

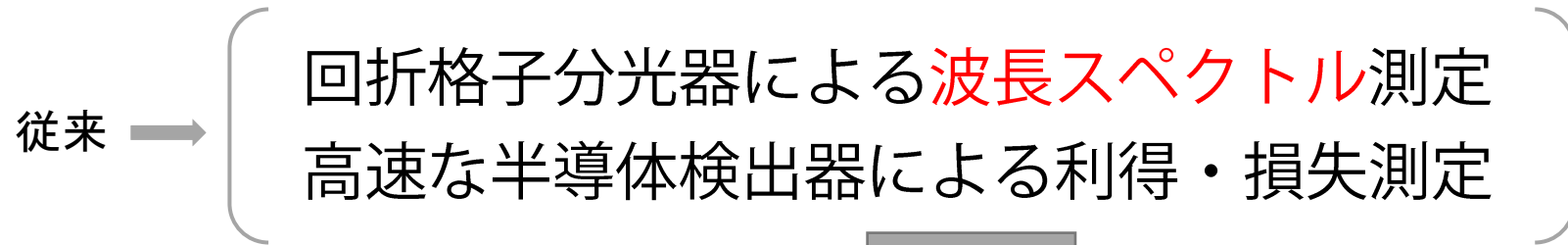
自己相関法を用いた FELマイクロパルス波形の計測

大阪大学産業科学研究所 磯山研究室

M2 大角寛樹

研究背景

発生したFEL光パルスを測定し、FELの物理を研究



マイケルソン干渉計の導入

自己相関関(干渉パターン)の測定 → FELマイクロパルス時間領域 → 周波数領域

時間領域・周波数領域の両面からの直接的な測定
⇒ より深いFEL物理の理解へとつながる

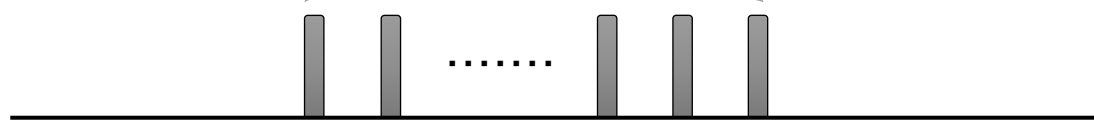
産研FELについて

電子ビーム

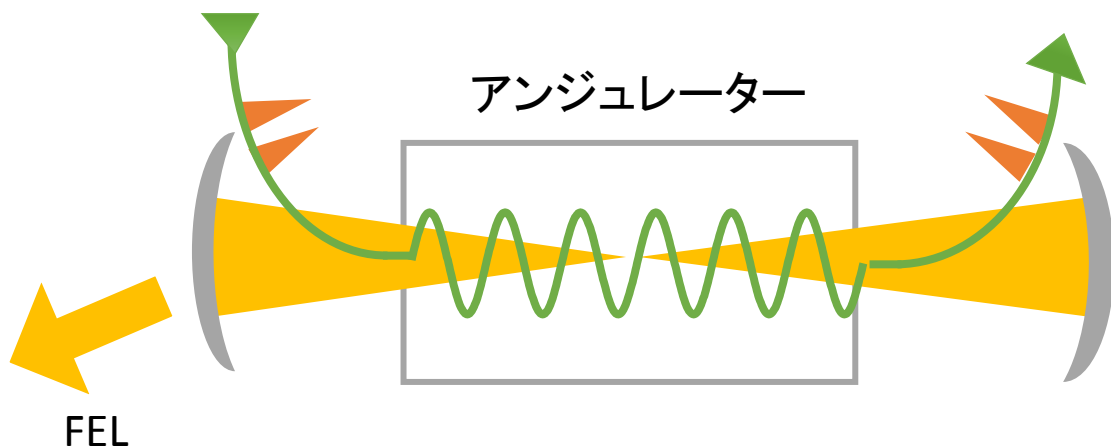
電子マクロパルス



電子マイクロパルス



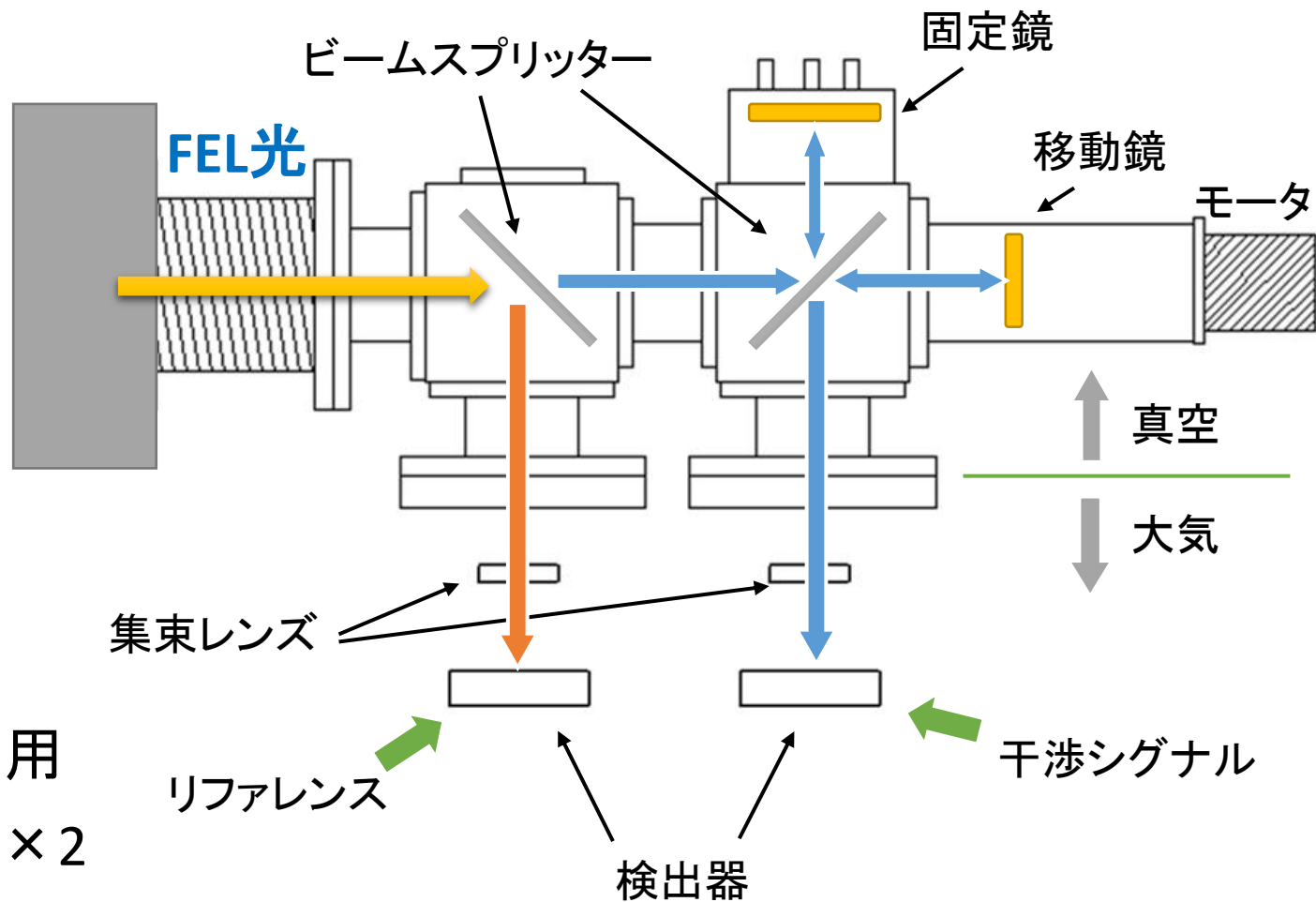
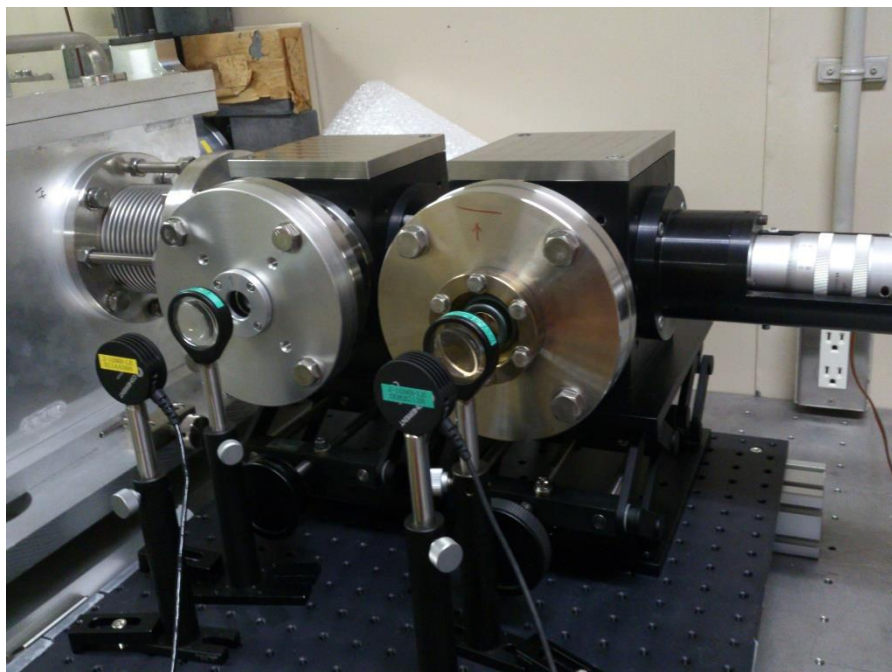
共振器型FEL



マクロパルス長	8 μ s
マイクロパルス長	20~30ps
マイクロパルス間隔	9.2ns
電子ビームのピークエネルギー	15.0MeV

FEL光は共振器内に蓄積
⇒後続の電子バンチと相互作用して増幅

マイケルソン干渉計



- ビームスプリッター：マイラーを使用
- 検出器：Energy meter (Φ10mm) × 2
- 移動鏡が $10\mu\text{m}$ (光路差 $20\mu\text{m}$)間隔で駆動

自己相関法

- 自己干渉波形(インターフェログラム)



時間領域

FELマイクロパルスの時間構造についての情報が得られる。



今回はFELマイクロパルスの半値幅について評価した。

フーリエ変換



Wiener-Khinchinの定理

周波数領域

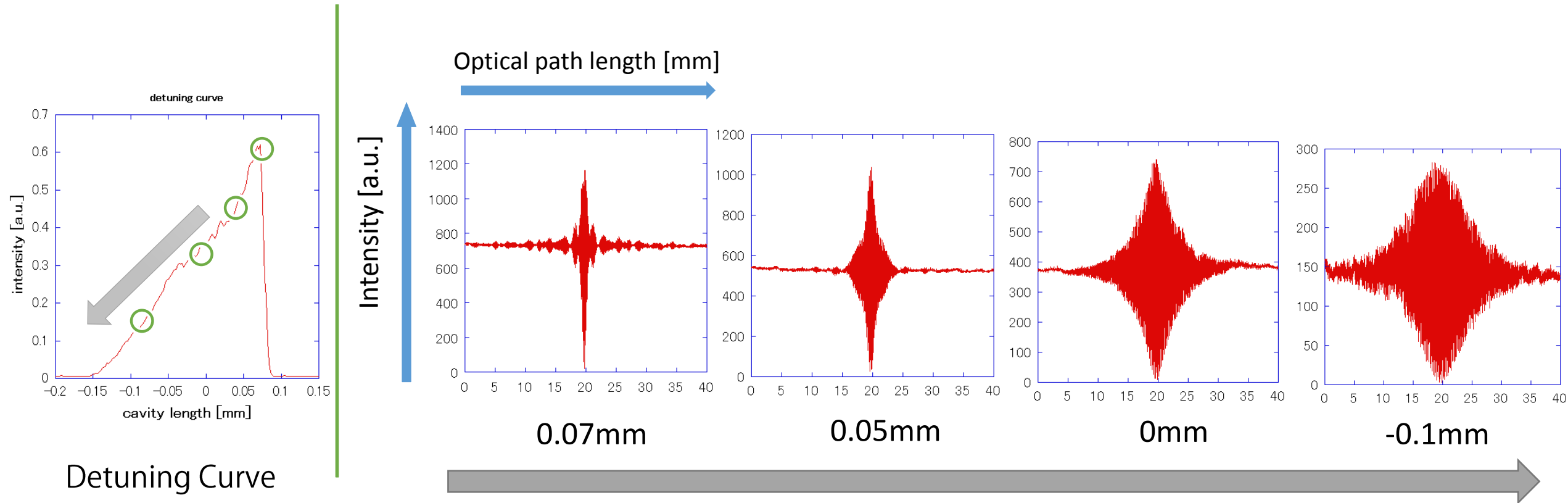
インターフェログラムからFEL光パルスの波長スペクトルが求められる。

フーリエ変換した周波数分解は $1/N\Delta t$ によって決まる。
(N:サンプリング数、dt:時間分解)

フーリエ分光においては、測定点数や測定する光路差を増やすことで周波数分解能を上げることができる。

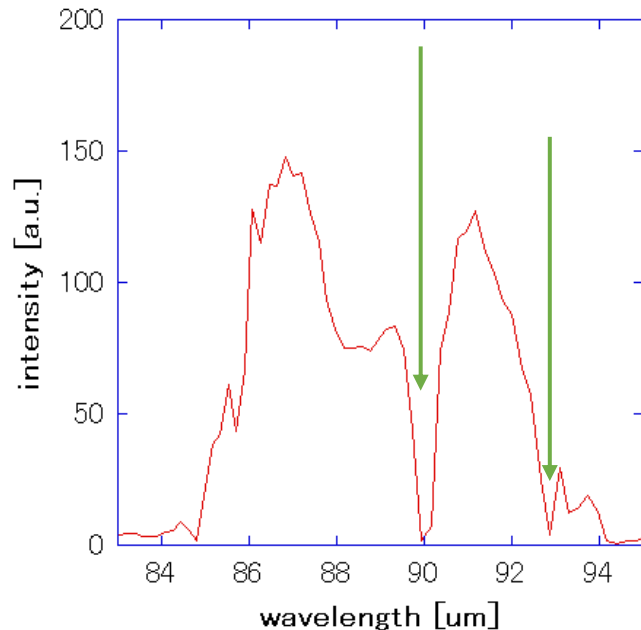
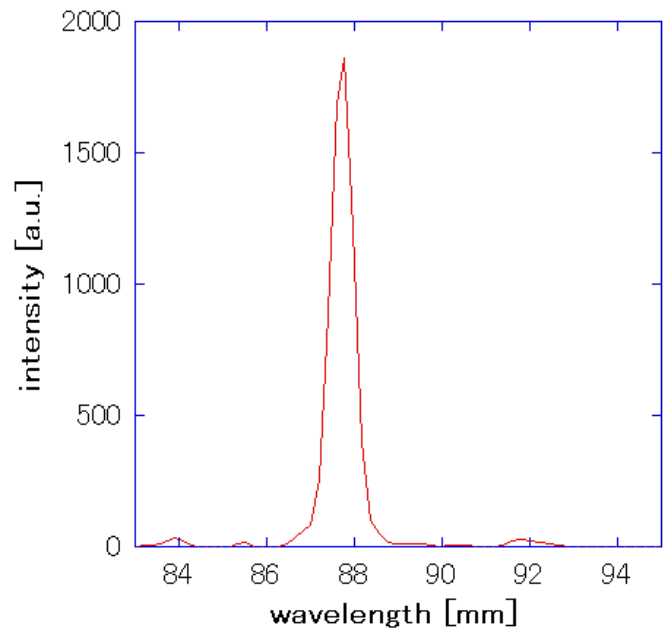
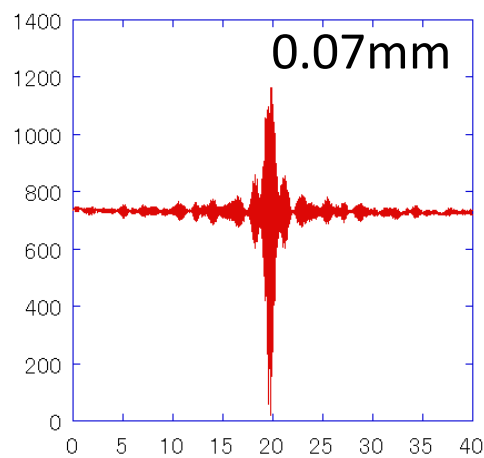
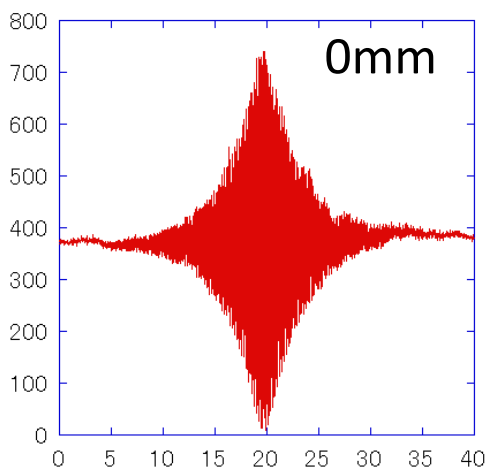
FELマイクロパルスの共振器長依存性

- 比較的水の吸収が少ないGap33において、Detuning長を0.07mm~-0.1mmまで変化



ミラーの距離が短くなるにつれて、マイクロパルスの幅は増加している。

水蒸気吸収による振幅変調



波長スペクトル

干渉計	水の吸収波長
89.94	89.92
92.87	92.83

水の吸収によって、自己相関波形及び波長スペクトルの形が大幅に変化している可能性がある。

水蒸気の除去(乾燥空気の導入)



干渉計の窓から検出器までを袋で密閉し乾燥空気を用いることで、露点温度を 20°C (湿度70%)から -7.2°C (湿度4.6%)以下まで減少させた。

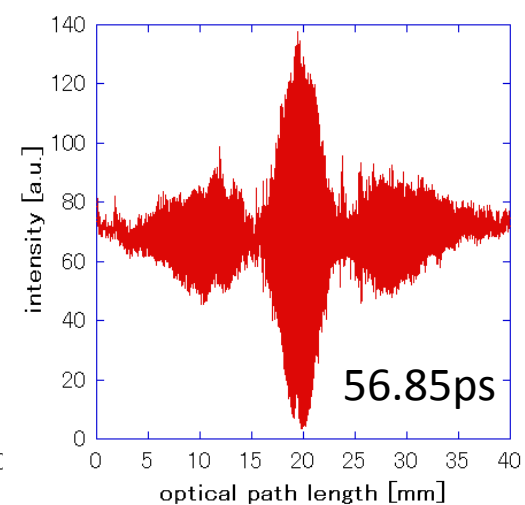
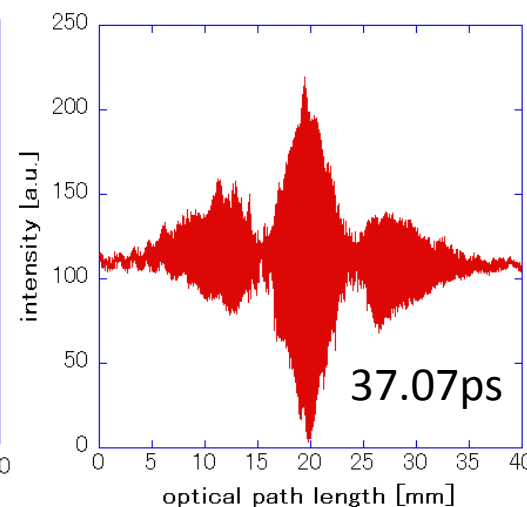
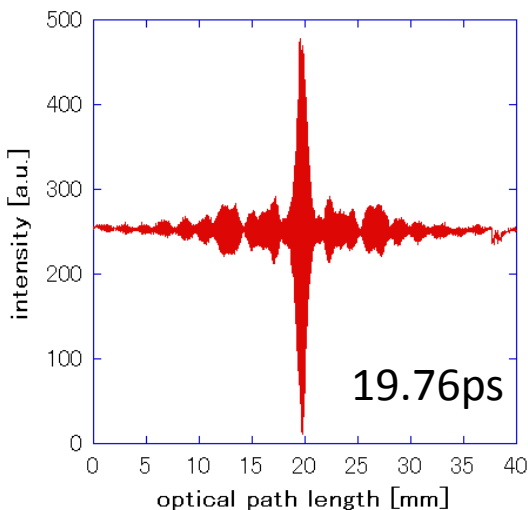
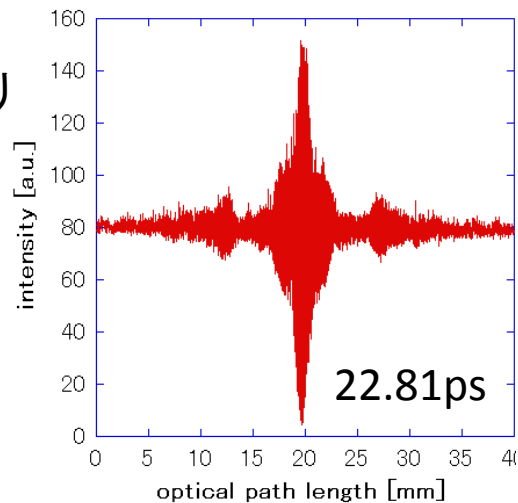
室内温度 26°C

ドライエアー

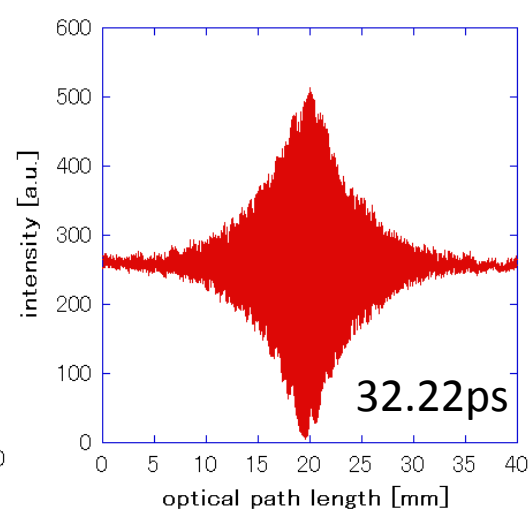
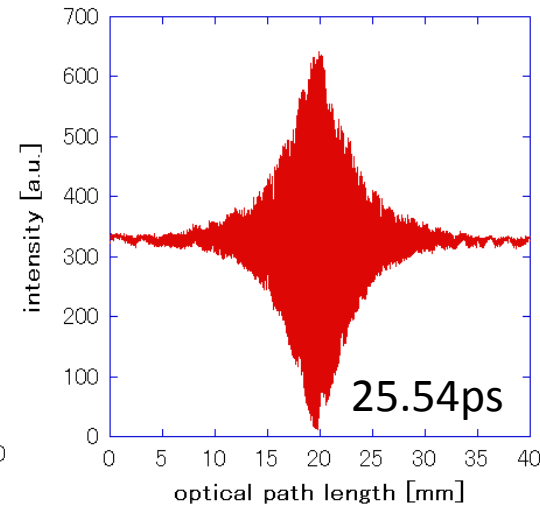
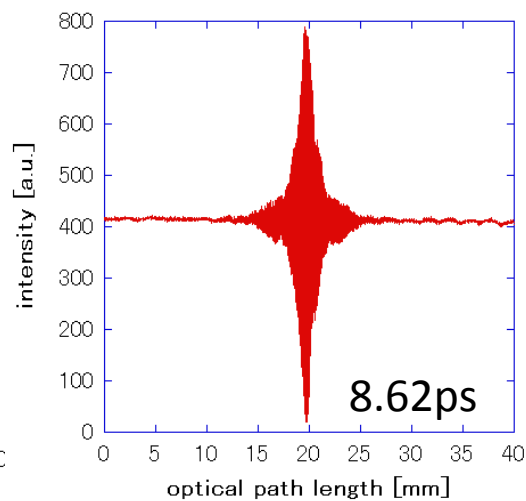
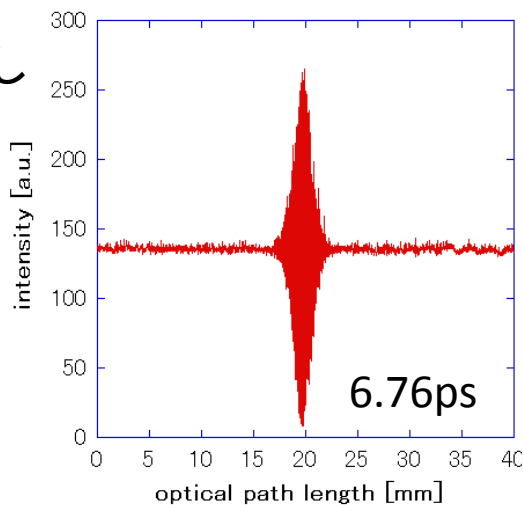
上流: ANEST IWATA SLP-22ECD
下流: CKD HD-1.5

水の吸収による自己相関波形の比較(Gap31)

吸収あり



吸収なし



0.081mm

0.065mm

-0.01mm

-0.08mm

誤差関数からFELマイクロパルスはガウシアン形状の可能性

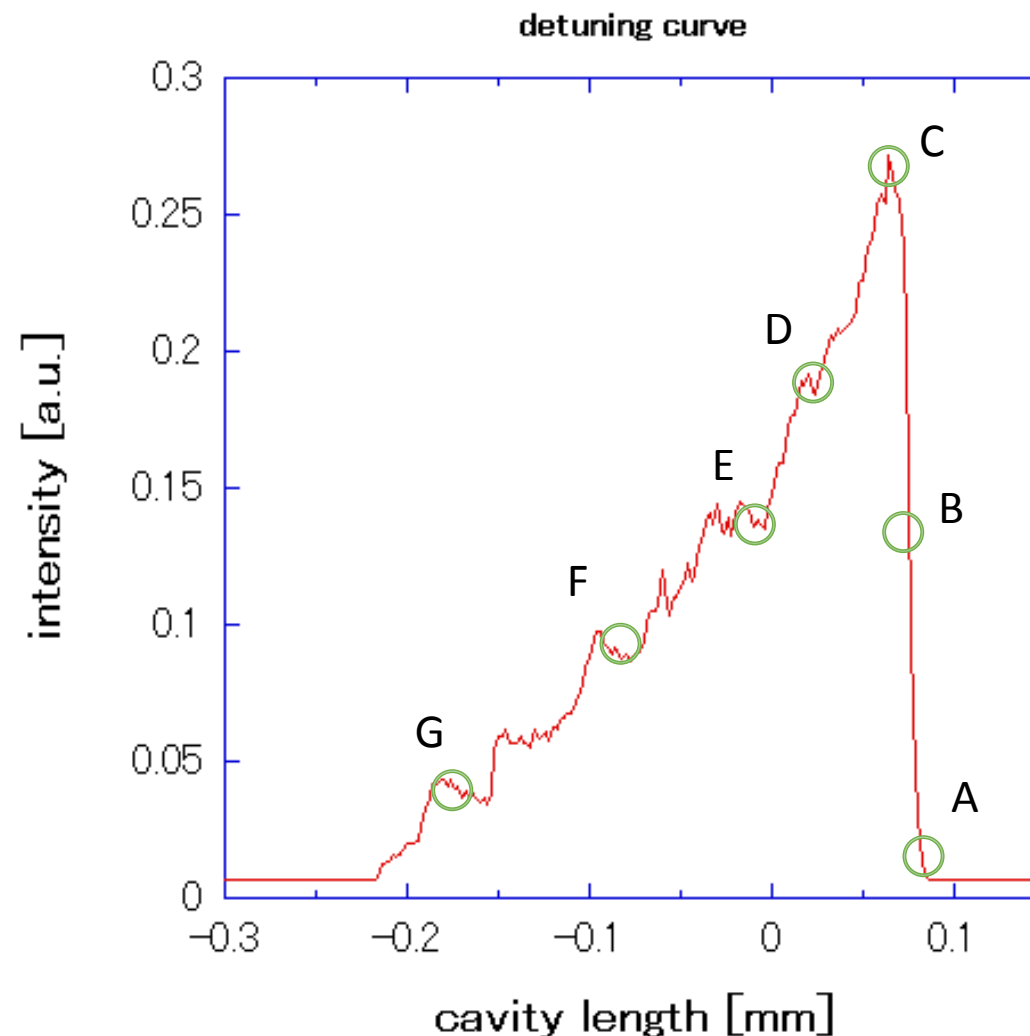
自己相関図の相関幅(FWHM)を評価(Gap31)

共振器長	相関幅 → パルス幅
A (0.081mm)	6.76ps(2.78mm) → 3.38ps
B (0.077mm)	5.98ps(1.43mm) → 2.99ps
C (0.065mm)	8.62ps(1.45mm) → 4.31ps
D (0.03mm)	16.41ps(2.38mm) → 8.21ps
E (-0.01mm)	25.54ps(7.42mm) → 12.77ps
F (-0.08mm)	32.22ps(9.57mm) → 16.11ps
G (-0.18mm)	33.68ps(12.82mm) → 16.84ps

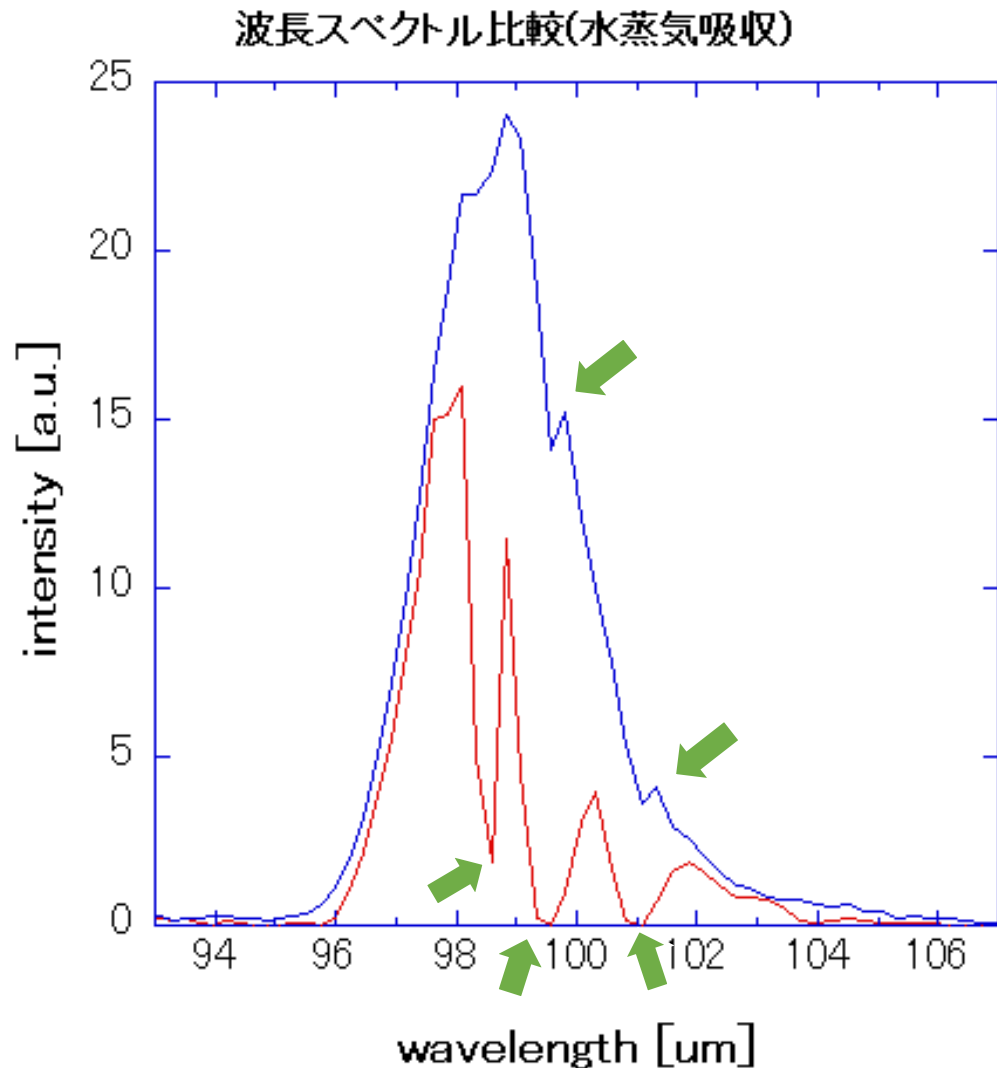
電子バンチ幅
約**20ps**~**30ps**



光パルス幅
約**3ps**~**17ps**



水の吸収による波長スペクトルの比較(Gap31)

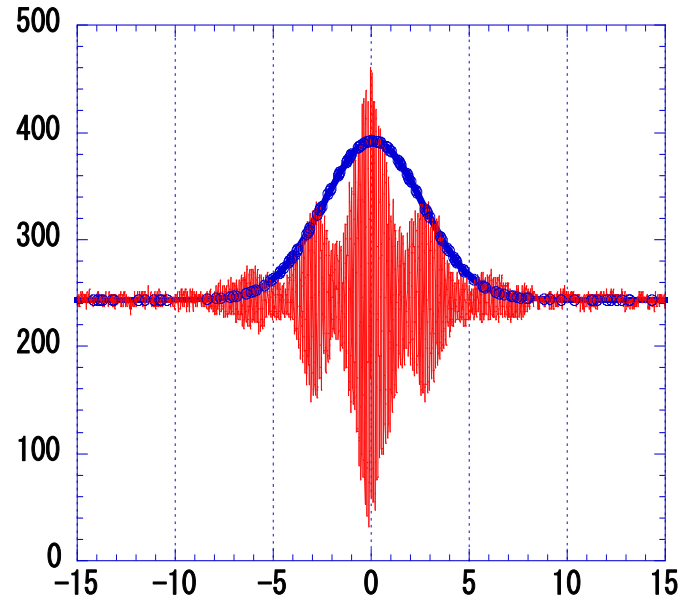


—赤線: 露点温度20°C
—青線: 露点温度-7.2°C以下

吸収波長	湿度70%	湿度14%
98.76	98.59	
99.59	99.57	99.57
101.21	101.08	101.08

乾燥空気の導入により、水による吸収が低下した。

フーリエ変換極限



光路差[mm]

ガウス型を仮定した時の
フーリエ変換極限

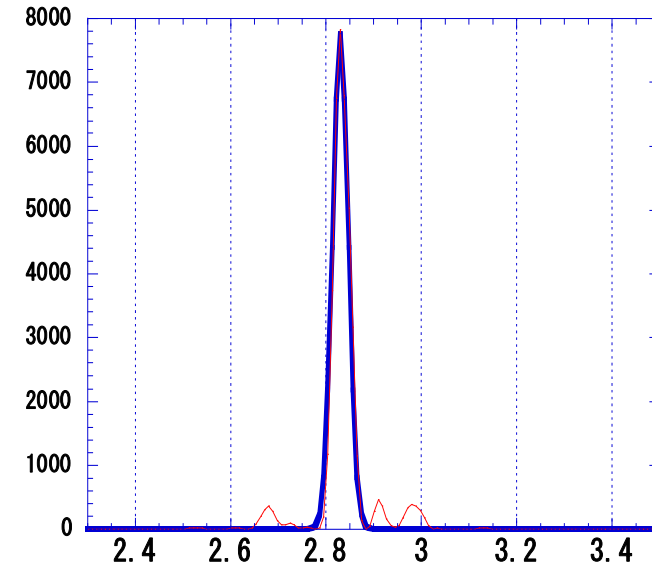
$$\Delta\omega \cdot \Delta\tau = 0.622$$

自己相関図の相関幅

$\Delta\tau$



フーリエ変換

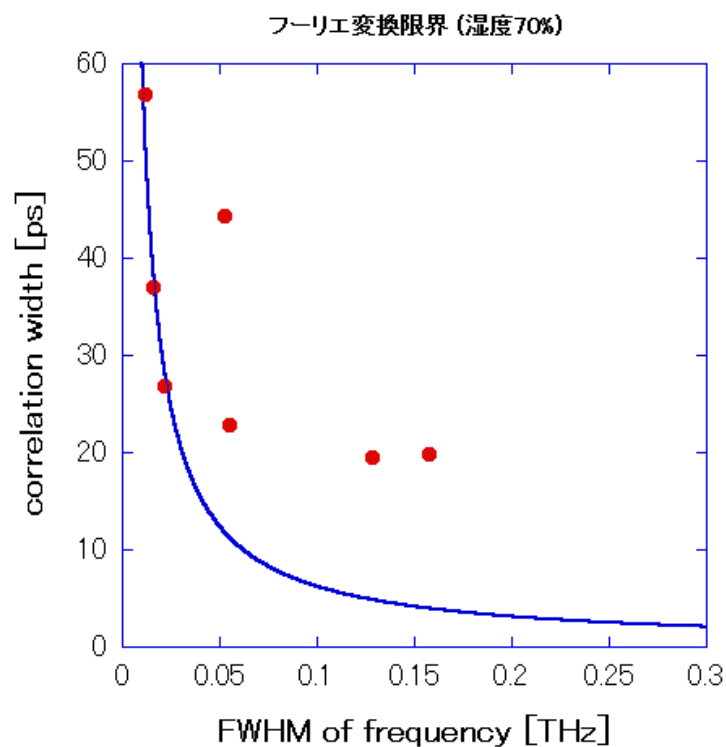


frequency[THz]

周波数スペクトル幅

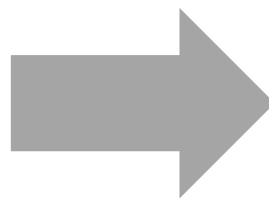
$\Delta\omega$

水の吸収によるフーリエ変換極限の変化

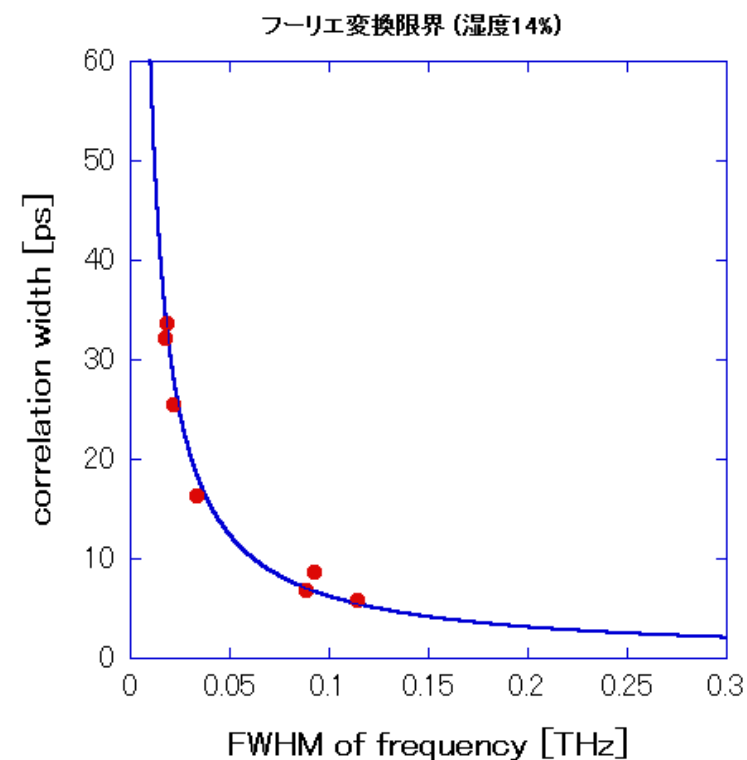


ガウス型を仮定した時の
フーリエ変換極限

$$\Delta\omega \cdot \Delta\tau = 0.622$$



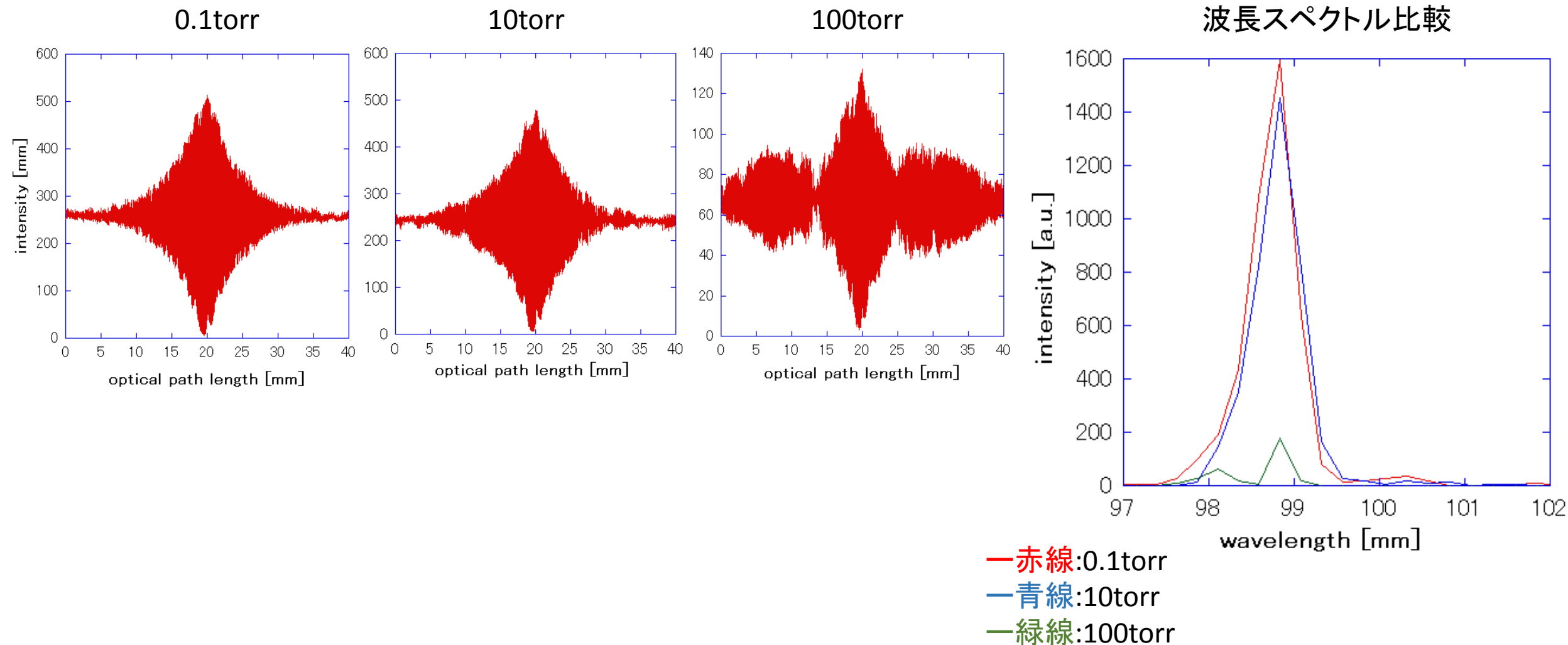
大気中の水蒸気を
乾燥空気で置換。



水蒸気による変調成分を除くことにより、FEL光パルス自己相関波形の相関幅がガウス型を仮定した時のフーリエ変換限界の値に近づく。

干渉計内での水の吸収(Gap 31 Mirror position -0.08mm)

干渉計窓より下流を露点温度 -7.2°C 以下に保った状態で、FELライン内の真空度を $0.01\text{torr} \rightarrow 10\text{torr} \rightarrow 100\text{torr}$ に変化させた。



まとめ

- 測定された自己相関図の相関幅を評価することにより、マイクロパルスの幅は最小2.4psから最大21.3ps付近まで変化することがわかった。またマイクロパルスはガウシアンのような形をしていると考えられる。
- 水の吸収によって変調が掛かっており、自己相関波形及び波長スペクトルに大きな影響を与えていることがわかった。
- 今後は自己相関波形についての解析を進めることで、より詳細なFELマイクロパルスの情報を抜き出していきたい。
- また、27MHzでの運転を行なっているため、FELマイクロパルスの情報から、108MHzと比べてどの程度バンチングを行えているかを比較したい。