

高周波超音波キャビテーションによる水中微生物の非活性化

関西大学システム理工学部

物理・応用物理学科

山本健

内容

- **高周波超音波**
 - 超音波の定義
- **超音波キャビテーション**
 - 超音波(音響)キャビテーションとその特徴
- **ソノリアクター(超音波照射装置)**
 - 低周波, 高周波
- **水中微生物の非活性化**
 - 藻類, 菌類
- **その他の能力**
 - 分解, ソノケミカル効率, PH

高周波超音波

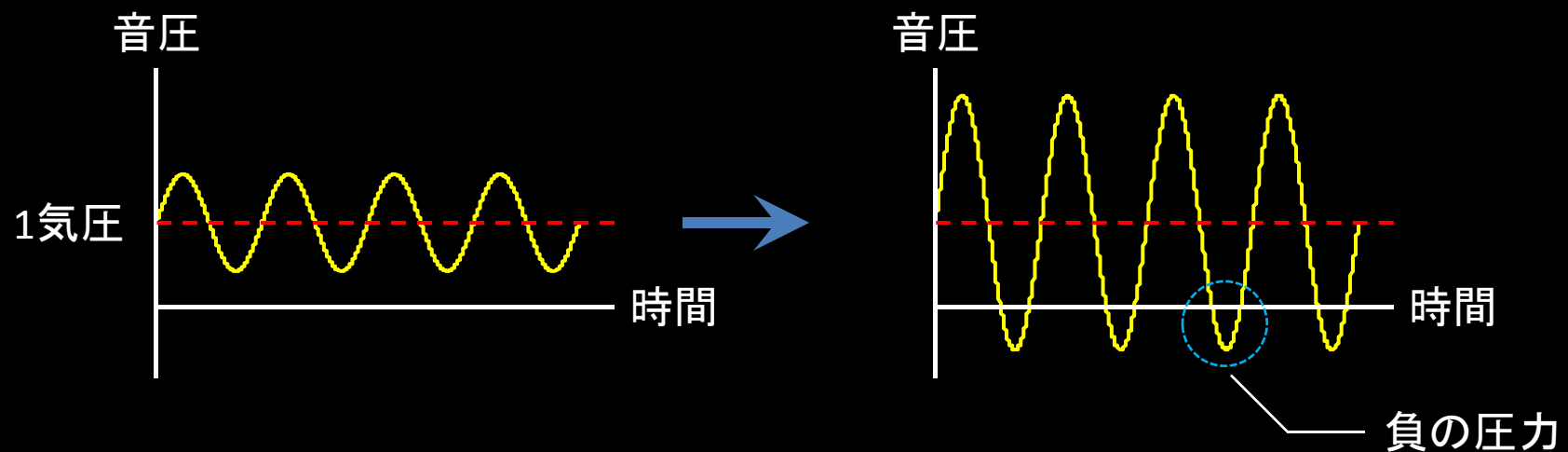
超音波の定義

- 周波数2万 Hz以上の音
 - 20,000 Hz = 20 kHz
- 周波数が高くて聴こえない音
 - 可聴特性には個人差がある
 - 超音波の定義にも個人差が生じる
- 高周波超音波とは
 - 数十kHzに対して、数百kHz～数MHzの超音波

超音波キャビテーション

超音波キャビテーション

- 水中の超音波
 - 圧力が正弦的に変化する
 - 水中では、**大気圧**が働いている
 - 音圧が高くなると、**負の圧力**が生じる
 - 液体の圧縮（正）に対して、引っ張りの圧力（負）

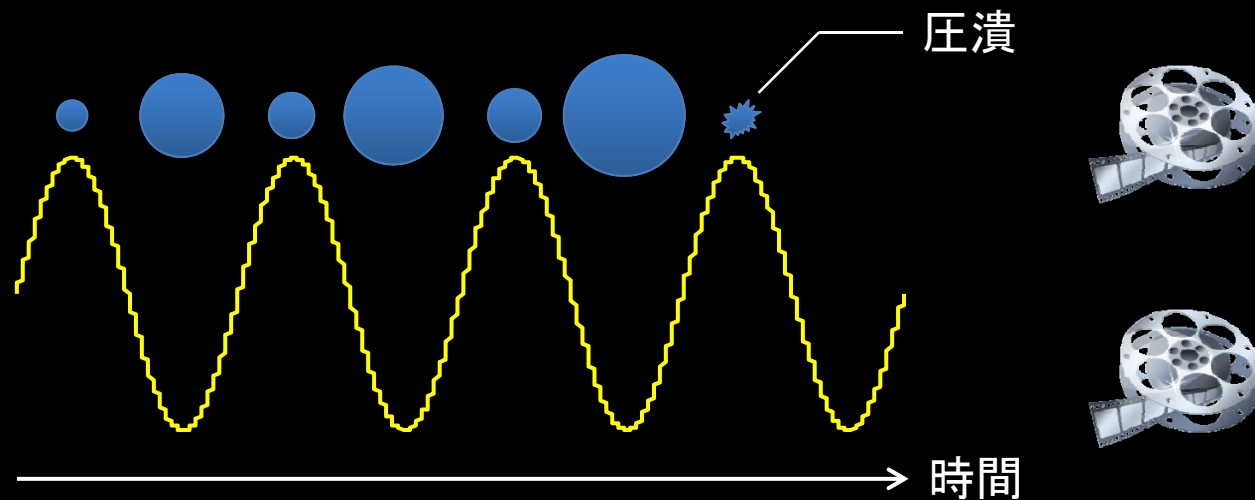


超音波キャビテーション

- 気泡の振動

- 負の圧力で生じた気泡は、超音波の周期に同期して振動する

- 時間の経過とともに気泡径が大きくなり、いずれ激しくつぶれる(圧潰)



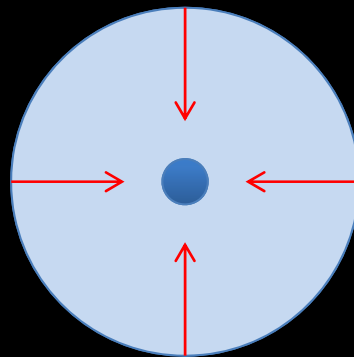
超音波キャビテーションの特徴

- 気泡の収縮

- 気泡が収縮すれば、圧力が高くなる
- 気泡は断熱過程で収縮するため、高温になる
 - 圧縮(圧潰)の気圧と温度は？

千数百atm

5000～数万°C



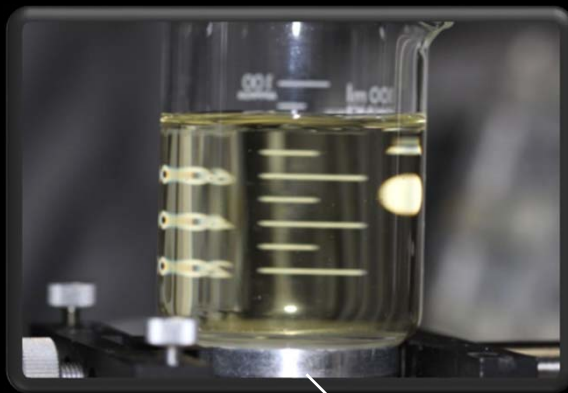
ホットスポット(反応場)

超音波キャビテーションの特徴

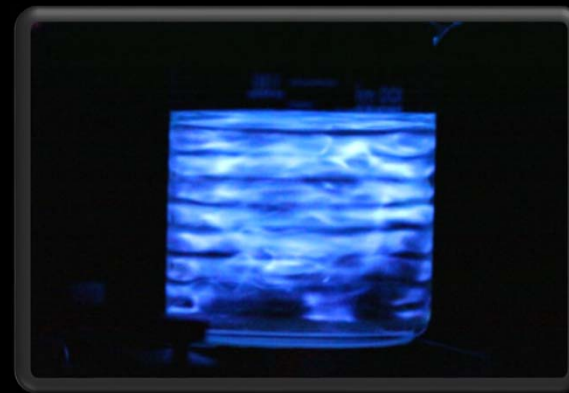
- 気泡の高温

- 気泡内が高温であれば、**発光**しているはず

- ビーカーの水に100 kHzの超音波を照射してキャビテーションを発生させる
- 暗室内で観察すると発光：**ソノルミネッセンス**



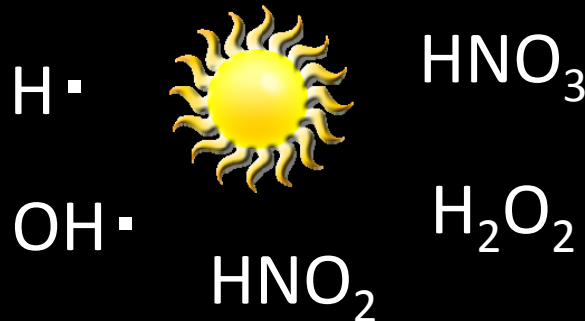
超音波振動子



暗室で撮影

超音波キャビテーションの特徴

- 高温高圧場（ホットスポット）
 - 気泡内が高圧状態になると、気泡内の空気ガス、水蒸気等が分解される
 - 水素ラジカル(H \cdot)、ヒドロキシラジカル(OH \cdot)
 - 水分子が熱分解、不対電子を持ち反応性が高い
 - 過酸化水素(H $_2$ O $_2$)、亜硝酸(HNO $_2$)、硝酸(HNO $_3$)
 - ラジカルと酸素ガスが分解してできる酸素(O)や窒素(N)と反応



超音波キャビテーションの特徴

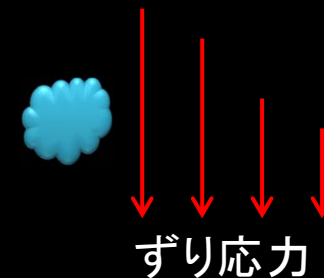
- 衝撃波

- 気泡壁から液体中に放射された圧力波が、それ以前に放射された前方の圧力波に追いつくため

- 気泡の振動速度 > 液体中の音速

- ずり応力

- 気泡の収縮や圧潰の際に、気泡近傍と遠方では液体の流れる速度がことなるため、そこに物体があればずり応力が加わる



ソノリアクター

低周波超音波照射

- 一般的な20 KHzの超音波
 - ボルト締めランジュバン振動子を用いた洗浄器, ホモジナイザーが広く利用
 - 高い超音波強度, 大きな振動変位, 大型化が容易
 - 乳化, 細胞破碎, 成分抽出, 表面処理, 洗浄等



ランジュバン振動子



Vibra-cell (Sonics & Materials)



Brasonic CPXH (Branson)

低周波超音波照射

- 20 KHzの超音波ホモジナイザー
 - 使用する上での問題点
 - キャビテーションノイズが非常に大きい
 - 気泡が音源となり、その騒音レベルは高い
 - 使用する際は、イヤーマフ等で暴露を防ぐ必要



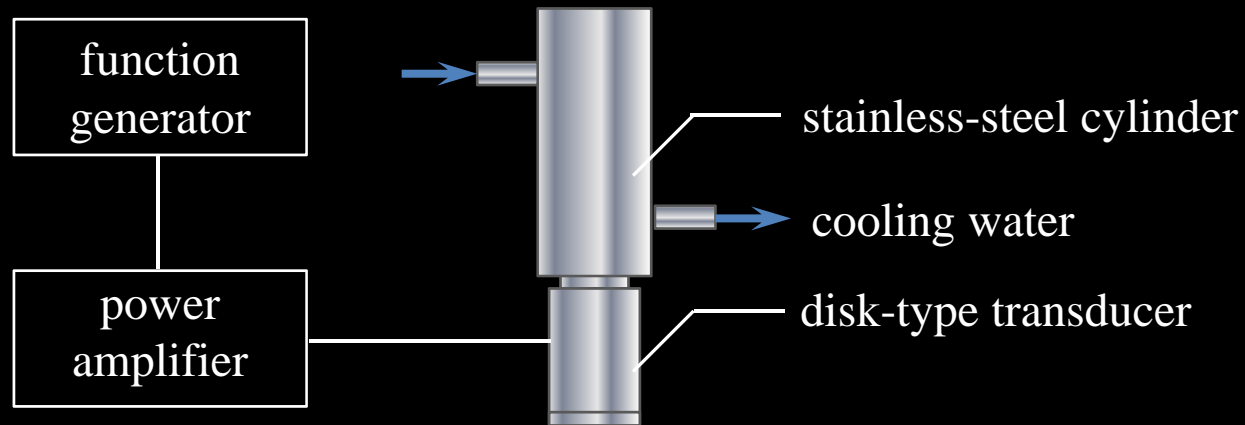
高周波超音波照射装置

- 数百 kHz～数 MHz

- 円板型の圧電セラミックス (PZT) を振動子として利用

- 高周波電力増幅器を用いて高電圧を印可
- 回路基板等の洗浄に利用

- 大きなエロージョンが起こり難い



マルチ周波数超音波リアクター

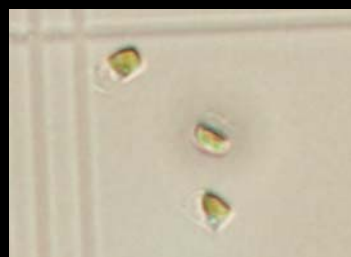
水中微生物の非活性化

藻類の超音波破壊

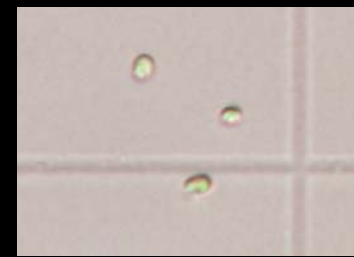
- 3種類の藻類 (*Chaetoceros gracilis*, *Chaetoceros calcitrans*, *Nannochloropsis* sp.) を超音波キャビテーションを用いて破壊
 - 藻類の脂質等の有効成分を抽出
 - 藻類破壊のメカニズム解明



Chaetoceros gracilis
(10.0 μm)



Chaetoceros calcitrans
(9.4 μm)



Nannochloropsis sp.
(5.0 μm)

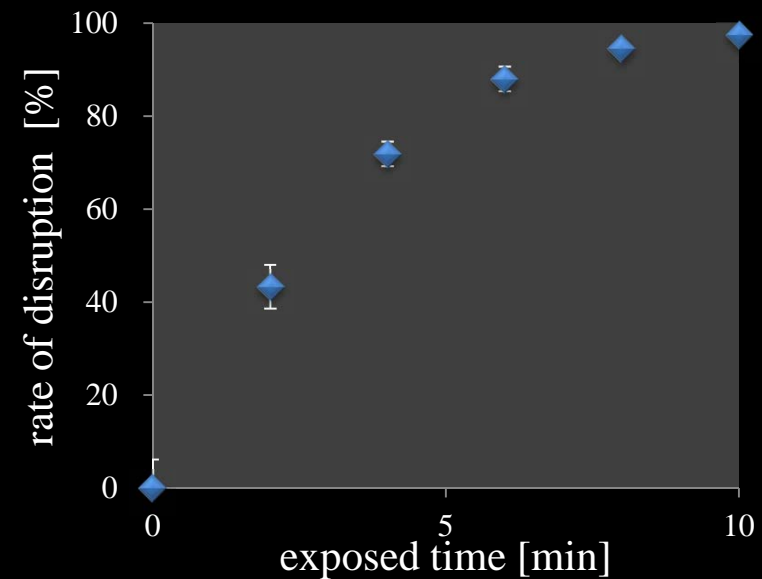
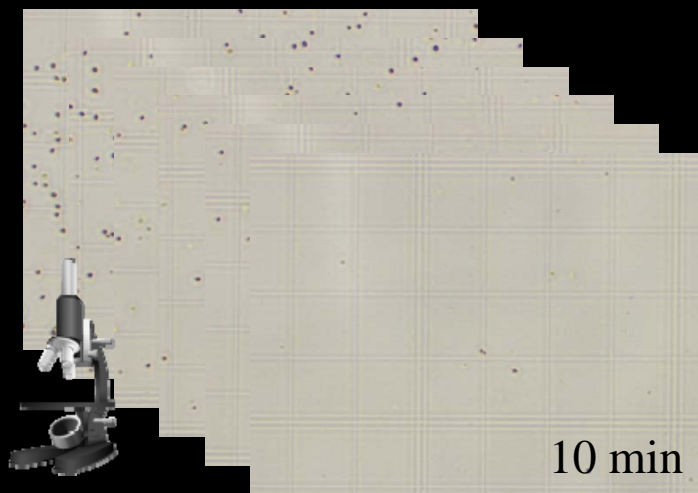
藻類の超音波破壊

- 破壊率

- 海水中に分散した藻類の数を顕微鏡で計測

- 血球計算盤を使用

- 分光器を用いて吸光度の計測も併用



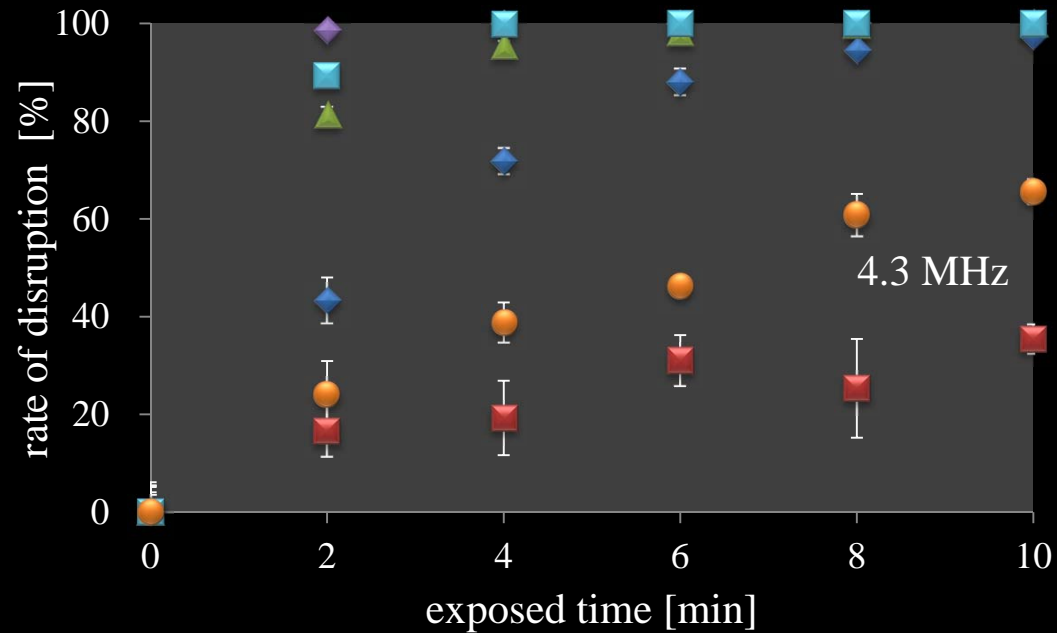
typical result of *Chaetoceros calcitrans* (10 W at 20 kHz)

藻類の超音波破壊

- *Chaetoceros gracilis* の破壊実験

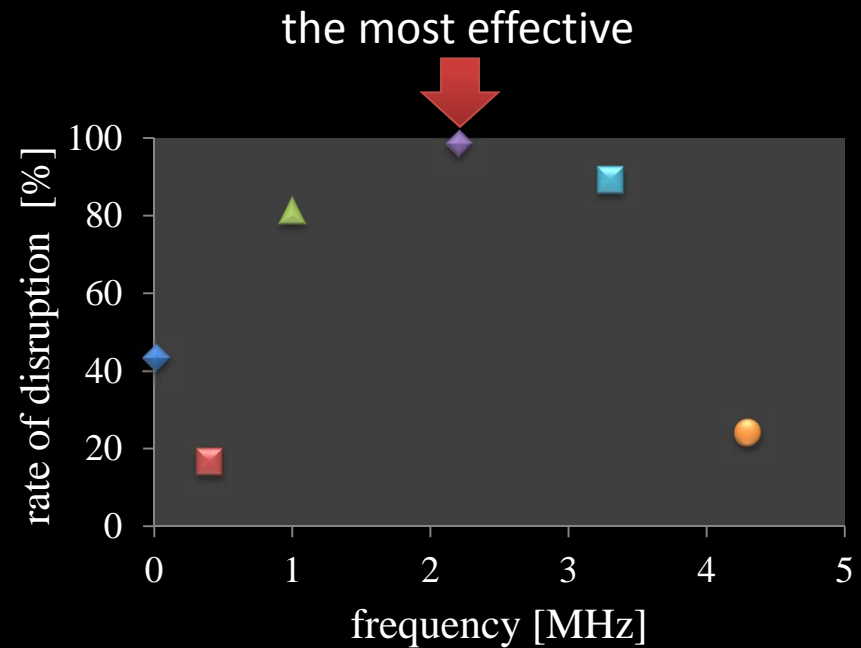
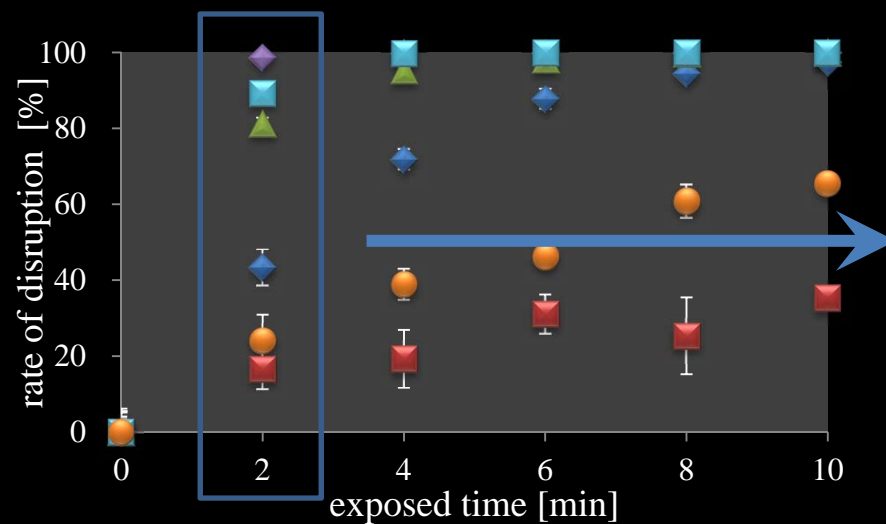
- 照射する超音波の周波数

- 20 kHz, 400 kHz, 1.0 MHz, 2.2 MHz, 3.3 MHz, 4.3 MHz



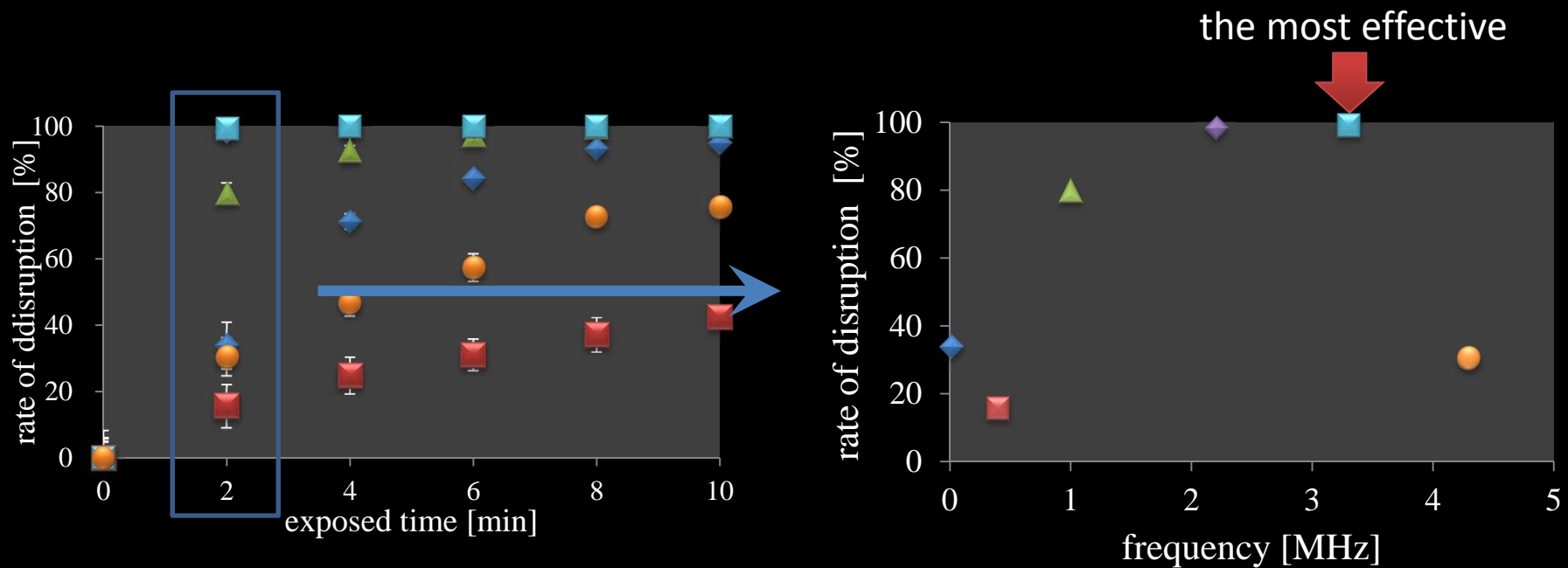
藻類の超音波破壊

- *C. gracilis* の破壊率周波数依存性
 - 直径約 $10\mu\text{m}$ の藻類
 - 3種類の中で1番大きい



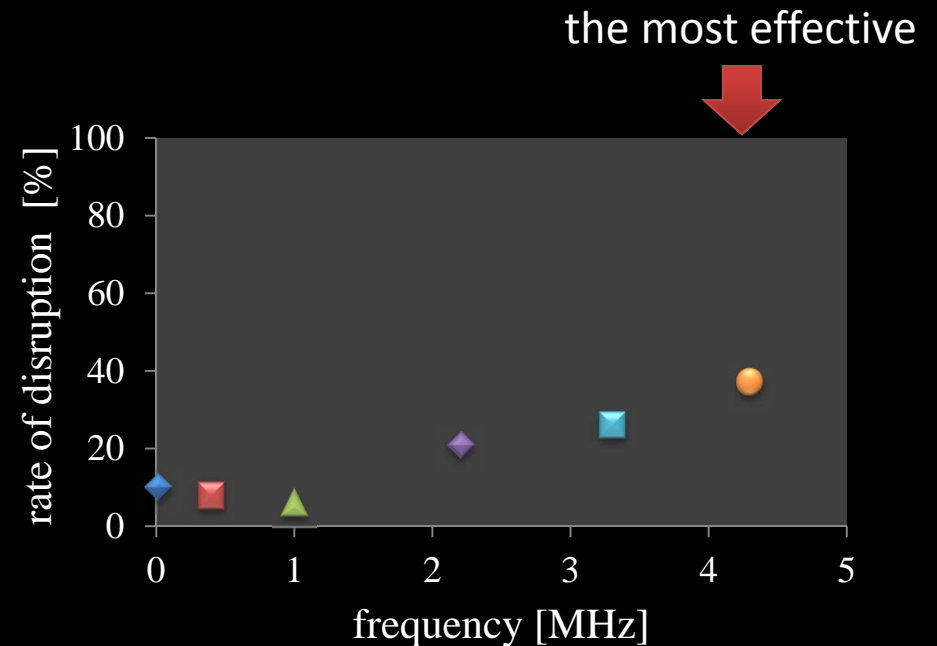
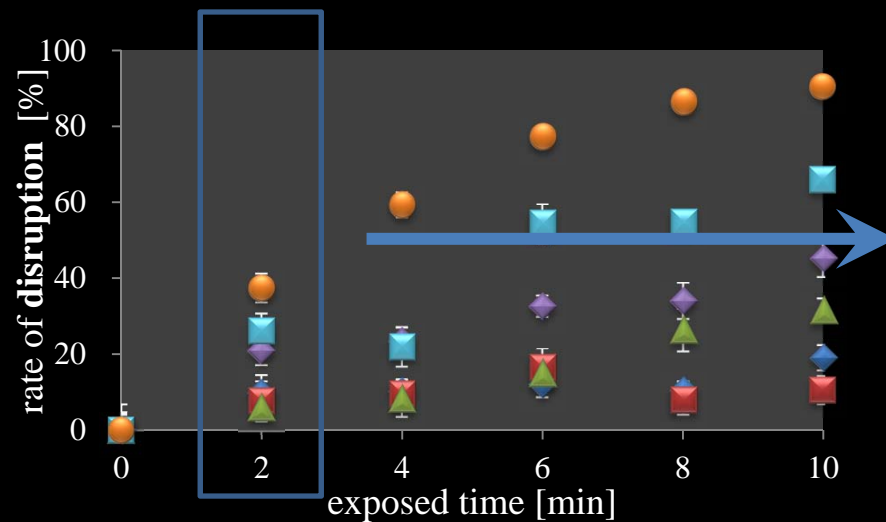
藻類の超音波破壊

- *C. calcitrans*の破壊率周波数依存性
 - 直径約 $9.4\mu\text{m}$ の藻類
 - 3種類の中で2番目に大きい



藻類の超音波破壊

- *Nannochloropsis sp.*の破壊率周波数依存性
 - 直径約 $5\mu\text{m}$ の藻類
 - 3種類の中で1番小さい

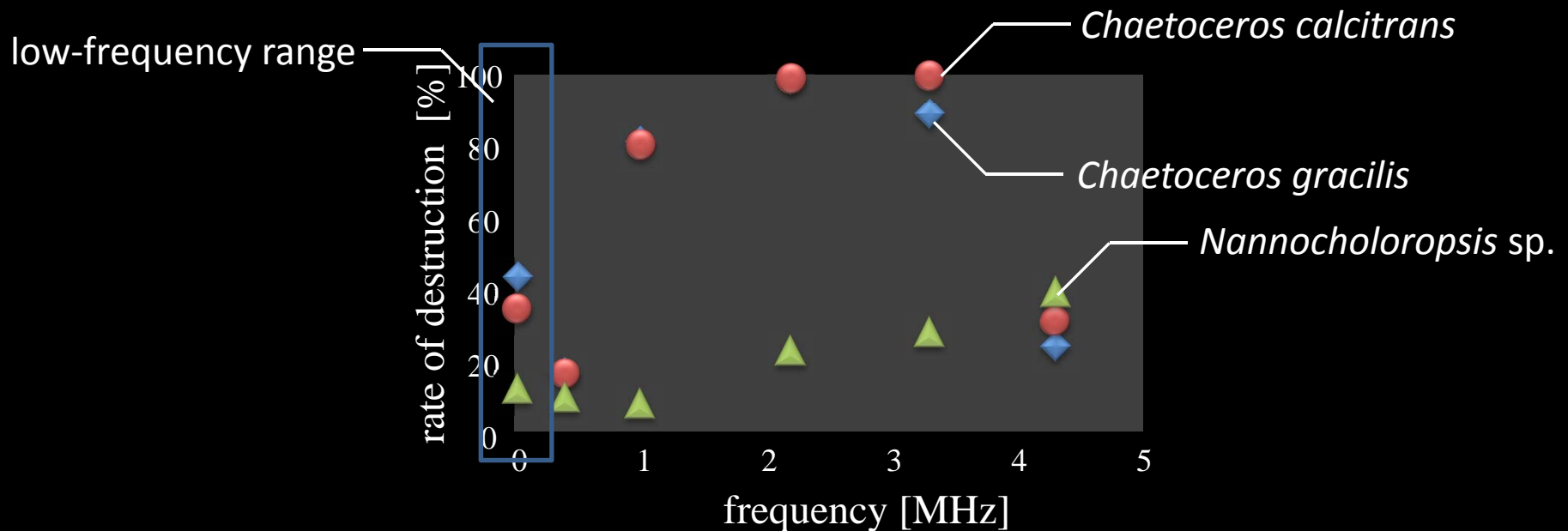


藻類の超音波破壊

- 破壊実験の結果

- 一般的な低周波超音波 (20 kHz) よりも高周波の方が藻類破壊には有効

- 藻類の弾性率から機械的な共振周波数を予想すると数 MHz 程度

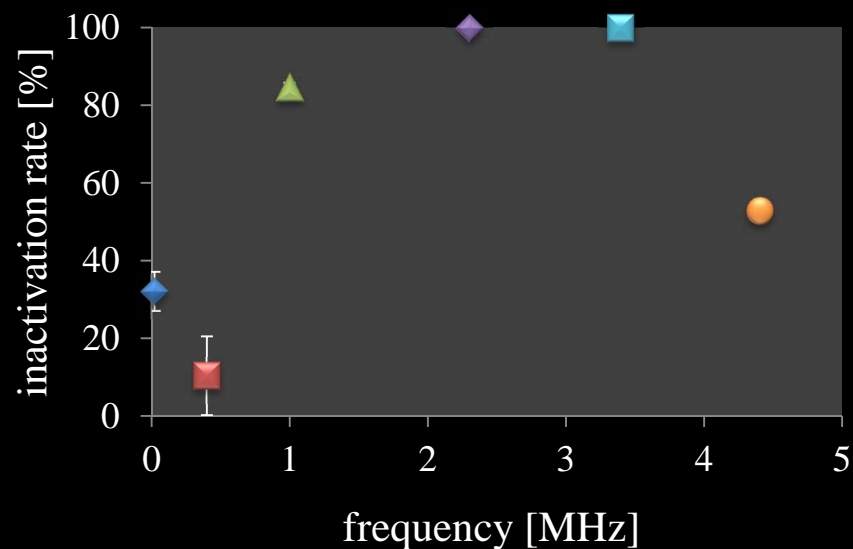
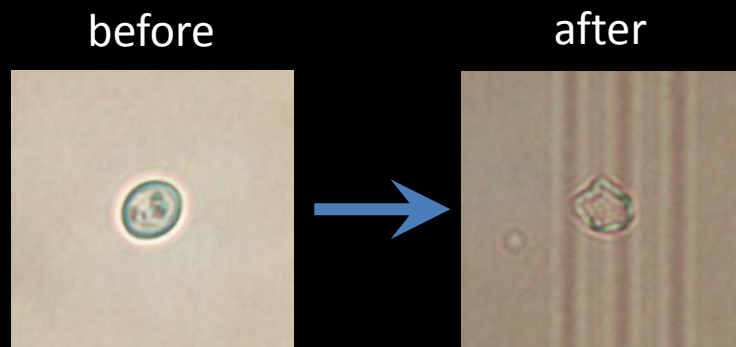


菌類の超音波破壊

- *B. Yeast*菌の破壊率周波数依存性

- *Saccharomyces cerevisiae* NBRC 2043

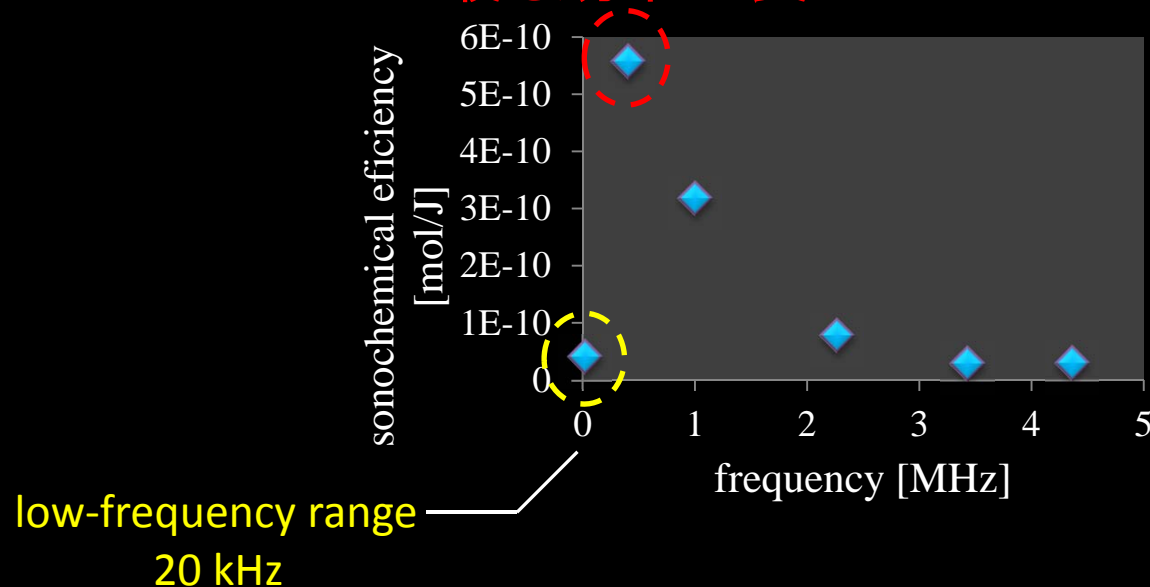
- 直径約 $3\mu\text{m}$ の酵母菌
- 同様に20 kHzよりも高周波が効果的



その他の能力

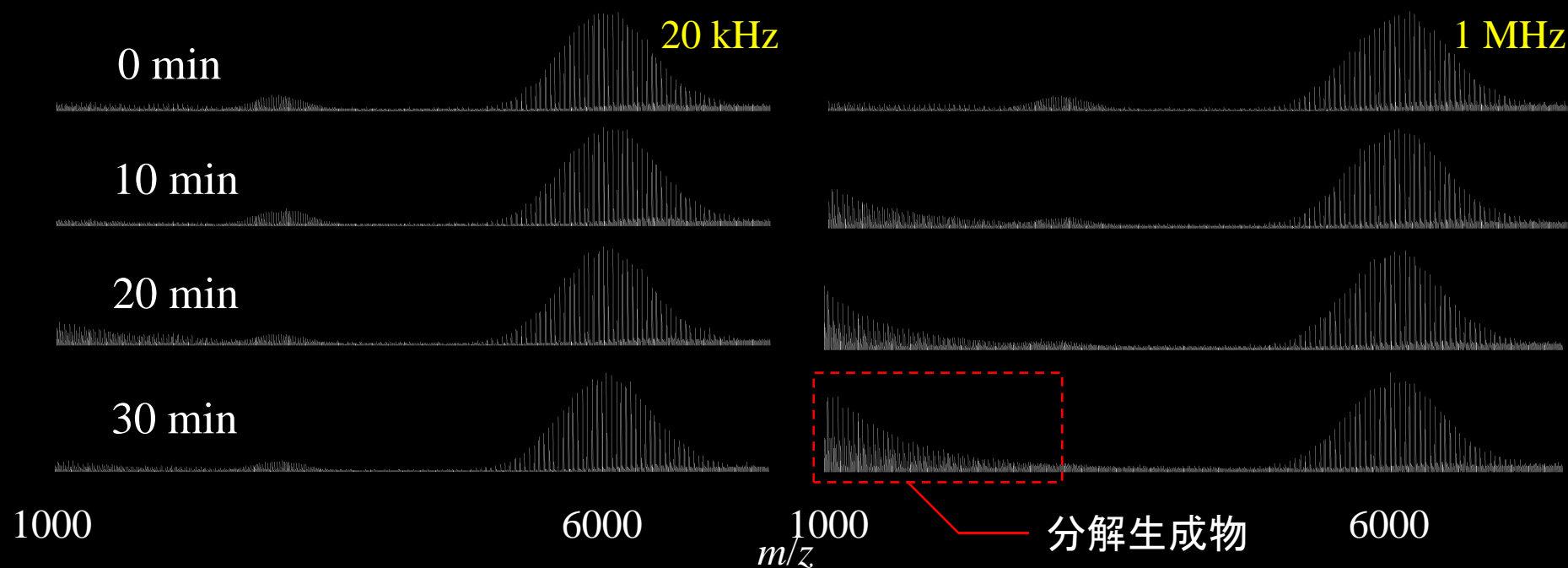
ソノケミカル効率

- 単位超音波エネルギー当たりの**化学種の生成量** ($\propto \text{OH}\cdot$)
 - 化学的作用の程度を示す
 - 超音波キャビテーションを用いた**化学反応の指標**
 - **400 kHzが最も効率が良い**



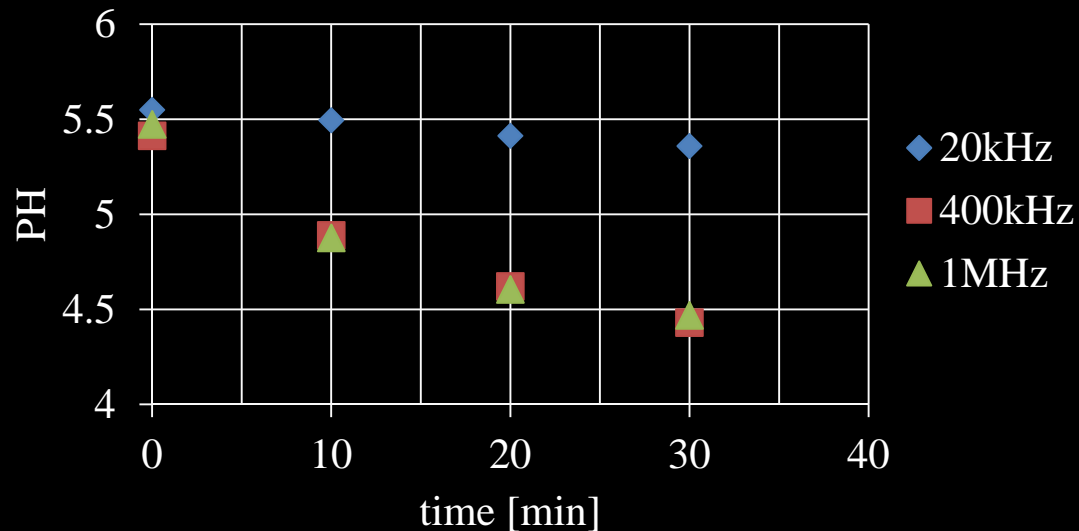
高分子分解

- ポリエチレングリコール(PEG)の分解
 - 20 KHzと1 MHzの超音波を30 min照射
 - 分子量のスペクトル(マススペクトル)を観察
 - 平均分子量6000のPEG



PHの変化

- 水に超音波照射し続けると、**水のPHが変化**する
 - 超音波キャビテーションによって化学種が生成され、**酸性になっていく**
 - 20 kHzよりも**高周波の方が有効**



まとめ

- **超音波キャビテーションの応用**

- 高分子等の分解・重合, 染料の脱色, 細胞壁の破砕, 基板や製品の洗浄, 藻類や菌類の非活性化, 液体の脱気, 固体の表面処理

- **化学的作用**

- $\text{OH}\cdot$, 過酸化水素, 熱分解...

- **力学的作用**

- 衝撃波, ずり応力, マイクロジェット...

まとめ

- 一般的な超音波処理 (20 kHz)
 - 高い超音波強度, 大きな振動変位
 - 製品化, 大型化が進む
- 高周波超音波キャビテーション
 - 低周波より高温かつ高圧
 - 高いキャビテーション密度
 - 大きな化学的作用 ($\text{OH}\cdot$, H_2O_2)
 - 微生物サイズと同等の小さな気泡 (数 μm)

お問い合わせ先

関西大学 社会連携部 産学官連携センター

TEL : 06-6368-1245

FAX : 06-6368-1247

E-mail : syakairenkei@ml.kandai.jp

【担当】

社会連携部 産学官連携センター

コーディネーター 松井 由樹