

21p-  
P14-3

# WGM微小共振器による中赤外マイクロコム発生のための分散制御

## Dispersion engineering of crystalline whispering gallery microresonators for mid-infrared micro comb generation



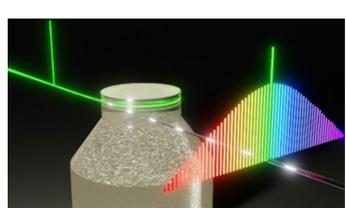
高林 諒明<sup>1</sup>, 田邊 孝純<sup>1</sup>, 藤井 瞬<sup>2</sup>  
Ryomei Takabayashi<sup>1</sup>, Taksumi Tanabe<sup>1</sup>, and Shun Fujii<sup>2</sup>

<sup>1</sup>慶應義塾大学 理工学部 電気情報工学科, <sup>2</sup>理工学部 物理学科 Keio Univ., Dept. of EEE<sup>1</sup>, Dept. of Phys.<sup>2</sup>

### 概要

中赤外領域においてモード同期したマイクロ光周波数コムを発生させるための、高Q値WGMフッ化マグネシウム共振器の最適導波路構造を検討した。導波路形状を三角形構造にすることで広範囲で異常分散を実現できることを有限要素法計算によって明らかにした。

### 微小共振器によるソリトンコム



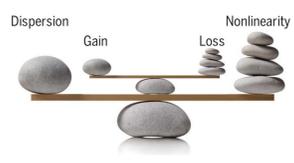
#### 高Q値微小共振器によるモード同期ソリトンコム

- 超小型
  - 低消費エネルギー動作
  - 広帯域&高繰返し
- パラメトリック発振の閾値
- $$P_{th} \propto \frac{V}{n_2 Q^2}$$

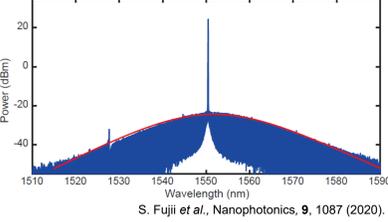
T. J. Kippenberg et al., Science 361, eaan8083 (2018).

#### ソリトン発生における平衡条件

- ✓ パラメトリックゲイン vs 共振器損失
- ✓ 異常分散 vs 非線形性

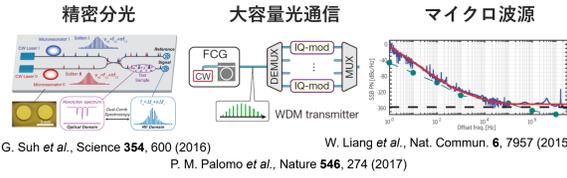


#### ソリトンコムの光スペクトル

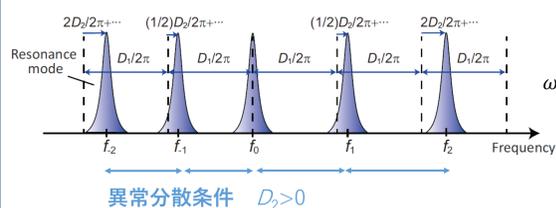


S. Fujii et al., Nanophotonics, 9, 1087 (2020).

#### 多種多様なアプリケーション



### 高Q値微小共振器の分散制御



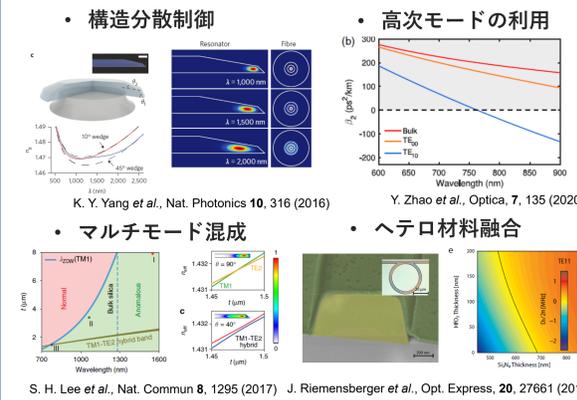
#### モード番号 $\mu$ における共振周波数

$$\omega_\mu = \omega_0 + D_1\mu + \frac{1}{2}D_2\mu^2 + \frac{1}{6}D_3\mu^3 + \frac{1}{24}D_4\mu^4 + \dots$$

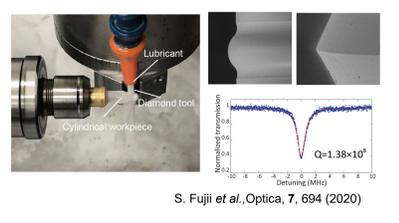
$$= \omega_0 + D_1\mu + D_{int} \quad \beta_2 = \frac{d^2\beta}{d\omega^2} = -\frac{nD_2}{cD_1^2} \text{ (ps}^2/\text{km)}$$

$m$ : azimuthal mode number  
 $\mu$ : relative mode number (pump  $\mu = 0$ )

#### 異常分散条件 $D_2 > 0$



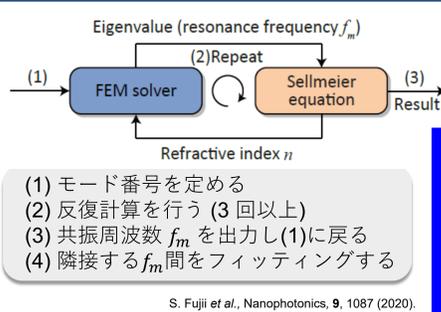
#### 超精密機械加工



S. Fujii et al., Optica, 7, 694 (2020)

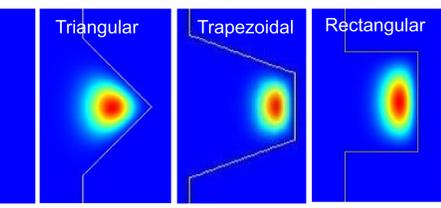
- 超高Q値 (>10<sup>8</sup>)
- 微細構造制御性
- 高歩留まり & 作製時間短縮

### 手法: 有限要素法(FEM)とセルマイヤー方程式による高精度反復計算



材料分散を構造分散の影響とともに含んだ分散を計算する繰り返し計算の手法

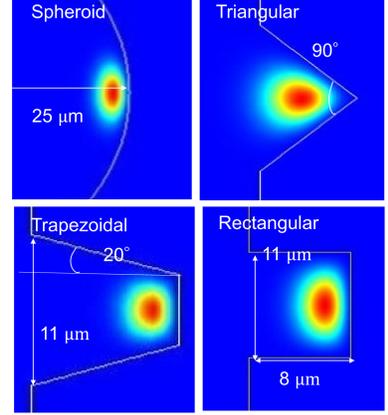
#### 4種の共振器構造



### 結果1: 通信波長帯におけるFSR 100 GHzのMgF<sub>2</sub>共振器の分散

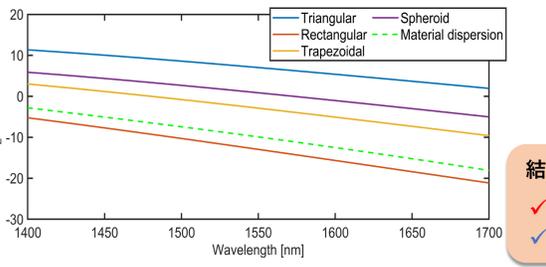
- #### フッ化マグネシウム(MgF<sub>2</sub>)結晶共振器
- 超高Q値 (>10<sup>9</sup>)
  - 広い透過性 (可視光~中赤外光まで低損失)
  - ラマン散乱の影響が弱い

#### 構造パラメータ例



ソリトンコムの生成には異常分散が必要とされるが楕円球形状の100 GHz-FSR以下では正常分散を示す = ソリトン発生には向かない

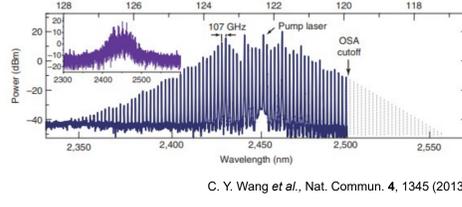
#### 波長1.55 $\mu\text{m}$ 帯におけるFSR 100 GHzの共振器の分散



- 結果: 導波路構造による高い分散制御性
- ✓ 三角形構造 > 正常分散
  - ✓ 矩形構造 > 異常分散

### 結果2: ソリトン発生の中赤外領域における分散制御

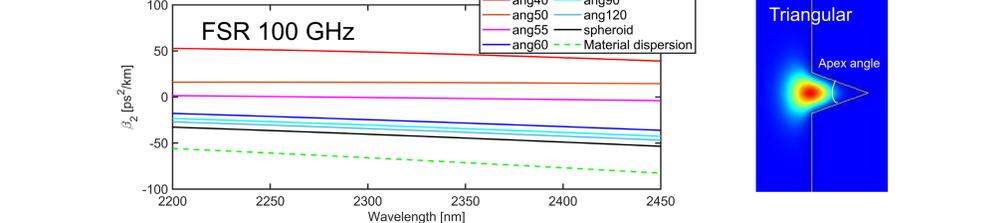
先行研究: 中赤外帯においてMgF<sub>2</sub>共振器によるソリトンコムは報告されていない。



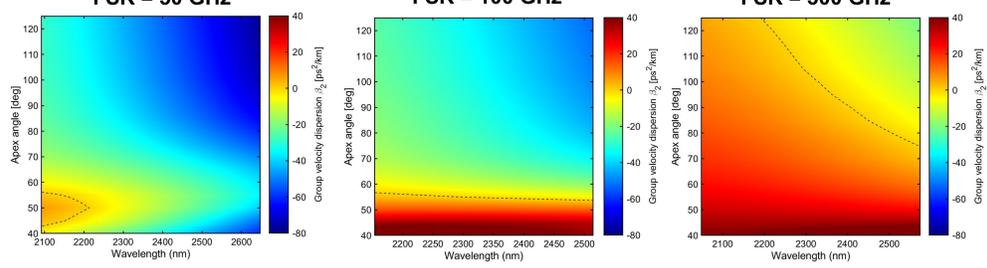
MgF<sub>2</sub> 共振器の光コムスペクトル。  
←材料分散が強すぎる異常分散であるためソリトン発生が難しい

**Idea: 三角形構造による分散補償**

#### 頂角と分散の関係 (正常分散から異常分散まで頂角で制御可能)



#### 中赤外領域における各FSRの共振器の分散



- 点線: ゼロ分散
  - 異常分散かつゼロ分散に近い分散がFSR 50, 100, 300 GHzで実現可能
- 結果: 中赤外領域における分散制御  
• 異常分散かつゼロ分散に近い分散を波長2.4  $\mu\text{m}$ で実現  
• MgF<sub>2</sub> 微小共振器で理論的には中赤外領域におけるソリトンの発生が可能である。

### 結論 および 謝辞

- 4種類の導波路構造においてフッ化マグネシウム微小共振器の分散計算を行い、共振器形状と分散の関係を解明した。
- 三角形構造が中赤外領域におけるソリトン形成の鍵であることを明らかにした。

This work is supported by JSPS KAKENHI (JP19H00873, JP22K14625), Mizuho Foundation for the Promotion of Sciences, and The Murata Science Foundation

