

2025年05月13日(火)

2025年 第3回 JBAバイオものづくりセミナー

(バイオものづくりの社会実装支援サービスを提供する機関の紹介)

(ZOOM配信)

攪拌技術の基礎および バイオ分野への応用

佐竹マルチミクス株式会社
攪拌技術研究所1G
吾郷 健一

1. 攪拌の基礎と装置選定

1.1 攪拌目的と攪拌作用

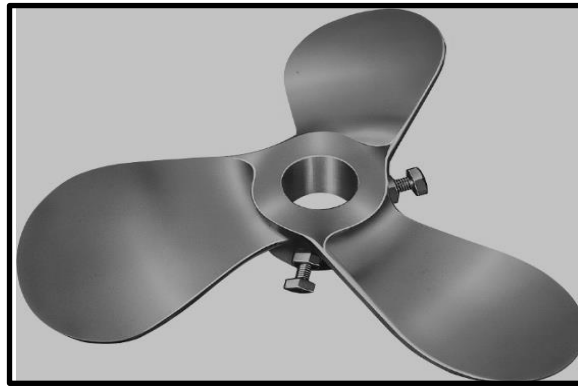
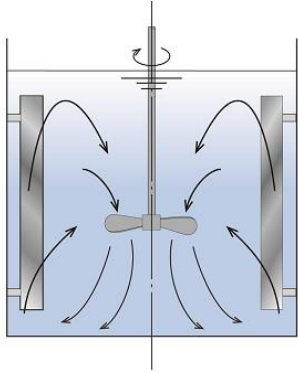
Table. 攪拌の目的と必要となる作用

【目的】	【主として関連する攪拌作用】
A. 均相液系の攪拌 濃度 温度]の均一化 ———— 混合均一化促進	———— (移動現象の役割) ———— (物質および熱移動)
B. 固-液系の攪拌 槽底での粒子の流動化 (沈降堆積防止) ———— 分離防止 液表面からの粒子吸い込み (浮上分離防止) / 粒子の浮遊懸濁、スラリー化 ———— 混合分散 凝集粒子の解膠、破碎、分散 ———— 細分化、分散 粒子の凝集沈降 (浮上) 分離 ———— 凝集、分離 粒子の溶解 晶析	(1) 混合および分散均一化作用 (2) 凝集、破壊細分化作用 (力学的作用 (運動量移動)) (3) 流動、浮遊化作用 (移動運搬作用) (4) 界面移動現象促進作用
C. 気-液系および液-液系の攪拌 分散 (気泡、液滴の細分化、分散) ———— 細分化、分散 ガス吸収および抽出	(物質及び熱移動)
D. 伝熱	
E. 反応：物質移動が前提。加熱、冷却および温度制御も強く関連 (A～Dの複合も強い因子を検討)	

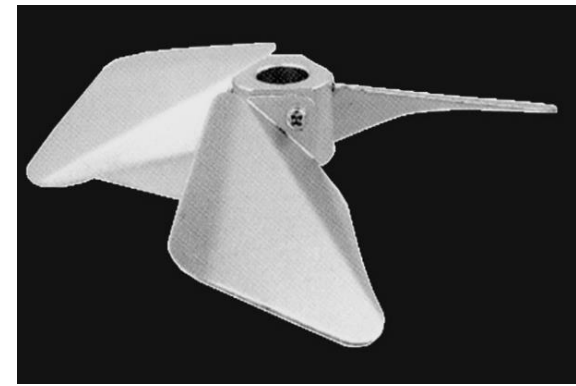
攪拌翼の種類

軸流翼

プロペラ

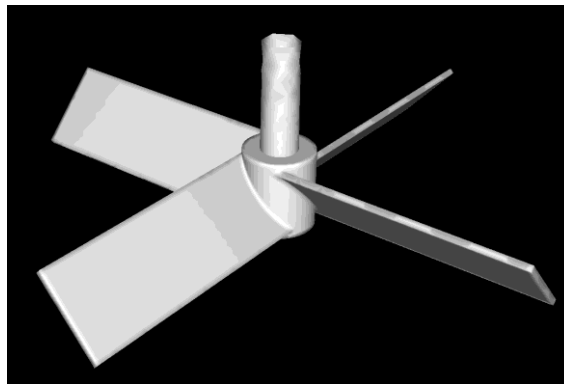
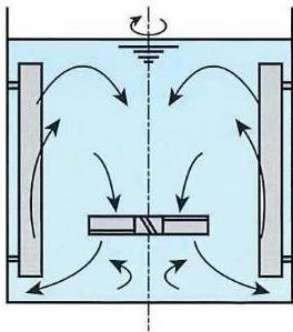


HR100翼

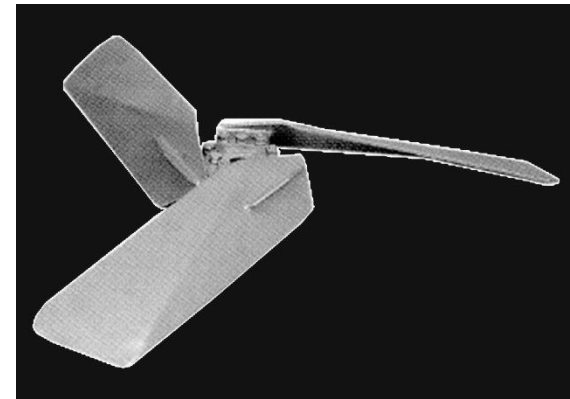


斜流翼

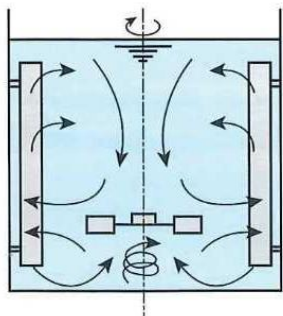
ピッチドパドル



HR320翼

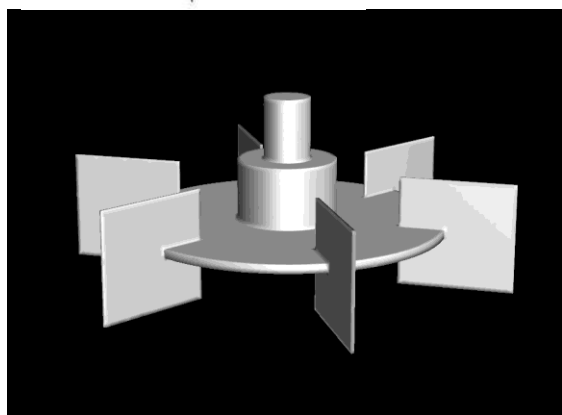


攪拌翼の種類

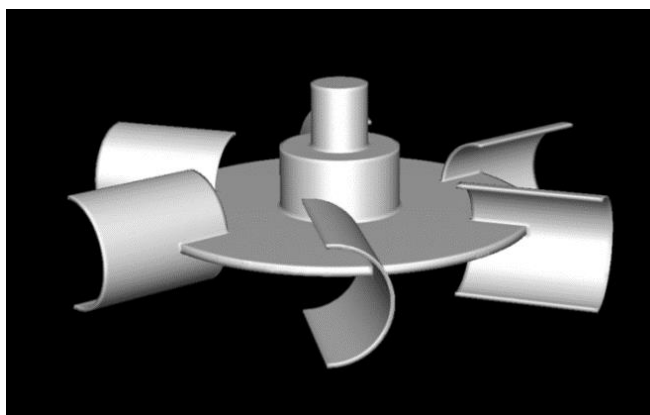


輻流翼

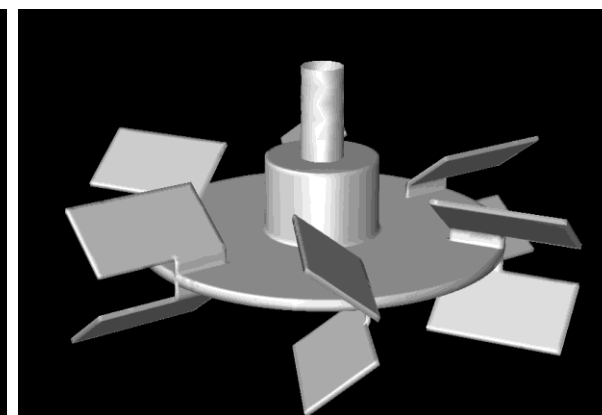
・・・通気攪拌や液液分散に使われることが多い。



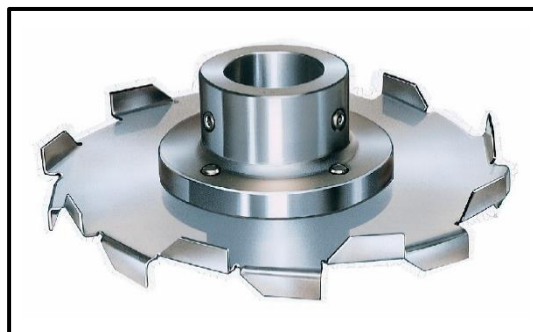
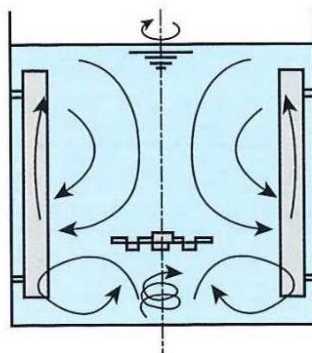
ディスクタービン



コンケーブ翼



HS100翼



DSインペラ（ディスパー）

ノコ歯状のエッジを有し、高速回転によって強力なせん断作用を起こす。

1.2 攪拌Reynolds数と動力特性

攪拌Reynolds数

攪拌動力を把握することは、攪拌装置の仕様選定に必要不可欠であり、攪拌性能評価の指標などにも用いられるため重要となる。

・攪拌Reynolds数 Re と動力数 N_p が重要

◎攪拌Reynolds数

$$Re = \rho n d^2 / \mu$$

ρ : 密度[kg/m³]

n : 回転数[s⁻¹]

d : 翼径[m]

μ : 粘度[Pa・s]

攪拌 Re 数により、槽内の流動状態を下記のように判別できる。

$Re \leq 100$	... 層流領域
$100 < Re < 1000$	... 遷移領域
$1000 \leq Re$	... 乱流領域

※上記区分の数値は、研究者や文献によって多少の違いがある。

動力特性

◎攪拌所要動力

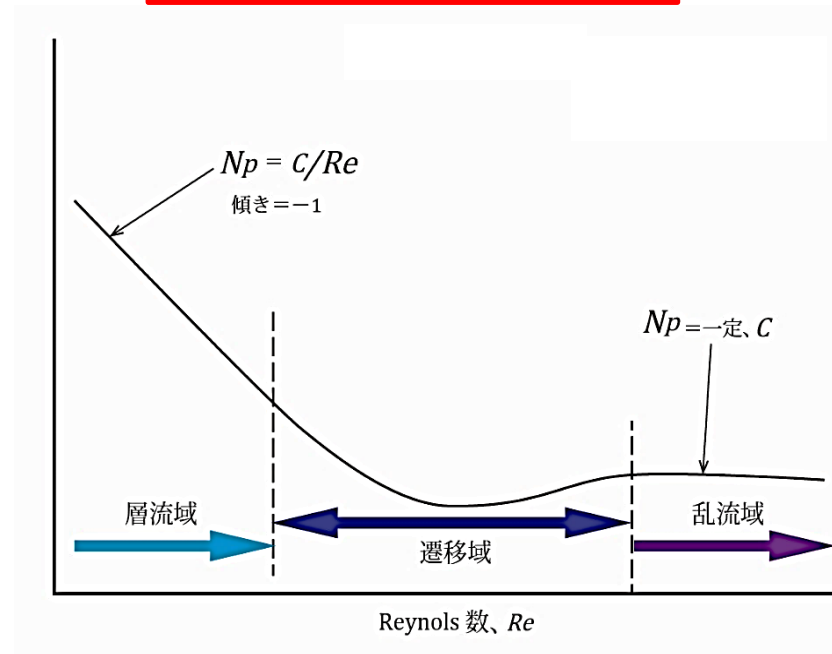
$$P = N_p \cdot \rho \cdot n^3 \cdot d^5$$

動力 P : [W] = [Nm/s]

密度 ρ : [kg/m³]

回転数 n : [1/s]

翼径 d : [m]



$$N_p = \frac{P}{\rho n^3 d^5}$$

Fig. 攪拌 Re 数と動力数 N_p との関係 (邪魔板条件)

【乱流域】 N_p がほぼ一定となる (邪魔板付き条件)。

【層流域 ($Re < 10$)】 動力数 N_p と攪拌 Re 数は下式の関係となる。

$$N_p \cdot Re = C \quad (C: \text{定数})$$

N_p - Re 曲線があれば, Re 数から N_p が分かるので, 設計することが可能

2. 攪拌の評価方法

2.1 フローパターンの測定

何を測定すればいいのか。

- ・ もっとも大切なのが、フローパターンである。
- トレーサー粒子を投入することで、間接的に流れを可視化することができる。

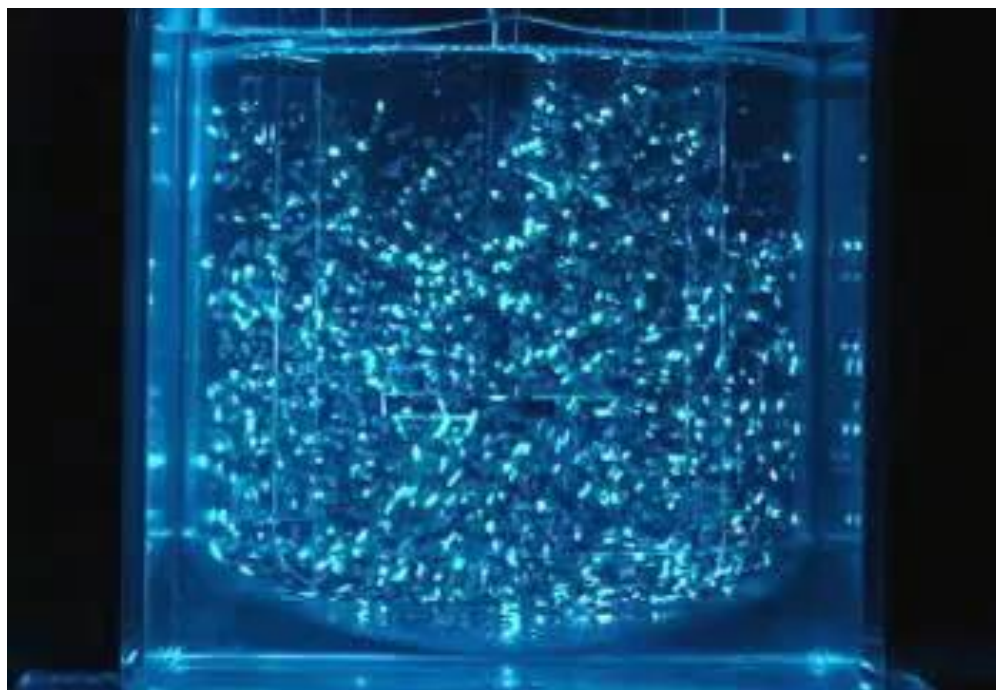
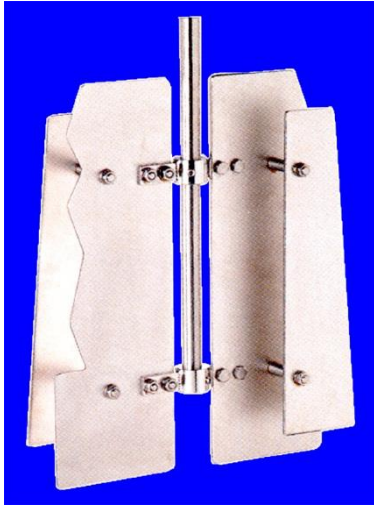


Fig. 粒子懸濁法: ABS粒子(比重1.05)による分散の様 (4PP)

2.2 混合時間の測定

ヨード-ハイポによる脱色反応を用いた方法



$$Re = 100$$

$$\mu = 1000 \text{ mPa} \cdot \text{s}$$

特殊大型翼
(MR205 Impeller)

ダブル
ヘリカルリボン

- 混合時間が測定できる。
- 実験準備, 実験方法が容易である。
- 視覚的に分かりやすい。

2.3 動力測定

トルクメータを用いて攪拌トルクから動力数 N_p を算出する。

→ N_p - Re 曲線

【ラボ用トルクメータ】

サタケミキシングトルクメータ

ST-4000



$$P = \omega T = 2\pi n T$$

$$P = N_p \rho n^3 d^5$$

動力 P [W]=[Nm/s]

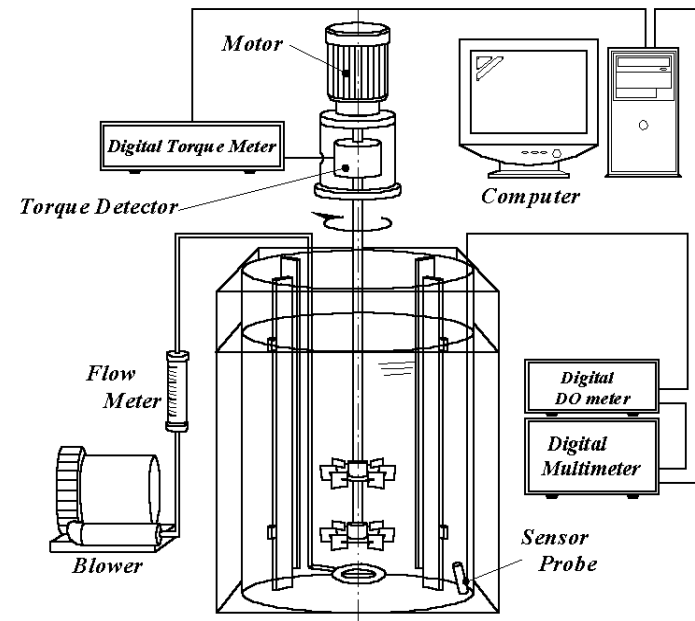
回転数 n [1/s]

トルク T [N·m]

密度 ρ [kg/m³]

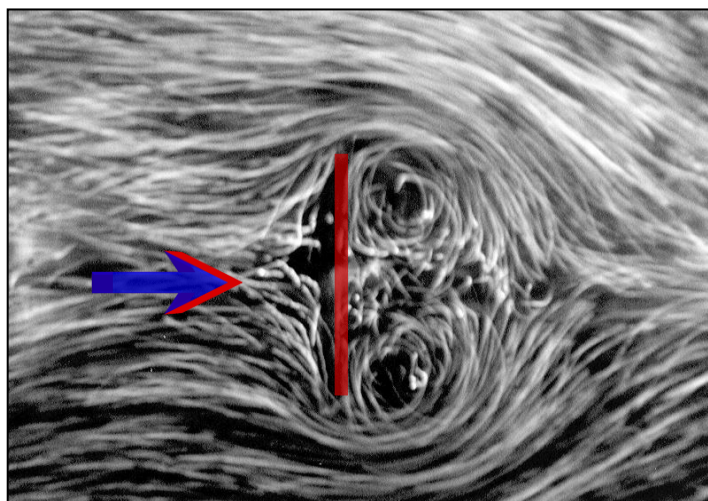
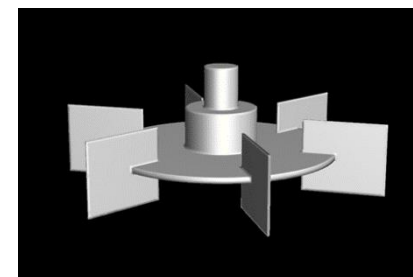
翼径 d [m]

【実用攪拌機用】

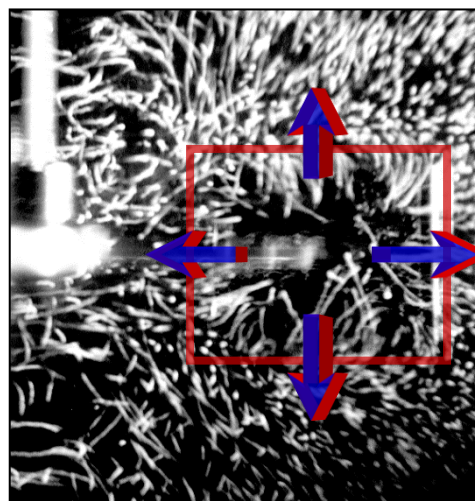


3.1 微生物培養(気液攪拌)

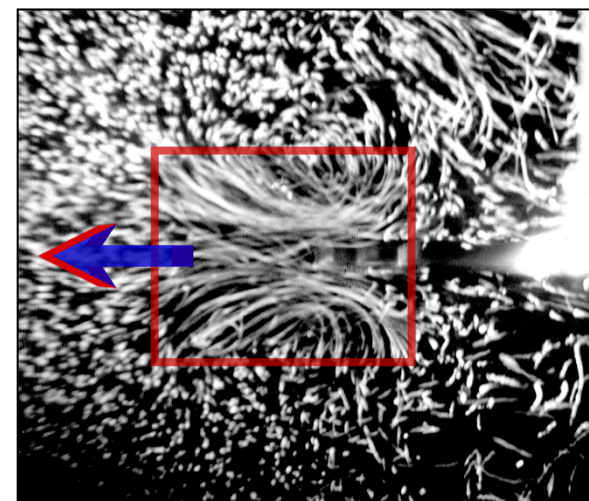
6FTの吐出特性 (粒子懸濁法による可視化)



翼断面



翼前面

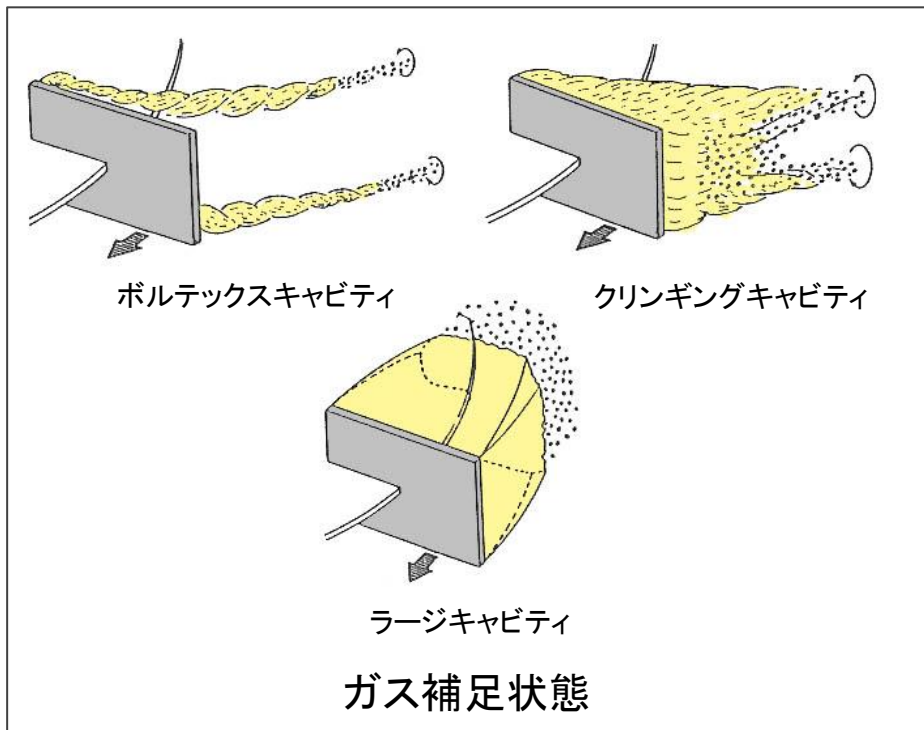


翼背面

◎翼背面の**負圧**と**慣性力**を利用した吐出形態

- ・負圧による高吐出流
- ・Edge Vortex (圧力勾配) などによるせん断力

従来翼の課題点

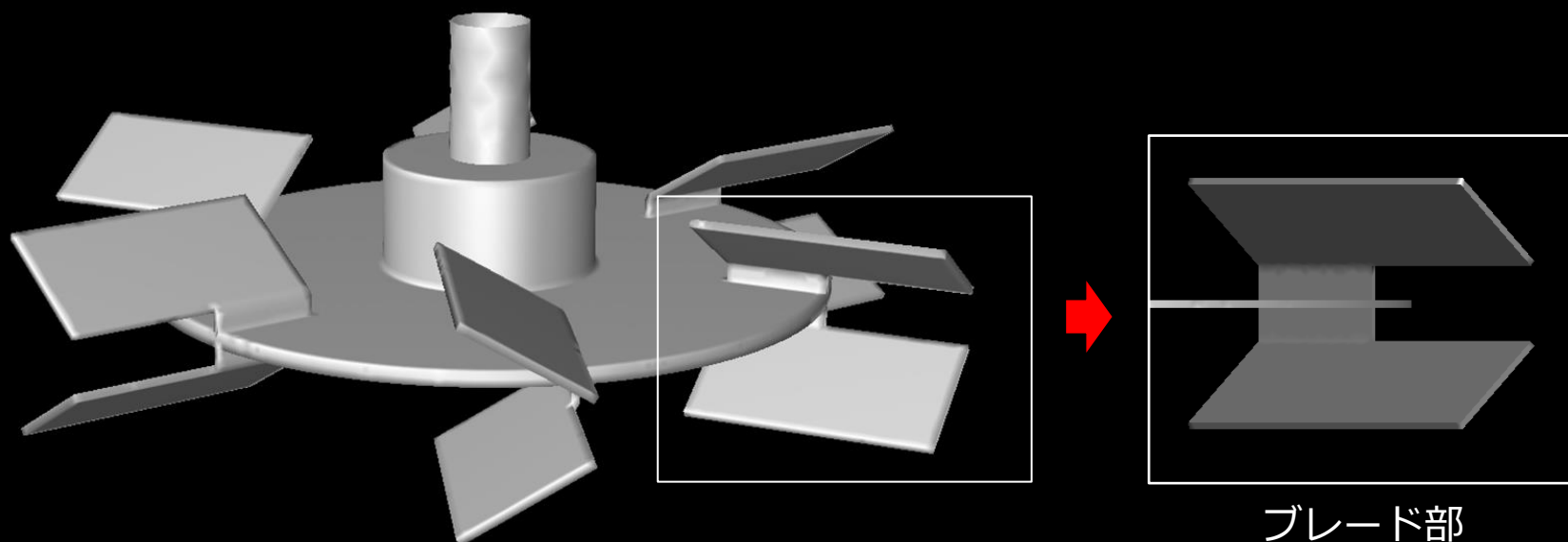


ラージキャビティ発生状況
($P_{gV}=1.5 \text{ kW/m}^3$, 1 vvm)

通気流量が増すと翼背面の**負圧部に気泡溜**が形成

- ・通気時の動力が極端に低下
- ・液流動作用が低下
- ・剪断・破壊作用が低下

Super-Mix HS100 Turbineの特徴



- ・ブレード吐出部にクリアランス(上下2枚の翼として最適化) → 最大の特徴
- ・剥離を抑制した翼形状(迎角の検討)
- ・従来型Turbineの翼背面の負圧を利用した吐出形態とは根本的に異なる

3.2 動物細胞培養(気液攪拌)

バイオ医薬品を効率的に生産する。

いかにして動物細胞を**高密度**に培養して**生産量**を**上げるか**が重要である。

動物細胞…細胞壁を持たない脆弱な細胞

攪拌操作に求められること

剪断力の抑制

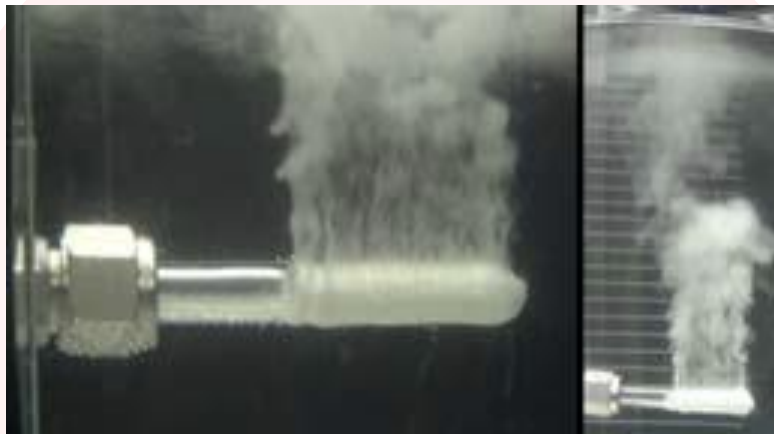
良好な混合

実用化には大量培養が求められる

動物細胞培養装置 VerSus Reactor

日揮
JGC CORPORATION

SPG膜スパージャー

マイクロバブルの均一分散による
高効率酸素供給

SATAKE

VMF

低剪断作用
高効率均一混合

二つの技術の融合

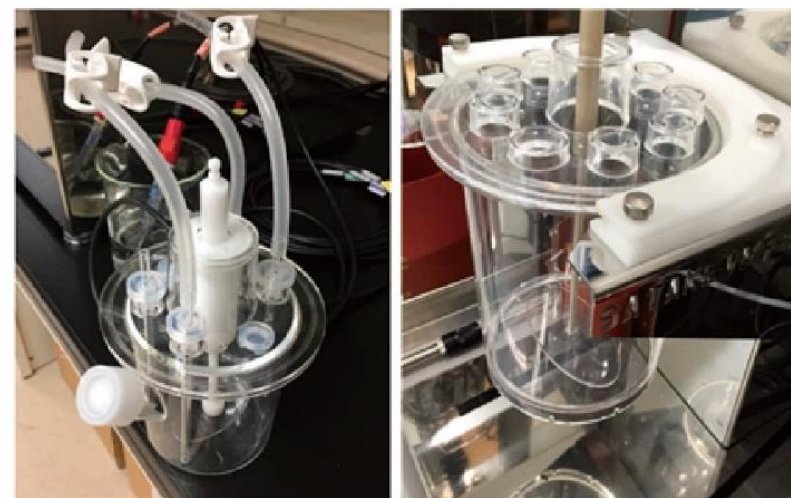
今までにない新しい細胞培養用バイオリアクター

VerSus Reactor®

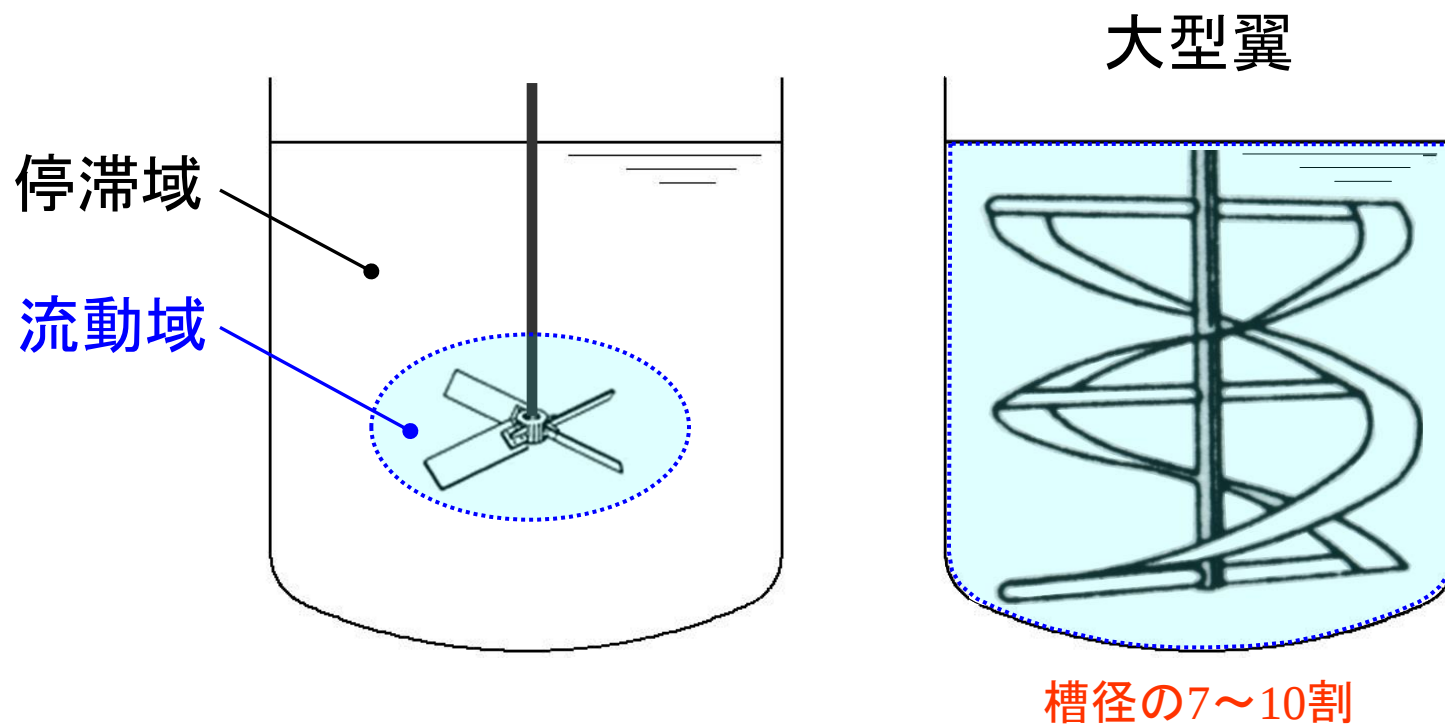
産業用iPS細胞分化誘導培養装置

HiD 4x4

SATAKE VMOVE MIXER® Single-Use Bioreactor



3.3 高粘度流体の攪拌



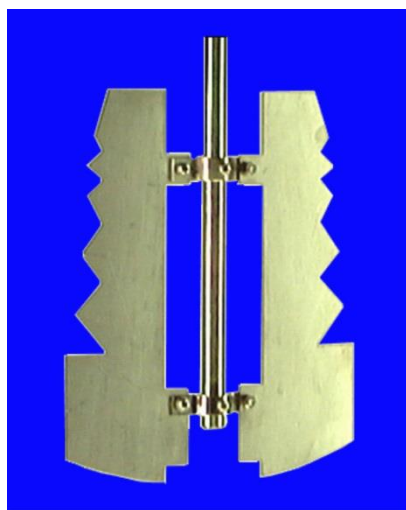
粘度が高い液：流体運動を止めようとする性質が強い。



槽径に対し、比率の大きい翼(大型翼)で全体を攪拌する。

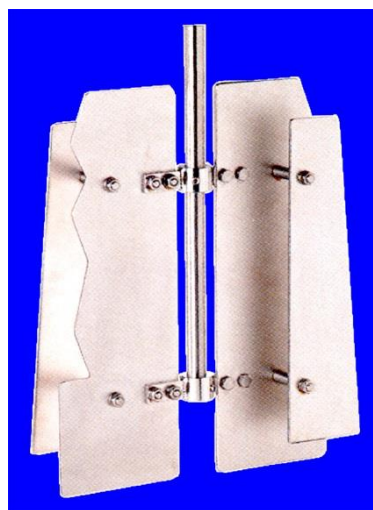
佐竹マルチミクスで開発された大型翼

MR203



標準型

MR205

吐出強化型
(二重翼効果)

MR210

サニタリー性
強化

LR500

超高粘性対応
(攪拌 $Re < 10$)



ご清聴ありがとうございました。

k.ago@satake.co.jp 吾郷 健一（あごうけんいち）