

機関番号：12605  
 研究種目：若手研究(B)  
 研究期間：2009～2010  
 課題番号：21760252  
 研究課題名（和文） 光パルスシンセサイザを用いたスーパーコンティニウムコム光の広帯域化・平坦化  
 研究課題名（英文） Broad and uniform supercontinuum comb generation using an optical pulse synthesizer  
 研究代表者  
 柏木 謙 (KASHIWAGI KEN)  
 東京農工大学・大学院工学研究院・助教  
 研究者番号：10509730

研究成果の概要(和文):本研究課題では周波数軸上で光を変調して合成した光パルスを用いて、広帯域かつ平坦なスーパーコンティニウムコム光源のスペクトルの生成を目指した。パルス合成の制御方法を改善してパルス合成精度が向上したため、スペクトルの平坦性が向上した。また、広帯域化にはピーク強度向上が必要なため、圧縮後パルスの形状制御を検討した。圧縮前の数ピコ秒のパルス形状を制御することで、圧縮後のパルス形状が制御可能となり、またサブピコ秒オーダーにまで圧縮できた。

研究成果の概要(英文): In this study, optical pulses, which were synthesized by frequency domain modulation, were used as seed pulses of broad and uniform supercontinua. We changed a method of the pulse synthesis, and suppressed the background noise of the pulses. The suppression improved the uniformity of supercontinua. We studied reconfigurable pulse compression for peak power enhancement of the seed pulses. The compressed pulse waveforms were controlled by changing the initial pulse waveform, and sub-ps wide compressed pulse was achieved.

#### 交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	1,800,000	540,000	2,340,000
2010年度	1,600,000	480,000	2,080,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,400,000	1,020,000	4,420,000

研究分野：光エレクトロニクス

科研費の分科・細目：電気電子工学、電子デバイス・電子機器

キーワード：光周波数コム、光パルス合成、スーパーコンティニウム、非線形光学

#### 1. 研究開始当初の背景

広い帯域を有する光周波数コムは、計測・分光を始めとして、様々な分野への応用が期待されている。光周波数コムは周波数軸上で等間隔の周波数成分を有する光を指す。光周波数コムの広帯域化には、高強度の光パルスを非線形ファイバに伝搬させるスーパーコンティニウム(SC)光生成技術を利用する。一般的にはSC光の周波数間隔は狭く、分光

器で各周波数成分を分解しての観測が不可能であった。

そこで、分光器で分解できる以上のスペクトル間隔(10GHzオーダー)を有し、さらに各周波数成分の絶対周波数が規定可能な広帯域光周波数コムが求められていた。(ここでは、10GHzオーダー以上の周波数間隔を有するSCを「SCコム」と記載する。)

## 2. 研究の目的

本研究課題では、SC コム光のスペクトルのさらなる平坦化かつ広帯域化を目的とする。平坦かつ広帯域な SC コム光を生成するために、任意形状の光パルスが合成可能な光パルスシンセサイザから生成した光パルスを利用する。光パルスシンセサイザは、時空間変換信号処理を原理として、光を周波数軸上で振幅・位相を変調することで任意形状の光パルスが合成できる(図 1)。研究代表者は変調信号の決定に、遺伝的アルゴリズムを用いて最適化しており、評価対象としては生成された光パルスの波形を利用する手法をとっている。

SC コムのスペクトルは使用する光パルスと非線形ファイバの特性から決定されてしまう。任意形状の光パルスが合成可能な光パルスシンセサイザを用いる本研究課題では、SC コム光のスペクトル形状の制御が可能である。この任意性を用いて、広帯域性と平坦性の両立を目指す。

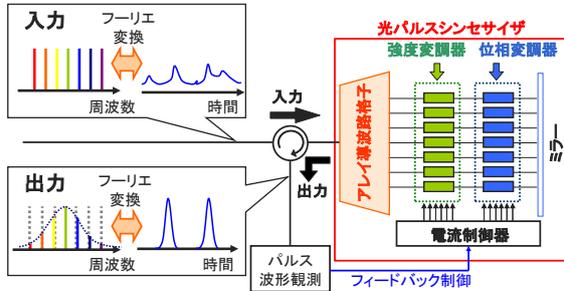


図 1 光パルスシンセサイザの動作模式図

## 3. 研究の方法

### (1) 精密光パルス合成と SC コム光生成

図 2 に光パルス合成と SC コム光生成用の実験系を示す。単一周波数レーザからの光を縦続接続した 2 つの位相変調器により変調して、帯域の狭い光周波数コムを生成する。そのコムを光パルスシンセサイザに導入して、各周波数成分の振幅と位相を独立に制御することによって光パルスを合成する。光パルスを合成するための変調信号は、遺伝的アルゴリズムを用いて光パルス形状を評価して、求める形状となるようにフィードバック制御することにより最適化している。

合成した光パルスを SC コム光生成に利用する場合、合成した光パルスの精密さが SC コム光のスペクトル平坦性に影響を与えることがわかっていた。その精密さは光パルスシンセサイザへの変調信号の最適化が不十分であったためである。そこで、遺伝的アルゴリズムの評価方法を改善した。従来はパルスのピークパワーが高くなるように、光パルスシンセサイザをフィードバック制御していた(図 3(1)「ピーク法」と呼ぶ)。しかし、パルスの背景雑音が残りに、これがスペクトル

の平坦性を劣化させていた。そこで、パルス形状と目標波形との差分を小さくする方法に変更することで、パルスの背景雑音抑圧を目指した(図 3(2)「差分法」と呼ぶ)。さらには、生成した光パルスからの SC コム光の生成を行った。

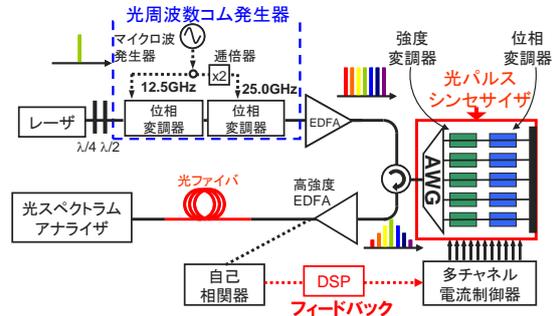


図 2 光パルス合成と SC コム光生成系

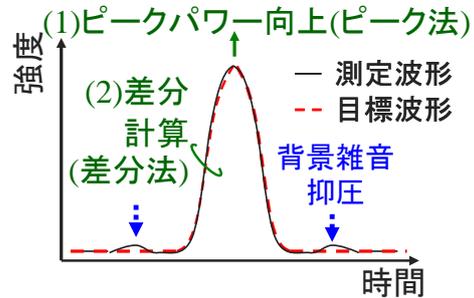


図 3 光パルスの評価関数の変更

### (2) 圧縮パルスの制御

広帯域な SC コム光を生成するためには、高いピーク強度のパルスが必要である。使用している光パルスシンセサイザでは生成できる光パルスの幅は 3ps 程度が最短となる。これでは、光ファイバ増幅器の出力制限からピーク強度が十分に得られない。そこで、光パルスシンセサイザからのパルスを圧縮する手法について検討した。圧縮されたパルスは一般的には歪んでしまい、主ピーク以外の残留成分(ペDESTAL)が生じてしまう問題がある。このペDESTALは SC コム光の平坦性を劣化させてしまう。そこで、圧縮後のパルスを評価対象として光パルスシンセサイザにフィードバック制御を行い、圧縮パルスの形状制御とペDESTAL抑圧について検討した(図 4)。

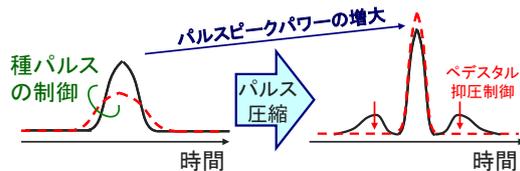


図 4 光パルス圧縮によるピーク強度向上と圧縮後パルスの制御

#### 4. 研究成果

##### (1) 精密光パルス合成と SC コム光生成

中心波長 1560 nm の単一周波数レーザからの光を位相変調器 2 台を用いて変調して、12.5 GHz 間隔の帯域幅 400 GHz の光周波数コムを生成した。光周波数コムを光パルスシンセサイザに導入して、各コム成分の振幅・位相を独立に制御した。光パルスシンセサイザは 12.5 GHz 間隔の 30 本のコム成分を振幅と位相をそれぞれ独立に制御可能である。その結果、繰り返し周波数 12.5 GHz、パルス幅 3.2 ps のガウシアンパルスを生成した。

光パルスシンセサイザの制御方法をピーク法から差分法に変更し、精密なパルス合成方法を確立した。また、弱い背景雑音についても評価しやすいように、信号強度の対数で差分を評価した。

2 つの制御方法により生成したパルス波形を図 5 に示す。規格化光強度は対数軸で示した。Pulse 1, 2 はそれぞれピーク法と差分法を用いて生成したパルスである。差分法に変更することで、光パルスの背景雑音が 4 dB 抑制できた。

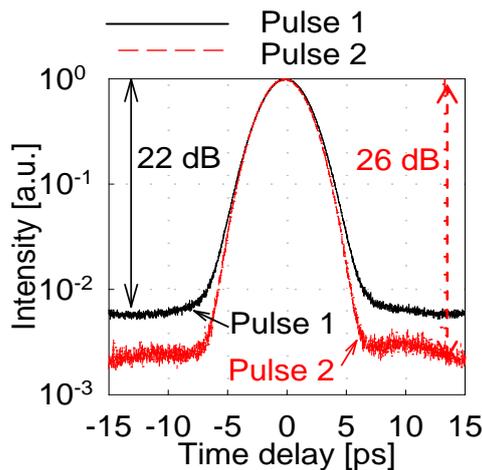


図 5 パルス合成手法最適化による背景雑音抑制

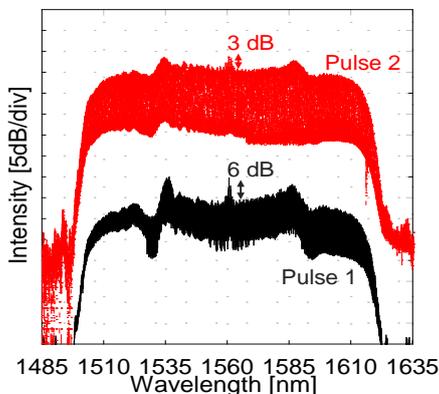


図 6 図 5 中の 2 種パルスを用いて生成した SC コム光

続けて、図 5 に示した合成パルスを種として SC コム光を生成した。それぞれのパルスを高出力光ファイバ増幅器を用いて高強度に増幅し、SC コム光生成用の分散フラットファイバに導入して生成した(図 6)。

両 SC コム光のスペクトルの種パルス波長である 1560 nm にピークが存在した。Pulse 1, 2 で生成した SC コム光のピークはそれぞれ 6 dB と 3 dB であり、差分法に変更することで 3 dB 抑圧することが出来た。また、SC コム光の 20 dB 帯域は、それぞれ 116, 118 nm であった。Pulse 2 は背景雑音部分が抑圧されたことで、光ファイバ増幅器が効率的に光パルスを増幅し、光ピーク強度が増大して帯域が広がったと考えられる。

##### (2) 圧縮パルスの制御

パルスシンセサイザで合成した 3.2 ps 幅のガウシアンパルスを増幅した後に光パルス圧縮用のファイバに伝搬させてパルスを圧縮した。図 7 に圧縮前後の光パルスのスペクトルと自己相関波形を示す。ここでは単純に圧縮したのみで圧縮前パルスの制御は行っていない。パルス幅は 1.01 ps にまで圧縮された。圧縮パルスには、パルスの前後にペDESTAL成分を有していることがわかる。

続いて圧縮後パルスを差分法により評価し、光パルスシンセサイザにフィードバックしてペDESTAL抑圧を図った。その結果を図 8 に示す。パルス幅が 1.06 ps とわずかに広がってしまったが、パルス前後のペDESTALが抑圧できた。また、圧縮用の光ファイバを変更することで、圧縮後のパルスがサブピコ秒(0.5 ps 以下)にまで圧縮できた。

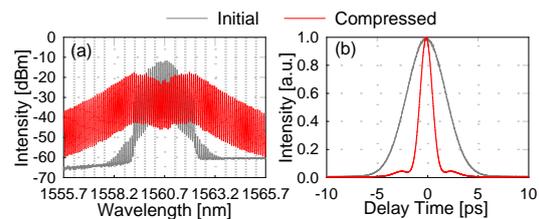


図 7 圧縮前後の光パルス  
(a) 光スペクトル (b) 自己相関波形

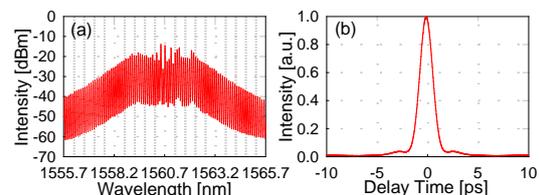


図 8 圧縮前光パルスを制御した圧縮パルス  
(a) 光スペクトル (b) 自己相関波形

## 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 2 件)

- ① Tatsutoshi Shioda, Kenichiro Fujii, Ken Kashiwagi and Takashi Kurokawa, “High-resolution spectroscopy combined with the use of optical frequency comb and heterodyne detection”, Journal of Optical Society of America B, Vol.27, No. 7, pp.1487-1491, 29th June, 2010. 査読有
- ② Ken Kashiwagi, Yuichiro Kodama, Ryo Kobe, Tatsutoshi Shioda, Yosuke Tanaka, and Takashi Kurokawa, “Fiber Transmission Characteristics of Optical Short Pulses Generated by Optical Pulse Synthesizer,” Japanese Journal of Applied Physics, vol. 48, no. 9, pp.09LF02, 24th Sep. 2009. 査読有

[学会発表] (計 17 件)

- ① 小島崇人, 粕谷洋介, 柏木謙, 黒川隆志, 崔森悦, “光周波数コム間隔掃引干渉法の高分解能化,” 2011 年春季 第 58 回 応用物理学関係連合講演会 (講演会中止・発表みなし成立), 2011 年 3 月 24 日 (3 月 9 日講演予稿集発行), 神奈川工科大学 (神奈川県)
- ② 粕谷洋介, 柏木謙, 黒川隆志, “スーパーコンティニューム光の広帯域化による高分解干渉計測,” 2011 年春季 第 58 回 応用物理学関係連合講演会 (講演会中止・発表みなし成立), 2011 年 3 月 24 日 (3 月 9 日講演予稿集発行), 神奈川工科大学 (神奈川県)
- ③ 水野陽介, 石津裕之, 柏木謙, 黒川隆志, “光パルスシンセサイザを用いた波形整形可能なパルス圧縮,” 2011 年春季 第 58 回 応用物理学関係連合講演会 (講演会中止・発表みなし成立), 2011 年 3 月 24 日 (3 月 9 日講演予稿集発行), 神奈川工科大学 (神奈川県)
- ④ 井上真嘉, 茂澤清信, 柏木謙, 田中洋介, 黒川隆志, “1 THz 帯域の光パルスシンセサイザを用いたパルス生成,” 2011 年春季 第 58 回 応用物理学関係連合講演会 (講演会中止・発表みなし成立) 2011 年 3 月 24 日 (3 月 9 日講演予稿集発行), 神奈川工科大学 (神奈川県)
- ⑤ Kiyonobu Mozawa, Hiroyuki Ishizu, Yuichiro Kodama, Ken Kashiwagi, and Takashi Kurokawa, “Fiber network

characterization by transmission analysis of test pulses generated by optical pulse synthesizer,” 16th Microoptics Conference, 3rd Nov. 2010, Hsinchu, Taiwan

- ⑥ Yosuke Kasuya, Hiroyuki Ishizu, Ken Kashiwagi, Naoyuki Tamura, Samuel Choi, and Takashi Kurokawa, “Interferometric signal evaluation by mode-frequency sweep of supercontinuum,” 16th Microoptics Conference, 2nd Nov. 2010, Hsinchu, Taiwan
- ⑦ Hiroyuki Ishizu, Yuichiro Kodama, Ken Kashiwagi, and Takashi Kurokawa, “Pulse compression control using optical pulse synthesizer and phase modulator,” 16th Microoptics Conference, 1st Nov. 2010, Hsinchu, Taiwan
- ⑧ Ken Kashiwagi, Hiroyuki Ishizu, and Takashi Kurokawa, “Reconfigurable Compressed Pump Pulse Using Optical Pulse Synthesizer for Broadband Supercontinuum Generation through Dispersion Flattened Fiber,” 16th Microoptics Conference, 1st Nov. 2010, Hsinchu, Taiwan
- ⑨ Ken Kashiwagi, Hiroyuki Ishizu, Yuichiro Kodama, Samuel Choi, and Takashi Kurokawa, “Highly precise optical pulse synthesis for flat spectrum supercontinuum generation with wide mode spacing,” European Conference on Optical Communication Conference 2010, 22nd Sep. 2010 Turin, Italy
- ⑩ Tatsutoshi Shioda, Kenichi Fujii, Ken Kashiwagi, and Takashi Kurokawa, “High-resolution Spectroscopy Using Interleaved Optical Frequency Comb”, Conference on Lasers and Electro Optics 2010, 18th May. 2010, San Jose, California USA
- ⑪ 石津裕之, 柏木謙, 田中洋介, 黒川隆志, “スーパーコンティニューム光発生のための種パルスの最適化,” 第 57 回 応用物理学関係連合講演会, 2010 年 3 月 19 日, 東海大学 (神奈川県)
- ⑫ Hiroyuki Ishizu, Ken Kashiwagi, Yosuke Tanaka, and Takashi Kurokawa, “Fiber transmission characteristics of parabolic pulses generated by optical pulse synthesizer,” Microoptics Conference, 2009 年 10 月 27 日, Miraikan, Tokyo
- ⑬ 柏木謙, 石津裕之, 小玉雄一朗, 田中洋介, 黒川隆志, “光パルスシンセサイザを用い

たスーパーコンティニューム光の生成”  
第 70 回応用物理学会学術講演会, 2009 年  
9 月 9 日, 富山大学(富山県)

- ⑭ Yuichiro Kodama, Ken Kashiwagi, Yosuke Tanaka, and Takashi Kurokawa “Fiber Transmission Characteristics of Optical Solitons Generated by Optical Pulse Synthesizer” Conference on Lasers and Electro-Optics / Pacific Rim, 2nd Sep. 2009, 上海(中国)
- ⑮ 柏木謙, 田中洋介, 黒川隆志 “光パルスシンセサイザによる光パルス生成とそのファイバ伝搬特性の解析” 第 2 回超高速光エレクトロニクス研究会, 2009 年 8 月 6 日, 東北大学(宮城県)
- ⑯ 柏木謙, 小玉雄一郎, 田中洋介, 黒川隆志, “光パルスシンセサイザを用いた形状可変なパルス圧縮” 2009 年電子情報通信学会 光エレクトロニクス研究会, 2009 年 6 月 19 日, 機会振興会館(東京都)
- ⑰ Ken Kashiwagi, Yuichiro Kodama, Yosuke Tanaka, and Takashi Kurokawa “Tunable Pulse Compression Technique Using Optical Pulse Synthesizer” Conference on Lasers and Electro-Optics, 1st Jun. 2009, Baltimore USA

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

柏木 謙 (KASHIWAGI KEN)  
東京農工大学・大学院工学研究院・助教  
研究者番号: 10509730

### (2) 研究分担者

該当無し

### (3) 連携研究者

該当無し