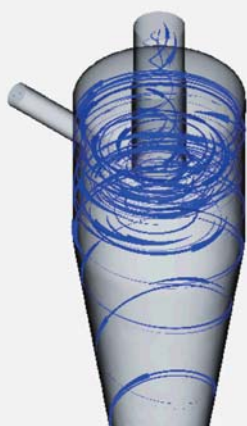


- エアリフトポンプの自由表面流解析
- 毛細管現象と土壌への透水現象の解析事例
- 水上ライドの解析事例
- 石油タンクのスロッシング現象
- はんだの溶融解析事例
- サンドセパレータの解析事例
- 防雪林の解析事例
- 噴霧エアノズルと噴霧燃焼の解析事例
- 噴霧・塗布ノズルと枚葉式洗浄機の解析事例
- 静電スプレーガンの解析事例
- デフロスタの解析事例
- 洗濯物の浴室乾燥
- 天然氷の凝固・融解解析事例
- 冷凍ブロックの流水解凍



Analysis Case Studies

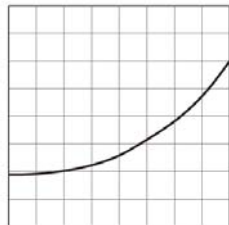
# 解析事例集—混相流編



# エアリフトポンプの自由表面流解析

『STREAM®』を利用し、エアリフトポンプをMARS法で自由表面流解析

## 自由表面流解析



### 界面捕獲法 (Interface Capturing Method)

界面を表す関数を移流させることにより界面挙動を解析。MAC (Marker and Cell) 法、Level Set 法、VOF (Volume of Fluid) 法、MARS 法など。

## エアリフトポンプの自由表面流解析

井戸や温泉の汲み上げ、浄化槽などの揚水で利用されるエアリフトポンプを、界面捕獲法であるMARS (Multi-interface Advection and Reconstruction Solver) 法で自由表面流解析を実行。

## エアリフトポンプの仕組み

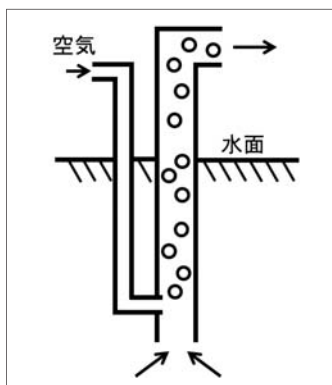


図1 エアリフトポンプ

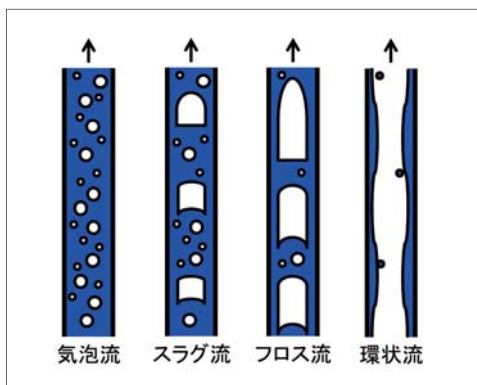


図2 管内の気液二相流の流動様式

- 図1のように下部を水面下に設置した管(揚水管)に空気を流入させると、管内の水が空気と混合し、比重が小さくなり上に押し上げられる。
- 揚水量は空気流入量、浸水深さ、揚水高さから経験式で求まるが、目的により曝気(エアレーション)を促進する場合と、促進しない場合があるため、揚水管内の気液二相流の流動様式(図2)を把握する必要がある。
- 様々な制約により可視化実験ができないこともあり、流体シミュレーション解析で流動様式が把握できれば有効である。

## 解析モデル

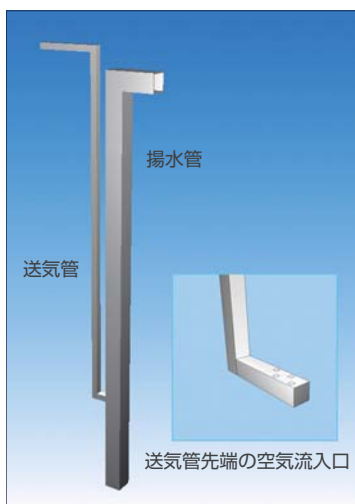


図3 解析したポンプ

揚水管	5 cm幅矩形
送気管	2 cm幅矩形
流入口	4ヶ所、千鳥配置
空気量	流入口1ヶ所あたり25 L/minで0.1秒毎に流入

ポンプを1m浸水させて水面から10 cm高い位置の容器に水を汲み上げる。

## 解析結果



図4 等値面図

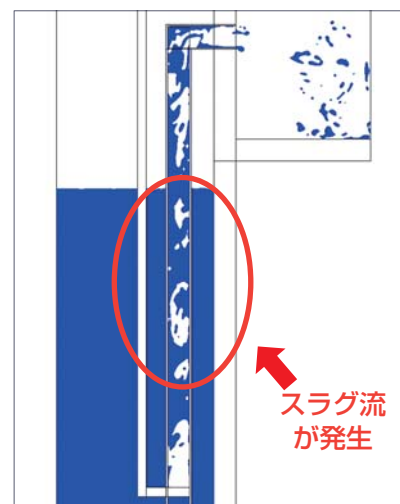


図5 気液分布図

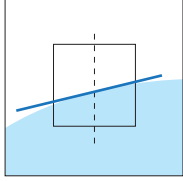
## comment

気液界面を等値面として可視化しました(図4)。空気が混合した水が揚水され、水しぶきとなって容器に注水される様子が再現されています。図5は揚水管内の中心断面における気液分布図です。青色が水を表しています。この図から、揚水管内がスラグ流だと推定することができます。

# 毛細管現象と土壌への透水現象の解析事例

『STREAM®』を利用し、毛細管現象と土壌への透水現象をMARS法で解析

## VOF (Volume of Fluid) 法

F値の分布例			ドナーアクセプター法			MARS法		
0.0	0.4	0.9	0.0	0.4	0.8			
0.3	1.0	1.0	0.3	1.0	1.0	界面勾配を1次関数で近似する		
0.6	1.0	1.0	0.7	1.0	1.0	界面形状の再現性が高い		

F値を厳密に保存 ▶ 界面は矩形で表現されてしまう

界面勾配を1次関数で近似する ▶ 界面形状の再現性が高い

**VOF法とは…**

- 解析領域の各要素に占める流体の体積率をF値 ( $0 \leq F \leq 1$ ) として定義し、この輸送方程式を解くことにより界面を求める自由表面流解析法。
- F値が0であれば1番目の流体(例えば空気)、F値が1であれば2番目の流体(例えば水)として、それぞれの物性(密度や粘度など)を考慮する。

## 毛細管現象の解析事例

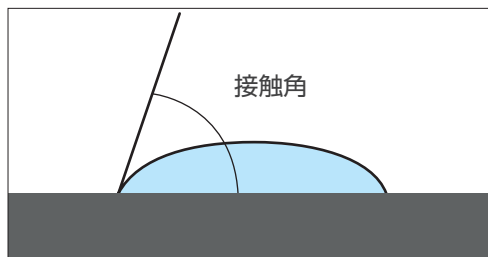


図1 接触角

**接触角とは…** 壁面と流体の自由表面との角度(図1)。接触角が小さければ壁面は濡れやすい性質(親水性)、接触角が大きければ壁は濡れ難い性質(撥水性)になる。

## 解析結果

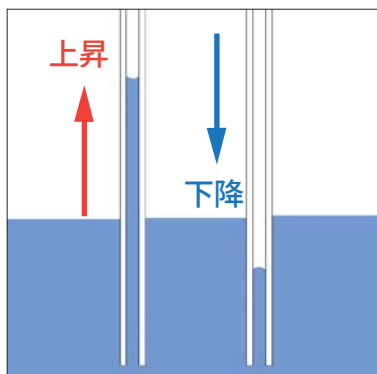


図2 毛細管 平板の接触角60°の親水性壁面(左)  
平板の接触角120°の撥水性壁面(右)

毛細管現象により親水性壁面を有する平板内では水面が上昇し、撥水性壁面を有する平板内では水面が下降する。このように接触角により流体の挙動は大きく変化する。

## 土壌への透水現象

### 解析モデル(土壌断面)

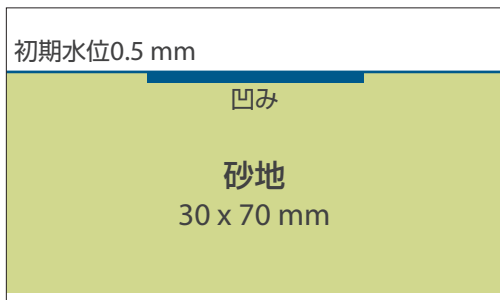


図3 解析対象

深さ	30 mm
幅	70 mm
中央部の凹み	深さ1 mm
空隙率	0.15(砂地、樹脂)
接触角	90°(樹脂)
ダルシー係数	$5 \times 10^{-10} \text{ m}^2$ (空隙率を0とした場合の浸透率に相当)
初期条件	一様な高さ0.5 mmの水位 (中央部の高さは1.5 mm)

### 解析結果



図4 砂地への透水



図5 砂地への透水(樹脂設置)

### comment

図4は2秒後の解析結果です。見かけの透水速度は中央部で約10 mm/sになります。図5は砂地の保水性を高めるためにダルシー係数を2桁小さくした樹脂を深さ5 mmに一部設置した解析結果です。樹脂により透水が妨げられている様子が再現されています。

# 水上ライドの解析事例

『SCRYU/Tetra®』を利用し、水上ライドの移動をVOF法と重合格子で解析

## VOF法と重合格子

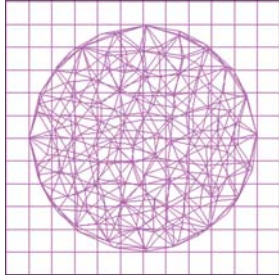


図1 重合格子

- 最新の流体シミュレーション解析ソフトウェアでは、VOF法と他の解析機能との組み合わせが可能となり、物体の移動を考慮した自由表面流などが解析できるようになった。
- 重合格子(overset grid)は、移動領域と静止領域の各要素を重ね合わせる方法。要素を再生成する必要がないため、プログラムが複雑にならないことや計算安定性が維持できる。

## 解析内容

### 解析モデル

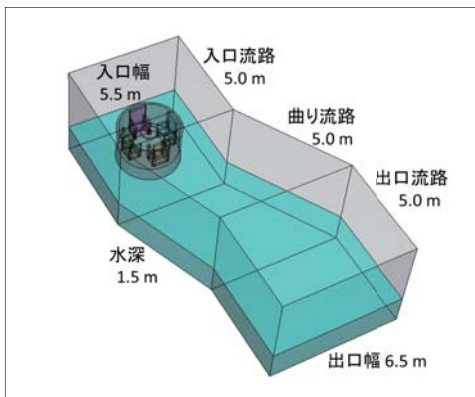


図2 曲がり流路

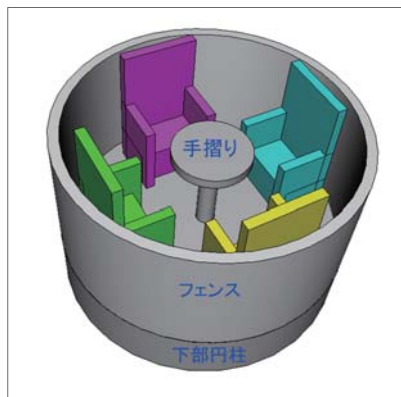


図3 ライド

乗車人数	大人4名
イス	4脚(乗客の体重を考慮し1脚あたり86 kg)
直径	3 m
密度	360 kg/m <sup>3</sup> (下部円柱とフェンス)
移動	6 DOF (6 Degrees of freedom)

水流からライドが受ける力を考慮し、並進および回転させる。

## 解析結果

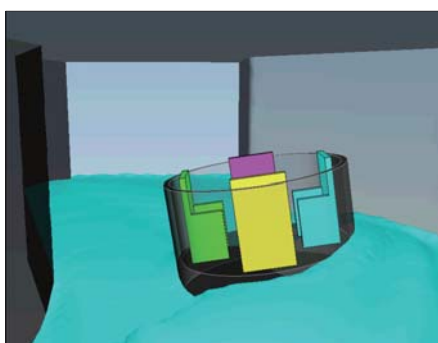


図4 ライドの水上移動3秒後(速度6 km/h)

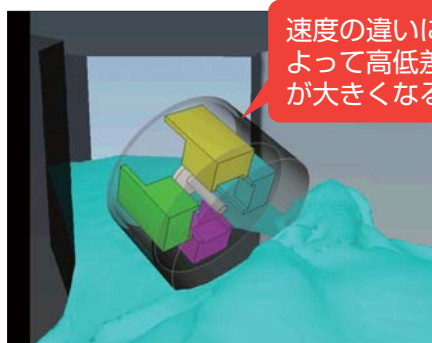


図5 ライドの水上移動3秒後(速度7 km/h)

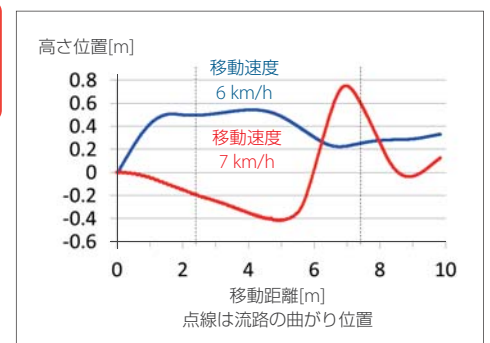


図6 移動距離に伴うライドの高さ位置

## comment

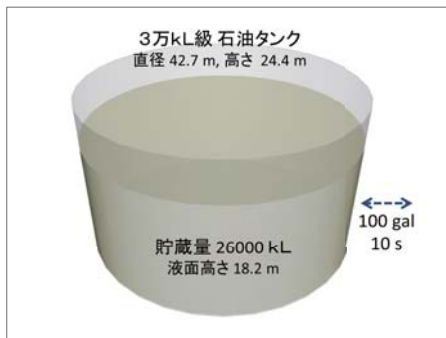
図4は水上移動するライドの速度が約6 km/hの場合の解析結果です。ライドは水上を揺れながら移動します。図5は水上移動するライドの速度が約7 km/hの場合の解析結果です。ライドは転覆こそしませんが、傾きが大きく乗客の安全が保障できません。図6は移動距離に伴うライドの高さ位置を表しています。ライドの移動速度が6 km/hの場合では10 mで0.54 m、7 km/hの場合では10 mで1.2 mの高低差となります。解析結果から、ライドの移動速度が6 km/hの場合でも、かなり大きなアップダウンのあるウォーターアトラクションであることが分かります。

# 石油タンクのスロッシング現象

『STREAM®』を利用し、石油タンクのスロッシング現象を解析

## 石油タンクの解析事例

### 解析モデル



石油貯蔵量	26,000 kL (密度740 kg/m <sup>3</sup> , 粘度0.0026 Pa·s, 表面張力係数0.020 N/m)
横揺れ	・ 100 gal(震度5相当, 加速度1 m/s <sup>2</sup> ) ・ 10秒間継続 ・ 周期は長周期地震動として5秒
要素数	1,306,800(直交格子)

- ・ MARS法(Multi-interface Advection and Reconstruction Solver法) で実時間60秒を解析。
- ・ 時刻刻みはクーラン数0.9を超えないように自動設定。

図1 30,000 kL級石油タンク

### 計算時間の短縮を検討

**(1) 対称面設定**  
図のように対称面を設定し要素数を653,400に軽減。これにより計算時間は52%短縮。

**(2) 並列計算**  
2並列計算を行った場合、計算時間はさらに47%短縮。

**(3) 部分的な要素粗化**  
液面の高低差が最大になる時の界面付近より下部の要素を粗く設定すると、要素数は505,296となり、計算時間を23%短縮。

**(4) 1流体設定**  
プログラムコードによっては1流体設定が可能。スロッシング解析で1流体設定すると計算時間を30%短縮できる。

← 計算時間が4時間から約30分に  
初期設定から**86%**の短縮 →

### 解析結果



図2 最大液面高さ 周期5秒・13秒後(左)、周期4秒・15秒後(中央)、周期2秒・17秒後(右)

### comment

図2は100 galの横揺れ周期を変更して計算した結果です。左は周期5秒、中央は周期4秒、右は周期2秒の最大高さの図です。周期5秒では、スロッシングの固有周期と近いために共振現象が起きていることがわかります。

# はんだの溶融解析事例

『SCRYU/Tetra®』を利用し、リフローはんだ付けの作業プロセスを解析

## はんだの溶融解析事例

### 解析モデル

基板上的の2カ所のランド部にクリームはんだを塗布し、VOF法を使って角形チップ抵抗器を配置。

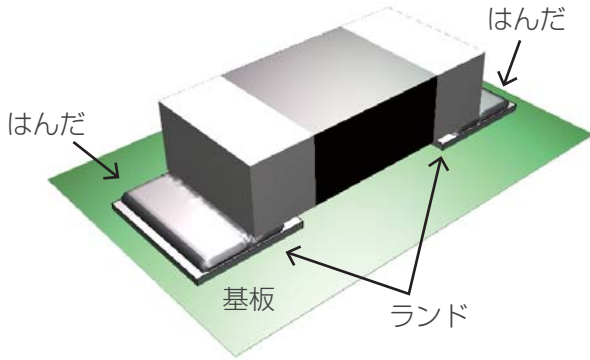


図1 0402サイズ チップ抵抗器

チップ抵抗器	長さ 0.4 mm 幅 0.2 mm
溶接はんだの粘性係数	100 ~ 0.020 ~ 100 Pa·sに 変化させることで溶融を表現
溶接はんだの密度	8000 kg/m <sup>3</sup>
表面張力	0.40 N/m
ランドやチップ抵抗器との接触角	30°

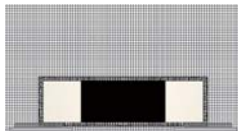


図2 重合格子

- ・チップ抵抗器を囲む移動領域と、静止領域の各要素と重ね合わせる重合格子 (overset grid) を設定。
- ・チップ抵抗器の移動は6DOF (6 Degrees of freedom)。運動方程式を解析することにより、溶融はんだから受ける力を考慮して並進および回転。

## 解析結果

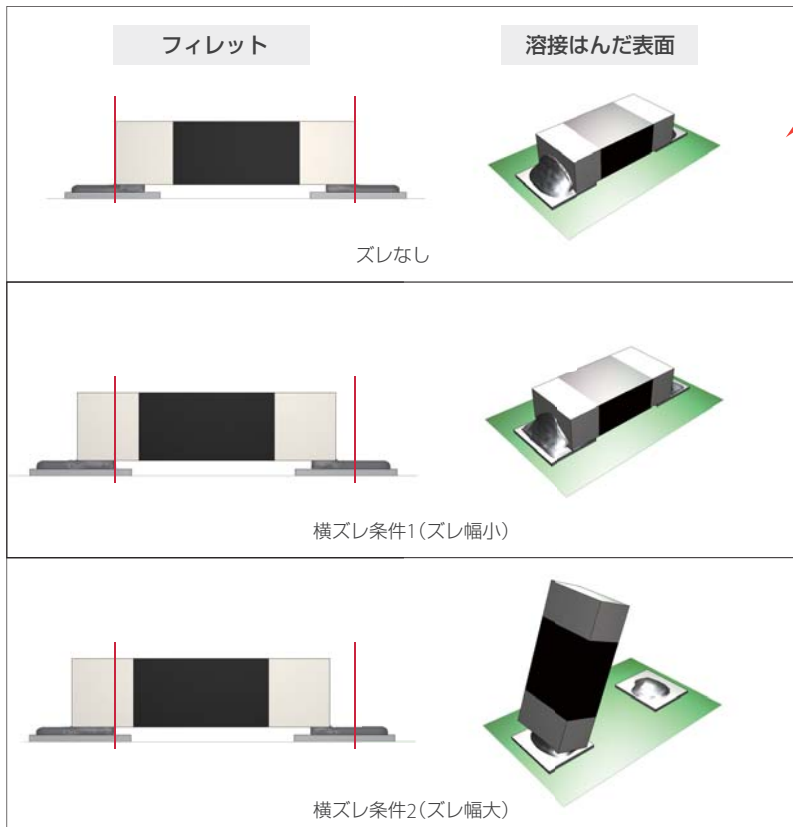


図3 溶接はんだ解析結果図 (ズレなし[上], 横ズレ条件1[中], 横ズレ条件2[下])

チップ抵抗器の両端に溶融はんだ表面のフィレットが形成されていく様子を再現できた

### comment

図3の横ズレ条件1の結果から、多少の横ズレならフィレット形式に問題ないことがわかります。横ズレ条件2の結果のように、電子部品が立ってしまう現象は、米国ニューヨーク市のマンハッタン区の高層ビルに例えてマンハッタン現象と呼ばれます。

# サンドセパレータの解析事例

『SCRYU/Tetra®』を利用し、粒子追跡法で水と砂の分離現象を解析

## 粒子追跡法 (Particle Tracking Method)

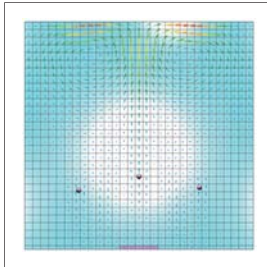


図1 Two way coupling

粒子追跡法は、図1のように格子で区切られた要素を用いて流体を連続相として解析 (Euler法) し、流体中の粒子を分散相として個別に追跡 (Lagrange法) し、流体と粒子を連成解析する方法。

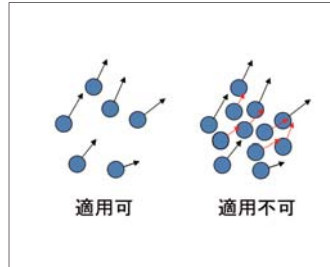


図2 粒子追跡法の適用

粒子追跡法では粒子を質点として考慮する。そのため、図2のように粒子の接触や衝突が支配的な対象には適用できない。

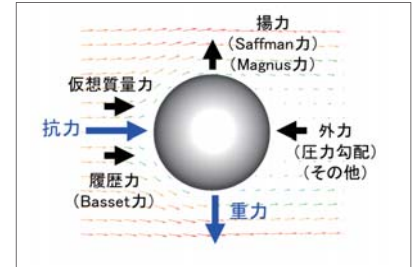


図3 流体中の粒子にかかる力

粒子密度が流体密度よりも大きい場合は抗力と重力が主な力になる。ただし、粒子の幾何学形状を球として抗力を算出するため、注意が必要。例えば、必ずしも球形ではない砂や埃、液滴などは形状が変化する。

## サンドセパレータの解析事例

### 解析モデル

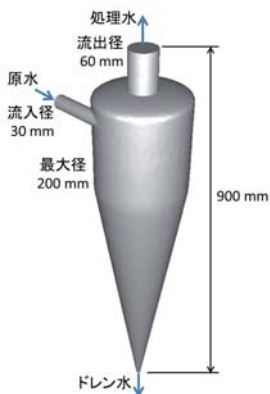


図4 サンドセパレータ

### 解析結果

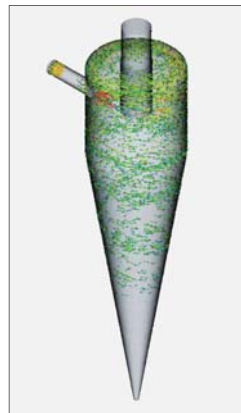


図5 粒子挙動

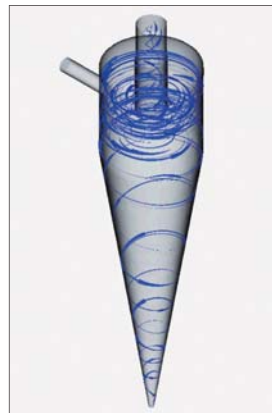


図6 流線

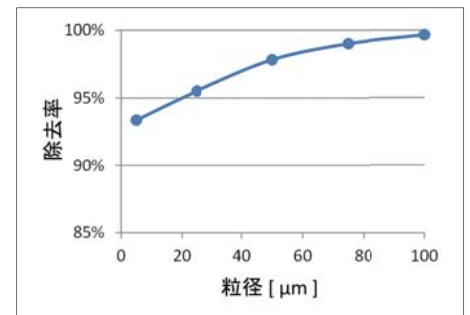


図7 粒径による除去率の変化

### サンドセパレータ

遠心力を利用して水と砂を分離する装置。水と砂の密度差は約2.5で、空気と砂に比べると密度差が小さく分離し難い。

原水の流入量を2.8 m<sup>3</sup>/hで一定と設定すると、約3%がドレン水として流出する。この原水と併せて粒径一定で密度2500 kg/m<sup>3</sup>の粒子100個を0.1秒毎に流入させ、30秒にわたり粒子追跡解析を行う。ドレン水と共に流出する粒子数を、ドレン水および処理水と共に流出する粒子数で除算して除去率とする。

### comment

- ・ 図5は粒径100 μmの粒子挙動の解析結果です。速度ベクトルを付与した粒子の挙動を表示しています。原水と共に流入する粒子は壁面に沿いながら下方に移動し、ドレン水と共に流出します。
- ・ 図6は水の流線を矢印で表現しています。サンドセパレータ内に生じる旋回流の様子がよくわかります。
- ・ 図7は粒径5、25、50、75、100 μmと粒径を変えた場合の除去率の変化です。粒径が小さくなるにつれて分離できなくなることがわかります。

# 防雪林の解析事例

『STREAM®』を使い、防雪林を粒子追跡法で解析

## 解析内容

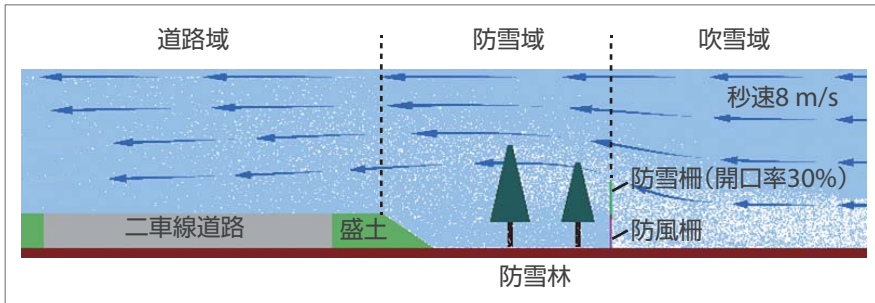


図1 道路防雪林

流入空気	流速8 m/s(基準高さ10 m)で氷点下20℃の空気がべき乗則(平坦地)で流入
雪粒子	・密度200 kg/m <sup>3</sup> 、粒径100μm ・地上から高さ3 mまで均一に流入 ・有効個数を1,000としてパーセル近似
反発係数	0.5(地面や防風柵など境界面に適用)
計算時間	8秒間

## 針葉樹の解析モデル

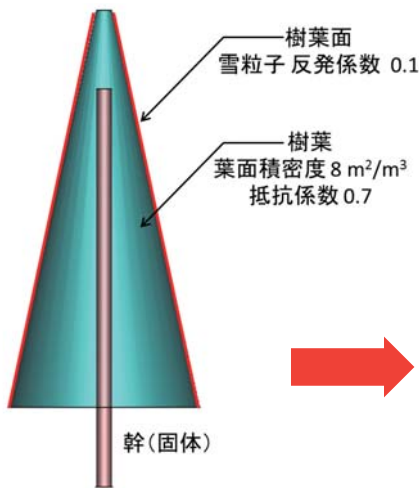


図2 針葉樹(断面図)

葉面積密度	8 m <sup>2</sup> /m <sup>3</sup>
抵抗係数	0.7の圧損領域
雪粒子の反発係数	0.1
針葉樹の配置	4 m間隔の2列の千鳥配置で狭林帯とする
針葉樹の設定	・保育期(植樹から15年程度の期間) ・育成期(保育期からさらに15年程度の期間) ・維持期(植樹から30年以上)

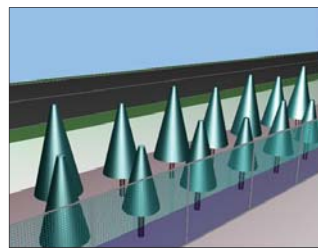


図3 保育期(樹高4.5～6.0 m)  
防風柵2 m、防雪柵2 m

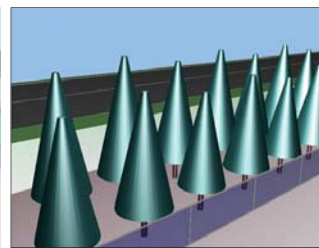


図4 育成期(樹高6.5～8.0 m)  
防風柵2 m

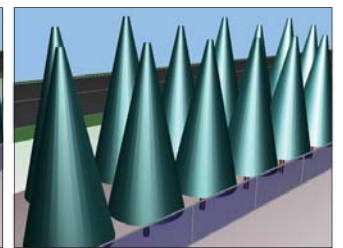


図5 維持期(樹高9.0～10 m)  
防風柵2 m

## 解析結果

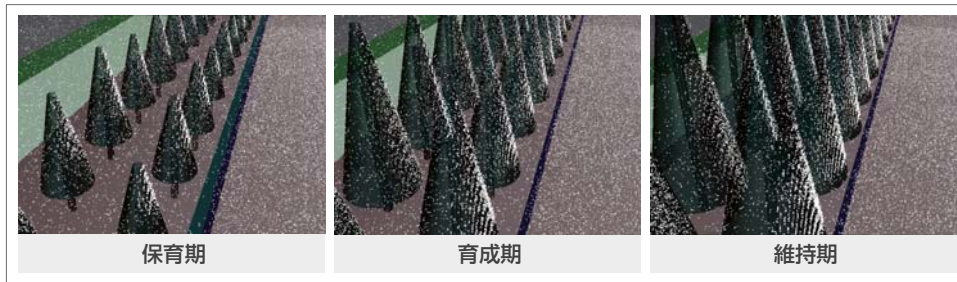


図6 雪粒子挙動

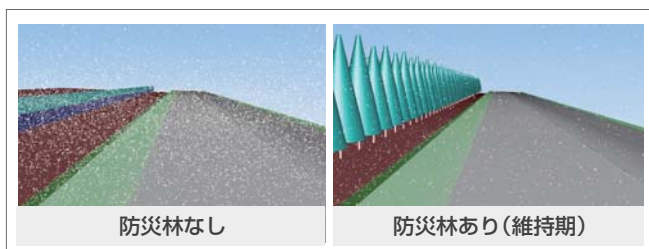


図7 道路視程

### comment

防雪林が成長するに従い、防雪域での雪粒子数が増え、道路域での雪粒子数が減り、防雪効果が高くなっていることがわかります。



# 噴霧エアノズルと噴霧燃焼の解析事例

『STREAM®』を利用し、粒子追跡法で蒸発や揮発を考慮した現象を解析

## 噴霧エアノズルの解析事例

粒子追跡法を用い、高温ガスを冷却する水滴の噴霧エアノズルを粒子追跡法で解析。2パターンの噴霧条件を比較する。

### 水滴の蒸発モデル



### 解析設定

流入する高温ガス	500℃
噴霧エア	27℃
形状	軸対称、軸対称2次元 (冷却容器・ノズル)
高温ガス流速	25 m/s
噴霧エア流速	40 m/s
壁面	静止壁、断熱条件

### 解析結果

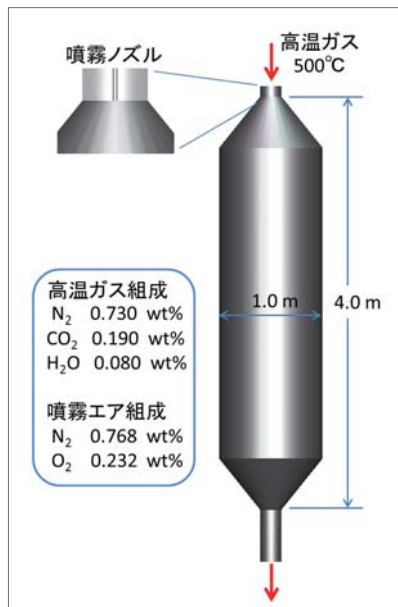


図1 噴霧エアノズル

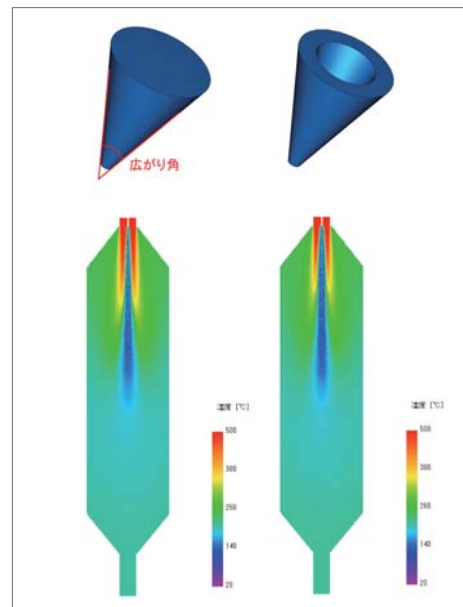
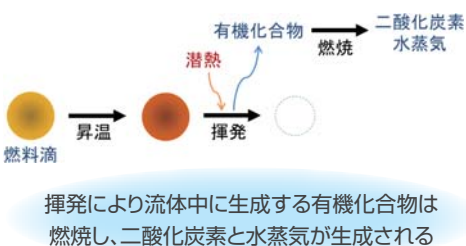


図2 温度分布(7秒後)  
フルコーン(左)、ホローコーン(右)

## 燃料滴の噴霧燃焼の解析事例

燃料滴の噴霧燃焼を粒子追跡法で解析。

### 燃料滴の噴霧燃焼モデル



### 解析設定

燃料滴	ザウター平均粒径で20μm (粒径分布に抜山・棚沢分布を適用)
噴霧流量	0.005 kg/s (パーセル近似10,000 s <sup>-1</sup> )
噴霧速度	15 m/s
噴霧パターン	ホローコーン 広がり角110～120°

- ・1秒間は空気と噴霧エアだけを流入し、1秒後から燃料滴を噴霧
- ・燃料滴の潜熱は200 kJ/kg、Antoine式の定数はn - デカンを用いる

### 解析結果

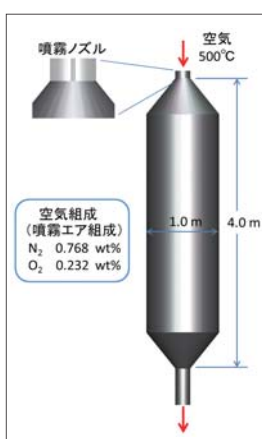


図3 燃焼容器

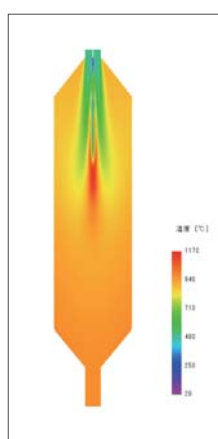


図4 燃料滴挙動と温度分布 (8秒後)

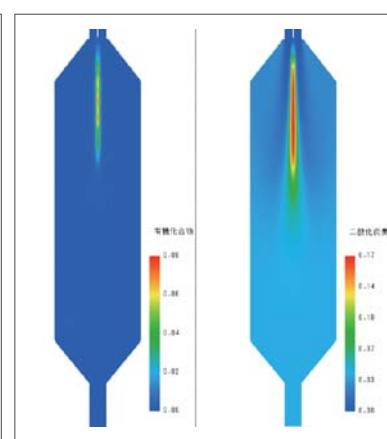


図5 燃焼ガスの質量分率分布 (8秒後)  
有機化合物(左)、二酸化炭素(右)

### comment

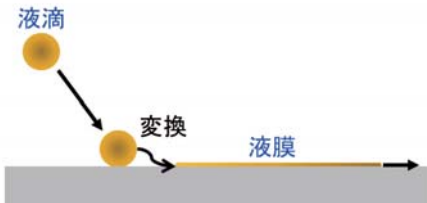
上の噴霧エアノズルの解析結果から、ホローコーンの方が比較的早く冷却されることがわかります。下の噴霧燃焼の解析結果は、燃料滴の噴霧燃焼により容器内の燃焼ガス温度が高くなることを示しています。

# 噴霧・塗布ノズルと枚葉式洗浄機の解析事例

『STREAM®』と『SCRYU/Tetra®』を活用し、粒子の液化挙動を解析

## 噴霧・塗布ノズルの解析(SCRYU/Tetra®)

### 液膜モデル



粒子が壁面で液化して生じる液膜の物性(密度と粘度)と液膜の高さを考慮し、壁面上を移動する液膜を解析する方法。表面張力や接触角を考慮しないため、計算負荷が小さい。

### 解析結果

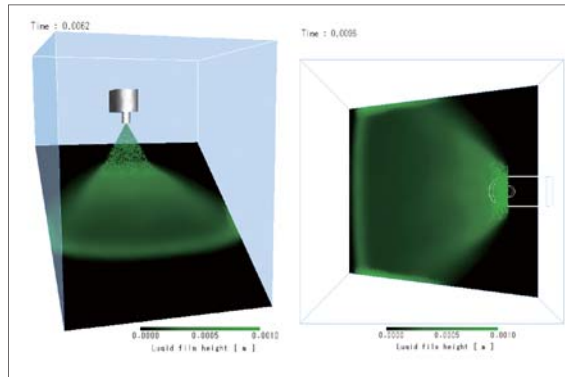


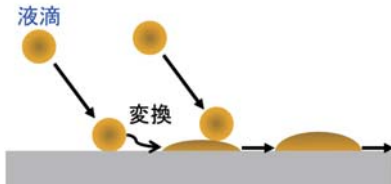
図1 解析結果(左:ノズル横からの視点 右:ノズル上部からの視点)

板	50mm × 40mm、斜めに設置
噴霧粒子	粒径100 $\mu$ m、ノズルで噴霧し板上で液化させ塗布している
塗布液膜の厚さ	1mmオーダー、粒子は長軸30°、短軸10°のフラット形で噴霧している

➡ 液体をほぼ均一に塗布できていることが確認できる

## 半導体ウェハの枚葉式洗浄機の解析(STREAM®)

### 自由表面流解析と組み合わせる方法



粒子が壁面や液面に付着した場合に、粒子から液に変換する。液に変換した粒子は消滅させ、それ以上は追跡しない。表面張力や接触角まで考慮するため、液の分裂や結合を解析できるが、液膜モデルと比較して計算負荷が大きくなる。

### 解析結果

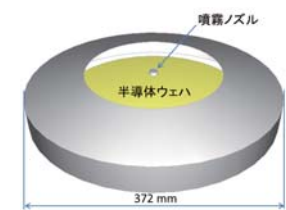


図2 枚葉式洗浄機

噴霧ノズル	粒径50 $\mu$ m(1流体ノズル)
噴霧流量	0.50 kg/s(30 L/min)
噴霧速度	15 m/s
物性	純水(洗浄水)
接触角	50°

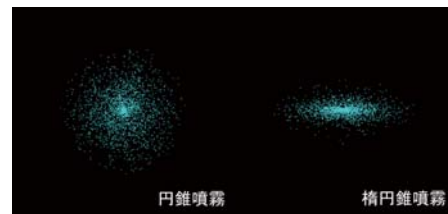


図3 噴霧の様子 円錐噴霧広がり角30°(左)、5°(右)

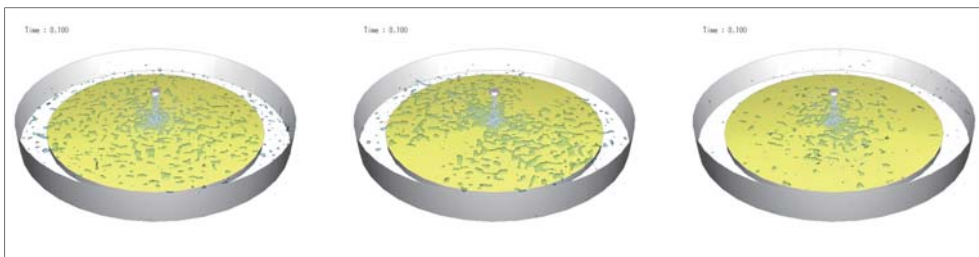


図4 洗淨水の様子(100秒後) 円錐噴霧(左)、楕円錐噴霧(中)、楕円錐噴霧2500 rpm(右)

➡ 楕円錐噴霧の場合は、洗淨効率を高めるためにウェハを高速回転すると、洗淨水が周方向にも広がることを確認できる

### comment

STREAM®とSCRYU/Tetra®を用い、粒子追跡法で粒子の液化を再現することができました。

# 静電スプレーガンの解析事例

『STREAM®』を利用し、静電スプレーガンを粒子追跡法で解析

## 静電スプレーガンの解析事例

### 解析モデル

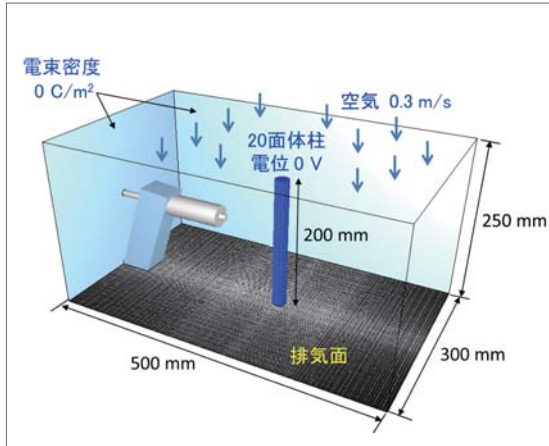


図1 塗装ブース

塗装ブース	500 mm × 300 mm × 250 mm
20面体柱	<ul style="list-style-type: none"> <li>幅20 mm × 高さ200 mm の20面体柱</li> <li>静電スプレーガン先端との距離が100 mmとなる位置に置いて塗装</li> <li>電位は0 V(接地電位)</li> </ul>
空気速度	<ul style="list-style-type: none"> <li>ブース天井面から一様な速度0.3 m/sで流入</li> <li>塗着されない塗料粒子を排気</li> <li>ブース床面は排気面(グレーチングのような床面)</li> </ul>
電束密度	0 C/m <sup>2</sup> (上下面を含む塗装ブースの全ての壁面)
空気の比誘電率	空気の比誘電率 1.000586

### 解析結果

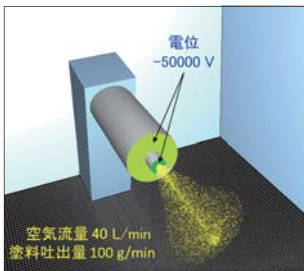


図2 静電スプレーガン

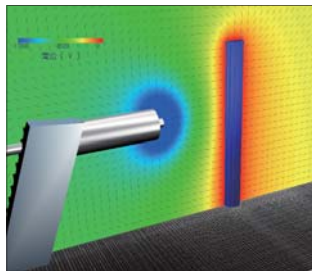


図3 中央断面での電位分布

空気流量	40 L/min(ノズル径10 mm)
塗料吐出量	100 g/min(塗料密度は1000 kg/m <sup>3</sup> )
塗料粒子の粒径	50 μm
ノズル先端電位	-50,000 V

20面体柱に付着した塗料粒子は消滅させ、それ以上追跡しない



堆積させ塗膜の厚さに換算する

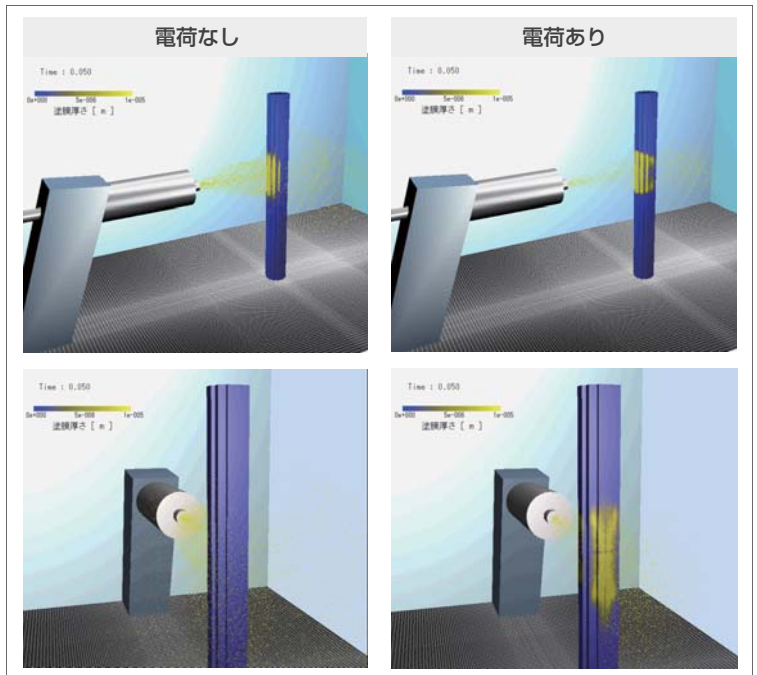


図4 解析結果(0.05秒後) 正面の塗膜分布(上)、背面の塗膜分布(下)

### comment

20面体柱に付着した塗料粒子数と噴霧した塗料粒子数から塗着効率を算出します。塗料粒子の電荷がない場合は59.6%でしたが、塗料粒子の電荷がある場合は84.5%となり、静電塗装の効果が再現されました。

# デフロスタの解析事例

『STREAM®』で室内の窓や壁で生じる結露・蒸発を計算

## 電熱式デフロスタの解析事例

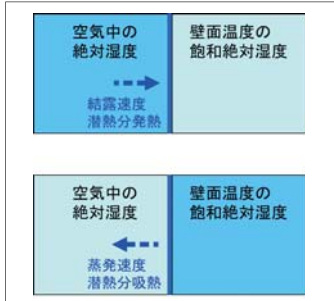


図1 結露速度

デフロスタとは…

車両の窓ガラスの結露による曇りを除去する機能

結露(蒸発)解析とは…

- ・気相側の流体解析で水蒸気を変数として取り扱う
- ・図1のように、空気中の絶対湿度が壁面温度の飽和絶対湿度より大きい場合には結露速度[ kg/(m<sup>2</sup> s) ]が生じ、潜熱分2500 kJ/kgを発熱する
- ・空気中の絶対湿度が壁面温度の飽和絶対湿度より小さい場合は蒸発速度(負の結露速度)が生じ、潜熱分を吸熱する

## 解析モデル



図2 鉄道車両

- ・二重ガラス構造と仮定。
- ・電熱線を4本として開始時から90秒後に発熱し、10秒間で1本あたり100 Wの発熱量に到達、その後はその発熱量を維持するものとする。

## 解析結果

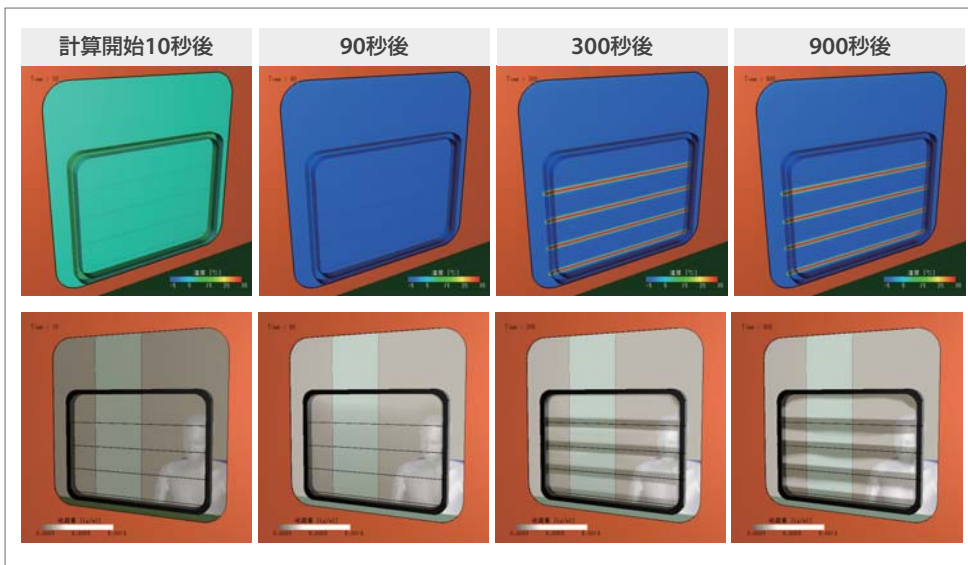


図3 運転手ガラス面の温度分布(上)と結露量分布(下)

解析対象	運転手席
表面温度	36℃
水分発生量	9.0 × 10 <sup>-6</sup> kg/(m <sup>2</sup> s) (50 mL/h)
表面温度	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ -5℃ (車両外側運転席ガラス)</li> <li>・ 20℃ (運転席扉)</li> <li>・ その他は断熱条件と想定</li> </ul>
初期温度	20℃ (運転席)
初期湿度	55% (相対湿度) 温度差による浮力を考慮

## comment

開始時から90秒後には運転席ガラス面に結露が生じますが、その後は電熱線の発熱に伴い、結露が除去されていく様子が確認できました。

# 洗濯物の浴室乾燥

『STREAM®』で固体の吸放湿特性を考慮した結露・蒸発解析を実行

## 吸放湿特性の設定

### 吸放湿特性とは…

固体の湿度(絶対湿度)を変化させるのに必要な水分量と、固体の温度を変化させるのに必要な水分量。

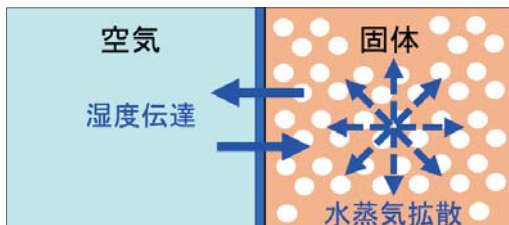


図1 固体中の湿気

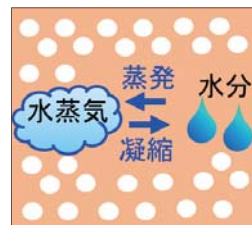


図2 固体中の吸放湿

図1のように乾燥時に空隙のある固体(多孔質体)を考える。固体中の湿気は水分の浸透や水蒸気の拡散で移動する。同時に、図2のように固体中では水蒸気が凝縮して水分になり、水分が蒸発して水蒸気になる相変化が起きる。相変化に伴う潜熱分の発熱と吸熱が影響するので、固体中の湿気と熱の移動は連成して解析する必要がある。この連成解析を実施する場合に吸放湿特性を設定する。

## 洗濯物の浴室乾燥の解析事例

### 解析モデル

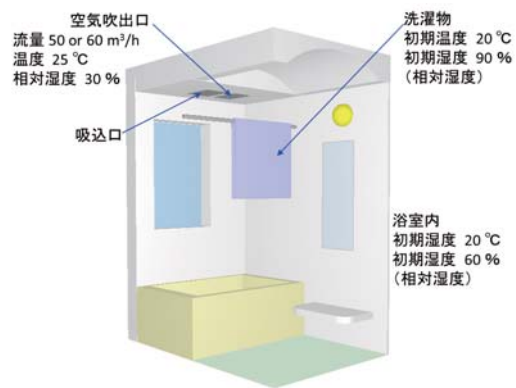


図3 洗濯物の浴室乾燥

洗濯物	長さ126 cm×幅60 cm×厚さ1cm 天井近傍の横棒にかけてであると仮定
空隙率	0.4(乾燥時)
密度	1.30 kg/m <sup>3</sup>
比熱	1.15 kJ/(kg·K)
熱伝導度	0.086 W/(m·K)
湿気伝導度	5.0×10 <sup>-6</sup> kg/(m·s (kg/kgDA)) <sup>*1</sup>
絶対湿度を変化させるのに必要な水分量	5.0×10 <sup>3</sup> kg/(m <sup>3</sup> (kg/kgDA)) <sup>*1</sup>
温度を変化させるのに必要な水分量	2.5 kg/(m <sup>3</sup> K)

\*1 DA…Dry Airの略 (kg/kgDA)…絶対湿度の単位

### 解析結果

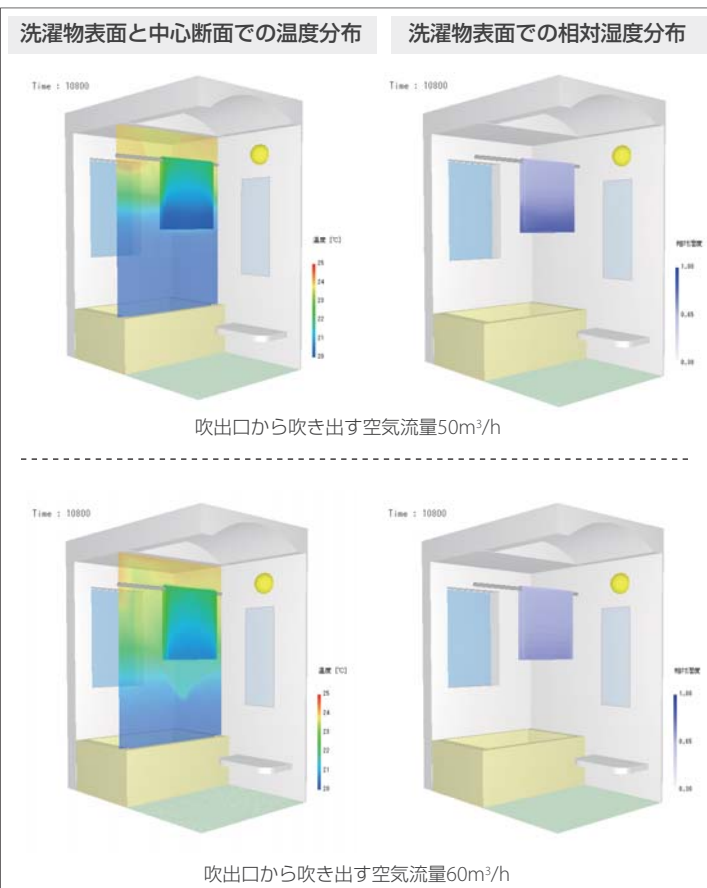


図4 解析結果(1時間30分後) 吹出口からの空気流量50m³/h(上)、60m³/h(下)

## comment

浴室乾燥により洗濯物が乾いていく様子が再現されています。空気流量を大きくすることにより洗濯物の乾燥が早まることがわかります。

# 天然氷の凝固・融解解析事例

『STREAM®』を使い、凝固・融解解析をマクロにアプローチ

## 温度回復法

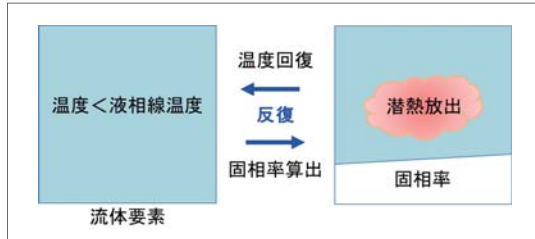


図1 温度回復法

- ・流体中における固相の体積率を固相率と定義する。
- ・固液界面では平衡であると仮定し、温度回復法により固相率の変化を求める。
- ・図1のように流体要素の温度を解き、温度が液相線温度(水などの純物質は平衡であれば固相線温度と一致する)よりも低い場合は潜熱と比熱から固相率を算出する。
- ・次に、固相率に相当する潜熱を放出(発熱)して再び流体要素の温度を解くことにより、流体要素の温度が回復する。
- ・これを反復すると流体要素の固相率と温度が求まる。

## 天然氷の凝固・融解解析

### 解析モデル

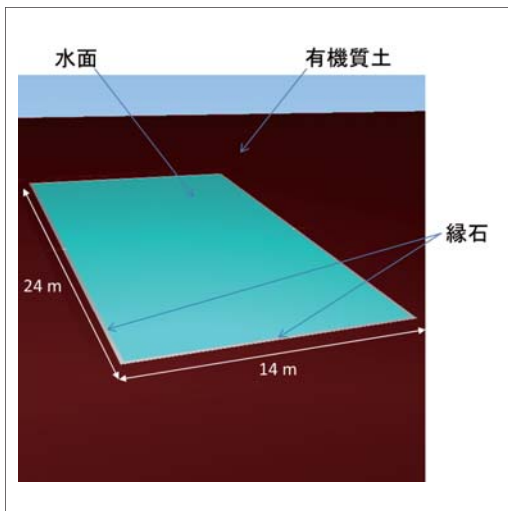


図2 水池

水池	長さ 24 m×幅 14 m×深さ 0.5 m 緑石で囲まれ、その周囲は有機質土
池の上面	外気 -8℃ 熱伝達係数 10 W/(m²K)
池の下面	外気 4℃(熱伝導条件)
解析手法	非定常解析
備考	水の流れは解かない

### 解析結果

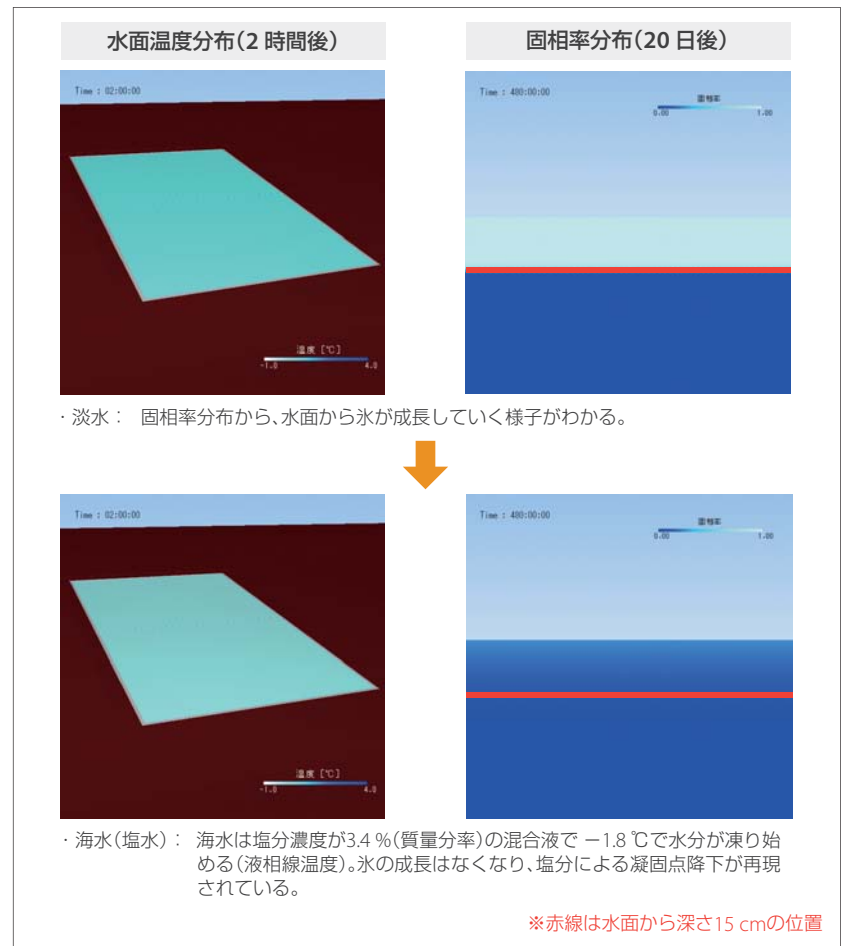


図3 解析結果 淡水(上)、海水(下)

## comment

図3は2時間後の水面温度分布と20日後の固相率分布です。淡水の結果から、水面はほぼ均一に温度が下がり、水面から氷が成長していく様子がわかります。水池を海水のような塩水に変えると、氷の成長はなくなり、塩分による凝固点降下が再現されています。

# 冷凍ブロックの流水解凍

『STREAM®』を使い、流水の解凍現象を凝固・融解解析で検証

## 流動限界固相率によるモデル化

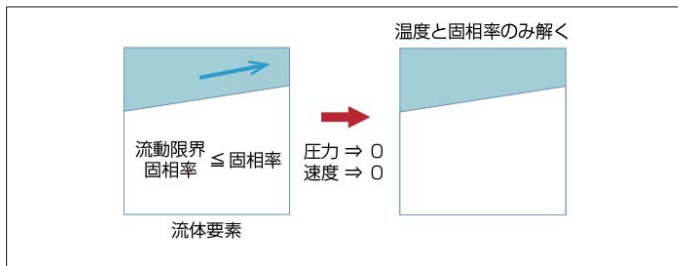


図1 流動限界固相率によるモデル化

固液共存状態における液相の流れは固相の体積率(固相率)により影響を受ける。氷を水で溶かす時のように固液界面が平滑な場合には、流体要素の固相率が流動限界固相率以上で圧力と速度を0にして、流体要素は温度と固相率のみ解くことでモデル化することが可能。

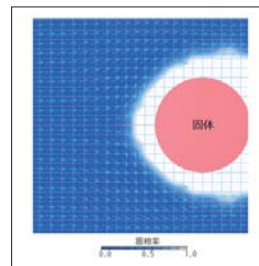


図2 解析事例の速度ベクトル

図2は固体の周囲に付着している氷を流水で溶かす解析事例の速度ベクトル。流体要素がわかるように格子を表示し、一定長の速度ベクトルを要素ごとに表示している。

## 冷凍ブロックの流水解凍解析事例

### 解析モデル

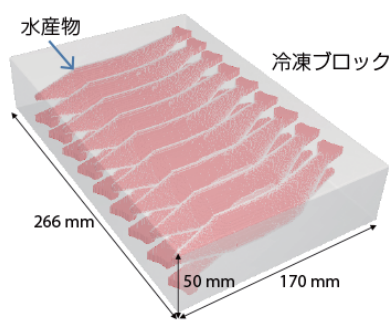


図3 冷凍ブロック

水産物	水産物18尾(各段に9尾) 長さ266 mm、幅170 mm、高さ50 mm
物性値	密度900 kg/m <sup>3</sup> 、比熱2000 J/(kgK)、 熱伝導率1.40W/(m·K)
温度	-20℃(冷凍ブロックの初期温度) 4℃(流水する水)
流水時間	20 分間
解析	非定常解析
流動限界固相率	0.9

### 解析結果

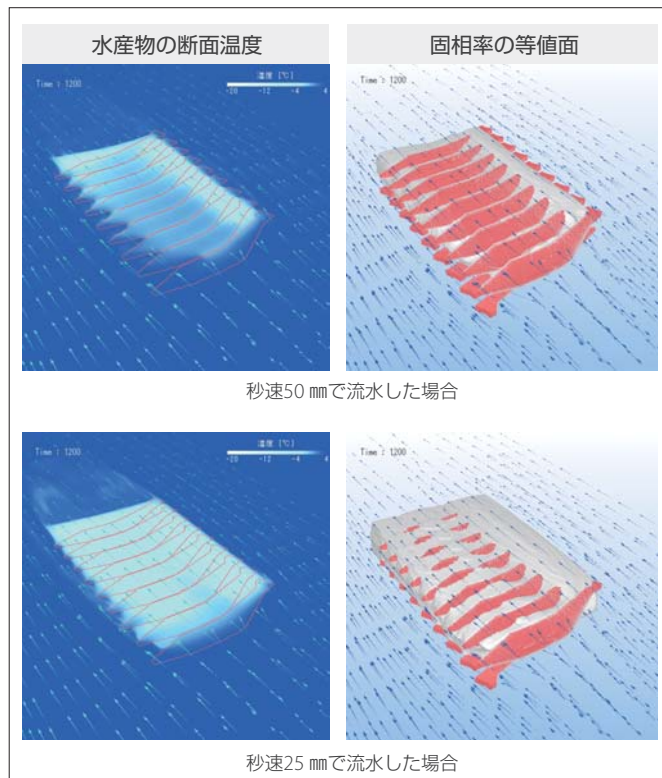


図4 解析結果 断面温度と固相率の等値面(20分後)  
流水秒速50 mm(上)、秒速25 mm(下)

## comment

断面温度を見ますと、手前の1尾以外は0℃以下になっていますので、大部分は半解凍状態と考えられます。この時点で水産物を流水から取り出し、自然解凍すれば水分のドリップもなく短時間で解凍できることとなります。