

2024年3月

RFLOW 解析事例集

粒子・流体連成 燃焼・反応解析	
ストーカ式焼却炉内のごみ燃焼解析	2
流動層式汚泥焼却炉の燃焼解析	5
流動層式ガス化炉内のごみ・コークス燃焼解析	6
ロータリーキルン式焼却炉内のごみ燃焼解析	8
ロータリーキルン式熱分解ガス化改質炉内の廃棄物ガス化解析	10
流動層式反応炉内のCO ₂ 吸着解析	12
粒子・流体連成 蒸発・乾燥解析	
FCC装置内の熱流動, 液滴蒸発, 触媒挙動解析	13
火薬乾燥解析	15
スプレードライヤー内の液滴蒸発解析	16
ノズルから噴霧された液滴蒸発解析	18
離散要素法 (DEM) による粒子解析	
湿式ボールミル内の液流れとボール挙動解析	20
外部磁界中の磁性粒子挙動解析	21
MPS 法による自由表面流れ解析	
MPS 法によるファイナル・ドライブ内の液挙動解析	22
トリクルベッドリアクタ内の液およびガス流れ解析	23
攪拌槽内の混相流解析	
攪拌槽内の液滴分裂・合一解析	25
培養槽内のガス吸収解析	26

問い合わせ先

株式会社アールフロー (R-flow Co., Ltd.)

岡 大樹 (Hiroki Oka)

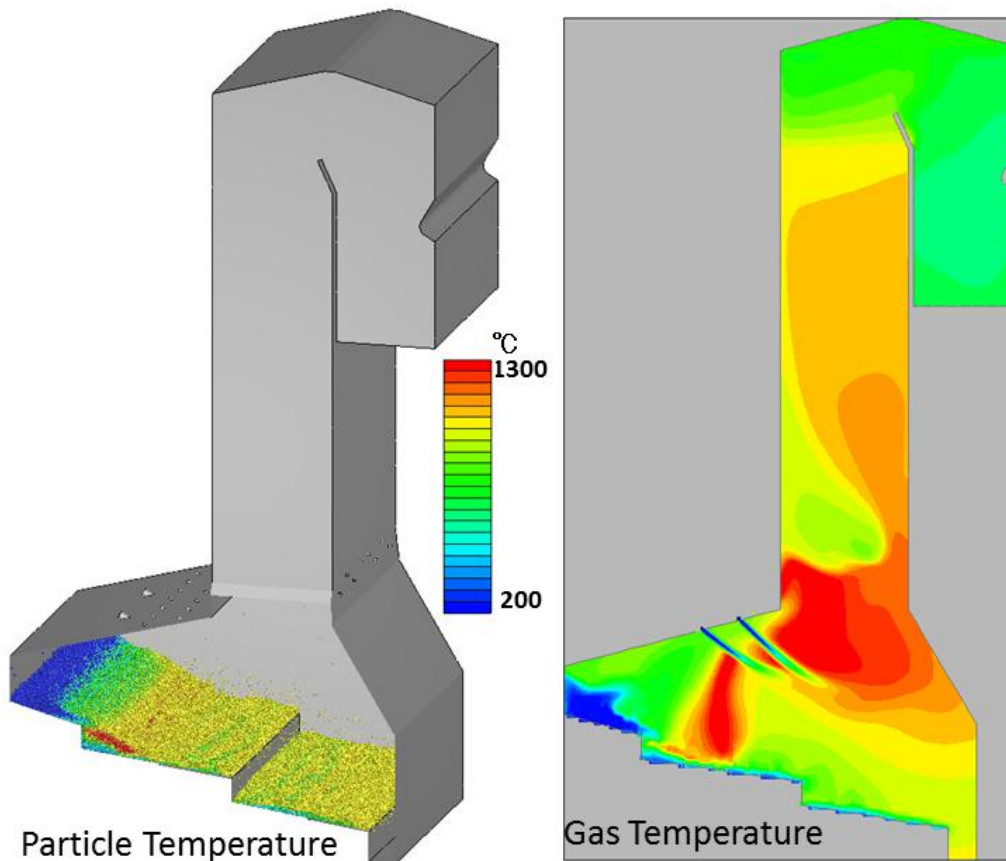
E-mail: oka@rflow.co.jp

Tel: 048-929-2345

<http://www.rflow.co.jp/>

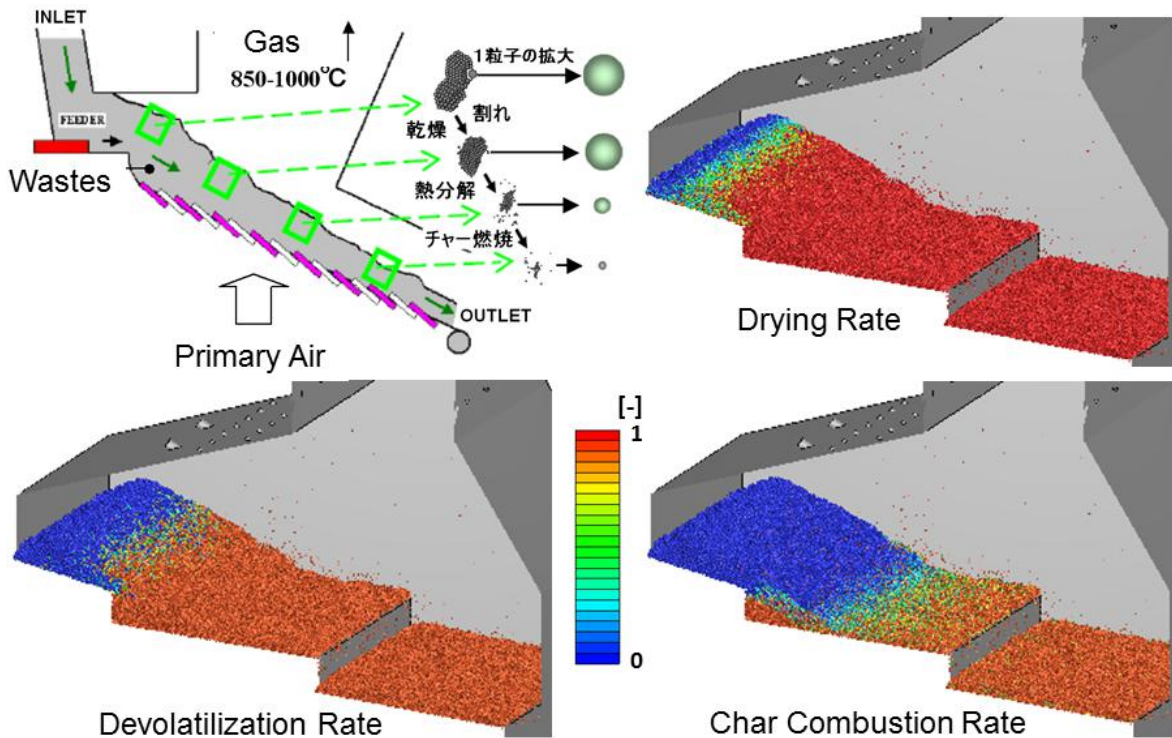
ストーカ式焼却炉内のごみ燃焼解析

中国広東省で数年前に建設されたごみ処理能力 750 t/day のストーカ式焼却炉内でのごみ燃焼過程を、RFLOW の燃焼解析機能を用いて再現しています。解析では、DEM (Discrete Element Method) ベースの粗視化モデルの草分けである「代表粒子モデル」^{1, 2)} を用いて、燃焼反応を伴うごみ粒子挙動、反応性ガスの圧縮性を考慮した熱流れと反応場、輻射場を連成して解析しています。また、ごみ粒子の燃焼は、水分蒸発、揮発分の放出 (熱分解)、固定炭素 (チャー) 燃焼の三段階に分けて解析を行っている他、燃焼に伴って発生・消滅する反応性ガス (酸素 (O_2)、水蒸気 (H_2O)、二酸化炭素 (CO_2)、一酸化炭素 (CO)、メタン (CH_4)、水素 (H_2) 等) の各濃度成分についても解析しています。

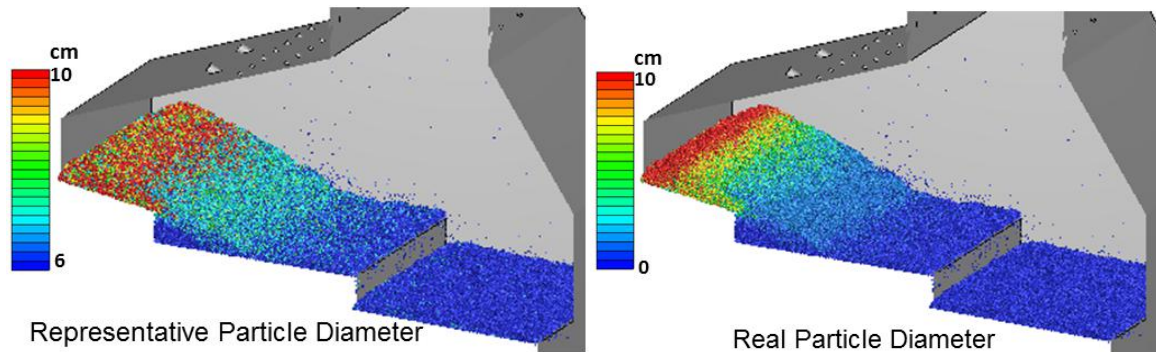


References

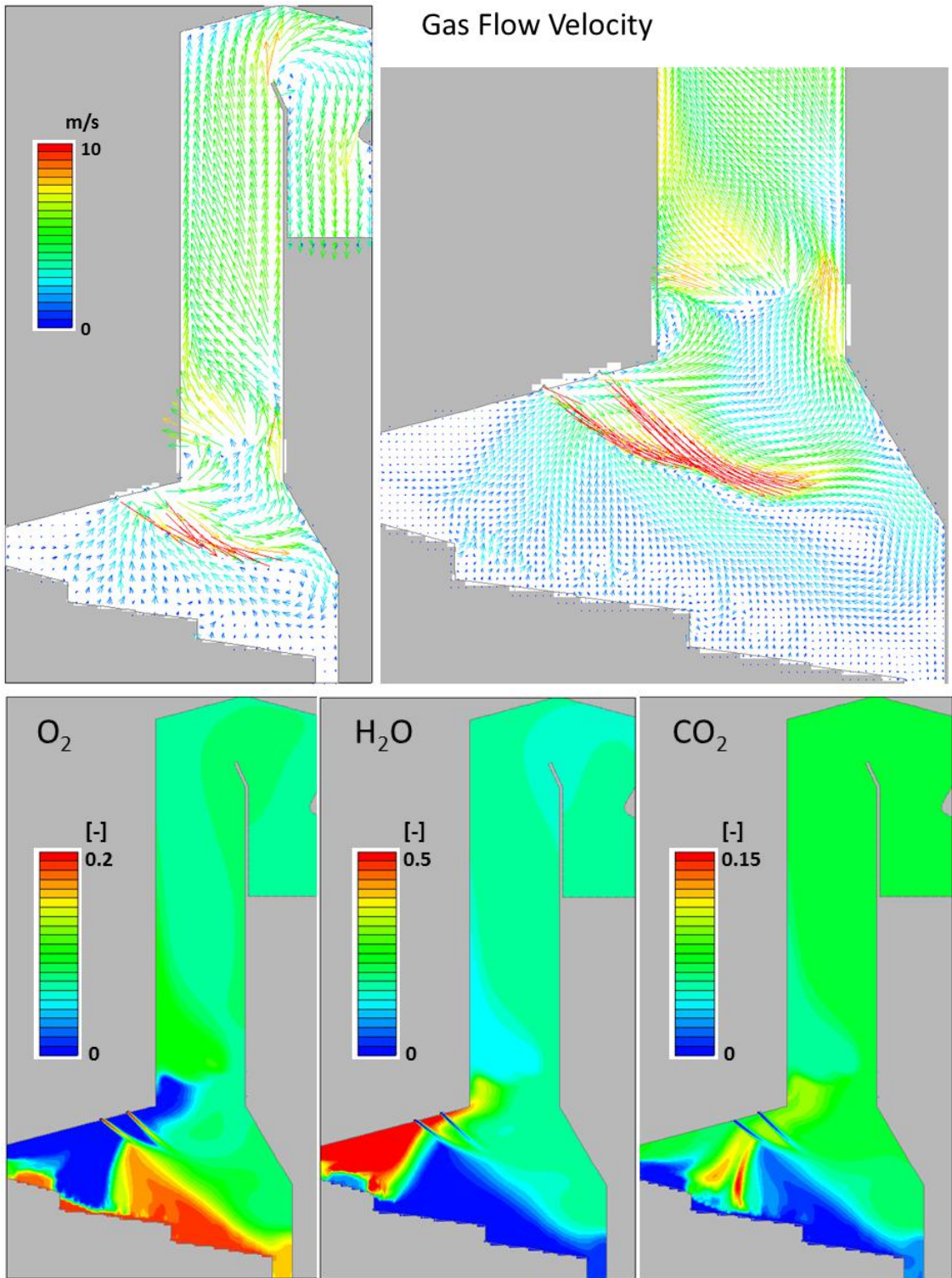
- Takeda, H., Granular flow simulation by continuum model, J. Soc. Powder Technol., Japan. **40** 746-754 (2003)
- Takeda H., Granular flow simulations in the industrial sector, J. Soc. Powder Technol., Japan. **50** 264-271 (2013)



ストーカ上に投入されたごみ粒子の燃焼過程は、水分蒸発、揮発分の放出（熱分解）、固定炭素（チャー）燃焼の三段階に分けて解析しています。



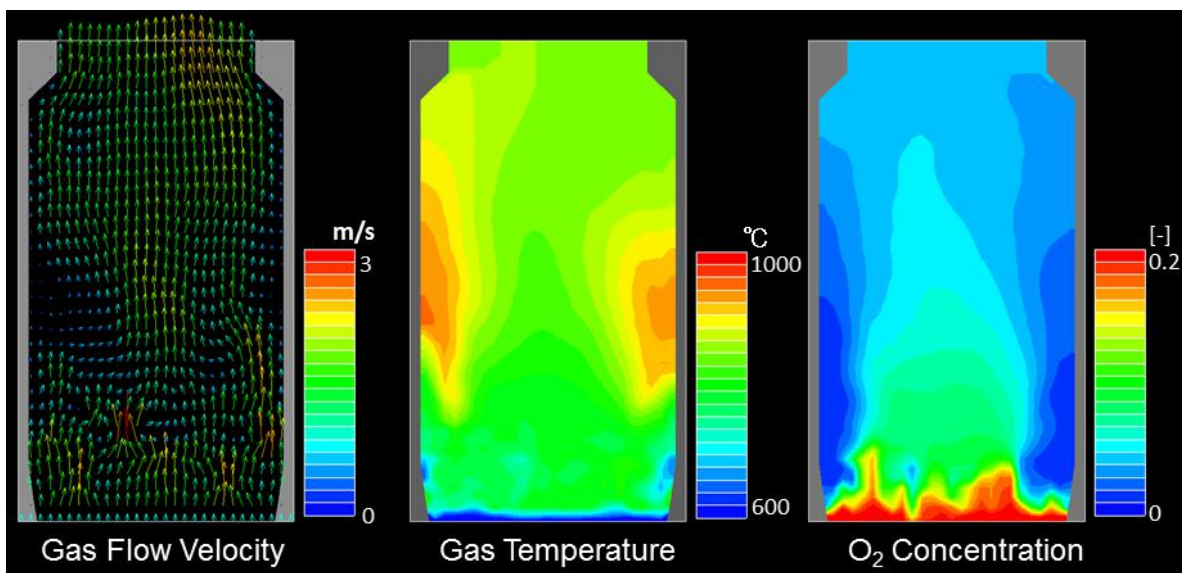
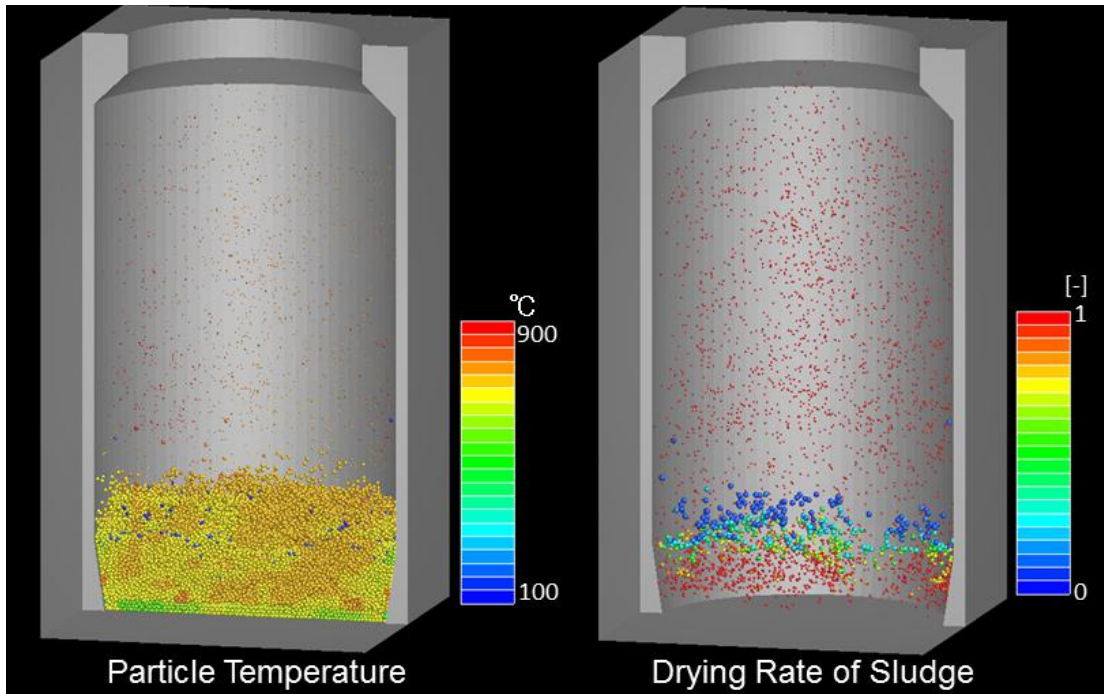
代表粒子モデルでは、燃焼反応の進行にともなって、代表粒子径（接触判定解析に用いる粒子径）と実粒子径（実際のごみ粒子の粒子径）がともに変化していきます。代表粒子径については、燃焼進行にともなうごみ粒子の体積減少（質量減少と密度変化）がそのまま反映するように決定されます。一方、実粒子径変化については、代表粒子径の変化に加えて、ごみ粒子の割れについても考慮して、解析条件として与えています。実際には、ごみ投入時と燃焼完了時（灰になったとき）の実粒子径（分布）を指定し、途中段階については補間により決定しています。燃焼完了時の実粒子径分布を考慮し、 μ オーダーからcmオーダーまでの粒径分布として与えることにより、主灰と飛灰の割合を間接的に設定することができます。



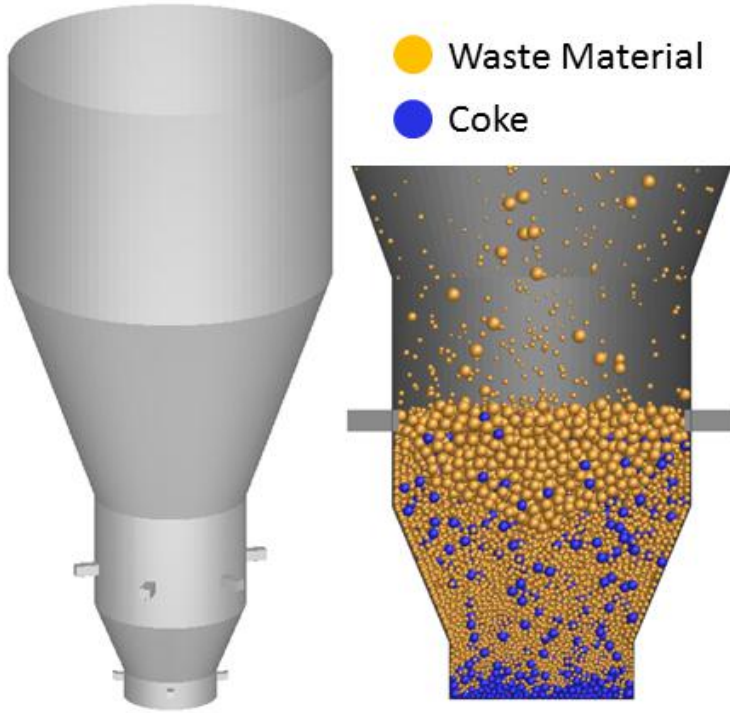
反応性ガスの濃度（体積占有率）分布。酸素（ O_2 ）、水蒸気（ H_2O ）、二酸化炭素（ CO_2 ）の他に、一酸化炭素（ CO ）、メタン（ CH_4 ）、水素（ H_2 ）についても解析しています。

流動層式汚泥焼却炉の燃焼解析

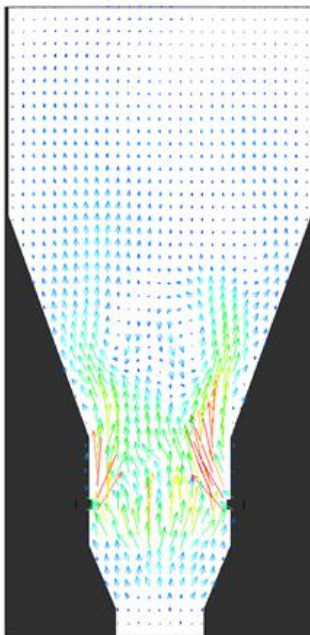
流動層式汚泥焼却炉内に投入された汚泥、バイオマス等の燃料粒子が燃焼する過程を、粒子（汚泥、砂）挙動、ガス流れ、熱、化学反応を解くことにより再現しています。汚泥の燃焼プロセスは、水分蒸発、揮発分の放出（熱分解）、固定炭素（チャー）燃焼の三段階に分けて解析している他、燃焼に伴い発生・消滅する反応性ガス（酸素 (O_2)、水蒸気 (H_2O)、二酸化炭素 (CO_2)、一酸化炭素 (CO)、メタン (CH_4)、水素 (H_2) 等)の各濃度についても同時に解析しています。



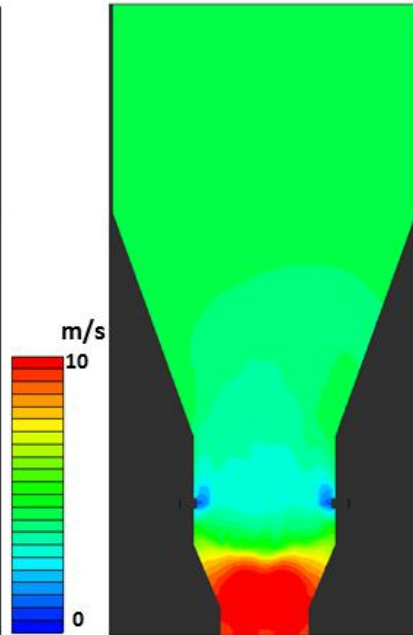
流動層式ガス化炉内のごみ・コークス燃焼解析



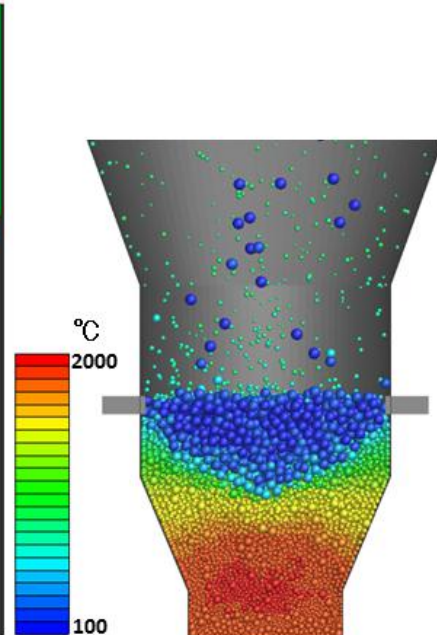
流動層式ガス化炉内に投入したごみ及びコークスの燃焼解析。ガス化により、一酸化炭素、水素、メタン等の可燃性ガスが発生します。ごみ粒子の燃焼は水分蒸発、揮発分の放出（熱分解）、固定炭素（チャー）燃焼の3段階に分けてモデル化しています。一方、コークスの燃焼は固定炭素燃焼のみをモデル化して解析しています。



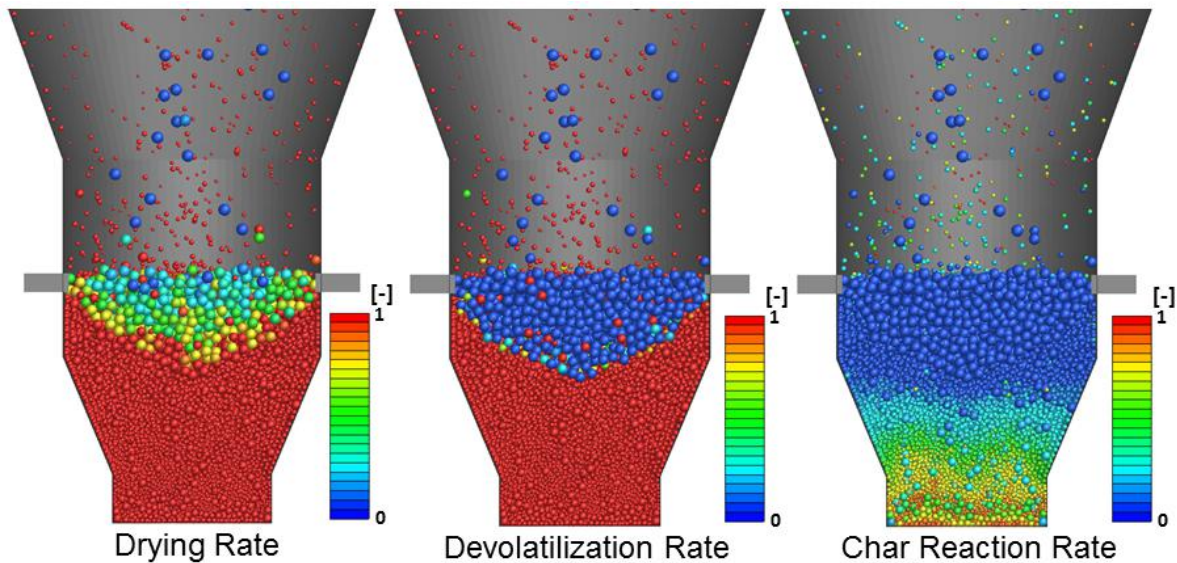
Gas Flow Velocity



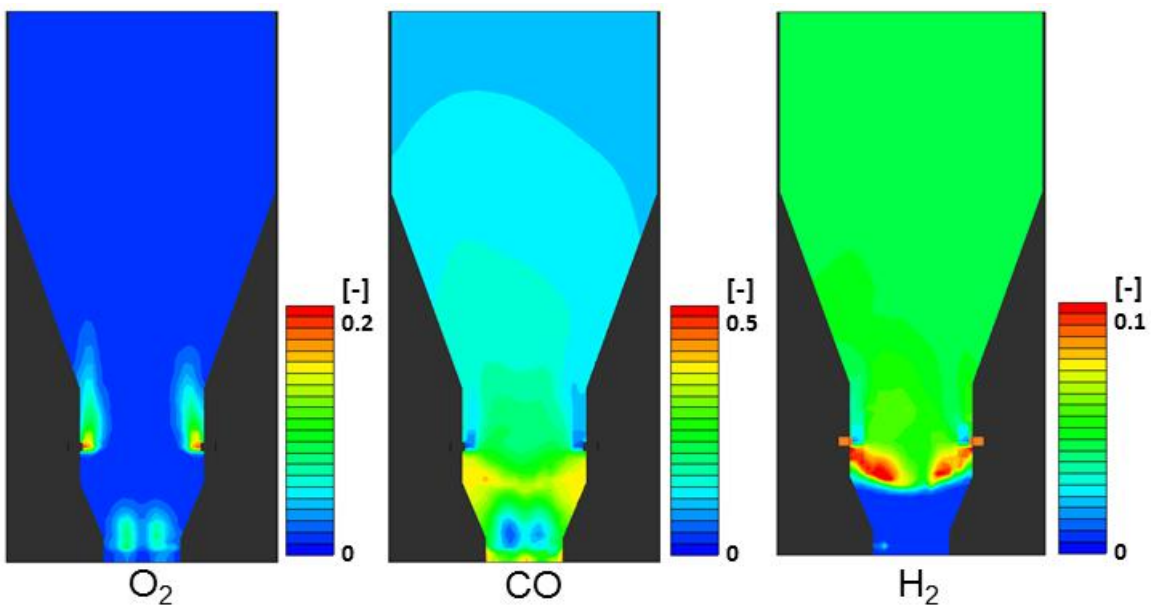
Gas Temperature



Particle Temperature

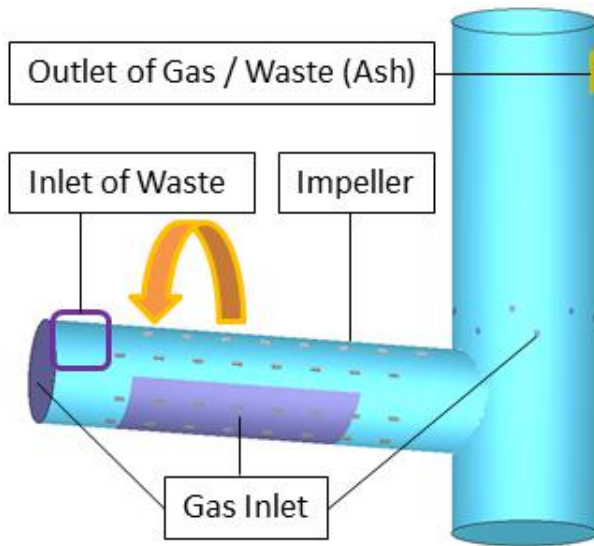


ごみ粒子の燃焼は水分蒸発、揮発分の放出（熱分解）、固定炭素（チャー）燃焼の3段階に分けてモデル化しています。一方、コークスの燃焼は固定炭素燃焼のみをモデル化して解析しています。

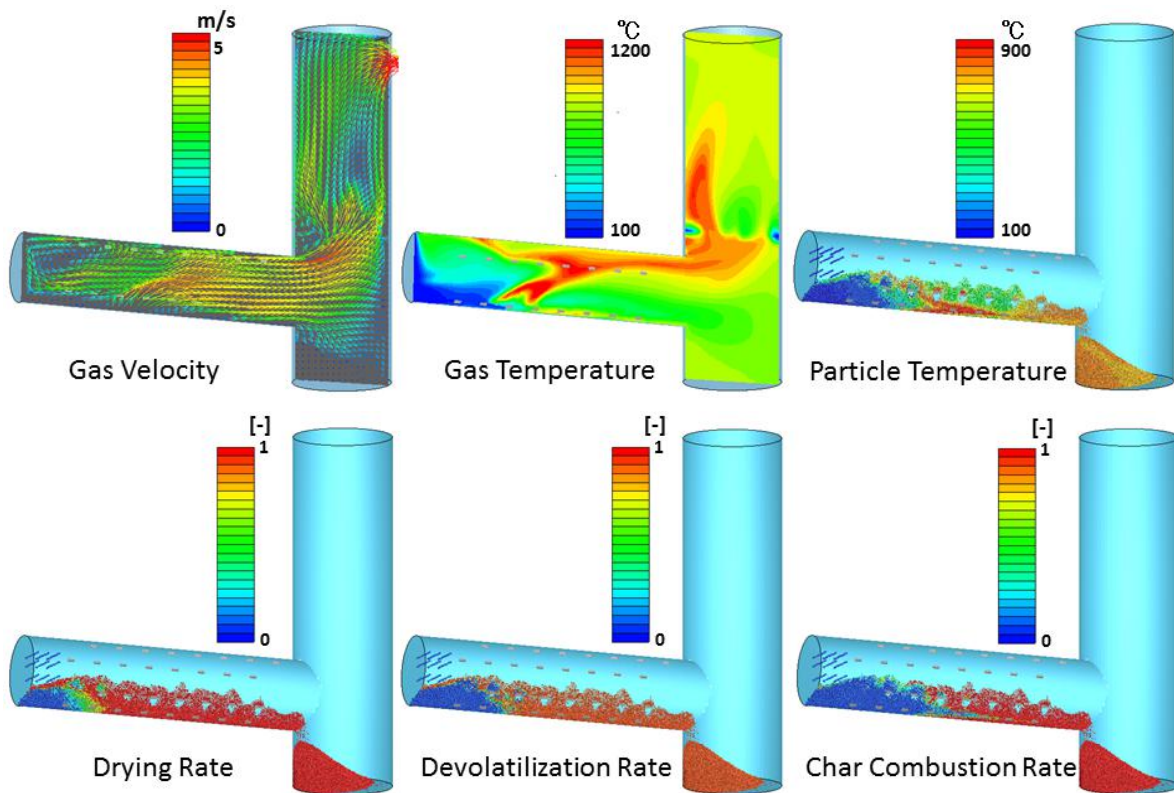


酸素 (O₂) および可燃性ガスの濃度分布。ガス化により、一酸化炭素 (CO)、水素 (H₂)、メタン (CH₄) 等の可燃性ガスが発生します。

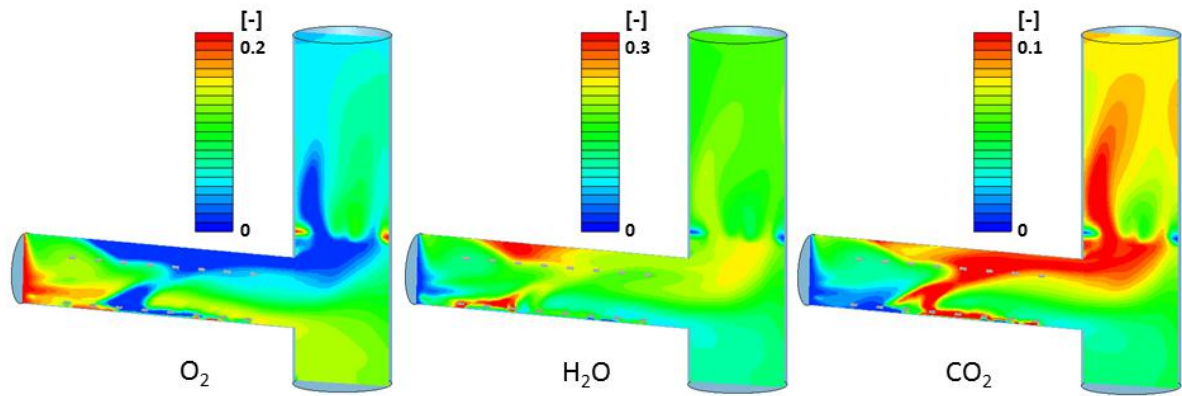
ロータリーキルン式焼却炉内のごみ燃焼解析



ロータリーキルン式焼却炉に投入されたごみの燃焼プロセスを、ごみ粒子挙動、反応性ガス等の流れ、熱、燃焼化学反応を解析することにより再現しています。ごみ粒子の燃焼プロセスについては、水分蒸発、揮発分の放出（熱分解）、固定炭素（チャー）燃焼の三段階に分けて解析している他、燃焼に伴い発生・消滅する反応性ガス（酸素（O₂）、水蒸気（H₂O）、二酸化炭素（CO₂）、一酸化炭素（CO）、メタン（CH₄）、水素（H₂）等）の各濃度についても同時に解析しています。



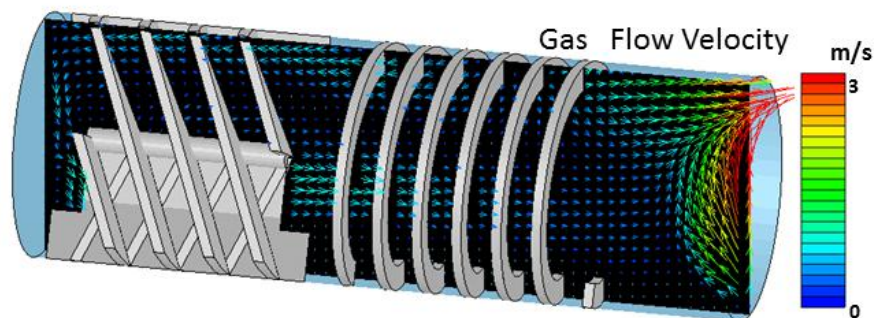
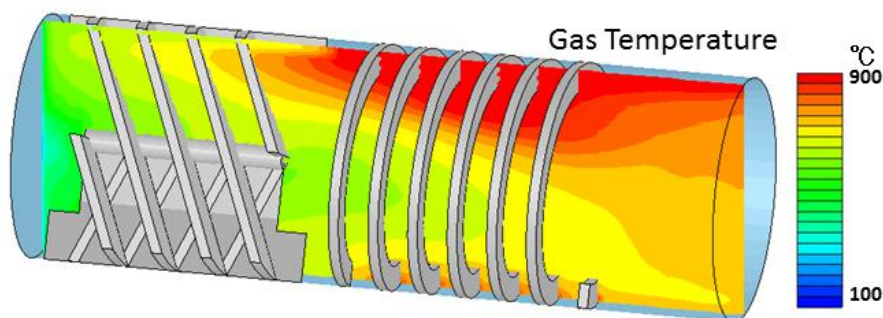
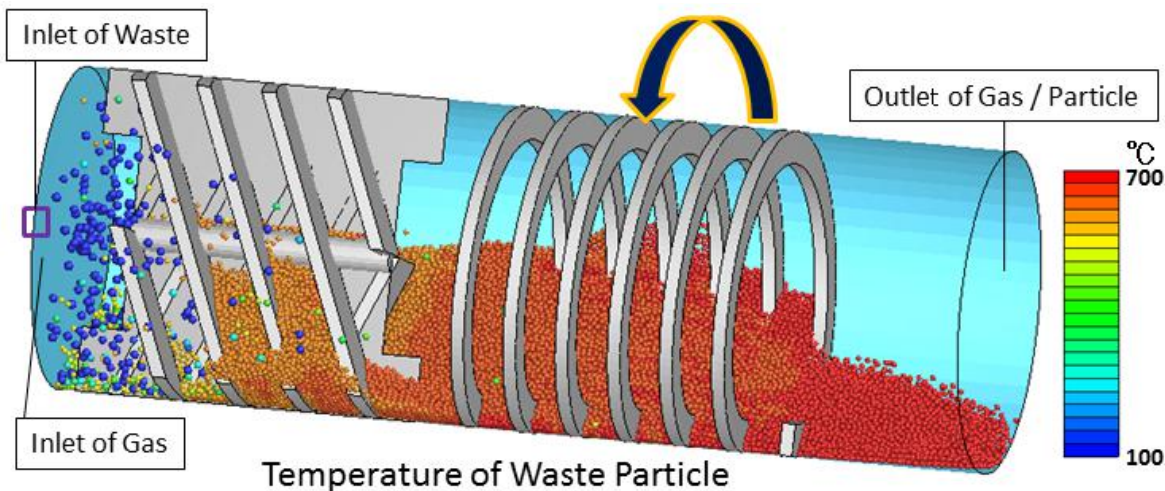
ごみ粒子の燃焼過程は、水分蒸発、揮発分の放出（熱分解）、固定炭素（チャー）燃焼の三段階に分けて解析しています。



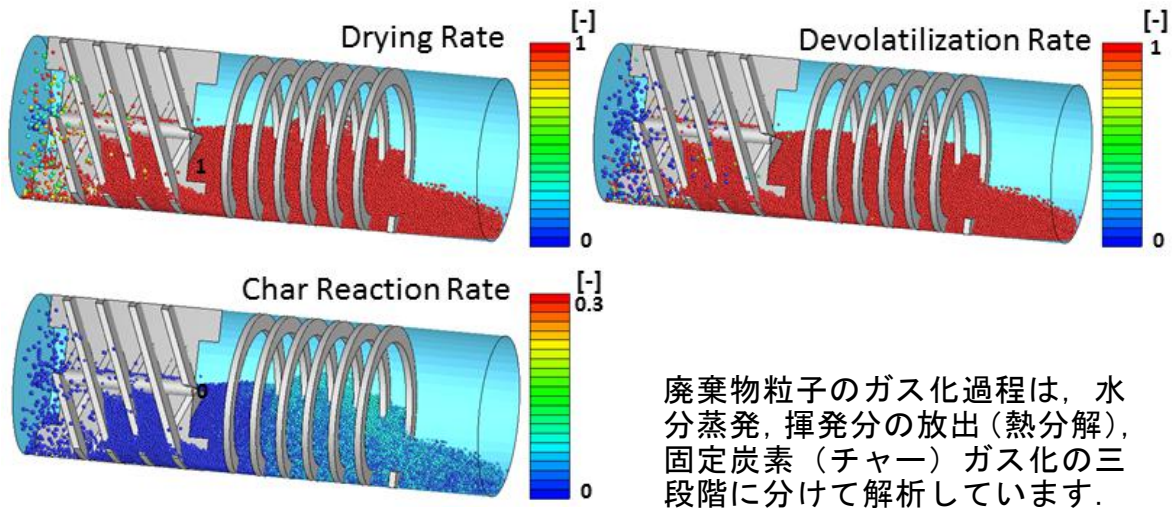
反応性ガスの濃度（体積占有率）分布. 酸素 (O_2), 水蒸気 (H_2O), 二酸化炭素 (CO_2) の他に, 一酸化炭素 (CO), メタン (CH_4), 水素 (H_2) についても解析しています.

ロータリーキルン式熱分解ガス化改質炉内の廃棄物ガス化解析

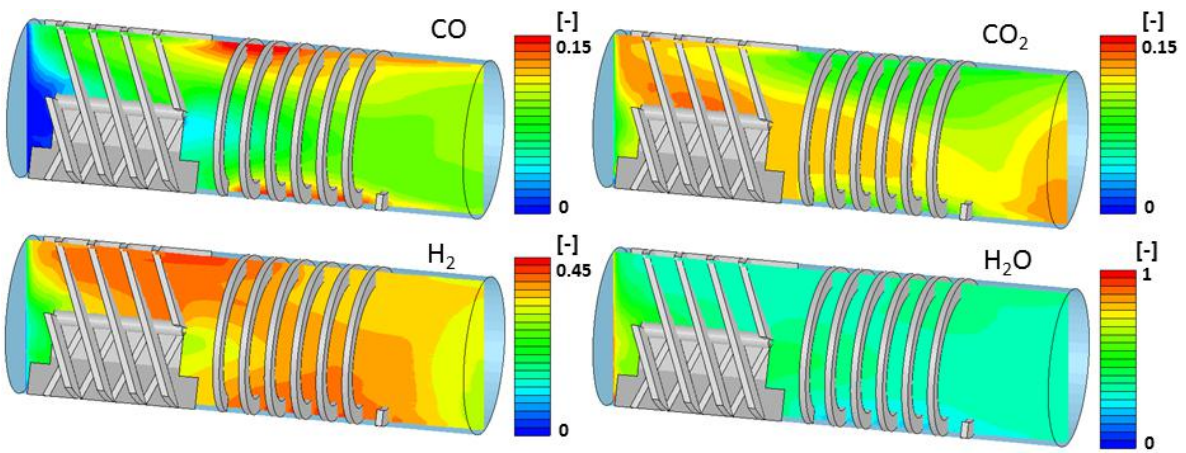
ロータリーキルン式熱分解ガス化改質炉内に投入された廃棄物のガス化プロセスの解析事例



廃棄物粒子の挙動、反応性ガス等の熱流動、ガス化反応を連成して解析することにより、ガス化プロセスを再現しています。廃棄物粒子のガス化過程については、水分蒸発、揮発分の放出（熱分解）、固定炭素（チャー）ガス化の三段階に分けて解析している他、ガス化に伴い発生・消滅する一酸化炭素（CO）、水蒸気（H₂O）、二酸化炭素（CO₂）、メタン（CH₄）、水素（H₂）等の各ガス濃度についても解析しています。



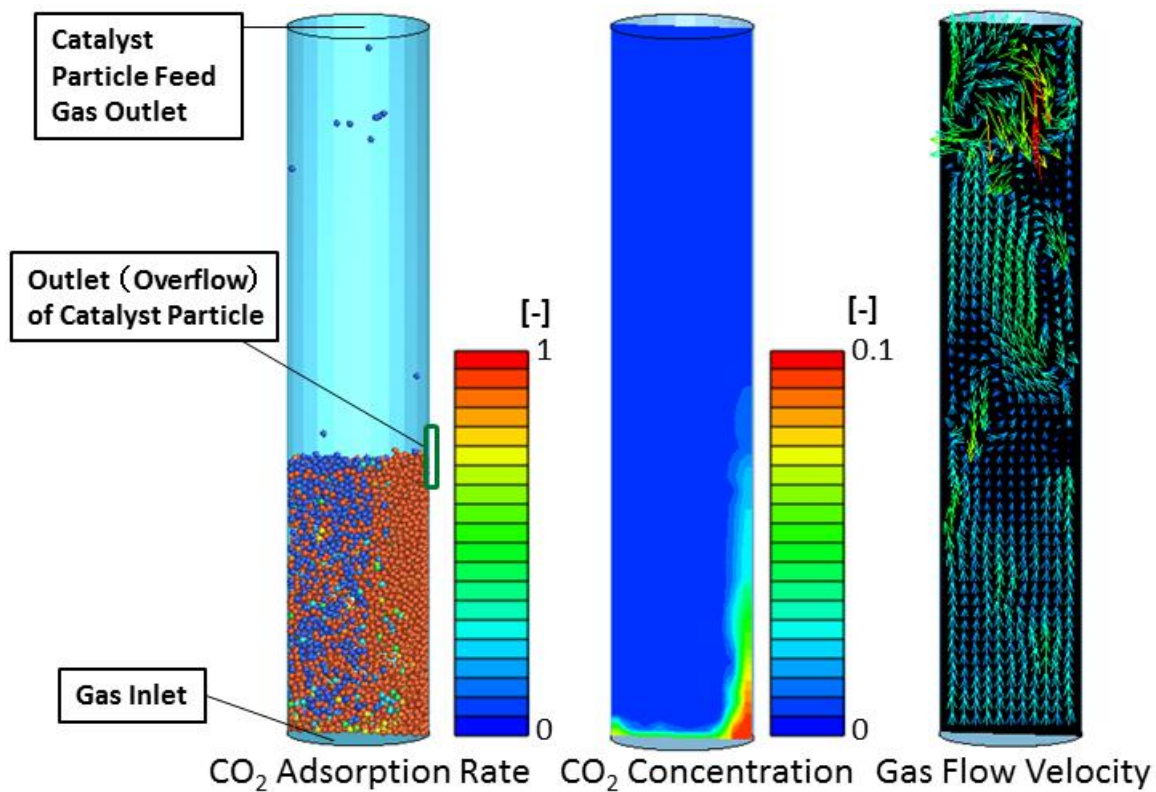
廃棄物粒子のガス化過程は、水分蒸発、揮発分の放出（熱分解）、固定炭素（チャー）ガス化の三段階に分けて解析しています。



反応性ガスの濃度（体積占有率）分布。上記濃度成分のほか、メタン（CH₄）等についても解析しています。

流動層式反応炉内の CO₂ 吸着解析

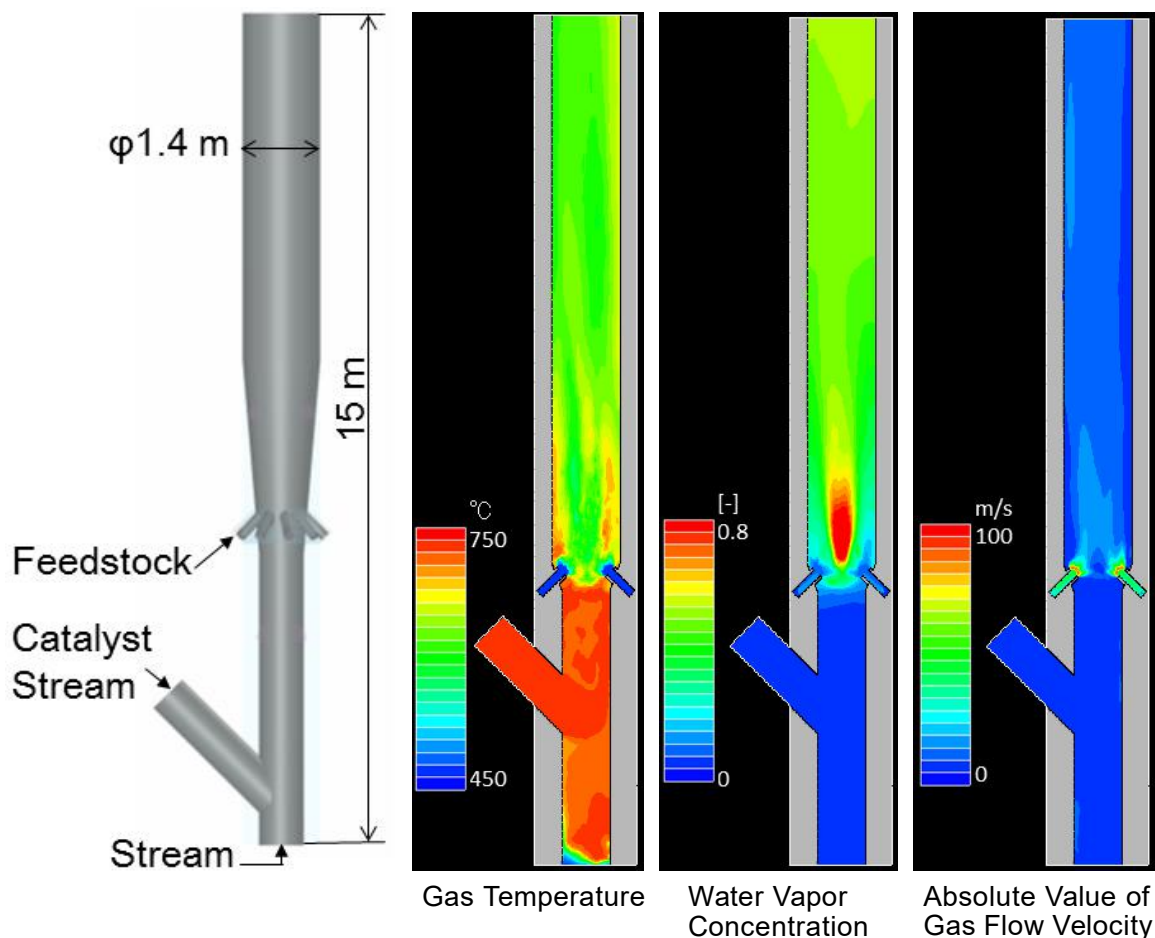
触媒 (Na₂O) 粒子が充填された流動層内にガスを通気することにより、ガス中に含まれる二酸化炭素 (CO₂) が触媒粒子に吸着される反応プロセスを解析しています。



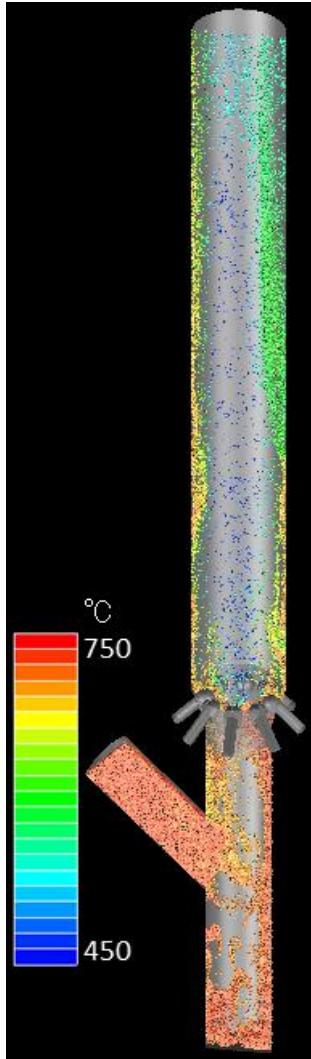
左から、触媒 (Na₂O) 粒子の二酸化炭素 (CO₂) 吸着率、ガス中二酸化炭素 (CO₂) 濃度、ガス流速分布に対応。触媒粒子投入時の CO₂ 吸着率は 0。

FCC リアクタ内の熱流動, 液滴蒸発, 触媒挙動解析

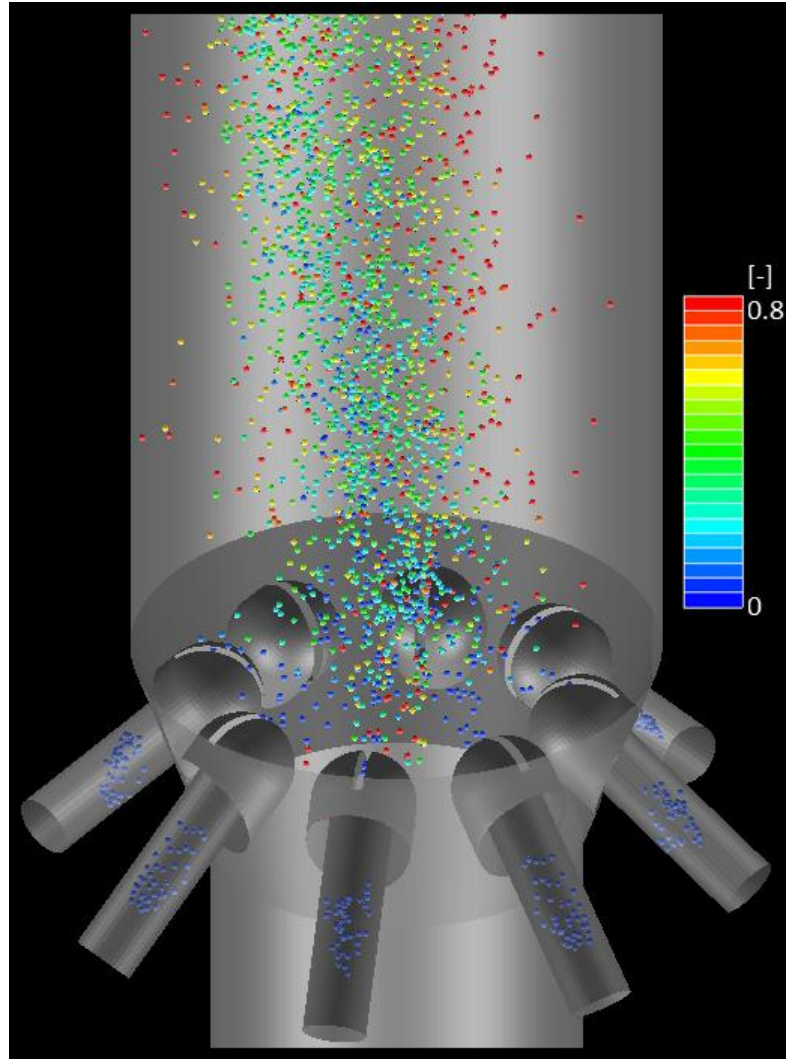
Fluidized Catalytic Cracking (FCC) リアクタ内のガス流れ、触媒粒子挙動、液滴蒸発過程を RFLOW による粒子・流体連成解析により再現しています。輻射場についても連成して解析しています。



触媒粒子および液滴の解析には、DEM ベースの代表粒子モデルを用いている他、液の蒸発に伴う粒子の質量減少に応じて、代表粒子（粒子接触判定計算に用いる解析上の粒子）径、実粒子径ともに小さくなっていきます。触媒粒子および液滴の挙動、温度、蒸発に関わる流体抵抗、粒子流体間伝熱係数、粒子表面積等の計算には、実粒子径を用いて解析しています。蒸発により蒸発ガスが発生します。



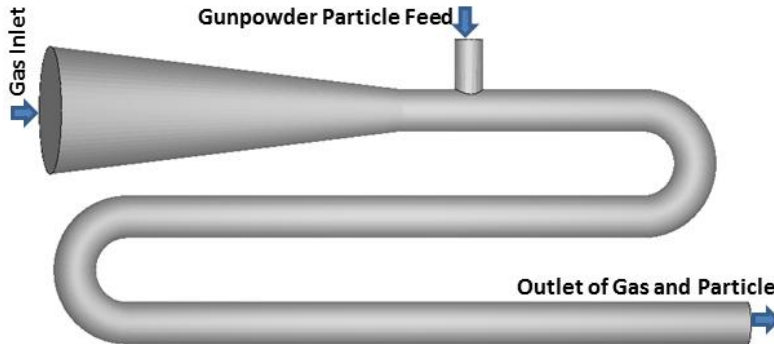
Catalytic Particle Temperature



Droplet Evaporation Rate

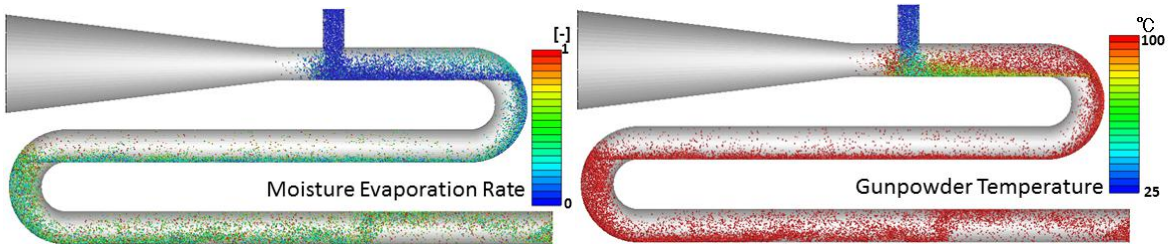
液の蒸発速度は、液滴粒子の温度が沸点に達した後、高温ガスから粒子流体間伝熱により粒子が受け取る熱量分が気化熱に変わるという前提で算出しています。

火薬乾燥解析

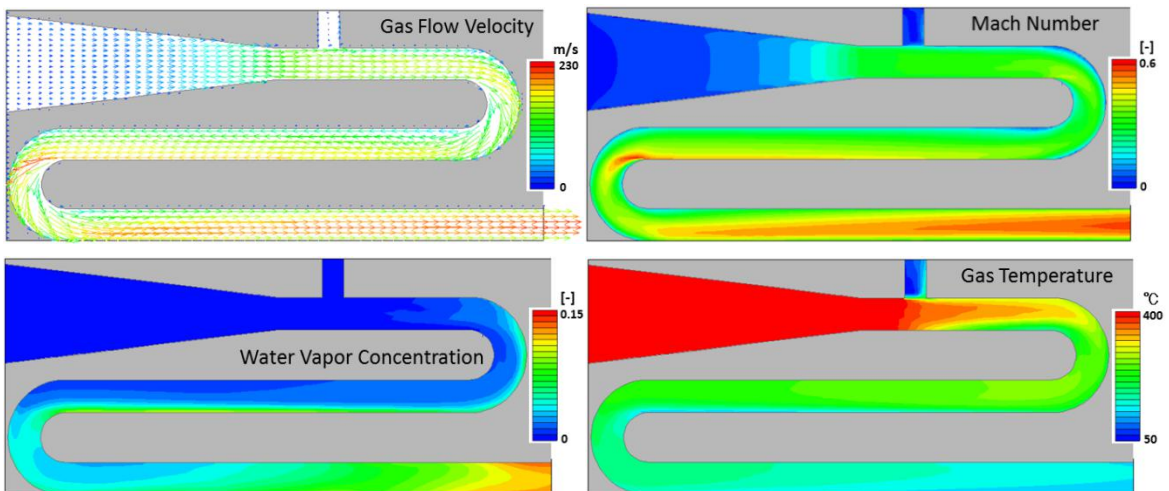


高速で流れる高温の圧縮性ガス流れの中に火薬粒子を投入することにより、火薬中に含まれる水分が蒸発していく過程をRFLOWによる粒子・流体連成解析により再現しています。

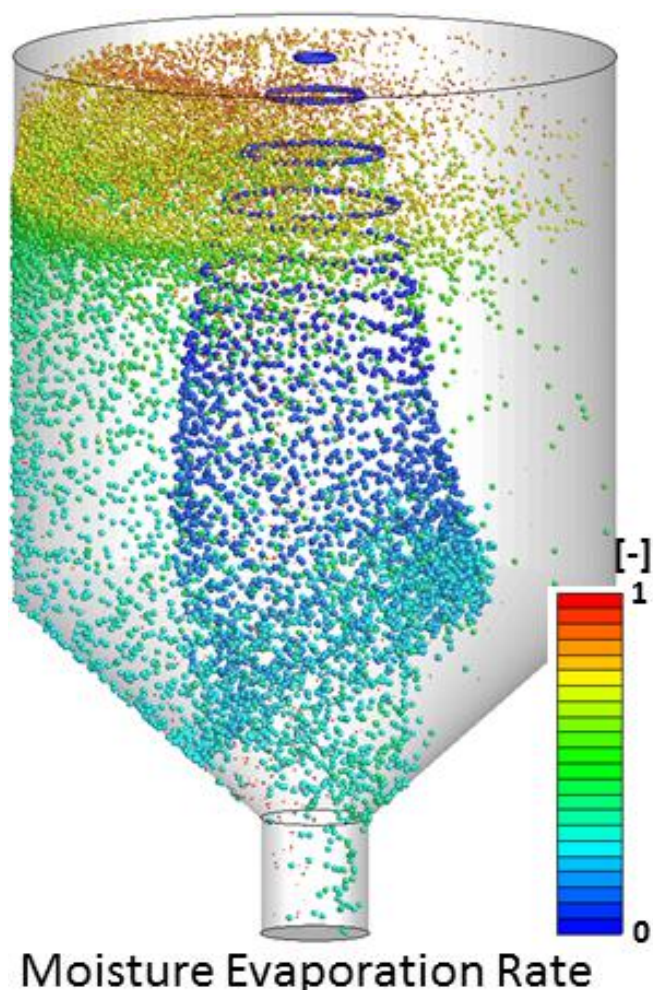
火薬粒子の解析には、DEM ベースの代表粒子モデルを用いており、粒子投入時の実粒子径については、粒径分布を与えて解析しています。水分の蒸発に伴う粒子の質量減少に応じて、代表粒子（粒子接触判定計算に用いる解析上の粒子）径および実粒子径の粒子密度が小さくなるような解析を行っています。粒子の挙動、温度、蒸発速度に関わる流体抵抗、粒子流体間伝熱係数、粒子表面積等の計算には、実粒子径を用いて解析しています。下図では、代表粒子の2倍の大きさで火薬粒子を表示しています。



水分蒸発速度は、粒子（液）温度が沸点（100°C）に達した後、高温ガスから粒子流体間伝熱により粒子が受け取る熱量分が気化熱に変わるという前提で決定しています。蒸発により水蒸気が発生します。



スプレードライヤー内の液滴蒸発解析

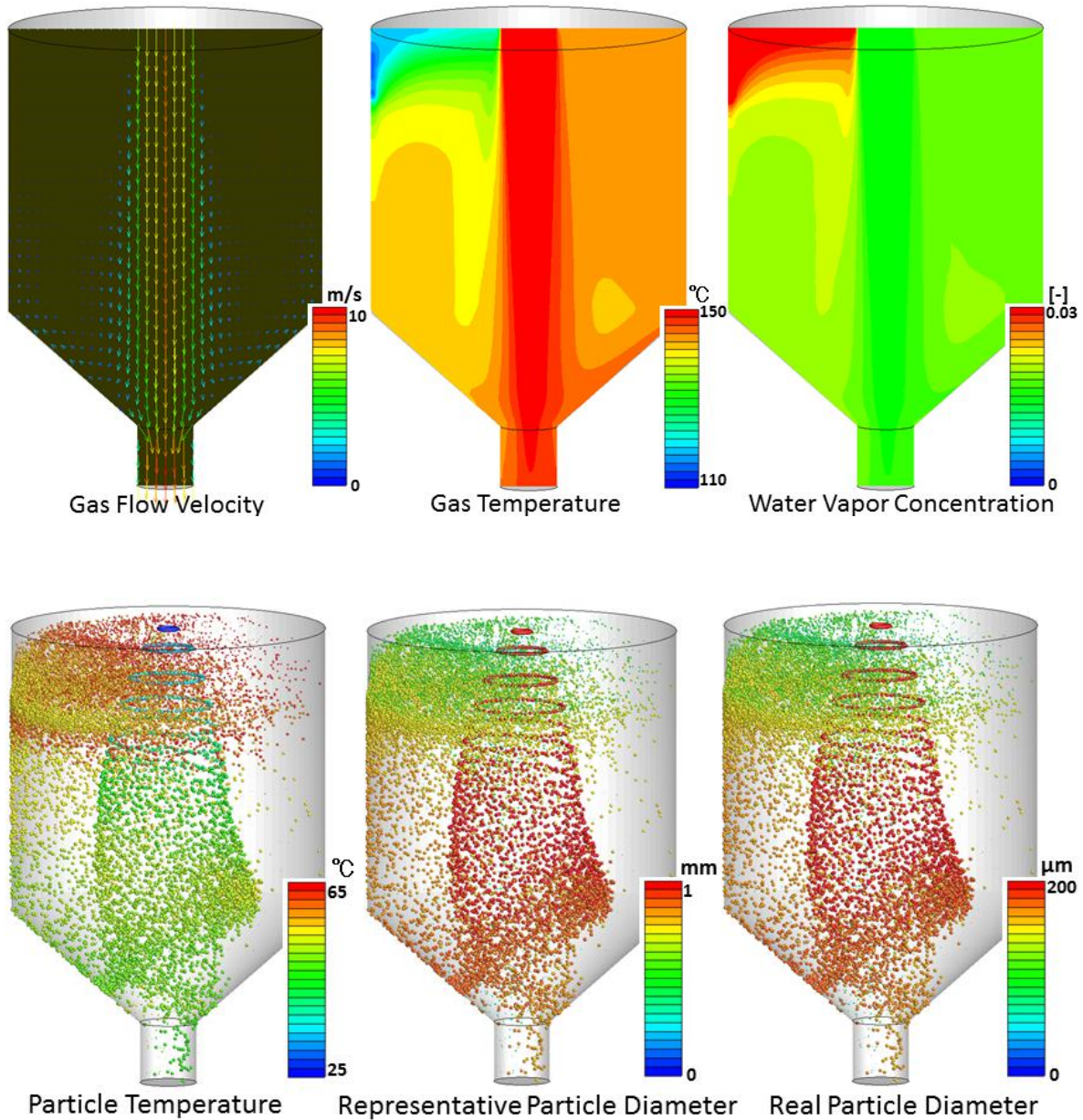


スプレードライヤー装置天井付近の中心部に設置された回転ノズルより、ガスとともに放出された液滴が蒸発していく過程をRFLOWによる粒子・流体連成解析で再現しています。

液の蒸発モデルとしては、液滴が沸点（100℃）に達した後の沸騰による蒸発に加え、沸点到達前の常温での蒸発についても考慮しています。常温蒸発では、ガス中の水蒸気濃度と飽和蒸気圧に基づく蒸発モデルを用いて、蒸発速度を求めています。

解析では、粒子は固体を含まない液滴と仮定していますが、固体粒子の表面に液が付着している状態の液蒸発過程を解析することも可能です。

上図では、代表粒子（粒子接触判定計算に用いる解析上の粒子）の20倍の大きさを液滴を表示しています。



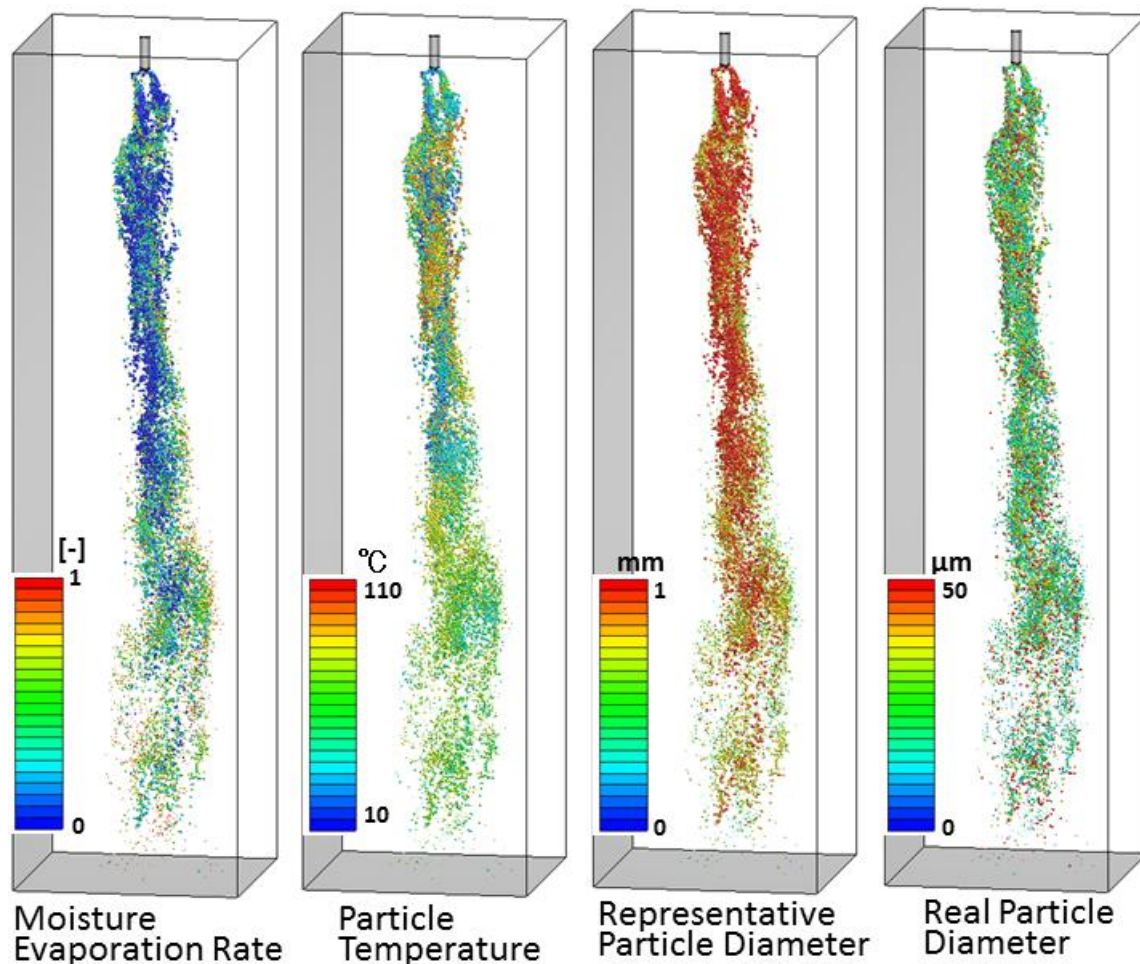
液滴粒子の解析には、DEM ベースの代表粒子モデルを用いており、液滴発生時の実粒子径に対して、粒径分布を与えています。液の蒸発に伴う粒子の質量減少に応じて、代表粒子（粒子接触判定計算に用いる解析上の粒子）径、実粒子径ともに小さくなっていきます。液滴の挙動、温度、蒸発速度に関わる流体抵抗、粒子流体間伝熱係数、粒子表面積等の計算には、実粒子径を用いて解析しています。上図では、代表粒子の 20 倍の大きさで液滴を表示しています。

ノズルから噴霧された液滴蒸発解析

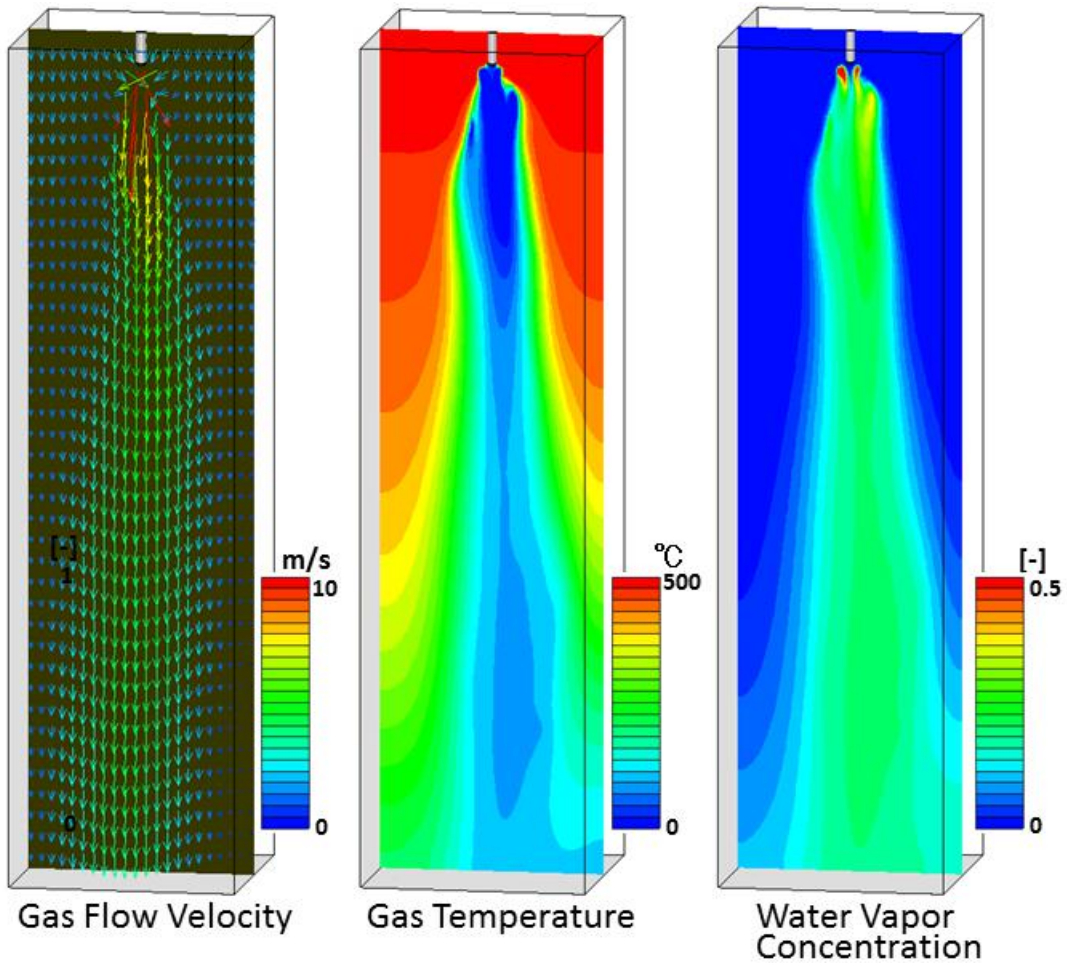
装置上部のノズルから噴霧された微細な液滴が蒸発していく過程を RFLOW による粒子・流体連成解析で再現しています。ノズル近傍からは、液滴を微粒化するためのガスも噴出しています。

液滴粒子の解析には、DEM ベースの代表粒子モデルを用いており、液滴発生時の実粒子径に対して、粒径分布を与えています。液の蒸発に伴う粒子の質量減少に応じて、代表粒子（粒子接触判定計算に用いる解析上の粒子）径、実粒子径ともに小さくなっていきます。液滴の挙動、温度、蒸発速度に関わる流体抵抗、粒子流体間伝熱係数、粒子表面積等の計算には、実粒子径を用いて解析しています。

液の蒸発モデルとしては、液滴が沸点（100℃）に達した後の沸騰による蒸発に加え、沸点到達前の常温での蒸発についても考慮しています。常温蒸発では、ガス中の水蒸気濃度と飽和蒸気圧に基づく蒸発モデルを用いて、蒸発速度を求めています。



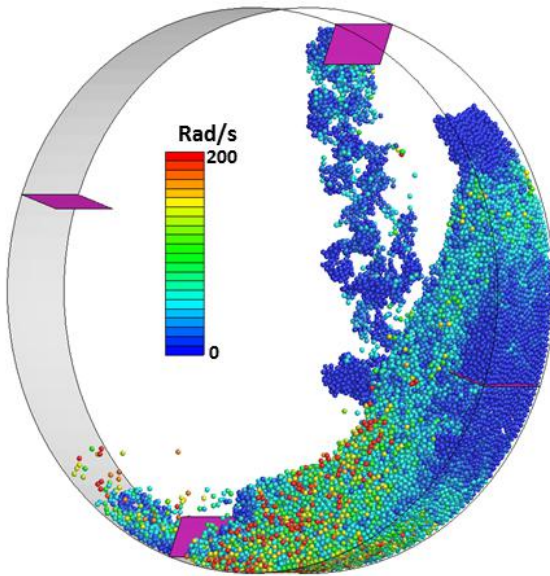
図では、解析に用いた代表粒子径の 10 倍の大きさで液滴を表示しています。



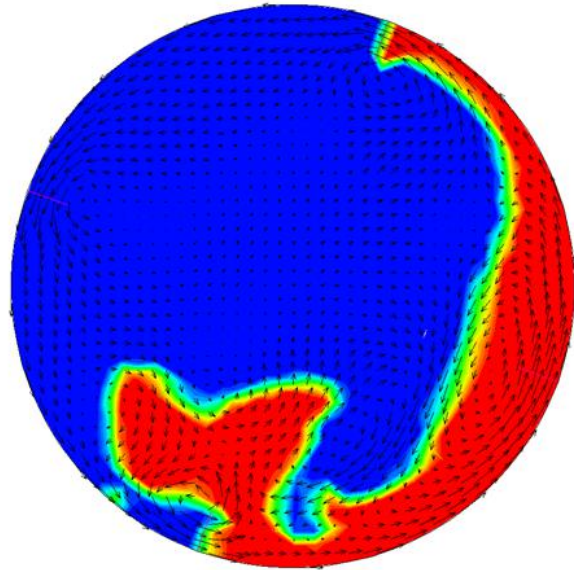
ノズル近傍からは、液滴を微粒化するためのガスが噴出しています。液の蒸発に伴い、水蒸気が発生します。

湿式ボールミル内の液流れとボール挙動解析

湿式ボールミル内の液流れとボール挙動の連成解析事例



ボール粒子の挙動
粒子表示色は回転角速度

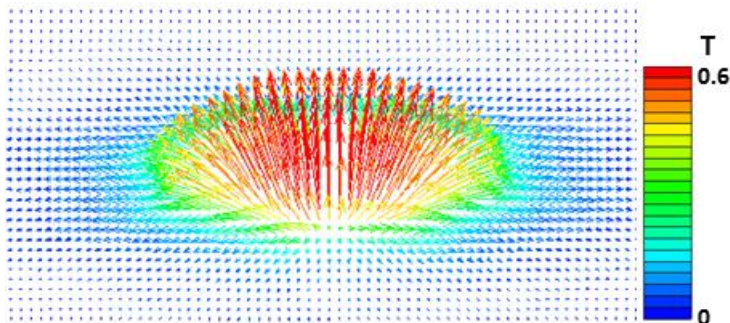


ミル中央断面での液分布と
液流速分布

液流れについてはVOF法により解析しています。一方、直径2mmのボール粒子挙動については、DEM（離散要素法）により解析しています。液の外（空中）に飛び出した粒子については、粒子表面に液が付着していることを想定し、液架橋力（付着力）を考慮した解析を行っています。液中にある粒子については、液架橋力は働かないようになっています。

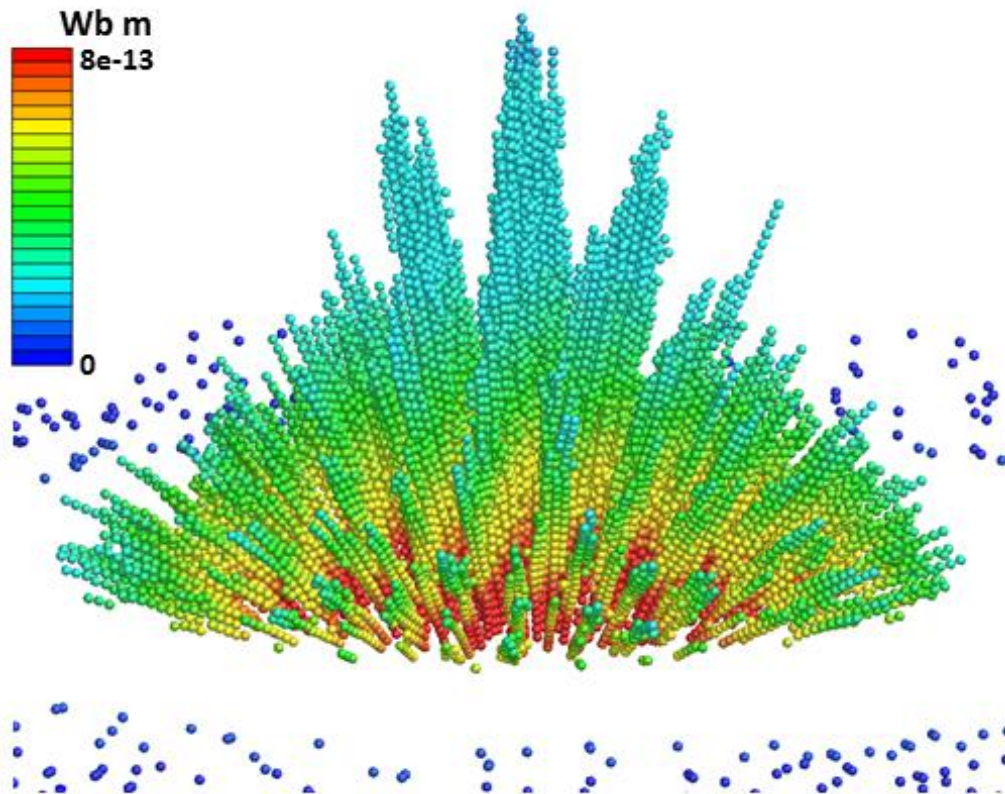
外部磁界中の磁性粒子挙動解析

磁界中にトナーのような磁性粒子が分散すると、粒子に作用する磁気作用力によって磁気ブラシが発生することが知られています。RFLOWでは、粒子中心に無限小の磁気双極子を仮定し、磁気双極子に作用する力として磁気作用力を定式化した上で、離散要素法（DEM）により、磁性粒子挙動を解析しています。



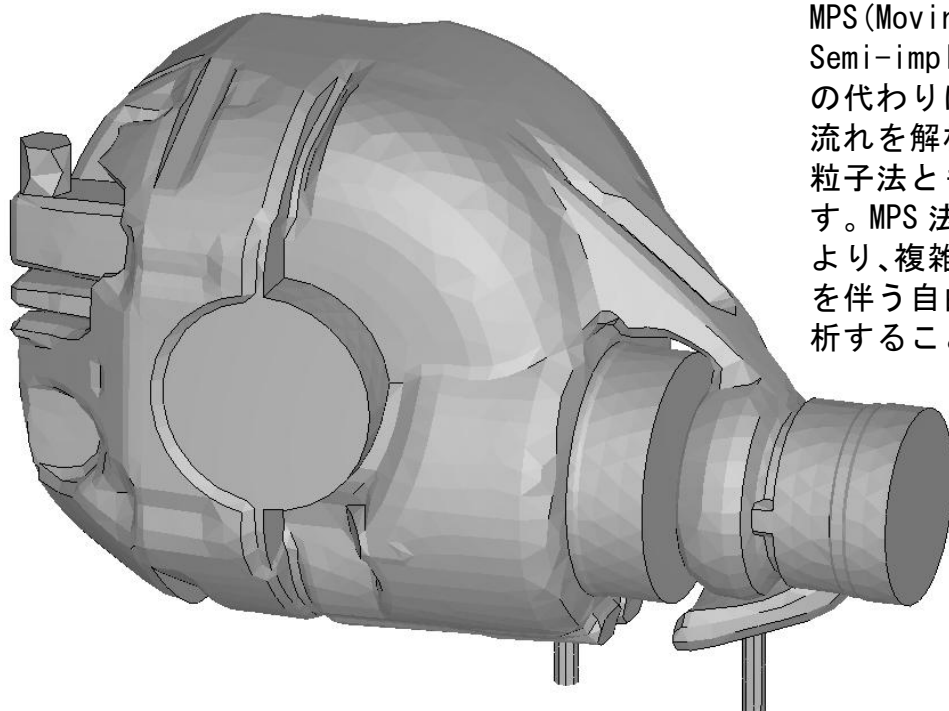
磁性粒子挙動解析で用いた外部磁界

下図では、実粒子径 $3.36 \mu\text{m}$ の磁性粒子に対し、代表粒子径 $500 \mu\text{m}$ の代表粒子を用いた代表粒子モデルにより解析しています。外部磁界（左図）は、解析の入力条件として与えています。

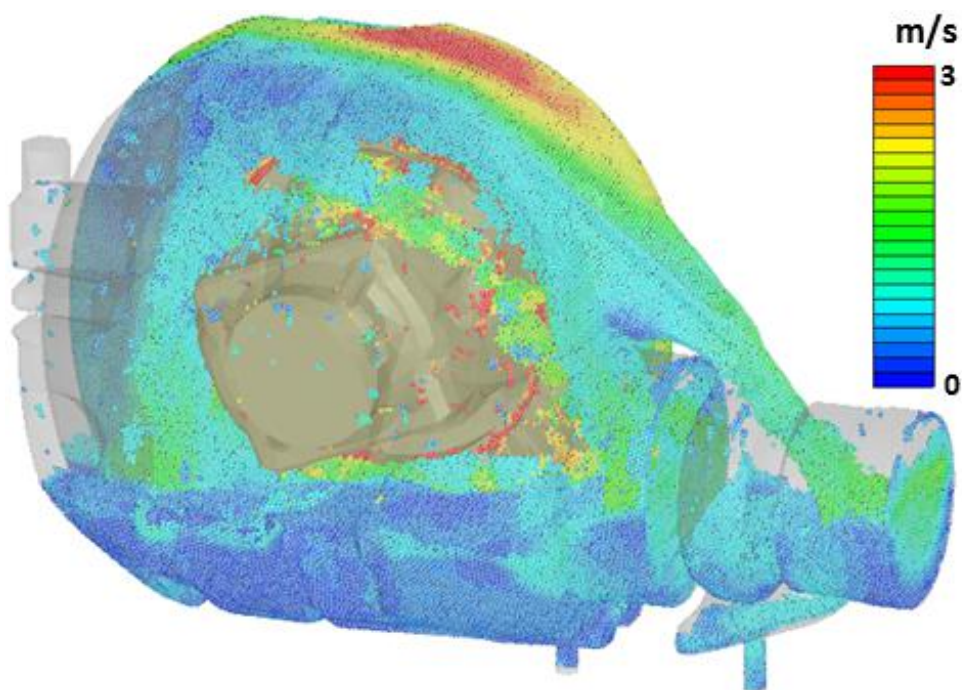


外部磁界中の磁性粒子の挙動。粒子表示色は磁気双極子モーメント。

MPS法によるファイナル・ドライブ内の液挙動解析



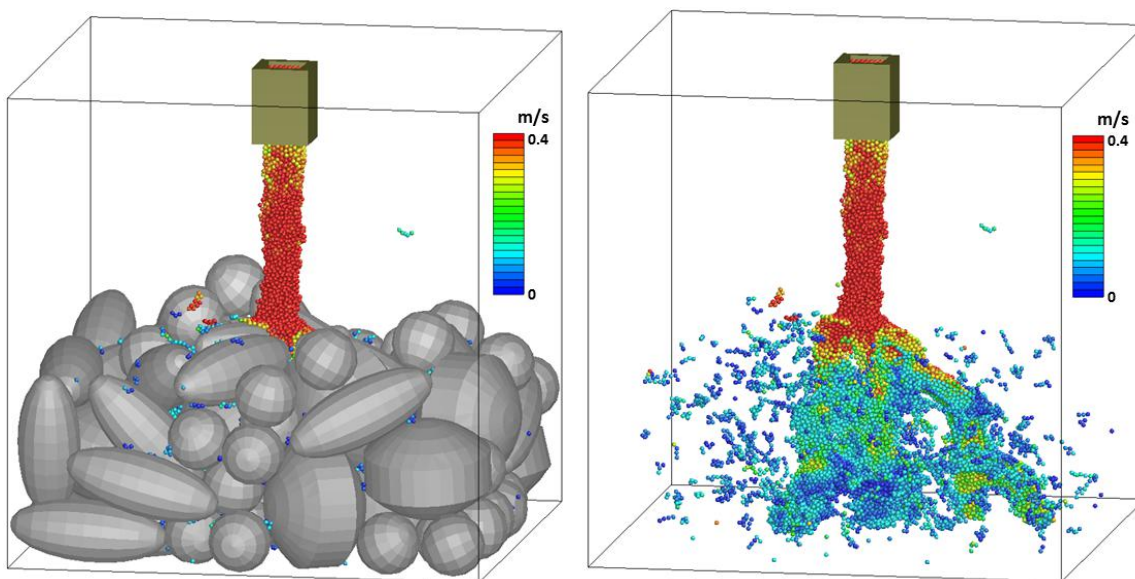
MPS (Moving Particle Semi-implicit) 法は、格子の代わりに粒子を用いて流れを解析する手法で、粒子法とも呼ばれています。MPS法を用いることにより、複雑な自由表面形状を伴う自由表面流れを解析することができます。



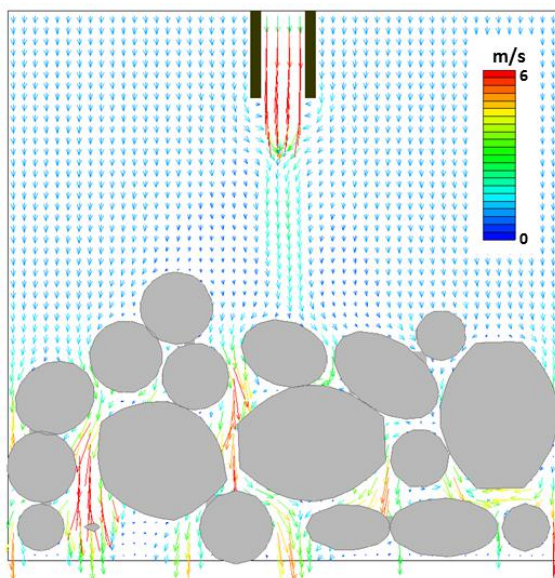
ある瞬間の液流れ。MPS 粒子表示色は MPS 粒子（液）速度の絶対値。

トリクルベッドリアクタ内の液およびガス流れ解析

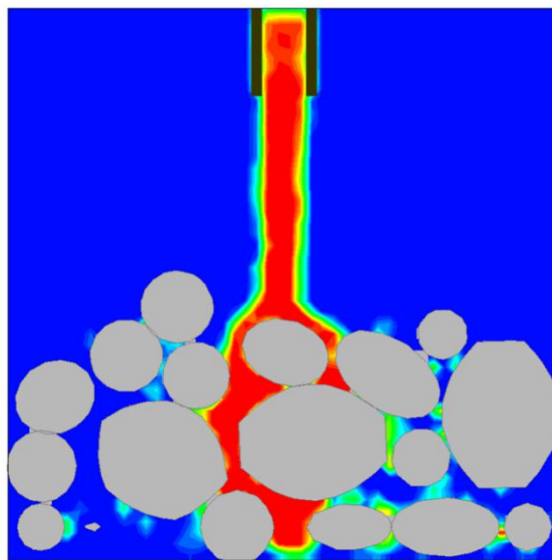
様々な形状の触媒粒子が充填されたトリクルベッドリアクタ内の液流れを MPS (Moving Particle Semi-implicit) 法、ガス流れを計算格子を用いた格子法で解析した事例。



触媒粒子の間を通過する液流速分布。粒子表示色は MPS 粒子速度の絶対値。



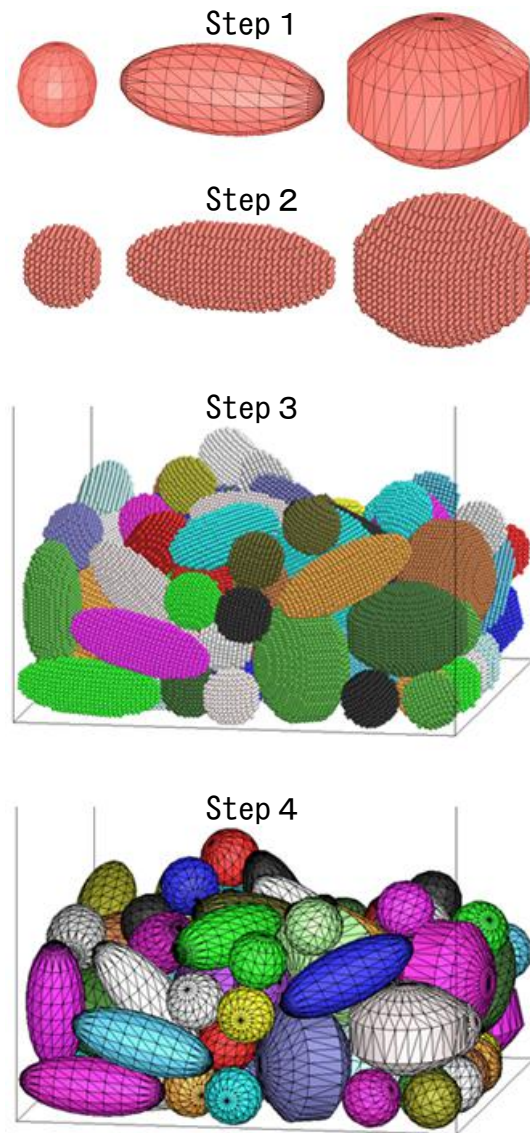
リアクタ中央断面内のガス流速分布。ガスは上部前面から流入。



MPS 粒子配置から求めたリアクタ中央断面内の液分布のコンター。

トリクルベッドリアクタの解析手順

トリクルベッドリアクタ内の流動解析を行うに先立ち、触媒粒子の充填状態を再現しておく必要があります。触媒粒子には様々な形状があるため、CAD等の形状データを用い、さらに結合粒子を用いたDEMによる解析を何段階かに分けて実施します。



Step 5
前頁のMPS法による液流れと格子を用いたガス流れの解析結果

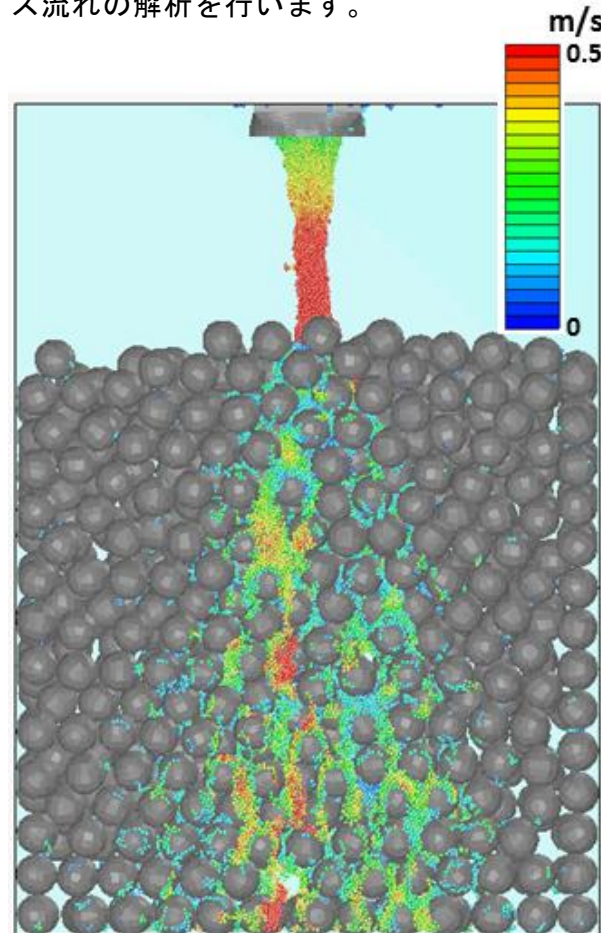
Step 1 :
様々な形状の触媒粒子を壁面要素として作成します。壁面要素はRFLOWのプリまたはCADからSTLファイルを介して作成できます。

Step 2 :
それぞれの壁面要素形状内に結合粒子を発生します。結合粒子の発生はRFLOWのソルバーにより行うことができます。

Step 3 :
DEMによる結合粒子の自由落下解析を、すべての粒子が静止するまで行います。

Step 4 :
静止状態にある結合粒子から、対応する壁面要素をRFLOWソルバーで復元します。

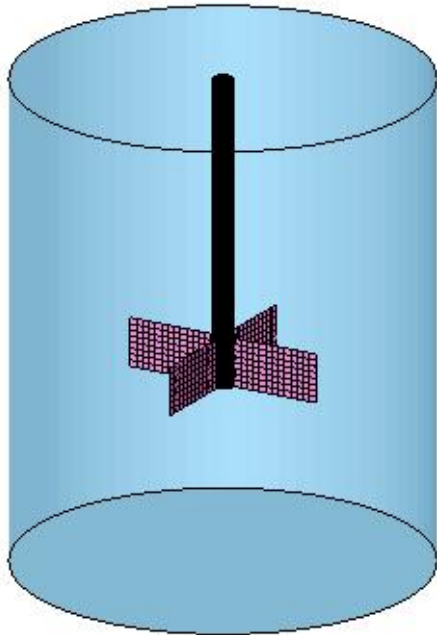
Step 5 :
前頁のMPS法による液流れと格子を用いたガス流れの解析を行います。



球状触媒粒子が充填されたトリクルベッドリアクタ内の液流れをMPS法を用いて解析した事例

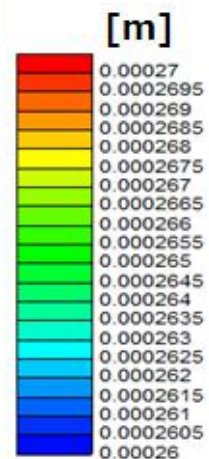
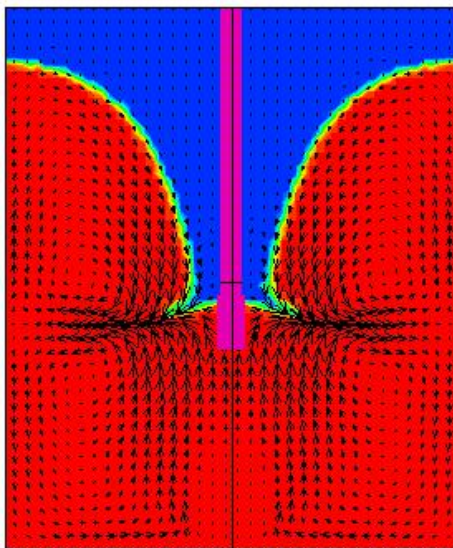
攪拌槽内の液滴分裂・合一解析

攪拌槽内の液滴の分裂・合一を考慮した液液分散系混相流解析事例



液滴については、連続体近似した上で、分散相（液滴）を液滴径の異なる13相に分割した14流体（連続相+13の分散相）オイラー・オイラー混相流モデルを用いて、液滴の分裂・合一を考慮した解析を行っています。

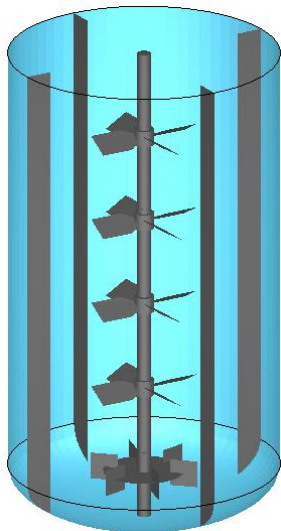
液滴の分裂モデルとしては、気泡の分裂モデルと同様、流れ場から受ける剪断応力によって最大安定液滴径が決まるという液滴分裂モデルを用いて解析しています。一方、合一については、接触した液滴の速度差に基づくウェーバー数により合一条件を算出するRFLOW独自の合一モデルを用いて解析しています。液滴の分裂・合一に伴い、液滴は液滴径の異なる同じ場所の別の分散相に移ることで、場所ごとの液滴径分布が求められます。



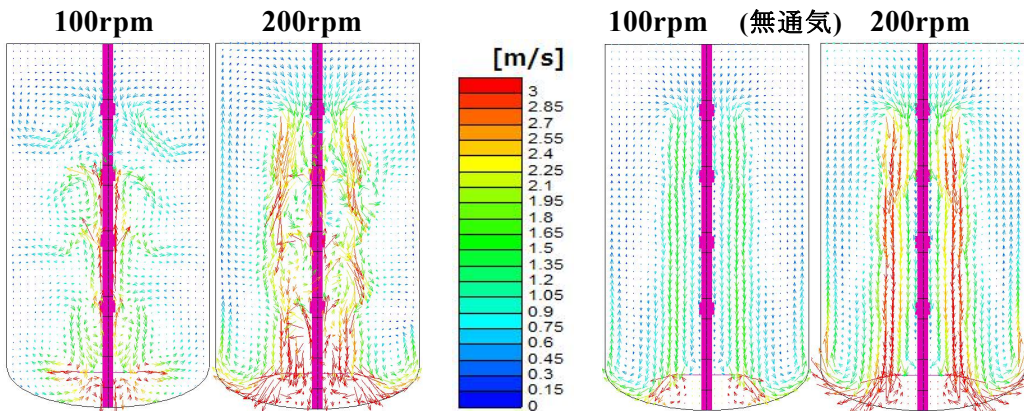
VOF 法により得られた液面形状と液流速分布（左）と、液滴のザウター平均径の空間分布（右）。

培養槽内のガス吸収解析

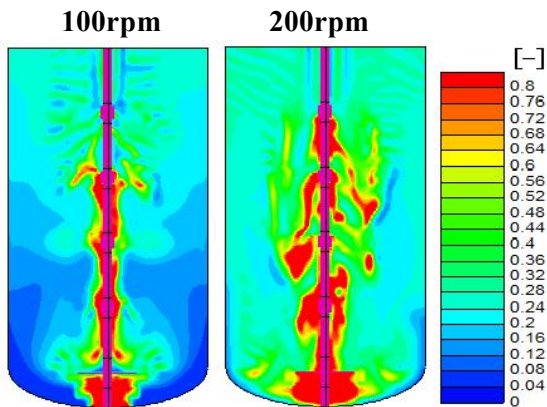
動物細胞等の微生物を培養するための通気攪拌槽型培養槽の解析事例。通気により供給された気泡中の酸素成分がガス吸収により溶存酸素(DO)として液中に溶け込みます。一方、液中では、微生物の呼吸によりDOが消費されると同時に二酸化炭素が放出されます。解析では、流れ場、気泡ポイド率、気泡径から求まる $k_L a$ に加えて、液中溶存酸素、二酸化炭素、気泡中酸素、二酸化炭素、および培地(培養液)濃度分布についても流動解析と連成して解析しています。また、気泡の分裂・合一を考慮したN+1(N相の分散相と連続相)混相流体モデルを用いて気泡径分布についても解析しています。



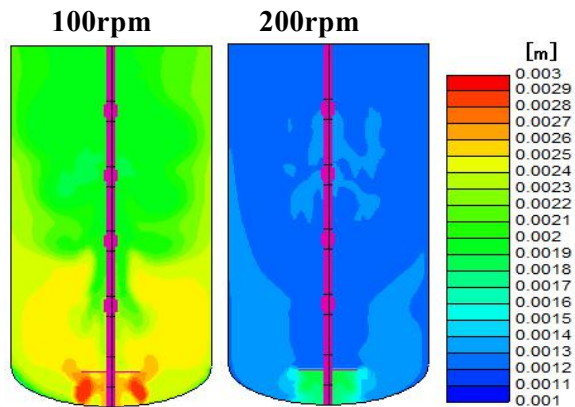
主な解析条件	
槽径	2[m]
液深	3.6[m]
翼回転数	100/200[rpm]
液密度	1000[kg/m ³]
液粘度	0.001[Pas]
DO 拡散係数	3.3×10^{-9} [m ² /s]
DCO ₂ 拡散係数	2.2×10^{-9} [m ² /s]
通気ガス	空気
通気量	0.2[m ³ /s]
微生物呼吸速度	0.0012[kg/m ³ s]
培養液注入量	0.001[m ³ /s]



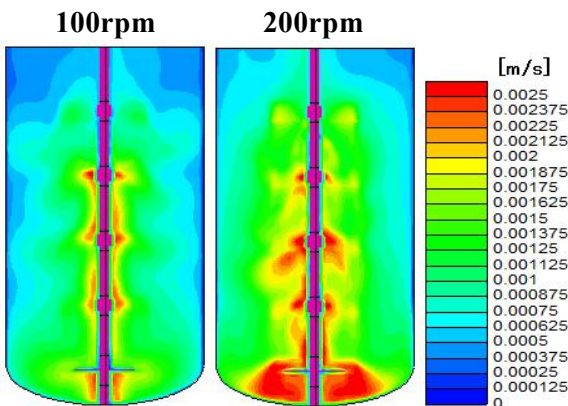
鉛直断面内の液流速分布。回転数が低いと通気の影響をより強く受けるため、中心付近での下降流が弱められる。右側の図は通気無の場合(参考)。



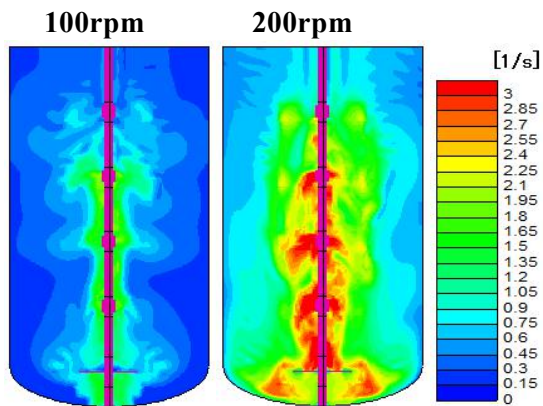
気泡ボイド率（体積占有率）分布. ボイド率の槽内平均値は, 100rpmでは0.164, 200rpmでは0.265と200rpmの方が大きい.



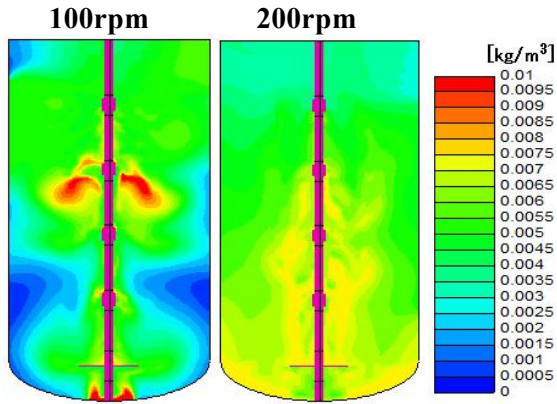
ザウター平均気泡径の空間分布. 気泡径の槽内全体での平均値は, 100rpmでは2.26[mm], 200rpmでは1.20[mm]と200rpmの方が小さい.



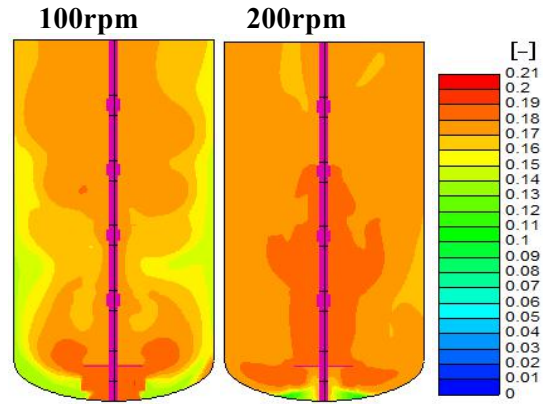
酸素の k_L 分布. k_L の槽内平均値は, 100rpmでは0.000683[m/s], 200rpmでは0.000968[m/s]と200rpmの方が若干大きい.



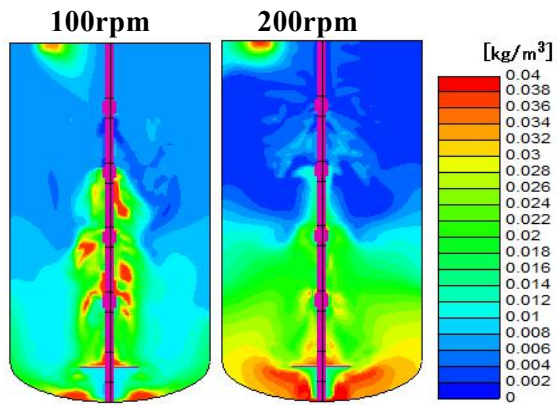
k_{La} (酸素)分布. k_{La} の槽内平均値は, 100rpmでは0.252[1/s], 200rpmでは0.944[1/s]と200rpmの方が圧倒的に大きくなる.



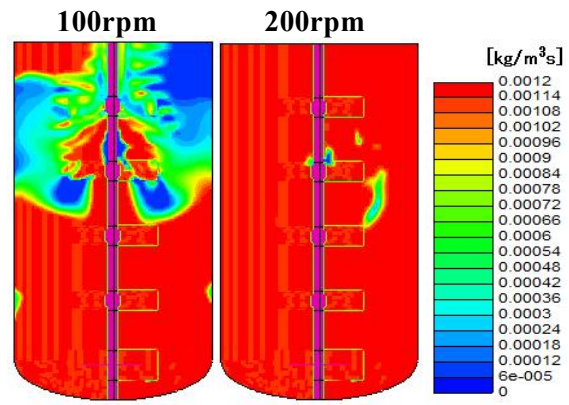
液中溶存酸素 (DO) 濃度分布. 槽内平均値は 100rpm では $0.00348 \text{ [kg/m}^3\text{]}$, 200rpm では $0.00548 \text{ [kg/m}^3\text{]}$.



気泡中酸素濃度分布. 槽内平均値は, 100rpm では 0.170 , 200rpm では 0.183 .



培養液 (培地) 濃度分布. 槽内平均値は, 100rpm では $0.0121 \text{ [kg/m}^3\text{]}$, 200rpm では $0.0081 \text{ [kg/m}^3\text{]}$.



呼吸速度分布. 100rpm では, 槽内上部で, 混合不良により, 十分な呼吸ができない領域が存在する.