

溶液の化学組成を非接触で リアルタイムイメージング

量子科学技術研究開発機構

関西光量子科学研究所 量子応用光学研究部

上席研究員 坪内 雅明

2023年6月20日

本技術内容の概要

1. レーザー光による光音響波(超音波)の発生
2. 発生した光音響波による溶液の化学組成分析

【特徴】

- 卓上小型装置による光音響波発生
- 溶液や溶液内サンプルに対して非接触、非破壊な手法
→ 化学組成等の空間的な分布(イメージ)のリアルタイム測定

原理解説1：超音響波と化学組成

超音響波（超音波の一種）

【特性】

- 波長 短波長 → より細かいものが「見える」
（高解像度）
- 速度（音速） 物質（濃度、組成）、温度、圧力に依存
→ これら物理量の「センサー」

液体

20℃	m/s
水	1483
メタノール	1121
エタノール	1162
アセトン	1203

固体

室温	m/s
熔融石英	5968
パイレックス	5640
ナイロン	2620
ポリエチレン	1950
ポリスチレン	2350

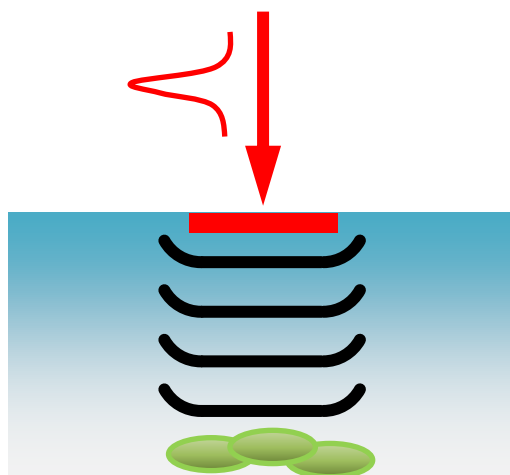
温度依存

水	m/s
10℃	1448
20℃	1483
25℃	1497
30℃	1509

CRS Handbook of Chemistry and Physics より

超音波は分析とそのイメージングに利用できる

原理解説2: 光音響波の発生



強いパルスレーザー光の照射(水面へ)



光が水の表面で吸収されエネルギーが
瞬間的に・局所的に蓄積



熱弾性効果により**光音響波**が発生し水中に伝播
速度:音速、圧力:1 Mpa程度

光音響波の利点:光が到達できない物質中を伝わる

- ✓ 物質内部の物性(温度、組成等)の観察
- ✓ 水中に存在するサンプル、物質内部の欠陥の非破壊観測

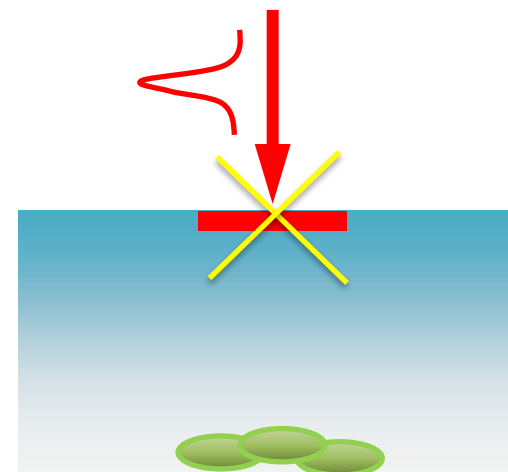
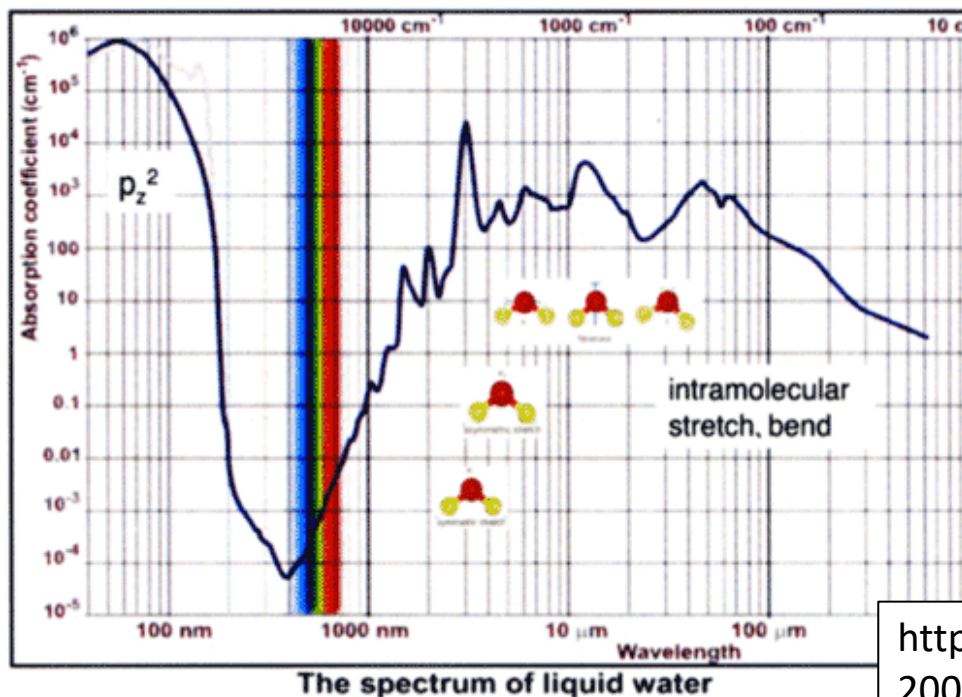
本技術内容の概要

1. レーザー光による光音響波(超音波)の発生
2. 発生した光音響波による溶液の化学組成分析

従来技術の問題点1: 可視光利用の場合

✓ 可視光は水に吸収されない(透明)

水の吸収スペクトル



光音響波が発生しない!

<https://nippon.zaidan.info/seikabutsu/2003/00213/contents/0006.htm>

従来技術の問題点1: 可視光利用の場合

佐藤・小原: 光学 36, 288 (2009)

解決策: 可視光を吸収する色素 or 黑色ゴムを仕込む

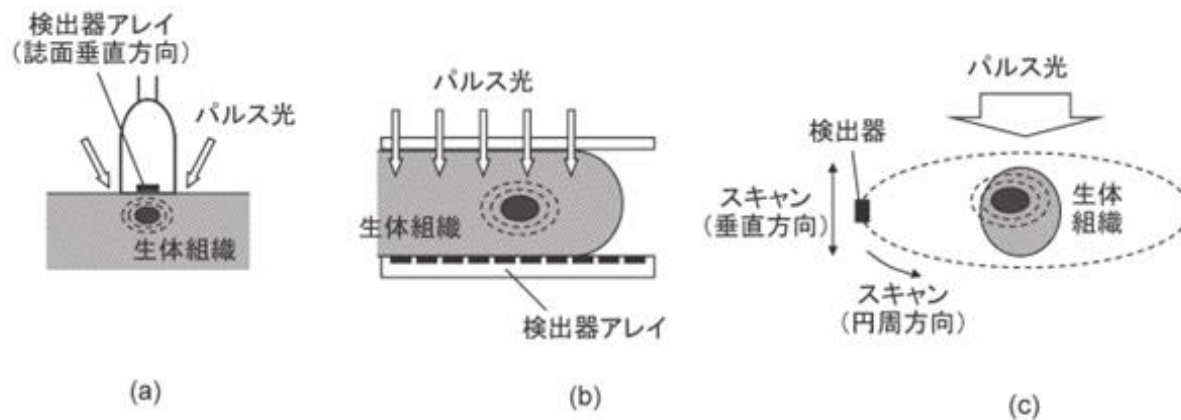


図4 光音響断層イメージング (PAT) の検出器と光照射の構成例。

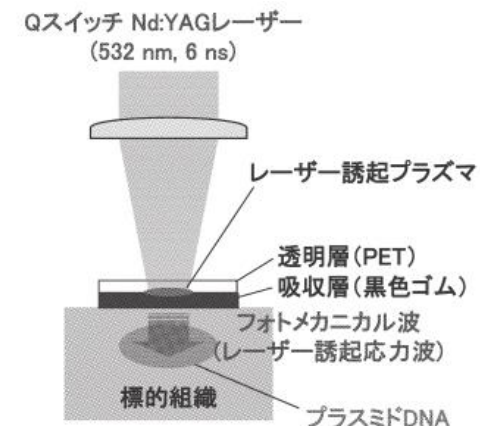
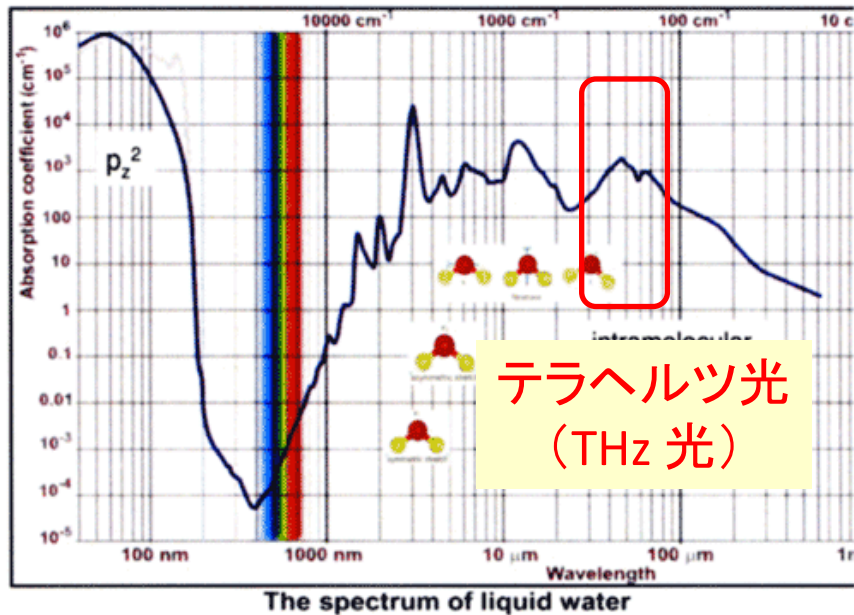


図8 フォトメカニカル波による遺伝子デリバリーの概念図。

問題点: 毒性、低い変換効率(レーザー集光による組織破壊)

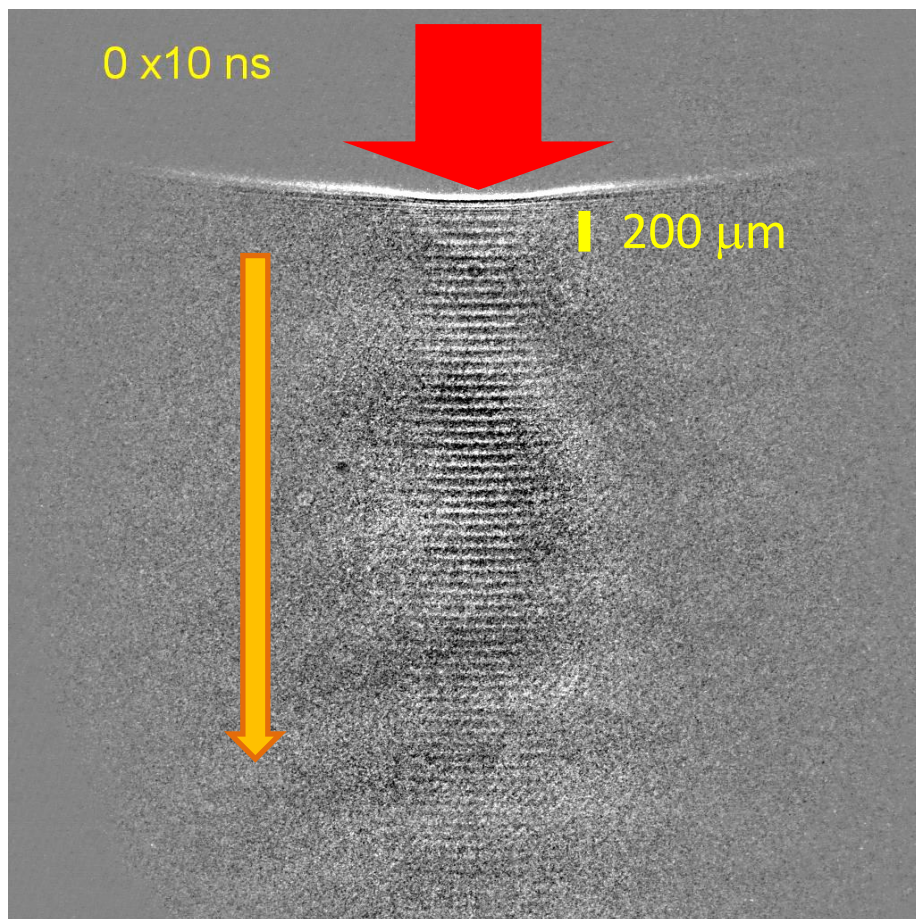
従来技術：テラヘルツ光利用の場合



周波数 4 THz 以上 (波長 75 μm 以下)

- ✓ **水への強い吸収** : 0.1 mm で吸収率 99.97%
 - 光吸収体を必要としない
- ✓ **低い光子エネルギー** : 可視光の1/100 以下
 - 分子や組織の損傷がない安全な光

従来技術の問題点: THz 光利用の場合

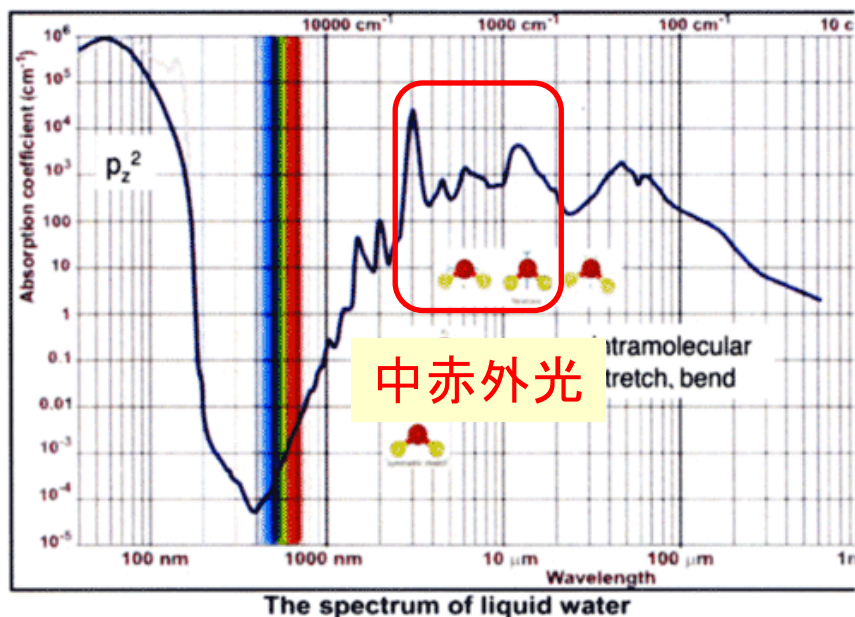


阪大産研



- ✓ 光音響波の高効率発生
- ✓ 装置が施設 → 実用化の壁

新技術：中赤外パルス光源の利用



波長 3 μm 以上の中赤外光

- ✓ 近年コンパクト化 → 実用化可能
- ✓ 光子エネルギー小
→ 非破壊非侵襲

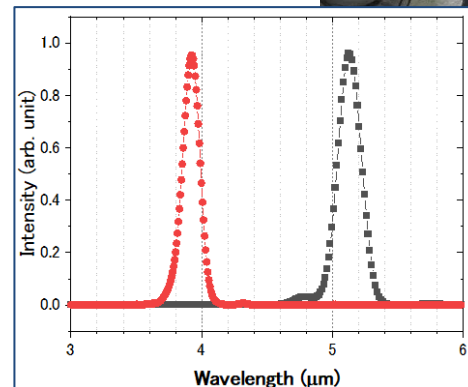
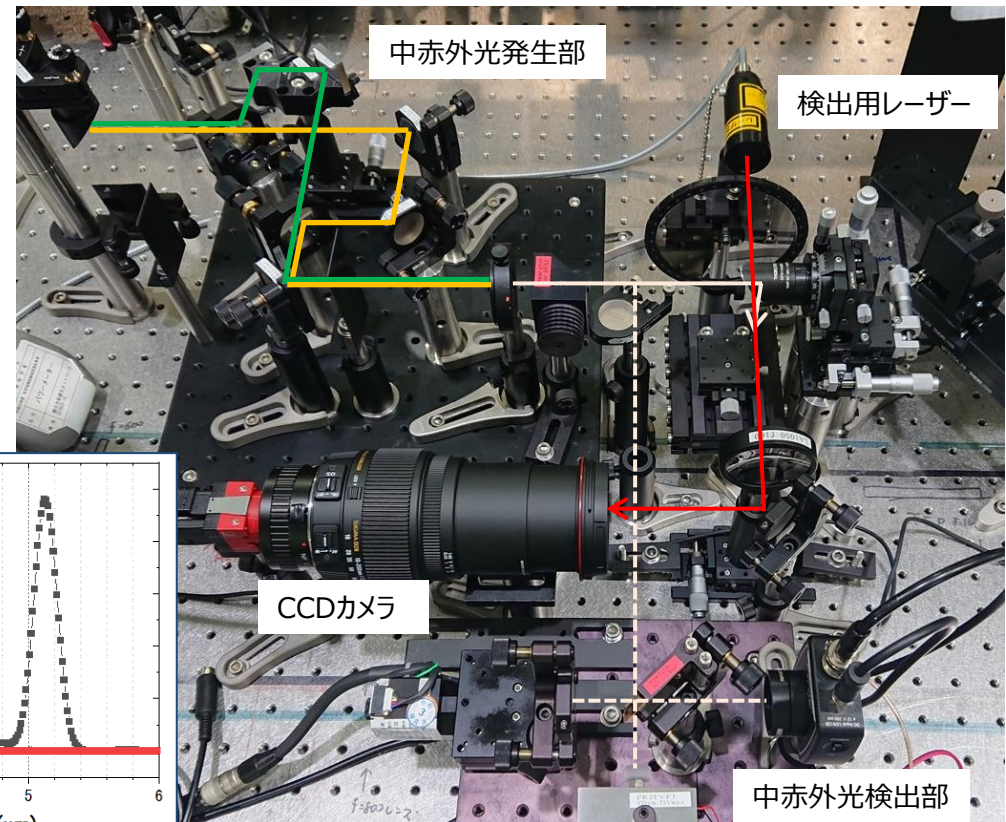
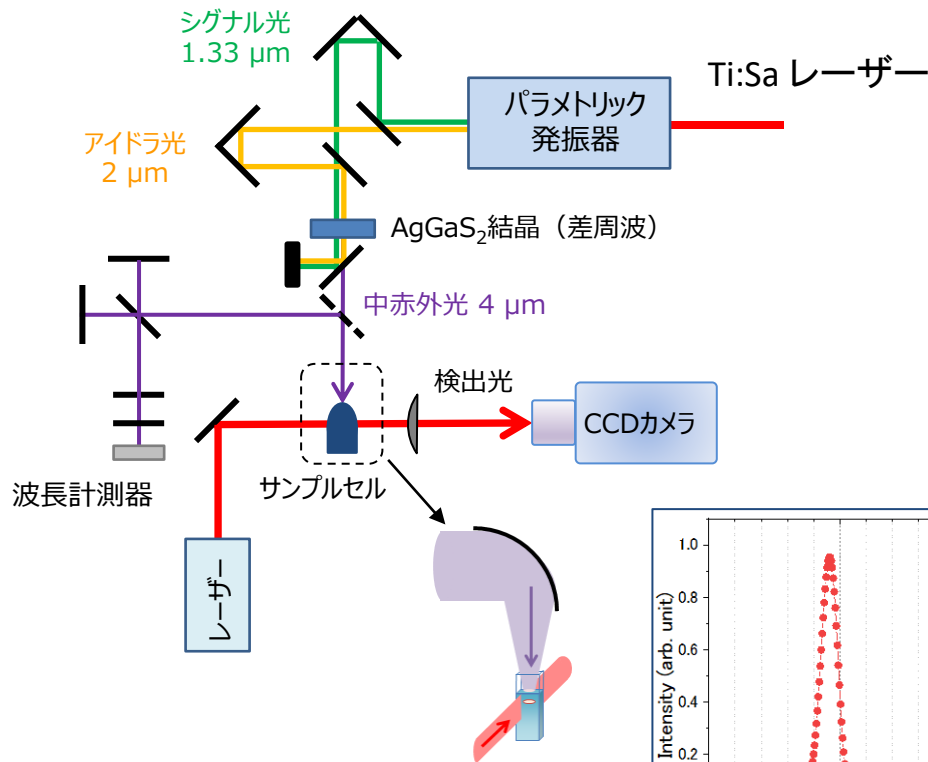
光源に対する要件

- 波長 3 μm より長波長
- パルス幅 5 ns (ナノ秒 = 10^{-9} 秒) 以下
- 繰り返しは速い(データ取得効率)

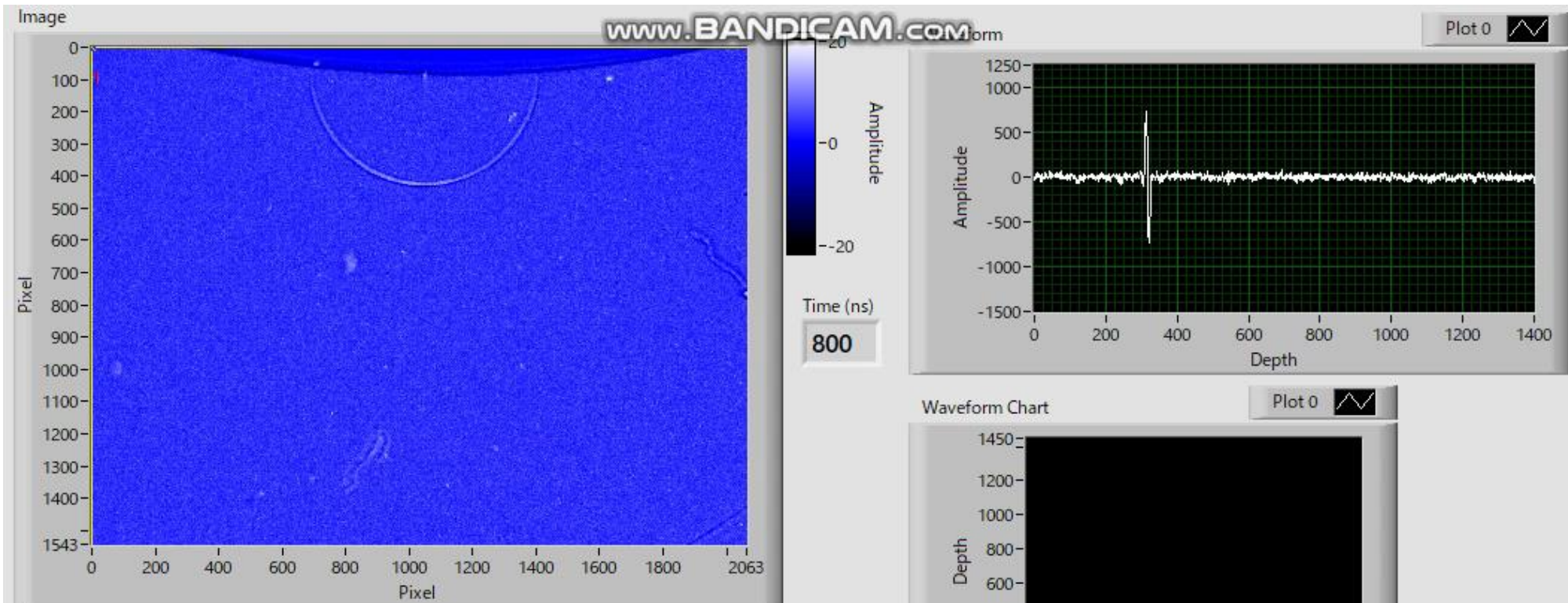
新技術：中赤外パルス光源の利用

QST 関西研チタンサファイアレーザーシステムの利用

波長: 3.5 ~ 7 μm 、パルス幅 100 fs
パルスエネルギー 15 μJ



中赤外パルス光源による光音響波発生



- 水深 **5 mm** 以上までの伝播を観測
- 音響波の波長は **33 μm** 程度（イメージの空間分解能に反映）

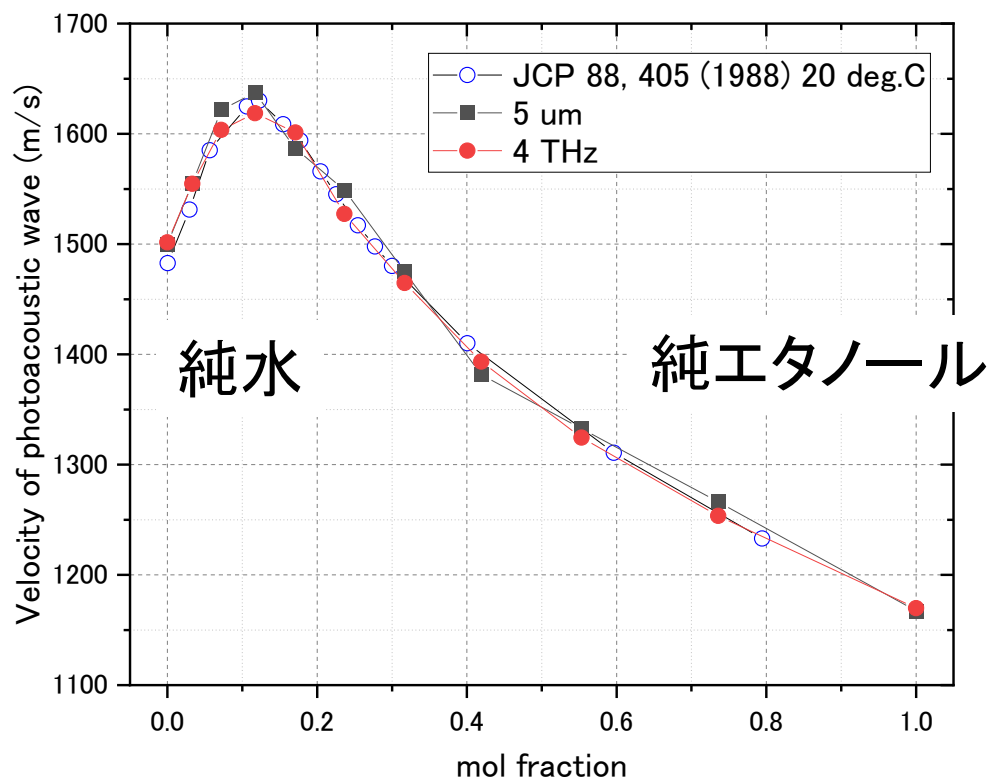
本技術内容の概要

1. レーザー光による光音響波(超音波)の発生
2. 発生した光音響波による溶液の化学組成分析

実用例：水・エタノール混合溶液の組成分析

✓ 音速が混合比(組成比)に強く依存する → 高感度定量分析

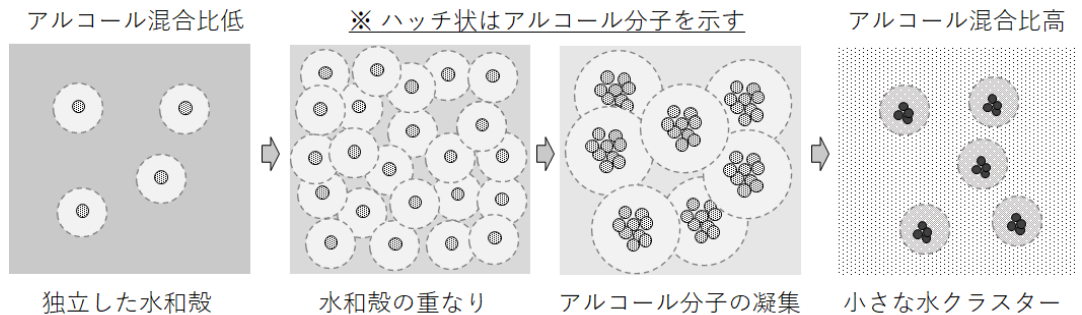
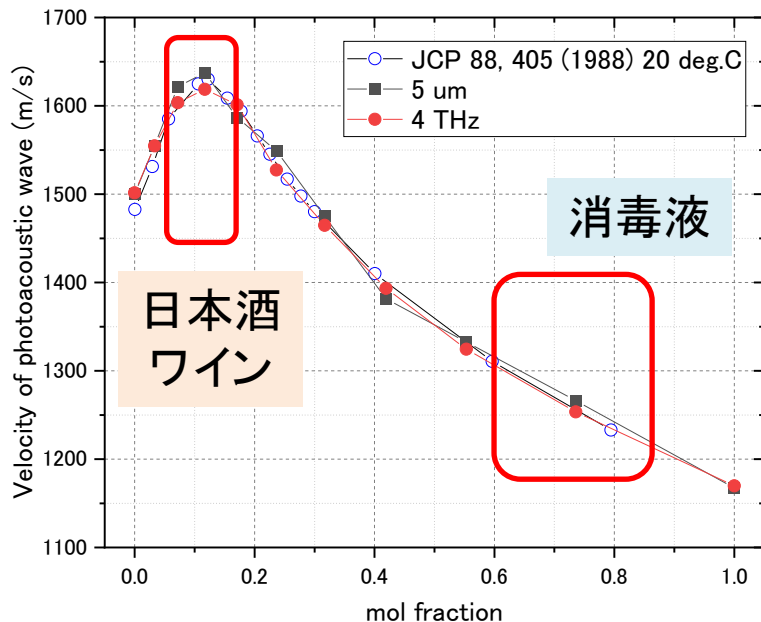
- ✓ **10秒程度**で測定可能な簡易性
- ✓ 分光的手法が使えない**無色透明試料**に適用可能



実用例1：お酒の醸造過程の定量評価

お酒（ワイン・日本酒）：新酒を数年熟成すると味がかわる（と言われている）

理由：不明
熟成度：官能検査 ← 定量評価できないか？

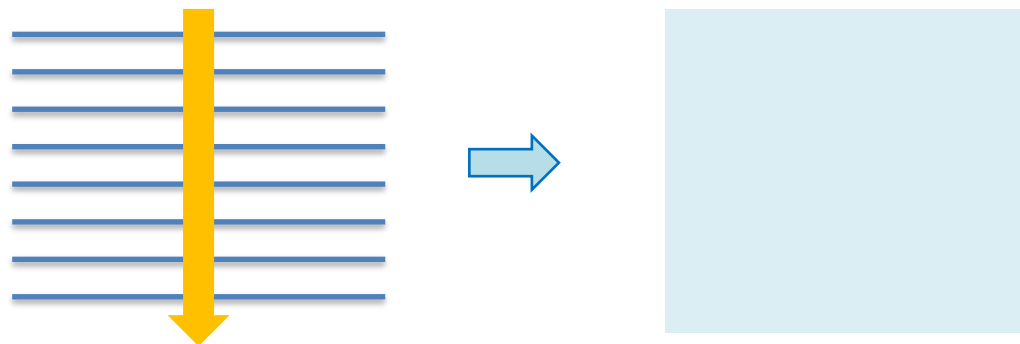


水・アルコール混合溶液の性質は組成比に強く依存
→ 組成比でミクロな分子の構造が変わる
→ 音速に反映

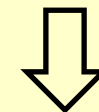
☆熟成度での音速の変化は？

実用例2: 組成分布の可視化

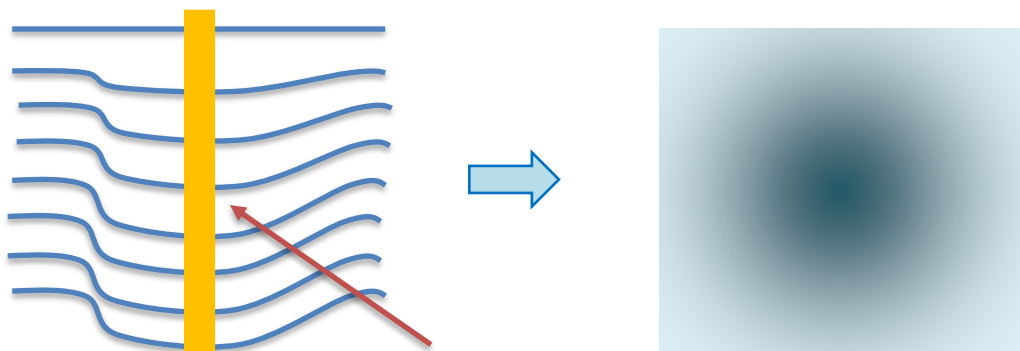
光音響波の連続測定



光音響波速度の
空間分布測定



組成、温度、圧力等
の空間分布測定



速度大

これらを
非接触、リアルタイムで

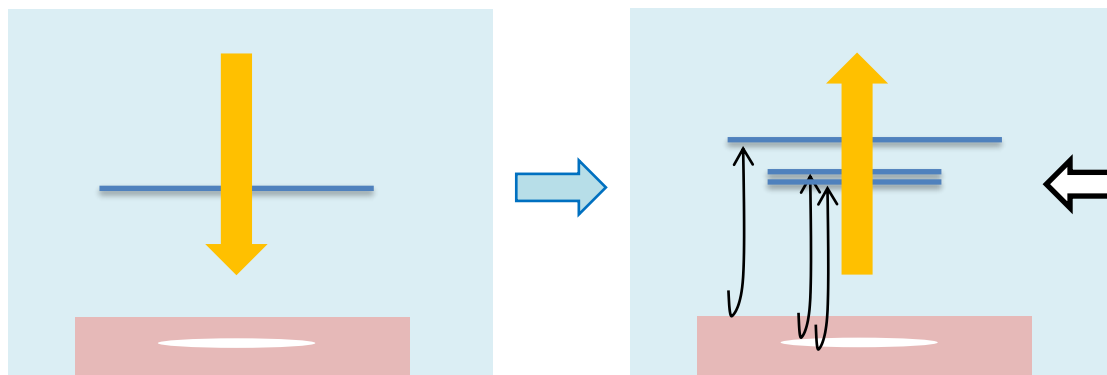
実用例3: 内部欠陥等の検査

水中に沈めた試料からの反射音響波測定

- 光音響波は固体内も透過する
- 界面では反射する



試料内部の欠陥等の検査
を非破壊で実施



欠陥等による遅延反射波

- ✓ 空間分解能: 光音響波の波長程度 $\sim 33 \mu\text{m}$
- ✓ 測定速度: カメラとレーザーの動作速度 \sim 数百Hz

➤ 試料をベルトコンベアで流しながらの測定が可能に

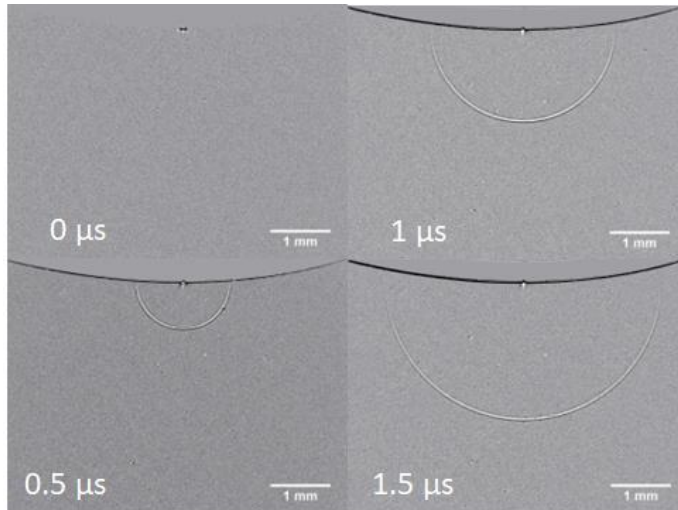
新技術の特徴・従来技術との比較

- 従来技術の問題点であった以下の点を改善
 - 色素・ゴム等有害物質の必要性（可視光）
 - 施設利用による非実用化（テラヘルツ光）
- 分光測定不能な透明・非透過物質に対して組成分析を実施することが可能となった。
- 組成分布をリアルタイムで画像化することが可能となり、検査時間の削減が期待される。
- 液体クロマトグラフィー（成分分析、微量分析）との棲み分け：組成分析、リアルタイムイメージング

実用化に向けた課題

- 現在、光音響波発生について、5 mm程度の平面波を1秒間に250回発生させるところまで開発済み（未発表）。
- 今後、リアルタイムイメージングについて実験データを取得し、画像分解能等の評価を実施する。
- 実用化に向けて、装置の小型化とデータ取得の高速化につとめる。

実用化に向けた課題：図解



報告済み：球面波



理想：大口径平面波

- ✓ 高出力中赤外光源(大口径化が可能)
- ✓ 光源のコンパクト化



現在はいずれも実現されつつある

企業への期待

- データ取得の高効率化
 - 画像データ処理技術の高度化
 - 中赤外パルスレーザーの小型化高繰り返し化
- 高速画像処理技術、中赤外パルスレーザー発生技術を持つ、企業との共同研究を希望。
- 非接触非侵襲での組成分布測定や欠陥検査を開発中の企業へ本技術の導入が有効と思われる。

本技術に関する知的財産権

- 発明の名称 :
 - 光音響波発生装置、光音響波発生方法及び組成推定方法出願番号
 - 特願2022-091646
- 出願人 : 量子科学技術研究開発機構
- 発明者 : 坪内雅明

本技術に関する投稿済論文

- “Mid-infrared light-induced photoacoustic wave in water and its application”, M. Tsubouchi, T. Endo, and R. Itakura, *Appl. Phys. Express*, 16, 012007 (2023).
- “Terahertz irradiation effects on the morphology and dynamics of actin biopolymer”, H. Hoshina, S. Yamazaki, M. Tsubouchi, and M. Harata, *J Phys.: Photonics*, 3, 034015 (2021).
- “Plane photoacoustic wave generation in liquid water using irradiation of terahertz pulses”, M. Tsubouchi, et al., *Sci. Rep.*, 10, 18537 (2020).

産学連携の経歴

- 2016年-2019年
 - 科学技術振興機構 研究成果展開事業 産学共創基礎基盤研究プログラム
「高速テラヘルツカラーイメージング装置の開発」

お問い合わせ先

量子科学技術研究開発機構
イノベーションセンターまでお願いします

T E L : 043-206-3027

F A X : 043-206-4061

e-mail : chizai@qst.go.jp