

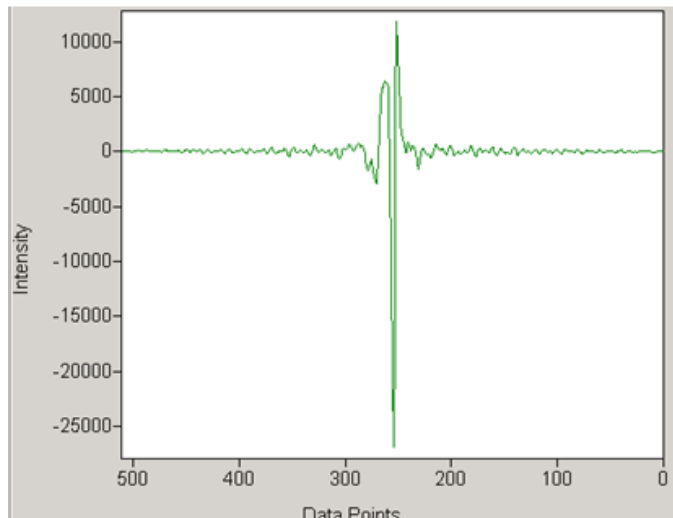
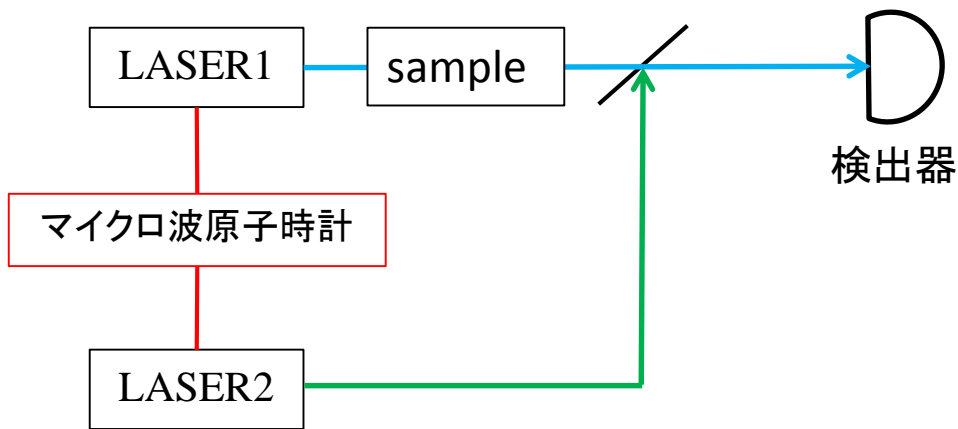
# H25年度 後期雑誌会

## VIPAを用いた周波数コム分光法

12/3 M1 市川 竜嗣

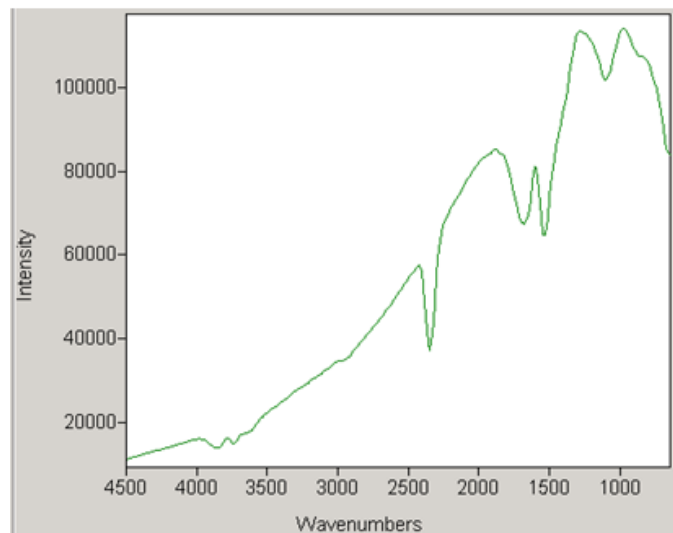
# イントロダクション

従来の分光法は...



干渉波形をフーリエ変換  
してスペクトルを得る

↓ フーリエ変換



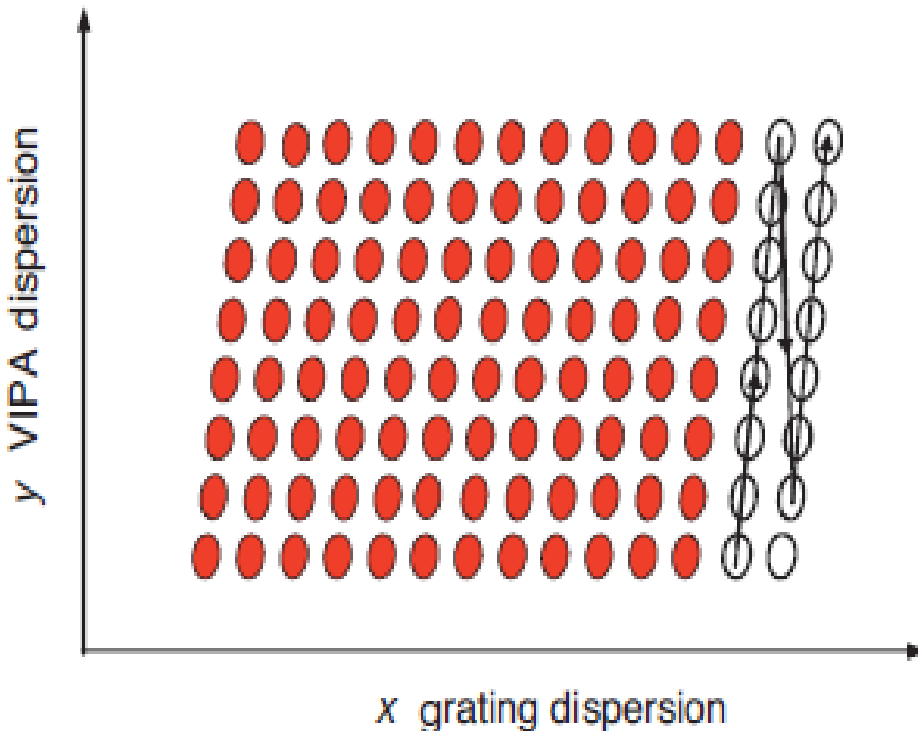
**個々のコムの振幅等の情報を同時に測定できない**

# VIPAを用いた分光法

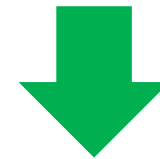
VIPA と回折格子を用いて、2次元にコムを分離



個々のコムの情報をリアルタイム  
でモニタリング・計測が可能



従来の点検出では、検出器の飽和やそれによるSN比の制限



測定時間を維持しつつ検出器の飽和を防ぎ高いSN比の実現

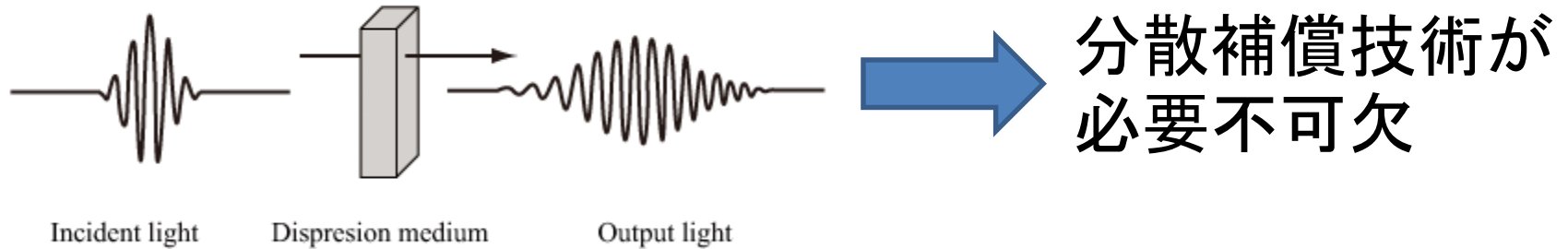
- 「Large angular dispersion by a virtually imaged phased array and its application to a wavelength demultiplexer」, M. Shirasaki, Optics Letters, **21**, No.5, 366(1996)
- 「Molecular fingerprinting with the resolved modes of a femtosecond laser frequency comb」, Scott A. Diddams, Leo Hollberg & Vela Mbele, Nature, **445**, 627(2007)
- 「Mid-infrared virtually imaged phased array spectrometer for rapid and broadband trace gas detection」, Lora Nugent-Glandorf, et al, Optics letters, **37**, No.15, 3285(2012)

「Large angular dispersion by a  
virtually imaged phased array and  
its application to a wavelength  
demultiplexer」

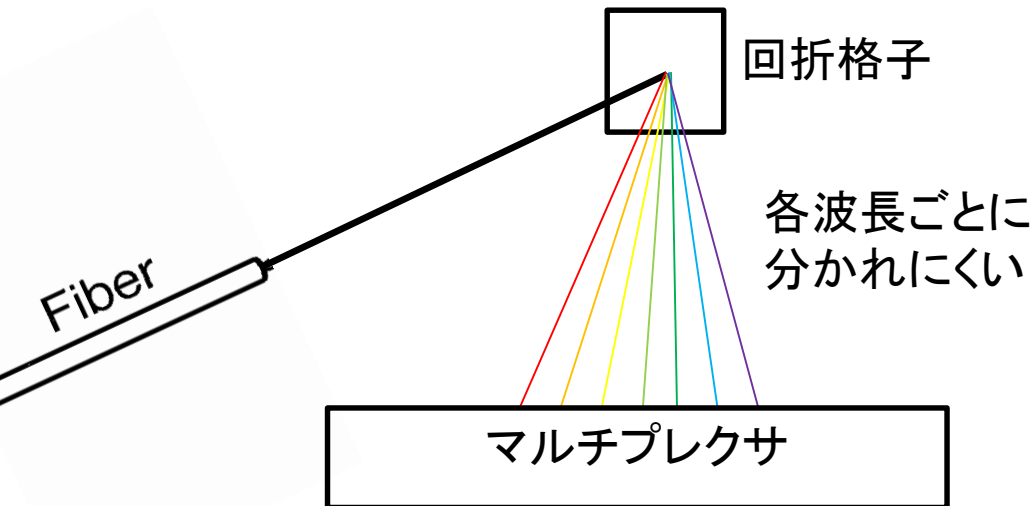
M. Shirasaki, Optics Letters, **21**,  
No.5, 366(1996).

# 背景

- ・WDM伝送システムに基づいた光ネットワークに対する需要が増大



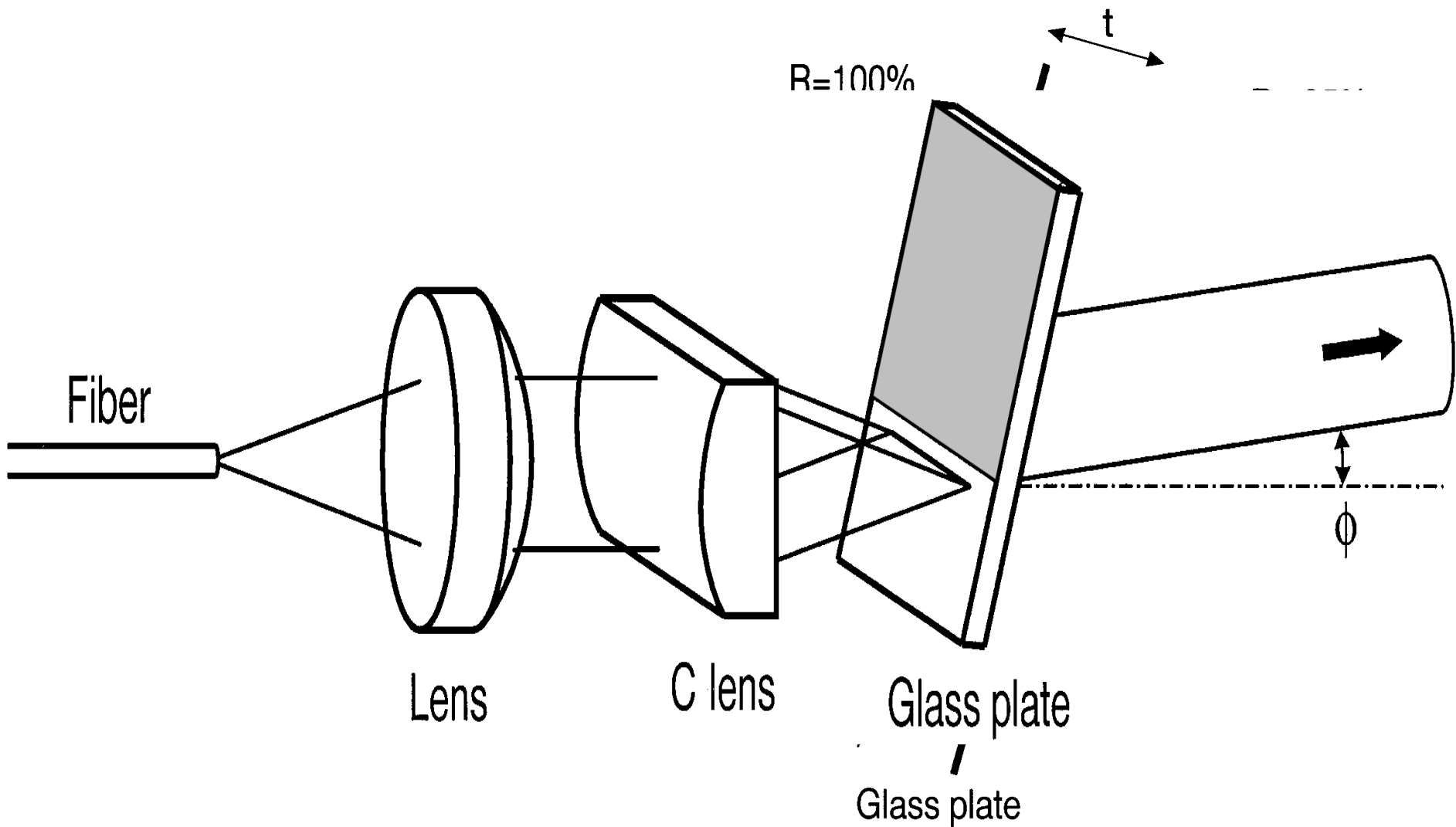
回折格子による分散では、角度分散量が不十分であり、高密度なマルチプレクサが必要となる



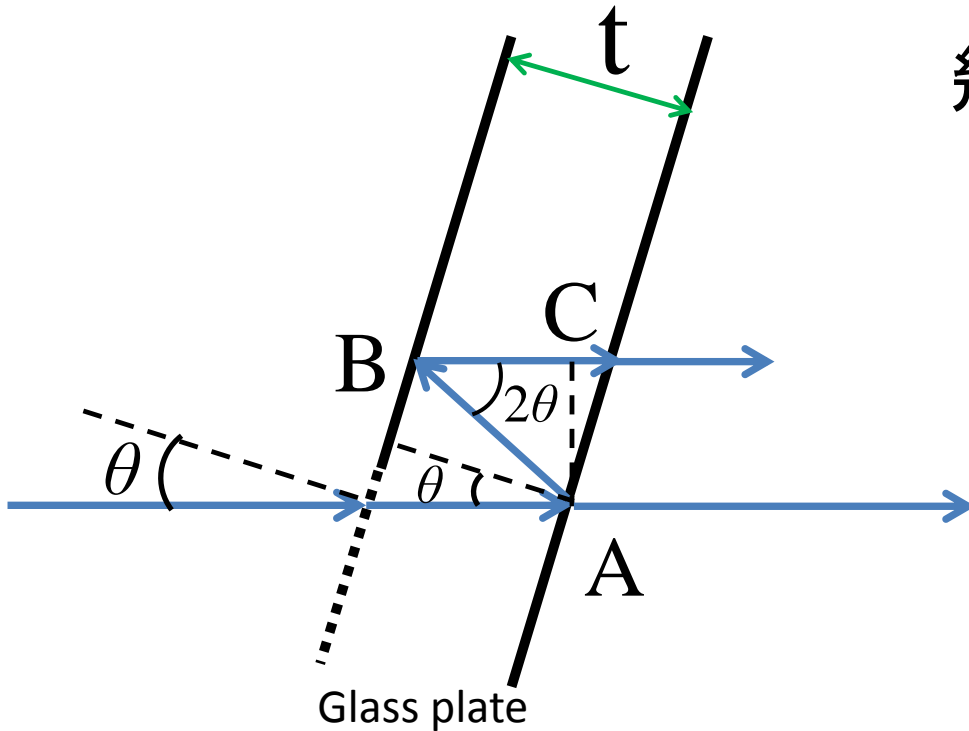
本論文では、  
高い角度分散量を持つ  
VIPA の開発およびその  
基本特性

# VIPAの概略図

位相の異なる複数のビーム源が配置されたphased array



# VIPAの原理



幾何学的距離差 =  $AB + BC$

$$AB = \frac{t}{\cos\theta}$$

$$\frac{BC}{AB} = \cos 2\theta$$

$$AB + BC = \frac{t}{\cos\theta} + \frac{t \cos 2\theta}{\cos\theta}$$

$$= 2t \cos\theta$$

$2nt \cos\theta = m\lambda$ : この条件を満たす方向に伝搬していく

角度分散を計算するために  $\theta$  を  $\lambda$  の関数として微分

$$\frac{d\theta}{d\lambda} = \frac{-m\lambda}{2nt \sin\theta} : \text{角度分散}$$

波長が  $d\lambda$  変化したときの、回折角の変化量



# 回折格子との比較

## 回折格子

$$\sin\alpha + \sin\theta = Nm\lambda$$

( $N = 1/d$ )

$$\frac{d\theta}{d\lambda} = \frac{Nm\lambda}{\cos\theta} : \text{角度分散}$$

- ・低角度分散
- ・偏光状態依存
- ・回折効率

## VIPA

$$\frac{d\theta}{d\lambda} = \frac{-m\lambda}{2nt\sin\theta} : \text{角度分散}$$

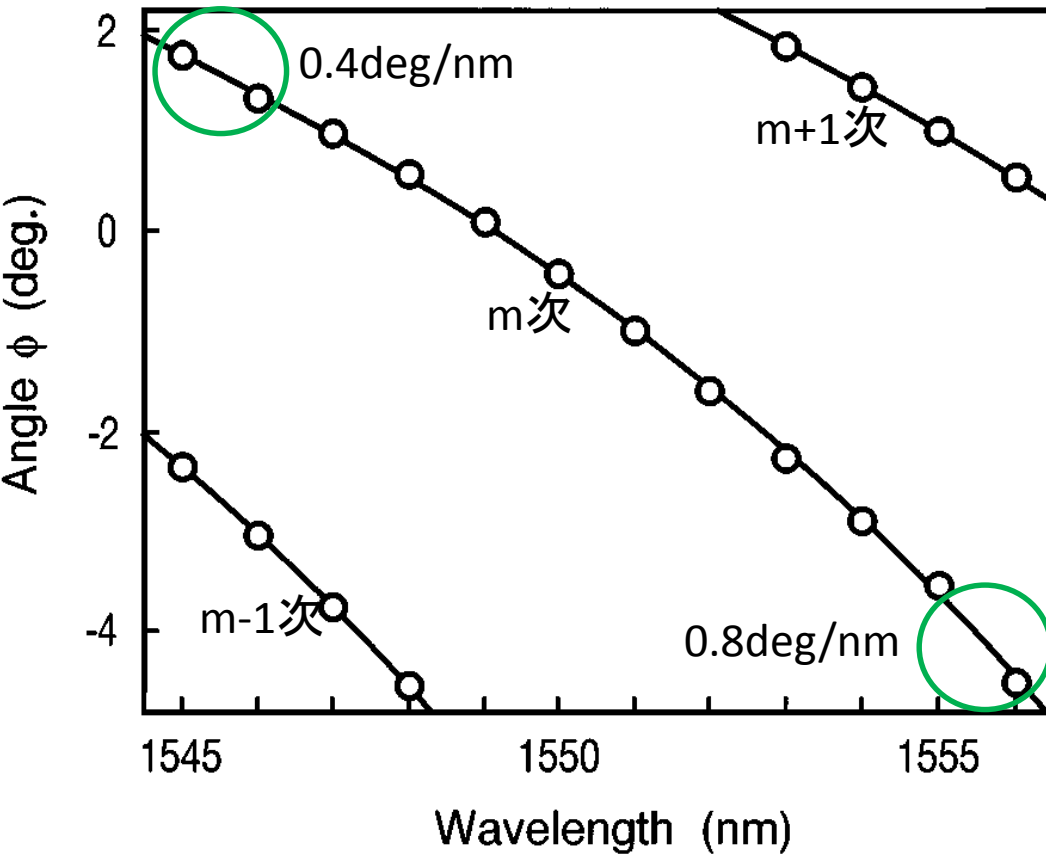
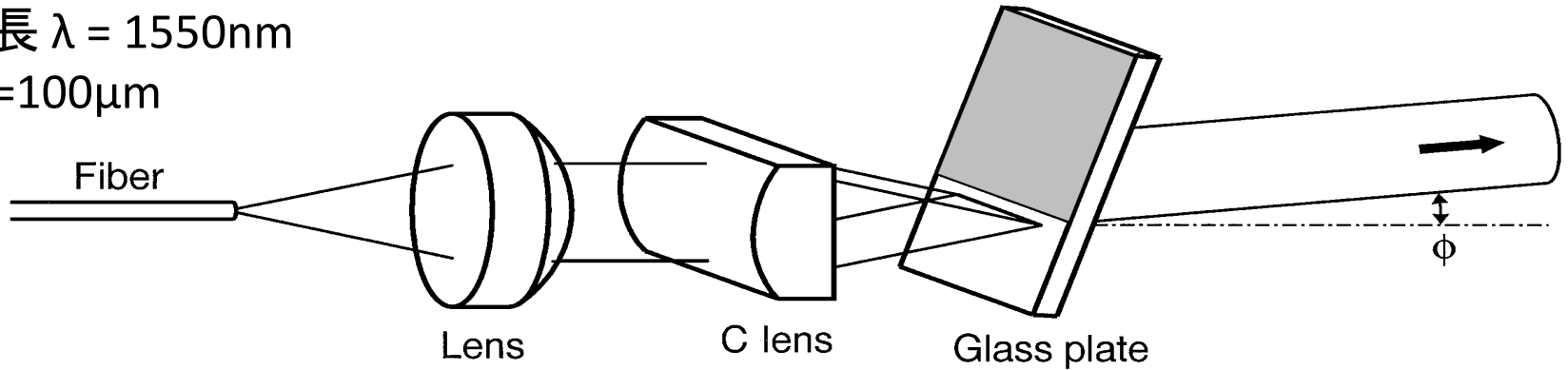
VIPA の次数は数百から千にもおよぶ



- ・非常に大きな角度分散
- ・偏光状態に依存しない
- ・効率が低い

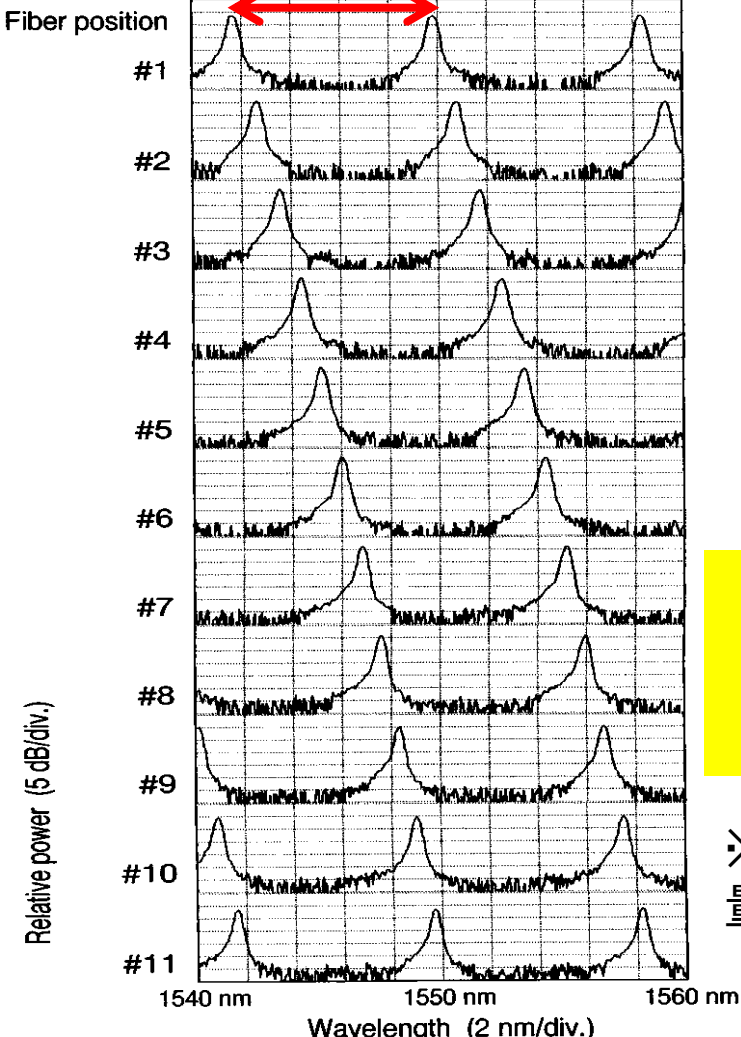
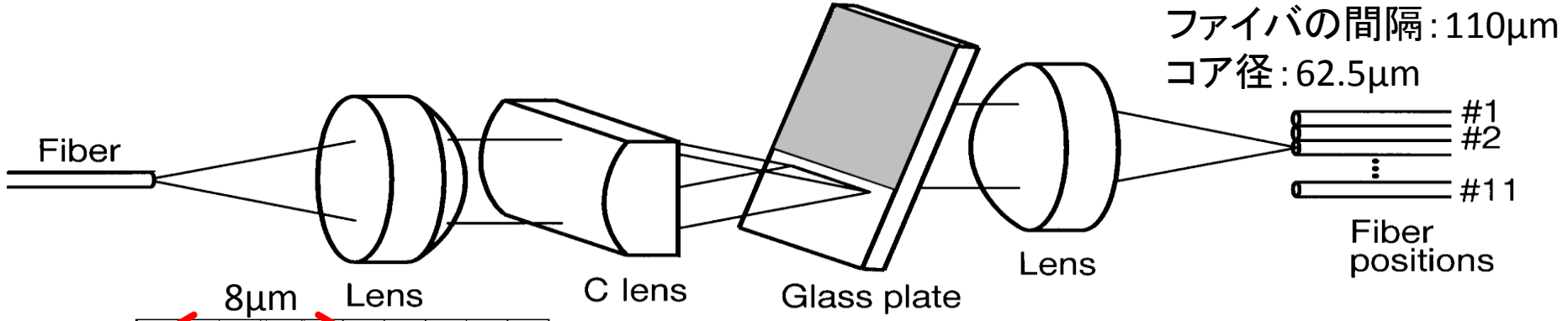
# 実験結果

入射角  $\theta = 6.4^\circ$   
 厚さ  $t = 100\mu\text{m}$   
 波長  $\lambda = 1550\text{nm}$   
 $\Delta\lambda = 100\text{nm}$

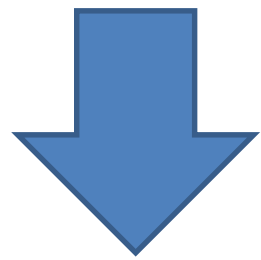


$$\frac{d\phi}{d\lambda} = \frac{-m\lambda}{2nts\sin\phi}$$

長波長側  
 $\lambda \rightarrow \lambda + d\lambda : \phi \rightarrow \phi - d\phi$   
 短波長側  
 $\lambda \rightarrow \lambda - d\lambda : \phi \rightarrow \phi + d\phi$



ピークの間隔  $8\mu\text{m}$  間を10  
分割して検出可能



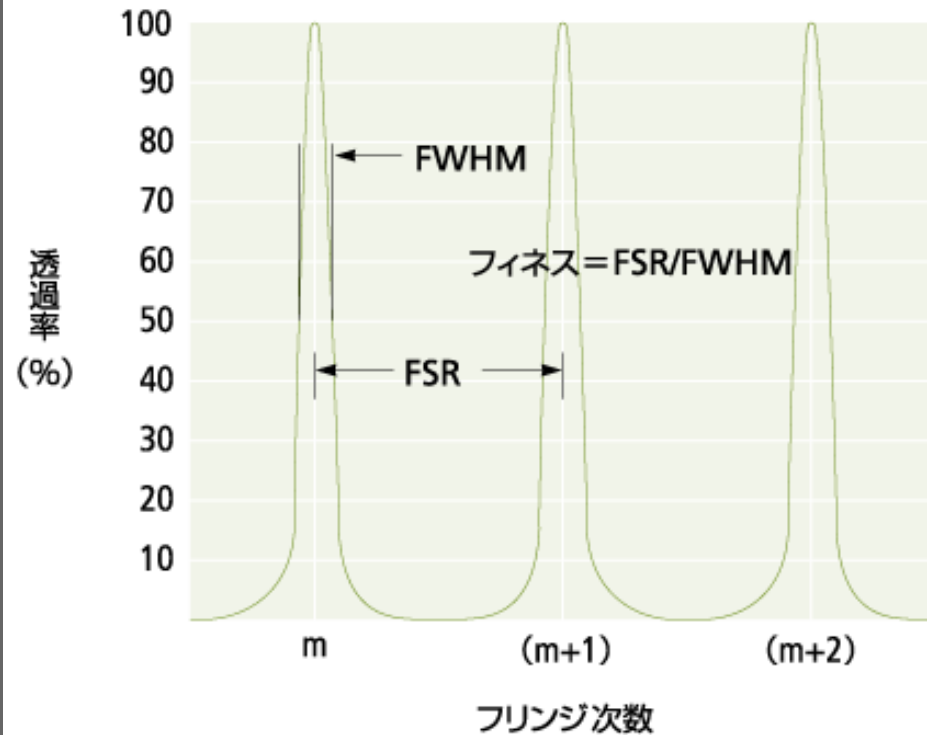
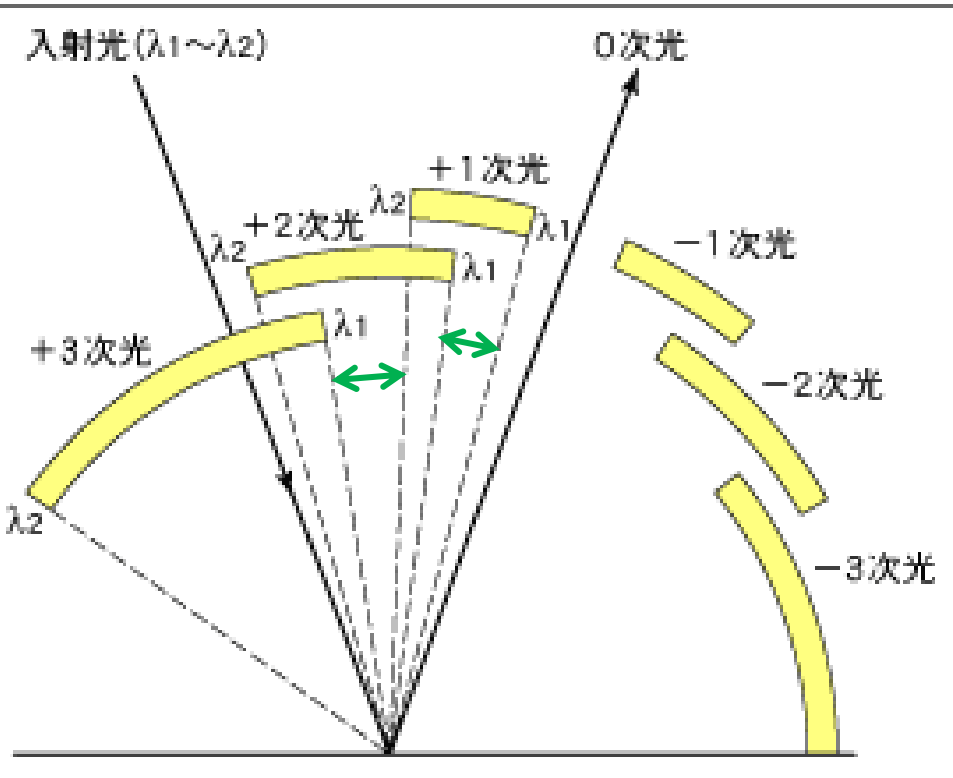
大きな角度分散により  
10波長分割多重方式への応用

※ブレース角30度の回折格子を用いた場合、角度分散量はおよそ1/10以下程度

# FSR (自由スペクトル領域)

光が回折格子に入射すると、隣り合う次数のスペクトルが一部重なり合う

➡ 重ならない領域をFSRという



$$FSR = \frac{c}{2nt \cos \theta}$$

位相差の式を周波数に変換した式

# まとめ

- 大きな角度分散を有するVIPAを開発し、その基本特性を評価した。
- $8\mu\text{m}$ の範囲を10分割し、波長分割多重方式への応用が可能であることを示した。

- 「Molecular fingerprinting with the resolved modes of a femtosecond laser frequency comb」

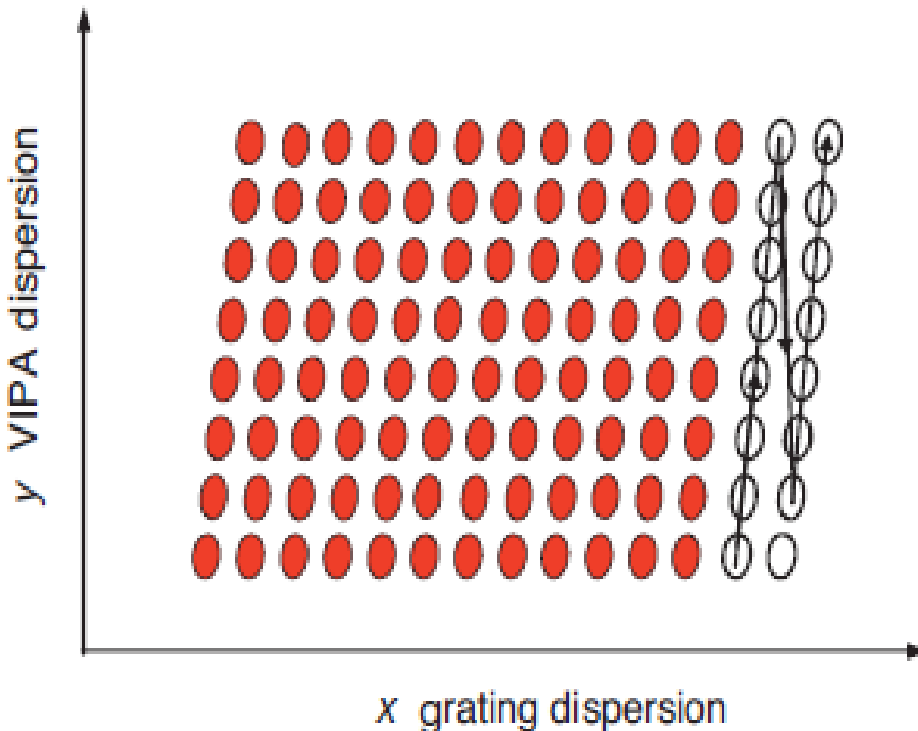
Scott A. Diddams, Leo Hollberg & Vela Mbele, *Nature*, **445**, 627(2007)

# VIPAを用いた分光法

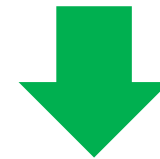
VIPA と回折格子を用いて、2次元にコムを分離



個々のコムの情報をリアルタイム  
でモニタリング・計測が可能

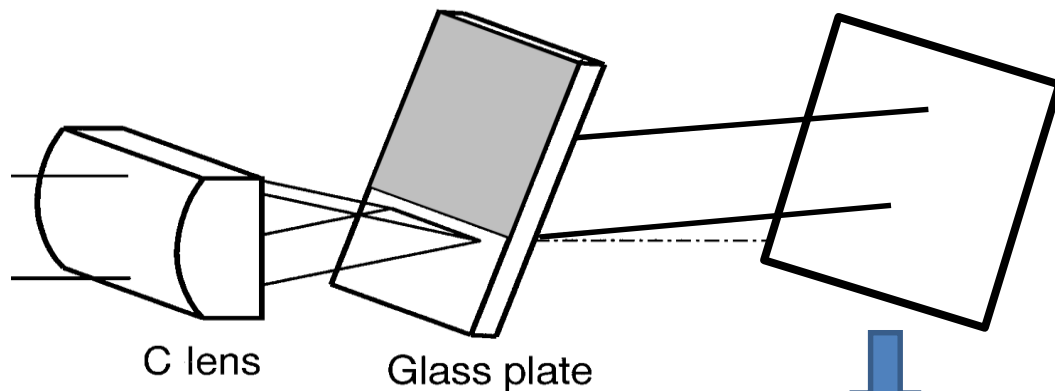
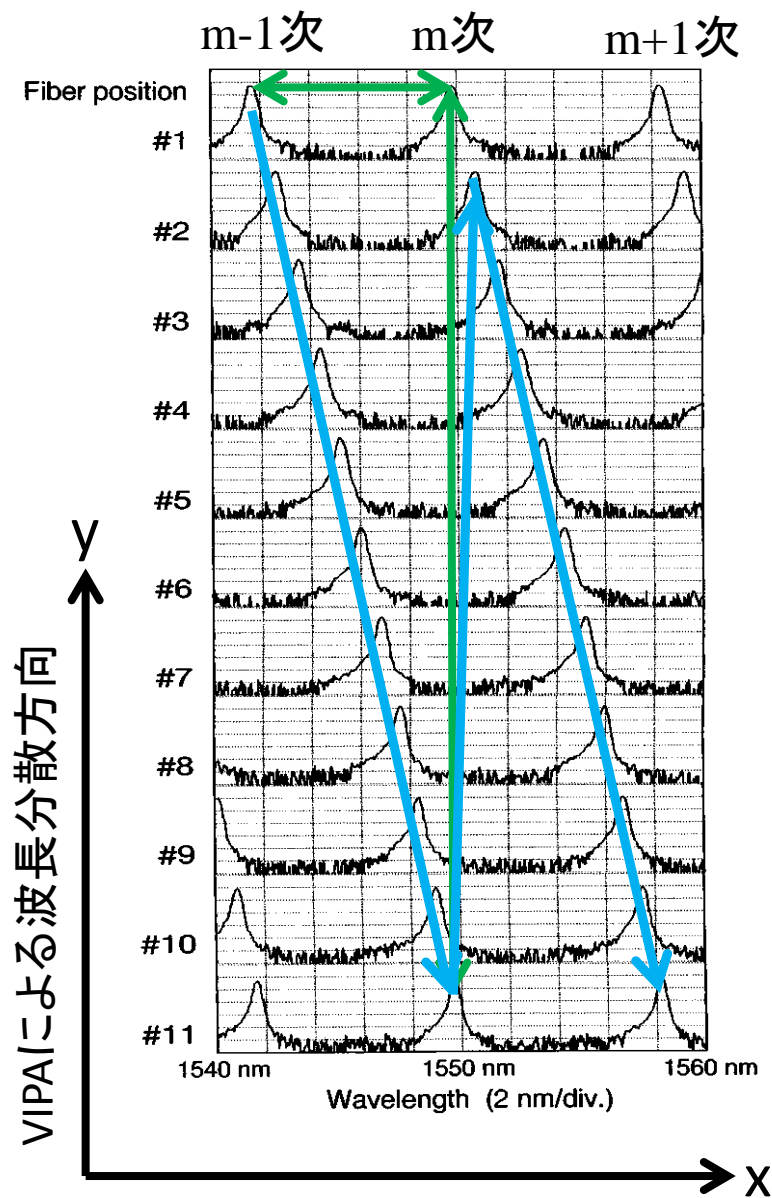


従来の点検出では、検出器の飽和やそれによるSN比の制限

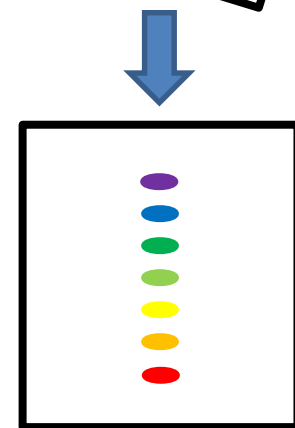


測定時間を維持しつつ検出器の飽和を防ぎ高いSN比の実現

# VIPA + Gratingによるコムの分離



様々な次数の  
光が重畳

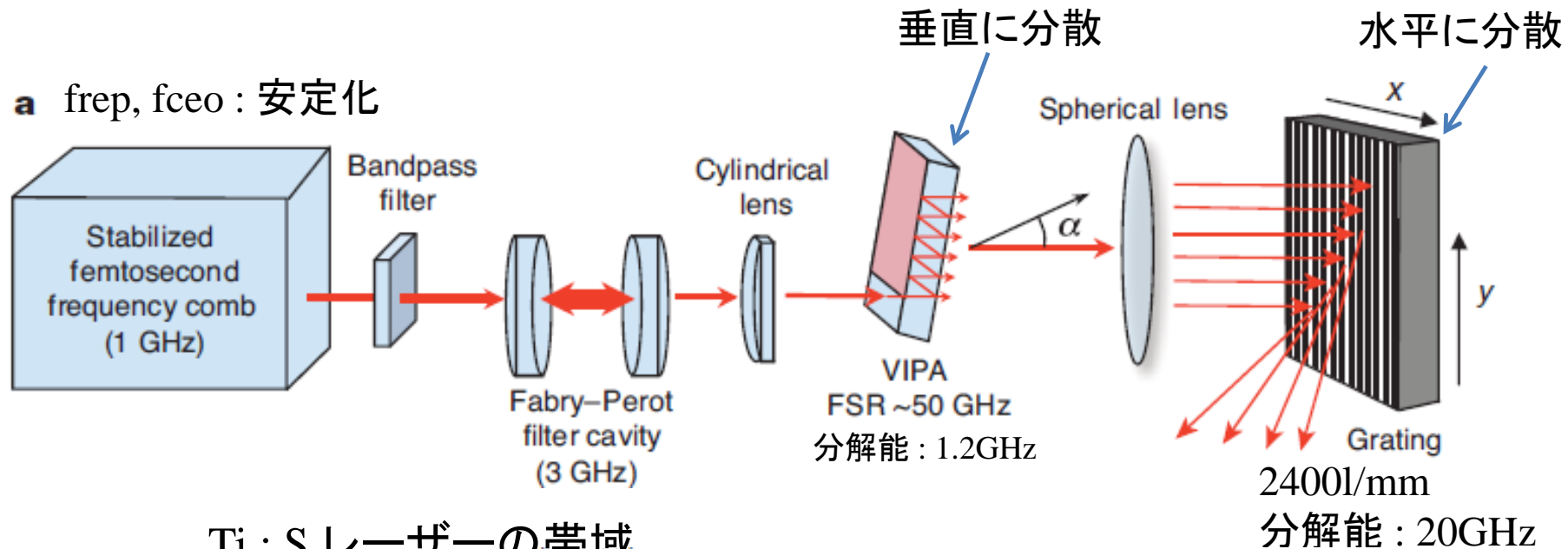


回折格子で水平方向に分散を与える

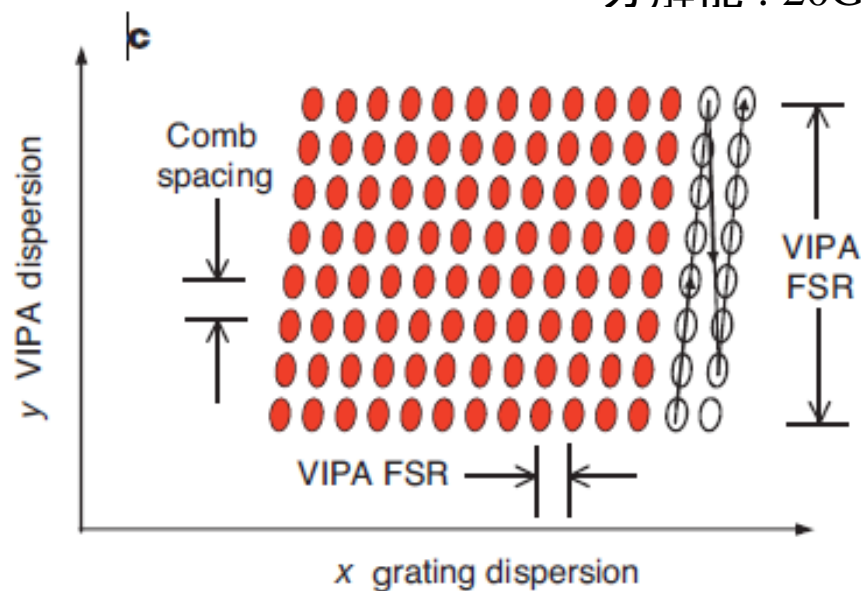
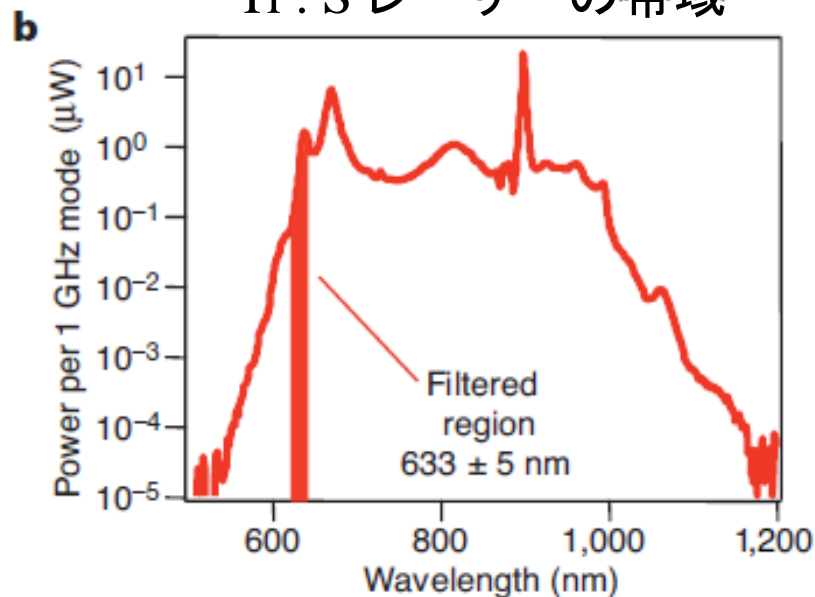


# 実験光学系

**a**  $f_{rep}$ ,  $f_{ceo}$  : 安定化



Ti : S レーザーの帯域



# VIPAシステムによる分光イメージ

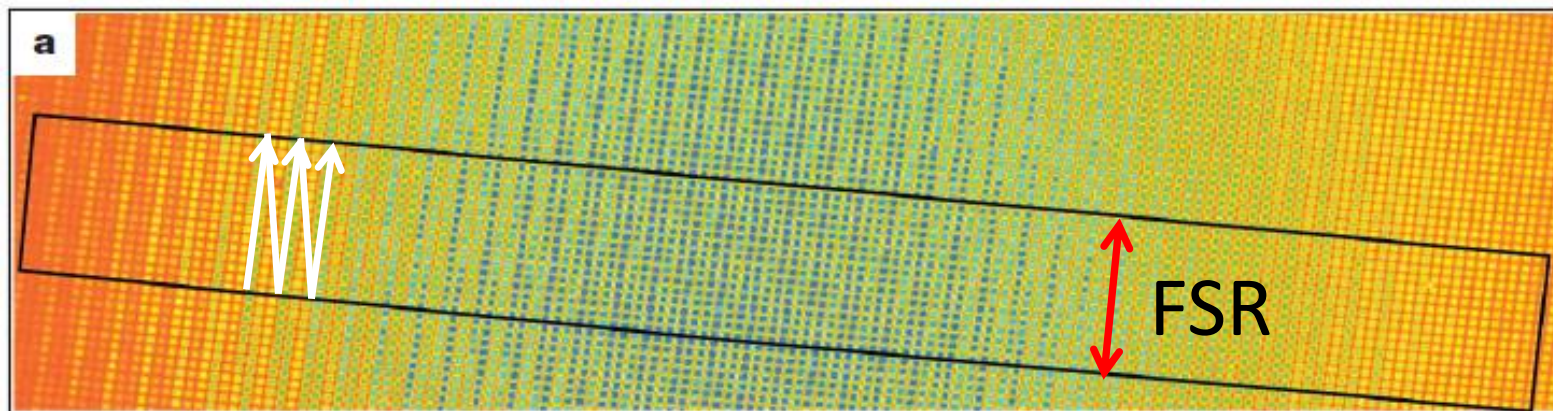
サンプル: ヨウ素

測定時間: 5ms

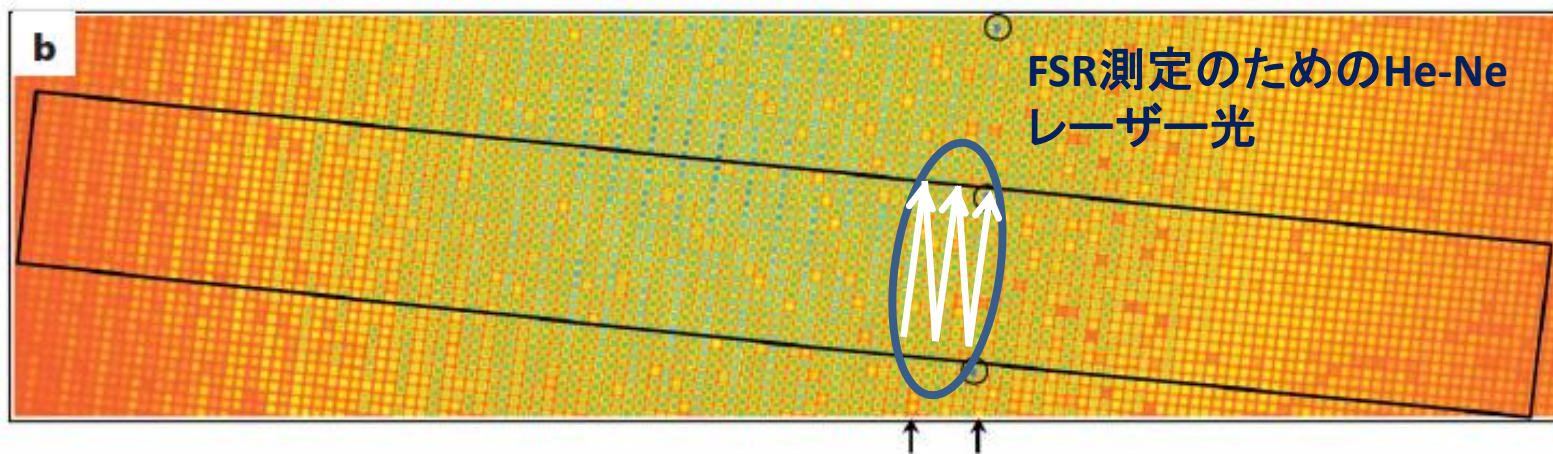
帯域: 6.5THz

振幅強

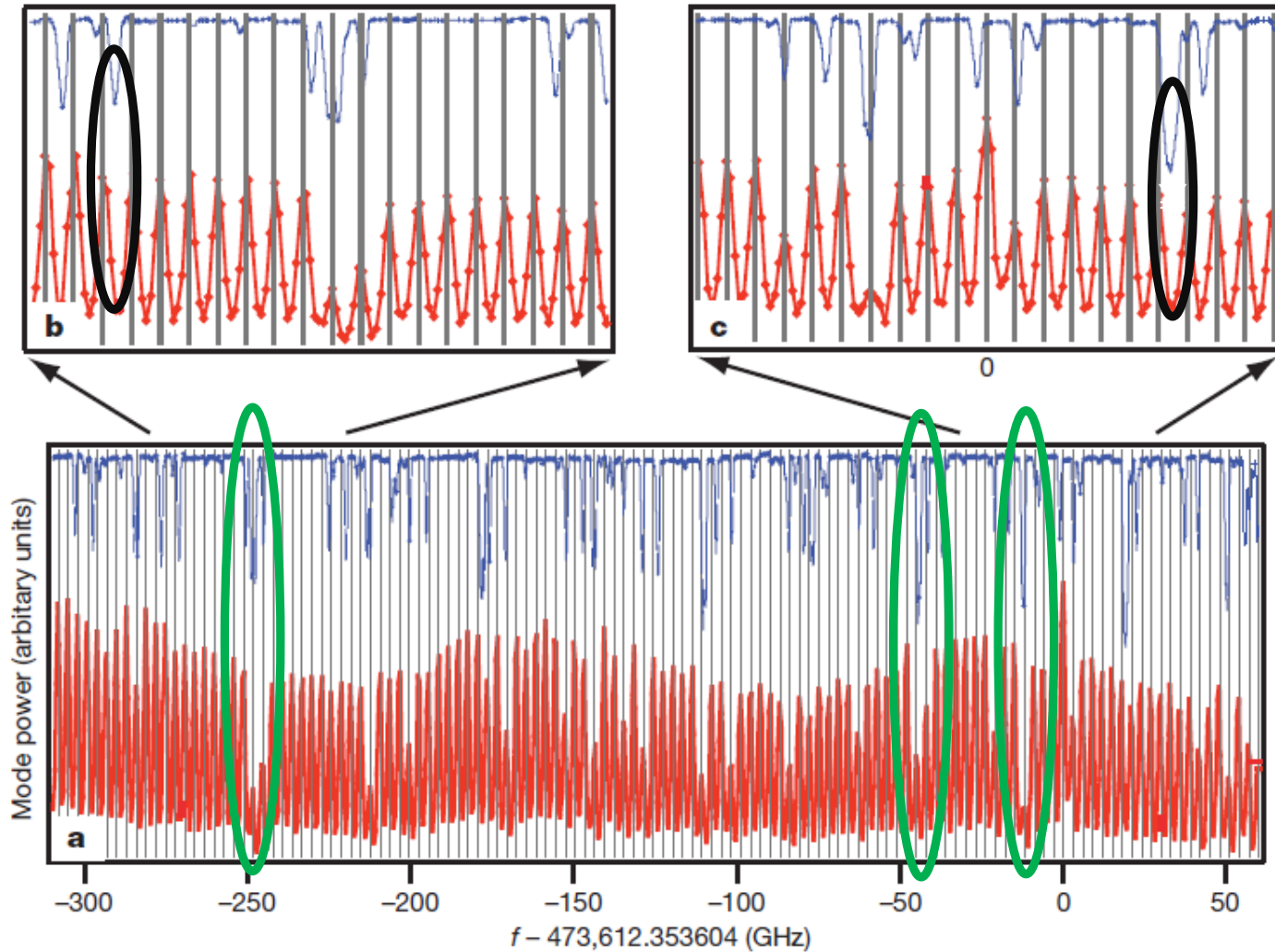
振幅弱



サンプルなしの背景光



# ヨウ素蒸気の吸収スペクトル



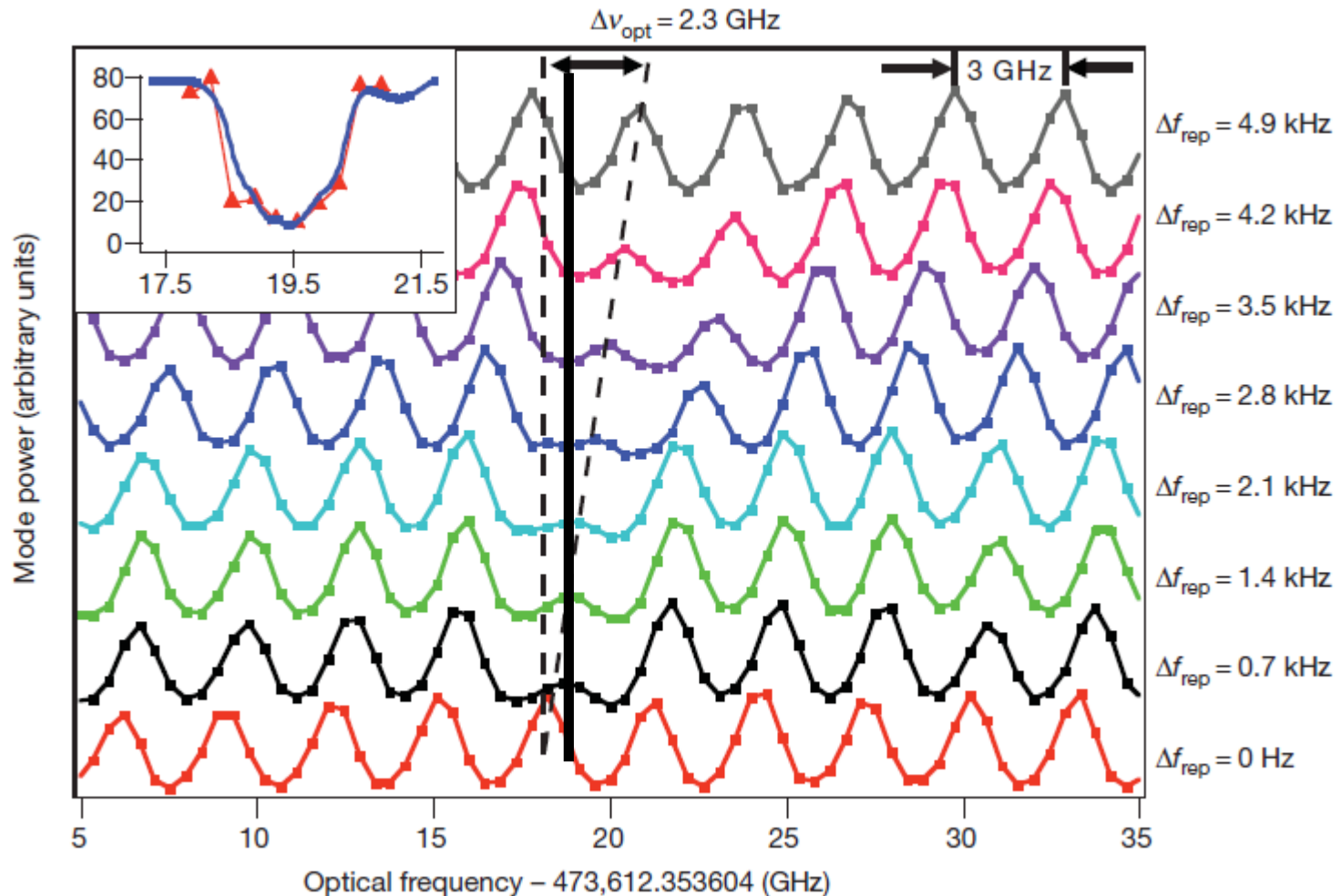
CWレーザーによる  
ヨウ素蒸気の透過  
スペクトル

今回得た吸収スペクトル

ある程度一致はしているが、CCDカメラの分解能  
がリミットしている

# 周波数走査

繰り返し周波数を走査することにより、より高い分解能での測定が可能



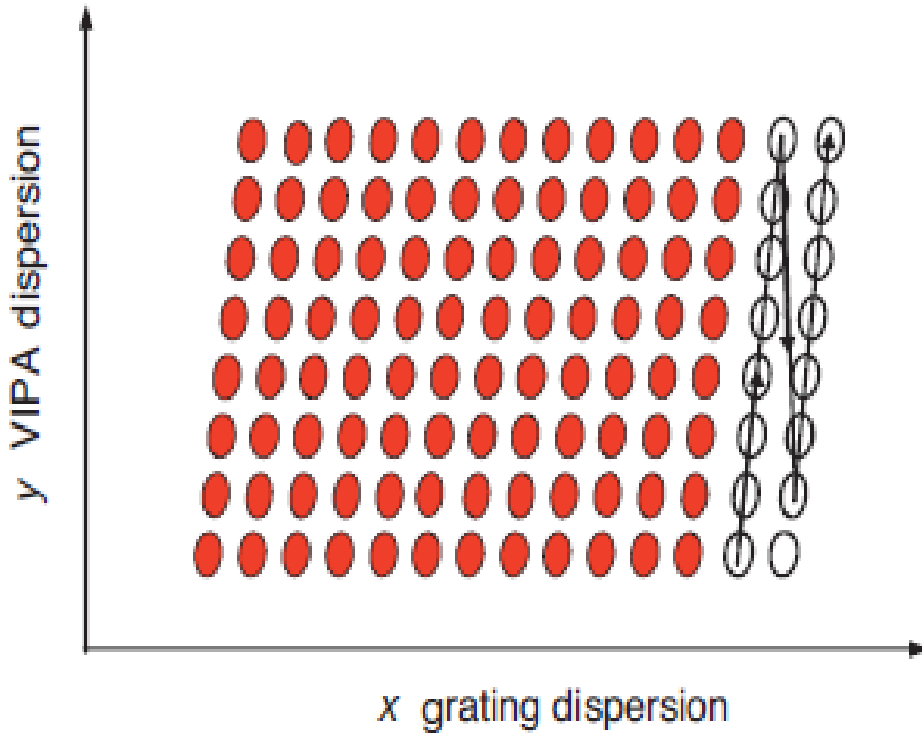
# まとめ

- VIPAと回折格子による分光器を用いて、ヨウ素蒸気の分光を行った
- 繰り返し周波数を走査することにより、より高い分解能での分光測定が可能である



「Mid-infrared virtually imaged  
phased array spectrometer for rapid  
and broadband trace gas detection」,  
Lora Nugent-Glandorf, et al, Optics  
letters, **37**, No.15, 3285(2012)

# イントロダクション



従来の点検出では、検出器の飽和やそれによるSN比の制限

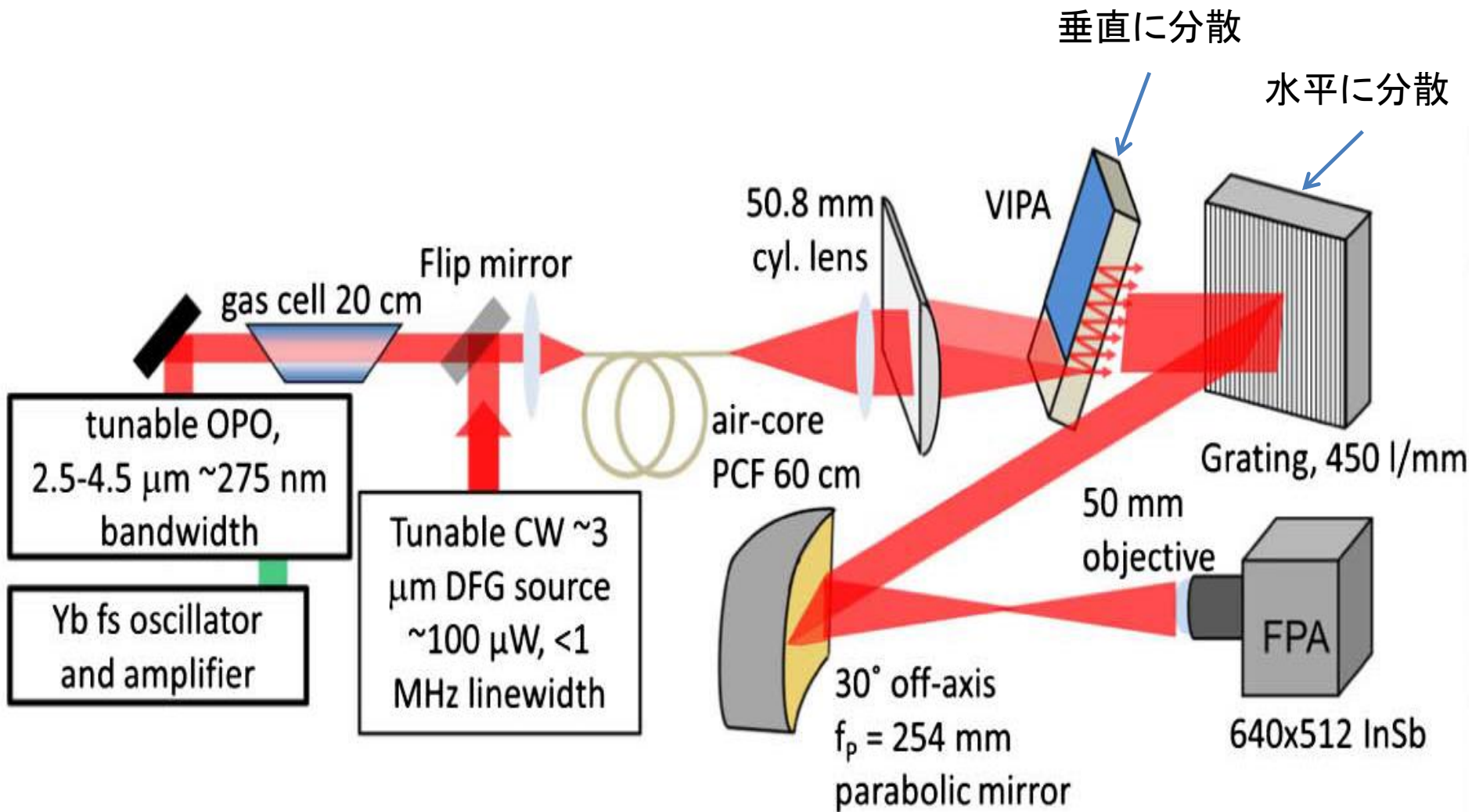


測定時間を維持しつつ検出器の飽和を防ぎ高いSN比の実現

本論文では、

VIPA + 回折格子による分光器の検出限界を評価し、ダイナミック分光法を行っている

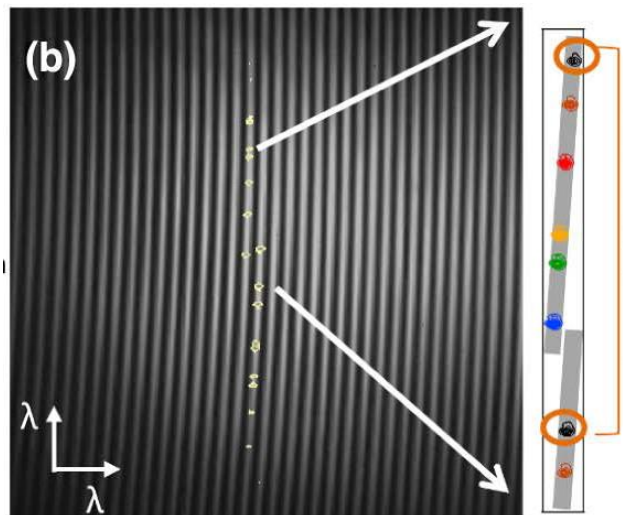
# 実験光学系





# VIPAの特性

## CWレーザーを用いて、VIPAのFSR・分解能の評価

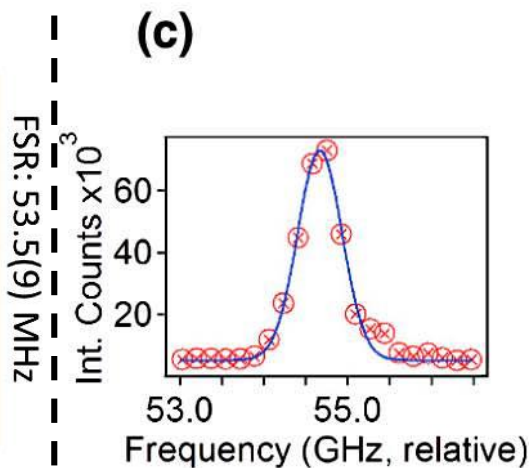


CWレーザーの周波数を変化させて重ねている

黒いドット=CWレーザーの  
同一周波数



**FSR = 53.5GHz**

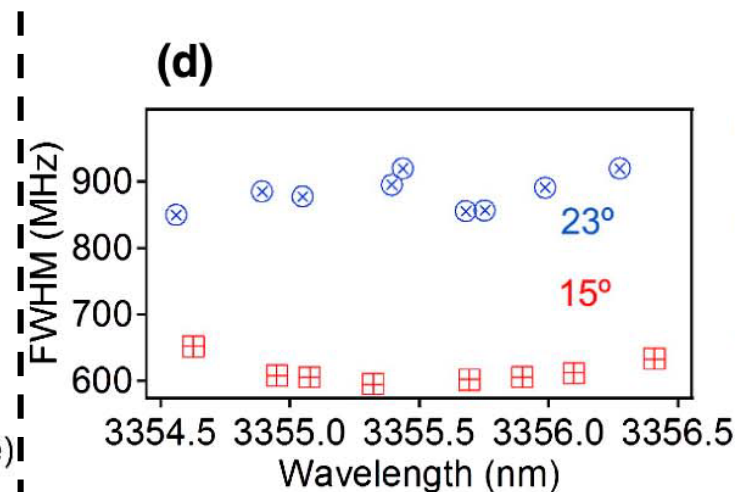


CWレーザーの線幅を実験系で測定

1 MHzの線幅を  
600MHzで測定



**分解能  
600MHz**



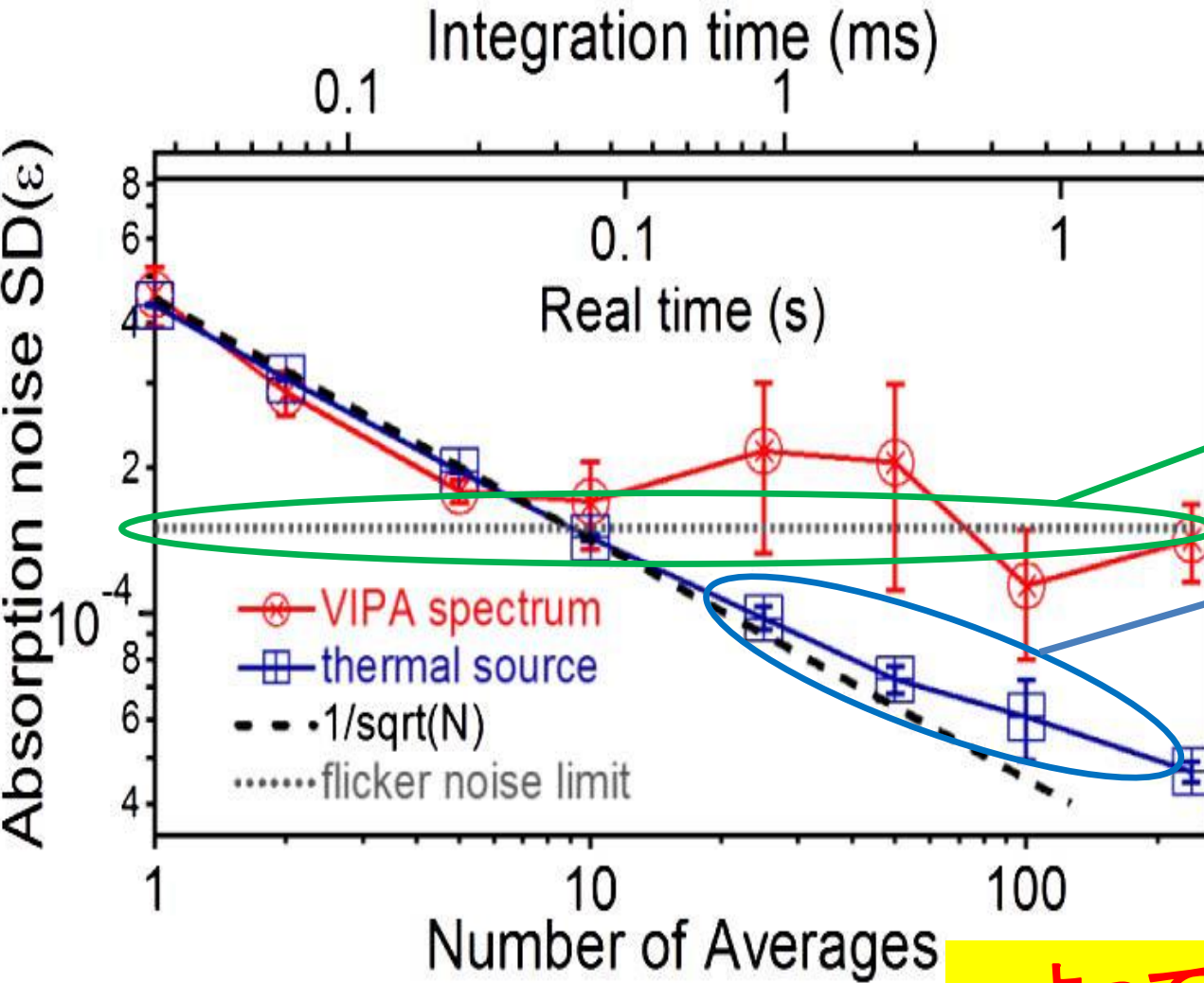
VIPAへの入射角度・CWレーザーの周波数を変化させて線幅を測定

入射角度により、分解能が大きく変化



**分解能は入射角度  
に大きく依存**

# ノイズ特性



※どちらもInSbアレイで検出

レーザーシステム  
のノイズ

レーザー光と同等  
のパワーを持つ熱  
光源のノイズ特性

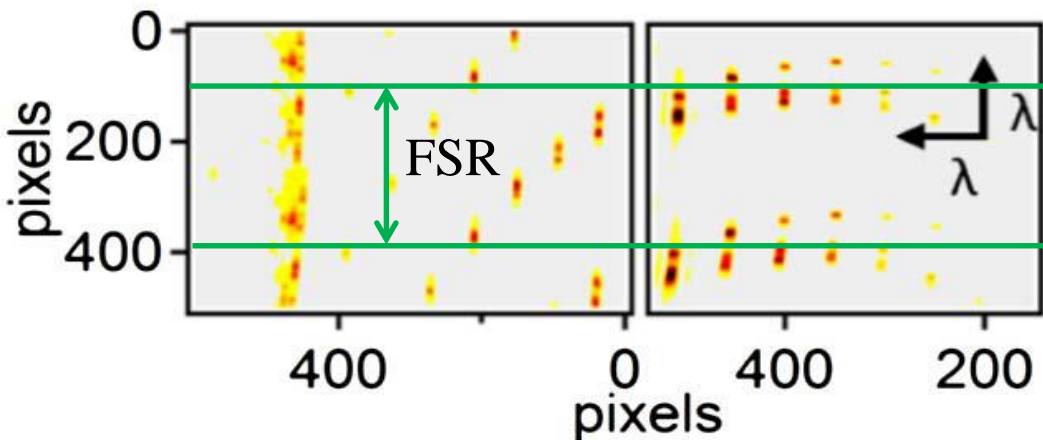


$\varepsilon = \ln \frac{S_1}{S_2}$  隣り合うフレーム間の自然対数

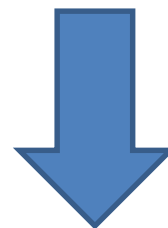
よって、レーザー自体の  
1/fノイズがリミットしている

積算時間: 7 $\mu$ s  
分解能 600MHz

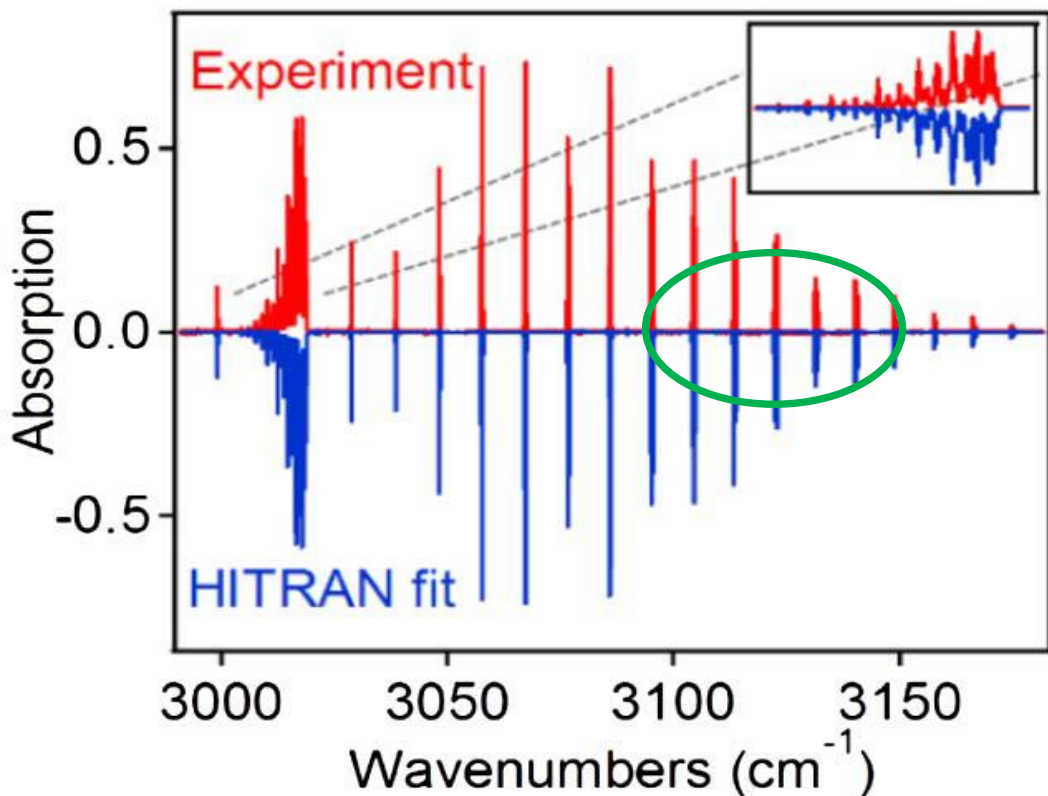
# メタンの分光実験



サンプルの吸光度を示す  
VIPA のイメージ



スペクトルに変換

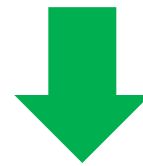
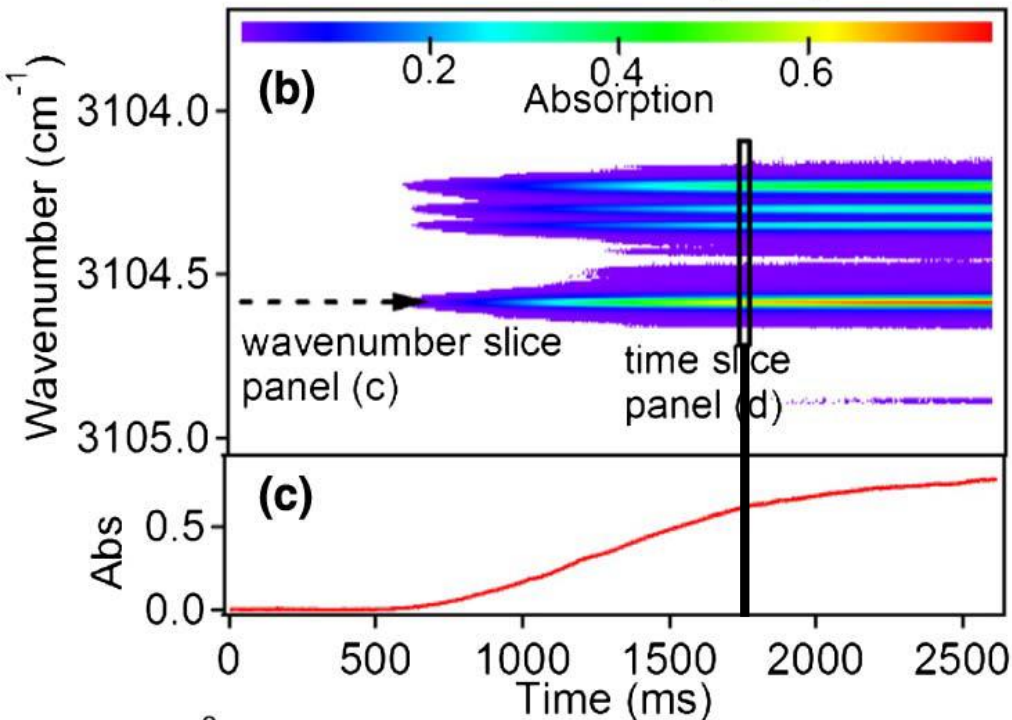
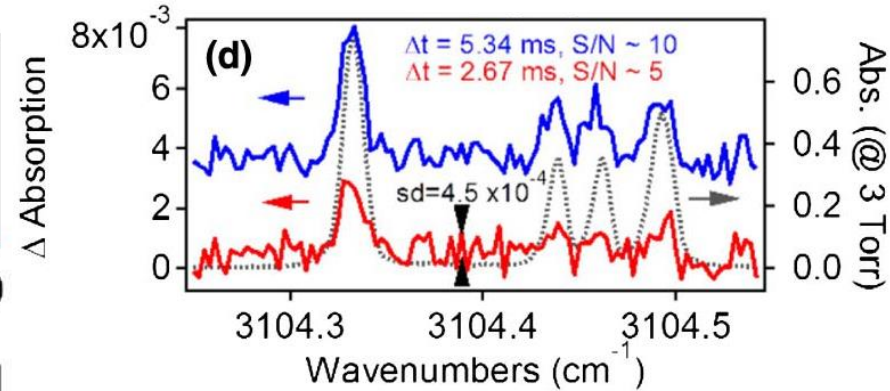
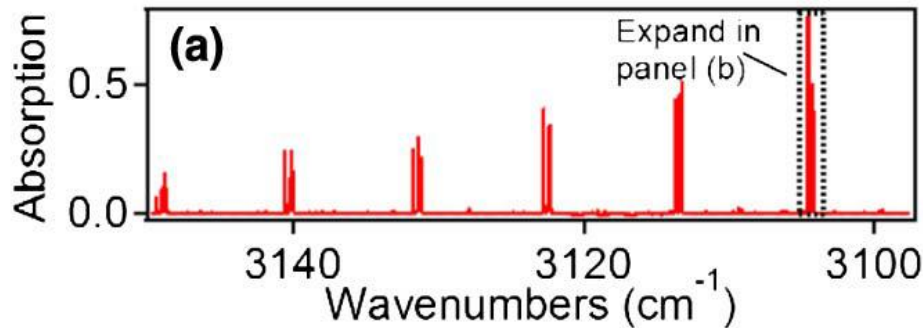


HITRANのデータベースとの残差 = 0.0017

# ダイナミック分光法の実証

測定時間: 2.67 ms/frame

帯域: 50cm<sup>-1</sup>



**赤** :  $\Delta t = 2.67$ ms イメージの差分

- SN =  $\sim 5$
- メインピークは検出できている
- サイドピークはつぶれている

**青** :  $\Delta t = 5.34$ ms イメージの差分

- SN =  $\sim 10$
- サイドピークも明確に検出できている

# まとめ

- CWレーザーを用いて、VIPA分光器の基本特性を調べ、検出限界について評価した。
- メタンの分光実験を行い、本装置の正確性が実証された。
- フレームごとのイメージの評価により、ダイナミック分光法を実証した。

# 総括

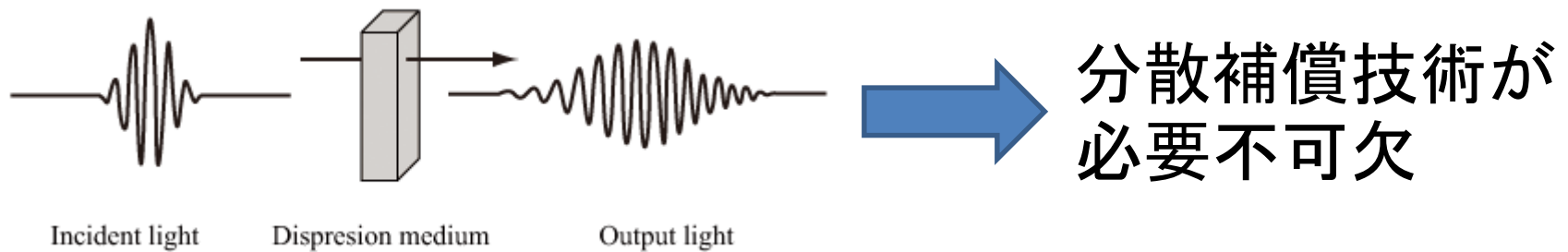
- VIPAの原理
- VIPAを用いた分散補償技術
- VIPAを用いた分光計測



# イントロダクション

VIPA ( *virtually imaged phased array* ) について

WDM伝送システムに基づいた光ネットワークに対する需要が増大



- ・1996年 白崎正孝によってVIPA が考案・開発(1)

波長分散補償技術  
として確立

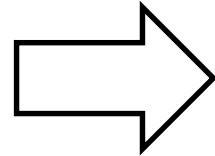




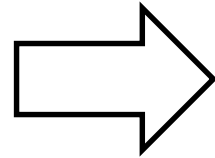
# 雑誌会の内容

## VIPA の特徴

- ・大きな角度分散
- ・偏光状態に低依存
- ・低コスト



<sup>(1)</sup> 分散補償技術



<sup>(2), (3)</sup> 周波数コム  
分光法

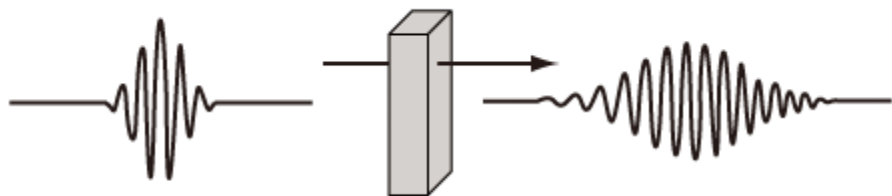
角度分散の大きいVIPAと回折格子を用いて、周波数コムを空間的に分離し、配列させる



個々のコムモードの振幅等の情報を一度に  
えることができる

# VIPA型可変分散補償器

- WDM伝送システムに基づいた光ネットワークに対する需要が増大



Incident light

Dispersion medium

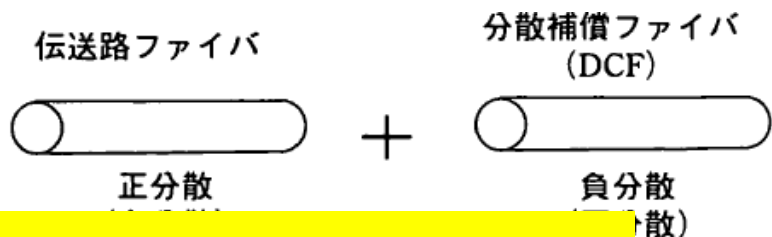
Output light

分散補償技術が必要不可欠

- 分散補償技術

- 分散補償ファイバ(DCF)

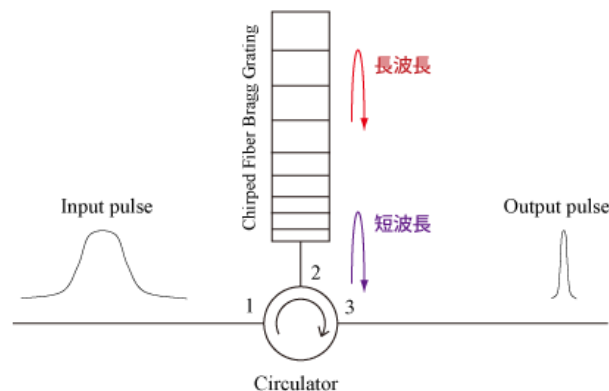
伝送路のファイバで生じる分散と逆の分散をもつファイバ



速い(遅い)  
遅い(速い)

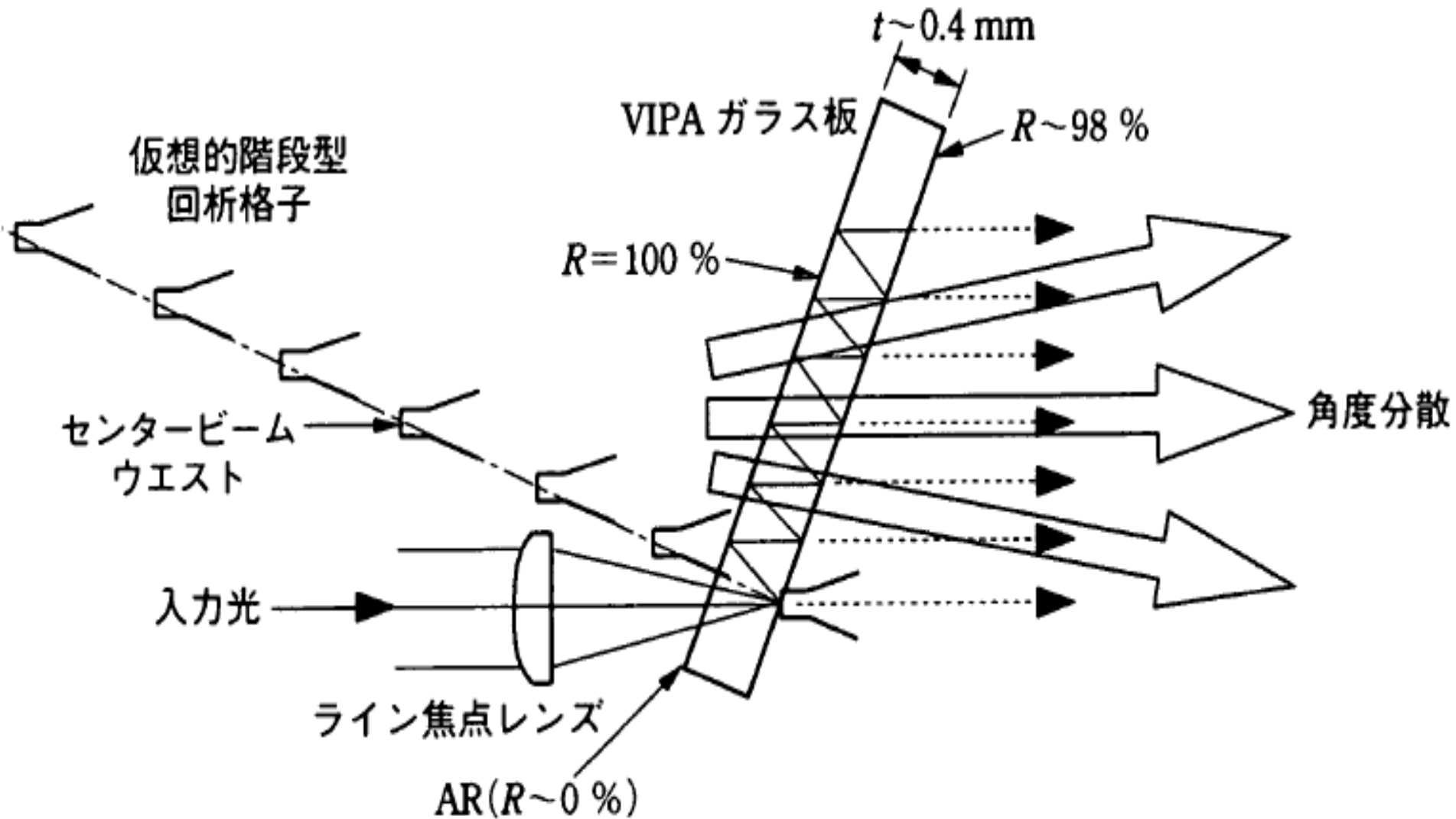
## 可変分散補償技術の確立

- チャープ光ファイバブラッググレーティング(CFBG)  
光ファイバ中に周期的な屈折率変化を形成させて、分散補償を行う



# VIPA型可変分散補償器

位相の異なる複数のビーム源が配置されたphased array



VIPA order: Single comb modes

