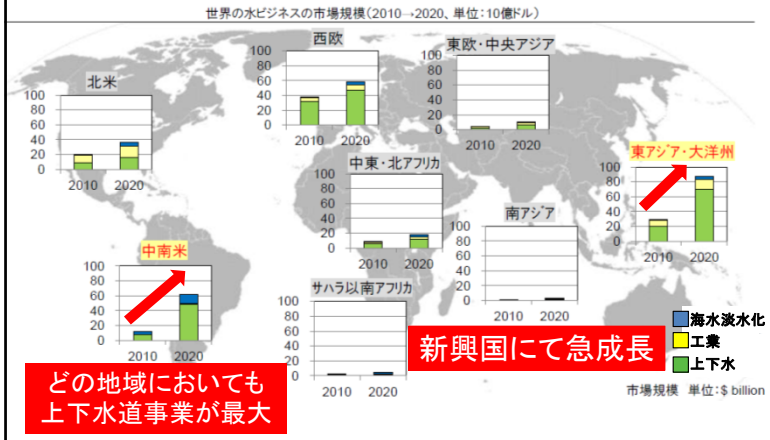
クロスフロー精密ろ過の直接数値シミュレーション

日大生産工（正）〇安藤努，加藤久貴
PIA（正）小池修
東大環安セ（正）辰巳怜

研究の背景

- 海外市場　各地域の水ビジネス市場の規模・成長性



出典：㈱日本総研，「最近の水ビジネス市場と主要プレーヤーの動向」，2014.3.17

研究の背景

- 水ビジネスにおける主要プレーヤーの市場占有率

区分	製品・サービス	シェア*								
事業運営	給水	Veolia（フランス）	Suez（フランス）	FCC（スペイン）	その他（小規模な民間事業者が多い：詳細次頁）					
エンジニアリング	海水淡水化プラント・装置	Sidem（フランス）	Besesa（スペイン）	Hyflux（シンガポール）	Doosan（韓国）	Aqua tech（米国）	その他			
水処理機器	オゾン発生装置	Ozonia（スイス）	Xylem（米国）/Wedeco（ドイツ）	メタウォーター	三菱電機	その他				
	MBR用膜ユニット	General Electric（米国）	クボタ	三菱レイヨン	Siemens（ドイツ）	その他				
素材	MF膜/UF膜	General Electric（米国）	Siemens（ドイツ）	旭化成ケミカルズ/Pall（米国）	三菱レイヨン	クボタ	その他			
	RO膜/NF膜	Dow Chemical（米国）	日東電工/Hydranautics（米国）	東レ	Woongjin Chemical（韓国）	東洋紡	その他			

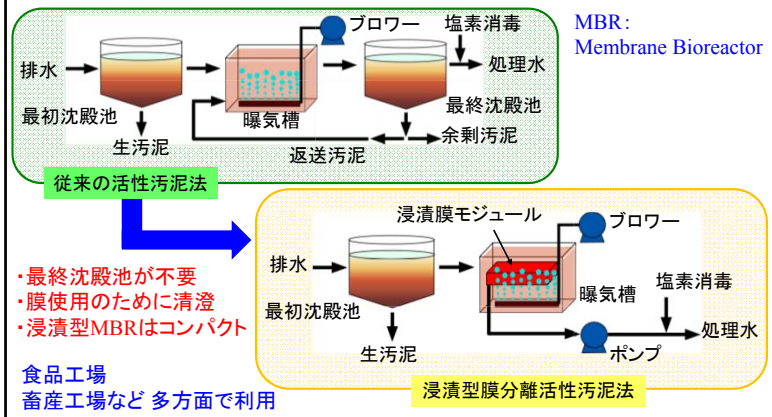
水メジャー　グローバル・コングロマリット　新興国企業　日本企業

* 事業運営は民営化市場における給水人口のシェア、それ以外は当該製品の市場規模をベースに各企業のシェアを試算

出典：㈱日本総研，「最近の水ビジネス市場と主要プレーヤーの動向」，2014.3.17

研究の背景

- 近年，『下水処理』において，曝気槽内に分離膜を浸漬させてろ過する膜分離活性汚泥法(MBR)が注目．



MBR：
Membrane Bioreactor

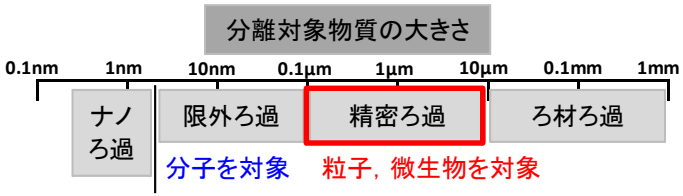
・最終沈殿池が不要
・膜使用のために清澄
・浸漬型MBRはコンパクト

食品工場
畜産工場など 多方面で利用

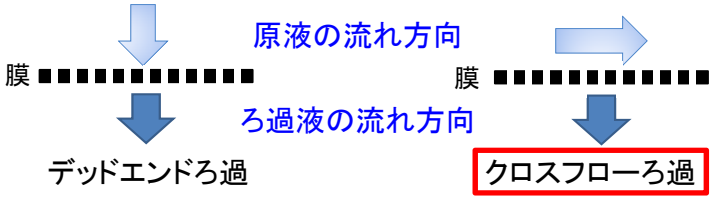
膜ろ過の分類

5/22

- 分離対象物質の大きさによる分類

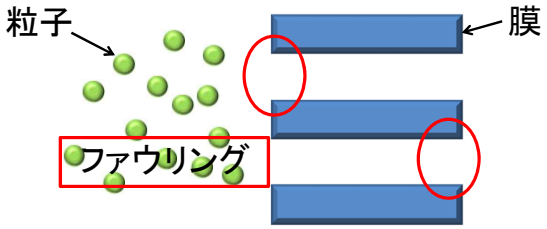


- 原液の流れによる類



膜ろ過の問題：ファウリング

6/22



粒子が膜に堆積して起こる目詰まり

⇒ ろ過効率，膜寿命，・・・

メカニズムの解明は重要な課題

シミュレーション系と現実系

7/22

➢『空間スケール』と『時間スケール』

空間スケール ⇔ 時間スケール

計算時間（コスト）

現実系：	＝ 実空間	＝ 実時間	間接情報
計算系：	≪ 実空間	≪ 実時間	直接情報

➢『ゆらぎの世界』と『理想の世界』

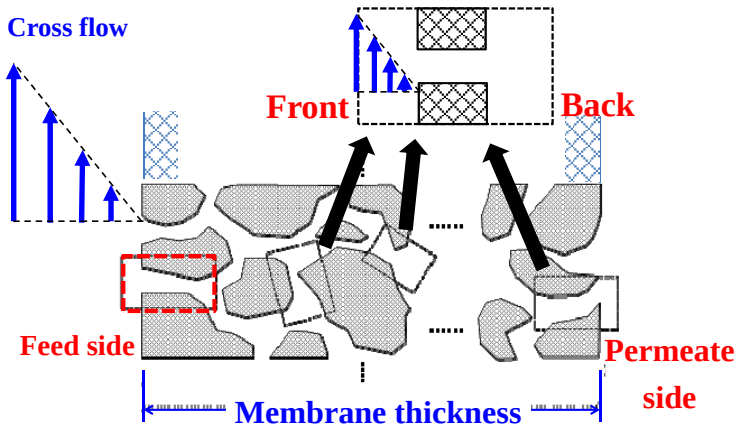
現実系：『ゆらぎの世界』　粒子・細孔径，粒子・膜表面，・・・

計算系：『理想の世界』　真球・真円，平滑，・・・　再現性

（「ゆらぎ」を与えることは可能）

シミュレーション系と現実系

8/22



研究の目的

- 膜ろ過の問題
  膜性能を低下させるファウリング(閉塞)による
  透過流束の低下がある.

この影響を知ることは膜ろ過プロセスの最適化のために必要不可欠.

しかし，それ以前にファウリングの過程が未だ分かっていない.

クロスフロー精密膜ろ過を対象とした
直接数値シミュレーションを実施して，
ファウリングと透過流速の関係を調べる.

基礎方程式

溶媒の運動　Navier –stokes方程式

$$\frac{\partial \boldsymbol{v}}{\partial t} + (\boldsymbol{v}\cdot\nabla)\boldsymbol{v} = -\frac{1}{\rho}\nabla p + \frac{\mu}{\rho}\nabla^2\boldsymbol{v} + \frac{1}{\rho}\nabla\cdot\boldsymbol{S} - \frac{1}{\rho}\boldsymbol{D} + \Phi\boldsymbol{\alpha}$$

揺動項　圧力勾配項　粒子加速度項

t :時間，$\boldsymbol{v}$:流体の速度ベクトル，ρ :溶媒の密度，p :圧力，
μ :溶媒の粘性係数，$\boldsymbol{S}$:揺動ストレステンソル，$\boldsymbol{D}$:圧力勾配ベクトル，Φ :粒子相関数

- $\boldsymbol{\alpha}$:粒子による加速度ベクトル

$$\boldsymbol{\alpha} = \frac{\boldsymbol{v}^p - \boldsymbol{v}}{\Delta t} + (\boldsymbol{v}\cdot\nabla)\boldsymbol{v} - \frac{\mu}{\rho}\nabla^2\boldsymbol{v} - \frac{1}{\rho}\nabla\cdot\boldsymbol{S} + \frac{1}{\rho}\boldsymbol{D}$$

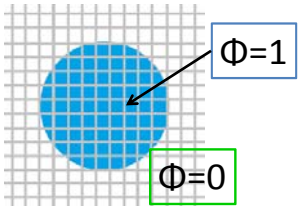
基礎方程式

粒子相関数

- ϕ=0

$$\frac{\partial \boldsymbol{v}}{\partial t} + (\boldsymbol{v}\cdot\nabla)\boldsymbol{v} = -\frac{1}{\rho}\nabla p + \frac{\mu}{\rho}\nabla^2\boldsymbol{v} + \frac{1}{\rho}\nabla\cdot\boldsymbol{S} - \frac{1}{\rho}\boldsymbol{D}$$

- ϕ=1
  場を粒子の速度にする
  $\boldsymbol{v}^p$:粒子の速度



基礎方程式

粒子の運動

- 並進運動

$$m\frac{d\boldsymbol{V}}{dt} = \boldsymbol{F}^{\mathrm{c}} + \boldsymbol{F}^{\mathrm{e}} + \boldsymbol{F}^{\mathrm{v}} + \boldsymbol{F}^{\mathrm{h}}$$

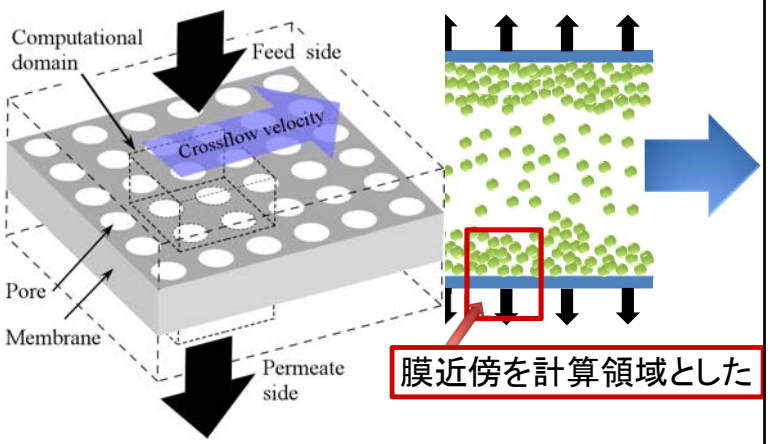
m :粒子の質量
$\boldsymbol{V}$:速度ベクトル
$\boldsymbol{F}^{\mathrm{c}}$:接触力ベクトル
$\boldsymbol{F}^{\mathrm{e}}$:静電力ベクトル
$\boldsymbol{F}^{\mathrm{v}}$:van der Waals力ベクトル
$\boldsymbol{F}^{\mathrm{h}}$:流体力ベクトル

- 回転運動

$$\boldsymbol{I}\frac{d\boldsymbol{\omega}}{dt} = \boldsymbol{T}^{\mathrm{c}} + \boldsymbol{T}^{\mathrm{h}}$$

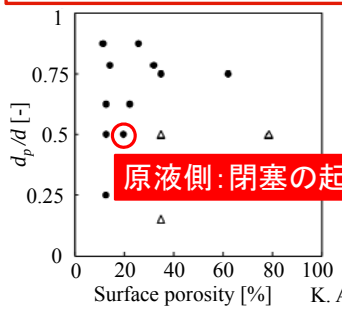
$\boldsymbol{I}$:慣性モーメント
$\boldsymbol{\omega}$:角速度ベクトル
$\boldsymbol{T}^{\mathrm{c}}$:接触トルクベクトル
$\boldsymbol{T}^{\mathrm{h}}$:流体トルクベクトル

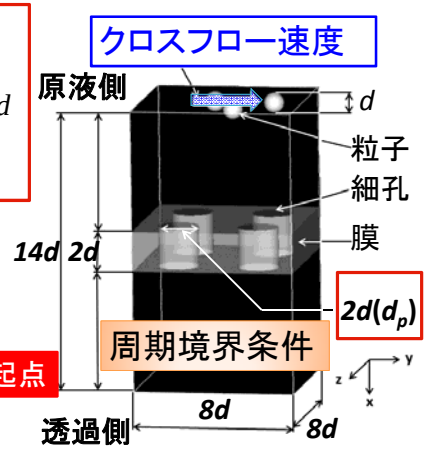
クロスフロー膜ろ過



シミュレーション条件と領域

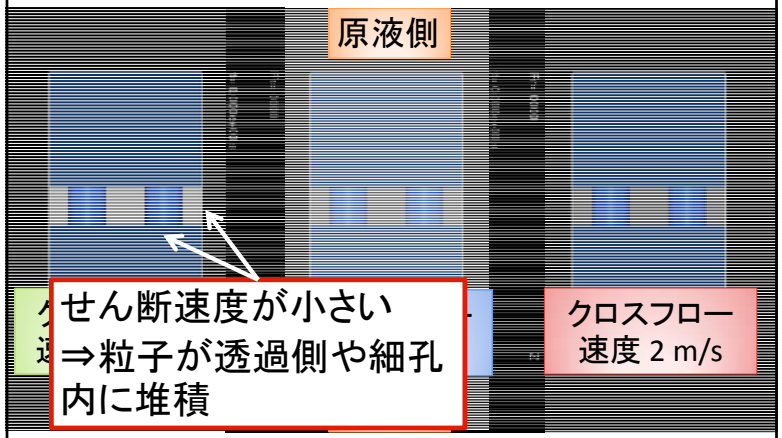
- 粒子径 d : 0.1 [μm]
- 圧力勾配 : 200 [GPa/m]
- 膜厚 d_m:2d, 細孔径d_p :2d
- **クロスフロー速度** :
  0.5, 1, 2 [m/s]



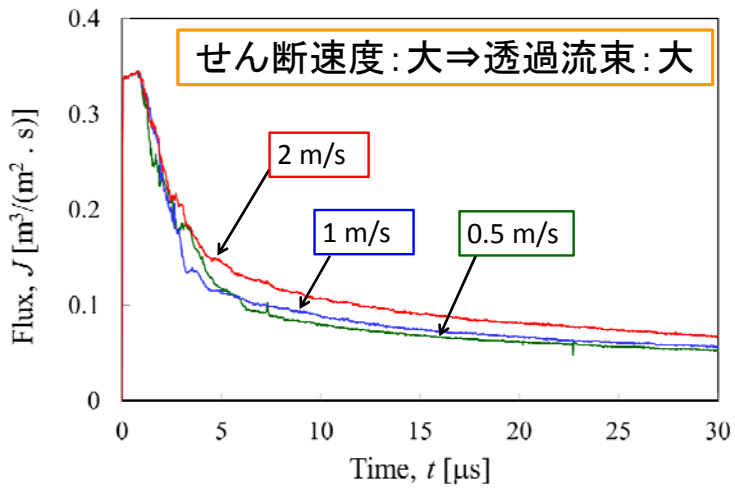


K. Akamatsu *et.al.*, *J. Chem.Eng. Japan*, accepted.

シミュレーション結果

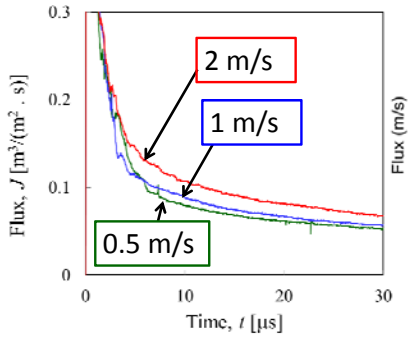


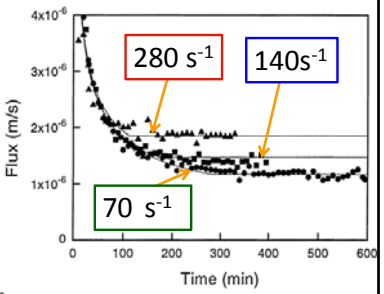
クロスフロー速度と透過流束



実験との比較

17/22





出典：L. Wang, L.Song,
J. Memb. Sci., 160, 1999, 41–50.

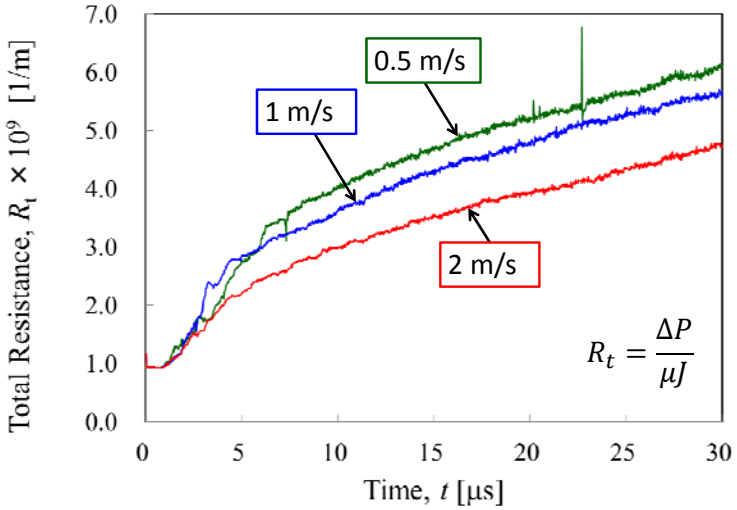
シミュレーション結果

実験結果

せん断速度：大 ⇒透過流束：大

クロスフロー速度と膜抵抗

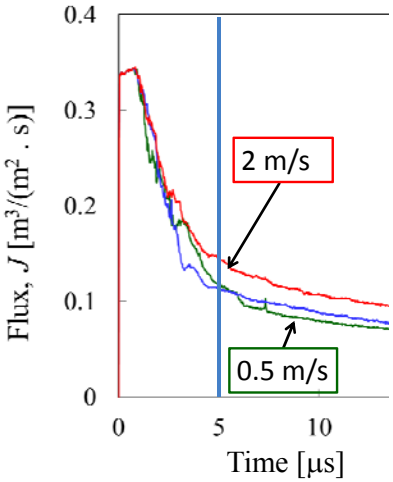
18/22

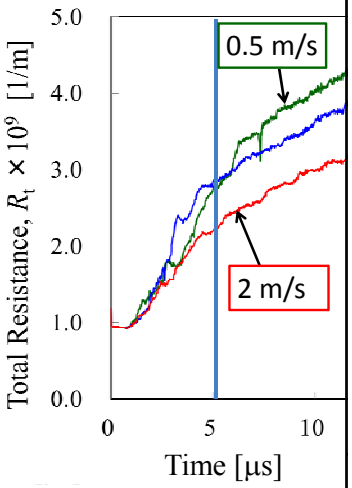


$$R_t = \frac{\Delta P}{\mu J}$$

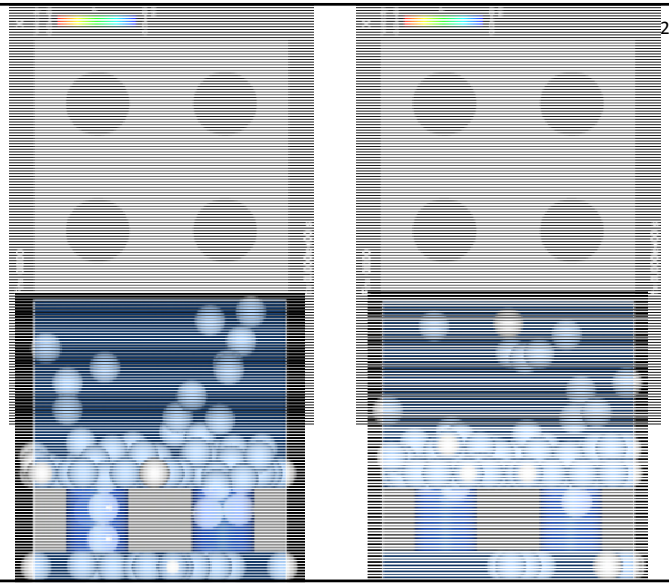
5μsまでの透過流束，膜抵抗

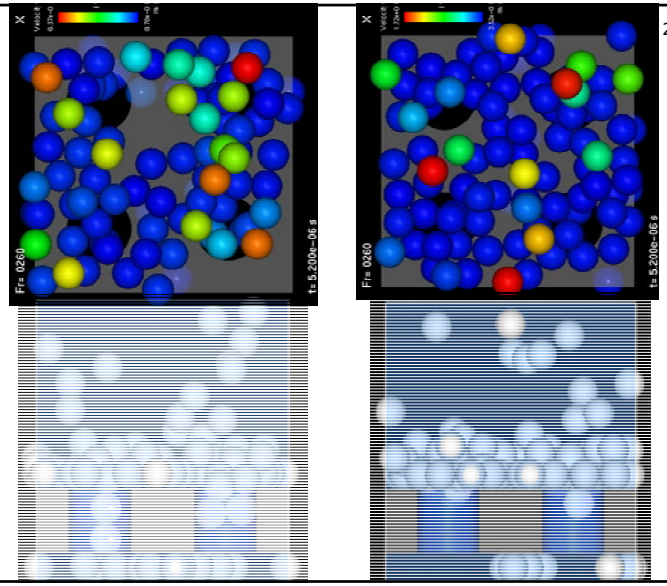
19/22



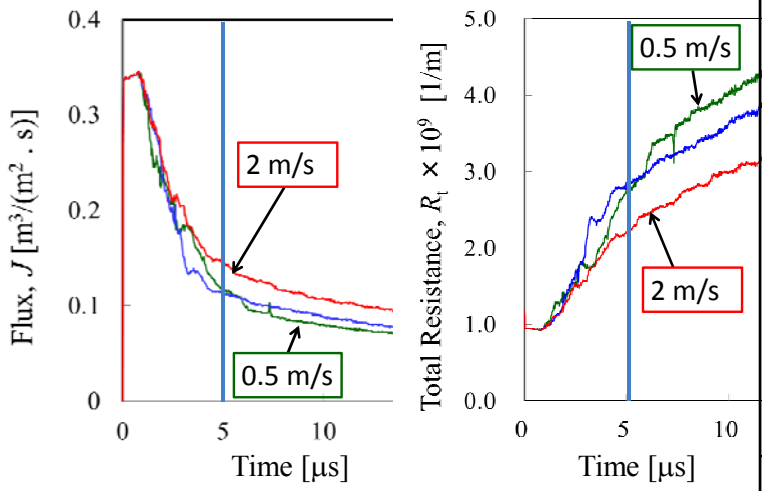


20/22





5μsまでの透過流束，膜抵抗



まとめ

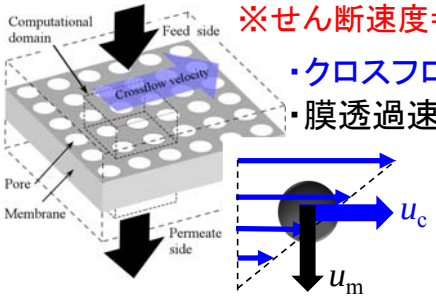
クロスフロー精密ろ過の直接数値シミュレーションを行い，以下の結果を得た．

- 実験と同様，せん断速度が大きい場合に定常透過流束が大きくなる結果を得た．

※せん断速度⇒ファウリング，膜抵抗

・クロスフロー速度：u_c

・膜透過速度（膜間圧力ΔP）：u_m



ファウリングとの相関を調べる必要性あり