

機関番号：12605

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2008～2010

課題番号：20360154

研究課題名(和文) 光コムと光シンセサイザによる高速・高密度光信号処理

研究課題名(英文)

Ultrafast signal processing based on optical frequency comb using optical synthesizer

研究代表者

黒川 隆志 (KUROKAWA TAKASHI)

東京農工大学・大学院工学研究院・教授

研究者番号：40302913

研究成果の概要(和文)：

高分解能なアレイ導波路格子からなる光シンセサイザを用いて、繰り返し周波数 12.5 GHz、最小パルス幅 3ps のさまざまなパルス波形の短光パルス整形技術を確立した。発生させたフーリエ限界パルスのファイバ伝搬特性を定量的に明らかにした。光シンセサイザによって生成した短光パルスを非線形ファイバに導入して、広帯域で平坦なスーパーコンティニューム光の発生に成功した。1Gbps 16 波の DWDM 伝送システムにおいて、ローカルコムを用いたヘテロダイン検波により、10km エラーフリー伝送に成功した。

研究成果の概要(英文)：

We developed optical pulse synthesizers which can generate picosecond pulses with a variety of waveforms including Gaussian and  $\text{sech}^2$  shapes. The optimal pulse shape for fiber transmission was experimentally clarified by using the optical pulse synthesizer. The optical pulse synthesizer also enables to reshape the pump pulses optimized for generating a uniform SC with wide mode-spacing over 10 GHz. We have demonstrated a heterodyne detection in a DWDM transmission system with a multicarrier light source based on optical frequency comb. The error-free 1-Gbps DWDM transmission with 25-GHz spacing has been achieved over 10-km.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	7,400,000	2,220,000	9,620,000
2009年度	6,400,000	1,920,000	8,320,000
2010年度	700,000	210,000	910,000
年度			
年度			
総計	14,500,000	4,350,000	18,850,000

研究分野：工学

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：短光パルス、光コム、パルス整形

## 1. 研究開始当初の背景

通信需要の爆発的な増大に伴い、光通信ネットワークの高速化・大容量化に向けた技術革新が望まれている。そのために 100 Gbps 以上の高速化、10 GHz オーダー間隔に信号光を詰め込んだ超高密度波長多重 (DWDM) の研究が盛んになされている。このような伝送容量の拡張と同時に、ネットワーク内のノードでの信号転送の高速化が必須である。

超高速光信号の生成、多重分波、信号処理を光レベルで行うために、研究者らは時空間変換処理に基づく光シンセサイザの開発と、位相変調器を利用した広帯域・高精度な光周波数コム発生の研究を行ってきた。時空間変換処理は当初 A.M.Winer によって回折格子を用いた空間光学系で実現されたが、1997 年 T. Kurokawa (研究代表者) らは、光導波回路で作られた処理系を世界に先駆けて提案

した。一方、コム光を波長多重用光源に適用できれば、1つのレーザから多数の発振周波数の異なる光源を作ることができ、経済的でメンテナンス上も有利である。研究者らは、2006年に50GHz間隔16波の光コムによりDWDM伝送実験を行い、10Gbps信号の100km伝送に初めて成功した。

## 2. 研究の目的

本研究の目的は、「光シンセサイザと光コム発生技術を用いて、次世代光通信の核となる、高速光パルスの生成/高密度波長多重/光パケット生成などの技術を開発する」ことにある。具体的には、

- (1) 光シンセサイザにより発生した短光パルスの波形/位相とファイバ分散・非線形性の関係を明らかにし、自動分散補償技術を開発する。
- (2) 高密度波長多重の送信用光源として広帯域で平坦なコム発生技術、また受信用ローカルコム光発生によるコヒーレント検波技術を開発し、高分解な分波を実現する。
- (3) 光シンセサイザを用いた光パケットの生成と全光処理の最適条件を明らかにする。

## 3. 研究の方法

前半は、短光パルスの波形/位相状態とファイバ伝搬特性との相関の解析や、コム光の最適生成条件の明確化など、基本現象の解明と要素技術の確立に重点をおいて進める。後半は得られた基礎的知見を基に、光パケット生成とその分散補償、DWDM伝送のコヒーレント検波などのシステム応用実験を行い、光シンセサイザ技術の有効性を明らかにする。

(1) ファイバ伝搬特性とパルス整形条件  
光パルスシンセサイザは高速な任意光波形を位相も含めて精密に調整できるところに大きな特長がある。これは従来の短パルスレーザや高速変調器を用いる手法では困難であった。この特長を活かして短光パルスの振幅と位相を精密に調整し、そのファイバ伝搬特性との関係を明らかにする。波形としては、 $\text{sech}^2$ 、Gaussian、両指数型などが従来詳しく計算されているが、精密な測定は十分になされていない。そこでソリトン波形も含めた精密な波形の合成により、ファイバ分散・非線形性の影響をしらべる。

(2) 平坦かつ広帯域な光コム生成

波長多重通信用光源に光コムを適用するためには、平坦性、広帯域性が求められる。そこで、本研究では光シンセサイザと非線形ファイバを用いたコム発生法を提案する。1つは、位相変調器の間に光シンセサイザを導入してコムスペクトルに精密な分散を与え広帯域化する方法である。非線形ファイバを用いる方法は従来からいくつかの研究例があるが、この方法は本質的に高S/N、低ジッターで均一なコムが発生できることが期待できる。

(3) 光パケット生成と自動分散補償

光シンセサイザを用いた光パルス生成技術をもとに、光パケット生成へ拡張する。高速な光サンプリングオシロスコープを用いて波形観測し、その結果をフィードバックする手法を検討する。高速TDM通信で重要な経路特性の同定と波形最適化についても検討する。

(4) 局発コム光の発生とコヒーレント検波

広帯域コムを用いたDWDM伝送を行うためには、高密度に並んだ光信号の1チャンネルだけを取り出さねばならない。このように狭帯域な光フィルタは作製が困難なため、コヒーレントコム検波を導入する。送信側から送られた隣接した2チャンネルの光をもとに、局発のコム光を生成し、ローカルコムを発生する。DWDM伝送信号のコヒーレントコム検波実験を行い、BER測定などからその有効性を確認する。

## 4. 研究成果

(1) ファイバ伝搬特性からみたパルス整形条件の最適化

光シンセサイザにより精密にパルス波形を整形できることを利用して、さまざまなパルス波形のファイバ伝搬特性を調べた。光パルスシンセサイザは、12.5GHz間隔に30本の出力チャンネルを有するアレイ導波路格子(AWG)とチャンネルごとに強度・位相変調器が集積された構造をもつ。中心周波数1553nm、繰返し12.5Gz、パルス幅4-8psの $\text{sech}^2$ 型およびGauss型フーリエ限界パルスを発生させ、単一モードファイバー(D=17ps/nm/km)に入射した。

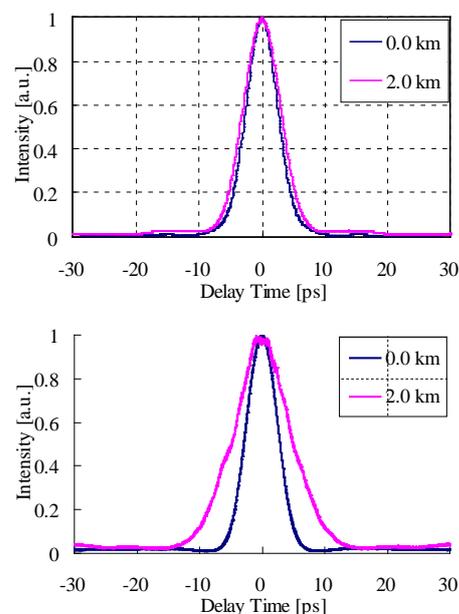


図1. ファイバ2km伝搬前後の波形の変化  
(上) Gauss型(初期パルス幅4.0ps, ピークパワー7.0W)

(下)  $\text{sech}^2$ 型(同3.7ps, 同6.3W)

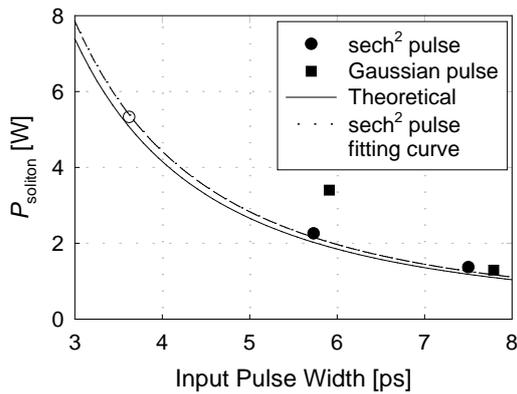


図 2. パルス幅とピークパワーの関係

2 km ファイバの伝搬前後のパルス波形を強度相関器によって測定した一例を、図 1 に示す。ピークパワーを増加すると、ファイバ伝搬による波形の広がりや抑えられていくことが分かる。特に  $\text{sech}^2$  型パルスでは、ピークパワーが 5.5 W 以上になると 5 km 伝搬後も波形の広がりほとんど見られない。これが実際にソリトンの伝搬をしているかどうか確認するために、パルス幅と基本ソリトンを満たすピークパワーとの関係をグラフにプロットしたところ (図 2)、理論値とよい一致を示した。

### (2) 平坦かつ広帯域な SC 光の生成

前記(1)の方法で生成した光パルスを非線形ファイバに入射して、光学非線形現象を利用してスーパーコンティニューム(SC)光を発生した。図 3 に SC 発生の実験系を示す。

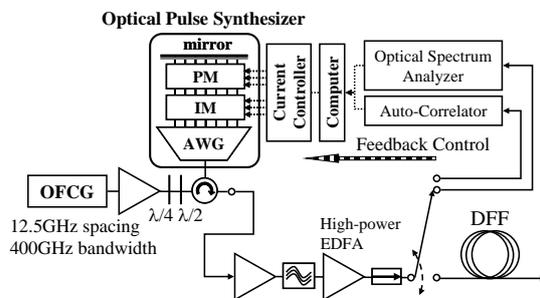


図 3. SC 発生の実験系

SC 光の周波数間隔は種コム生成の際に使用した変調周波数と同様の 12.5GHz である。光パルスシンセサイザで生成した光パルスを高出力の光ファイバ増幅器により増幅し、非線形ファイバに伝搬させることで生成した。図 1 に示した Gauss 型と  $\text{sech}^2$  型パルスで生成した SC コム光のスペクトルを図 4 に示す。20dB 帯域幅で 102nm の帯域に渡って平坦性の良いスペクトルが生成されており、10THz 以上の帯域を持つ光周波数コムを生成することが出来た。 $\text{sech}^2$  型と比べ Gaussian 型の方が 20dB 帯域幅は広くなるが、5dB 帯域幅はほぼ同じであった。このこ

とから、 $\text{sech}^2$  型種パルスの方が平坦なコム発生に適していることが明らかとなった。

以上のように広帯域なスペクトルが制御可能かつ周波数間隔が可変な光コムシンセサイザが実現できた。

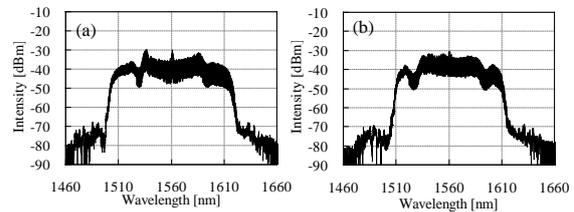


図 4. 発生した SC スペクトル  
(a) Gauss 型, (b)  $\text{sech}^2$  型

### (3) 100Gbps 8bit 光パケットの生成

短光パルス生成手法のアルゴリズムを改良して、100Gbit/s 相当の 8 ビット光パケット生成に成功した。図 5 に最終的に得られたパケット波形を示す。パケットの周期は、80 ps であり、100 Gbps の信号であることが確認できる。フィードバック処理に約 40 分を要したが、一旦、所望波形の制御電流が決定されれば、波形と制御電流の関係をルックアップテーブル化することにより、100 Gbps の任意 8 bit パケットを即座に発生できる。そこで、一定の制御電流に対するパケット信号の再現性について調べたところ、元の波形と同じ制御電流を 8 日後に光シンセサイザに加えても、生成した波形は完全に一致していた。また、異なる光パケットパターンの切り替えを制御電流の切り替えによって実時間で行えることを確認した。したがって、GA により得たい波形の制御電流値を決定できれば、これをルックアップテーブル化し、任意の光パケットを実時間で再現性よく発生できる。

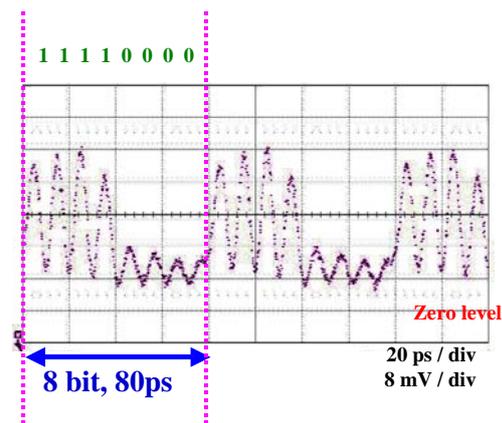


図 5. 光パケット“11110000”のオシロスコープによる観測波形

### (4) 局発コム光の発生とコヒーレント検波

光周波数コムとヘテロダイン検波を導入した DWDM システムを図 6 に示す。送信側では、周波数間隔が 25GHz、16 波の光周波

数コムをキャリア光として生成した。これを分波し、各キャリア光に 1Gbps の NRZ 変調信号を付加した (以下、信号コム)。もう一方では、周波数シフターによって光周波数コム全体を 9.4GHz シフトした (以下、局発コム)。信号コムと局発コムを偏波合成して一本の光ファイバによって 10km 伝送した。受信側では、各々が偏波分離され、目的の信号光に対応した局発光を波長可変フィルタによって 1 本の局発光スペクトルのみを抽出した。光電変換後、9.4GHz の IF 帯信号を BPF で切り出し、Mixer によるダウンコンバート後に信号波形をサンプリングオシロスコープで観測した。その波形を図 7 に示す。

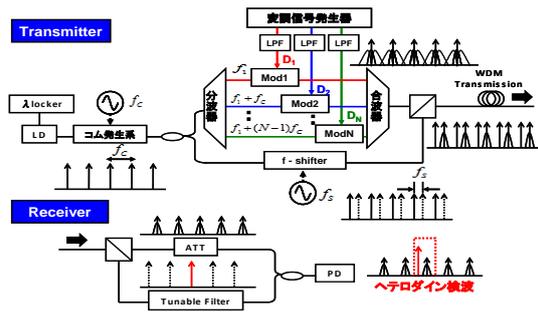


図 6. ヘテロダイン検波による DWDM 伝送

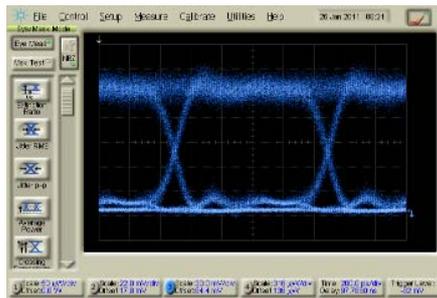


図 7. 観測されたアイパターン

## 5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 6 件)

- (1) T. Shioda, K. Fujii, K. Kashiwagi, T. Kurokawa, High-resolution spectroscopy combined with the use of optical frequency comb and heterodyne detection, *Optical Society of America B*, 査読有, Vol.27, No. 7, July, 2010, pp.1487-1491.
- (2) K. Kashiwagi, Y. Kodama, R. Kobe, T. Shioda, Y. Tanaka, T. Kurokawa, Fiber transmission characteristics of optical short pulses generated by optical pulse synthesizer, *Japanese Journal of Applied Physics*, 査読有, Vol. 48, 2009, pp. 09LF02-1-4.
- (3) S. Choi, N. Tamura, K. Kashiwagi, T. Shioda, Y. Tanaka, T. Kurokawa, Supercontinuum comb generation using optical pulse synthesizer and highly nonlinear dispersion-shifted fiber, *Japanese Journal of*

*Applied Physics*, 査読有, Vol. 48, 2009, pp. 09LF01-1-6.

- (4) Y. Tanaka, Y. Matsunaga, T. Hoshi, T. Shioda, T. Kurokawa, Multicarrier light source with 50 GHz spacing and its application in dense wavelength division multiplexing system, *Japanese Journal of Applied Physics*, 査読有, Vol. 48, 2009, pp. 09LF04-1-7.
- (5) Y. Tanaka, R. Kobe, T. Shioda, H. Tsuda and T. Kurokawa, Generation of 100-Gb/s packets having 8-Bit return-to-zero patterns using an optical pulse synthesizer with a lookup table, *IEEE Photonics Technology Letters*, 査読有, Vol. 21, No.1, 2009, pp.39-41
- (6) T. Shioda, T. Mori, T. Sugimoto, Y. Tanaka, T. Kurokawa, High-resolution spectroscopy based on optical phase modulator and optical frequency comb, *Optics Communications*, 査読有, Vol. 282, No. 14, 2009, pp. 2909-2912.

[学会発表] (計 44 件)

- (1) 宝地戸、松永、柏木、田中、黒川「高密度 WDM/1Gbps ASK 伝送のヘテロダイン検波特性」電子情報通信学会東京支部学生会論文集、p 171、2011 年 3 月 18 日.
- (2) 香田、宝地戸、柏木、田中、黒川「周波数コムを用いた DWDM 伝送の注入同期によるホモダイン検波の可能性」電子情報通信学会東京支部学生会論文集、p 173、2011 年 3 月 18 日.
- (3) 茂澤、石津、小玉、柏木、黒川「光パルスシンセサイザを用いたダークパルスの発生」春季第 58 回応用物理学関係連合講演会予稿集、**24a-BH-1**、2011 年 3 月 9 日.
- (4) 喬、石津、茂澤、柏木、黒川「光パルスシンセサイザを用いた位相パルスの生成」春季第 58 回応用物理学関係連合講演会予稿集、**24a-BH-2**、2011 年 3 月 9 日.
- (5) 水野、石津、柏木、黒川「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」春季第 58 回応用物理学関係連合講演会予稿集、**24a-BH-3**、2011 年 3 月 9 日.
- (6) 井上、茂澤、柏木、田中、黒川「1 THz 帯域の光パルスシンセサイザを用いたパルス生成」春季第 58 回応用物理学関係連合講演会予稿集、**24a-BH-4**、2011 年 3 月 9 日.
- (7) 粕谷、柏木、黒川「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」春季第 58 回応用物理学関係連合講演会予稿集、**24p-KT-10**、2011 年 3 月 9 日.
- (8) 小島、粕谷、柏木、黒川、崔「光周波数コム間隔掃引干渉法の高分解能化」春季第 58 回応用物理学関係連合講演会予稿集、**24p-KT-3**、2011 年 3 月 9 日
- (9) 塩田、黒川「光周波数コムを用いた高分

- 解スペクトル計測システム【招待講演】  
レーザー学会学術講演会第31回年次大会, 電気通信大学, 2011年1月10日
- (10) 大和田、柏木、黒川「光周波数コムを用いたブリルアンファイバセンサ特性」  
2010年日本光学会年次学術講演会、**10aG5**、中央大学駿河台記念館、2010年11月10日。
- (11) 喬、石津、茂澤、柏木、黒川「位相パルスの生成とファイバ伝搬特性の検討」  
2010年日本光学会年次学術講演会、**9pD7**、中央大学駿河台記念館、2010年11月9日。
- (12) K. Mozawa, H. Ishizu, Y. Kodama, K. Kashiwagi, T. Kurokawa, "Fiber network characterization by transmission analysis of test pulses generated by optical pulse synthesizer," 16<sup>th</sup> Microoptics Conference (MOC2010), **WB4**, pp.366-367, Hsinchu, Nov. 3, 2010.
- (13) Y. Kasuya, H. Ishizu, K. Kashiwagi, N. Tamura, S. Choi, T. Kurokawa, "Interferometric signal evaluation by mode-frequency sweep of supercontinuum", 16<sup>th</sup> Microoptics Conference (MOC2010), **WP15**, pp.118-119, Hsinchu, Nov. 2, 2010
- (14) K. Kashiwagi, H. Ishizu, T. Kurokawa, "Reconfigurable compressed pump pulse using optical pulse synthesizer for broadband supercontinuum generation through dispersion flattened fiber," 16<sup>th</sup> Microoptics Conference (MOC2010), **MD6**, pp.42-43, Hsinchu, Nov. 1, 2010.
- (15) H. Ishizu, Y. Kodama, K. Kashiwagi, T. Kurokawa, "Pulse compression control using optical pulse synthesizer and phase modulator," 16<sup>th</sup> Microoptics Conference (MOC2010), **MD4**, pp.38-39, Hsinchu, Nov. 1, 2010.
- (16) W. Qiao, H. Ishizu, K. Kashiwagi, T. Kurokawa, "Generation of optical short pulses with pulse-shaped phase waveforms and their fiber transmission characteristics," 16<sup>th</sup> Microoptics Conference (MOC2010), **MD5**, pp. 40-41, Hsinchu, Nov. 1, 2010.
- (17) K. Kashiwagi, H. Ishizu, Y. Kodama, S. Choi, T. Kurokawa "Highly precise optical pulse synthesis for flat spectrum supercontinuum generation with wide mode spacing," , ECOC2010, **We.7.E.5**, Torino, Sept. 22, 2010.
- (18) 宝地戸、松永、柏木、田中、黒川「光周波数コムを用いた DWDM 伝送信号のヘテロダイン検波」2010年電子情報通信学会通信ソサイエティ大会、**C-3-4**、大阪府立大、2010年9月14日
- (19) 大和田、柏木、黒川「光周波数コムのブリルアンセンサへの応用」第45回光波センシング技術研究会、**LST45-17**、静岡文化芸術大学、2010年6月9日。
- (20) 塩田、藤井、柏木、黒川「位相変調器と光周波数コムを用いた 4THz 帯域での 1MHz 高分解能スペクトル計測法」第45回光波センシング技術研究会、**LST45-16**、浜松、2010年6月9日。
- (21) T. Shioda, K. Fujii, K. Kashiwagi, and T. Kurokawa, "High-resolution Spectroscopy Using Interleaved Optical Frequency Comb," In The Conference on Lasers and Electro Optics 2010 (CLEO 2010), **CTuS2**, San Jose, May 18, 2010.
- (22) 石津、柏木、田中、黒川「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、**19p-B-5**、東海大、2010年3月19日。
- (23) 茂澤、石津、小玉、柏木、黒川「短光パルス伝播によるファイバ網特性の解析」第57回応用物理学関係連合講演会、**19p-B-6**、東海大、2010年3月19日。
- (24) 喬、柏木、黒川「ピコ秒位相パルスのファイバ伝搬特性の検討」第57回応用物理学関係連合講演会、**19p-B-7**、東海大、2010年3月19日。
- (25) 粕谷、田村、柏木、黒川「干渉計測のための周波数間隔可変な SC 光発生」第57回応用物理学関係連合講演会、**19a-J-9**、東海大、2010年3月19日。
- (26) K. Fujii, K. Kashiwagi, T. Shioda, Y. Tanaka, T. Kurokawa, "Signal to noise ratio improvement in optical fiber loop memory with optical switch and EDFA," 15th Microoptics conference (MOC'09), **K5**, pp. 340-341, Tokyo, Oct. 28, 2009.
- (27) H. Ishizu, K. Kashiwagi, Y. Tanaka, T. Kurokawa, "Fiber transmission characteristics of parabolic pulses generated by optical pulse synthesizer," 15th Microoptics conference (MOC'09), **J70**, pp. 262-263, Tokyo, Oct. 27, 2009.
- (28) 柏木、石津、小玉、田中、黒川「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回応用物理学学会学術講演会、**9p-ZN-4**、富山大、2009年9月9日。
- (29) S. Choi, T. Kurokawa "Profilometry based on optical frequency comb (Invited)," CLEO/PR 2009, **WE2-2**, Shanghai, Sept.2, 2009.
- (30) Y. Kodama, K. Kashiwagi, Y. Tanaka, T. Kurokawa, "Fiber transmission characteristics of optical solitons generated by optical pulse synthesizer," CLEO/PR 2009, **WH3-4**, Shanghai, Sept.2, 2009.
- (31) T. Shioda, K. Fujii, K. Kashiwagi, T.

- Kurokawa, "High-resolution spectroscopy based on interleaved optical frequency comb," CLEO/PR 2009, **WE1-2**, Shanghai, Sept.2, 2009.
- (32) 柏木, 田中, 黒川, 「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, 東北大, 2009年8月6日.
- (33) K. Kashiwagi, Y. Kodama, Y. Tanaka, T. Kurokawa, "Tunable pulse compression technique using optical pulse synthesizer," CLEO/IQEC 2009, **JThE25**, Baltimore, June 4, 2009.
- (34) T. Shioda, K. Fujii, K. Kashiwagi, T. Kurokawa, "High-resolution spectroscopy combined with optical frequency comb and heterodyne detection method," CLEO/IQEC 2009, **CMII3**, Baltimore, June 1, 2009.
- (35) 石津, 小玉, 柏木, 田中, 黒川, 「光パルスシンセサイザにより合成した放物線パルスのファイバ伝搬特性」2009年春季第56回応用物理学関係連合講演会, **2p-B-3**, 筑波大, 2009年4月2日.
- (36) 津田, 黒川 「アレイ導波路回折格子を用いたGHz帯光信号プロセッシング」第2回先端光量子科学アライアンスセミナー, pp.37-42, 慶応大, 2009年3月27日.
- (37) 小玉, 柏木, 田中, 黒川 「光パルスシンセサイザを用いた形状可変なパルス圧縮」電子情報通信学会 2009 総合大会, **C-4-8**, 愛媛大, 2009年3月17日.
- (38) 黒川 「光パルスのシンセシスとその応用」第111回微小光学研究会, pp.49-54, 日本女子大, 2009年3月6日.
- (39) 小玉, 河辺, 柏木, 田中, 黒川 「光パルスシンセサイザで発生した短光パルスのファイバ伝播特性」電子情報通信学会 2008年ソサイエティ大会, **C-4-18** 2008年9月17日.
- (40) 松永, 星, 西脇, 柏木, 田中, 津田, 黒川 「局発周波数コムの生成と DWDM 伝送信号のホモダイン検出」電子情報通信学会 2008年ソサイエティ大会, **C-3-7**, 明治大, 2008年9月16日.
- (41) N. Tamura, S. Choi, K. Kashiwagi, T. Shioda, Y. Tanaka, T. Kurokawa "Supercontinuum comb generation using optical pulse synthesizer and highly-nonlinear dispersion-shifted-fiber", Information Photonics 2008, **3-p5**, Awajishima, 19<sup>th</sup> Nov., 2008.
- (42) Y. Matsunaga, T. Hoshi, Y. Tanaka, T. Shioda, T. Kurokawa "DWDM transmission of 27-frequency channels with 50-GHz spacing using frequency comb lightsource" Information Photonics 2008, **3-p8**, Awajishima, 19<sup>th</sup> Nov., 2008.

- (43) Y. Kodama, R. Kobe, T. Shioda, Y. Tanaka, T. Kurokawa, "Fiber Transmission Characteristics of Optical Short Pulses Generated with Optical Pulse Synthesizer" Information Photonics 2008, **p1-23**, Awajishima, 17<sup>th</sup> Nov., 2008.
- (44) K. Fujii, K. Kashiwagi, T. Shioda, Y. Tanaka, T. Kurokawa "Buffering of 2.5-Gbps Optical Packets by Fiber Loop with Optical Switch and EDFA," Information Photonics 2008, Awajishima, **p1-25**, 17<sup>th</sup> Nov., 2008.

〔産業財産権〕 ○出願状況 (計2件)

名称: 構造測定方法および構造測定装置

発明者: 柏木謙, 黒川隆志

権利者: 東京農工大学

種類: 特願

番号: 2011-013109

出願年月日: 2011. 1. 25

国内外の別: 国内

名称: 光パルス圧縮装置および光パルス圧縮方法

発明者: 柏木謙, 黒川隆志

権利者: 東京農工大学

種類: 特願

番号: 2011-017310

出願年月日: 2011. 1. 28

国内外の別: 国内

〔その他〕

ホームページ等

<http://www.tuat.ac.jp/~tkurolab/index.html>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

黒川 隆志 (KUROKAWA TAKASHI)

東京農工大学・大学院工学研究院・教授

研究者番号: 40302913

### (2) 研究分担者 (2010 は連携研究者)

田中 洋介 (TANAKA YOSUKE)

東京農工大学・大学院工学研究院・准教授

研究者番号: 20283343

### (3) 連携研究者

津田 裕之 (TSUDA HIROYUKI)

慶應義塾大学・理工学部・教授

研究者番号: 90327677

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