



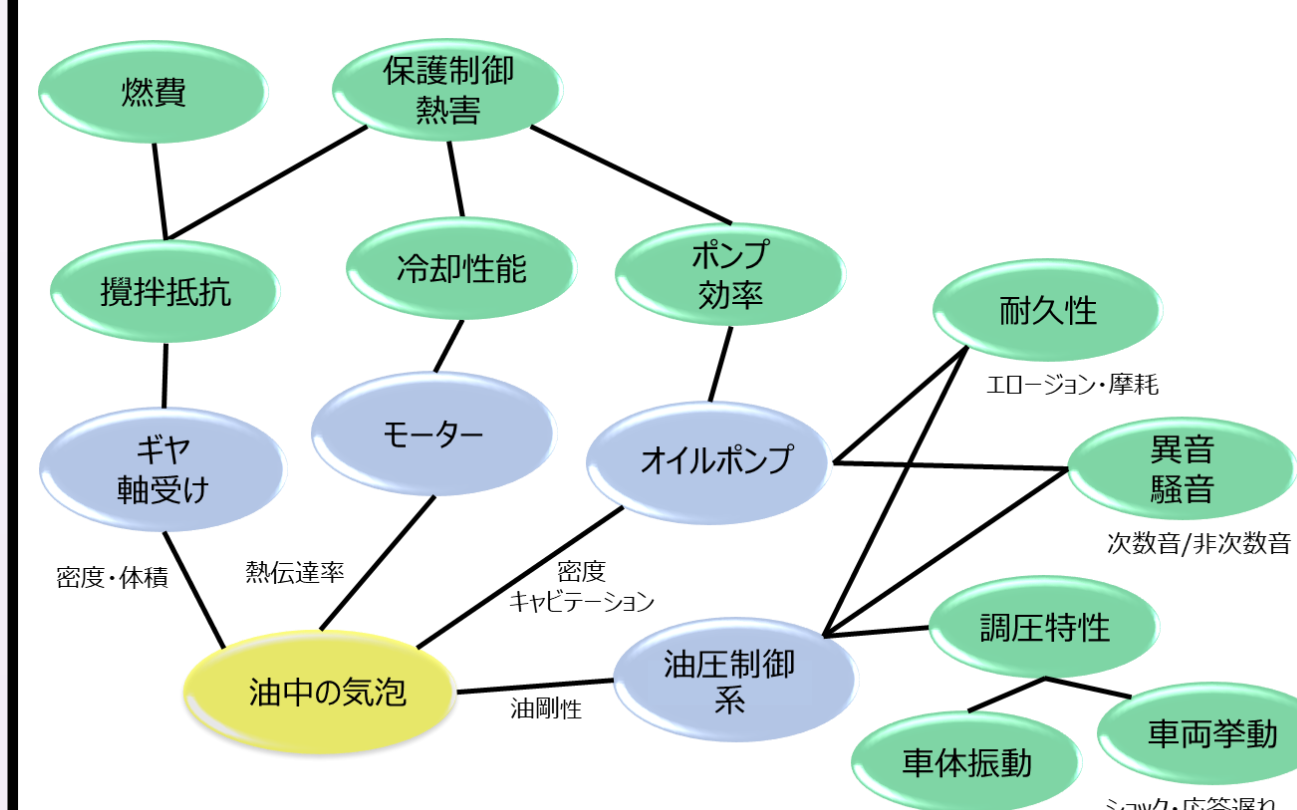
[P11] テラヘルツ波を用いた潤滑油の気泡含有率の非接触測定

Non-contact measurement of volumetric contents of air bubbles in lubricating oil by using terahertz wave

○前田航汰¹, 菜嶋茂喜^{1,2} 阪市大院工¹, 阪公大院工^{1,2}

Introduction

潤滑油中の気泡



油中の気泡はトランスミッションの様々な機能に影響を与えている

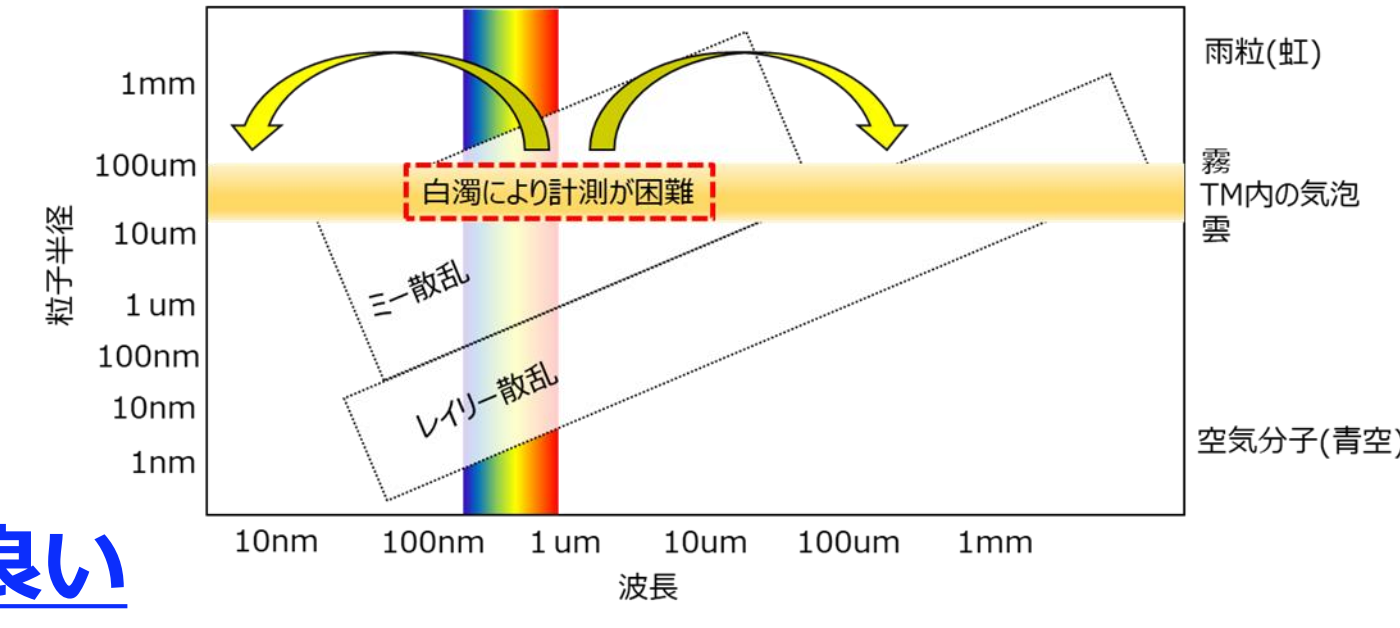
→油中の気泡とトランスミッションの機能を定量的に診断する必要がある

現状の診断方法と課題

- 音による手法 → 時間分解能が足りない
- 光学的手法 → ミー散乱の影響
- X線領域を用いた手法 → 安全性や取扱の制限

潤滑油中の気泡測定にTHz波の使用で解決

- 利点**
- 高い透過特性
 - 低散乱
 - 安全



気泡を含む潤滑油とTHz波の相性が良い

Proposed methods

THz波を用いた潤滑油中の気泡含有率測定

気泡含有率の変化により、潤滑油の実効屈折率が変化

→透過THz波に時間差が発生

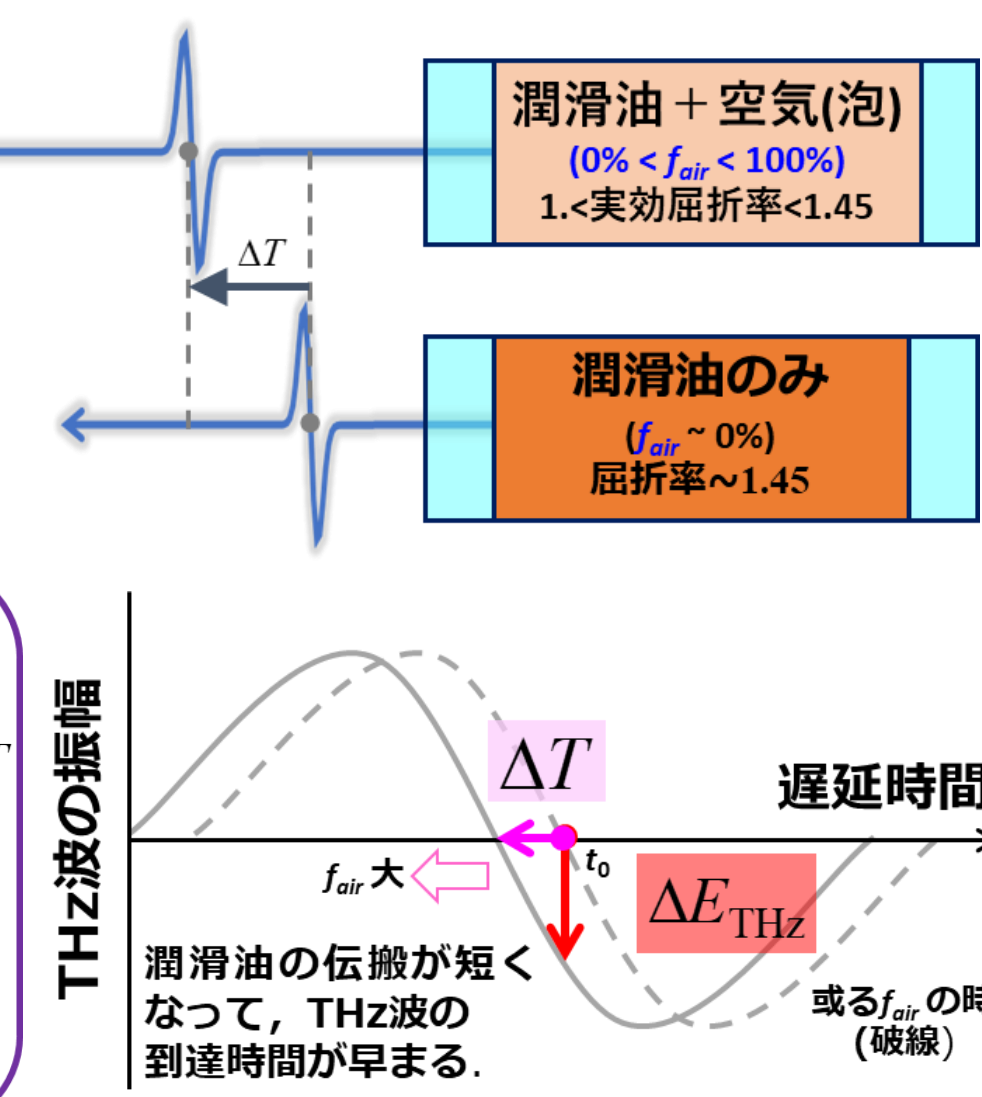
THz波信号と実効屈折率の関係

$$E_{THz}(t) = E_0 \sin(\omega_{THz}(t - t_0))$$

$$\Delta E_{THz} = \frac{d}{dt} E_{THz}(t) \times \Delta T = -E_0 \omega_{THz} \Delta T \propto \Delta T$$

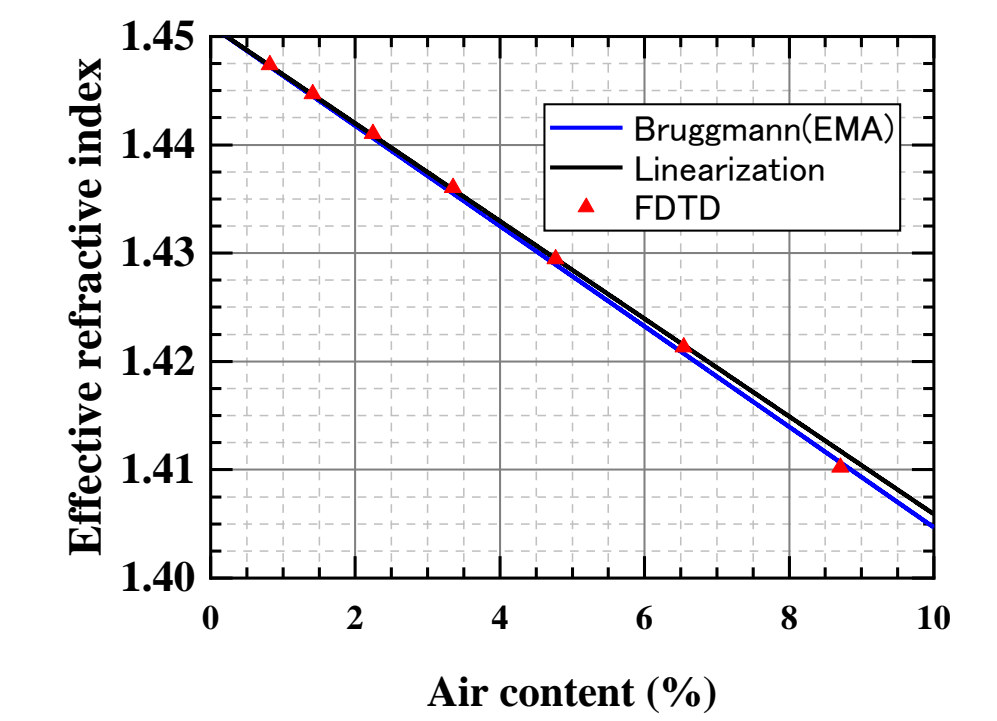
$$\Delta T = \frac{d_{cell}}{c_0} \frac{\partial}{\partial n_{EMF}} n_{EMF}(f_{air}) \propto \Delta n_{EMF}$$

$$\Delta E_{THz} \propto \Delta T \propto \Delta n_{EMF}$$



潤滑油と気泡の実効屈折率

気泡サイズが波長以下なので、有効媒質として振る舞うと予想 → FDTD電磁界計算で確認



潤滑油と気泡による実効屈折率は有効媒質理論(EMA)に従う
低気泡含有率ではほぼ直線

【実験目的】
THz波を用いた潤滑油中の気泡含有率測定の原理実証と実時間測定技術の開発

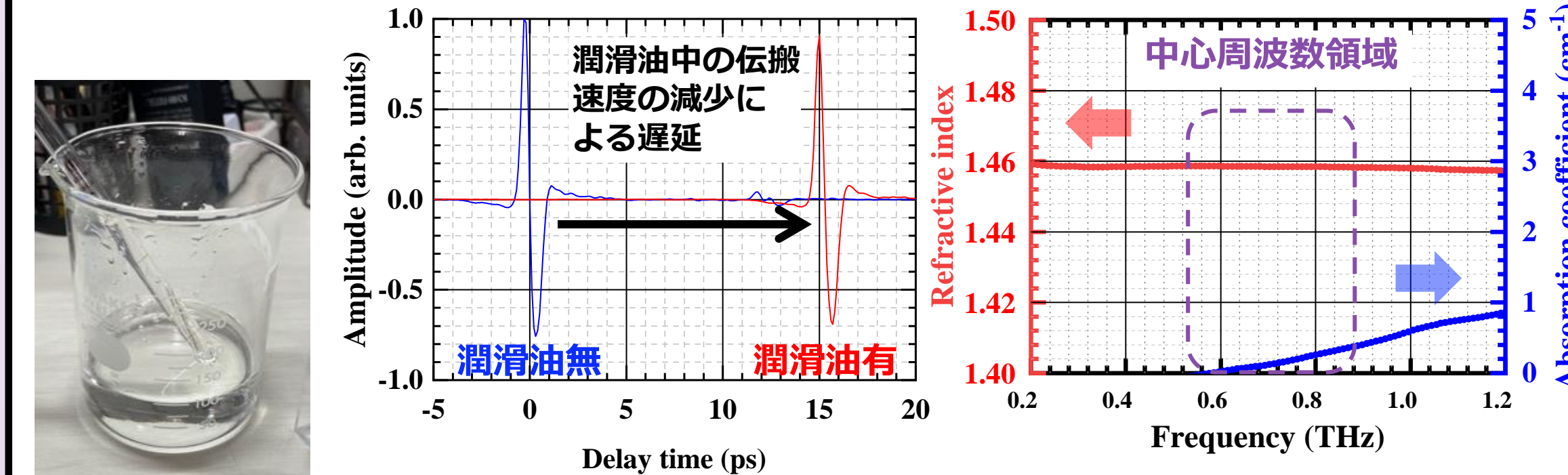
THz波信号から、潤滑油の情報(実効屈折率, 気泡含有率)が得られる

Experimental Results

気泡混入させた潤滑油の透過測定

使用した潤滑油

THz-TDSにより潤滑油の基礎情報を調査



ENEOS社製 Gp.III基油

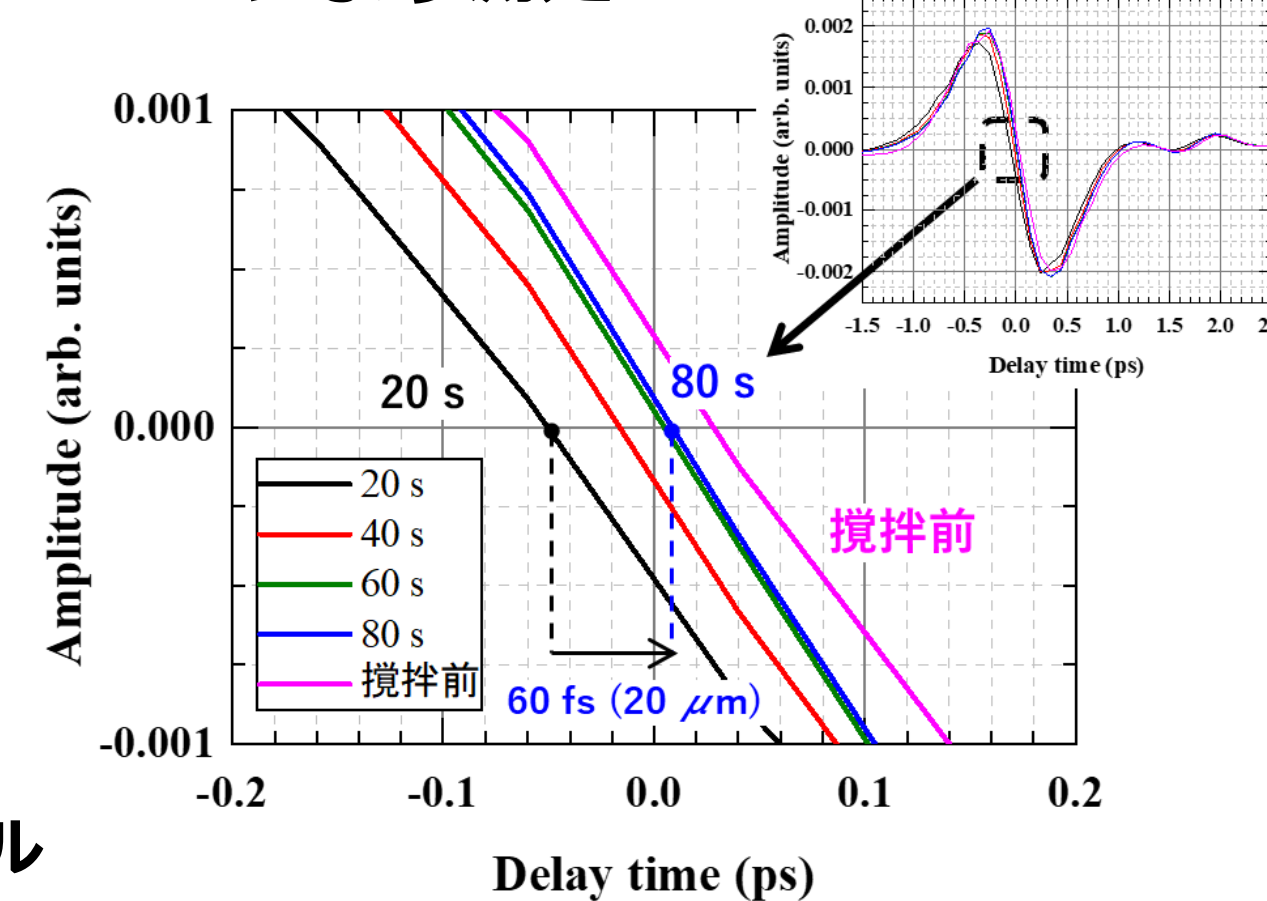
- オイル透過後で波形に大きな変化なし → 屈折率 n_{oil} は一定
- $n_{oil} = 1.459$ (0.7 THz, 20°C)
- 吸収は小さくほぼ透明 ($\alpha < 1 \text{ cm}^{-1}$)

気泡混入させた潤滑油測定

手でセルを振り、気泡を混入、時間経過で気泡が減少 → その様子をTHz-TDSにより測定



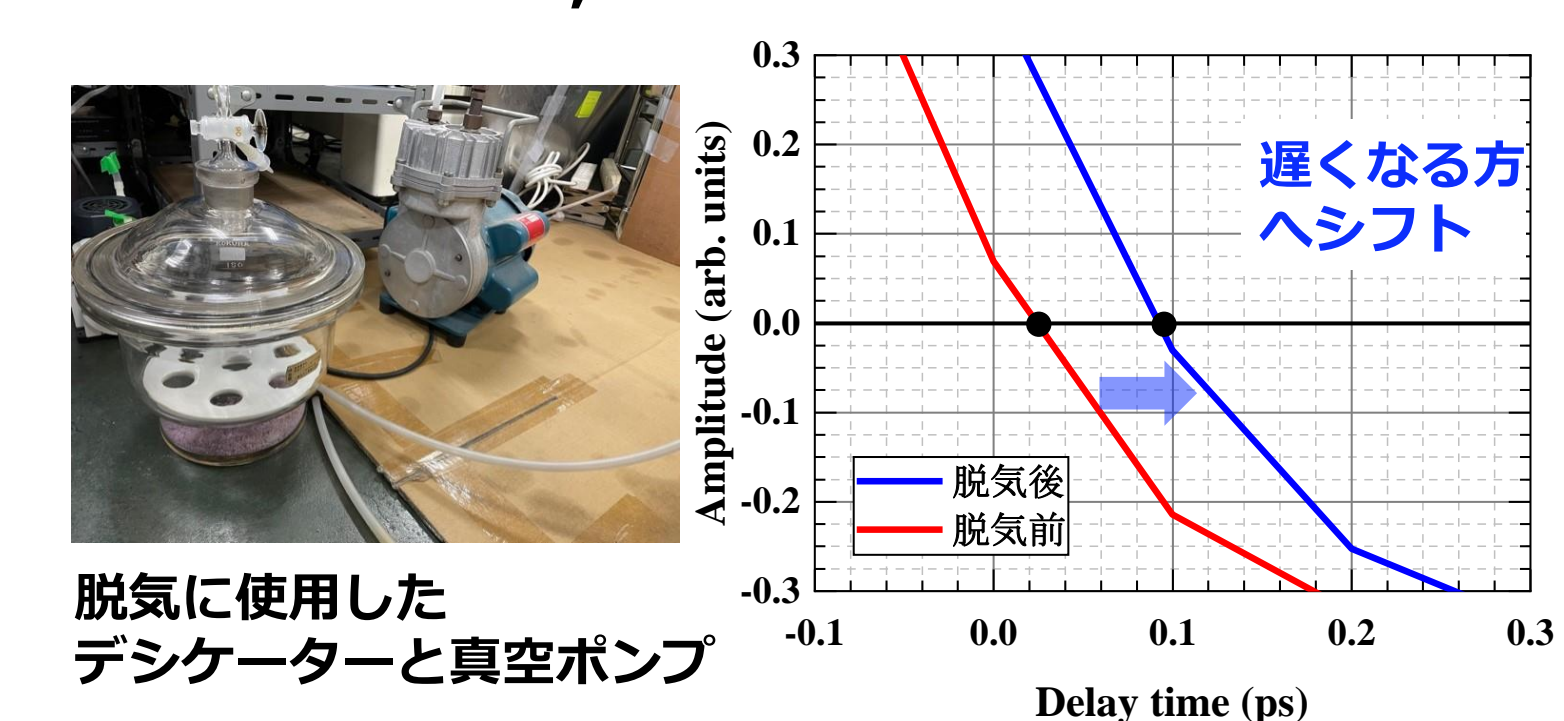
測定に使用したセル



- 気泡を含む潤滑油を透過したTHz波の時間シフトを確認
- 時間経過毎に減少する気泡含有率を時間シフトが反映(約1%の変化)

脱気前後の潤滑油測定

潤滑油を脱気し、脱気前後をTHz-TDSで測定



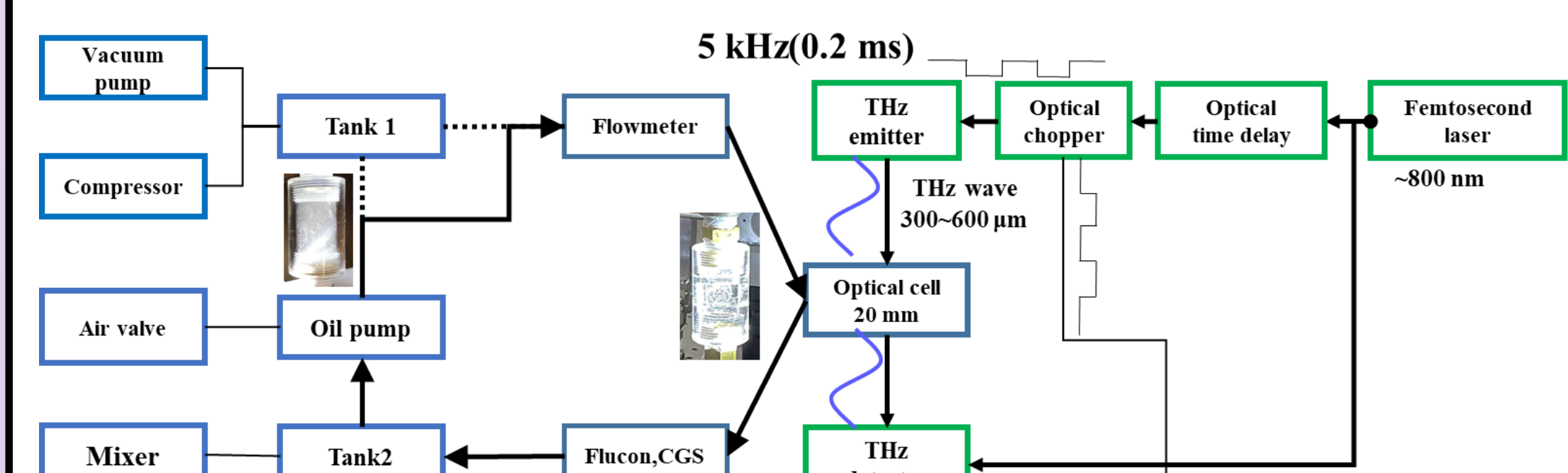
脱気に使用したデシケーターと真空ポンプ

- 脱気によりTHz波が右にシフト(遅くなる)
- 時間差: 約100 fs → 気泡含有率: 約0.15%
- 脱気前後での気泡含有率の変化を検出

気泡含有率の変動に応じたTHz波の時間シフトを検出

気泡を含む潤滑油の実時間測定システム

潤滑油の流路系と測定系の2つのシステムで構成

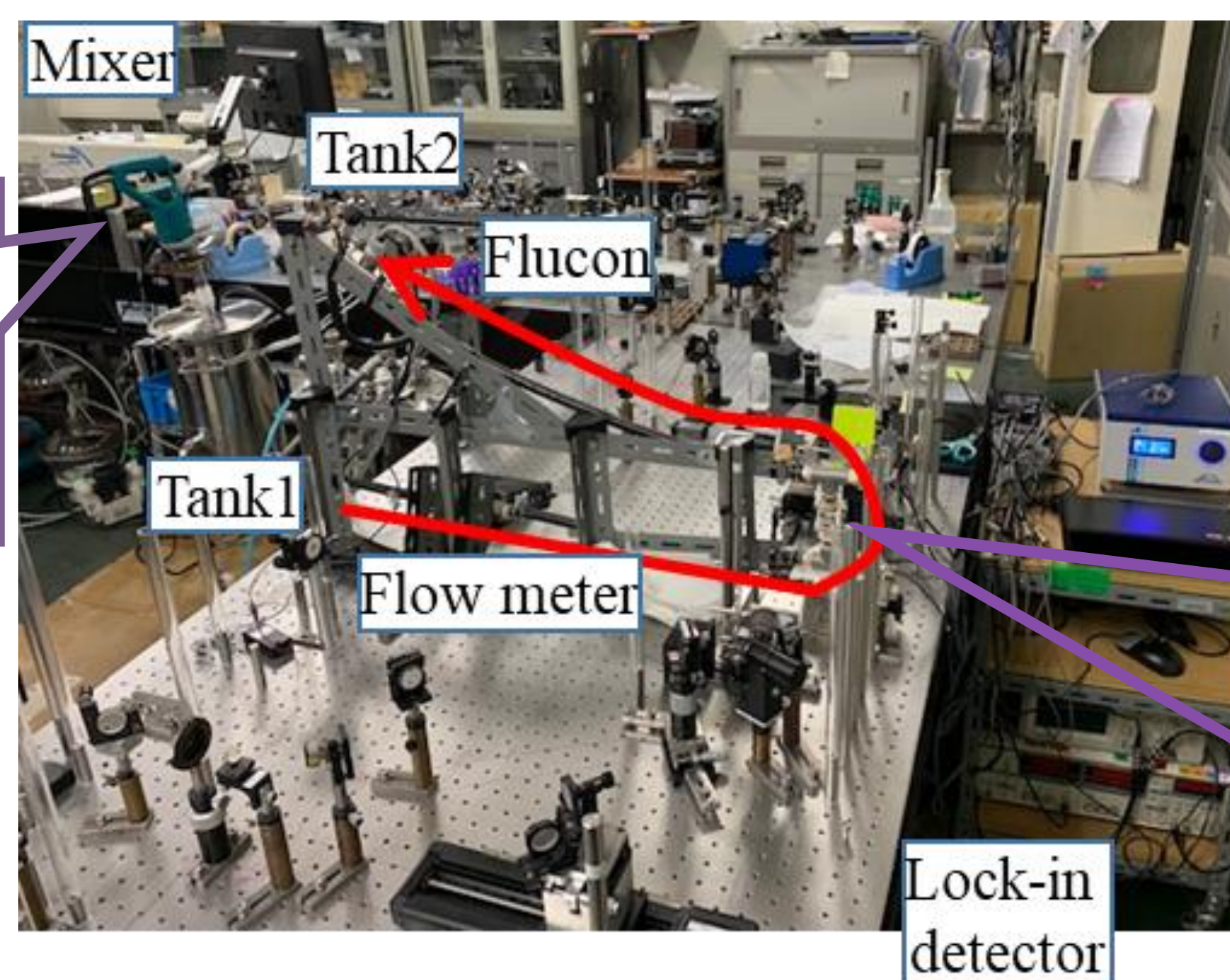


気泡発生方法

- 電動ミキサーで、タンク内の潤滑油を攪拌、気泡を含ませる
- 攪拌強度を調整すると、気泡含有率も変化

測定系

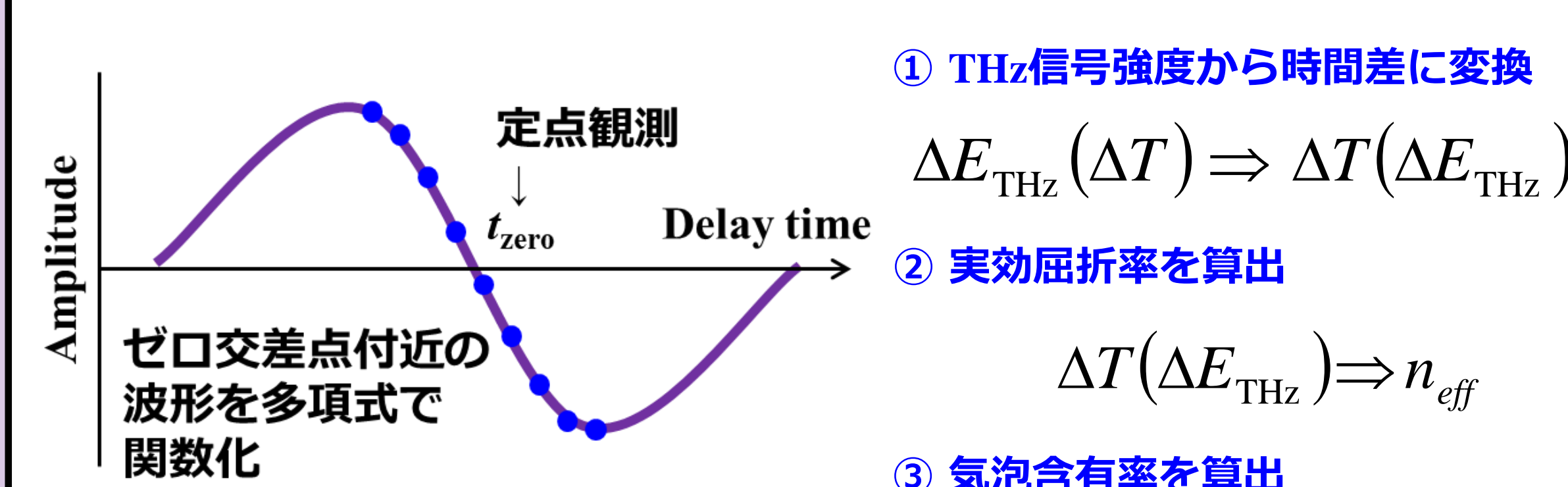
- THz波計測の応答速度は3 ms
- THz波信号, 油圧, 流量, 気泡含有率の同時集録が可能



- 流路系**
- 2つのタンクとオイルポンプで循環
 - ゴムホースを伝い、流量計 → 圧力センサ → THz波測定用セル → 気泡含有率測定器 (Flucon) で流れる
- ← Response speed : 3 ms

THz波による潤滑油中の気泡含有率の実時間測定

THz位相差検出測定法(THz-phase difference measurement)



① THz信号強度から時間差に変換

$$\Delta E_{THz}(\Delta T) \Rightarrow \Delta T(\Delta E_{THz})$$

② 実効屈折率を算出

$$\Delta T(\Delta E_{THz}) \Rightarrow n_{eff}$$

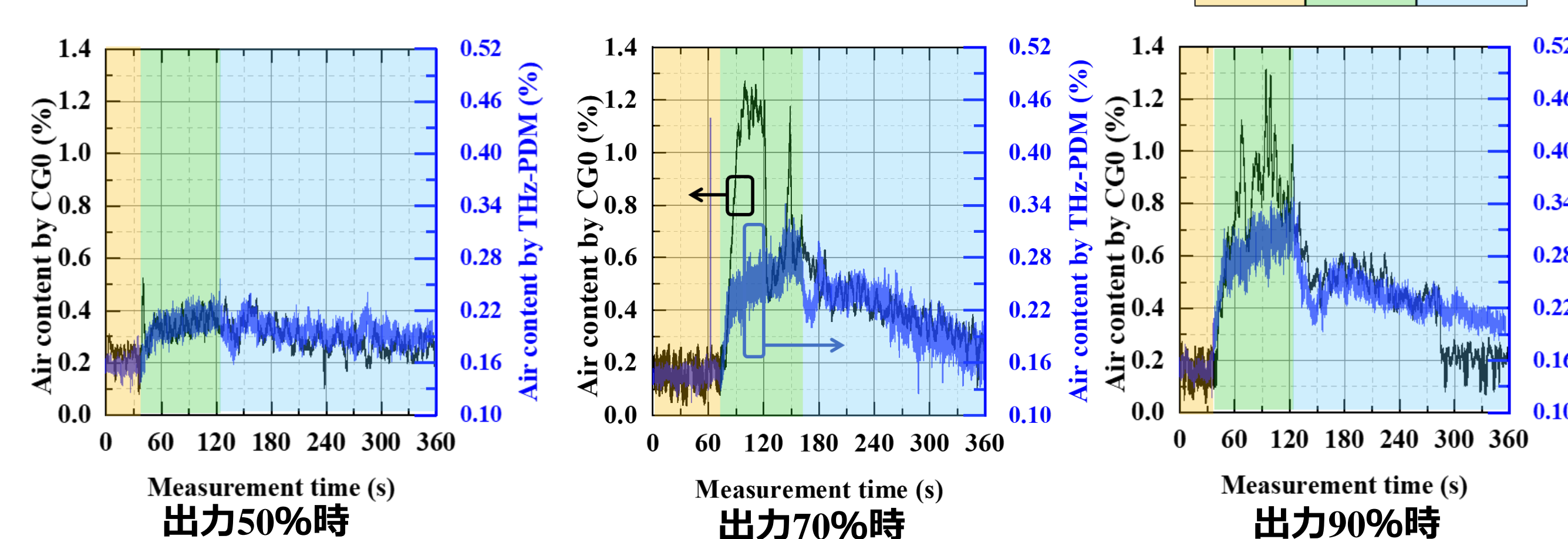
③ 気泡含有率を算出

$$n_{eff} \Rightarrow f_{air}$$

実効屈折率 n_{eff} と空気含有率 f_{air}
「空気」 ~ 「オイル」
 $n = 1$ $n_{oil} \approx 1.459$
の間を直線近似

気泡含有率測定器(Flucon)とTHz波による結果を比較

攪拌強度や操作を切り替えて測定



- 両測定による気泡含有率の変動は同調
- 攪拌強度や状態に応じた変動を反映

実時間でTHz波による測定が、潤滑油中の気泡含有率の変化を捉えることができる

±1%オーダーで、差が見られる

両測定の差は、配置状況による空気溜まりなどの測定環境の差が影響

Conclusion

THz波の位相検出技術を用いた潤滑油中の気泡含有率の非接触測定の原理の実証と実時間測定を行った

- 潤滑油中の1%未満の気泡含有率の変動や脱気前後の影響をTHz波透過波形の時間シフトとして検出できることを実証
- THz波を用いた潤滑油中の気泡含有率の実時間計測系を試作し、時間分解能: 3 msで気泡含有率の定量的な測定を達成

謝辞

本研究は、2021年度の自動車動力伝達技術組合 (TRAMI) の委託研究により実施したものである。