

# 超高速時空間光情報処理の展開

## —時間と波長と空間と—

小 西 毅

### Ultra-Fast Spatio-Temporal Information Processing

Tsuyoshi KONISHI

Ultra-fast optical signal processing and ultra-fast optical signal form conversion for temporal, spectral, and spatial signals are described. Time-varying spectral modulation for arbitrary ultrafast signal generation is demonstrated as one of applications of ultrafast time-to-two-dimensional-space-to-time conversion. The continuous sequence of a spectral-decomposed pulse is generated from a seed ultrashort pulse and its spectrum on each timing is independently modulated in the space domain. As a result of preliminary experiments, the ultrashort pulse sequence of a 1 ps interval with three wavelength channels can be generated, which is ideally equivalent for the 3 Tbit/s (1 Tbit/s $\times$ 3 channels) time-varying spectral modulation. This technique approach does not need any active devices, the bit rate of a generated ultrafast signal depends only on the pulsewidth of a seed ultrashort pulse and it is potentially expected to apply to various fields, which requires arbitrary ultrafast signals.

**Key words:** ultrashort pulse, time-space conversion, time-frequency transform, spectrogram

超短光パルスを中心とする超高速フォトンクス、微細加工技術を中心とするナノテクノロジーなど、現在の科学技術の進展の動向は光の研究にとってまさに追い風である。可視光の波長はサブミクロンオーダーであり、最短時間幅をもつとされる 2.7 fs のモノサイクル光パルスでさえ、空間的な長さにして数百ナノメートルである<sup>1)</sup>。また、電子線描画技術等をはじめとする現在のナノテクノロジーの成熟した技術は、やはりサブミクロンオーダーの領域にあり、光を取り巻く各種先端技術の目指す物理的なパラメーターのオーダーが波長程度もしくはそれ以下の空間局在性をもつ領域に集中してきたことを意味する (図 1)。このことは、一般的な光学素子が時空間的に“新しい価値”をもつことをも意味する。つまり、レンズ等の光学素子の設計や利用においては、光の存続時間や空間的な局在性自体はこれまであまり意識されてこなかったが、素子の構成要素と同程度の空間的局在性をもつ光、超短光パルスの出現とともに、その設計や利用法に変化が生じると考えられるわけ

である。例えば、回折格子を用いて超短光パルスの分光を行うことを考える。波長分解能は、一般に光の照射面積、つまりビーム径に依存する。しかし、超短光パルスの場合には、ビーム径よりもはるかに短い空間局在性をもつために、波長分解能は、ビーム径とは関係なく超短光パルスの瞬時投影面積に依存する。つまり、超短光パルスの時間幅と直結するようになる。このように回折格子 1 つをとっても、これまでとは異なる扱いが必要となる。また、フォトリソグラフィに代表される最近のナノテクノロジーの進展は、さらにその構造による光制御の自由度を与えてくれると期待される。このような背景のもと、筆者らは、時間と波長と空間に重畳された信号間の変換を重視することにより、超短光パルスの時空間性に着目した超高速時空間光情報処理に関する研究を進めてきた (図 2)。平成 16 年度光学論文賞受賞論文<sup>2)</sup>は、この光の時空間性を用いた時間・周波数並列変調による任意の超短光パルス信号生成の実証実験についてまとめたものである。本稿では、本受賞論文の

内容を中心に、光の時空間性を用いた時間・周波数並列処理の概要と、その応用に関する展望について解説を行う。

### 1. 光の時空間性を用いた時間・周波数並列処理による任意の超短光パルス信号生成

超短光パルスは、バイオ計測から光通信に至る幅広い応用分野において非常に有効なツールとしてすでに活用されており、信号の超高速化をはじめこれらのさまざまな応用分野の要求に応えるためには、計測プローブや情報媒体として任意のパルス波形を自由に生成することが求められる。超高速光信号の整形には、スペクトル分解を応用した方法が最も一般的である<sup>3-5)</sup>。理論的には、このパルス整形技術で任意の波形を生成することは可能であるが、実際には、その実現性は光学素子の性能に強く依存する。スペクトル分解に基づく従来のパルス整形の方法は、波形の周波数変調に適している。しかし、時間と周波数の同時変調を周波数領域で行うためには、時間情報を周波数情報に重畳し、それらの変調情報を単一の光学素子に多重化する必要がある。一般に、利用可能な変調素子は、実現可能な分解能やダイナミックレンジに限界がある。結果として、整形波形の多重度や実現性は制限されてしまう。例えば、光通信の分野では、波長分割多重を伴う光時分割多重 OTDM/WDM (optical time division multiplexing/wavelength division multiplexing) が次世代光通信のための基本的な信号多重化の枠組みとして期待されている<sup>6,7)</sup>。その中で、OTDM/WDM のための多波長パルス列の生成などが精力的に検討されている。OTDM/WDM の信号は、時間もしくは周波数どちらかのみで高い分解能を必要とすることはなく、時間もしくは周波数領域のどちらかのみで扱われるべきではない。OTDM/WDM の信号の制御において、必要な仕様に対応して時間と周波数の分解能を使い分けするためには、時間と周波数の分解能の一定の関係のもとに形成される時間-周波数領域での時間可変スペクトル変調処理

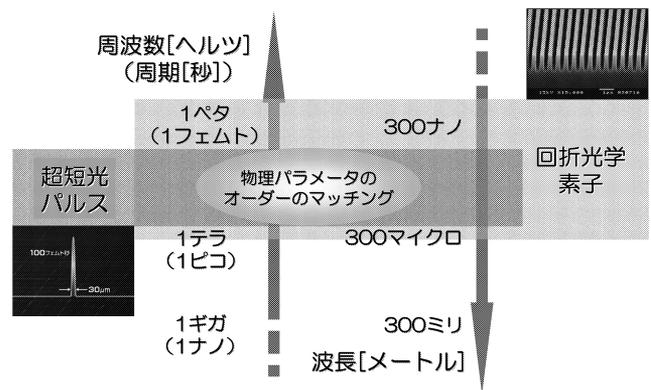


図1 最近の光の周辺技術の関係。

のアプローチが最適であると考えられる。このような時間可変スペクトル変調処理を実現するために、筆者らは、従来のパルス整形技術とは異なる新しい方法を提案、研究してきた<sup>8)</sup>。

筆者らの方法は、超短光パルスをもとに、その時間と周波数の成分を空間に展開した時間-周波数領域で直接的に変調するものである。このような時間信号に含まれる時間と周波数の情報の並列的な捉え方は、時間-周波数変換として、信号処理の分野で体系化されている<sup>9)</sup>。時間-周波数変換は、時間信号  $u(t)$  を任意の局在的な直交関数系に展開する変換である。最も簡単な時間-周波数変換の一種である短時間フーリエ変換 (short time Fourier transform: STFT) を例に説明する。STFT は、短い時間窓  $w(t)$  を時間的に掃引しながら信号  $u(t)$  に掛けたものを随時フーリエ変換することにより、瞬時的な周波数分布を得る方法である。STFT の結果として、次式で表される局在的なスペクトル分布の時系列な集合 (二次元分布) が得られる。

$$STFT(\tau, \omega) = FT[u(t) \cdot w(t - \tau)] \quad (1)$$

ここで、 $FT$  はフーリエ変換、 $t$  は注目する固定時刻、 $\tau$  は掃引のための時刻を表す。また、 $\omega$  は角周波数を表す。式

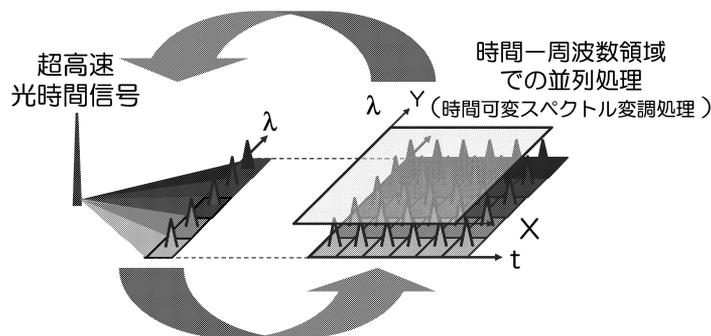


図2 光の時空間性を用いた超高速光情報処理の概念図。

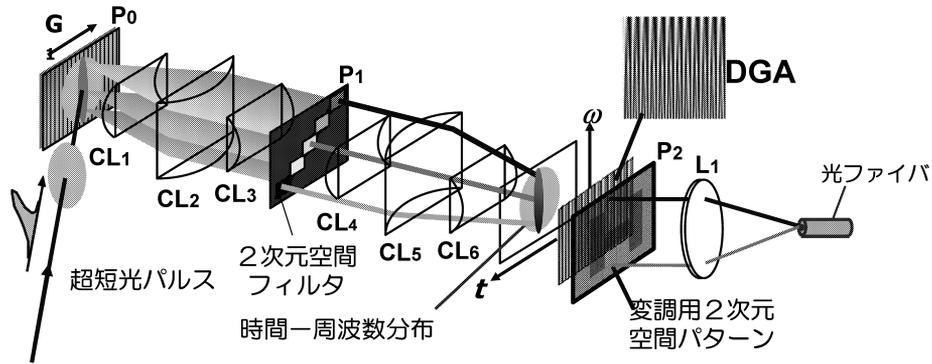


図3 時間と周波数の二次元情報を二次元空間上へ展開する光学システム。

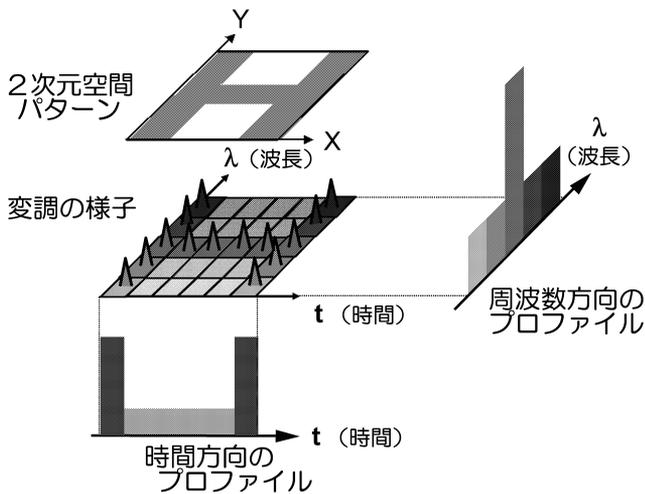


図4 変調用の二次元空間パターンと出力信号の時間および周波数変調の関係。

(1) より,  $STFT$  は, 信号波形  $u(t)$  と局所的な時間窓  $w(t)$  をもつテンプレート波形との相関処理を行っていることと等価であることがわかる. さらに, このテンプレート波形  $w(t)$  に用いられる直交関数系としてさまざまな関数系を選ぶことが可能であり, 変換自体に信号処理の考え方を導入することができる. 本手法では, 時間と周波数の二次元情報を並列に処理するために, 二次元空間面にそれらの情報を展開する. 時間と周波数の二次元情報を二次元空間面に展開するためには, 分光技術を利用して周波数情報を空間に展開する従来の時空間変換に加えて, 時間情報を空間に直接展開する直接時空間変換が必要となる. 一方, 空間面に適当な角度をつけて入射された超短光パルスは, 空間面にその瞬間的な射影像をつくる. この射影像は, 時間的な分布に対応しているので, 瞬間的な直接時空間変換を実現することができる<sup>10-12)</sup>. 図3に, 時間と周波数の二次元情報を二次元空間上へ展開する光学システムの一例を示す. システムは, 回折格子と複数の円筒レンズと二次元空間フィルターから構成されている.  $P_0$  面の回折格子上へ

斜入射された超短光パルスの時間波形  $u(t)$  は, 瞬間的に回折格子に射影される. この射影像が出力面に結像され, 水平軸に瞬間的な時間波形が得られる. 同時に回折格子によって水平方向に分光された光波  $U_0$  は,  $P_1$  面の二次元空間フィルターによって垂直方向に異なるスペクトル成分が切り出され, スペクトル分布の軸が垂直軸に回転して  $P_2$  面に結像される. その結果, 時間と周波数の二次元情報が二次元空間面に展開され, 次の分布  $U$  が近似的に得られる.

$$U(t, \omega, x, y) \propto \sum_{n=1}^N U_0(t - \alpha x, \omega_n - \omega_c) \cdot \text{rect}\left(\frac{y - n \cdot \Delta y}{\Delta y}\right) \quad (2)$$

ここで,  $x, y$  はそれぞれ  $P_2$  面の水平軸, 垂直軸の座標,  $\alpha, \Delta y, n, \omega_n, \omega_c$  はそれぞれ斜入射を表す定数,  $P_1$  面の二次元空間フィルターの各開口の高さ方向の大きさ, その開口位置を表す番号,  $n$  番目の開口により切り出される角周波数, 入射パルスの中心角周波数を示す. この空間展開された時間-周波数分布に対して, 二次元空間パターンによる変調を行うことにより, 時間と周波数の成分の直接変調が可能となる. 特に, 変調後の光波を再度時間信号に変換する場合には, すべてのスペクトル分解された光波を1つのビーム状にコリメートする必要がある. そのためには, 各スペクトル分解された光波が同じ方向に射出するように設計した異なる回折格子を, 各高さごとに配置した回折格子アレイ (designed grating array: DGA) を  $P_2$  面に用いればよい. その結果, 二次元空間パターンにより変調された時間と周波数の関係を保った状態で, すべての光は1つのビーム状にコリメートされる. 図4に, 変調用の二次元空間パターンと, 出力信号の時間および周波数変調の関係を示す. 出力信号の時間および周波数のプロフィールは, 変調用の二次元空間パターンの縦軸方向および横軸方向での積分にそれぞれ対応する.

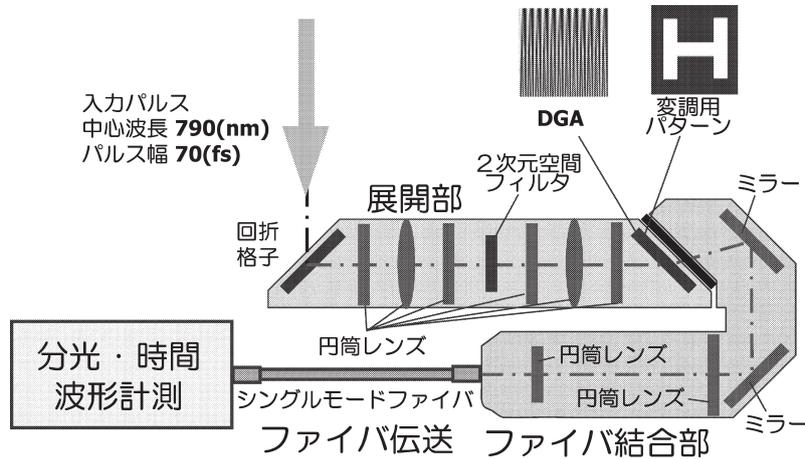


図5 時間可変スペクトル変調処理を実現するための実験系。

## 2. 時間可変スペクトル変調処理の実証実験と実験結果

図5は、時間可変スペクトル変調処理を実現するための実験系である。光源のチタンサファイアレーザーの諸元は、中心波長 790 nm、パルス幅 70 fs、繰り返し周波数 82 MHz である。回折格子は、1200 lp/mm のものを用いている。DGA は、各格子ピッチを 0.952~1.096  $\mu\text{m}$  の範囲で変化させたものを用いた。二次元空間パターンにより変調された後の光波は、ファイバー結合系によりシングルモードファイバーに結合される。シングルモードファイバー伝播後の出力信号の時間および周波数のプロファイルを計測することにより、所望の時間可変スペクトル変調処理が行われていることを確認した。変調用二次元空間パターンとしては、図4の例で用いたものと同様の文字パターン“H”を用いた。

図6に、シングルモードファイバー伝播後の出力信号の時間および周波数のプロファイルの計測結果を示す。3つの波長チャネルをもつ1 ps 間隔の4つの超短光パルスが得られていることがわかる。各パルスは、変調用の二次元空間パターンに対応した異なるピークパワーをもっている。このように、図4に示した変調用の二次元空間パターンと出力信号の時間および周波数変調の様子の関係が得られていることがわかる。これらの結果より、提案する系を用いて、時間可変スペクトル変調処理が実現できることを確認した。上述のシステムに超高速の面型の時間ゲートを付加することにより、文字画像に対応する時間と波長の二次元情報をもつ変調超短光パルスから、文字画像を二次元空間面へ展開することができる。また、二次元空間パターン情報の時間と波長への重畳も可能である<sup>13,14</sup>。

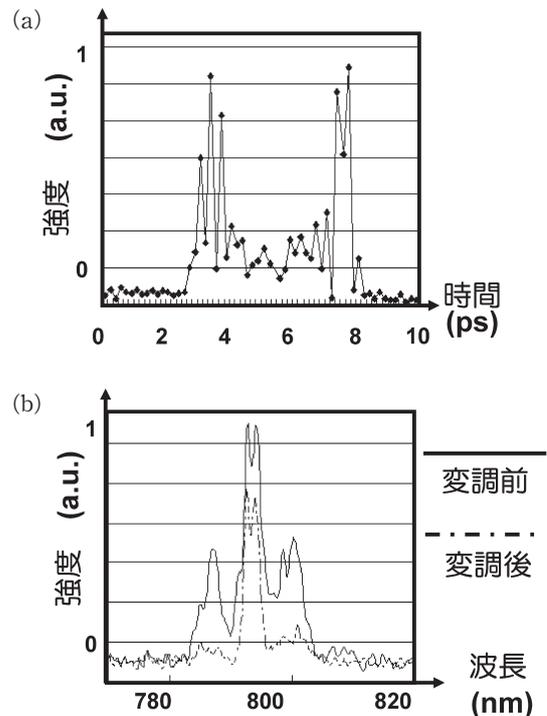


図6 シングルモードファイバー伝播後の出力信号の時間および周波数のプロファイルの計測結果。(a) 時間プロファイル、(b) 周波数プロファイル。

## 3. 最近の進展・今後の動向

時間と波長の二次元情報を二次元空間に展開する機能を超短光パルスの計測に応用することにより、周波数分布の時間的な変化である光スペクトログラムを空間的な干渉縞として計測することができる<sup>15,16</sup>。既知の超短光パルスの振幅と位相を基準にすることにより、信号超短光パルスの振幅と位相を求めることができる。機械的な走査がまったく必要ないために、原理的にシングルショットでの計測が可能である。図7に、試作した計測器（光スペクトログラ

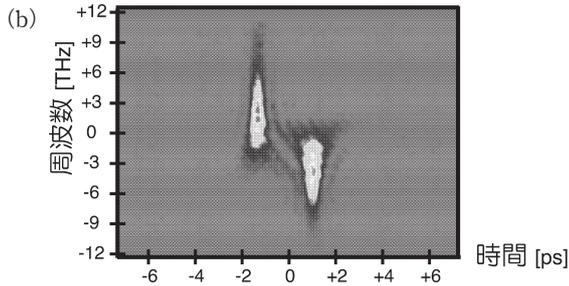
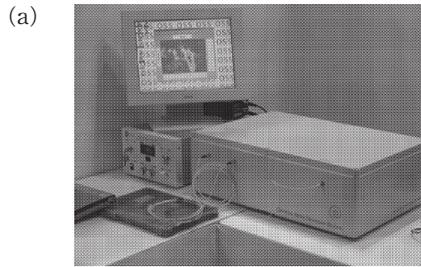


図7 (a) 試作した計測器 (光スペクトログラムスコープ) と (b) その計測結果例。

ムスコープ)と、チャープした超短光パルスの時間-周波数分布 (光スペクトログラム) の計測結果を示す。光スペクトログラムスコープのプロトタイプの中では、システムでの光量損失を最大限に抑えるために、微細加工技術を利用したさまざまな高機能光学素子を活用している<sup>17)</sup>。

次世代光通信の担い手であるフォトニックネットワーク実現の鍵となる技術のひとつとして、光ラベル認識処理実現への試みが精力的に行われている<sup>18)</sup>。時間と周波数の二次元情報を二次元空間に展開するために用いるテンプレート波形の直行関数系として複数のラベル信号波形群を採用することにより、複数のラベル信号波形の並列認識が可能となる。その基本要素として単一のラベル信号波形をテンプレート波形に用いた、超高速ラベル認識基礎実験を行っている<sup>19)</sup>。ここで用いられるラベル信号波形のテンプレートは、計算機ホログラムで設計された空間フィルタで実現されており、空間フィルタを最適に設計することにより、従来のマッチドフィルタリングに基づく光相関処理で大きな問題となっていた類似ラベル信号間のクロストークの問題を解消することが可能となる<sup>20)</sup>。この方法をさらに発展させて、伝送路では短いラベル符号を用いて伝送を行い、ラベル認識時に認識に適した別の符号に変換を行ってからラベル認識処理を行うことにより、認識能力を飛躍的に向上させることも可能となる<sup>21)</sup>。これらの例は、従来の光信号処理技術が新しい形で活用できることを示す典型的な事例と考えることができる。このように、今後、空間領域の光技術のもつ二次元並列性を活用した、さらに新しい機能が創出されることが期待される。

最後に研究の機会を与えてくださった大阪大学伊東一良教授、奈良工業高等専門学校一岡芳樹校長 (大阪大学名誉教授)、大阪大学谷田純教授に深く感謝いたします。また、本研究の遂行に多大なご協力を賜りました(財)大阪科学技術センター北村佐津木氏、尾下善紀氏 (現ニコン(株))、余万吉氏 (現富士写真フイルム(株))ほかの皆様にも厚く感謝いたします。また、本研究の一部は、大阪府地域結集型共同研究事業“テラ光情報基盤技術”、文部科学省都市エリア産学官連携促進事業 (大阪/和泉地域)“ナノ構造フォトニクス”の一環として行われました。

## 文 献

- 1) 例えば, 末田 正, 神谷武志: 超高速光エレクトロニクス (培風館, 1991).
- 2) T. Konishi, Y. Oshita, W. Yu, H. Furukawa, K. Itoh and Y. Ichioka: "Application of ultrafast time-to-two-dimensional-space-to-time conversion (I): Time-varying spectral modulation for arbitrary ultrafast signal generation," *IEEE Photonics Technol. Lett.*, **16** (2004) 620-622.
- 3) C. Froehly, B. Colombbeau and M. Vampouille: "Shaping and analysis of picosecond light-pulses," *Prog. Opt.*, **29**, (1983) 65-153.
- 4) Y. T. Mazurenko: "Pulsed Fourier optics," *Opt. Spectrosc.*, **57** (1984) 1-6.
- 5) A. M. Weiner: "Femtosecond Fourier optics: Shaping and processing of ultrashort optical pulses," *Trends in Optics and Photonics*, ed. T. Asakura (Springer Verlag, Berlin, 1999) 223-246.
- 6) S. Kawanishi, H. Takara, K. Uchiyama, I. Shake and K. Mori: "3 Tbit/s (160 Gbit/s/spl times/19 channel) optical TDM and WDM transmission experiment," *Elect. Lett.*, **35** (1999) 826-827.
- 7) M. Nakazawa, H. Kubota, K. Suzuki, E. Yamada and A. Sahara: "Ultrahigh-speed long-distance TDM and WDM soliton transmission technologies," *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, **6** (2000) 363-396.
- 8) T. Konishi and Y. Ichioka: *Optical Information Processing: A Tribute to Adolf Lohmann* (SPIE Press, Washington, 2002) pp. 311-341.
- 9) 例えば, L. Cohen: *Time-Frequency Analysis* (Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ, 1995).
- 10) T. Konishi and Y. Ichioka: "Ultrafast image transmission by optical time-to-two-dimensional-space-to-time conversion," *J. Opt. Soc. Am. A*, **16** (1999) 1076-1088.
- 11) K. G. Purchase, D. J. Brady and K. Wagner: "Time-of-flight cross correlation on a detector array for ultrafast packet detection," *Opt. Lett.*, **18** (1993) 2129-2131.
- 12) T. Konishi, H. Furukawa, Y. Ichioka, K. Nakagawa, M. R. Melloch and D. D. Nolte: "Direct time-space conversion of ultra-fast pulses based on interferometric time-of-flight cross correlation using a fast optical addressable spatial light modulator," *Opt. Quantum Electron.*, **33** (2001) 1063-1076.
- 13) Y. Oshita, T. Konishi and Y. Ichioka: "Ultrafast time-to-two-dimensional-space conversion system using SHG crystal," *Opt. Rev.*, **9** (2002) 141-145.
- 14) Y. Oshita, T. Konishi, W. Yu, K. Itoh and Y. Ichioka: "Application of ultrafast time-to-two-dimensional-space-to-time conversion (II): Time-varying spectral control for

- arbitrary ultrafast signal re-shaping,” IEEE Photonics Technol. Lett., **16** (2004) 620-622.
- 15) T. Konishi and Y. Ichioka: “Optical spectrogram scope using time-to-two-dimensional space conversion and interferometric time-of-flight cross correlation,” Opt. Rev., **6** (1999) 507-512.
  - 16) K. Tanimura, T. Konishi, K. Itoh and Y. Ichioka: “Amplitude and phase retrieval of ultrashort optical pulse using optical spectrogram scope,” Opt. Rev., **10** (2003) 77-81.
  - 17) W. Yu, Y. Oshita, H. Toyota, T. Konishi, T. Yotsuya and Y. Ichioka: “Development of deep gratings for wavelength dispersion applications,” Jpn. J. Appl. Phys., **42**, (2003) 3434-3437.
  - 18) 例えば, 北山研一: “21世紀ネットワークの創造と限りないインパクト”, 電子情報通信学会誌, **85** (2002) 298-305.
  - 19) T. Konishi, T. Kotanigawa, K. Tanimura, H. Furukawa, Y. Oshita and Y. Ichioka: “Fundamental functions for ultrafast optical routing by temporal frequency-to-space conversion,” Opt. Lett., **26** (2001) 1445-1447.
  - 20) H. Furukawa, T. Konishi, Y. Oshita, W. Yu, K. Itoh and Y. Ichioka: “Suppression of crosstalk in header recognition based on optical correlation using multiple-object discriminant filter,” Jpn. J. Appl. Phys., **43** (2004) 7065-7068.
  - 21) H. Furukawa, T. Konishi and K. Itoh: “Optical label recognition using additional pre-spread coding,” Electron. Lett., **40** (2004) 1440-1441.

(2005年5月25日受理)