

## 2. 新技術・新産業の創出に関する報告

### 超高速時空間テラ光情報変換・伝送システムの研究

時空間情報変換システム研究Gリーダー  
小西 毅（大阪大学大学院工学研究科）

#### 1. 研究の目的

本プロジェクトのテーマである「光」は、超高速性、超広帯域性、空間並進性といった光にしかできない非常に卓越した物理的な特長を元来兼ね備えている。しかし、電気一辺倒の現在のテクノロジーの中では、これまでなかなかその特徴を活かしきることはできなかった。このような背景が、光を用いたシステムの開発において、「光」オリエンテッドな進め方が困難であったことの一つの理由である。一方、「光」というものを用いた既存のシステム自体も、空間系のバルクオプティクスと時間系のファイバオプティクスの2つのオプティクスに完全に分かれているのが現状である。空間系とは、顕微鏡などの精密光学器械に代表されるものであり、我が国が世界に誇る技術を有している。また、時間系とは、光通信に代表されるもので次世代のインターネットを支える切り札として期待されている。この2つの技術は、同じ「光」という物理現象を利用しているにもかかわらず、まったく異なる「産業」と「学問」に立脚している。現在、「光」を利用した産業として最も成功を収めた光通信では、単なる伝送だけでなく更に進んだ「処理」にまで「光」を用いることが検討され始めており、「光」に対する期待は追い風一色の拡大基調である。このような「光」に対する多大な要請に応えるには、時間系と空間系のオプティクスに分断されている現在の産業構造の構造改革が必要となる。本研究の目指すところは、新しい光の産業の創生に貢献するために、「光」オリエンテッドなアプローチにより時間系と空間系の2つの光の世界を繋ぐことである。(図1)

時空間テラ光情報変換・伝送システムの研究の具体的な研究目標は、「光」のみが持つ優れた特長（超高速性、超広帯域性、並列・並進性）を最大限まで活用することを追求した光情報処理システムとそのシステム構築に必要なデバイスをはじめとする周辺技術の研究を行うことである。時空間テラ光情報変換・伝送システムは、特に2次元空間情報による直接的な超高速光時間信号の変調を特徴としており、空間情報の2次元性を利用した並列処理により超高速光時間信号の電氣的な処理を用いない超高速処理の実現が可能である。(図2) その研究の成果は、光通信をはじめ超高速現象の計測など様々な応用分野につながることを期待される。本研究を通して、様々な新しい「光」の応用に対する将来性を見極めることも重要な目標である。

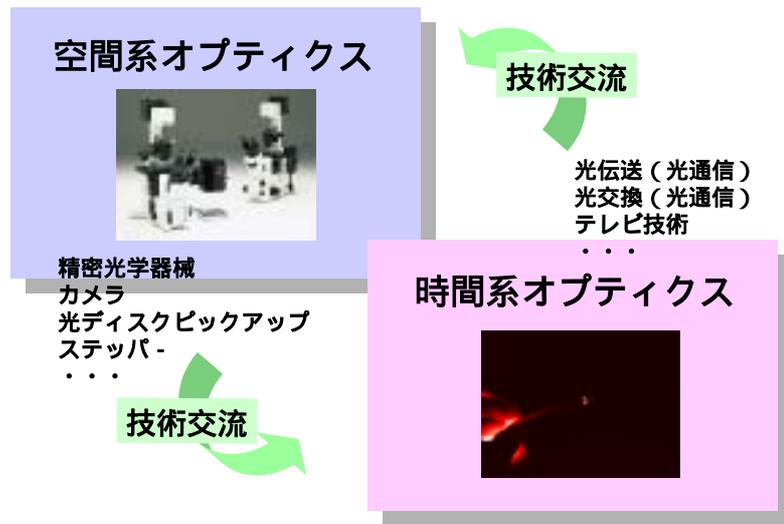


図1 研究の背景と目的

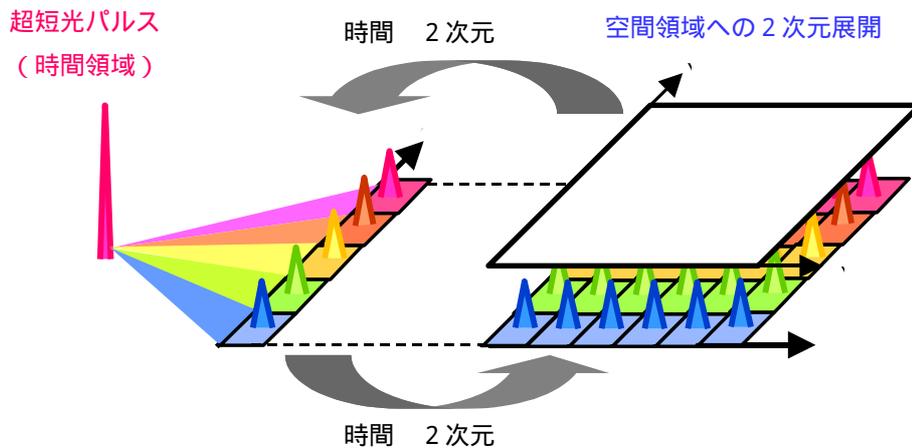


図2 超高速時空間光情報変換の概念図

## 2. 研究テーマの内容の概要説明

### 2.1 フェーズ（平成9年度～平成11年度）

フェーズの研究の目標としては、時空間テラ光情報変換・伝送システムの基本原理である超高速時空間光情報変換の原理実証を中心に据えた。具体的なフレームとして、画像入出力・伝送システムを設定することにより各機能の検討を進めてきた。

超高速時空間光情報変換は、1) 2次元空間 時間変換と2) 時間 2次元空間変換の2つに分けることができる。1) 2次元空間 時間変換について2種類の実証実験システム、2) 時間 2次元空間変換においては、4種類の実証実験システムを試作した。これらの実証実験システムの動作確認を通して、その処理能力の実証実験を行った。それぞれの実証実験の内容を表1にまとめる。

## 2.2 フェーズ (平成12年度~14年度)

フェーズの研究の目標としては、フェーズで原理追究を行った超高速時空間光情報変換の具現化システムの高効率化、高性能化を目指し、周辺デバイスの開発と連動したシステム開発を進めることを目標とした。また同時にその応用展開の検討を進めてきた。特に、システムに必要な分散素子、時間-周波数変換フィルタなどの高効率化と光ファイバへの結合効率を考えた素子の検討を行った。さらに、システムの精密な光学設計を行うことにより、その本質的な性能評価を行った。応用展開については、1) 次世代光通信と2) 超高速光信号計測の検討を行った。その内容を表2にまとめる。

表1 フェーズの研究の内容

研究項目	研究目標、数値目標等
1) 2次元空間 時間変換	
直接変換実証システム	<ul style="list-style-type: none"> <li>変換の超高速性の実証</li> <li>超高速変換・伝送の実証</li> </ul>
間接変換実証システム	<ul style="list-style-type: none"> <li>入力画像可変機能の付加</li> <li>動画入力 of 検討</li> </ul>
2) 時間 2次元空間変換	
非線形時間ゲートを用いた実証システム	<ul style="list-style-type: none"> <li>変換後のカスケード処理の検討</li> <li>テラビット級の変換レートの実現</li> <li>変換の超高速性の実証</li> </ul>
干渉時間ゲートを用いた実証システム	<ul style="list-style-type: none"> <li>変換の超高速性の実証</li> </ul>

表2 フェーズの研究の内容

研究項目	研究目標、数値目標等
1) システム開発	
時間 2次元空間変換	<ul style="list-style-type: none"> <li>時間-周波数変換フィルタの光量損失の向上</li> <li>システム内での非線形効果の利用効率の向上</li> </ul>
2次元空間 時間変換	<ul style="list-style-type: none"> <li>変換後に得られる光波のファイバ入力の検討</li> </ul>

2) デバイス開発	
深溝グレーティング	<ul style="list-style-type: none"> <li>高効率の光波結合型深溝グレーティングを用いて広い帯域にわたって均一な効率を得る素子の開発</li> </ul>
時間 - 周波数変換フィルタ	<ul style="list-style-type: none"> <li>位相型の素子の開発</li> </ul>
3) システムの光学設計	<ul style="list-style-type: none"> <li>最終的な系の設計による最適化の検討</li> </ul>
4) 応用展開の検討	
次世代光通信	<ul style="list-style-type: none"> <li>次世代フォトニックネットワークにおいて重要な要素技術への応用の検討</li> </ul>
超高速光信号計測	<ul style="list-style-type: none"> <li>シングルショット計測の検討</li> <li>リアルタイム計測の検討</li> <li>振幅と位相の解析の検討</li> </ul>

### 3. 5年間で共同研究の成果報告

#### 3.1 フェーズ（平成9年度～平成11年度）

##### 3.1.1 概略

2次元空間 時間変換については、直接変換実証システムによる変換の超高速性の実証を行い、1.5ps間隔のビット信号の変換に成功した。また、間接変換実証システムの入力画像可変機能の付加を目的として、光アドレス型空間光変調素子による入力画像の可変性の確認に成功した。時間 2次元空間変換については、非線形時間ゲートを用いた実証システムを用いて変換後のカスケード処理の検討を行い、変換後の光波としてカスケード処理可能な2次元画像の取得に成功した（毎秒8テラ画素の変換レート）。（図3）干渉時間ゲートを用いた実証システムでは、超高速干渉時間ゲートを用いることにより、光速による変換の実証を行った。また、変換後の2次元光波分布の状態を確認した。これらの成果を表3にまとめる。

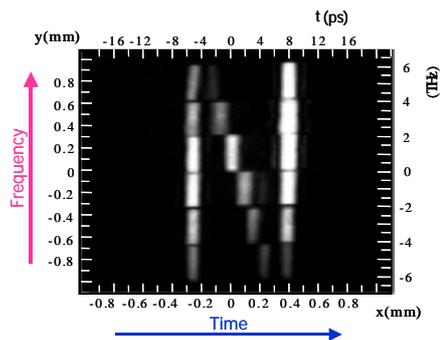


図3 展開文字画像“N”

##### 3.1.2 成果の具体例

ここでは、直接的な変換方法を用いた2次元空間 時間変換 ファイバ伝送 2次元空間変換の実験を中心に報告する。2次元空間 時間変換後の光波を光ファイバへの結合を行うためには、変換後の光波をコリメートして出力する必要がある。この目的のために、2次元空間 時間変換システムの出力面に各周波数成分が同じ方向に出力されるように設計した異なる格子定数を持つ回折格子のアレイを配置することにより、周波数成分を全て

同じ方向に射出させることができる。この回折光学素子を用いて2次元空間 時間変換後の出力光を光ファイバへ結合した。図4に試作したシステムを示す。図5(a)に作製した回折格子のアレイの概観を示す。2次元空間信号として「H」の文字画像を用いた実験を行った。図5(b)にファイバ伝送後に得られた信号光のクロスコリレーションの結果を示す。変換後に「H」に対応して正しく変調されたパルスが得られた。この結果より、2次元空間 時間信号変換の出力をファイバに入力・伝送可能であることを確認した。

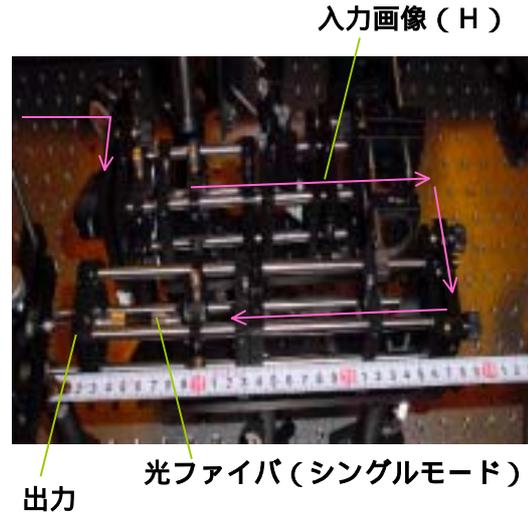
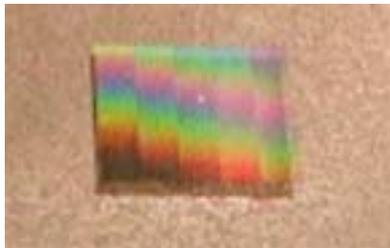
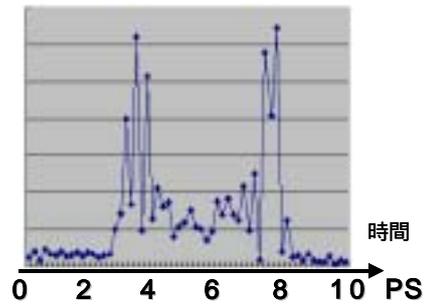


図4 試作システム



(a) 作製した回折格子のアレイ



(b) 信号光の時間的なプロファイル

図5 2次元空間 時間変換 ファイバ伝送 2次元空間変換の成果

### 3.2 フェーズ (平成12年度~14年度)

#### 3.2.1 概略

システムの開発では、時間 2次元空間変換時間 - 周波数変換フィルタによる光量損失を完全に解消する構成を考案(原理的に100%の光利用効率)した。非線形時間ゲートを用いるシステムでは、非線形効果を最適に利用するアーキテクチャを考案した。2次元空間 時間変換後に得られる光波のファイバ入力を考慮したモード補正方法を考案した。変換における時間情報生成の新しい方法を考案した。素子開発として、深溝グレーティング分散性の低い高効率の光波結合型深溝グレーティングの開発に成功(広い波長帯域に渡って95%以上を達成)した。また、時間 - 周波数変換フィルタ位相型の素子で97%以上の光の利用効率を達成した。システムの精密な光学設計を行うことにより、提案するシステムが回折限界(5 μm以下のPSF)を達成できることを実証した。(図6) 次世代光通信への応用展開として、次世代フォトニックネットワークにおいて重要な要素技術となる光ヘッダ認識の全光化方法を考案した。実験的に1.5 psのパルス間隔のヘッダ信号に対する原理確認に成功。また、システム全体での一連の処理の確認のために経路スイッチ

の一方法を提案した。超高速光時間信号計測では、超高速光信号計測シングルショット計測、リアルタイム計測に成功し、と振幅と位相の解析を実証した。これらの成果を表4にまとめる。

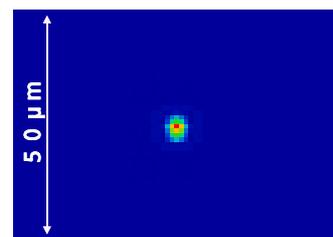


図6 光学設計の成果

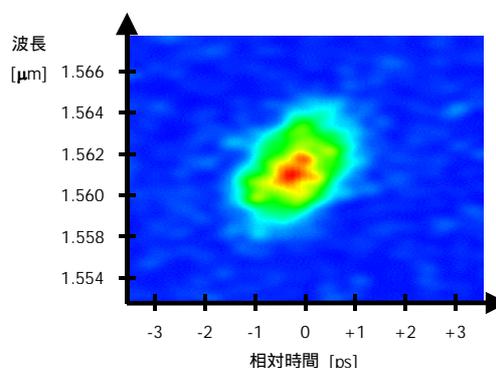
### 3.2.2 成果の具体例

ここでは、事業後に実用化への展開が行われる超高速光信号計測システム（光スペクトログラムスコープ）の開発をとりあげて報告する。また、次世代のフォトニックネットワークへの応用展開の例として、超高速光ヘッダ認識実験の成果について報告する。

干渉現象を用いて時間-2次元空間変換を実現する方法では、1パルス当たり10フェムトジュールの微弱な超高速時間信号に対応可能な計測を実現することができる。この方法では、時間信号の時間的なスペクトル分布の変化の様子（光スペクトログラム）が空間的な干渉縞として得られるために振幅と位相の情報を計測することが可能である。時間的なスペクトル分布の変化は、物質内で生じる超高速現象を計測するための過渡吸収応答計測において非常に有効な方法として定着している。また、波長多重通信（WDM）で用いられる多チャンネル超高速時間信号のモニタリングなどにも非常に有効である。この方法を用いた超短光パルスの光スペクトログラム計測システム（光スペクトログラムスコープ）を試作した。図7(a)に光スペクトログラムスコープの試作システムを示す。また、図7(b)にフェムト秒パルスに対して得られた光スペクトログラムの結果を示す。時間的にもスペクトル的にもガウス分布をしているフェムト秒パルスの様子を見ることができる。



(a) 試作システム



(b) 可視化した光スペクトログラム

図7 光スペクトログラムスコープの成果

次世代のフォトニックネットワークにおいては、伝送路における信号の超高速伝播性を損なうことなく処理を実現するために、光電変換を必要としない超高速処理システムの開発が必要不可欠である。この超高速処理の実現に、超高速時間信号の時間情報と波長情報を同時に制御することができる時空間テラ光情報変換・伝送システムを応用することが可能である。そこで、時空間テラ光情報変換・伝送システムを応用したパケット信号（行き先を指定するヘッダとデータを表すペイロードから構成される）のヘッダの内容の認識実

験を行った。超高速の相関演算処理を行うことにより、所望のヘッダ信号が入力された場合にのみ相関ピーク信号を出力させることができる。この相関ピーク信号を用いてパケット信号の経路制御等を行うことができる。

図8 (a)に提案システムを、図8 (b)に4ビットのヘッダ信号に対する認識結果を示す。認識結果として、正しく相関ピーク信号が得られているのがわかる。

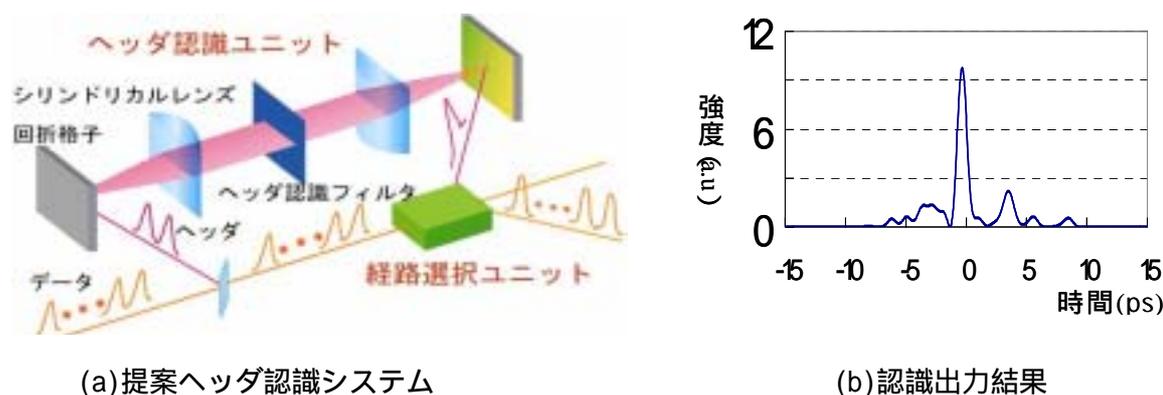


図8 提案ヘッダ認識システムの成果

表3 フェーズの研究の内容と成果

研究項目	成果
1) 2次元空間 時間変換	
直接変換実証システム	<ul style="list-style-type: none"> <li>変換の超高速性の実証</li> <li>1.5ps間隔のビット信号の変換・伝送に成功</li> </ul>
間接変換実証システム	<ul style="list-style-type: none"> <li>入力画像可変機能の付加</li> <li>光アドレス型空間光変調素子による入力画像の可変性の確認に成功</li> <li>動画入力装置の提案</li> </ul>
2) 時間 2次元空間変換	
非線形時間ゲートを用いた実証システム	<ul style="list-style-type: none"> <li>変換後のカスケード処理の検討</li> <li>変換後の光波としてカスケード処理可能な2次元画像の取得に成功(毎秒15テラ画素の変換レート達成)</li> </ul>
干渉時間ゲートを用いた実証システム	<ul style="list-style-type: none"> <li>変換の超高速性の実証</li> <li>超高速干渉時間ゲートを用いることにより、光速による変換を行う、変換後の2次元光波分布の状態を確認した。</li> </ul>

表4 フェーズの研究の内容と成果

研究項目	成果
1) システム開発	
時間 2次元空間変換	<ul style="list-style-type: none"> <li>時間 - 周波数変換フィルタによる光量損失を完全に解消する構成を考案（原理的に100%の光利用効率）。</li> <li>非線形効果を最適に利用するアーキテクチャを考案。</li> </ul>
2次元空間 時間変換	<ul style="list-style-type: none"> <li>変換後に得られる光波のファイバ入力を考慮したモード補正方法を考案。</li> <li>変換における時間情報生成の新しい方法を考案。</li> </ul>
2) デバイス開発	
深溝グレーティング	<ul style="list-style-type: none"> <li>分散性の低い高効率の光波結合型深溝グレーティングの開発に成功（広い波長帯域に渡って95%以上を達成）。</li> </ul>
時間 - 周波数変換フィルタ	<ul style="list-style-type: none"> <li>位相型の素子で97%以上の光の利用効率を達成。</li> </ul>
3) システムの光学設計	
	<ul style="list-style-type: none"> <li>回折限界（5 <math>\mu\text{m}</math>以下のPSF）を達成できることを実証。</li> </ul>
4) 応用展開の検討	
次世代光通信	<ul style="list-style-type: none"> <li>次世代フォトニックネットワークにおいて重要な要素技術となる光ヘッダ認識の全光化方法を考案。</li> <li>実験的に1.5 psのパルス間隔のヘッダ信号に対する原理確認に成功。</li> <li>経路スイッチの一方法を提案。実験的に原理確認。</li> </ul>
超高速光信号計測	<ul style="list-style-type: none"> <li>シングルショット計測に成功。</li> <li>リアルタイム計測に成功。</li> <li>振幅と位相の解析を実証。</li> </ul>

#### 4. 研究目標に対する達成度

本研究の成果は、テラビット級の情報展開を実現するという研究目標を一桁以上上回る

毎秒10テラの情報の展開を実現し、その目標を基本的に達成することができた。図9に、本研究で得られた成果の処理能力の現在の光通信の研究開発の現状における位置付けを表したグラフを示す。図9から分かるように、時空間テラ光情報変換の情報変換の処理能力は、既に基礎実験レベルにおいても非常に高いために、将来的な光通信産業に対して寄与していくことが期待される。

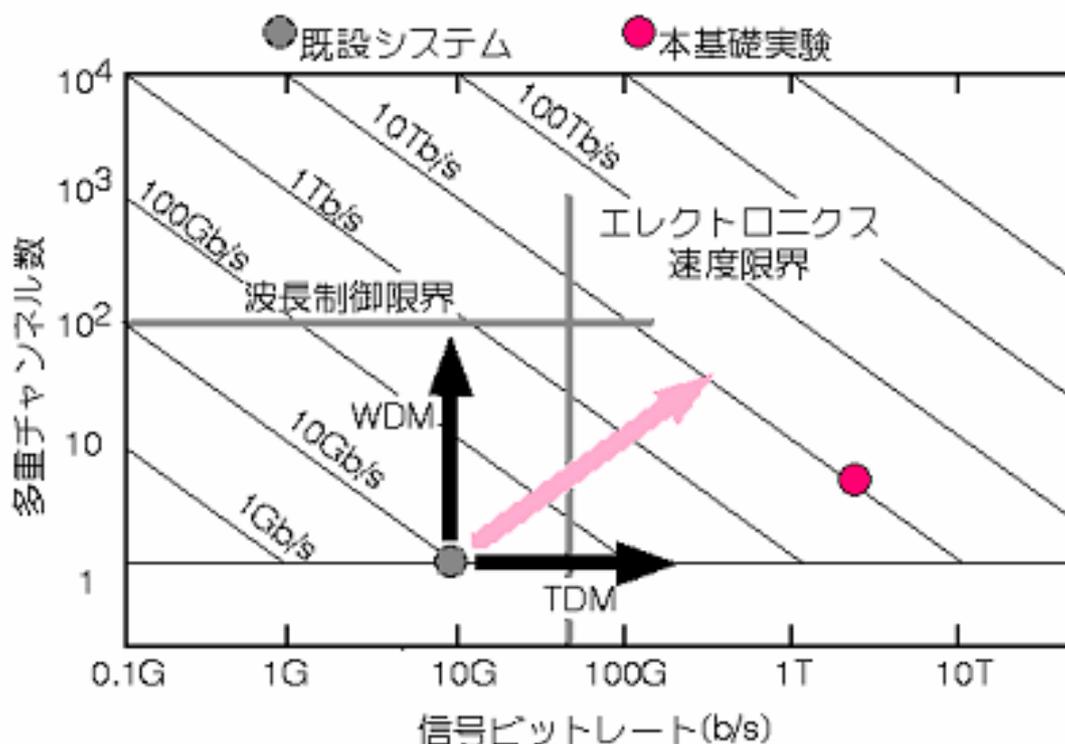


図9 現在の光通信の研究開発の現状における本研究成果の位置付け

## 5. 成果活用に関する報告

本研究の成果の活用を目指して、以下の特許を出願した。

### 【特許】

- (1) : 出願番号 : 特願 2 0 0 0 - 2 9 2 8 7 1 ( 出願日 : 2000 年 9 月 26 日 )  
 発明の名称 : 光ルーティング方法およびその装置  
 特許出願人 : 科学技術振興事業団、発明者 : 小西 毅、一岡芳樹
- (2) : 公開番号 : 特開平 1 1 - 4 6 3 0 4 ( 公開日 : 1999 年 2 月 16 日 )  
 発明の名称 : 空間 - 時間 - 空間信号処理方法  
 特許出願人 : 科学技術振興事業団、発明者 : 一岡芳樹、小西 毅
- (3) : 特許番号 : 特許第 3 0 1 8 1 7 3 号 ( 登録日 : 2000 年 1 月 7 日 )  
 発明の名称 : 極短光パルスの波形計測方法  
 特許権者 : 大阪大学長、発明者 : 一岡芳樹、小西 毅

- (4) : 公開番号 : 特開 2 0 0 0 - 2 7 5 6 8 9 ( 公開日 : 2000 年 10 月 6 日 )  
発明の名称 : 時間信号の 2 次元空間信号への超高速変換方法  
特許出願人 : 科学技術振興事業団、発明者 : 一岡芳樹、小西 毅
- (5) : 公開番号 : 特開 2 0 0 1 - 3 1 8 2 1 7 ( 公開日 : 2001 年 11 月 16 日 )  
発明の名称 : 有効屈折率法を用いたブレード位相型回折光学素子及びその製造方法  
特許出願人 : 科学技術振興事業団、発明者 : 余 万吉、小西 毅、一岡芳樹
- (6) : 公開番号 : 特開 2 0 0 2 - 0 0 6 3 5 6 ( 公開日 : 2002 年 1 月 9 日 )  
発明の名称 : 時間信号の空間信号への直接高速変換方法および装置  
特許出願人 : 科学技術振興事業団、発明者 : 小西 毅、一岡芳樹
- (7) : 公開番号 : 特開 2 0 0 2 - 0 7 2 2 7 0 ( 公開日 : 2002 年 3 月 12 日 )  
発明の名称 : 時間信号から二次元空間信号への超高速変換方法及び装置  
特許出願人 : 科学技術振興事業団、発明者 : 尾下善紀、小西 毅、一岡芳樹
- (8) : 出願番号 : 特願 2 0 0 1 - 1 7 1 7 7 ( 出願日 : 2001 年 1 月 25 日 )  
発明の名称 : 光情報処理装置  
特許出願人 : 科学技術振興事業団、オリンパス光学工業  
発明者 : 雙木 満、橋本 武、小西 毅
- (9) : 出願番号 : 特願 2 0 0 1 - 2 5 6 6 1 8 ( 出願日 : 2001 年 8 月 28 日 )  
発明の名称 : 光情報出力装置及び光情報読取装置  
特許出願人 : 科学技術振興事業団  
発明者 : 余 万吉、尾下善紀、小西 毅、一岡芳樹
- (10) : 出願番号 : 特願 2 0 0 1 - 3 5 3 8 2 0 ( 出願日 : 2001 年 11 月 19 日 )  
発明の名称 : 空間周波数フィルタおよび時間 - 周波数変換方法  
特許出願人 : 科学技術振興事業団  
発明者 : 小西 毅、一岡芳樹、余 万吉、尾下善紀
- (11) : 出願番号 : 特願 2 0 0 1 - 3 5 3 8 1 2 ( 出願日 : 2001 年 11 月 19 日 )  
発明の名称 : 光時分割多重信号生成方法およびその装置  
特許出願人 : 科学技術振興事業団、オリンパス光学工業  
発明者 : 雙木 満、橋本 武、小西 毅、一岡芳樹
- (12) : 出願番号 : 特願 2 0 0 1 - 3 5 3 8 1 3 ( 出願日 : 2001 年 11 月 19 日 )  
発明の名称 : 超高速次元変換装置および超高速次元変換  
特許出願人 : 科学技術振興事業団、オリンパス光学工業、  
発明者 : 雙木 満、橋本 武、小西 毅、尾下善紀
- (13) : 出願番号 : 特願 2 0 0 2 - 8 1 3 9 3 ( 出願日 : 2002 年 3 月 22 日 )  
発明の名称 : 広帯域スーパーコンティニューム極短光パルスを用いたシングルショット過渡吸収計測方法および

シングルショット過渡吸収計測システム  
特許出願人：科学技術振興事業団、アイシン精機  
発明者：小西 毅、一岡芳樹、後藤俊夫、西澤典彦、廣住知也

#### 6．フェーズ（5年終了後）の取り組みの予定

本事業終了後の展開として、今後の産業応用展開が重要となる。今後の産業応用展開の課題としては、標準化の流れをはじめこの処理能力を実用的なシステムとして機能させていくための周辺技術との整合性をとっていくことが非常に重要であると考え。特に、超短光パルスの計測システムは、他機関における実験においても試用され、計測システムとしての実績と認知が得られつつある。また、本計測システムは、文部科学省の「都市エリア産学官連携促進事業」における成果育成型のプロジェクトのテーマの一つとして採択され、事業化への方向を積極的に検討する予定である。このような派生的な応用を通じた産業応用への展開も更に検討していく必要がある。

また、本研究は新規性の高い次世代のフォトニック情報通信システムの提案と実証であり、この研究がきっかけとなって日本学術振興会の産学協力事業として「フォトニック情報システム」に関する先導的研究開発委員会が設立され、国家レベルで次世代の超高速超容量の情報通信の開発にむけての研究が継続されることになった。

#### 7．まとめ

超高速時空間テラ光情報変換・伝送の研究グループの研究内容とその成果を報告した。本事業全体の最終目標は、「新しい光の産業の創生への寄与」である。本研究は、基礎研究として位置付けられ、その成果が必ずしもそのまま産業に結びつくものではない。しかし、産業直結の技術の性能向上による産業創生のアプローチに加えて、既存の産業の抱える問題点に注目した産業構造自体の構造改革へのアプローチも重要である。本研究の目指すところは後者にあたる。例えば、本研究の成果の一つであり、顕微鏡などの精密光学器械に代表される「空間系の光技術」と光通信に代表される「時間系の光技術」の両方の要素を結集した波形計測システム：光スペクトログラムスコープは、現在、光技術の更なる活用が求められている光通信分野における強力な計測システムとして、着実にその要請に応える一歩を刻みだしている。今後も、「光」オリエンテッドなアプローチを追究することにより、「空間系の光産業」と「時間系の光産業」の間に風穴を開け、新しい光の産業の創生への貢献を目指していく努力が必要である。