

# 光時間周波数信号処理による 超高速光計測

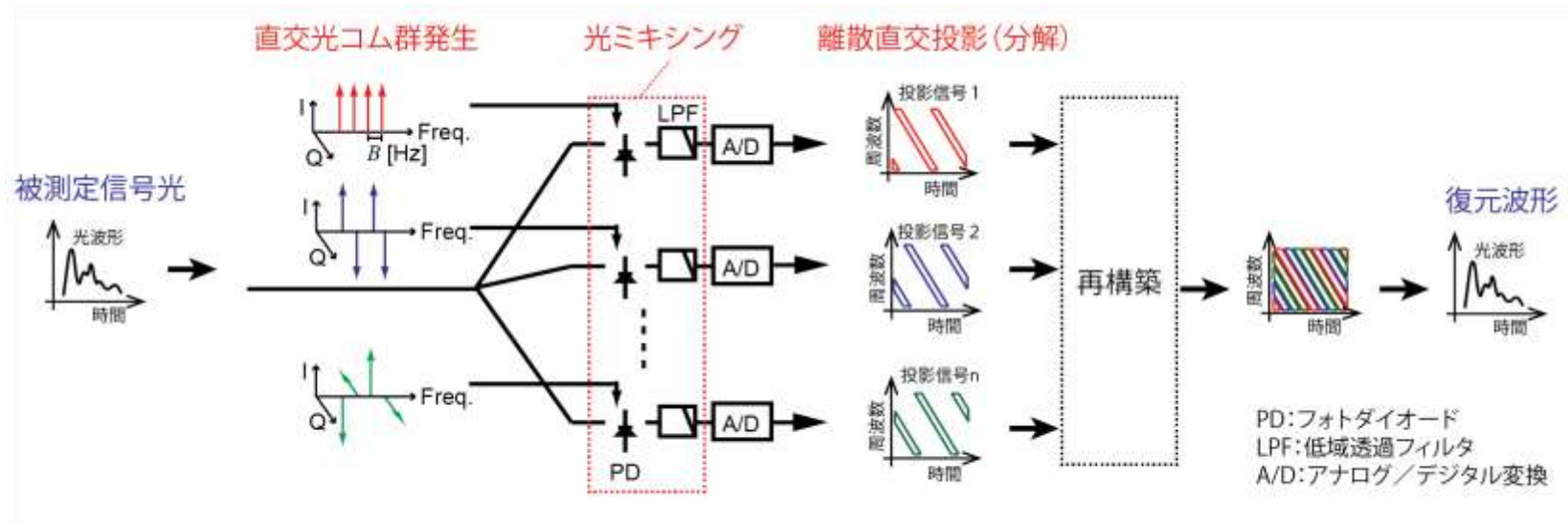
東京都立大学 システムデザイン学部  
電子情報システム工学科

准教授 坂本高秀

2021年2月5日

# 光時間周波数信号処理による超高速光計測

科学技術振興機構 戦略的創造研究推進事業個人型研究(さきがけ)  
「光の極限制御、積極利用と新分野開拓」:平成27~30年度  
「光時間周波数離散直交変換による超高速連続光計測とその仮想化」



- **超高速連続光サンプリングを実現**  
時間分解能:  $\sim \text{ps}$ , サンプリングレート:  $\sim \text{TSa/s}$
- **光通信用光エレクトロニクスを駆使**  
複雑な光段処理 (超短パルス光源, 非線形光学, 光フィルタ等) に依存しない

# 光時間周波数信号処理による超高速光計測

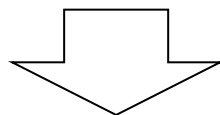
## 背景

高速現象の計測, 補足, 解析: 電子計測技術が主力

例: 汎用オシロスコープによる波形計測

電圧, 電流などの高速時間波形を測定, 高速現象を捕捉  
研究開発のあらゆる分野で活躍

問題点: エレクトロニクスの応答速度限界により, 測定帯域はGHz程度  
(ハイエンドなものでも) 数10GHz程度が限界



- 光を介することにより, エレクトロニクスの速度限界を超えた「超高速波形計測」の実現が狙われる.
- 電子計測では捉えられない, 超高速現象の捕捉に期待.

# 光時間周波数信号処理による超高速光計測

しかしながら、既存の光波形計測技術では..

## E/O変換+高周波オシロスコープ【既存技術I】:

(ハイエンドなものは)リアルタイム計測能力に優れるものの  
計測速度, 帯域に限界あり: 数10GHz程度

(より一般的なものは)(間欠)サンプリングに基づき, リアルタイム計測を行えない

## 光/光サンプリング【既存技術II】:

高い時間分解能(ピコ秒~フェムト秒領域)が得られるものの  
乏しいリアルタイム計測能力,  
重厚な計測系(超短光パルスレーザや, 非線形光学に依存)

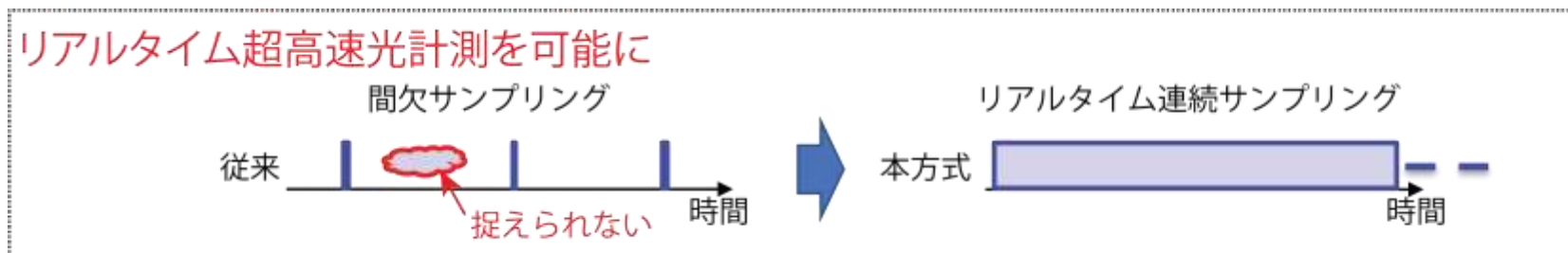
# 光時間周波数信号処理による超高速光計測

## 目的

リアルタイム計測，シングルショット計測を可能とする，実践的な超高速光波形計測技術を開発し，制御性，可搬性に優れた計測装置化を目指す。

- 高い時間分解能：ピコ秒（～フェムト秒領域）
- 優れたリアルタイム計測能力：
  - サンプルングレート：100 GSa/s～Tsa/s以上
  - 長い測定時間窓：ミリ秒以上

を両立



過渡現象等の一度きりの現象を逃さず捉える。  
超高速現象，低速現象が混在してもOK

# 光時間周波数信号処理による超高速光計測

## ターゲット

超高速リアルタイム光波形計測能力, 制御性, 可搬性に優れた光計測装置としての優位性・汎用性を活かし, 様々な分野への普及を目指す.

### #1 通信波長帯(1.55 $\mu\text{m}$ )での応用

- (光通信用)光/電子デバイス研究・開発  
 数100GHz~THzの帯域をカバーする, 超高速光信号解析, 超高速光/電子応答, 過渡応答評価等の手法が求められている.  
 現状: E/O変換+高周波オシロスコープ【既存技術I】による. 帯域: 数10GHz程度
- 光センシング, Lidar用(1.55  $\mu\text{m}$ 帯)  
 位置, 形状検出の高速化, 高感度化, 高解像度化が求められている.  
 (空間分解能: m $\rightarrow$ cm $\rightarrow$ mm $\rightarrow$  $\mu\text{m}$ )  
 現状: time-of-flight計測の時間分解能により制約(主に900nm帯により展開)
- 超高周波デバイス研究・開発(ミリ波, テラヘルツ波)  
 超高周波(~100GHz~THz)の高効率検出は困難  
 現状: EOサンプリングなど, 低速等価サンプリングに限られる.

# 光時間周波数信号処理による超高速光計測

## ターゲット

超高速リアルタイム光波形計測能力，制御性，可搬性に優れた光計測装置としての優位性・汎用性を活かし，様々な分野への普及を目指す。

### #2 各波長帯への応用展開

#### ・ 超高速物理計測，物性解析（各波長帯）

超高速光パルス応答，超高速分光計測を行える簡易な光計測器が求められている。

現状：超短パルス光源や，非線形光学に依存，リアルタイム計測能力に乏しい

#### ・ バイオ計測，医療応用（1 $\mu$ m帯，可視波長帯）

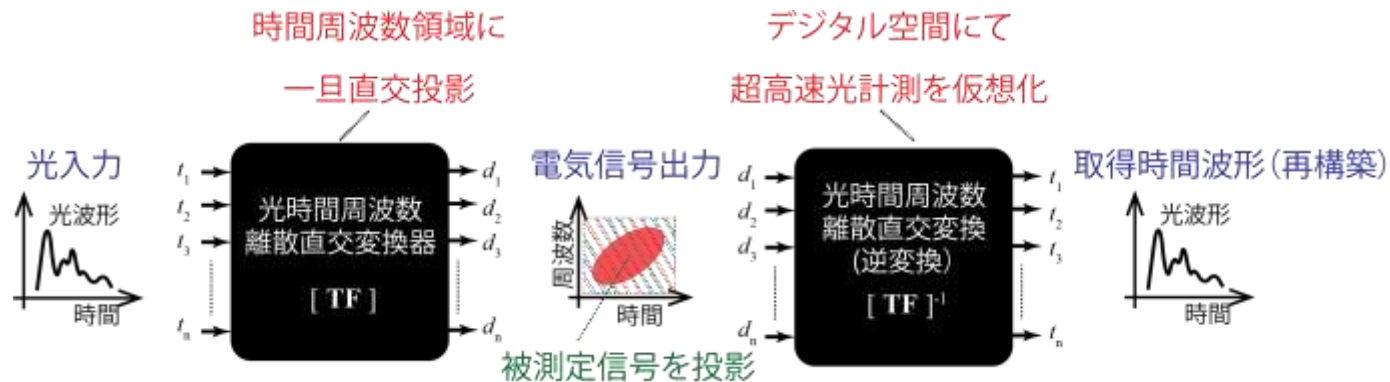
蛍光測定，放射光計測，顕微システム応用等が求められている。高速・リアルタイム計測能力等が求められている。

現状：（目的により）超短パルス光源依存のシステムが多い

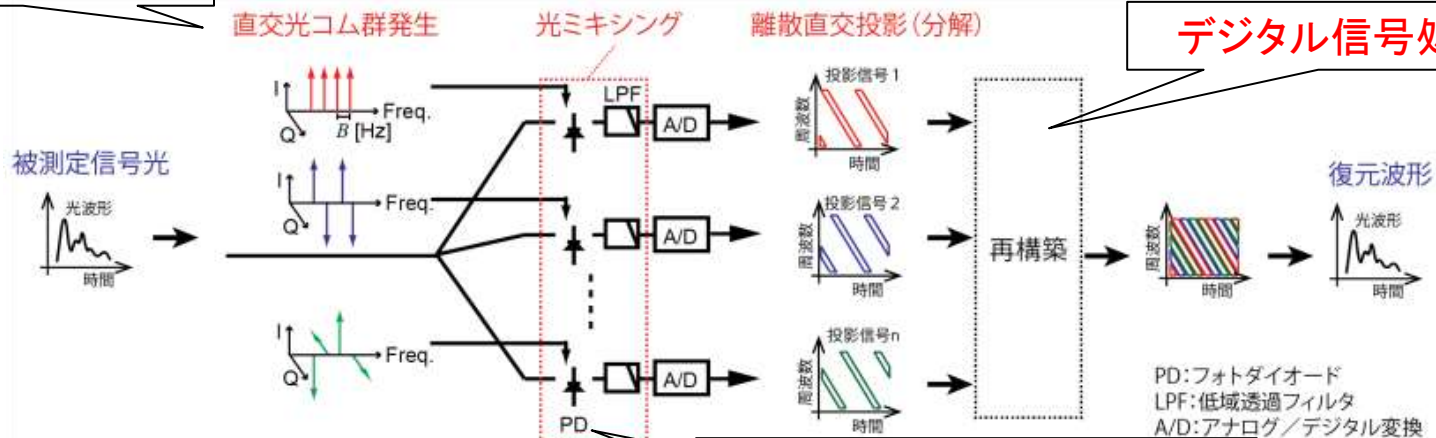
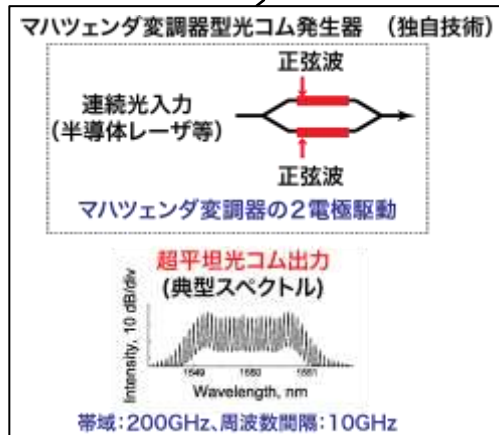
課題： 発光現象等に応じた光計測技術を各波長帯に準備する必要あり

# 光時間周波数信号処理による超高速光計測

## 原理



光変調器(成熟技術)にて



デジタル信号処理にて

フォトダイオード(成熟技術)にて

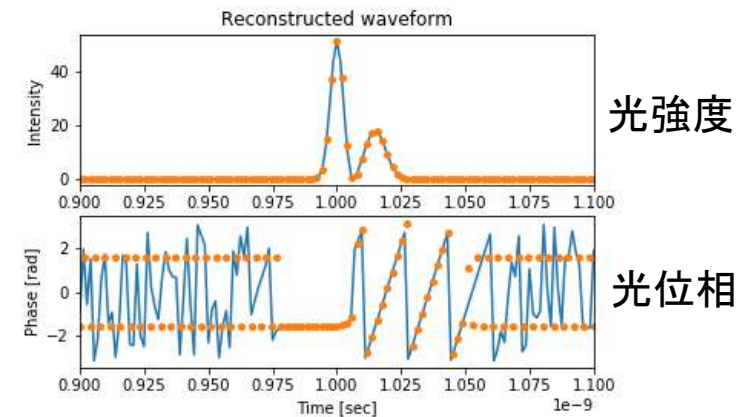
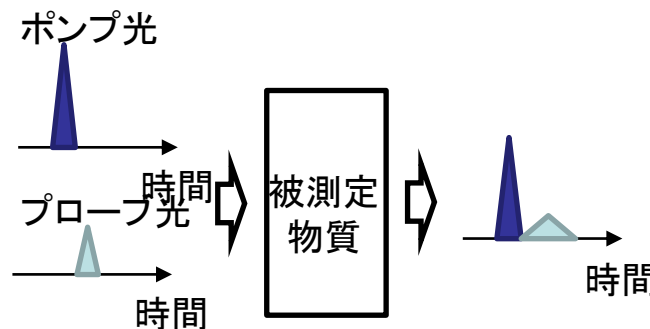
(成熟した)光エレクトロニクス(連続光源, 光検出器, フォトダイオード)のみを用い~THz以上のリアルタイム測定帯域を確保



# 光時間周波数信号処理による超高速光計測

## 数値計算例

ツインパルスの  
光強度, 位相計測を想定



- 実験的には原理実証に成功,  
100 GSa/s (サンプリングレート), 10 ps (時間分解能) 程度の性能を確認 (論文投稿準備中)
- 展示会にて技術紹介
  - ナノテク展2019 (JSTブース)  
@東京ビッグサイト
  - バイオ・ジャパン展2020  
@横浜パシフィコ



現状はこの規模

ナノテク展2019 JSTブースにて  
2019/1/30-2/1 @東京ビッグサイト

# 従来技術とその問題点(1)

## E/O変換＋高周波オシロスコープ【既存技術I】

光・電変換素子をフロントエンドに持つ、光サンプリングオシロスコープは、高速光波形計測のために用いられてきているが、

- 時間分解能は光・電変換素子の応答素子により制限される
  - 時間分解能は、数10ピコ秒程度にとどまる。
- リアルタイム計測、シングルショット測定を行うためには、超高速アナログデジタル変換回路(ADC)の開発が必要
  - 光・電変換素子の応答帯域を完全にカバーするのは困難。

等の問題があった。

## 従来技術とその問題点(2)

### 光/光サンプリング【既存技術II】

ピコ秒, フェムト秒の時間分解能を持つ光/光サンプリングに基づく超高速光波形計測技術(例:超高速分光装置等)は, 先端光計測技術として培われてきているが,

- 超高速レーザの適用が必須であり, 非線形光学, 高精細フィルタといった重厚な技術が必須であった.
- リアルタイム計測, シングルショット測定は困難であった(高度技術が必要であった).

等の問題があった. ラボユースに留まり, 広く利用されるまでには至っていない.

# 新技術の特徴・従来技術との比較

## 特徴(機能面)

- ・ シングルショット・リアルタイム計測能力を持つ超高速光計測が可能に
- ・ 長いタイムフレーム(数ミリ秒)内で引き起こされる超高速光現象を逃さず捉える.
- ・ 数100GHz～THzの帯域をカバー(時間分解能:ps～(fs領域))
- ・ 光振幅, 光位相, 波長, 偏光を全て計測可能

# 新技術の特徴・従来技術との比較

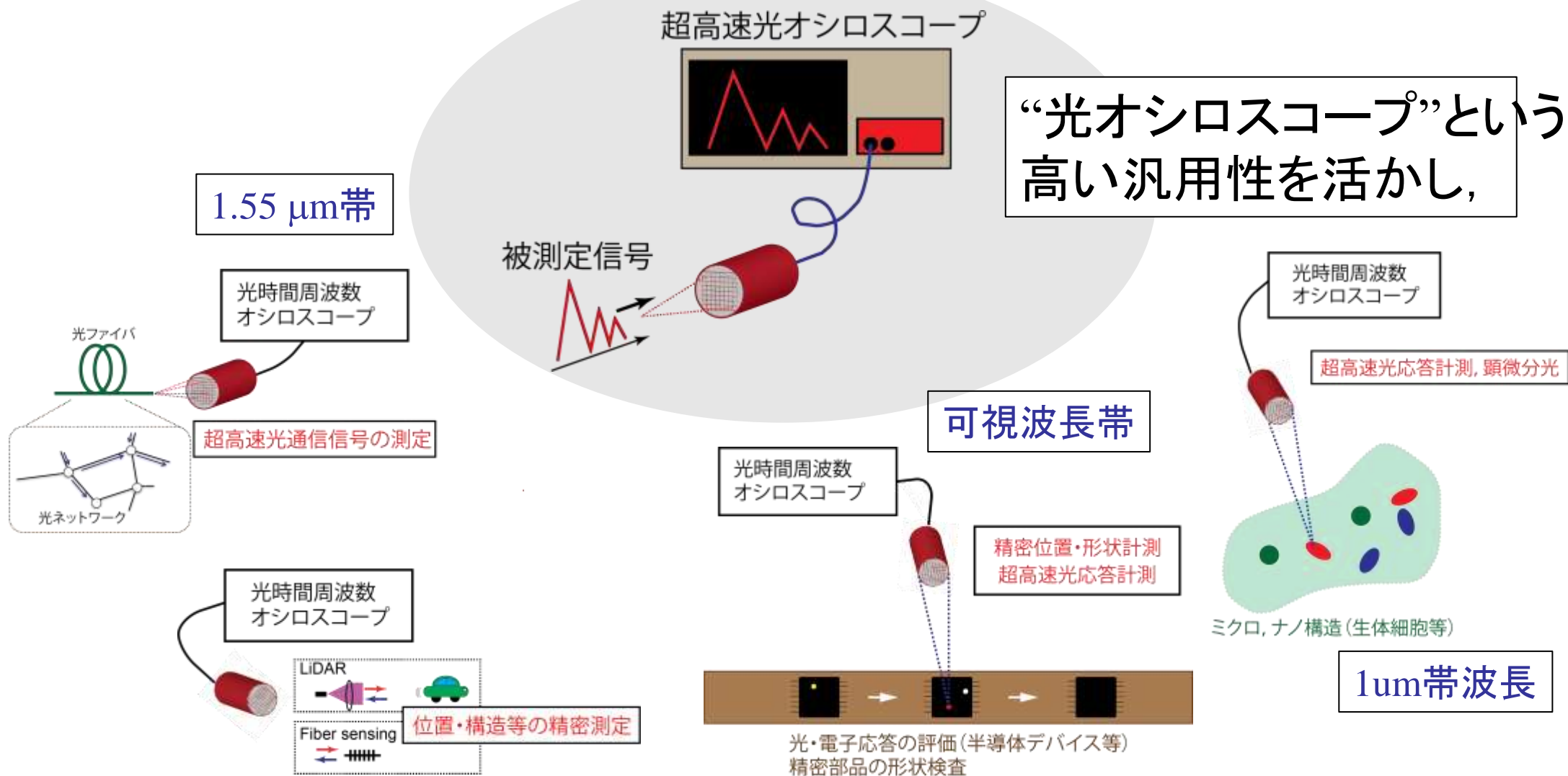
## 特徴(技術面)

- ・ 十分に成熟した光エレクトロニクス, 光ファイバ技術のみを駆使して超高速光計測機能を実現
- ・ 従来必須であった重厚な超高速光計測関連技術(超高速レーザ(超短パルス光源), 非線形光学, 高精細光フィルタ)を廃する.
- ・ コンパクトかつ実践的な超高速光波形計測技術の確立へ(ラボ・ユースからの卒業を)

# 新技術の特徴・従来技術との比較

	本技術	光/電変換+電氣的 オシロスコープ [従来技術 I]	光/光サンプリング [従来技術 II]
サンプリング レート	超高速 100 Gsa/s~T sa/s以上	高速 数10 Gsa/s	低速 Sa/s~ kSa/s
時間分解能	ps (fs領域も視野に)	数10ps	ps-fs
帯域	超広帯域 100 GHz~THz以上	低速 数10 GHz	超広帯域 THz以上
リアルタイム計 測	対応 時間窓:msec以上	対応 時間窓:msec以上	非対応, 限定的
光計測能力	光強度, 光位相, 光波長	主に光強度	主に光強度

# 想定される用途



“光オシロスコープ”という  
高い汎用性を活かし、

1.55 μm帯

超高速光オシロスコープ

被測定信号

光時間周波数  
オシロスコープ

超高速光通信信号の測定

可視波長帯

光時間周波数  
オシロスコープ

精密位置・形状計測  
超高速光応答計測

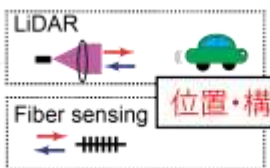
光時間周波数  
オシロスコープ

超高速光応答計測, 顕微分光

マイクロ, ナノ構造(生体細胞等)

1 μm帯波長

光時間周波数  
オシロスコープ



位置・構造等の精密測定



光・電子応答の評価(半導体デバイス等)  
精密部品の形状検査

光応答は波長依存: 波長に応じたケアが必要

# 想定される用途

- 実践的な構成(従来必須であった超高速レーザ, 非線形光学, 高精細光フィルタ技術が不要)であることを活かし, 超高速レーザ技術に基づく超高速光計測・分光技術の置き換えを狙っていく.
- 汎用光オシロスコープとしての応用展開を狙う.
- 通信応用, 非通信応用, 双方にインパクトを.
- 超高速光計測を必要とする物理計測, バイオ計測, 医療応用といった分野や用途に展開することも可能と思われる.



# 実用化に向けた課題

- 現在, 光通信波長帯(1.55um帯)での原理実証済み.
  - 今後, 1.55um帯におけるプロトタイプ開発を行っていく.
  - ターンキー動作を目指す!
- また, 他波長帯域での実証・装置化を目指す. 超高速レーザに基づく超高速光計測・分光技術の置き換えを狙っていく. (望: 共同開発)
  - 光エレクトロニクス素子(レーザ, 検出器等)自体は各波長で充実(仕様)
  - Fiber opticsは波長により活用可能
- 併せて, 幅広い分野への応用を見据えたアプリケーション開拓が必要 (望: 共同研究・開発)

# 企業への期待

## 「計測装置化」のパートナー探し

- 未解決の他波長対応(例:可視波長, 1 $\mu$ m帯対応)については, 対応波長に応じた既存光エレクトロニクス(半導体レーザ, 光変調, 光検出技術)の活用により克服できると考えている.
- 光計測装置開発実績を持つ(もしくはその能力を有する)企業との共同開発を希望
- 既に超高速光計測・分光のための光計測装置を開発中であり, 高機能化, 小型化による差別化を考えている企業には, 本技術の導入が有効と思われる.

# 企業への期待

## 「アプリケーション開拓」のパートナー探し

- 通信波長帯(1.55um)での応用展開
  - 波長にこだわらないアプリケーションなら、通信波長帯での開発は有利.
  - 通信/非通信の応用展開のためのパートナーを探す
- 非通信波長帯(可視波長等)への展開
  - バイオ計測, 医療計測等の各分野での計測機器の開発実績を持ち, 同分野のニーズを見渡せるパートナーを探す
  - 上記分野に限らず幅広い応用展開の方向性を

# 関連特許

光計測技術関連：新規出願準備中

光コム光源関連：

- 「超平坦光周波数コム信号発生器」（特許4771216）
- “Interval control-type optical comb, ”Interval control-type optical comb (PCT/JP2017/032887)

光オシロスコープ関連：

- 「一括取得型光検出装置及び光検出方法」（出願番号：15/323728, 登録番号：10090918）
- “Collective acquisition-type photodetection device and photodetection method, ” (PCT/JP2015/065892)

# お問い合わせ先

**東京都立大学**

**総合研究推進機構・URA**

**TEL 042-677-2829**

**FAX 042-677-5640**

**メールでのお問い合わせは以下です**

**<https://tmu-rao.jp/contact/>**