バンド幅として 200nm を達成した。

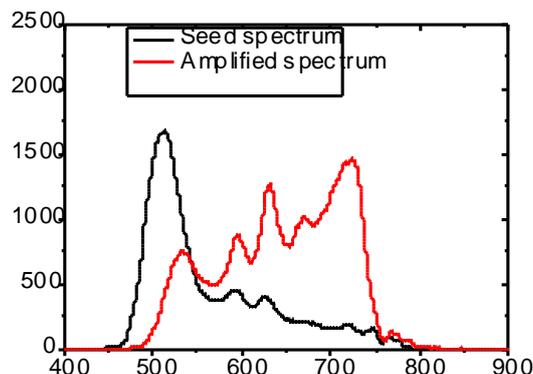


図7 LBO 結晶を用いた広帯域 NOPA の試験結果.

光パラメトリック増幅のさらなる高出力（大口径）化には、重水素置換率を最適化した DKDP が有用である。重水素置換率 13% の DKDP 結晶を用い、図8のように近赤外領域の信号光の増幅波長帯域幅として 250nm 以上を達成した（原著論文 9）。また、重水素置換率を調整することで最大 400nm 以上の増幅帯域幅が得られることを数値解析により明らかにした。

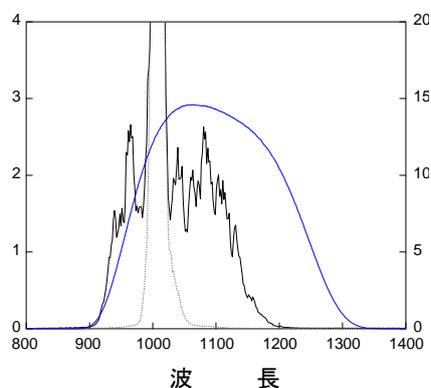


図8 増幅光のスペクトル(黒太線)、計算値(青線)、発振器出力スペクトル(黒細線).

また、広帯域光パラメトリックチャープパルス増幅時の位相シフトについては、位相整合条件を最適化することにより、位相シフト量を任意に制御できることを明らかにした（原著論文 4）。さらに、超広帯域光パラメトリックチャープパルス増幅については、異なる位相整合角を有する 2 ビーム励起光増幅器の最適化を実施し、昨年度得られた増幅波長帯域幅 350nm を大幅に更新し、550nm の帯域幅を達成した。

#### ④時間的アダプティブ制御（宮永グループ）

図9に示すようなMIIPS (Multiphoton Interpulse Interference Phase Scan) 法の開発を開始し、数サイクルパルス (300nm 以上のスペクトル幅) に適用可能な高次分散計測・補償光学系の計算機シミュレーションを行うとともに、そのシステム構築を開始した。

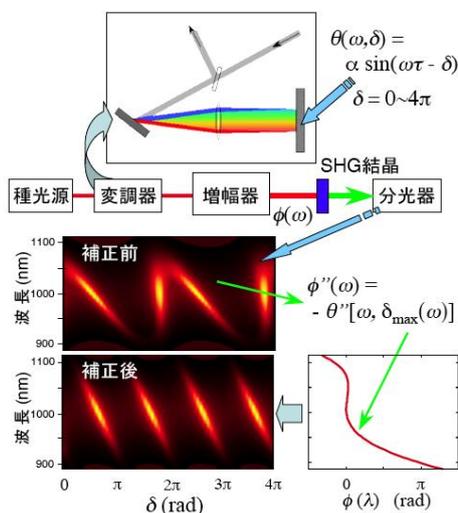


図9 時間的アダプティブ制御の原理と制御性の評価.

また、パルス伸延、圧縮用のチャープミラーに関して検討するとともに、試作品を入手してその特性評価を開始した。

⑤空間的アダプティブ制御 (宮永グループ、藤田グループ)

数サイクル光の渦や軸対称偏光レーザーパルス発生のための素子に関して検討を開始した。これまで、ラゲールガウシアンビーム (光の渦) 発生には螺旋位相板を用いてきたが、本研究では位相板による群速度分散を避けるために、信号光の位相が保存される光パラメトリック過程を利用して光の渦を増幅する。そのために、図10に示すように、反射型液晶空間変調器を用いてTi サファイアフェムト秒レーザーパルスの光の渦発生を試験した。次年度に、この光の渦の増幅特性を評価する計画である。

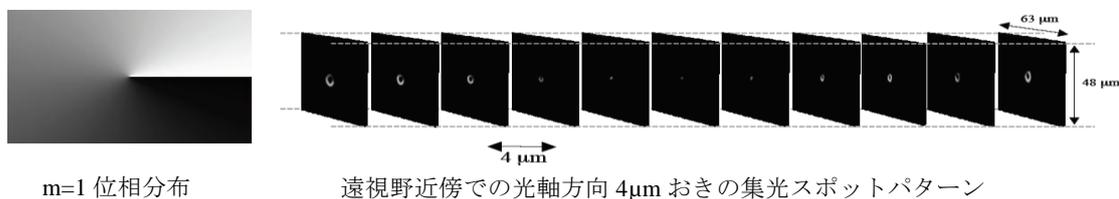


図10 液晶空間位相変調器に m=1 螺旋位相分布を与えた場合の集光スポットパターン.

軸対称偏光発生素子としては、これまでネマティック液晶を用いた空間的旋光分布制御素子を自作していた。これに代えて、市販のフォトニック結晶型の素子を試験した。図 11 に軸対称偏光 Ti サファイアフェムト秒レーザー光の集光パターンならびにそれを用いてナノ周期構造を作成した。変更状態を radial (放射状) 偏光及び azimuthal (同軸状) 偏光にすることによって、同軸状及び放射状の偏光に直交するナノ周期構

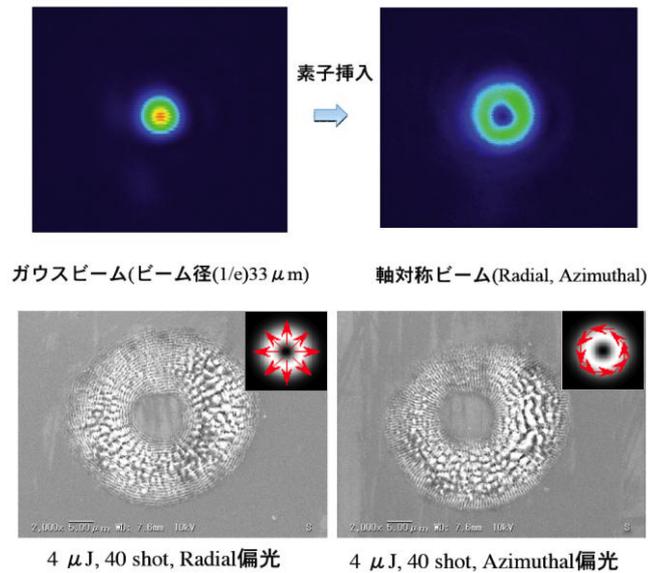


図 11 ガウスビームから軸対称偏光への変換（上段）及びナノ周期構造の形成（下段）。  
下段の写真で、左右は各々 radial 偏光、azimuthal 偏光に対応する。

造を形成可能である。

数サイクルレーザーと物質の相互作用を研究するために PIC 粒子コードの改良を行っている。図 12 は、10fs、 $10^{18}\text{W}/\text{cm}^2$  のレーザーパルスが低密度ガス中を伝搬する様子を調べたものである。伝搬に伴ってバブルが生成され、単色に近い電子（この計算では約 8MeV）が加速されることが観測され、今後バブル形成・電子加速のパルス幅や偏光分布依存性を調べる。また、今後は 1 オクターブに近いチャープパルスがプラズマを伝搬する際に発生するラマン過程と音波生成、ならびにそれを利用したイオン加速等についても研究する計画である。

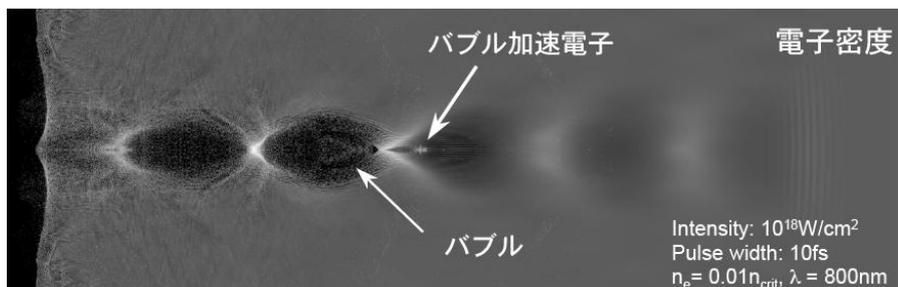


図 12 超短パルスが低密度ガス中に生成するバブルと電子加速の単色性の改善。

⑥データベース（藤田グループ、宮永グループ）

ピコ秒パルスレーザー(100mJ、3.6ps、波長 1053nm)装置を用いて、パルス圧縮用の誘電体多層膜回折格子の損傷評価試験を行った。測定条件は、真空雰囲気、レーザー入射角度  $72^\circ$  である。図 13 にパルス幅 9.8ns、波長 1064nm のレーザー光による試験結果と併せて、損傷閾値のパルス幅依存性を示す。電子雪崩に起因する損傷機構では閾値はレーザーパルス幅の 1/2 乗に比例するが、ピコ秒領域では 1/2 乗則による値よりも高くなることが確認された。

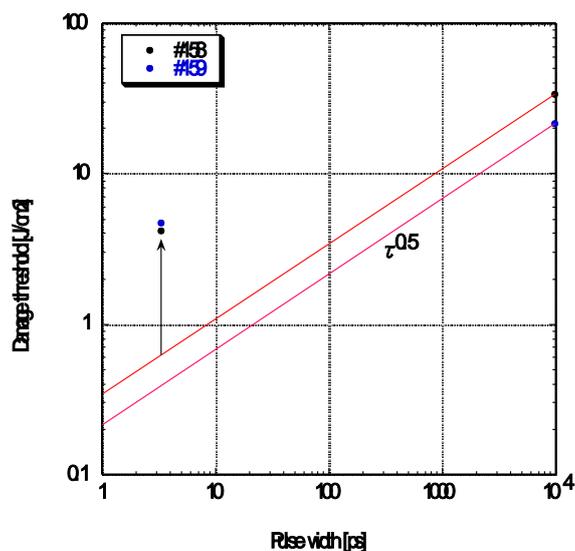


図 13 誘電体多層膜回折格子のレーザー損傷閾値.

また、図 14 に示すように、光学材料の物性値の人為的制御の例として、TGG セラミックスのベルデ定数の温度依存性を計測し、ファラデー回転子としての性能が低温下で飛躍的に向上することを実験的に明らかにした。(原著論文 2))

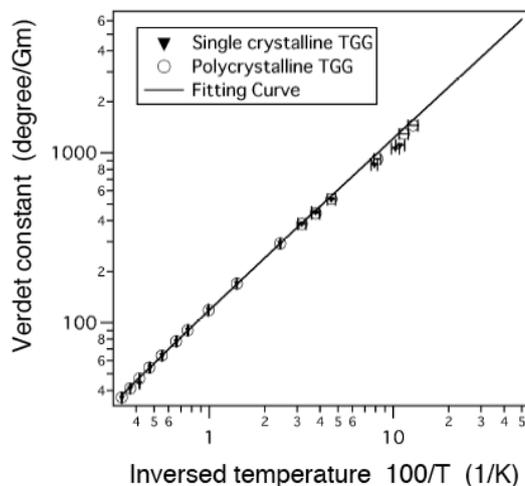


図 14 TGG セラミックのベルデ定数の温度依存性.

⑦統合レーザーコード（宮永グループ）

①～③で用いられる第2高調波変換や非同軸パラメトリック増幅に関する計算機コードを整備している。

⑧基幹装置構築のための環境整備（宮永グループ、川嶋グループ）

基幹装置を組み上げて高出力化の段階に入るためにはシステム全体の防塵が不可欠であり、また安定動作のためには温度の安定化が必要である。そのために図15に示すようにクリーンルームの整備を行った。次年度早々にはクリーンルームを稼働させ、基幹装置の全コンポーネントの組み立てに入る予定である。



数サイクル種光とOPCPAエリア（手前） LD励起CPAガラスレーザー（手前）

図15 基幹装置を構築するためのクリーンルーム及び温度制御等の環境整備。

### 3. 研究実施体制

(1)宮永グループ

①研究分担グループ長：宮永 憲明（大阪大学、教授）

②研究項目

基幹装置技術の開発（超広帯域種光技術の開発と基幹装置の構築）

光波メトロロジー・アダプティブ制御

光学材料データベースと統合レーザーコード

(2)山川グループ

①研究分担グループ長：山川 考一（(独) 日本原子力研究開発機構、研究主幹）

②研究項目

超広帯域光パラメトリックチャープパルス増幅・パルス圧縮技術の開発

多層膜素子の分散評価

(3)川嶋グループ

①研究分担グループ長：川嶋 利幸（浜松ホトニクス株式会社、主任部員）

②研究項目

高出力ピコ秒パルス技術、高効率波長変換技術、及び高出力化・安定化技術

(4)藤田グループ

①研究分担グループ長：藤田 雅之（(財)レーザー技術総合研究所、主任研究員）

②研究項目

多層膜素子と光学材料の高耐力化のためのデータ蓄積

#### 4. 研究成果の発表等

(1) 論文発表（原著論文）

1. Baozhen Zhao, Yongliang Jiang, Keiich Sueda, Noriaki Miyanaga, and Takayoshi Kobayashi, "Ultrabroadband noncollinear optical parametric amplification with LBO crystal" Optics Express, Vol. 16 Issue 23, pp.18863-18868 (2008).
2. R. Yasuhara, S. Tokita, J. Kawanaka, T. Kawashima, H. Kan, H. Yagi, H. Nozawa, T. Yanagitani, Y. Fujimoto, H. Yoshida, and M. Nakatsuka, "Development of cryogenic TGG ceramic based Faraday rotator for inertial fusion driver", Journal of Physics: Conference Series, The fifth International Conference on Inertial Fusion Sciences and Applications, vol. 112, 032059 (2008).
3. T. Harimoto and K. Yamakawa "Recompression of a Femtosecond Second-Harmonic Pulse Based on Combined Action of Group-Velocity Dispersion and Phase Modulations in a Potassium Dihydrogen Phosphate Crystal", Japanese Journal of Applied Physics, Vol. 47, pp. 4547-4551 (2008).
4. 小澤祐貴, 張本鉄雄, 山川考一  
「光パラメトリックチャープパルス増幅における位相シフトの数値解析」  
レーザー研究, Vol.36, pp.374-378 (2008).
5. 宮永憲明  
「大出力レーザー応用の拡がり」  
レーザー研究, Vol.36, pp.530-537 (2008).
6. 山川考一, 青山 誠, 赤羽 温, 小川 奏, 辻 公一  
「超高強度数サイクルレーザー」  
レーザー研究, Vol.36, pp.555-561 (2008).
7. K. Sueda, J. Lu, K. Kondo, R. Mizoguchi, K. Tauchi and N. Miyanaga, "Pulse shape control of a high-energy PW laser for fast ignition of laser fusion" accepted to Laser Phys. Lett.
8. K. Sueda, R. Nakajima, Z. Baozhen T. Kawashima, M. Fujita, K. Yamakawa, N. Miyanaga "Generation of self-phase-stabilized pulses for intense few-cycle laser system" accepted to Laser Phys. Lett.

9. K. Ogawa, K. Sueda, Y. Akahane, M. Aoyama, K. Tsuji, K. Fujioka, T. Kanabe, K. Yamakawa and N. Miyanaga  
“Controlling the phase matching conditions of optical parametric chirped-pulse amplification using partially deuterated KDP”  
accepted to Optics Express.

(2) 特許出願

平成 20 年度 国内特許出願件数：1 件（CREST 研究期間累積件数：1 件）