

# 機器設計における熱流体解析の活用事例

## CFD Simulation Analysis of Equipment Design



井上尚子\*  
Naoko Inoue



多田俊哉\*  
Toshiya Tada

当社では汎用熱流体解析ソフトウェア（ANSYS Fluent）を活用して、各種機器設計を行っている。本報では、①ガス冷却塔の入口ダクトの適正な接続方法、②シックナーのセンターウェル長さの影響、③ボイラ火炉への適正な燃焼空気供給方法について検討した事例について紹介する。

Some equipment is designed by using commercial general-purpose CFD code (ANSYS Fluent). In this report, three case studies are described as follows; 1) Design of gas inlet duct of gas cooling system, 2) Effect of centerwell length for thickener performance, 3) Design of air supplying system for waste heat boiler.

### Key Words :

数値流体力学  
シミュレーション

Computational Fluid Dynamics  
Simulation

### 【セールスポイント】

汎用熱流体解析ソフトウェアを活用することで適正な機器設計が可能となる。

### まえがき

当社は水処理、廃棄物処理、化学・食品機器の分野で様々なプラントや機器を社会に提供している。これらの製品は物質と熱の流れを伴うものであり、それらを適正に制御することが製品の性能を確保するうえで重要な課題である。また、新しい製品の開発においては、熱や流体の挙動を正確に予測することで開発のスピードアップとコストダウンが可能となる。このように設計や開発において重要な因子である熱流体の挙動を予測する上で、CFD (Computational Fluid Dynamics) を利用した解析は有効な手段であり、これまでも多くの成果を上げている。本報では、汎用熱流体解析ソフトウェア (ANSYS Fluent) を用いて、①ガス冷却塔の入口ダクトの適正な接続方法、②シックナーのセンターウェル長さの影響、③ボイラ火炉への適正な燃焼空気供給方法について検討した事例について紹介する。

### 1. 廃棄物処理プラント) ガス冷却塔の流れ解析

都市ごみ処理施設では都市ごみを焼却した排ガスから排熱ボイラで熱回収をした後、排ガスに水を噴霧して所定の温度まで冷却するためにガス冷却塔が必要となる場合がある。ここで、噴霧した水の蒸発が完了する前に冷却塔の壁面に到達すると、排ガスが所定の温度まで低下しないだけでなく、濡れた壁面に飛灰が付着・成長することによって操業に支障をきたすことがある。それゆえ、噴霧水の軌跡に乱れが生じないように、ガス冷却塔内のガス流れは整流された状態になるように塔本体の形状が設計されている。しかし、ガスの整流状態は本体のみならず入口ダクトの接続の仕方によっても大きく影響を受ける。そのため、配置などの制限のもとで問題が生じないようにCFD解析を用いて適正なダクト接続方法を検討している。

ガス冷却塔のシミュレーションにおいて、噴霧水の挙動は分散相モデル (Discrete Phase Model) を用いて解析している。分散相モデルでは、排ガスは連続体として扱われ、噴霧水はこの流れ場を通過する多数の液滴 (分散相) として軌跡を追跡することで解析される。当然であるが、噴霧された液滴は排ガスを流れるだけでなく、排ガスから熱を受けて蒸発し、排ガス中に水蒸気として移行する挙動が再現されている。

ガス冷却塔とダクトの接続方法を検討した解析例を図1に示す。各ケースはダクトの接続部面積、ダクト形状が異なっており、形状3はガス冷却塔上部のチャンバー形状も異なっている。図1はシミュレーションを行った4ケースの接続方法での流れのベクトル図である。

これらの結果から適正な接続方法を判定するため排ガスの流れと噴霧水の挙動を定量的に評価する指標を独自に設定した。設定した3つの定量評価指標

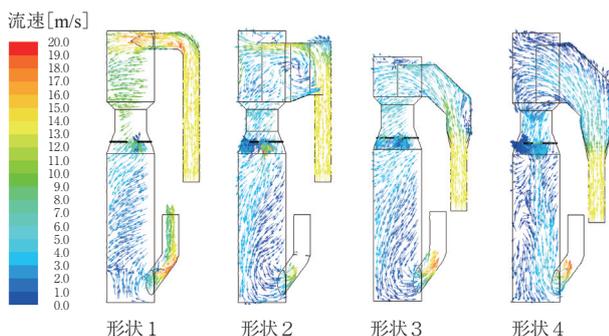


図1 ガス冷却塔の解析例 (速度ベクトル図)

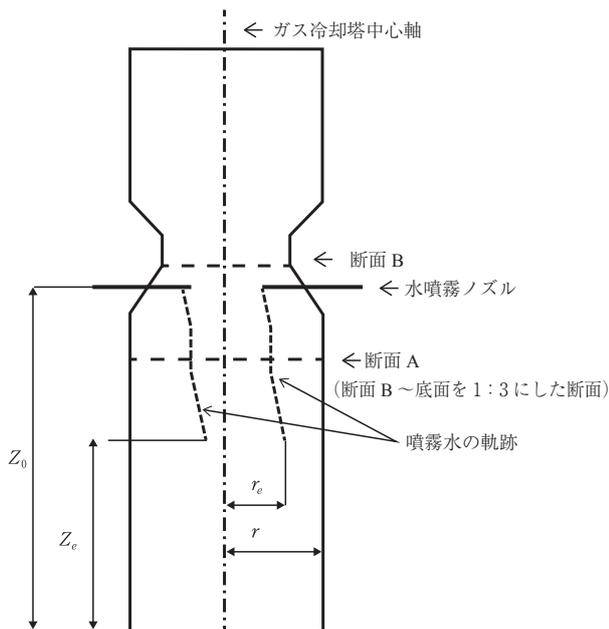


図2 ガス冷却塔における各種定量評価指標

はそれぞれ以下のように定義されるものである (図2参照)。

① 排ガスの整流状態に関する指標:  $C$  [-]

図2に示す断面A (平面  $x$ - $y$  で表現) において、排ガスの鉛直下向き運動量で評価した重心がガス冷却塔中心軸からどれだけ離れているかで、排ガスの整流状態を評価する。この値が小さいほど、排ガス流れがチャンバーで整流されていると考えられる。

$$C = (G_x^2 + G_y^2)^{1/2} / r$$

ここに、 $G_x = \sum px / \sum p$ : 重心位置 [m]

$G_y = \sum py / \sum p$ : 重心位置 [m]

$r$ : 減温塔半径 [m]

$p = \rho V w$ : 運動量 [ $\text{kg} \cdot \text{m} / \text{s}$ ]

$x$ : 塔中心を原点とした場合の  $x$  座標 [m]

$y$ : 塔中心を原点とした場合の  $y$  座標 [m]

$\rho$ : 排ガス密度 [ $\text{kg} / \text{m}^3$ ]

$V$ : セル体積 [ $\text{m}^3$ ]

$w$ : 鉛直下向き速度 [m/s]

② 噴霧水の水平蒸発距離に関する指標:  $H$  [-]

噴霧水粒子がもっとも壁面近くで蒸発した位置とガス冷却塔中心軸からの距離の比で評価する。この値が小さいほど、噴霧水粒子は壁面から離れた位置を通過しながら蒸発するため、噴霧水が壁面近傍を局部的に冷やすことによる灰付着の発生を抑制できると考えられる。

$$H = r_e / r$$

ここに、 $r_e$ : 半径方向最大蒸発距離 [m]

$r$ : 減温塔半径 [m]

③ 噴霧水の垂直蒸発距離に関する指標:  $Z$  [-]

噴霧水粒子が全て蒸発する高さで評価する。

この値が小さいほど噴霧水粒子は早く蒸発しており、排ガスを効率よく冷却していると考えられる。

$$Z = (Z_0 - Z_e) / Z_0$$

ここに、 $Z_0$ : 噴霧高さ [m]

$Z_e$ : 噴霧水蒸発高さ [m]

①によって排ガスの流れを評価し、さらに、②、③によって噴霧水の状態を評価できる。また、評価指標は無次元化することで異なる大きさのガス冷却塔を評価できるようになっている。

各形状における定量評価指標を表1に示す。形状

表1 ガス冷却塔解析結果の各種定量評価の結果

項目	形状1	形状2	形状3	形状4
排ガス整流状態 C [-]	0.254	0.227	0.142	0.096
噴霧水の水平蒸発状態 H [-]	0.766	0.713	0.730	0.535
噴霧水の垂直蒸発状態 Z [-]	0.203	0.266	0.255	0.340
評価	×	×	△	○

1のようにダクト接続部面積が小さくガス冷却塔入口流速が速いと排ガスの整流状態が良くなく、噴霧水の水平蒸発距離に関する指標も悪くなった。形状2ではダクト接続部面積を大きくしたが接続部で偏流が生じてガス冷却塔入口流速が速くなったため、評価指標での評価は形状1に比べて改善されなかった。形状3の接続方法だとガスの整流状態は良くなるが、噴霧水の水平蒸発距離に関する指標は改善されず、これはガス冷却塔入口での流速が影響しているものと予想される。最終的には形状4のように徐々にダクトを拡張し入口流速を抑えることで、ガスの整流状態と噴霧水の水平蒸発距離に関する指標を適正な数値にすることができた。形状4では噴霧水の垂直蒸発距離に関する指標が他の形状に比べて大きい、それでも噴霧ノズルから底面までの距離の0.34倍のところまで蒸発が完了しており、問題のない状態であるといえる。以上、シミュレーションによる検討の結果、形状4の評価がもっとも良くなり、配置による制限のある場合でも適正なダクト接続方法を提案することができた。

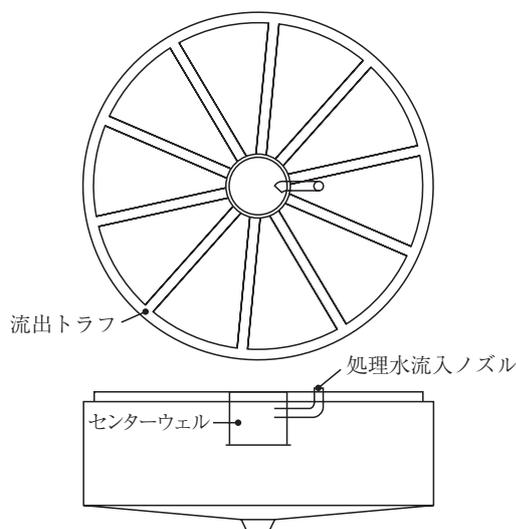


図3 シックナー概略図

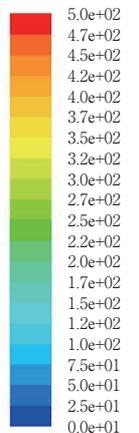
## 2. 水処理プラント) シックナーの流れ解析

シックナーとは、原水中の固体粒子（フロック）を重力により沈降濃縮させ、固液を分離する連続式の水処理装置である。本報で取上げるシックナーでは、センターウェルと呼ばれる筒状の箇所へ原水を流入させることで整流し、固液分離した処理水は上部の円周および放射状に設置したトラフから流出していく。シックナーの底に沈殿したフロックは、高濃度の汚泥としてポンプにより引抜かれる。通常、廃水処理用のシックナーは常温で使用されるが、今回は原水温度約98℃と特殊な条件下での使用を求められた。この場合、比重や温度勾配が常温と異なることが予想されるため、より安全な機器形状を検討することとなった。本報では、センターウェル長さがフロック沈降性能にどのような影響を与えるかシミュレーションにより確認した例について紹介する。

シミュレーションに使用したシックナーの形状を図3に示す。シックナー内の水が溢れて、円周および放射状に設置されたトラフより流出することを再現するため、トラフの上部に薄い流出領域を設定している。今回はシックナー底部の汚泥の堆積および汚泥の引抜きは考慮せず、センターウェルの長さがシックナー内の流れ場にどのような影響を与えるのかを確認した。シックナー性能は、分散相モデル (Discrete Phase Model) を用いて再現したフロックを流入させ、トラフからどれだけ流出するかで評価することとした。ここで、フロックの密度はフロック凝集性および沈降性を求めるためのピーカー試験で得た情報をもとに、以下に示す Stokes の式より求めた。

$$v_s = \frac{D_p^2(\rho_p - \rho_f)g}{18\eta}$$

粒子滞留時間 [s]



上：センターウェル長，下：センターウェル短

図4 0.25 mm 粒子の軌跡

ここに、 $\nu_s$  : 終末速度 [m/s]

$D_p$  : 粒子径 [m]

$\rho_p$  : 粒子の密度 [kg/m<sup>3</sup>]

$\rho_f$  : 流体の密度 [kg/m<sup>3</sup>]

$\eta$  : 流体の粘度 [Pa·s]

図4および表2に、粒子の軌跡および流出数を示す。沈降試験で得られたフロック径2.5 mmではセンターウェル高さによる違いが判断できなかったため、1/10の径(0.25 mm)および中間の径(0.79 mm:体積比が同じになるよう設定)でも検討を行った。その結果、センターウェルが長い形状ではどの径のフロックもトラフからの流出は認められなかったが、センターウェルが短い形状では、粒子径が小さくなるとフロックが浮上しトラフから流出する結果が得られた。

図5の温度コンター図を見ると、センターウェルが短い形状では、シクナー内で温度境界層が生じていることが確認できる。この温度境界層により流れが温度境界層部分で抑えられ、結果としてシクナーが浅い場合と同様の状態となっていることが、フロックの流出、すなわち性能悪化の原因であると考えられた。このことは、図4に示す粒子軌跡において、センターウェルが短い形状ではフロックがシクナーの底まで到達していないことから確認できる。

表2 フロック流出数 (全48個中)

粒子径	センターウェル長	センターウェル短
2.50 mm	0	0
0.79 mm	0	1
0.25 mm	0	7

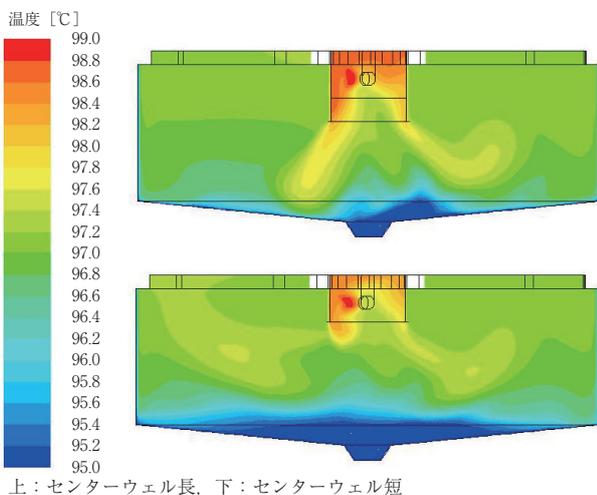


図5 温度コンター図

以上のシミュレーション結果より、2種類のセンターウェル高さを比較した場合、長い形状の方が好ましいと推察され、設計に反映されることとなった。

### 3. 廃棄物処理プラント) ボイラ火炉の燃焼解析

図6に示す流動層ボイラは、砂を流動媒体とした高温の流動層(砂層)で木質チップなどの燃料を熱分解し、可燃性ガス、未燃分および灰に分解したのち、ボイラに設置した二次空気によって可燃性ガスを完全燃焼させる。燃焼により発生する高温の排ガスはボイラにより熱回収し、発電に利用する。流動層ボイラは燃え残りが少なく熱回収率が高いことから、高い発電効率が得られると期待される。ただし、ボイラ入口付近が高温化すると耐火物ゾーンでクリンカが生成する恐れがある。また、ボイラ火炉に灰溶融点以上の高温域がある場合にも、クリンカがボイラ壁や管群に付着することで、熱回収が阻害されることが懸念される。

そこで、①耐火物構造であるボイラ入口が800℃以下、②ボイラ火炉が灰溶融点である1100℃以下、かつ均一な温度となる二次空気の吹込み方法を検討した。

計算範囲は砂層面からボイラ出口までとし、砂層表面から熱分解されたガスが発生すると仮定している。ここで、熱分解されたガスの成分および発熱量の設定が重要となるため、流動する砂層上のガス性状を把握する必要がある。そこで、当社ではベンチスケール実験炉によるガス化実験を行ってデータを

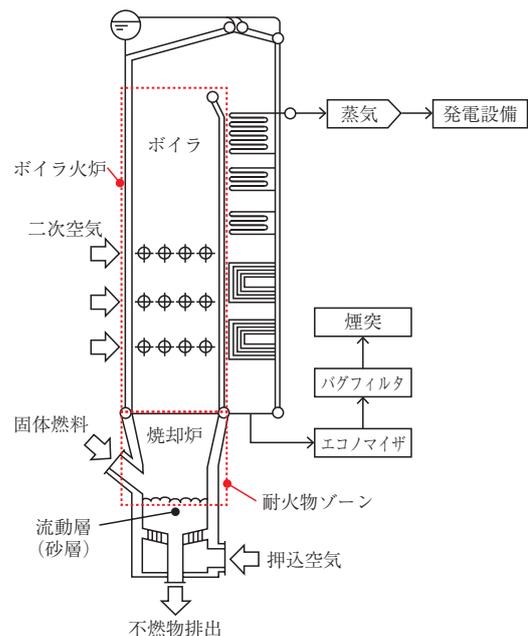


図6 流動層ボイラ略図

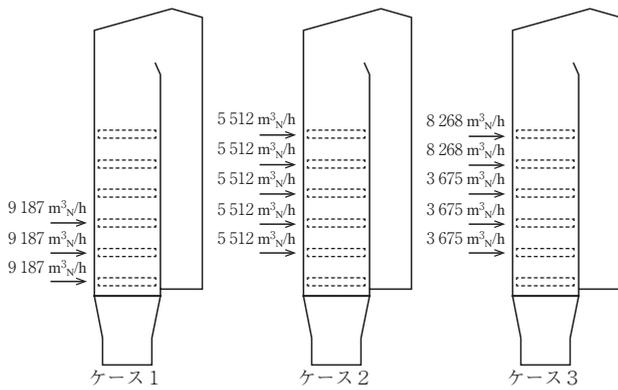


図7 二次空気吹込み条件

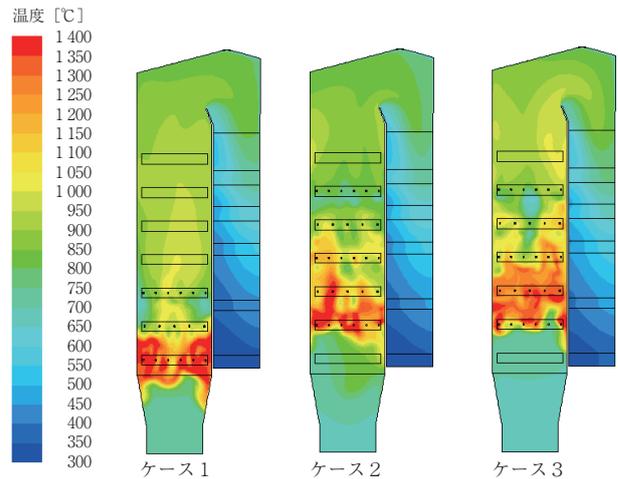


図8 温度コンター図

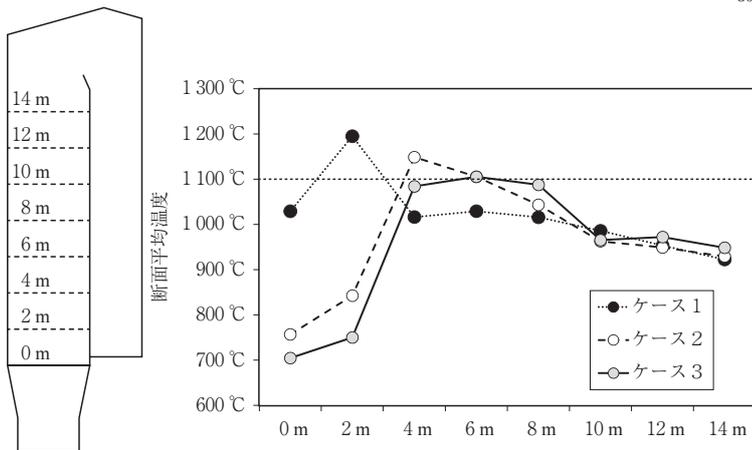


図9 断面平均温度グラフ

取得し、燃料の性状とガス化条件から砂層で発生するガス組成を予測するツールを作成した。本シミュレーションでも上記のツールを用いてガス組成を予測し、インプット条件としている。ガス成分はCO、H<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub>、C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>、H<sub>2</sub>O、N<sub>2</sub>、CO<sub>2</sub> およびガス状のCの8種類とした。チャーおよびタールとして出てくる成分はガス状のCとすることで物質、熱収支を合わせている。

図7に本シミュレーションで検討した二次空気吹込み条件を示す。ケース1は下三段のノズルに均等に二次空気を配分した条件、ケース2は図7に示す五段のノズルに均等に二次空気を配分した条件、ケース3はケース2と同様のノズルを使用し、下流(上側)の二段に空気を多く配分した条件である。

図8に、計算結果の一例として温度コンター図を、図9にボイラ内温度の断面平均温度のグラフを示す。図8、9より、ケース1はボイラ入口部(0m)が1000℃以上となっていることが確認でき、耐火物ゾーンでのクリンカ発生が懸念される。一

方、一段目のノズルを使用しないケース2、3ではボイラ入口の温度が750℃程度に抑えられていることが分かる。

また、ケース1、2はボイラ火炉にて灰の溶融点1100℃を超えており、その後は急激に温度が減少する傾向がある。それに対しケース3は、6m地点で1105℃と若干1100℃を超えるものの、局所的な高温域は見られず、かつ均一な温度場が生成されている。

以上の結果より、最下段のノズル高さを高くし、下流の二段に空気を多く配分したケース3の空気分配方法をベースとして、二次空気のノズル配置や吹込み条件を検討していくこととした。

## むすび

以上、機器設計に熱流体解析を活用した3つの事例について紹介した。

- ①ガス冷却塔では、配置による制限がある場合でも整流状態を維持できるダクト接続方法を提示することができた。
- ②シクナーでは、センターウェル長さの違いによる性能の違いを確認し、設計に反映させることができた。
- ③ボイラ火炉では、二次空気吹込み方法のケーススタディを行い、適切な温度の燃焼場となる空気分配方法について検討することができた。

このように熱流体解析を用いることは適正な機器設計を行う上で有効な方法であると考えられる。今後、これら解析による予測結果を実機で検証することで解析精度を向上させていく予定である。

\*技術開発センター プロセス技術開発部 廃棄物処理室