



カーボンナノチューブを用いた広帯域 超短パルスファイバレーザー光源の開発

名古屋大学

工学部・工学研究科 電子工学専攻

教授 西澤 典彦

nishizawa@nuee.nagoya-u.ac.jp

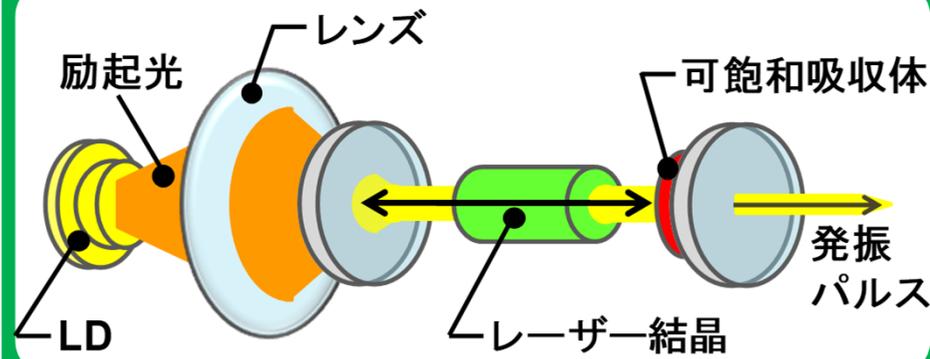
産業技術総合研究所

主任研究員 榊原 陽一

yo-sakakibara@aist.go.jp

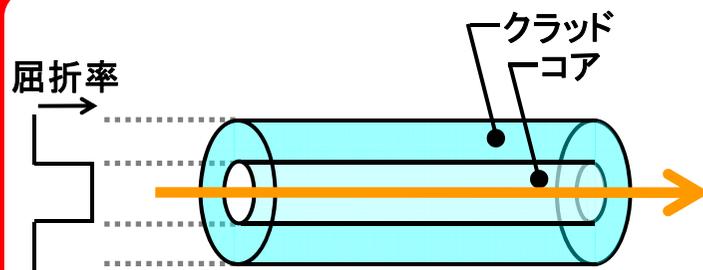
1. 単層カーボンナノチューブを用いた超短パルスファイバレーザー
 - ・波長1.55 μm Er添加超短パルスファイバレーザー
 - ・波長1.8-2.0 μm Tm添加超短パルスファイバレーザー
2. 広帯域波長可変超短パルス光源
 - ・1.55~2.0 μm 広帯域波長可変超短パルス光源を開発
 - ・1ショット毎に波長を制御可能, 世界最速の波長可変光源
3. 楕状分布ファイバを用いたスペクトル圧縮技術
 - ・広帯域波長可変狭線幅光源の開発
 - ・スペクトル幅 0.5~1.0 nmまで狭窄化
4. 1.0~2.0 μm 広帯域コヒーレントスーパーコンティニューム光源
 - ・コンパクト, 平坦, 低雑音, コヒーレント
 - ・分光計測, OCT, 光周波数コム等に有用

固体レーザー

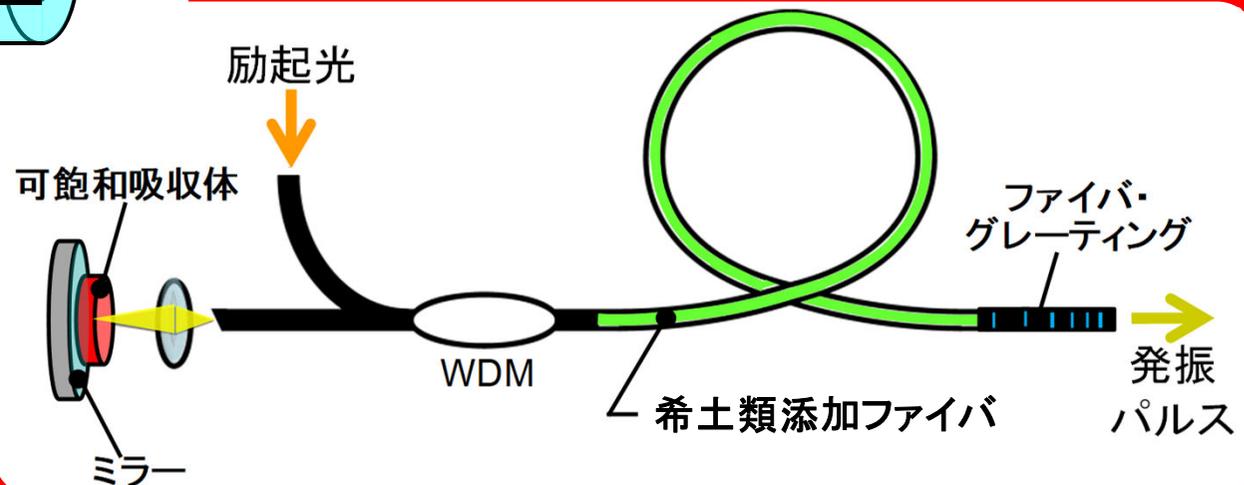


ファイバーレーザーの利点

- (1) 小型・軽量
- (2) 水冷・アライメント不要
- (3) 長寿命・メンテナンスフリー
- (4) ビーム品質が良い

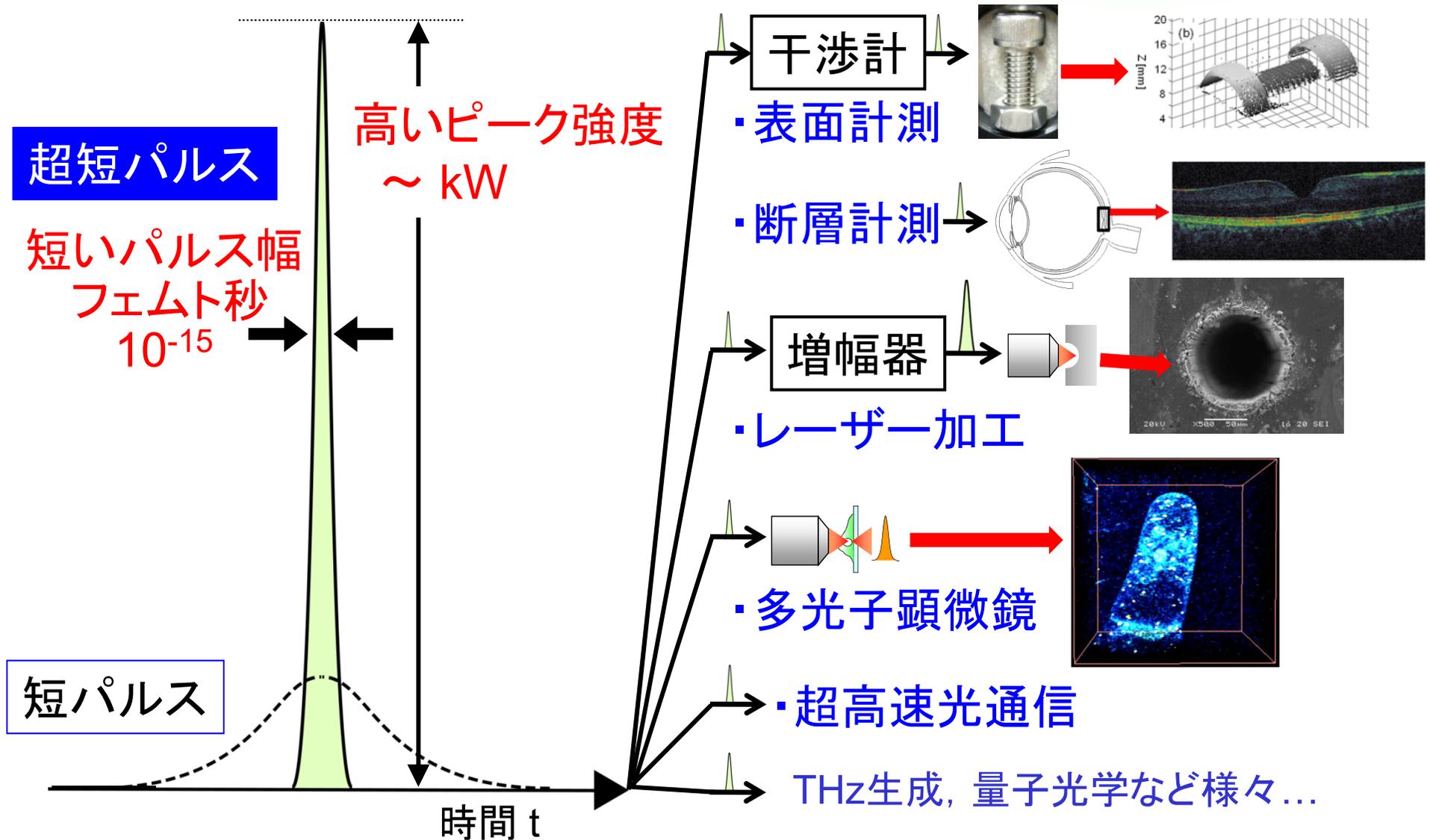


ファイバーレーザー



背景（超短パルスと応用技術）

レーザー技術の進歩 (モード同期) → 超短パルス



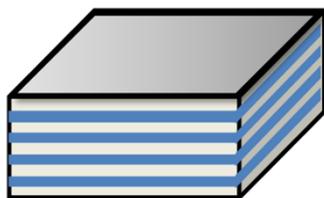
受動モード同期手法

- ・非線形偏波回転
- ・非線形増幅ループミラー
- ・可飽和吸収体

より安価・
安定・小型化可能で、
高機能化が期待できる

半導体可飽和吸収ミラー (SESAM)

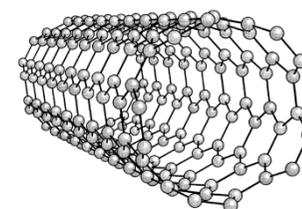
現在主に用いられている



- ・主に反射型のデバイス
- ・製作過程が複雑で高価

単層カーボンナノチューブ (SWNT)

2003年～



[1]

- ・反射・透過型のデバイスが可能
- ・作製が容易で安価 ・広帯域

単層カーボンナノチューブ(SWNT)を用いた受動モード同期 超短パルスファイバレーザー

新技術説明会
New Technology Presentation Meetings!

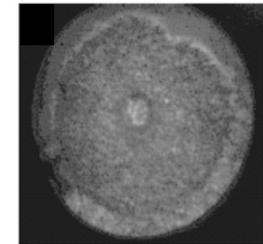
2003年: SWNTを用いた受動モード同期ファイバレーザーの初の報告

S.Y.Set, H.Yamaguchi, Y.Tanaka, M.Jablonski, Y.Sakakibara,
A.Rozhin, M.Tokumoto, H.Kataura, Y.Achiba, and K.Kikuchi
OFC2003, PD44



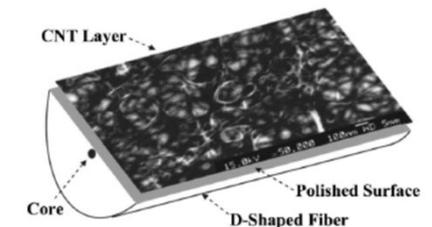
・直接堆積型

S.Yamashita et al, OL 29, 1581 ('04)
J.W.Nicholson et al, OE 15, 9176 ('07)



・近接場型

Y.W.Song, et al, OL 32, 148 ('07), APL 92
K.Kieu et al, OL 32, 2242 ('07)



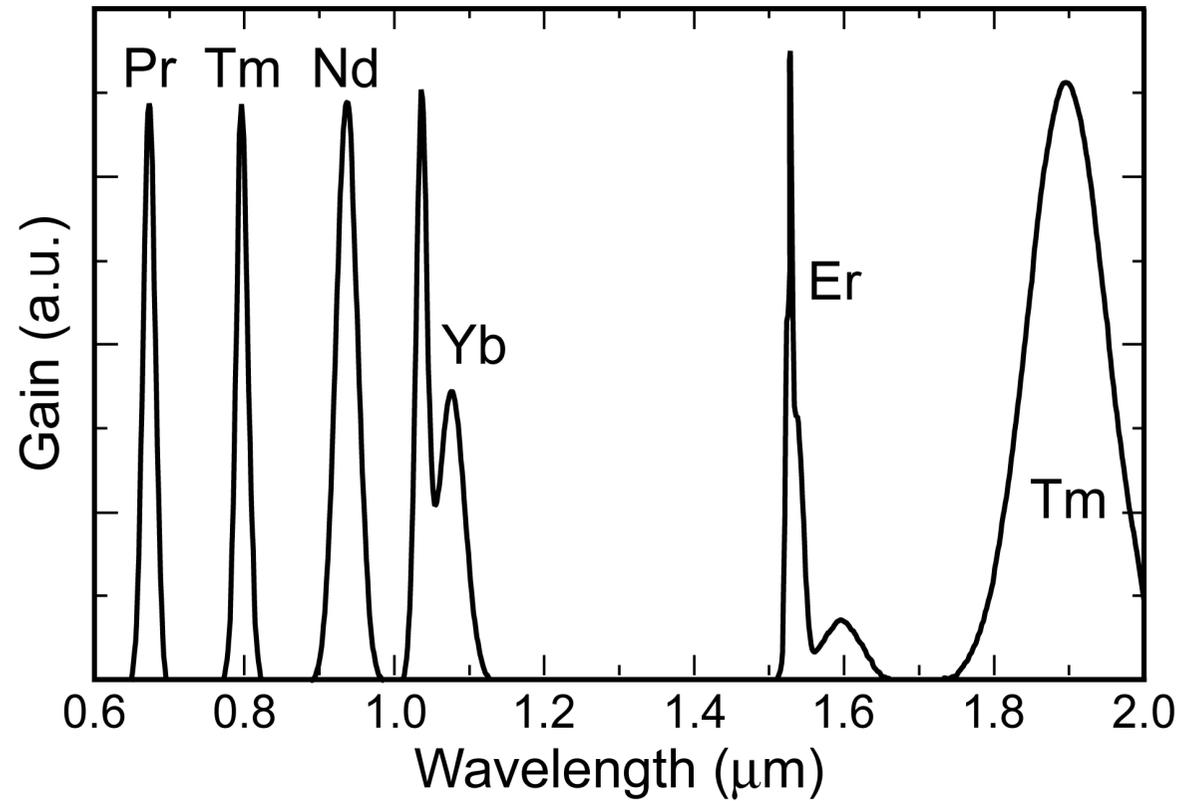
・フィルム型

Y.Sakakibara, et al, ECOC'05, 1, 37 ('05)
A.G.Rozhin, et al, APL 88, 051118 ('06)
M.Nakazawa, et al, OL 31, 915 ('06)



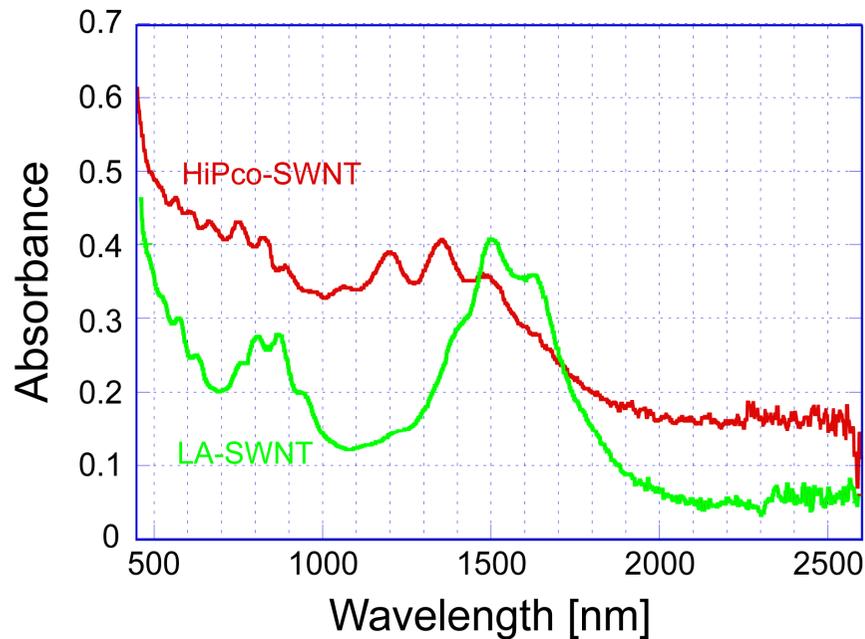
丈夫, 柔らかい, 全偏波保持型が構築可能

N.Nishizawa, Y.Seno, Y.Sakakibara, et al, OE 16, 9429 ('08)



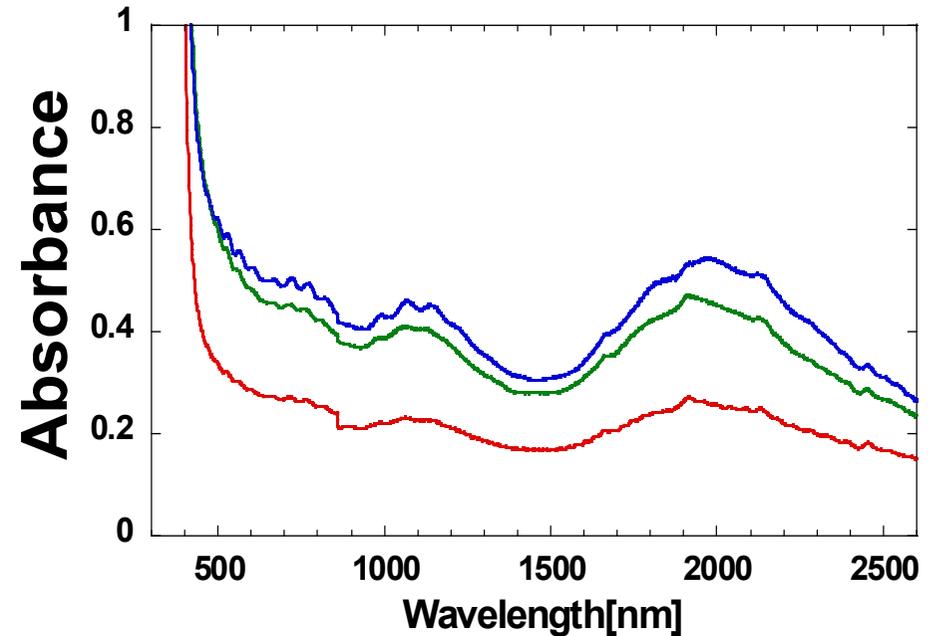
開発した単層カーボンナノチューブフィルムの吸収スペクトル

1.55 μm 用SWNTフィルム



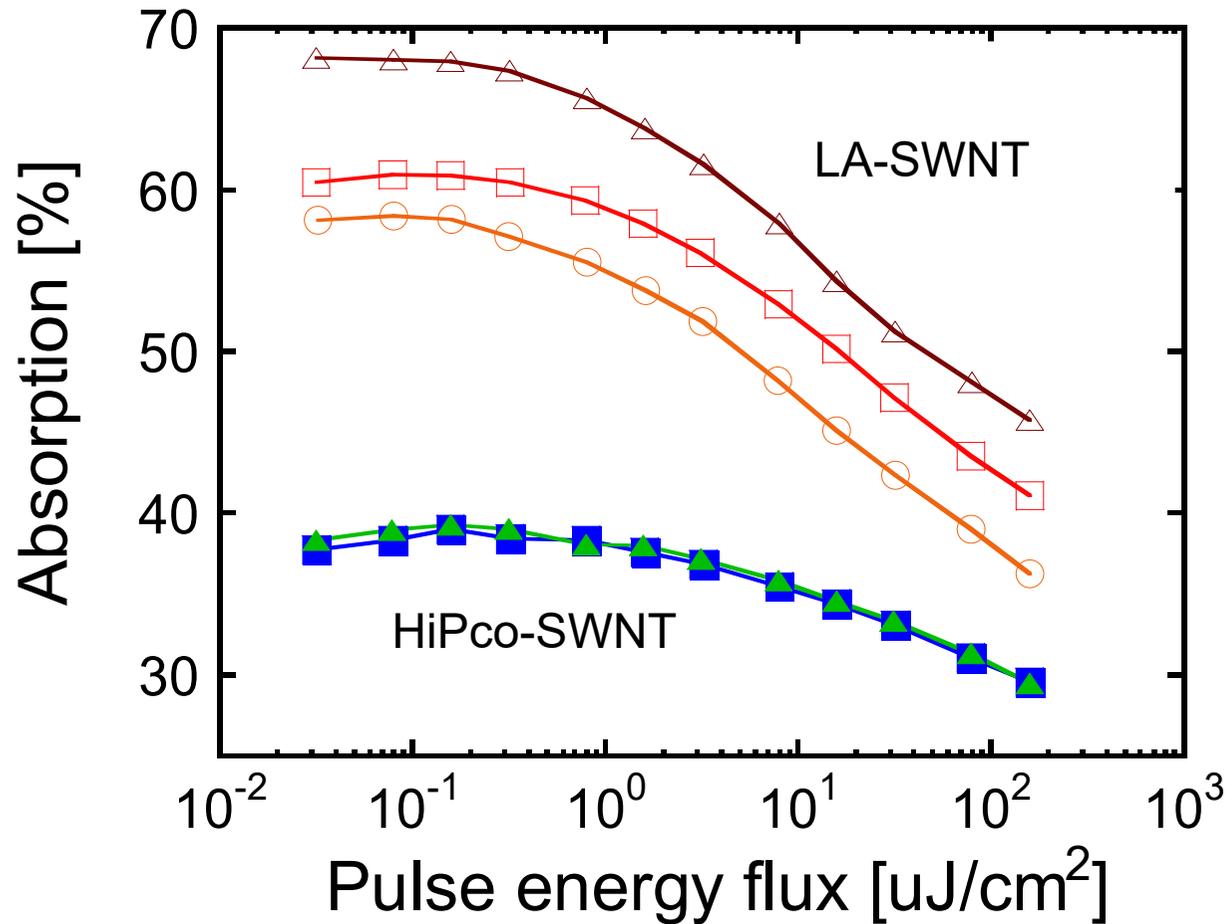
直径 1.2 nm のSWNTを精製して
使用

2.0 μm 用SWNTフィルム

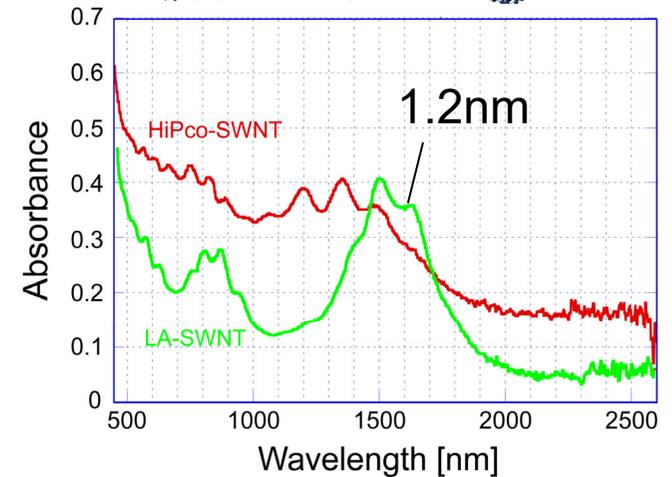


直径 1.6 nm のSWNTを精製して
使用

SWNTを均一に分散させたポリイミドフィルムを開発



吸収スペクトル

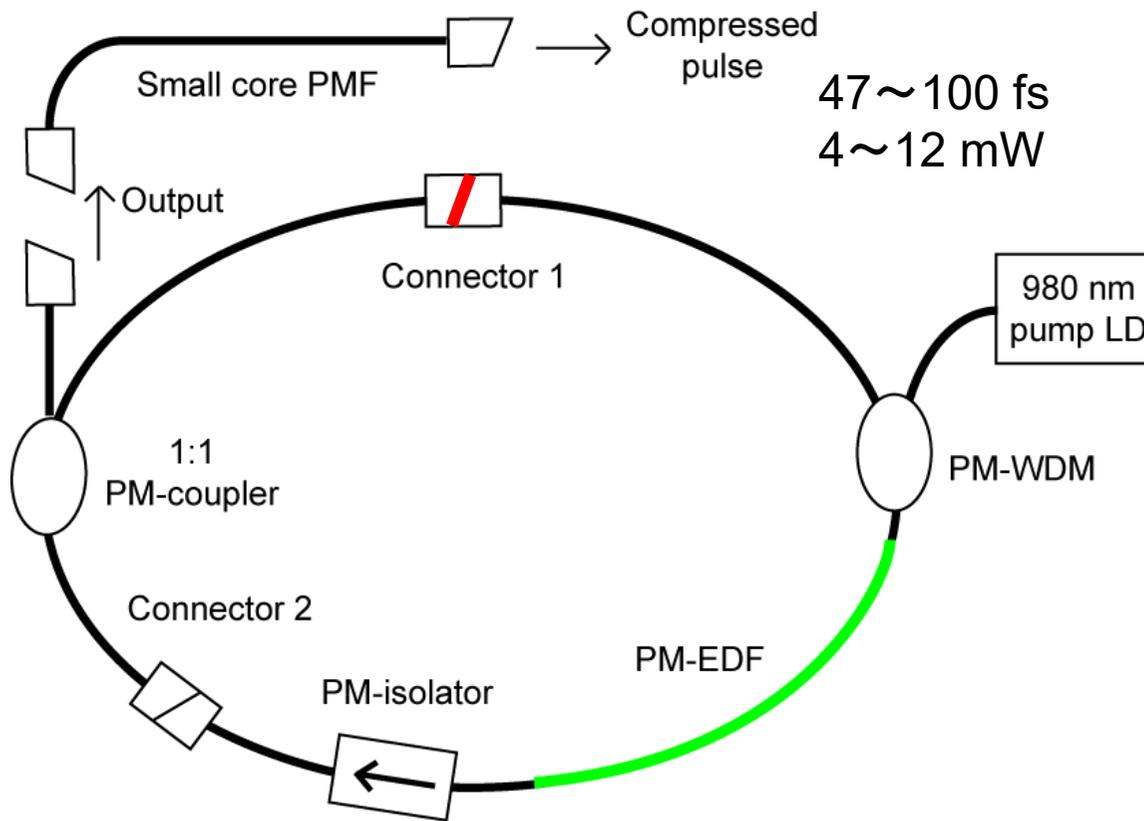


2mm × 2mm × 17 μm



各種ポリイミド分散SWNTフィルムの可飽和吸収特性

ポリイミド分散SWNTフィルムをコネクタに設置した様子

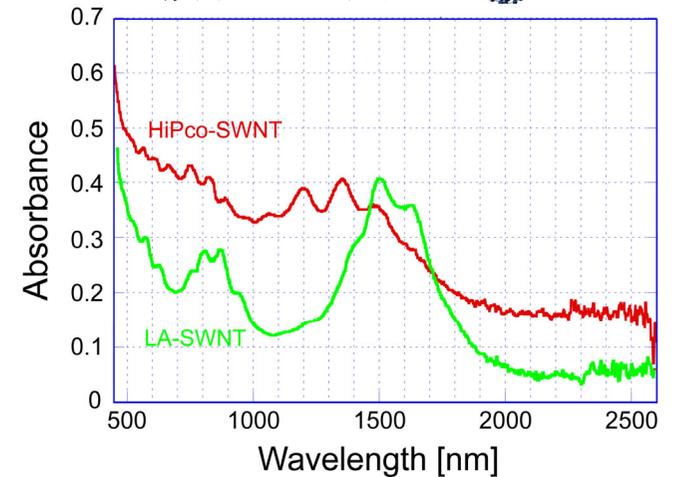


ファイバレーザの構成

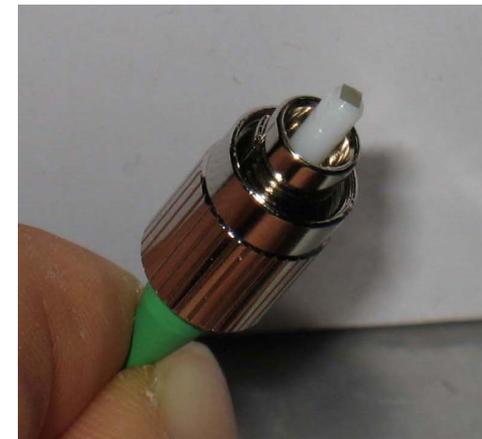
可飽和吸収+非線形効果+波長分散

➡ 超短パルスが発振

吸収スペクトル

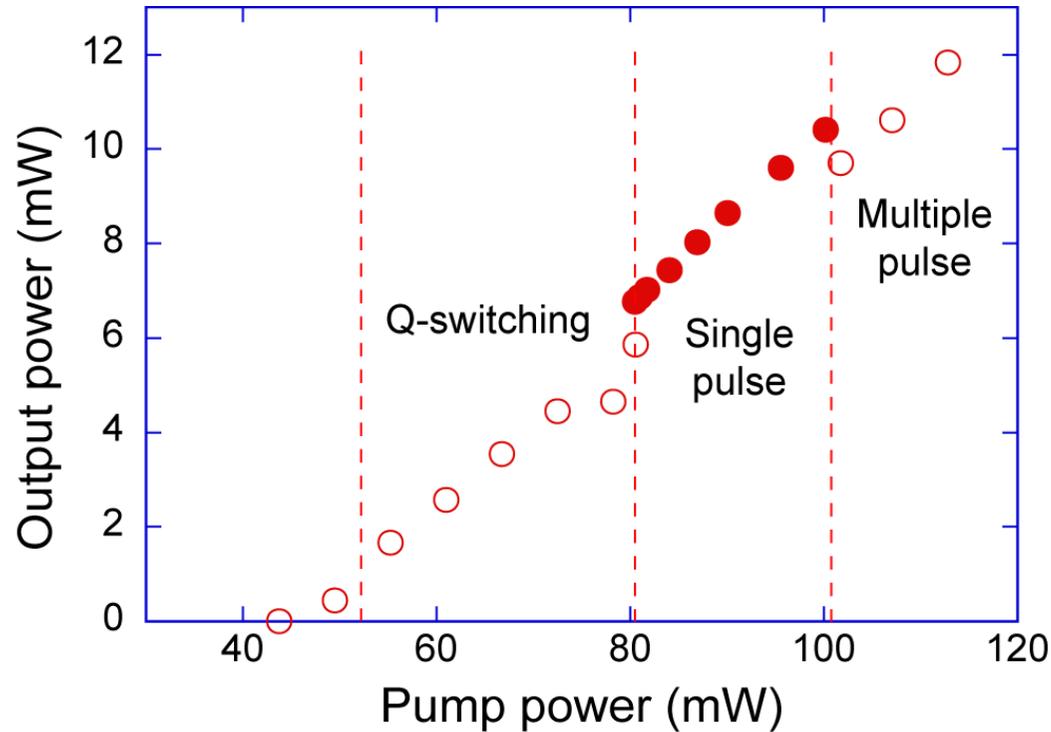


2mm × 2mm × 17μm

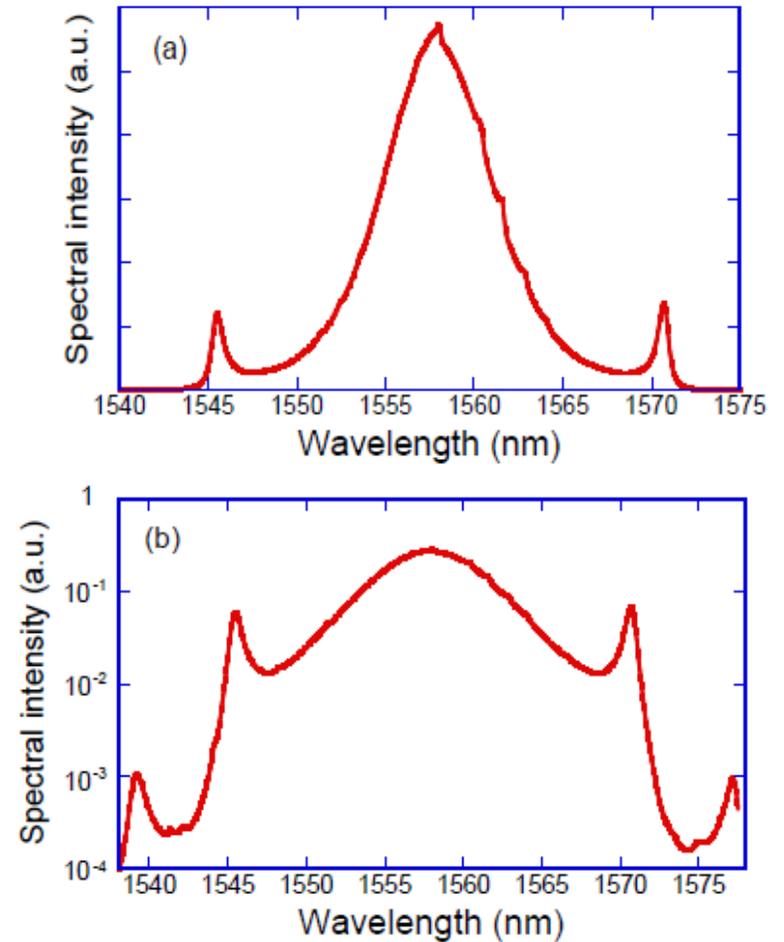


ポリイミド分散SWNTフィルムをコネクタに設置した様子

励起光に対する出力の変化



パルススペクトル



$\Delta t = 354$ fs

- ・無調整でセルフスタート
- ・パルスエネルギーの上限はシングルパルス条件の閾値で制限

SWNTを用いた受動モード同期ファイバレーザの数値解析

自己位相変調 自己急峻化 ラマン散乱

$$\frac{\partial A}{\partial z} + \frac{i}{2} \beta_2 \frac{\partial^2 A}{\partial T^2} - \frac{1}{6} \beta_3 \frac{\partial^3 A}{\partial T^3} + \frac{(\alpha(A,t) - g(A,t))}{2} A = i\gamma \left[|A|^2 A + \frac{i}{\omega_0} \frac{\partial}{\partial T} (|A|^2 A) - T_R A \frac{\partial |A|^2}{\partial T} \right]$$

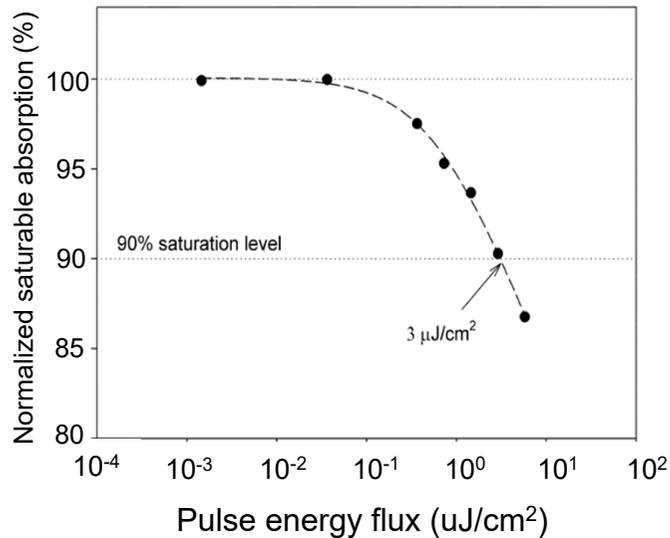
波長分散

利得・吸収

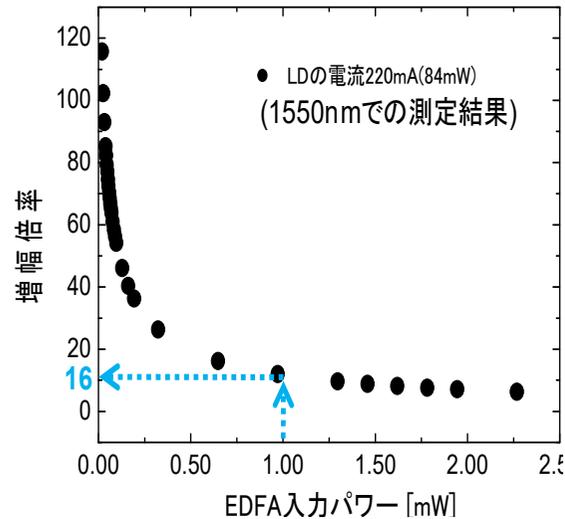
非線形効果



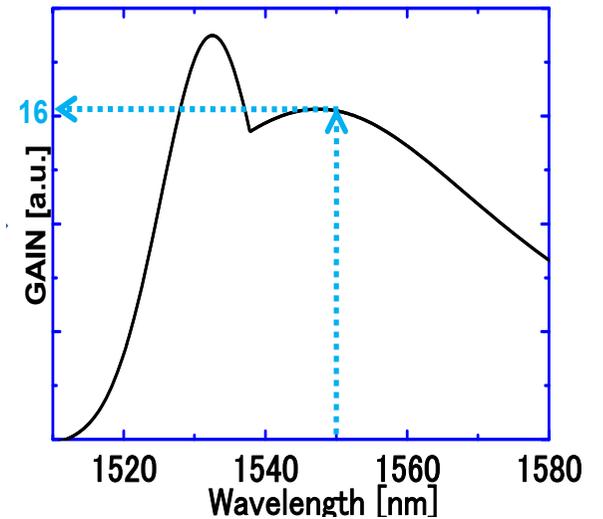
SWNTの可飽和吸収特性



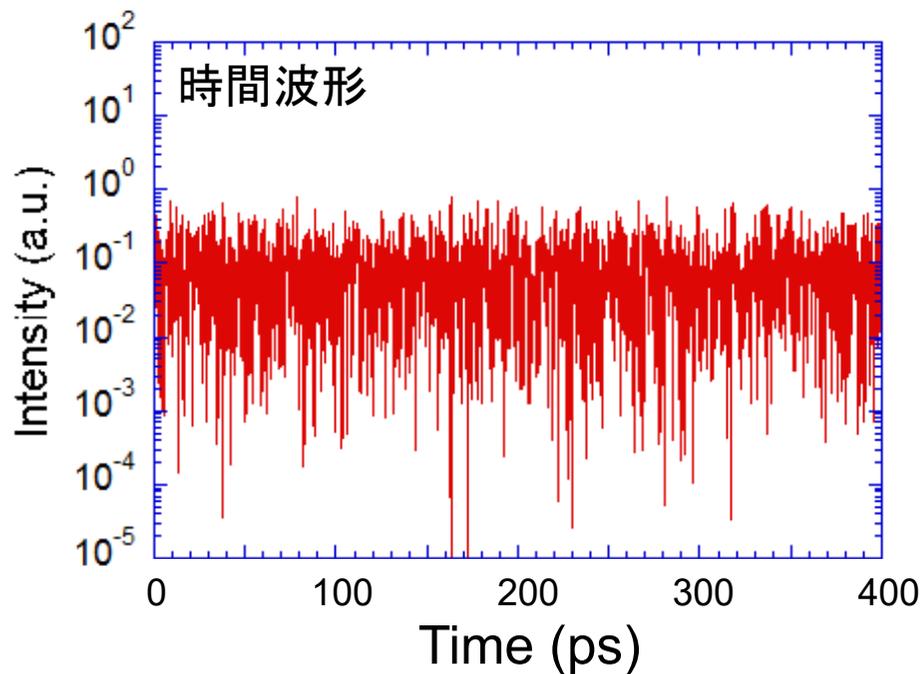
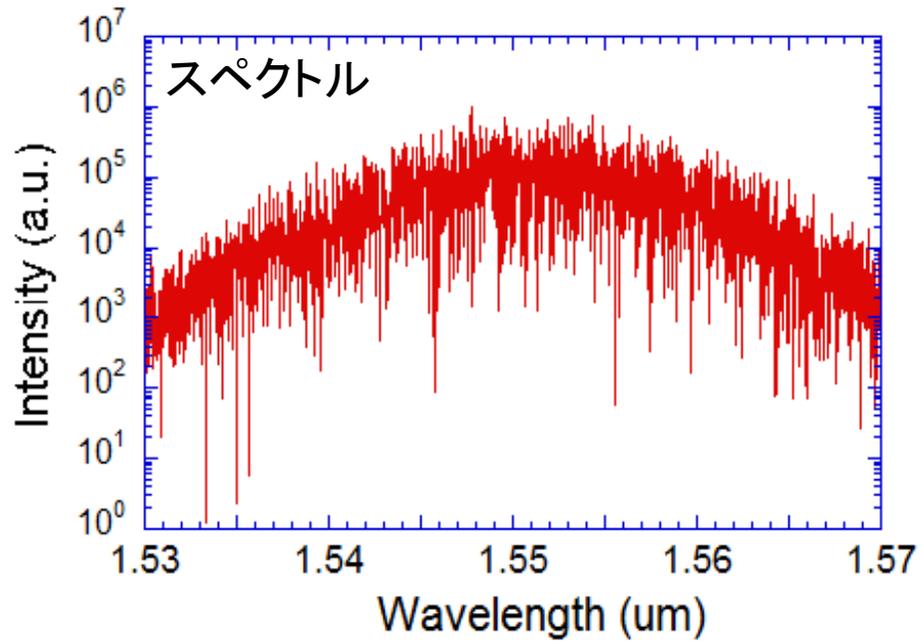
EDFの増幅特性



EDFの利得スペクトル

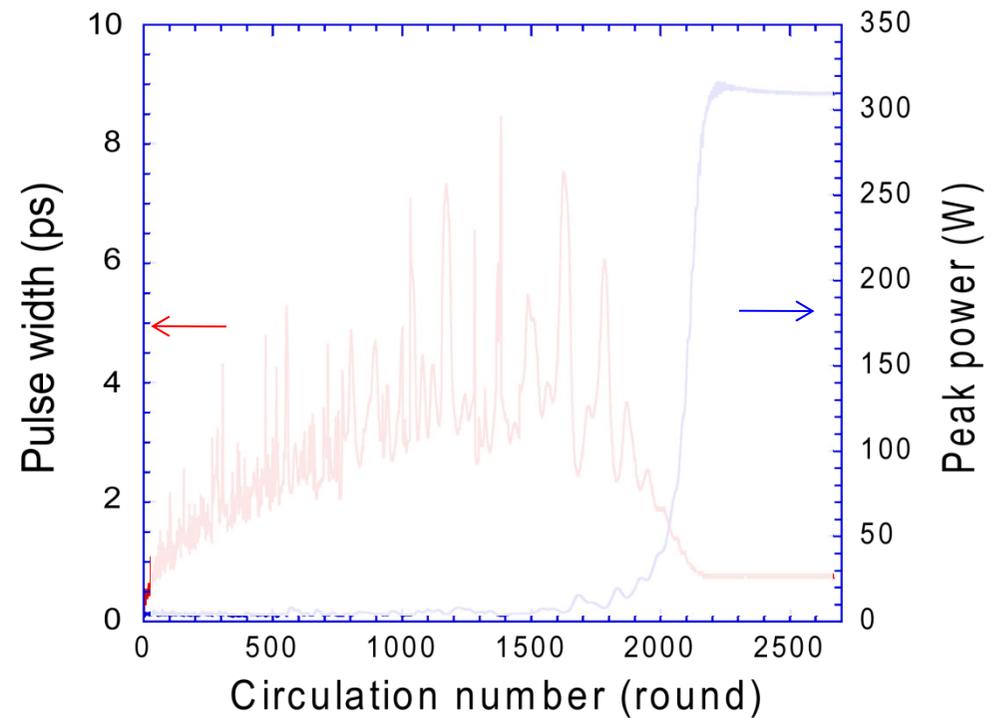


ナノチューブファイバレーザーのモード同期の初期過程の計算結果

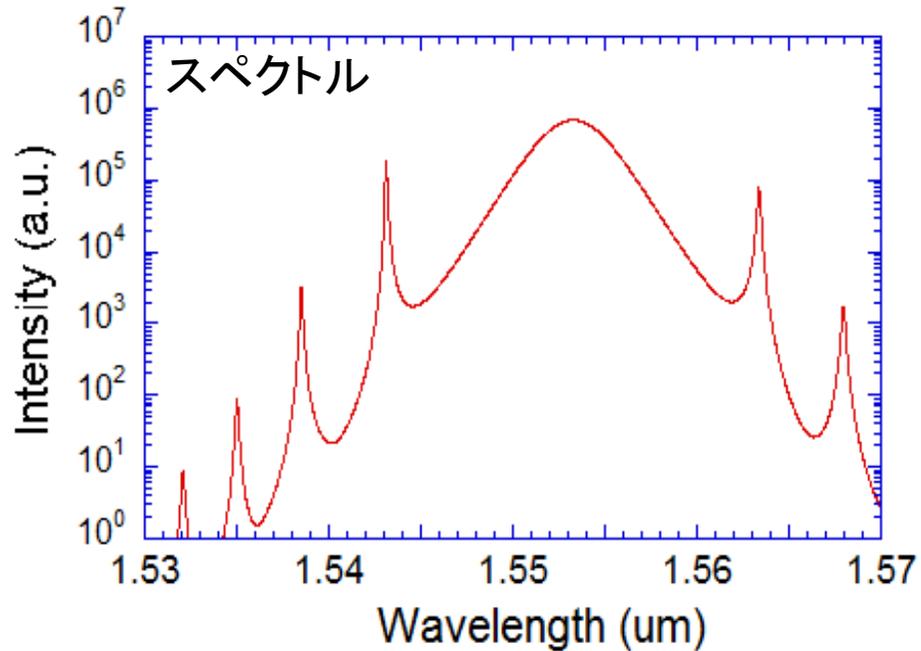


周回数: 10 周

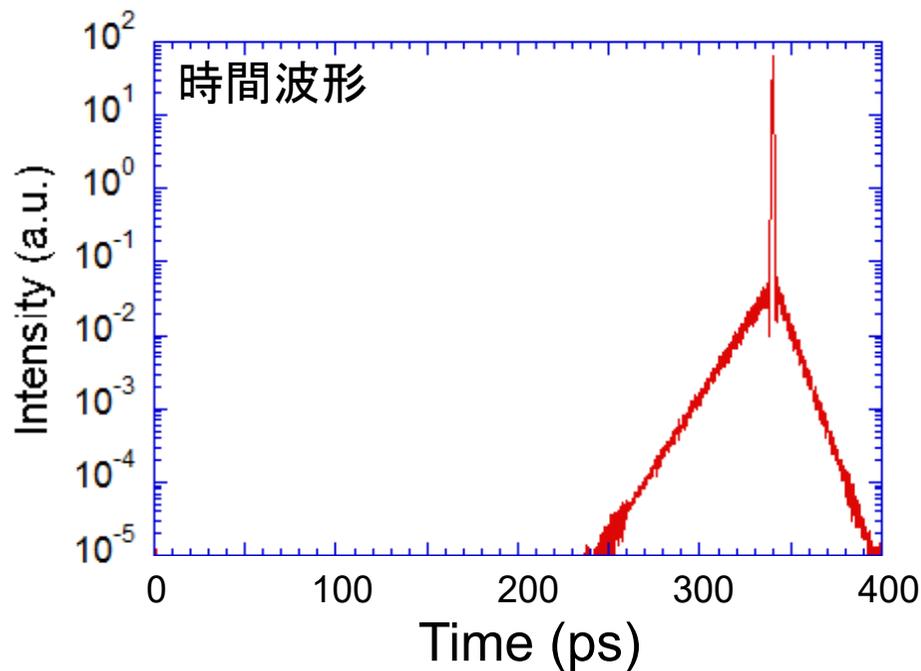
パルス幅とピーク強度の変化



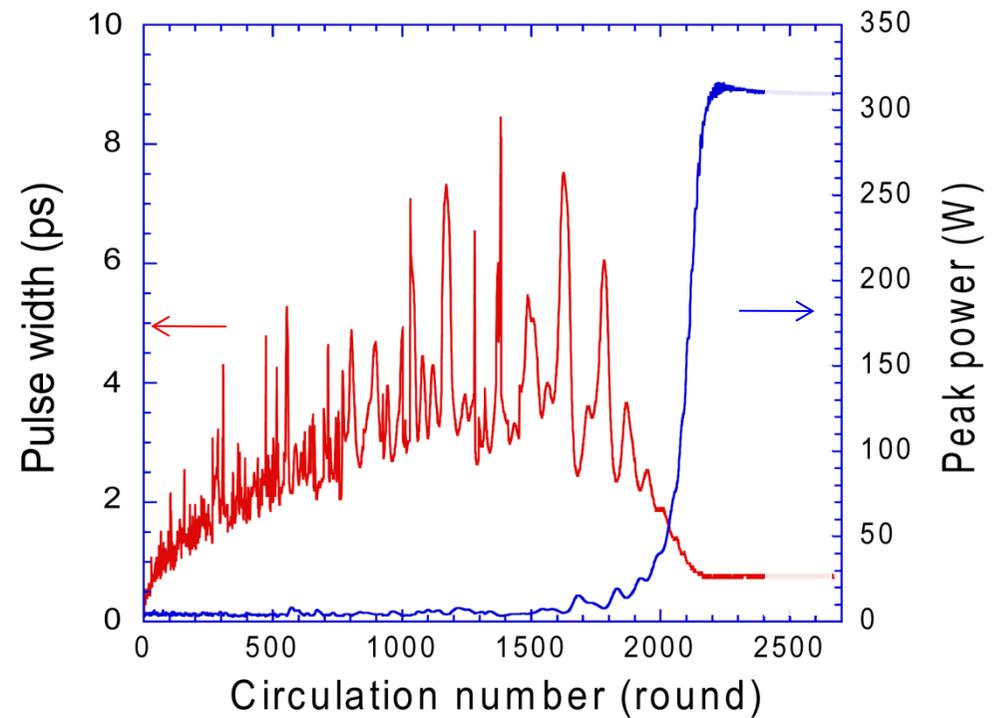
ナノチューブファイバレーザのモード同期の初期過程の計算結果

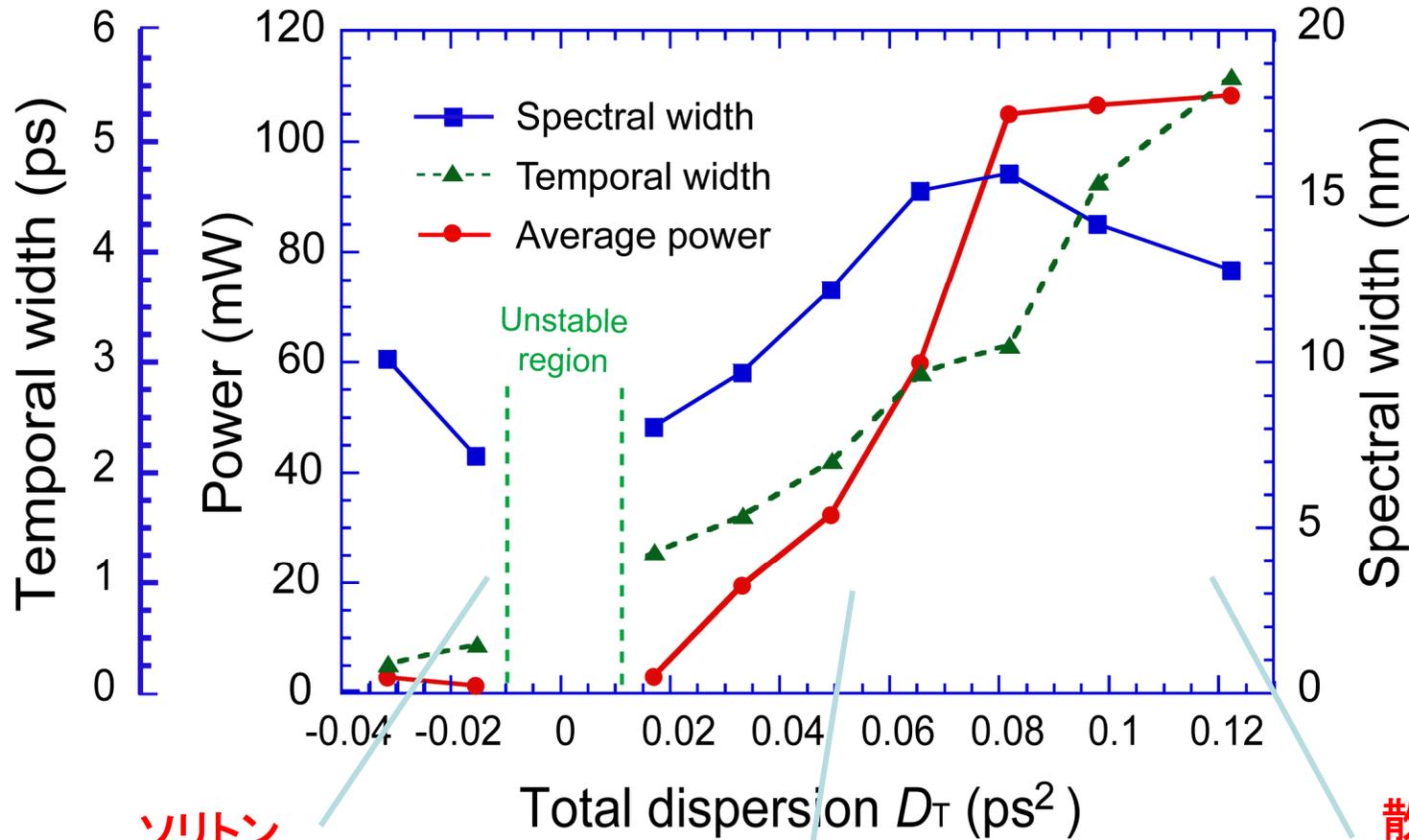


周回数: 2400 周



パルス幅とピーク強度の変化





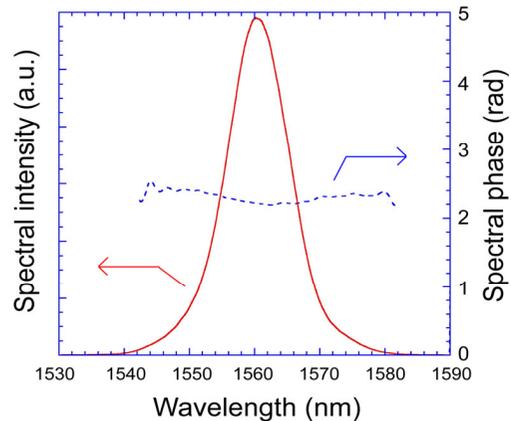
(N.Nishizawa, et al, OE 19, 21874, 2011)

**約十倍の
高出力化
に成功!!**



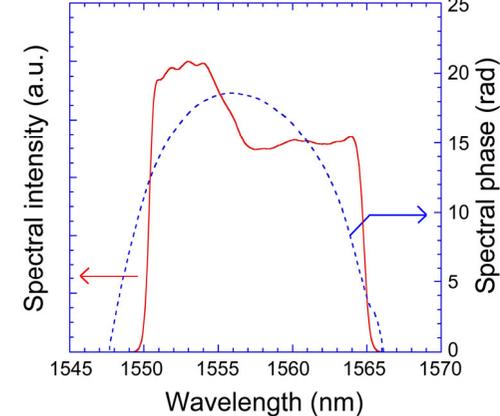
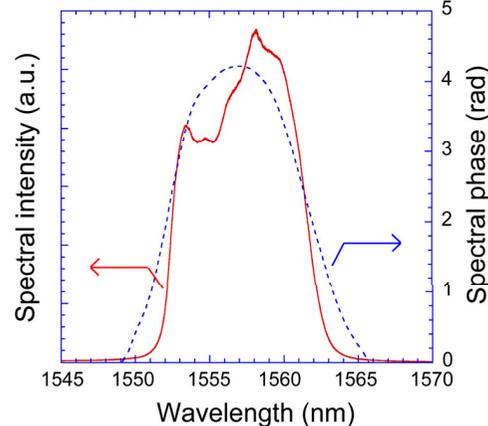
**出力: 216 mW,
ナノチューブファイ
バレーザーで
最高出力を達成**

ソリトン

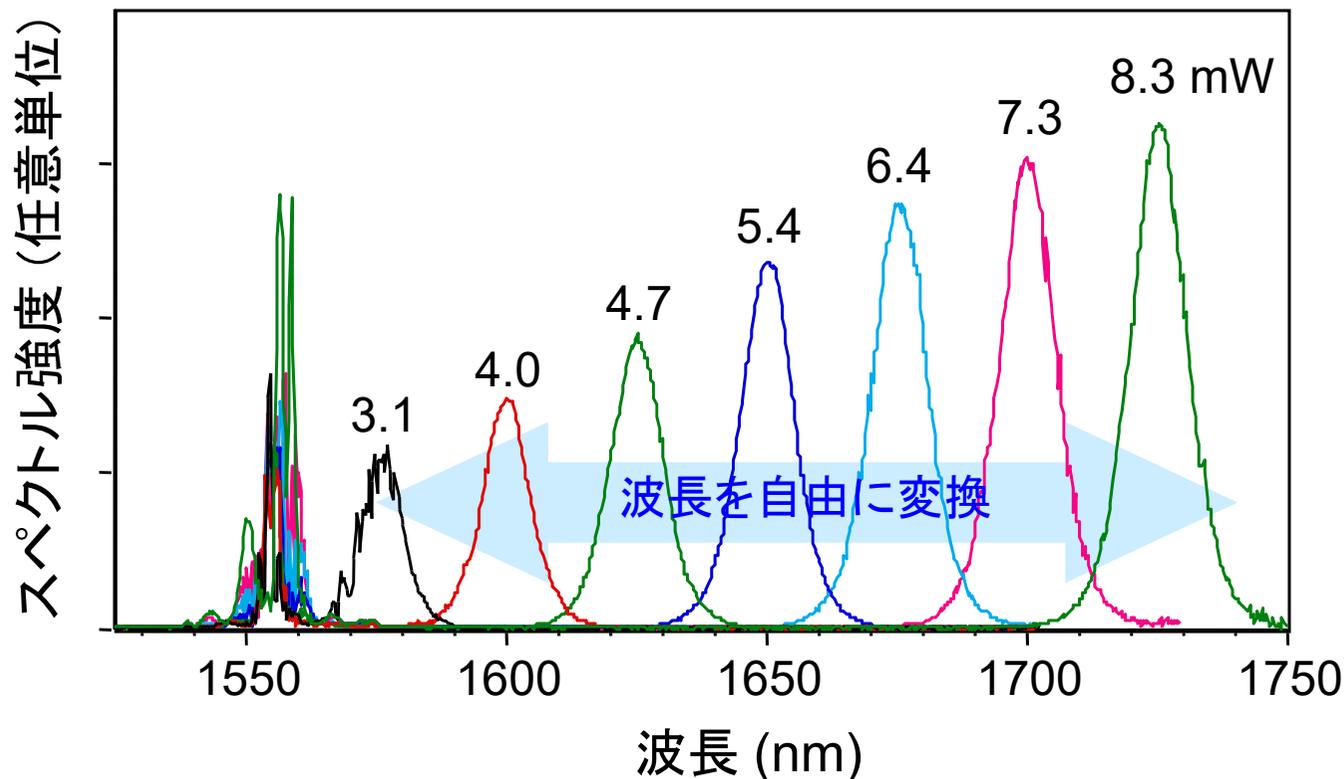


Total dispersion D_T (ps²)

散逸性ソリトン



IEEE PTL 11, 325 (1999)



波長可変ソリトンのスペクトルの変化

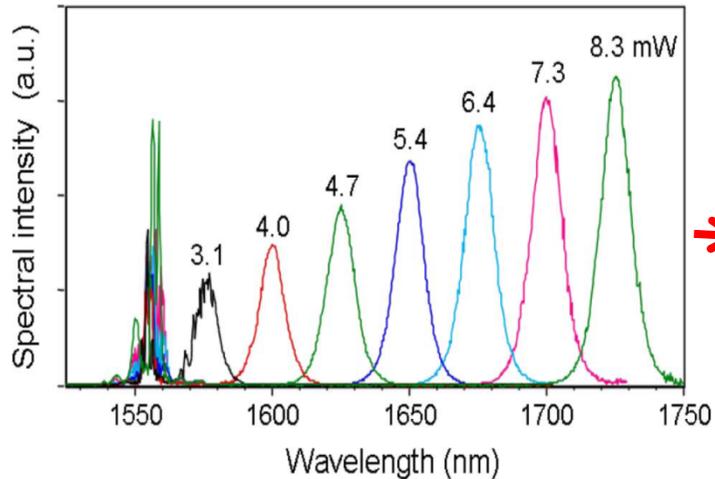
光ファイバの非線形性を用いて超短パルス光の波長を変換

入射光強度の変化に対し波長が連続にシフト

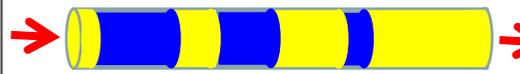
世界最速の波長可変光源

波長可変超短パルスファイバレーザー

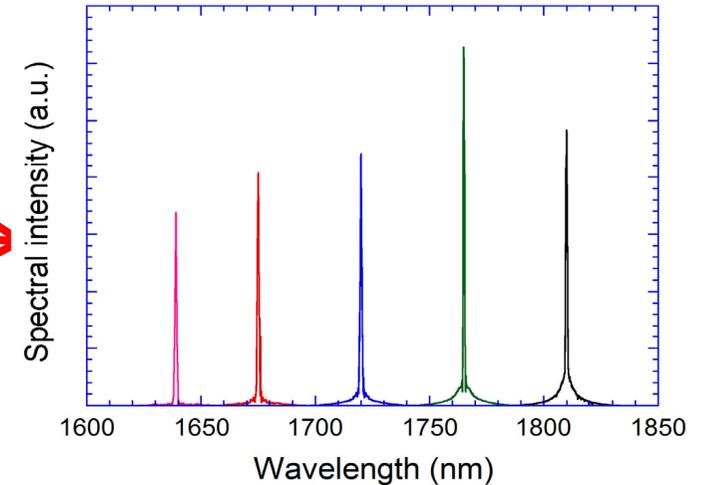
圧縮したパルススペクトル



楕状分布ファイバを用いたスペクトル圧縮

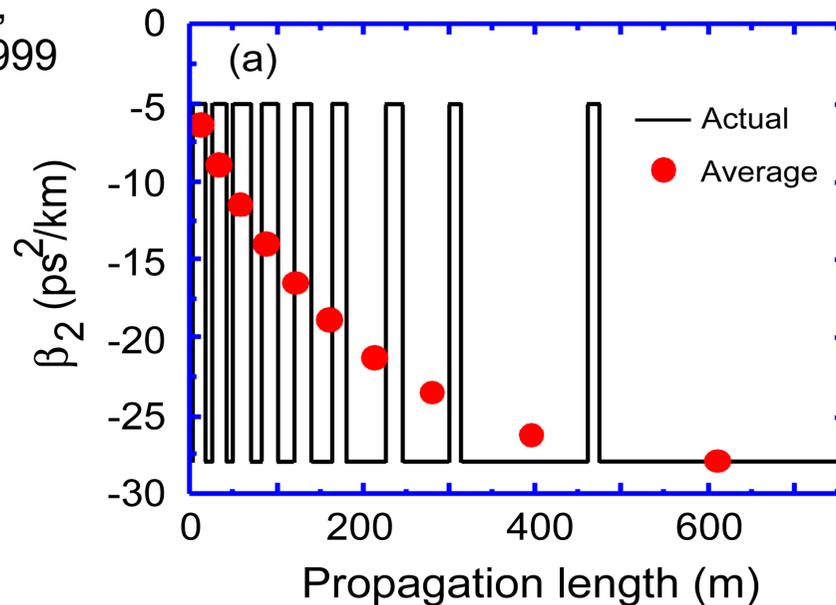


広帯域, 高圧縮



Nishizawa and Goto,
IEEE PTL 11, 325, 1999

楕状分布ファイバの
分散値の分布

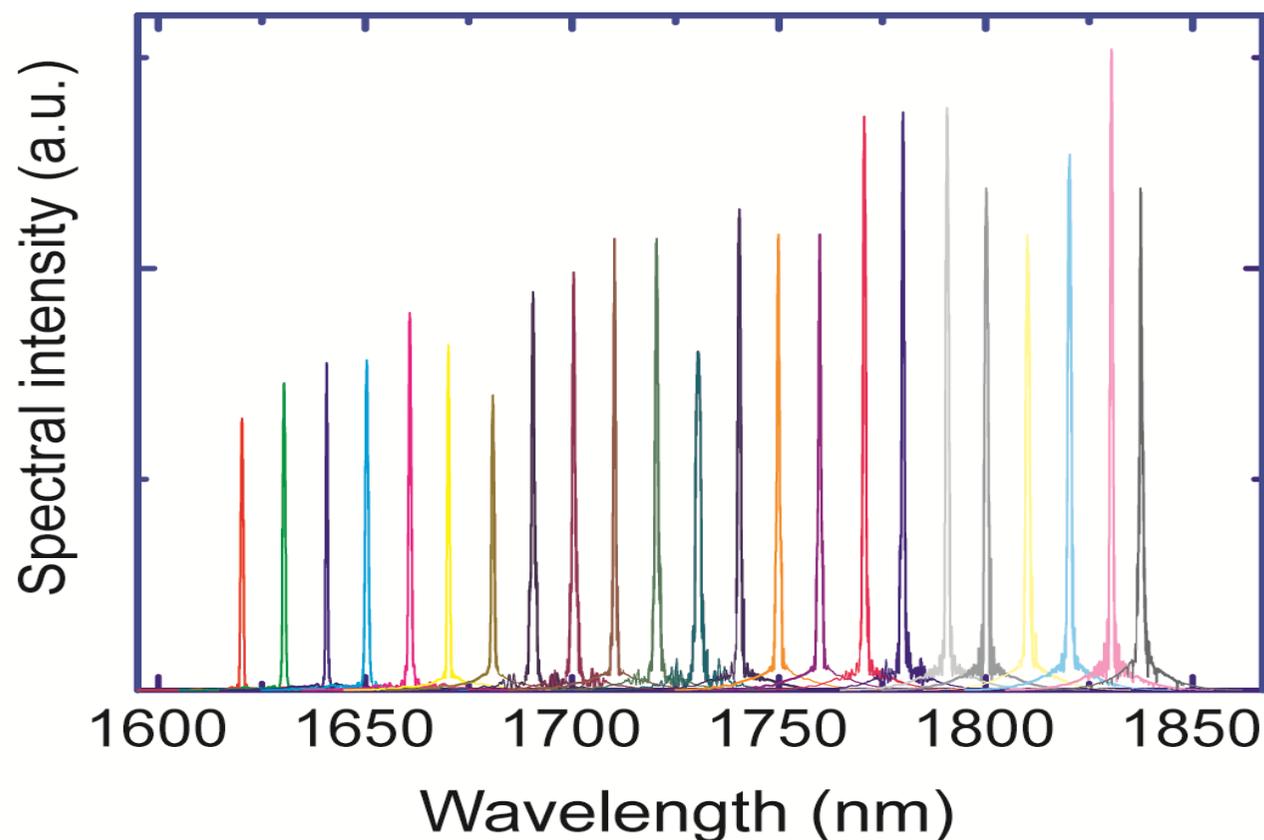


分散増加ファイバ
における断熱
ソリトンスpektrum
圧縮効果を利用

$$N^2 = \frac{\gamma P_0 T_{FWHM}^2}{3.11 |\beta_2|}$$

楕状分布ファイバを用いた広帯域波長可変狭線幅光源の開発

新技術説明会
New Technology Presentation Meetings!



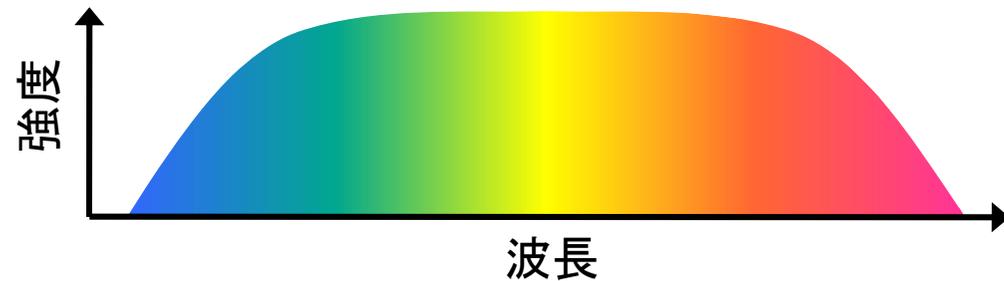
波長可変幅 : 1620 – 1850 nm
狭窄スペクトル幅 : 0.54 – 0.71 nm
スペクトル圧縮率 : 18.9 – **25.9** (*The largest*)

Nishizawa, Takahashi, Opt. Exp. **18**, 11700 (2010)

超広帯域連続スペクトル光

新技術説明会
New Technology Presentation Meetings!

スーパーコンティニューム光 (SC光)



J. K. Ranka, et al., Opt. Lett. **25**, 25 (2000)

N. Nishizawa and T. Goto, Jpn. J. Appl. Phys., **40**, L365 (2001)

➤ 特徴

高輝度 (数十mW) ・ コヒーレント ・ 光周波数コム

超広帯域 : 1.2~2.0um, 1.0~2.6um, 0.45~1.4um

光ファイバ出力 : 取り扱いが容易 ・ 集光できる

コヒーレント : 極短パルス生成, 光周波数コム

応用: 光断層計測(OCT), 各種波長依存性の評価, 分光計測

高精度スーパーコンティニューム光の生成

特徴

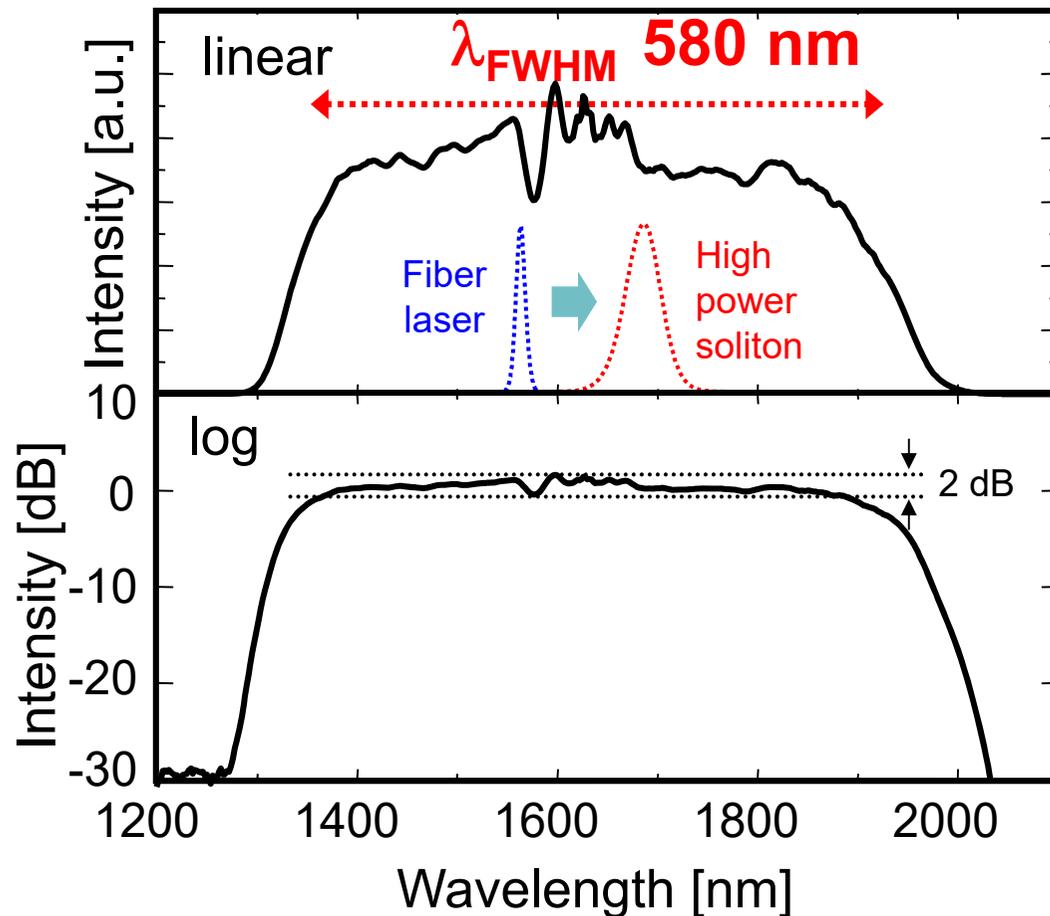
バンド幅 1300 ~ 2000 nm (20dB)

$$\Delta\lambda = 580 \text{ nm}$$

非常に平坦で滑らかなスペクトル
500nmの帯域で2 dBの平坦性

低雑音
高コヒーレンス
高強度 (40mW)

J.Takayanagi, N.Nishizawa
et al. JJAP 45, L441 (2006)



大学発ベンチャーで製品化

高精度超広帯域スーパーコンティニューム光源プロトタイプ

新技術説明会
New Technology Presentation Meetings!

名古屋大学発
ベンチャー
(株)NUシステム
との共同開発

ファイバレーザー

SC光
生成装置

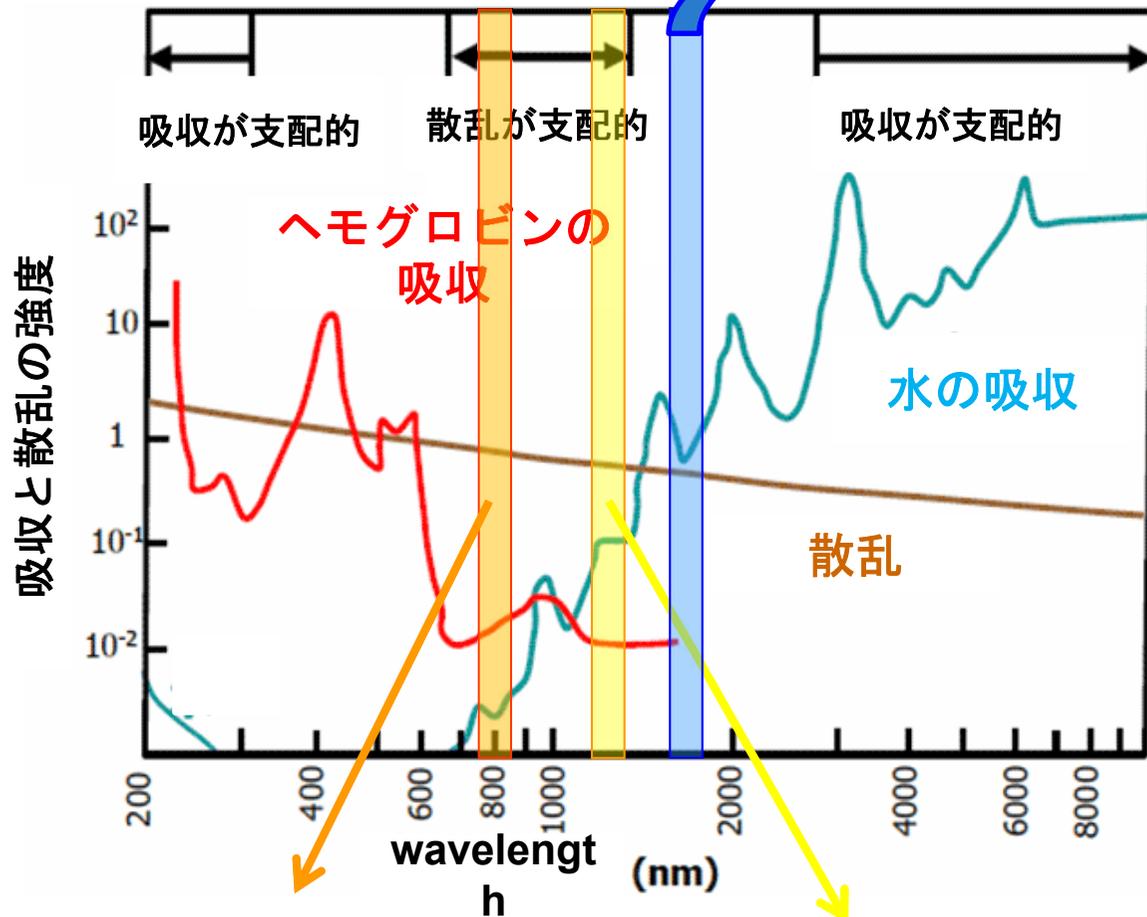


安定・軽量な全ファイバ型プロトタイプの開発に成功!!

平成23年度産学官連携功労者表彰・科学技術政策担当大臣賞受賞

■ 浸達長の波長依存性

《生体サンプルの光学特性》



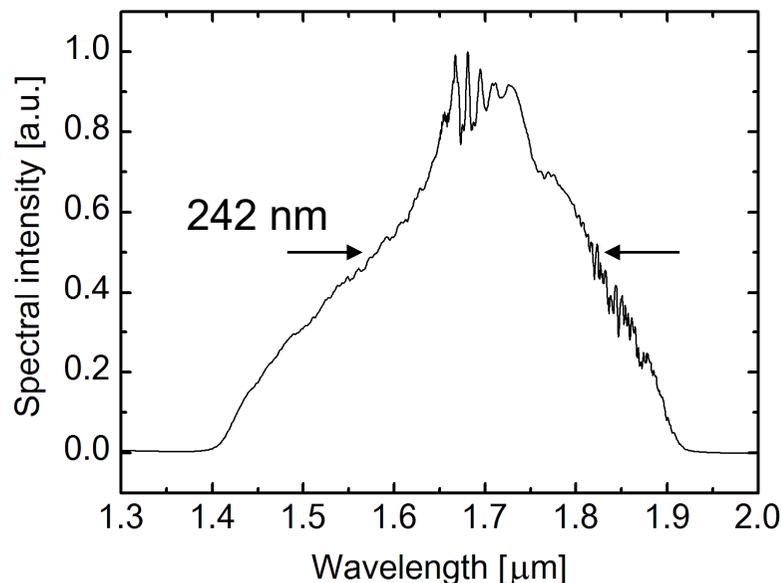
新たな波長域:
1.7 μm 帯

- ・低吸収
- ・低散乱

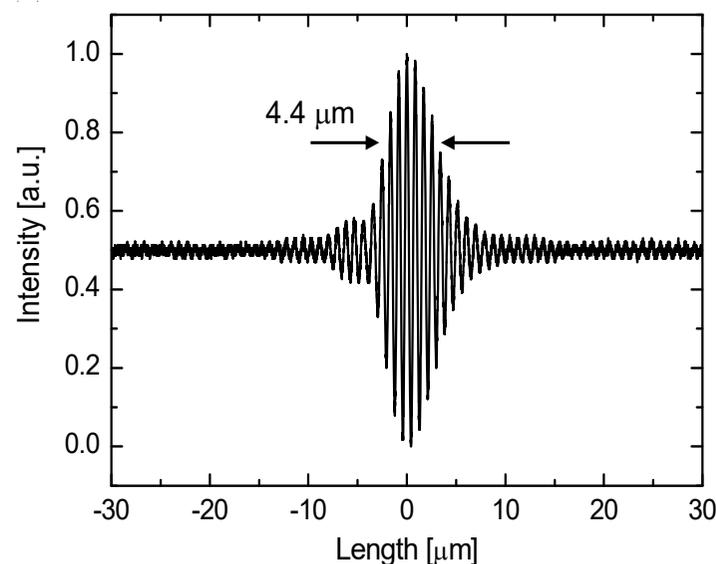
0.8 μm 帯 1~2 mm 1.3 μm 帯

Kawagoe, Nishizawa, et al.
Biomed. Opt. Exp. **5**, 932 (2014)

SC光のスペクトル



干渉信号



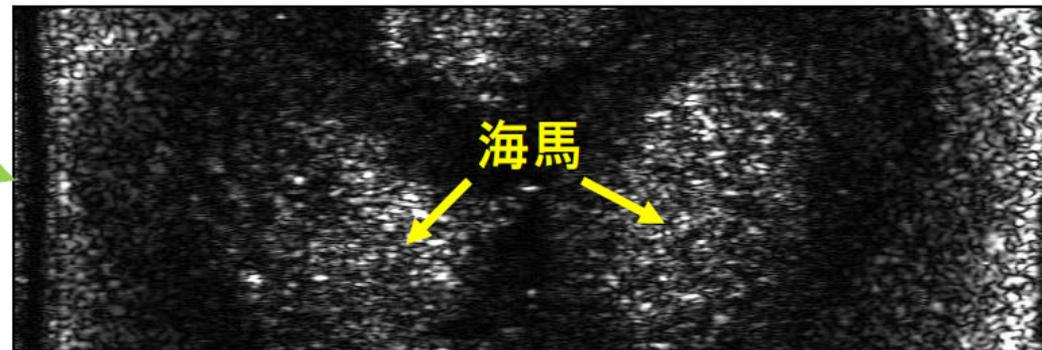
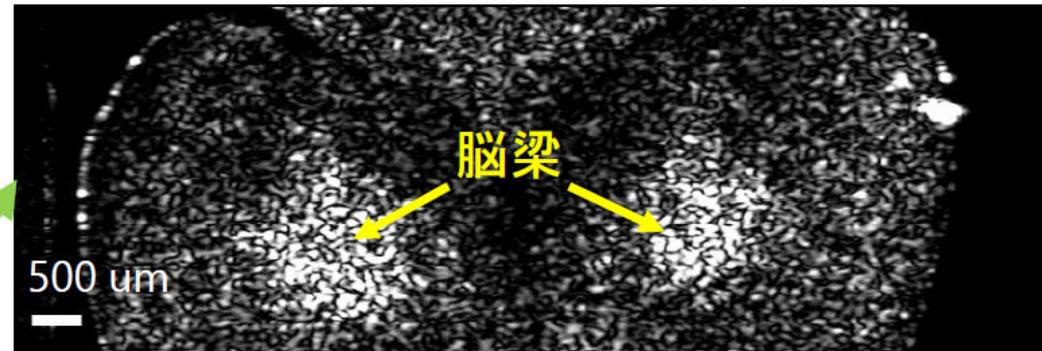
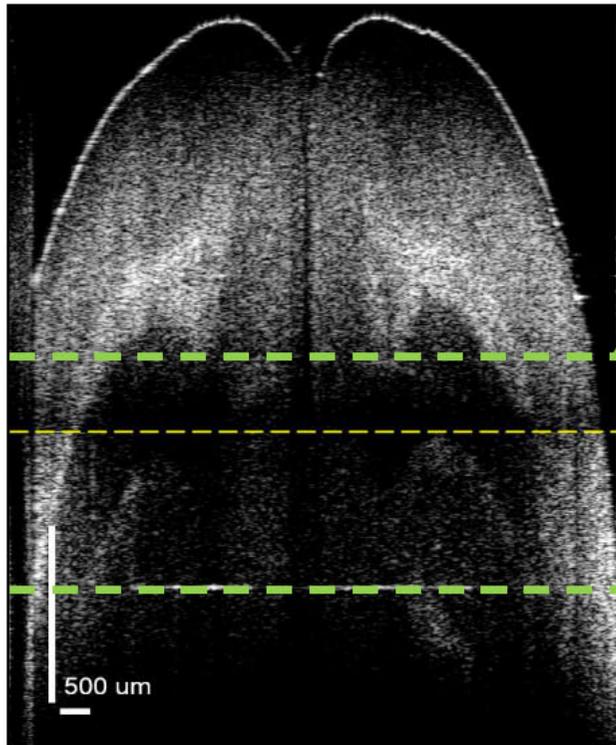
波長 1.7 μm におけるSC光の生成

繰り返し周波数	: 110 MHz (Previous: 47 MHz)
最大出力光強度	: 60 mW (Previous: 30 mW)
中心波長	: 1.7 μm
スペクトル幅	: 242 nm

→ 高繰り返しSWNTファイバーレーザーを用いて
波長1.7 μm 帯 高出力SC光を生成

深部構造の3次元イメージング

3Dイメージング時間 (平均無し): **~6 s** ($10.2 \times 3.4 \times 2.1 \text{ mm}^3$)
(Total: ~100 s, 16 times average)



高侵達・高分解能・高速な生体イメージングを実現

お問い合わせ先 (担当コーディネーター)

名古屋大学

学術研究・産学官連携推進本部

知財・技術移転G 高橋 桂太

TEL 052-788 - 6017

FAX 052-788 - 6146

e-mail k.takahashi@aip.nagoya-u.ac.jp