

環境に優しい廃水処理を実現

化学プラントで発生して環境を汚染するスラッジを効率的に除去する方法を研究する際に役立つ流体解析

Quan Yuan, Cyrus Parks, Jen-Hsiang Kao, Jason Ammerman, Kenneth M. Kromka (米国 フリーポート, Dow Chemical Company)

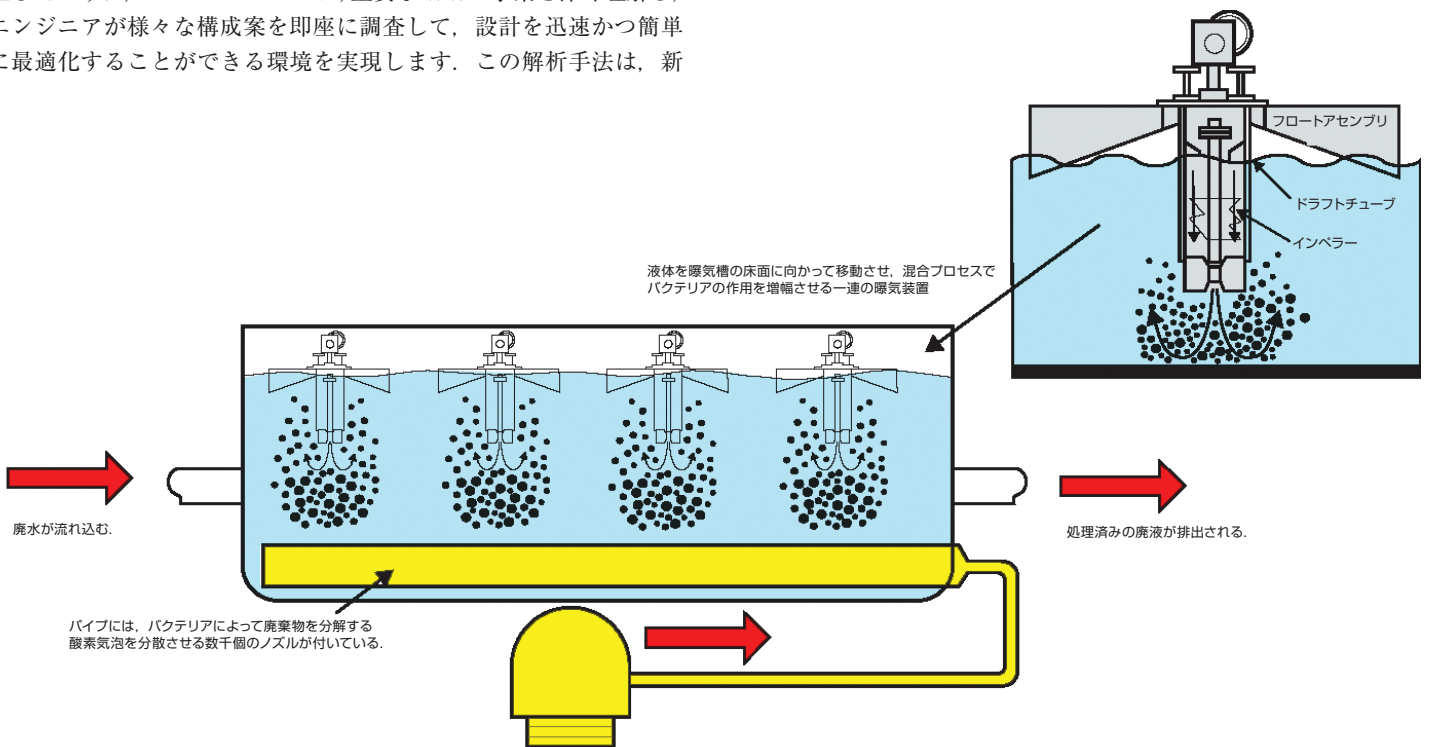
化学処理システムから発生する廃棄物の中には、廃液が周辺環境に排出される前に安全に除去する必要がある有害物質を含んでいるものがあります。厳しい政府基準によって厳重に規制されている廃水処理（WWT）は、持続可能な化学プロセスを実現する上で不可欠なものです。実際、業界の大手企業各社は、この持続可能性を社会的責任と考え、汚染の防止のほか、最も貴重な資源の1つである水の再利用に努めています。

こうした環境イニシアティブの目標は、スループット率を最小限のエネルギーで最大限に高め、廃棄物をできる限り効率的に抽出することにあります。米国に本拠地を置く Dow Chemical 社のエンジニアチームは、この目標を念頭に置き、流体解析を行って化学処理プラントの WWT システムの設計および運用方法を研究するいくつかのプロジェクトに着手しました。これは、新しいプラントでも以前の設計を繰り返すことが常であった業界にとって大きな一歩です。

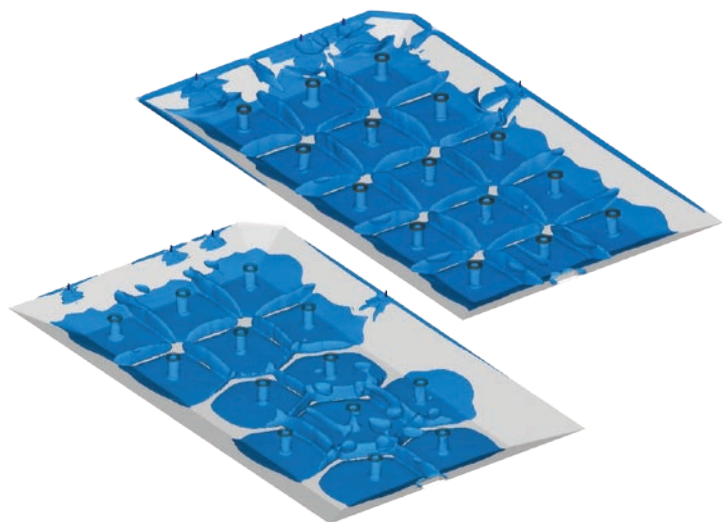
Dow Chemical 社のエンジニアチームが今回のプロジェクトで実証したように、シミュレーションは、重要な WWT 事業を深く理解し、エンジニアが様々な構成案を即座に調査して、設計を迅速かつ簡単に最適化することができる環境を実現します。この解析手法は、新

しい化学処理プラントを設計したり、既存の設計の問題を解決したり、性能を向上させた WWT システムによって旧式のプラントを改善したりする際の基盤として利用できるように開発したものです。

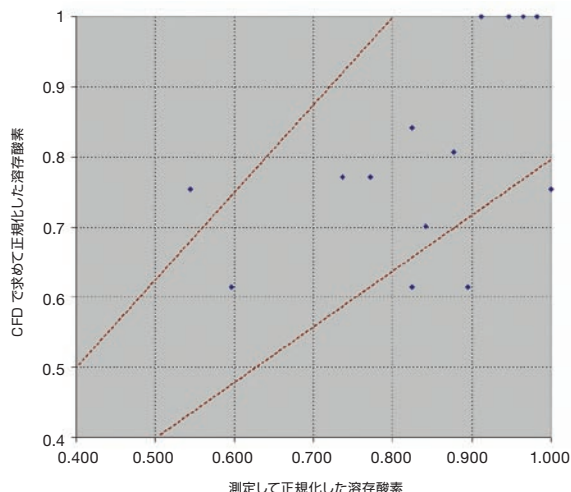
この手法では、検査して濾過した廃液を大きな曝気槽（原料が入る入口と処理済み廃液が排出される出口を持つタンクなどの）で処理する WWT 事業の重要なステップに焦点を絞っています。曝気槽の中では、自然に順応したバクテリアが有機化合物を安全な物質に分解します。1つの曝気槽の底では、小さな散布ノズルが付いた数本のパイプが気泡を分散させて、スラッジに酸素を送り、廃棄物の分解を加速させます。もう1つの曝気槽では、浮動曝気装置の攪拌作用によって、この分解プロセスがスムーズに行われるようになっています。その際には、曝気装置のインペラーが廃液と酸素気泡の両方を曝気槽の床面に向かって移動させて沈殿を抑えると同時に、この混合プロセスでバクテリアの作用を増幅させる仕組みになっています。



化学処理廃水をバクテリアで処理するスラッジ槽の主要部を示した切開図



青色の等値面は、床面近くの液体速度が0.2フィート/秒で、スラッジがスラッジ槽に沈殿していないことを表す(上)。13個の曝気装置だけでも、同様の流れを実現できる(下)。



スラッジ槽内の溶存酸素の測定値と流体解析の結果との間には、高い相関関係が見られる。

Dow Chemical社の研究者は、これらのプロセスのモデリングに伴う厄介な問題を解決しなければなりません。たとえば、全長と幅が数百フィートに及ぶことが多い大きなスラッジ槽には、ミリメートルサイズの数千個もの散布ノズルが設置されているため、このモデリングに際しては、広範囲にわたる次元スケールを調整する必要があります。また、WWTプロセスで発生する気体と液体の乱流は非常に複雑で、気泡を液体の中に放出する方法のほか、気泡が溶けて液体になるときの酸素物質移動、非球形気泡のサイズと形状、廃棄物を分解する際の生化学反応など様々な要因に左右されます。さらに、液体をドラフトチューブの下に押し流すスクリー型インペラーを動作させる電動機を備えた浮遊アセンブリから成る複雑な浮動曝気装置が多数設置されています。

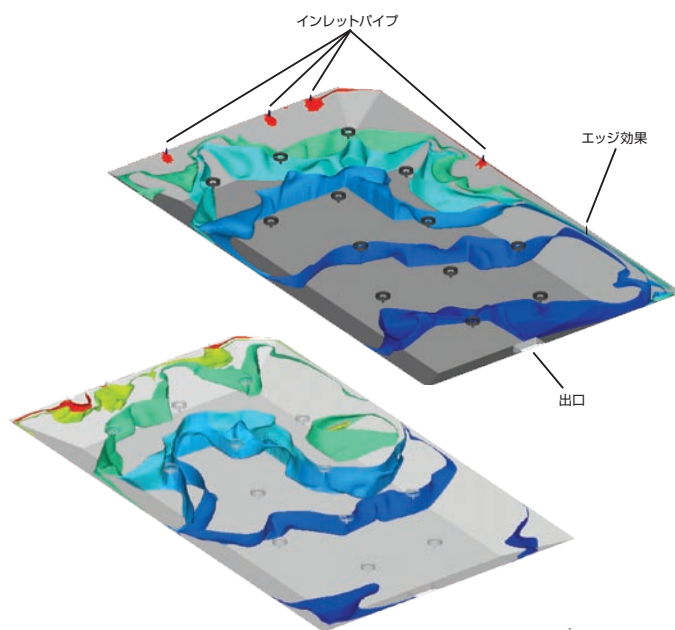
こうした複雑な問題に直面したエンジニアチームは、研究を迅速に進めて成果をあげ、精度の許容レベルを満たさなければなりません。それに加え、手順を標準化する必要もありました。これは、

後にこの手法を利用したエンジニアが用途ごとに手順を作り直す必要がないようにするためです。

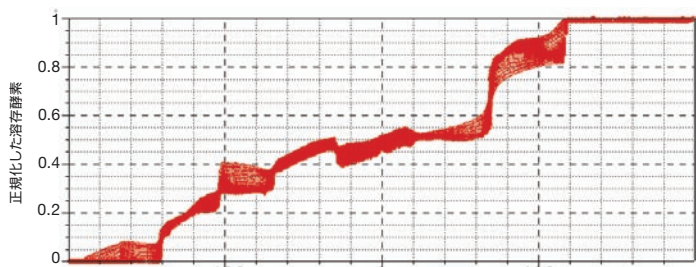
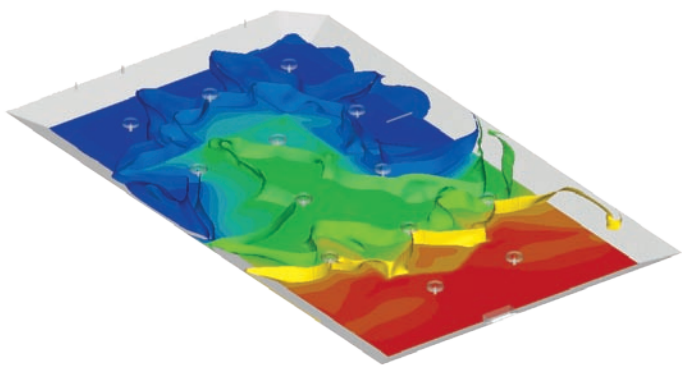
Dow Chemical社のエンジニアチームは、多数のパイプと散気ノズルの効果をモデリングするため、最初に1つのノズルの気液二相作用をシミュレーションし、液体を両側に押しやると同時に液体の一部を上方向に流す気泡によって生じる気体分布と液体速度を求めました。次に、この小さな領域を考慮に入れ、スラッジ槽全体に設置されている数千個のノズルの挙動分布をひとまとめにして表現しました。

浮動曝気装置を表現した際には、インペラーの複雑な形状をモデリングする代わりに、曝気装置のポンピング能力とドラフトチューブの体積に関するサプライヤーデータを使用して、チューブから排出される液体の速度を計算し、スラッジ槽内に存在する気泡の様々な濃度を求めました。

また、スラッジ内の複雑な気液流をモデリングした際には、実験計測を行ったり、乱流エネルギー散逸率から推定したりすることによって、気泡のサイズと表面積を求めてから、シャード数の相関を使用して相関物質移動係数(酸素が液体に溶解する割合)を計算しました。さらに、この物質移動係数を用いて流体解析を行い、溶存酸素の総量とスラッジ槽内の生化学反応速度を求めました。その際に使用したのがANSYS FLUENTのユーザー定義関数(UDF)です。このユーザー定義関数を利用した理由は、ANSYS FLUENTをカスタマイズし、こうした用途に対応するDEFINEマクロを用いて特殊な計算を実行できるからです。



シミュレーションを行ったことで、スラッジ槽に4個のインレットパイプを配置するとエッジ効果(不完全溶存酸素)の大きな領域が発生することが分かった(上)。このため、インレットパイプを配置し直したところ、こうした効果を大幅に抑制することができた(下)。なお、赤色は酸素必要量が高い領域、青色は酸素必要量が低い領域を表す。



エンジニアチームは、スラッジ槽の水平中心面に存在する溶存酸素がスラッジ槽の入口から離れるに従って直線的に増えることを確認してから、スラッジ槽の周辺部に溶存酸素プローブを配置したところ、スラッジ槽内の溶存酸素含有量を正確に測定することができた。

次に、気液流、乱流、溶存酸素、生体化学反応速度などすべての変数を結合して、1,000万個の計算セルから成る大領域モデルを作成し、スラッジ槽全体を表現しました。その後、スラッジ槽内の溶存酸素の総量を計測した結果と流体解析の結果を比較したところ、よく一致したため、この手法の精度が証明されました。

このため、エンジニアチームはこのモデルを自信を持って使用して、様々なシミュレーションを行い、スラッジ槽の性能を最大限に高める上で必要な設計変更を検討することができました。また、この流体モデルを用いて、数個の重要なパラメータを変更しながら様々な構成案を迅速に調べたことで、性能基準を満たす最適な設計に辿り着くこともできました。多くの場合、ANSYS FLUENTの機能を使用してシミュレーションを行えば、酸素レベルや液体速度などが異なる領域を分離する境界を表す等値面を作成して、様々な挙動が見られる複雑なシステムの特性を的確に把握することができます。

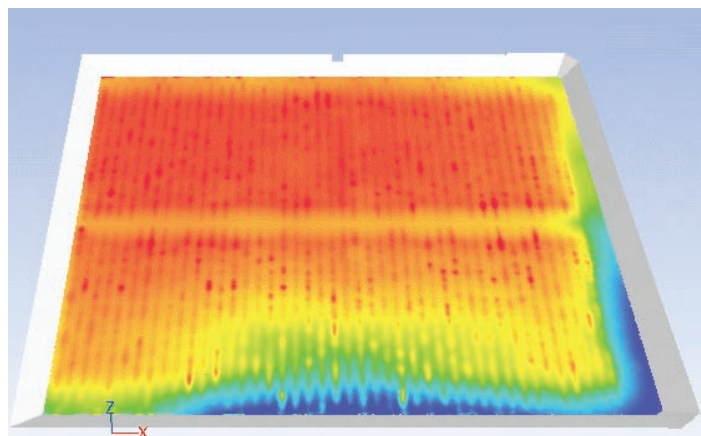
スラッジ槽の床面近くには、液体速度が遅い領域があります。Dow Chemical社のエンジニアチームは、固体が沈殿しやすくスラッジが均一に混合されない可能性のあるこうした領域を最小限に抑えるため、浮動曝気装置を効果的に配置する研究にも取り組みました。この研究では、床面近くの液体速度が一定であることを表す等値面を色分け表示し、直径が500～5,000ミクロンの粒子の3つの沈降速度(0.1, 0.2, 0.3フィート/秒)を重点的に調べました。このチームは最初に、15個の曝気装置を3つのグループに分けてから、これらのグループを基準線に合わせて5列に均等に配置し、液体速度が遅い領域を確認しました。次に、一連の反復計算を実行したところ、

最も経済的に配置してこうした混合作用の遅延を最小限に抑えるには、スラッジ槽の出口に隣接する列に配置されている2つの曝気装置を取り除く必要があることが分かりました。ただ、設計の修正に必要な方向性を示すシミュレーションによって曝気装置の数を15個から13個に減らすことになるとは思っていませんでした。

さらにエンジニアチームは、13個の浮動曝気装置の配置を変えてから、4個のインレットパイプ(スラッジ槽出口の反対側の端に3個、スラッジ槽の側壁に1個)の位置を調査しました。その一環としてシミュレーションを行ったところ、側壁にある1つのインレットパイプからスラッジ槽に入るスラッジによってエッジ効果(スラッジ槽でうねって進む不完全溶存酸素の塊)が発生することが判明しました。このため、このシミュレーション結果を参考にしてインレットパイプの位置を変更し、エッジ効果を回避しました。

また、シミュレーションでは、3つのインレットパイプを持つ構造を採用することで、すべての曝気装置が同じ速度で動作し、溶存酸素がスラッジ槽の入口側から出口側へ直線的に流れるようになるということも確認できました。さらに、この分布をチェックしたところ、一連の溶存酸素プローブをスラッジ槽の周辺に間隔を置いて配置することによって、WWT事業者がスラッジ槽内の溶存酸素含有量を極めて正確に測定できるようになることも分かりました。スラッジ槽の性能を最大限に高めるには、こうした測定を行う必要がありますが、これにより、スラッジ槽の酸素必要量の変化に応じて酸素流量を調整することが可能になります。

本稿では、曝気装置の配置と酸素流量、スラッジ槽のインレットパイプの位置、溶存酸素プローブの配置をシミュレーションで最適化することによって、WWTシステムの性能を大幅に向上させることができることを示すプロジェクトを紹介しました。なお、この事例で分かるように、Dow Chemical社は流体解析を行ってWWTシステムの設計と運用方法を的確に把握しながらイノベーションを継続的に進めています。■



深層曝気装置の流量を50%減らしたことで、スラッジ槽全体の溶存酸素濃度がほぼ一定になった。正規化した溶存酸素濃度が1、青色は0を表す。