

# 光学式精密運動計測センサおよび 外部標準が不要な校正法の開発

東北大学 大学院工学研究科 ファインメカニクス専攻  
准教授 松隈 啓

2024年7月9日

# 本日の発表の概要

本技術は、

“回転運動を精密に測定するセンサに対して  
外部参照センサなしで高精度に校正する技術”

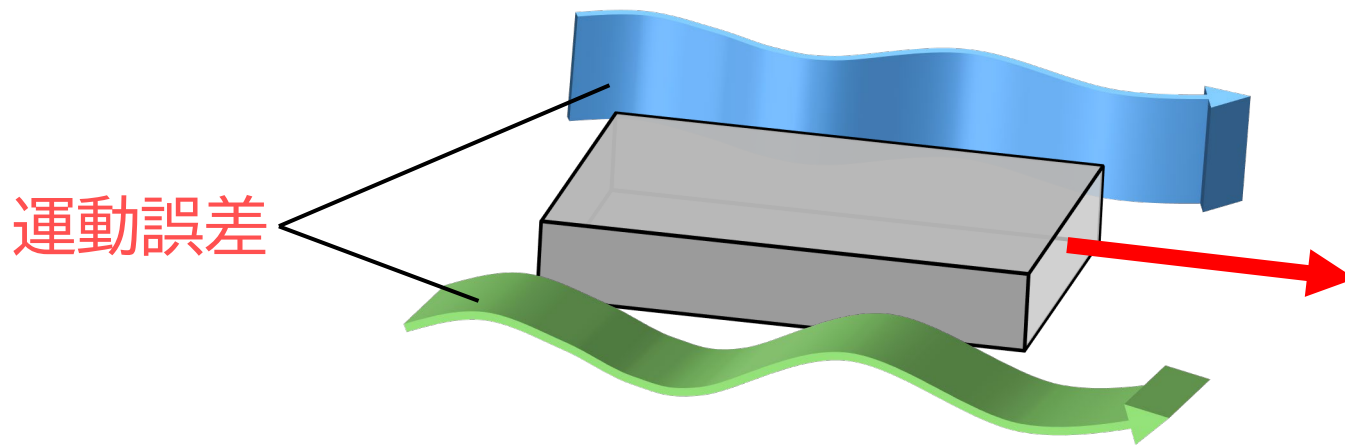
1. 回転運動測定に関する背景
2. 従来技術の課題
3. 新技術の概要
4. 想定される適用方法
5. その他情報

# 研究の背景 | 回転運動測定の意味

物体の運動の記述: 6自由度  $X, Y, Z, \theta_X, \theta_Y, \theta_Z$ .

回転運動測定が必要な例:

精密加工装置, 走査型プローブ顕微鏡等の直動ステージでの  
直線運動誤差に対する評価

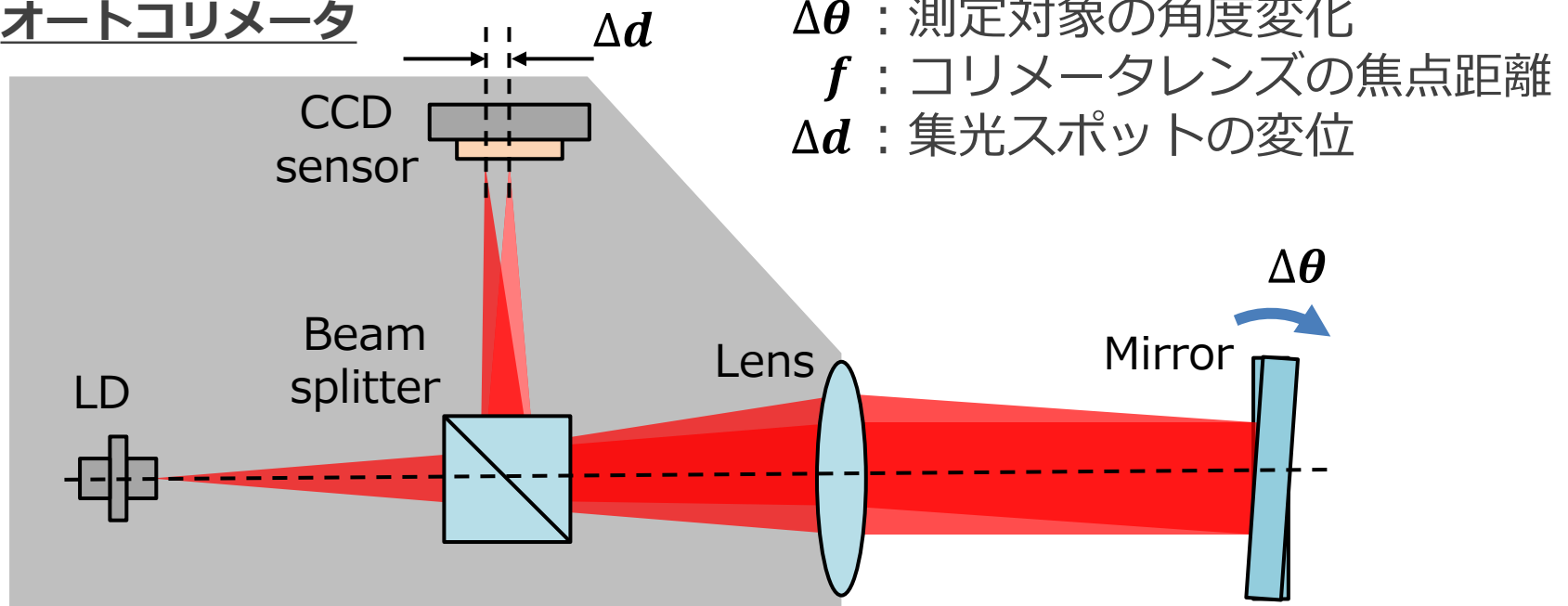


運動誤差は製品の設計からのずれ, 測定の誤差を生む  
精密ものづくりプロセスでは回転運動測定をしながら,  
直線的な動きの誤差を補正するよう制御する事例もある

# 研究の背景 | オートコリメータ

直動ステージの運動誤差や精密形状測定などの  
角度計測に**オートコリメータ**が多用される

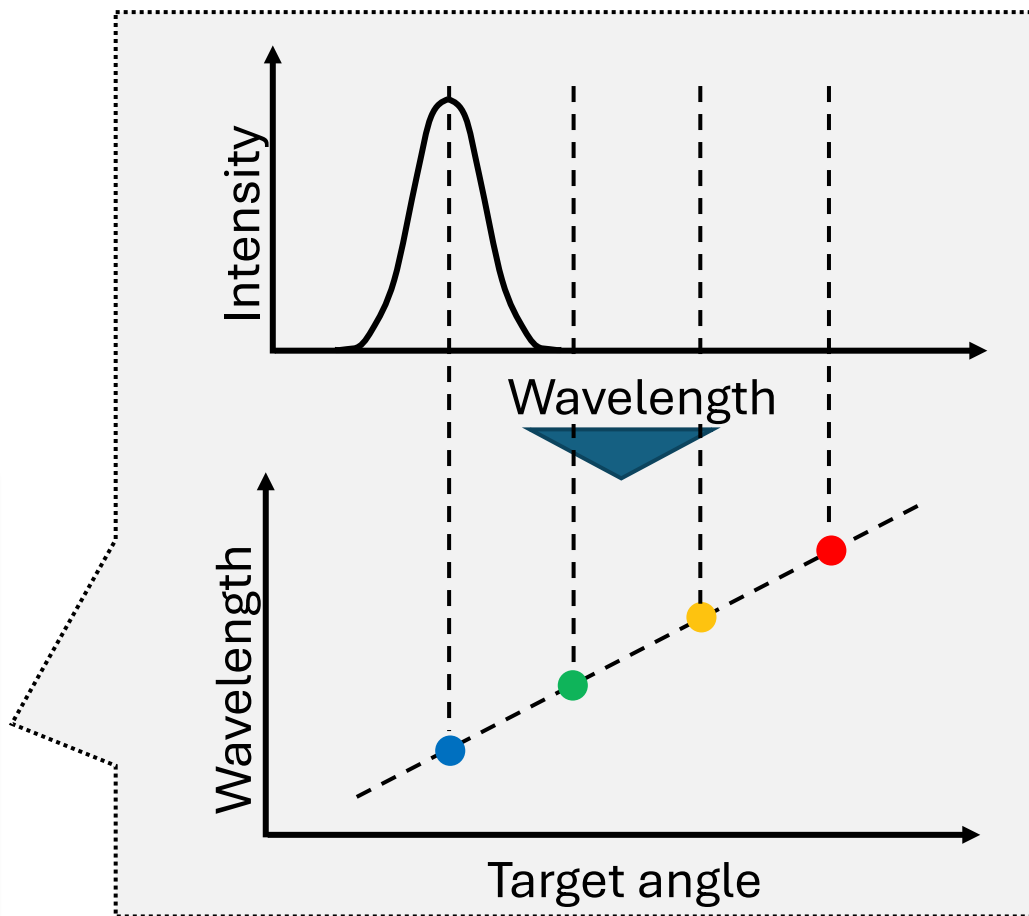
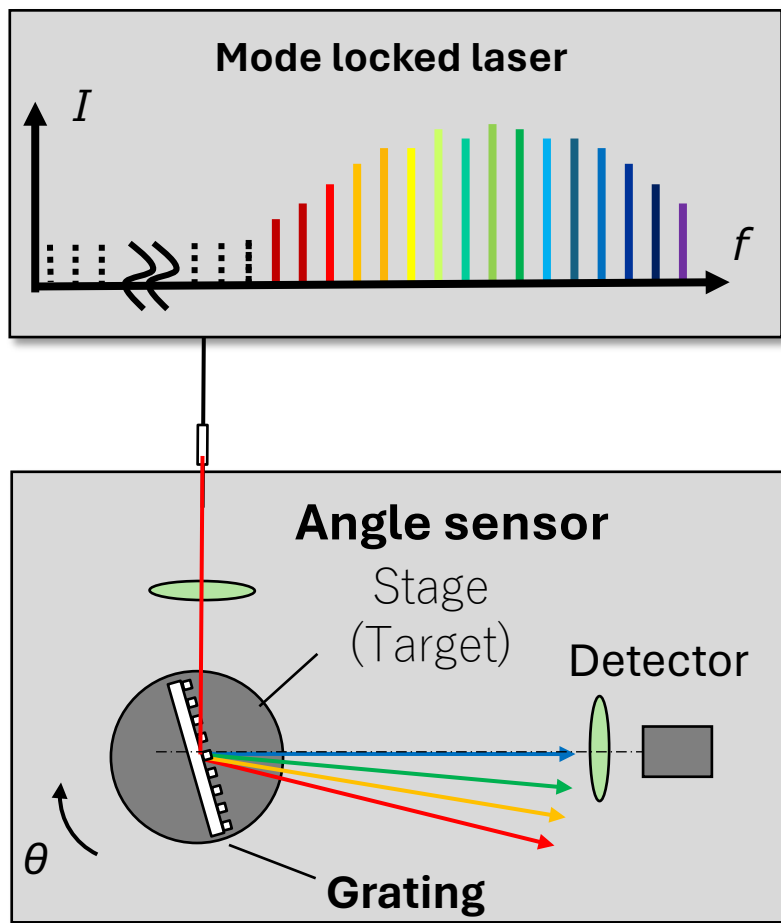
## オートコリメータ



集光スポットの位置変化量から角度変位を検出できる

$$\text{測定対象の角度変化 } \Delta\theta = \tan^{-1} \frac{\Delta d}{2f} \cong \frac{\Delta d}{2f}$$

# 研究の背景 | フェムト秒レーザー角度計測



検出される回折光の波長と測定対象の角度が1対1に対応した**広範囲測定が可能**

# 研究の背景 | 代表的な先行研究例

当グループ

Y. Chen *et al.*, Precision Engineering 54, 284 (2018).

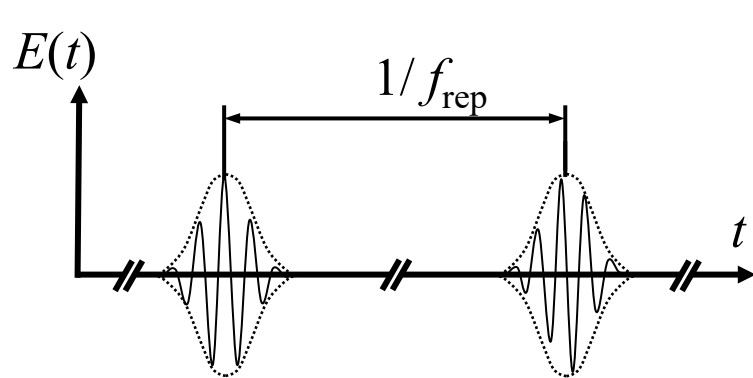
他研究グループ

S. Zhou *et al.*, Optics Letters 48, 1104 (2023).

いずれも光周波数コムを用いた測定

# 研究の背景 | 光周波数コム

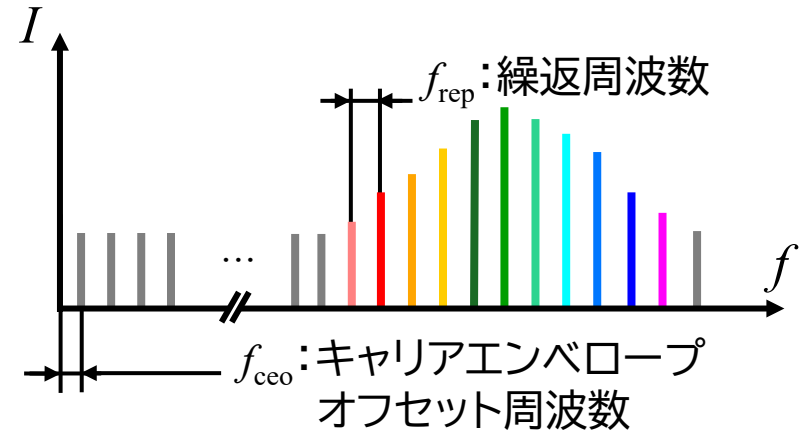
時間領域: 超短パルスレーザ



フーリエ  
変換



周波数領域



縦モード周波数を制御されたものが**光周波数コム**  
協定世界時に同期した光周波数コム装置が  
**日本の長さの国家標準**になっている

$m$ 番目のピーク周波数

$$f_m = \underbrace{f_{\text{ceo}}}_{\text{安定化制御}} + m \cdot \underbrace{f_{\text{rep}}}_{\text{安定化制御}}$$

$f_{\text{ceo}}, f_{\text{rep}}$  を周波数標準と同期・制御  
⇒ **高安定な光周波数基準**

GPS搭載1ppsと同期すれば  
**光周波数を常に校正しながら測定可能**

# 研究の背景 | 従来法の課題

光周波数コムや  
フェムト秒レーザー

光源

検出用  
光ファイバー

分光器

回折格子

検出器の設置角

別のセンサを用いて校正  
または  
既知として扱う

回折格子ピッチ(間隔)を  
別のセンサを用いて校正  
または  
既知として扱う

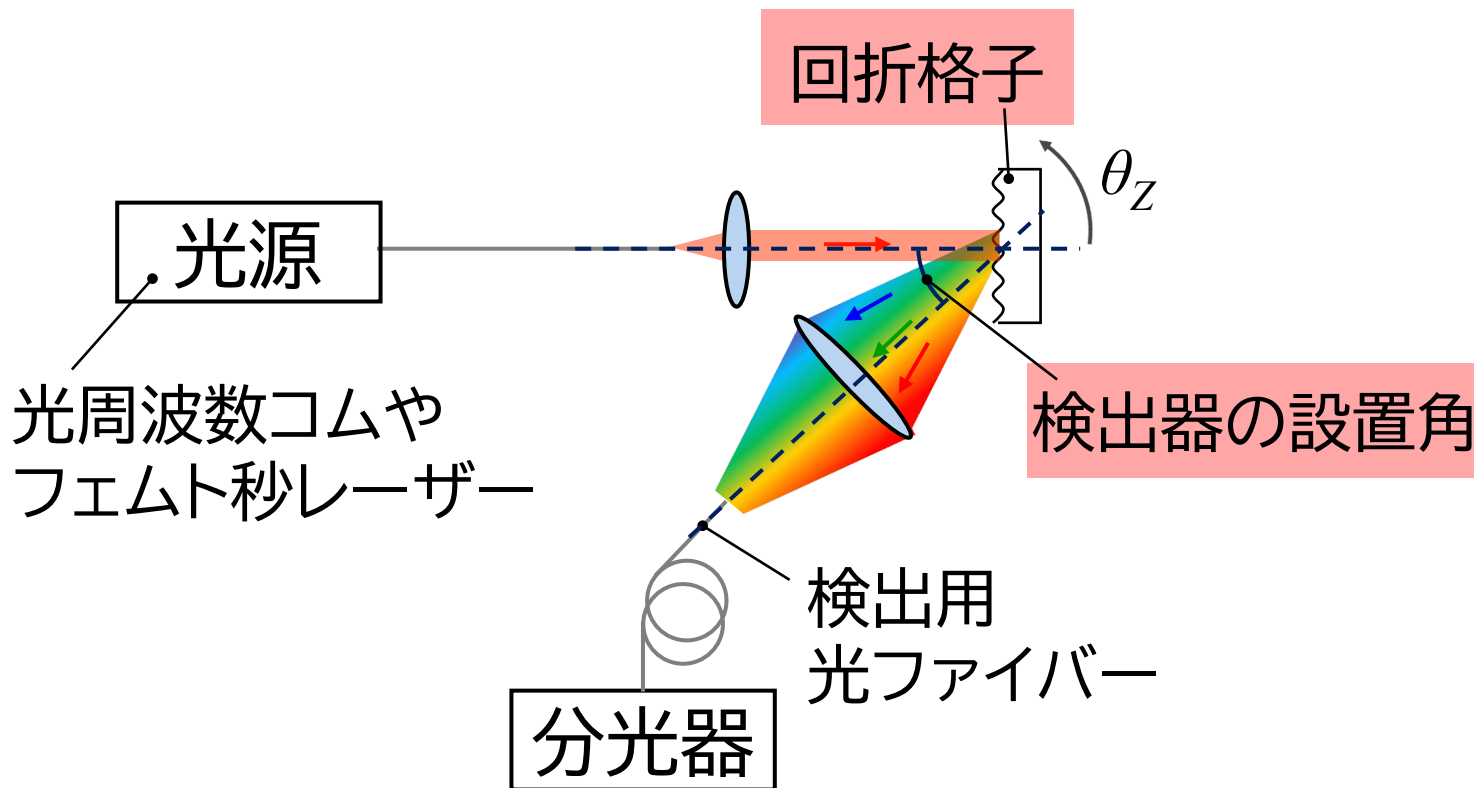
問題点

光周波数情報が常に校正されても  
結果的に別の基準やセンサが必要



# 新技術の概要

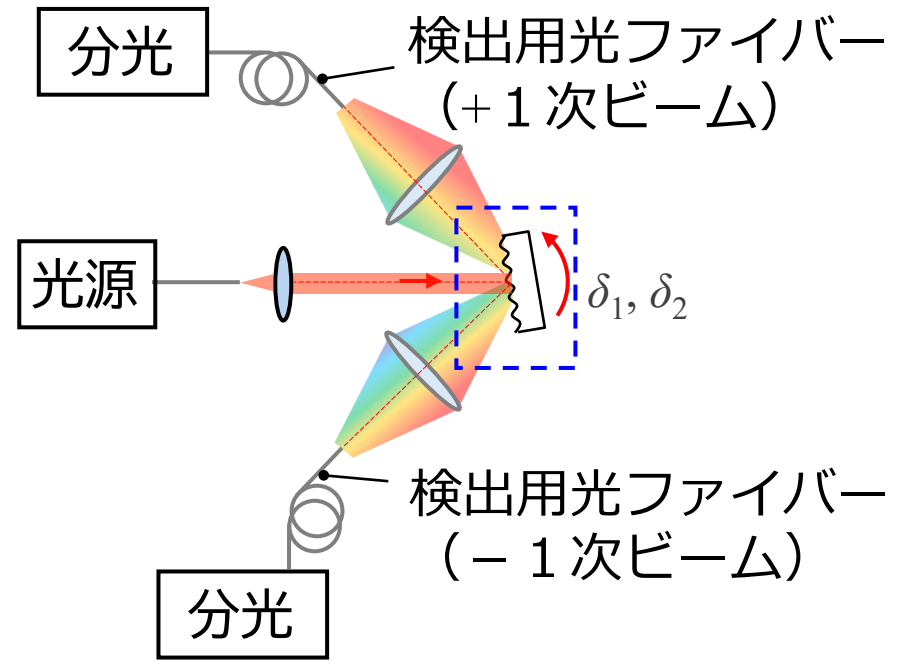
回折格子ピッチ・検出器の設置角を決定する技術



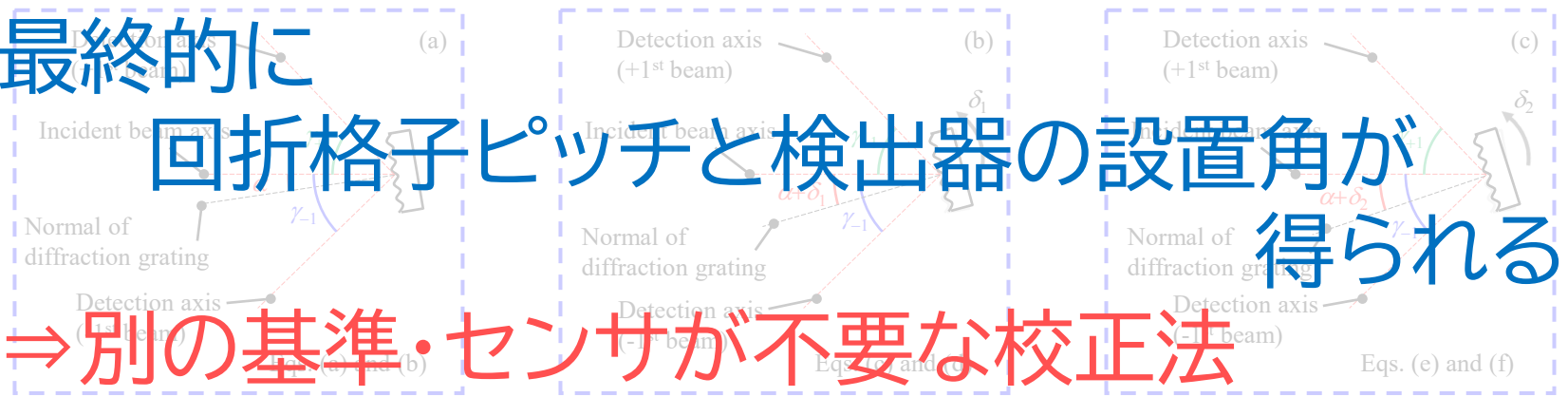
# 新技術の原理

## ポイント

- (1) 2本のビームから波長情報を取得
- (2) 回折格子を適当な量 ( $\delta_1, \delta_2$ ) 回転させる
- (3) 数理的に問題を解く



最終的に  
回折格子ピッチと検出器の設置角が  
得られる  
⇒別の基準・センサが不要な校正法

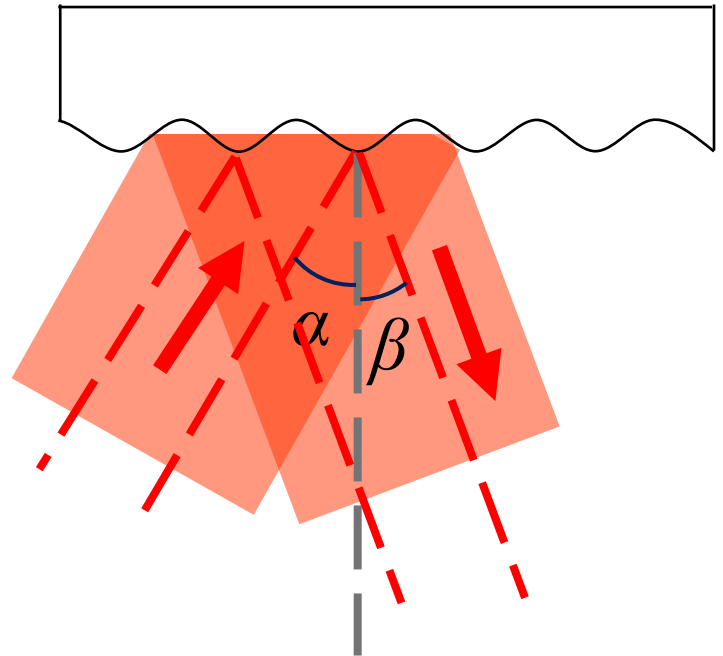


# 基本原理 | 回折格子への光入射と回折

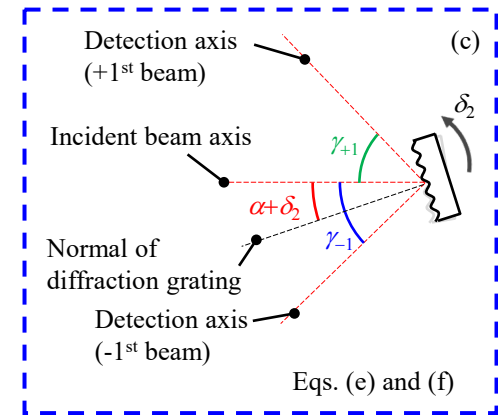
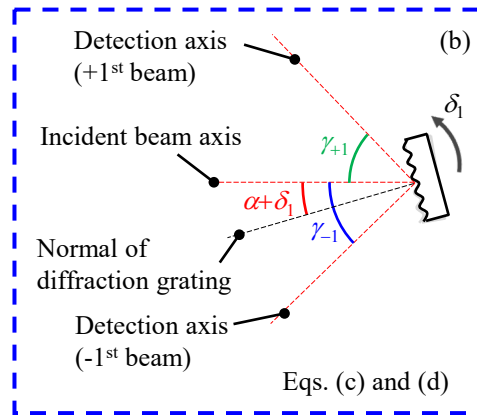
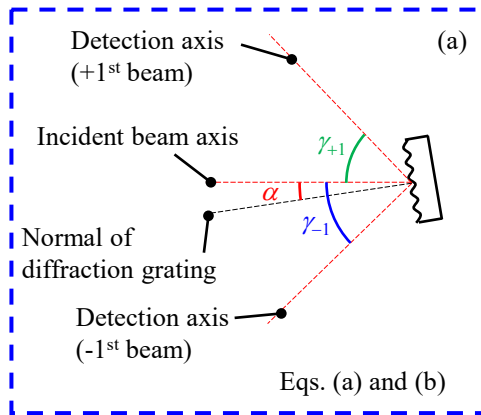
## 回折格子方程式

$$g(\sin \alpha - \sin \beta) = m\lambda$$

- $g$  : 回折格子ピッチ
- $\alpha$  : 入射角
- $\beta$  : 回折角
- $m$  : 整数
- $\lambda$  : 光の波長



# 新技術の原理 | 連立回折格子方程式



$$(a) \sin \alpha - \sin(\gamma_{-1} - \alpha) = -\frac{\lambda_{-1}}{g}$$

$$(b) \sin \alpha + \sin(\gamma_{+1} + \alpha) = \frac{\lambda_{+1}}{g}$$

$$(c) \sin(\alpha + \delta_1) - \sin(\gamma_{-1} - \alpha - \delta_1) = -\frac{\lambda_{-1}'}{g}$$

$$(d) \sin(\alpha + \delta_1) + \sin(\gamma_{+1} + \alpha + \delta_1) = \frac{\lambda_{+1}'}{g}$$

$$(e) \sin(\alpha + \delta_2) - \sin(\gamma_{-1} - \alpha - \delta_2) = -\frac{\lambda_{-1}''}{g}$$

$$(f) \sin(\alpha + \delta_2) + \sin(\gamma_{+1} + \alpha + \delta_2) = \frac{\lambda_{+1}''}{g}$$

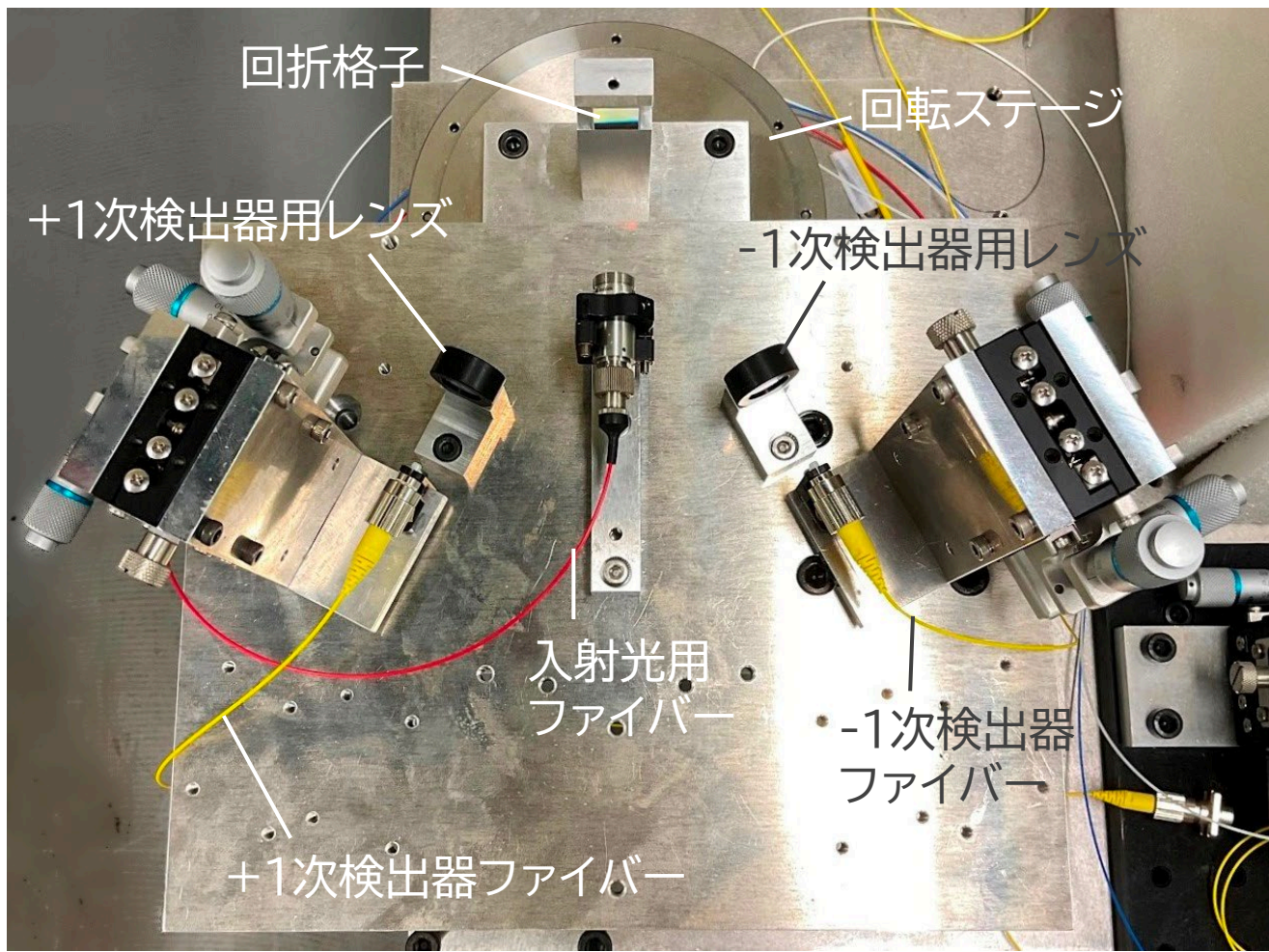
波長情報に実験値を入れるのみ

未知数  $\alpha, \delta_1, \delta_2, \gamma_{+1}, \gamma_{-1}, g$  が解かれる

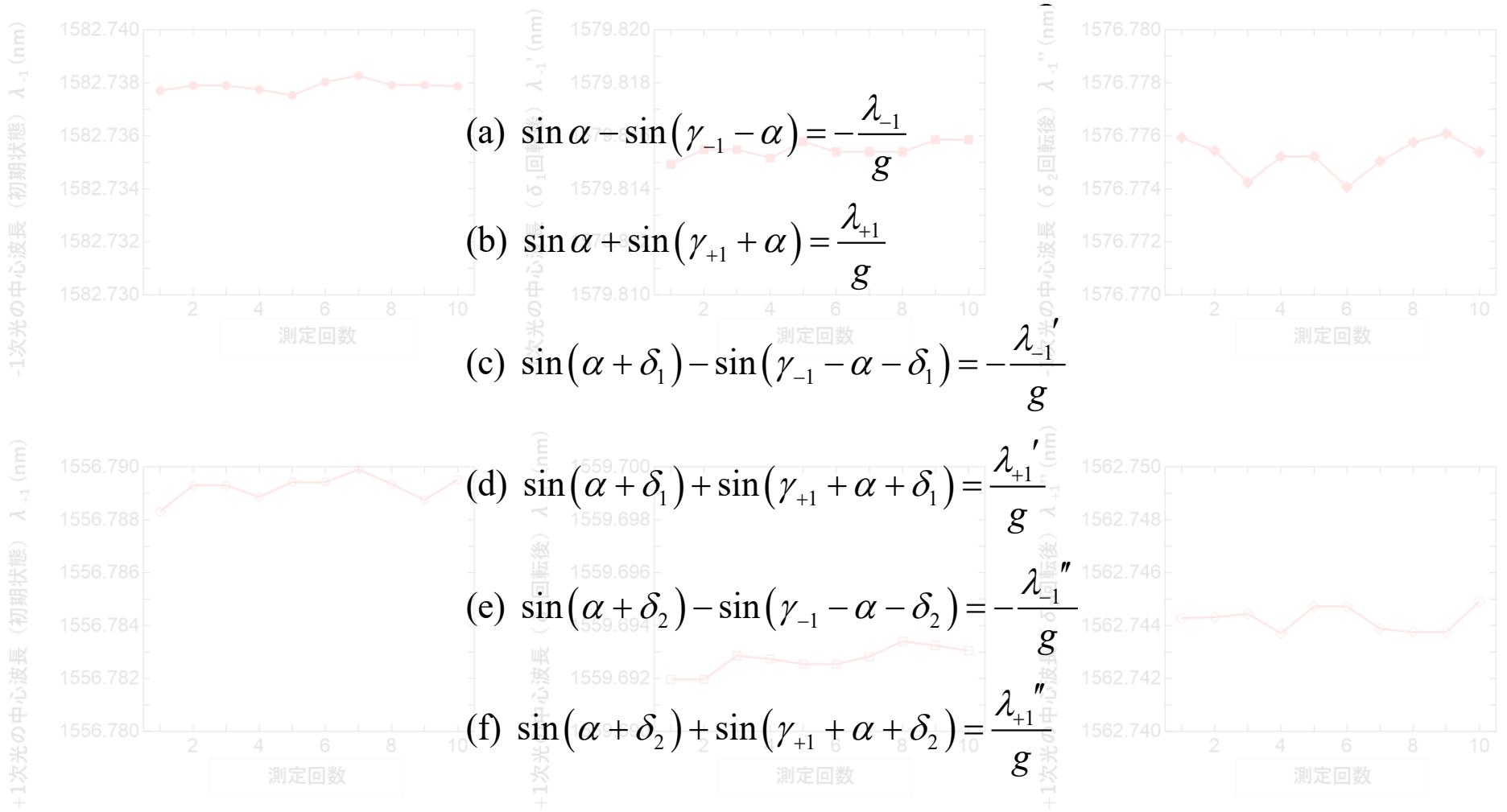
設置角

回折格子ピッチ

# 原理実証実験

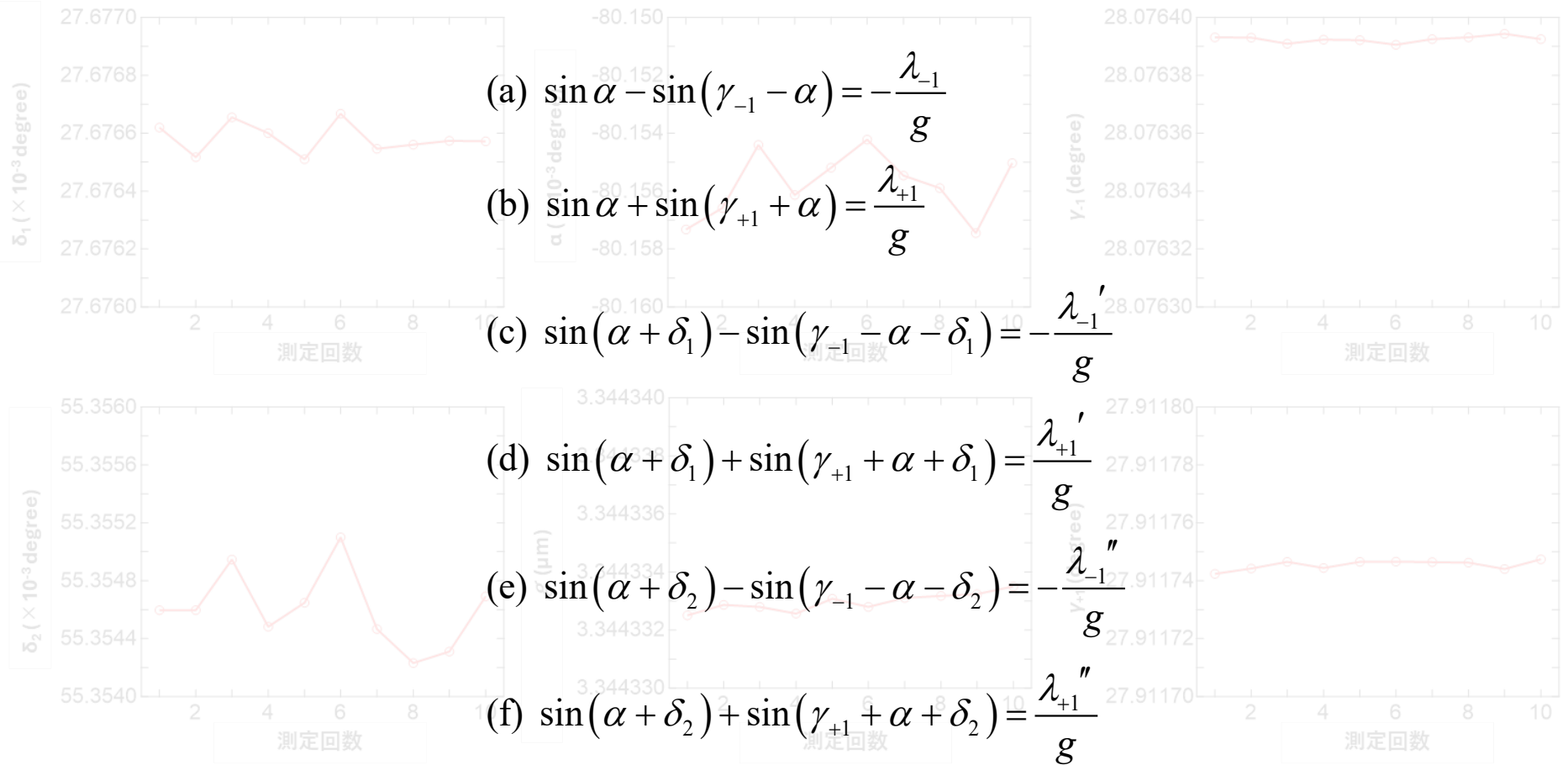


# 原理実証実験(入力パラメータ)



連立回折格子方程式に入力して方程式を数値的に解く

# 原理実証実験(解)



回折格子ピッチ $g$ と設置角 $\gamma_{+1}$ ,  $\gamma_{-1}$ は6桁の精度で決定

# 新技術の特徴・従来技術との比較

- 広帯域光源と回折格子を用いた回転運動測定に関して、従来技術では課題として残っていた**回折格子ピッチと測定器設置角度の校正に対して外部センサの必要のない校正に成功した。**
- 従来技術での回折格子のAFMなどでの校正において、校正環境と使用環境では温度など異なることで校正結果と実際の差異も問題となるが、**本技術の適用でその場校正が可能**となり、これらの課題が解決された。
- 本技術の適用により、オートコリメータなどの外部センサが不要になることによるコスト削減、回折格子のその場校正が可能となったことにより校正業者への依頼が不要になるなどコスト的メリットが期待される



# 本研究の活用 | 何ができるようになるか？



GPS内臓の原子時計  
正確な1秒間に1回の  
パルス(1 pps信号)

実験室内

アンテナ

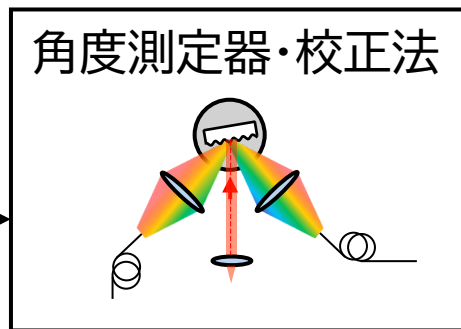
常に正しい光周波数を取得しつつ  
GPS信号さえ取得できる環境であれば、  
他にいかなる外部測定器・標準も必要なく  
実験室内で正しい角度が常に保証される

Rb周波数  
標準

RF信号  
発生器

光周波数  
コム1

光周波数  
コム2



検出器

周波数解析

# 想定される用途

- ロータリーエンコーダなどを組み込んだ高付加価値回転ステージの校正やリニアステージの運動誤差測定に適用可能
- リニアエンコーダ, 分光器などに用いる回折格子のその場ピッチ校正にも応用可能

# 企業への貢献・PRポイント

- 光周波数コムを用いた測定と相性が良いことから、校正のトレーサビリティ認定を行う企業などが本技術を利用できる可能性がある
- 本技術は、回転機械の校正、運動誤差補正などに用いることができ、回転・直線運動ステージの高正確化に寄与する
- 回折格子の校正により、リニアエンコーダや分光器の校正などにも寄与できる
- 回折格子ピッチをうまく選べば工作機械メーカーなどでの真直な(またはある基準角度の)基準の製作に寄与できる

# 実用化に向けた課題

- 方程式に入力するパラメータである波長測定精度がさらに桁レベルで向上すれば、出力である回折格子ピッチや測定器設置角などの決定精度が向上する。
- 今後、光周波数コムを用いた測定手法をさらに向上させ精度を高めていく予定である。

# 企業への期待

- 波長測定精度の向上には光周波数コムの高速・高安定化技術が必要であり, これらの技術を持つ企業等との共同研究を希望.
- トレーサビリティ認定に本技術を適用可否について検討できる企業等とも共同研究を希望.
- ステッピングモータ・回転ステージなどを開発・製造している企業には, 本技術での校正が有効と考えられる.

# その他の技術について

概要:デュアルコム分光を用いた精密測定用光演算器

- 本技術とも相性が良いと考えられる, 従来の測定を超高精度化するための方法を考案.
- レーザースペクトル解析手法におけるスペクトル, 位相, 偏光などを演算し, 高精度化する技術.
- まだ原理実証には至っていないが, 例えばリニアエンコーダなどを桁レベルで向上するためのアイデアであり, 実用化に興味のある企業との共同研究を希望.

# 本技術に関する知的財産権

- 発明の名称：光学式角度測定装置用校正装置、  
光学式角度測定装置向け校正方法
  - 出願番号：PCT/JP2024/ 16268
  - 出願人：東北大学
  - 発明者：松隈 啓，井口颯太，高 偉
- 
- 発明の名称：精密測定装置、精密測定方法
  - 出願番号：特願2024-082123
  - 出願人：東北大学
  - 発明者：松隈 啓

# お問い合わせ先

東北大学

産学連携機構 ワンストップ窓口

問い合わせフォーム

<https://www.rpip.tohoku.ac.jp/jp/aboutus/form>

TEL 022-795-5275