

17 May 2002

Biological Fixation/Sequestration of Carbon Dioxide

Toru Sato

Technology for Reduction of CO2

- Energy Saving
- Energy Conversion
- Sequestration/Recycle of CO2
 - Geological Sequestration
 - Ocean Sequestration
 - Biological Sequestration
 - Coral Reef Afforestation
 - Microalgae



Microalgae



photosynthesis - CO2 fixation
valuable products - business chance

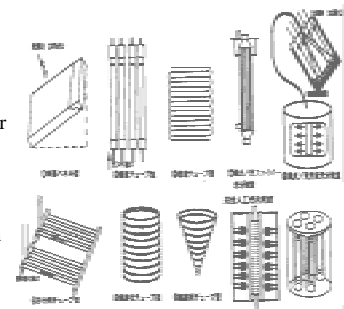
Microalgae	usage
Chlorella Sp.	healthy food
Nanno chloropsis	feed staff (DHA)
Botryococcus braunii	hydrocarbon
Hematococcus	Astaxithantin
Chlorococcum litorale	low pH

Photobioreactor

Efficiency of Photobioreactor

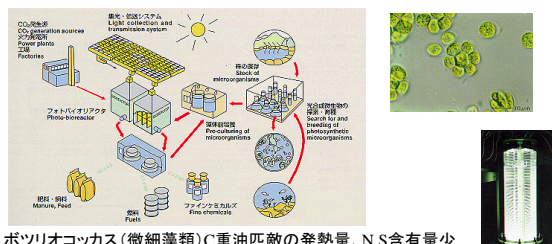
direct link

Efficiency of Sequestration



Recently, electricity companies, heavy industries, chemical companies have been engaged in the development of photobioreactors with high performance

Bioreactor System in Power Plant Proposed by RITE



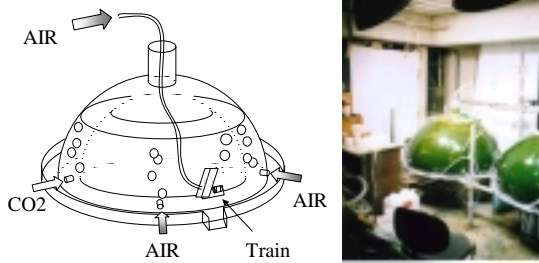
ボツリオコッカス(微細藻類)C重油匹敵の発熱量、N,S含有量少
LNG火力発電所(100万kW)で集光面積20km²、リアクタ体積100万m³
排出の7.4%CO2固定→固形燃料→7.66億kWh/年(1.9%の燃料削減)
→5.5%CO2削減

Objectives

1. Analysis of Existing Bioreactor
2. Invention of New Bioreactor
3. Design of CO2 Recycle System

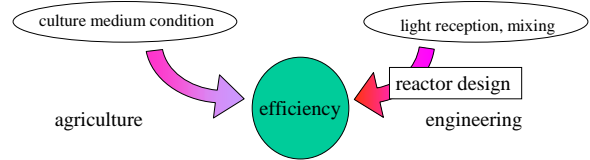
1. Analysis of Existing Bioreactor

Biodome (Microgaia Co. Ltd)



Elements associated with Efficiency

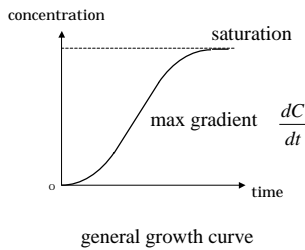
- sunlight reception
- mixing (global, local)
- culture medium condition (temperature, pH, salinity, etc)



Growth Curve

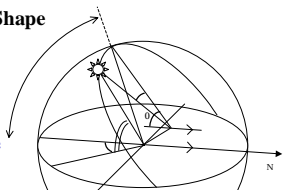
Maximum Efficiency = Growth Rate

$$V \frac{dC}{dt} \quad V: \text{reactor capacity}$$



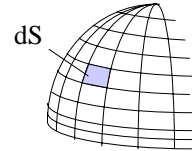
Light Reception and Reactor Shape

modelling of the movement of the sun with respect to season, daytime, and latitude



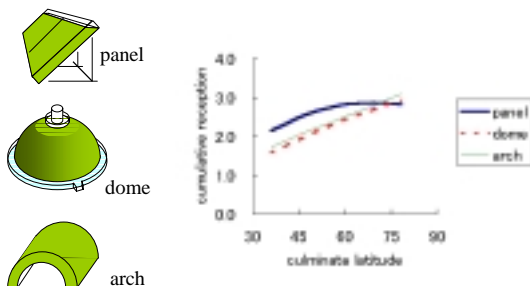
altitude of the sun λ
direction β

$$\text{reception} = \int_{\text{sun rise}}^{\text{sun set}} \int_{\text{area}} I(\lambda, \beta, S) d\theta dS$$



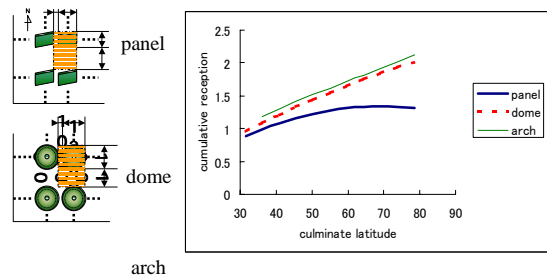
Ex. Comparison of Various Reactors in Reception in a Day

(at unit land area of **single reactor**, the north latitude 35 deg.)



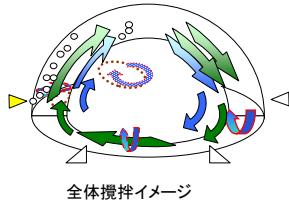
Ex. Comparison of Various Reactors in Reception in a Day

(at unit land area for **mass production**, the north latitude 35 deg.)



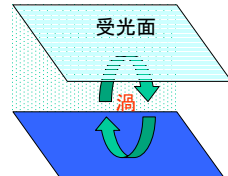
攪拌と生産性の関係

全体攪拌



全体攪拌イメージ

局所的攪拌(渦)



局所的攪拌イメージ

この2種類の攪拌を分離して考える

ドーム型バイオリアクターを用いた可視化実験

(目的、観測項目)

・トレーサー実験

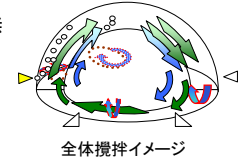
全体攪拌の状態

滞留の有無、渦の生成の有無

・タフト実験

全体攪拌による対流

内層と外層の流れの相違

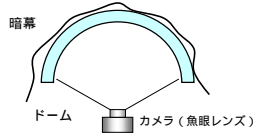


全体攪拌イメージ

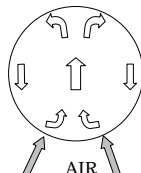
トレーサー実験

・実験方法

培地内にトレーサーを入れて魚眼レンズで内部から撮影



写真撮影例

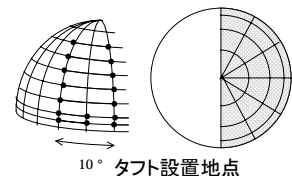


スケッチ例

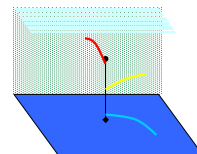
タフト実験

・実験方法

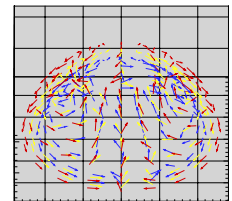
内部に3色のタフトを設置しトレーサーと同様に魚眼レンズで撮影



10° タフト設置地点



タフトイメージ

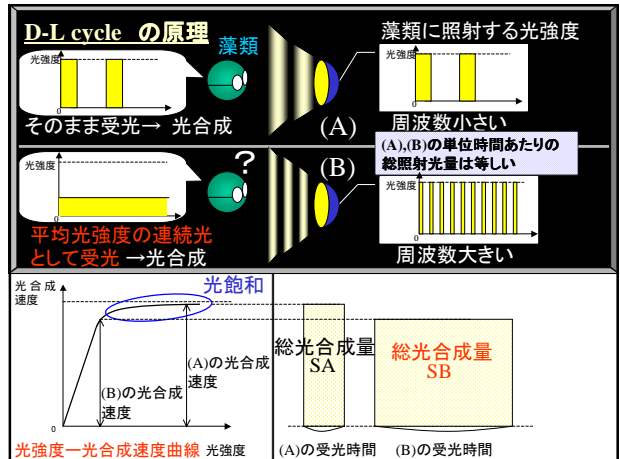
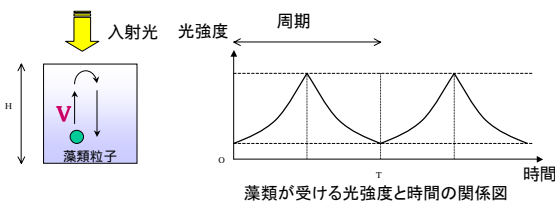


実験結果例

2) 局所的攪拌(渦)

渦により藻類が受ける光強度の強弱が周期的に変化する
→ D-L (ダークライト) cycle により光合成効率増加

局所的攪拌(渦): 性能向上を促進する役割



D-L cycle による生産性向上効率を数値モデル化

平均化の割合を表す係数 Γ ($0 \leq \Gamma \leq 1$)

$$\Gamma = \frac{0.972\nu}{0.67 + \nu}$$

ν : 周波数 (Terry KLらによる) 周波数が大きいほど光を平均化する割合が増加

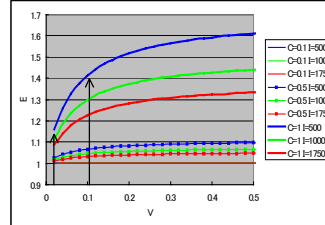
※式はクロレラの実験によるもの
成長率上昇係数E

$$E = \frac{\text{成長量}(D-L\text{cycle効果あり})}{\text{成長量}(D-L\text{cycle効果なし})} = \frac{(1-\Gamma)SA + \Gamma SB}{SA}$$

周波数が大きいほどD-L cycleによる効果大

D-L cycle による生産性向上効率を数値モデル化

D-L cycleによる成長率上昇係数E と渦流速Vのグラフ



例)ドーム型バイオリアクターの渦流速

V=0.02(m/s)
(AIR 40L/min)

(※PIV実験より)

V=0.1(m/s)
(AIR 70L/min)

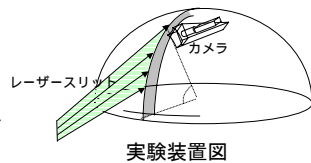
C=1(g/L)、I=500($\mu\text{ mol/m}^2/\text{s}$)において、成長率は約1.21倍となる。

局所的攪拌(渦の生成、渦流速)の重要性

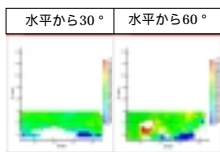
PIV実験

・実験方法

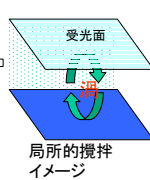
培地にトレーサーを入れ、PIVにより渦流速測定



実験装置図



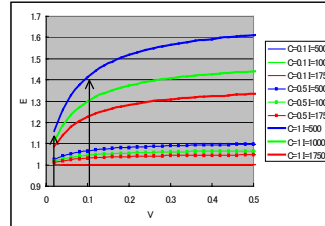
実験結果例



局所的攪拌イメージ

D-L cycle による生産性向上効率を数値モデル化

D-L cycleによる成長率上昇係数E と渦流速Vのグラフ



例)ドーム型バイオリアクターの渦流速

V=0.02(m/s)
(AIR 40L/min)

(※PIV実験より)

V=0.1(m/s)
(AIR 70L/min)

C=1(g/L)、I=500($\mu\text{ mol/m}^2/\text{s}$)において、成長率は約1.21倍となる。

局所的攪拌(渦の生成、渦流速)の重要性

培養実験(2)

目的: 局所的攪拌の強度による生産性変化の実証

培養装置: 培養実験(1)と同様

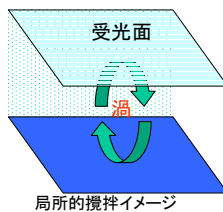
培養条件

AIR流量: 40L/min

70L/min

攪拌方法: 従来の攪拌方法

他は培養実験(1)と同様



局所的攪拌イメージ

実験結果

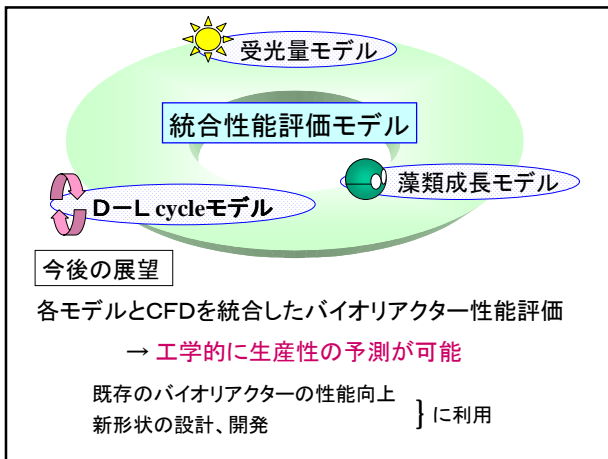
攪拌強度	空気流量 40 L /min	空気流量 70 L /min
成長速度 (平均)	0.0532g/L/day	0.195g/L/day

攪拌強度の増加 → 生産性の向上

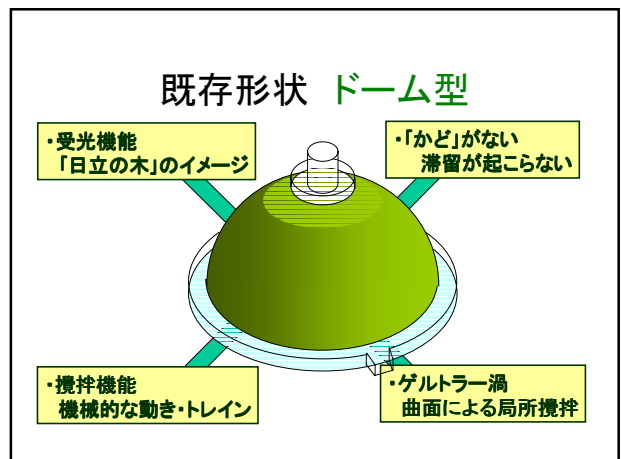
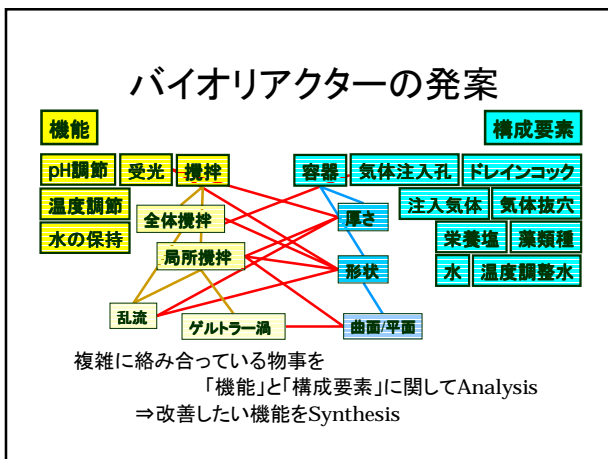
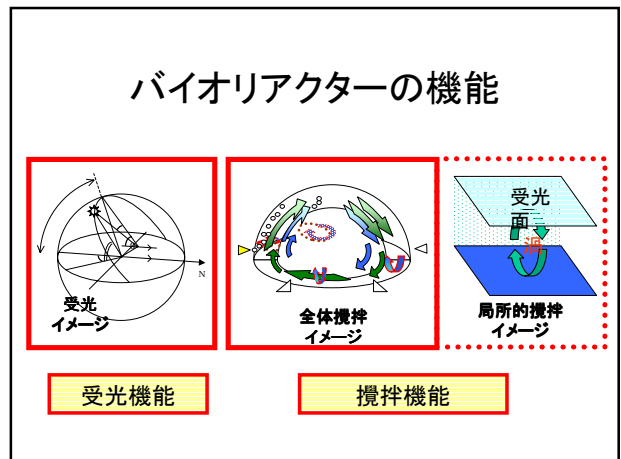
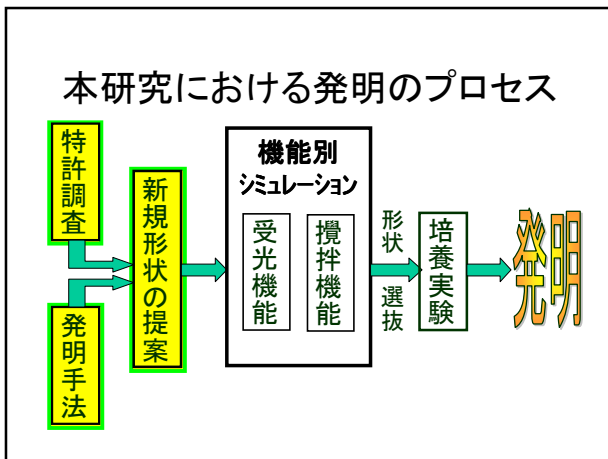
攪拌が生産性に大きく影響を与えることが確認された

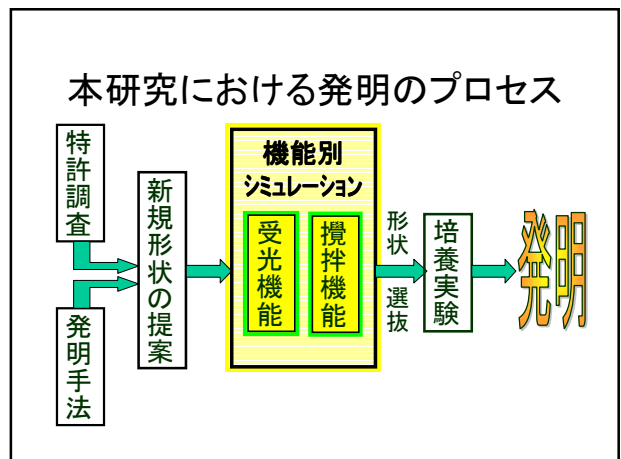
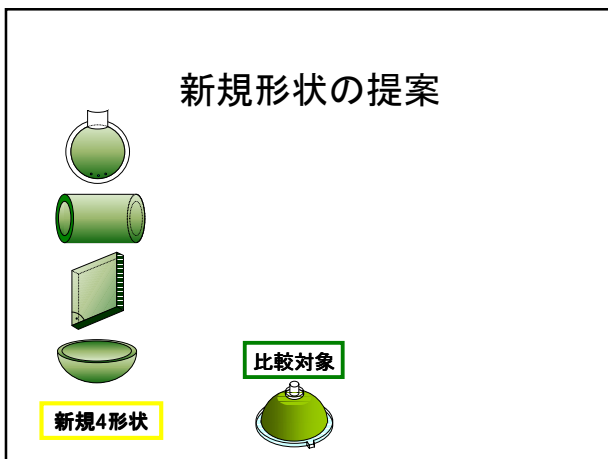
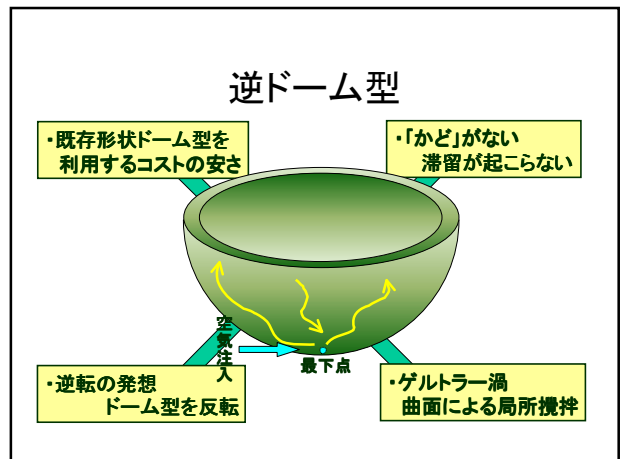
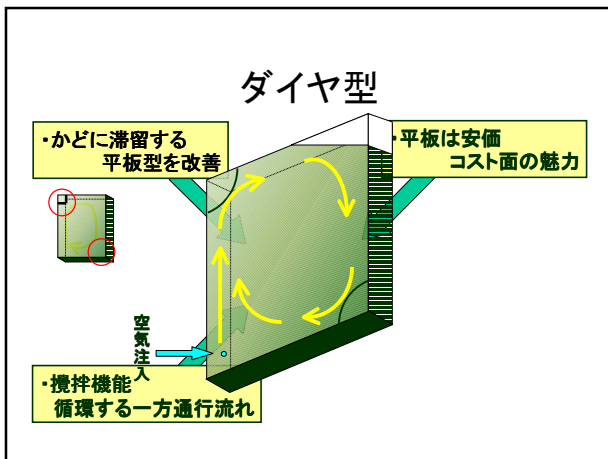
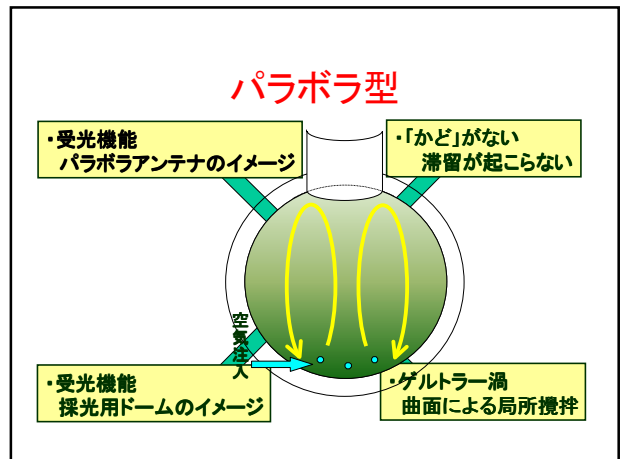
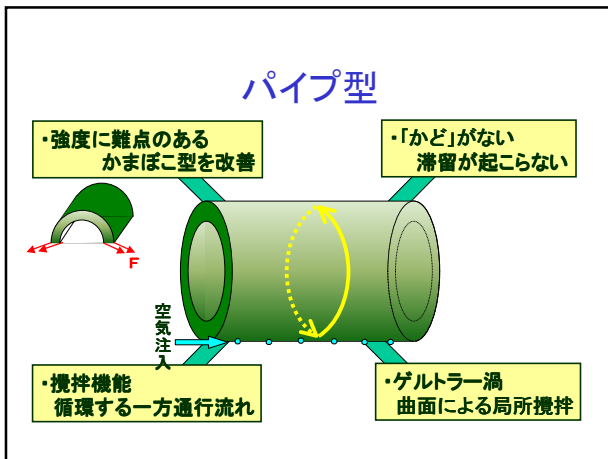
攪拌と成長率に関してD-L cycleモデルと傾向が一致

→ 攪拌モデルの信頼性



- Objectives
1. Analysis of Existing Bioreactor
 2. **Invention of New Bioreactor**
 3. Design of CO2 Recycle System



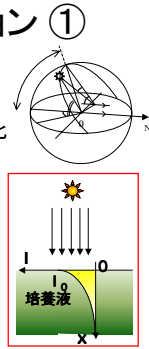


バイオリアクターの機能別シミュレーション ①

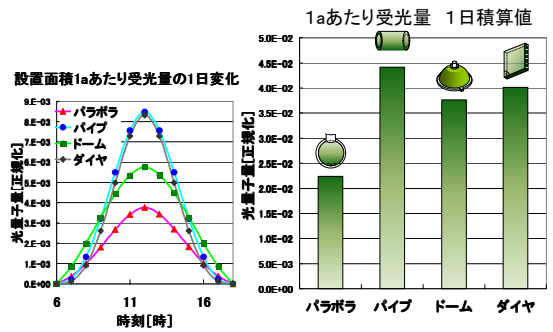
• 受光機能

1. 太陽の日変化による日射角度の変化
2. 大気透過による減衰
3. 太陽方向培養液厚さによる減衰

光量子量を日分積算
↓
1日積算総受光量



受光量評価 光量子量積算



バイオリアクターの機能別シミュレーション ②

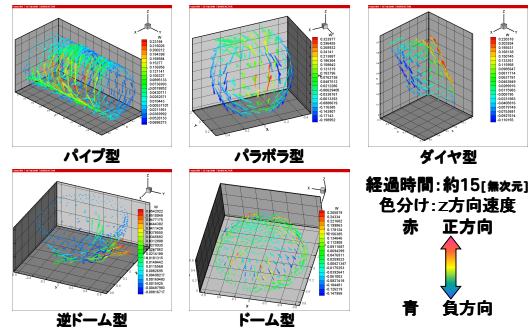
• 攪拌機能 非構造格子CFD

- 2相流モデル
 - 液相の運動方程式: NS式
 - 気相の運動方程式: 抗力・揚力・付加質量を考慮
 - 気相・液相の質量保存則: ボイド率の輸送

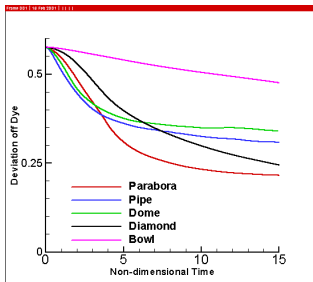
- 攪拌評価パラメータの考案

1. 染料(乱数)拡散
 2. 光量子拡散
- 流動物質の標準偏差: 小 ⇒ 攪拌力: 大

攪拌の様子 速度ベクトル図



攪拌評価 1. 染料拡散



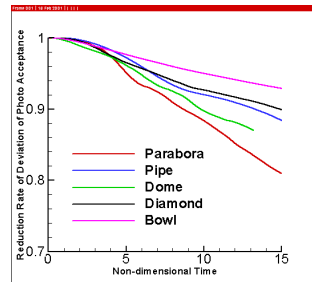
拡散の式:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + u_j \frac{\partial C}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\nu_j}{S_c} \frac{\partial C}{\partial x_j} \right) + \Gamma$$

$$C_0(L) = \text{RandomNumber}$$

$$\Gamma = 0$$
 C: 染料 とみなす
 液相の流れによって拡散
 ↓
 標準偏差
 ↓
 1位 **パラボラ型**

攪拌評価 2. 光量子拡散

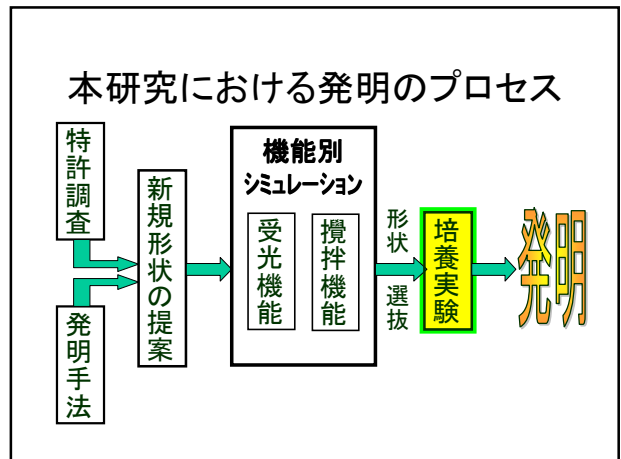
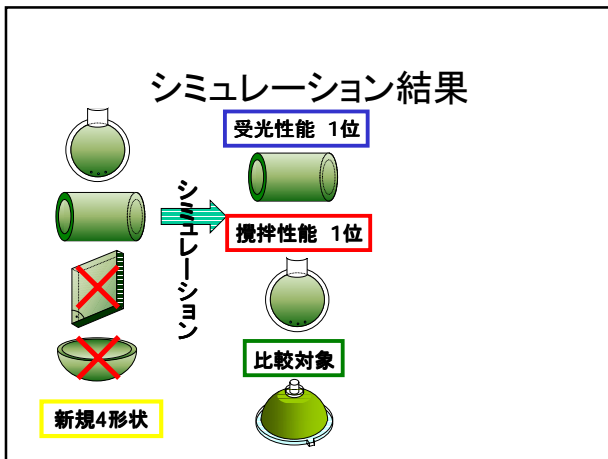


拡散の式:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + u_j \frac{\partial C}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\nu_j}{S_c} \frac{\partial C}{\partial x_j} \right) + \Gamma$$

$$C_0(L) = 0$$

$$\Gamma = I_0 \exp(-kcx)$$
 C: 光量子量 とみなす
 液相の流れによって拡散
 ↓
 標準偏差
 ↓
 正規化
 1位 **パラボラ型**



培養実験

実験形状: **パラボラ型**・パイプ型・ドーム型

期日: 2001年1月12日~1月24日

場所: ヤマハ発動機株式会社(静岡県磐田市)

培養藻類: クロロコッカムリトリアライ



実験条件

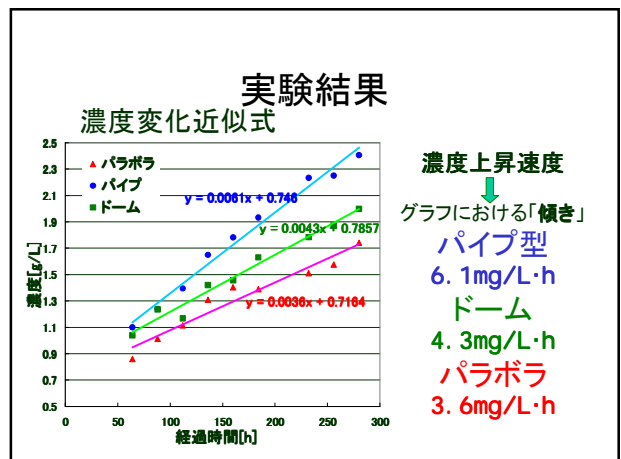
- 培養液量: ドーム型 130L; パイプ型 70L; パラボラ型 70L
- 気体注入量:
 - ドーム型 60L/分; パイプ型 31L/分; パラボラ型 31L/分
- 気体注入時間: AM6:00-PM6:00
- 培地: MC培地 人口海水を使用
- 初期濃度: 1.0g/L
- 設置方角: 真南向き
- 温度調整設定温度: 25°C

MC培地 成分表

薬品名	薬品量	薬品名	薬品量
KNO ₃	1.25mg/L	AS-solution	1ml/L
KH ₂ PO ₄	1.25mg/L	Fe-solution	1ml/L
MgSO ₄ ·7H ₂ O	1.25mg/L	30%希釈人口海水	1000ml

人口海水 成分表

薬品名	薬品量	薬品名	薬品量
NaCl	35.1g/L	MgSO ₄ ·7H ₂ O	6.0g/L
MgCl ₂ ·6H ₂ O	5.0g/L	CaCl ₂ ·2H ₂ O	1.5g/L
KNO ₃	1.0g/L	KH ₂ PO ₄	0.07g/L
EDTA·2Na	18.0mg/L	FeCl ₃ ·4H ₂ O	2.4mg/L
ZnCl ₂	4mg/L	H ₃ BO ₃	60mg/L
CuCl ₂ ·6H ₂ O	2mg/L	CuCl ₂ ·2H ₂ O	4mg/L
MnCl ₂ ·4H ₂ O	40mg/L	(NH ₄) ₂ MoO ₄	37mg/L



培養成績評価

- 設置面積 1aあたりの藻体生産量 $A \times B$

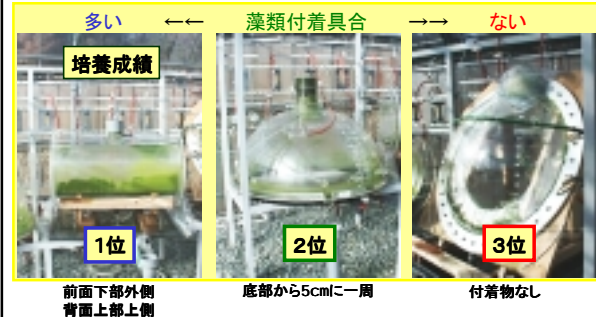
	占有面積	A.設置台数	濃度上昇率	B.藻量増加	A×B全藻量増
パイプ	1.50m ² /台	66.7台/a	6.1mg/L・h	427mg/台・h	28.3g/a・h
ドーム	2.86m ² /台	35.0台/a	4.3mg/L・h	516mg/台・h	18.1g/a・h
パラボラ	1.56m ² /台	63.7台/a	3.6mg/L・h	252mg/台・h	16.1g/a・h

基準: 設置面積あたり気体注入量

- **パイプ型**が最も優秀
- 攪拌性能の高かった**パラボラ型**は苦戦

実験後の装置

藻類付着

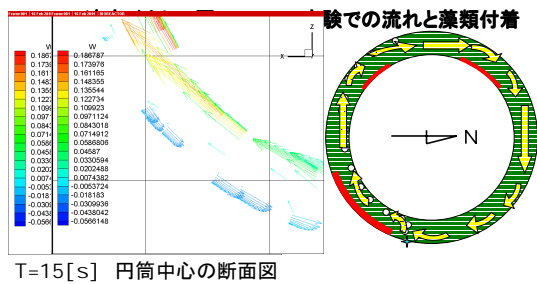


1位
前面下部外側
背面上部上側

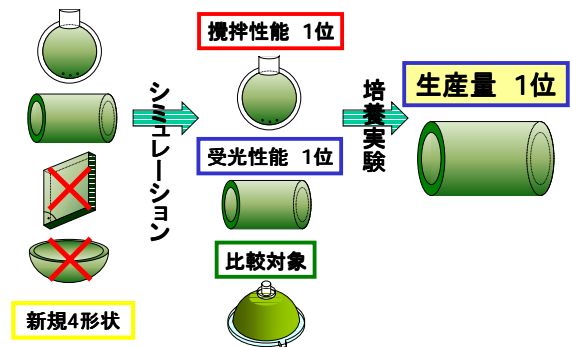
2位
底部から5cmに一周

3位
付着物なし

パイプ型流れの様子 断面図に見る



新規形状バイオリアクターの発明



結論

高効率なバイオリアクターを発明

パイプ型:ドーム型対比

57%upの生産量

- 特許の取得のために
- パイプ型にできた
藻類付着の解消



Objectives

1. Analysis of Existing Bioreactor
2. Invention of New Bioreactor
3. Design of CO2 Recycle System

太陽エネルギーを利用したCO2固定

バイオリクターの場合

燃料となる微細藻類を生産し、代替燃料にすることにより消費されるはずであった化石燃料からのCO2排出を抑える。いわばCO2をリサイクルする。

太陽光発電の場合

電力を生産し、消費されるはずであった化石燃料からのCO2排出を抑える。

今回比較するシステム

- ・バイオリクターシステム → 面積が必要 → **海外の砂漠**
- ・太陽光発電システム → 送電ロスの問題 → **国内都市部**

	砂漠におけるバイオリクターシステム	都市部太陽光発電
設置場所	中国 砂漠	国内都市部 設備の屋根
土地制約	広大な土地利用化	制約大
CO2固定形態	中国の石炭発電に換算	東京電力の実績に換算

バイオリクターによる遠隔地型CO2固定システムの概要

排出権取引を前提として海外の広大な土地を利用。

- ・C重油相当の発熱量をもつポツリオコッカスを固体燃料として生産する。
- ・現在有効利用されていない砂漠でCO2固定を行う。
- ・生産に必要なエネルギーは太陽光発電システムを設置してまかなう。

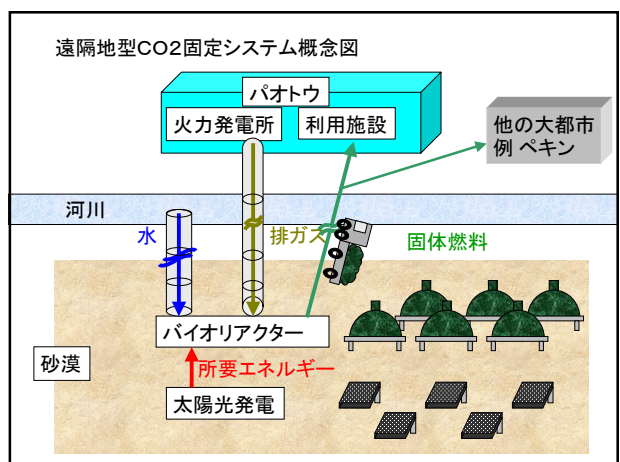
試算条件

用いる藻類 ポツリオコッカス。発熱量は8900kcal/kg、成長速度は現在の実験での最高データ、0.527g/L/dayが達成できるとする。

CO2固定量 ・ポツリオコッカスでは現地中国での炭素排出比 1.47 kg-CO2/kWh(電力)
 ・太陽光は東京電力の炭素排出比 0.31kg CO2/kWh (電力)を用いる。

システムの稼働率 バイオリクターシステムは90%
 太陽光発電システムは100%

所要エネルギー 化石燃料を用いる藻類運送エネルギー以外は太陽光発電から得る。



システムのエネルギー収支 設置面積 1km²あたり
単位 kWh

	バイオリアクター	太陽光
A 運転エネルギー	2.0E+7	
B CO ₂ 供給エネルギー	2.4E+5	
C 水供給エネルギー	1.5E+4	
A～C小計 (太陽光発電でまかなう)	2.0E+7	
D 藻類運送エネルギー	2.5E+5	
E 生産するエネルギー	8.2E+7 熱	10.3E+7 電力
F 総生産エネルギー (E-D)	8.2E+7 熱	10.3E+7 電力

システムの面積と生産エネルギー

	バイオリアクター	太陽光
A 設置面積 km ²	1	1
B 太陽光発電設置面積 km ²	0.116	—
C 全体面積 km ² (A+B)	1.116	1
D 総生産エネルギー kWh/year	8.2E+7 熱	10.3E+7 電力
E エネルギー生産性 kWh/km ² /year (D/C)	1.98E+7 電力	10.3E+7 電力
F 電力比 CO ₂ 排出量 kg-CO ₂ /kWh(電力)	14.7 中国石炭発電	0.35 東京電力
G CO ₂ 固定量 t/km ² /year (E×F)	29100	31900

システムのコスト試算

設置面積 1km²あたり

	バイオリアクター	太陽光発電
A 年間 CO ₂ 固定量 t/year	29100	31900
B 初期コスト 億円	724	1240
C 年間経済収支 億円	-15.6	+1.5
D 年間必要経費 億円(B/20年-C)	42.6	60.5
E CO ₂ 固定経費 円/kg-CO ₂ (D/A)	145	190

遠隔地型バイオリアクターシステムの可能性

1990年の94%という目標値を達成するためには1998年度の排出量の11.5%、1.38億t-CO₂を削減しなければならない。



すべてバイオリアクターシステムで削減すると仮定

1.38億tを削減するのに 4,742km²の面積(日本面積の1.2% ゴビ砂漠の0.36%)で削減できる計算。

遠隔地型バイオリアクターシステムの可能性
他の削減方法との比較

固定方法	固定コスト 円/kg-CO ₂	利点	問題点
海洋隔離	8.7	大量 安価	深海生態系への影響, 国際法
地中隔離 植林	11 17~	大量 安価	安全性、地下環境の変化 経済活動との摩擦、食糧問題との競合
本システム	145	土地有効利用 コストダウンの可能性	コスト
都市での太陽光発電	190	電力生産	土地確保, コスト
砂漠植林による局所的気候変化	—	土地有効利用	コストパフォーマンス不明
海洋栄養散布	—	大規模	コストパフォーマンス不明

Conclusions

1. Analysis of Existing Bioreactor
2. Invention of New Bioreactor
3. Design of CO₂ Recycle System