

蓄電池開発への流体解析技術適用

Application of Fluid Analysis to Storage Battery Development

飯塚 博幸*
Hiroyuki Iizuka齋田 耕作*
Kosaku Saita**Abstract**

The authors have previously reported the application of CAE (Computer Aided Engineering) technology to storage battery development. Recently, CFD (Computational Fluid Dynamics) technology becomes more active in CAE field, along with advancement of computer, and it has achieved a lot of good effect. It is very useful to apply the CFD analysis technology to the storage battery development, because the fluid occupies the key role in battery design, battery manufacturing process, and battery operation. In this report, air cooling analysis of battery, molding analysis of battery case, and casting analysis of the lead alloy substrate and strap are described as a case where CFD is applied to the storage battery development.

はじめに

本誌において、著者は蓄電池開発における CAE (Computer Aided Engineering) 技術の適用について、事例を交えて報告してきた^{1) 3)}。これまでの報告は、熱解析、構造解析といったいわゆる静物を対象にしたものであったが、本報では、蓄電池開発において極めて重要な流体解析を適用した事例について述べる。

1. 蓄電池における流体の重要性

蓄電池は、その製造工程において多くの流体を扱う。例えば鉛蓄電池では、活物質の基になる鉛粉のペーストは、鉛粉を硫酸水溶液と混合し化学反応させることで作られるが、その際に両者が均一になるように混練することが、電池の品質を維持する上で重要となる。

また、極板の骨組みとなり、活物質で発生した電気を集めるための基板と呼ばれる網目状の鉛合金製の格子は、主に溶融した鉛合金（溶湯）を金属型内に注ぎ凝固させる（重力 casting）ことで作られる。このとき、欠陥のない基板を得るには、鋳型内の溶湯の流れ／凝固を制御することが重要である。

その後、鉛粉ペーストは、ホッパーと呼ばれる充

填機にかけられ、基板に規定の厚みになるよう塗りこまれ、熟成／乾燥などの工程を経て電極板となる。

電池の外装となるプラスチック製の箱（電槽）は、溶融したプラスチックを金属型内に、高圧で流し込み冷却凝固させる（樹脂成型）ことで作られる。良好な製品を得るには、製品形状、ゲート位置、樹脂／鋳型の温度、樹脂の注入速度、凝固時間などを適正に制御する必要がある。

電池の組み立て工程では、極板は積層された状態で電槽内に挿入され、電解液が各セル均等の液面高さとなるように、規定の量が流し込まれる。最後に電池を充電するが、電気化学反応によって生じた熱で電位温度が過度に上昇するのを防ぐために、充電中の電池は、水冷もしくは強制的に空冷されることが多く、その冷却設備の設計にも流体解析技術が用いられることがある。

このように、蓄電池の製造工程／運用段階には多くの流体が関わっているが、さらに電池の設計段階から流体を意識した適切な設計も必要となっている。例えば、鉛格子基板を設計する場合、集電性能、活物質保持性能を向上させつつ、数値流体力学（CFD：Computational Fluid Dynamics）解析にて鋳型内での溶湯の流れを予測し、鋳造不良が起き難い形状とすることが求められる。

* 技術開発本部

2. 流体解析技術

2.1 流体解析技術の歴史

流体の一般的な特性や基礎理論を用いて、パイプ内の流体の流れを数値的に解き、工業プラントを設計するといったことは、古くから行われてきた。しかし、開放空間での流れ場の解析といった、より複雑な挙動を示す対象に対して、これらの方法では有効な解は得られなかった。そこで、構造解析などの分野で使われる差分法や有限要素法などの手段を用いて、流体解析を行う手法である CFD が 1980 年代から活発に行われるようになってきた。しかし、当時は、流体の運動を支配する方程式が、非常に複雑な構造をしていることと、その方程式自体の特性が強い非線形性をもっていることから、その計算には、高性能の大型のコンピュータが必要であり、CFD が一般化しているとはいえなかった。⁶⁾

近年では、ハードウェアの進歩がめざましく、以前は大型計算機でしか解析できなかったものが、机上ワークステーションレベルでも解析できるようになった。例えば、約 10 年前の平均的なワークステーションは、マイクロプロセッサの計算能力は、約 300 メガ FLOPS (1 秒間に 3 億回の計算が可能) 程度であったが、最近では 1 個のマイクロプロセッサ内に 4 つのコアを内蔵したもので 30 ギガ FLOPS、8 コアでは 60 ギガ FLOPS と、100 倍以上の処理能力を持つようになった。この処理能力は 1990 年代前半のスーパーコンピュータの処理能力に匹敵する値である。

一方、ソフトウェアでは、基本計算式は 1980 年代にはほぼ完成されていたが、各ソフトウェアベンダーにより、操作系が CUI (コマンド ユーザー インターフェース) から GUI (グラフィカル ユーザー インターフェース) 方式へと置き換えられてきた。さらに GUI もより使いやすいものへと改善されてきており、従来は操作が難しく解析専任者だけが使用していたが、設計者自らが手軽に使えるソフトウェアも多く登場するようになってきた。その結果、流体解析の適用範囲は、より広範なものへと急速に広がりつつある。

2.2 流体解析の効果

流体解析の最も大きなメリットは、実験では得られないような、現象の可視化が可能なことである。一般に流体の流れそのものを見るのは困難で、空冷であれば煙、液体であれば浮遊物などのマーカーを流体中に介在させ、その動きから間接的に判断することになる。また、金属型内での流れなどは、その様子を観測するのが不可能な場合も多い。

数値解析においては、計算結果を表示させるソフトウェア (ポストプロセッサ) により、流れのベクトル表示、流線表示、マーカー追跡、流速の等高線表示などをグラフィカルに表示させ、あらゆる角度から評価が可能である。その結果、対象物を改良するためのアイデアが生まれやすく、改良のための PDCA サイクルを短時間で進行させることができる。

3. 流体解析の実例

3.1 電池の空冷解析

蓄電池は一般に、使用される環境が低温下では充放電性能が低下し、高温下では寿命が短くなるという傾向があるため、一定の温度範囲内で運用できるように温度管理されることが多い。特に Li-ion 電池では、安全性の問題から、鉛蓄電池やアルカリ蓄電池に比べ、より厳密に管理する必要がある。

図 1、2 は、自動車用鉛蓄電池の空冷解析を行ったものである。解析モデル (図 1) に示すように、充電で発熱中の電池 1 個を床に置き、一方の短側面側から強制的に風を送り、電池を冷却した。解析結果 (図 2) として、電池周囲の空気の流れを流線表示し、同時に電池表面の温度分布を等高線表示させたものを示す。このような解析を行うことで、電池を冷却するのに必要な風速などを求めることができる。また多数の電池を同時冷却する場合には、このモデルを拡張して全ての電池を均等冷却するための検討を行うことができる。

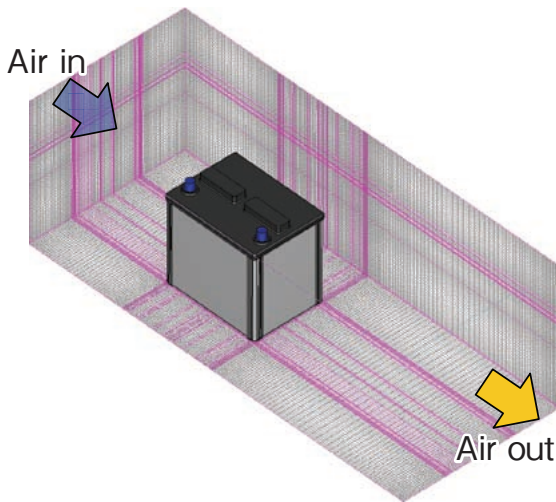


図1 電池空冷解析の解析モデル
Fig.1 Calculation model of battery cooling by air flow

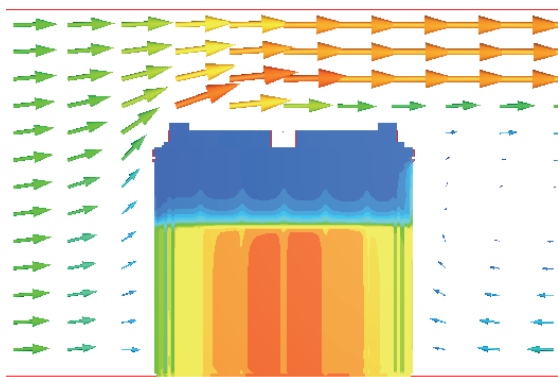


図2 電池空冷解析の解析結果
Fig.2 Calculation result of battery cooling by air flow

3.2 樹脂成型解析

以前は、2.5次元解析（薄板を立体的に張り合わせたような形状）が主流であったが、最近では完全3次元モデルで解析を行うソフトウェアが増えてきている。2.5次元解析では計算の精度に問題があった厚みのある塊状の対象物でも、正確な解析が可能となった。

図3～5は、自動車用鉛蓄電池の外装箱（電槽）について、樹脂の成型解析を行ったものである。ソフトウェア導入以前は、実験で型内の流れを見ることができないため、ショートショット（樹脂の量を規定よりも少なくし、流動途中の形状を再現する）などの断片的な情報しか得られなかった。ソフトウ

エアを導入し、樹脂の成型解析を行った結果、時間ごとの流動形状を詳細にアニメーションで観察することが可能となった。また、解析から得られる情報は、型内の樹脂の温度、圧力、流動先端の会合位置／角度（ウエルドラインの発生予測に利用）、エアトラップの位置などのほか、成型後の収縮変形など多岐にわたる。

この樹脂成型解析の結果、ゲート位置、樹脂の流入条件などの適正化が図られ、電槽の品質の向上に役立った。

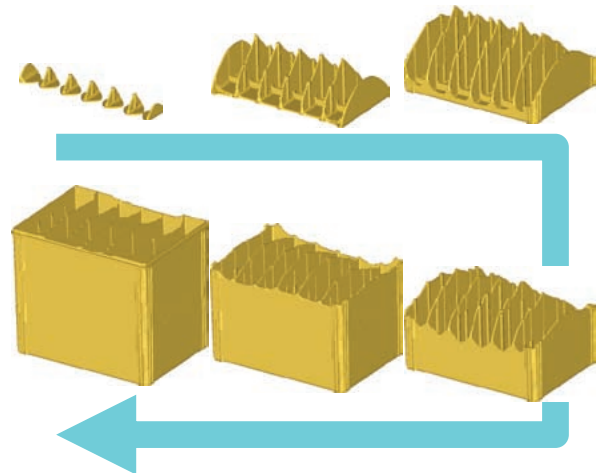


図3 電槽成型時の樹脂流れ解析結果
Fig.3 Calculation result of resin flow during battery container forming



図4 電槽成型時のウエルド会合角解析結果
Fig.4 Calculation result of resin meeting angle during battery container forming

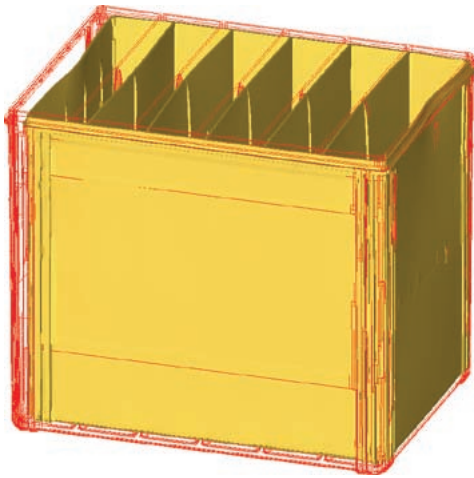


図5 電槽成型後の収縮変形解析結果
(実際の変形量を5倍に拡大表示)
Fig.5 Calculation result of battery container shrinkage
after forming (deformed 5 times)

3.3 鋳造解析

鋳造解析では計算速度の点から、直方体要素（ボクセルメッシュ）で解析を行うのが主流である。ボクセルメッシュは、階段状の表面形状による形状誤差が計算精度の面で問題であったが、表面メッシュの改良により、傾斜面や曲面などにも適用可能なものになってきている。特に、鉛蓄電池で用いられる格子基板のような、微細な構造をもつ対象物を精度良く計算するのに、この機能は重要である。

図6は、自動車用鉛蓄電池に対して、格子基板の鋳造解析を行ったものである。樹脂成型解析と同じく、これまで観察することができなかった鋳型内の溶融鉛の挙動を詳細に観察することが可能となった。また、ソフトウェアの機能により鋳造欠損や引け巣など欠陥の発生個所、量を予測することも可能となった。

基板の鋳造解析の導入は、その設計段階にて鋳造のしやすさを評価できるようになり、製品開発時の手戻りが大幅に減少した。また、他のCAEソフトウェアによる鋳型の温度分布の適正化等と共に、当社の鉛基板の品質の向上に大いに役立っている。

図7は、自動車用鉛蓄電池のストラップを鋳造方式（Cast On Strap : COS）で形成するときの鋳型内の溶湯流れを解析したものである。ストラップの製造工程では、電池1個あたり合計12個のスト

ラップを一度に鋳造成型する必要があるが、従来は鋳型の各ストラップ部分へ均等に溶湯を流し込むのが難しく、セルごとに極板との溶接状態が一定でないなど、製品の品質にばらつきが生じていた。そこで溶湯の流動解析を用い、各部分に均等に湯が流れ込むよう鋳型形状の適正化検討を行なったことで、ストラップ部分の品質向上に貢献した。

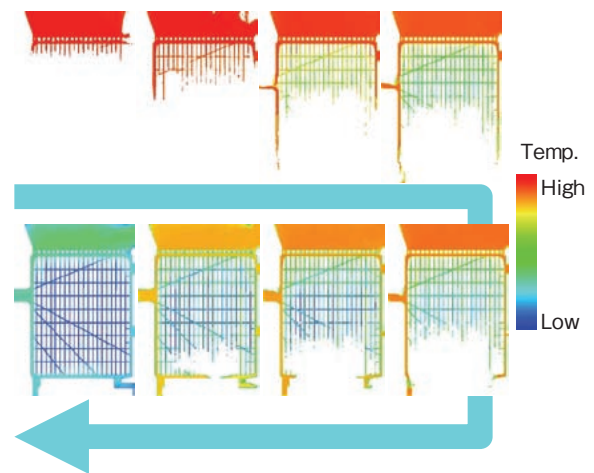


図6 基板鋳造時の溶湯流れ解析結果
Fig.6 Calculation result of lead-melt flow during grid casting

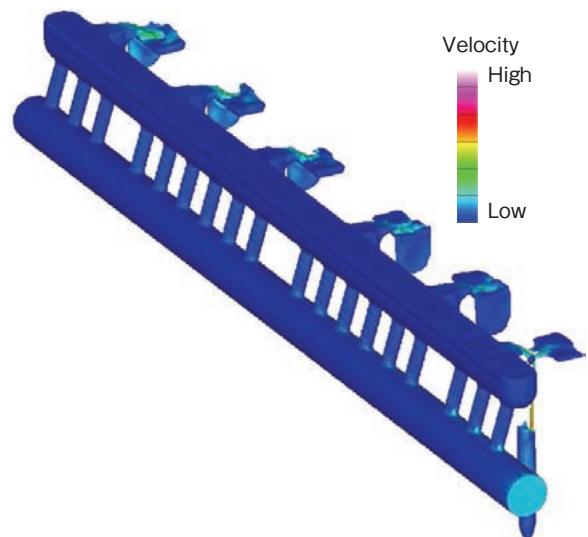


図7 ストラップ鋳造時の溶湯流れ解析結果
Fig.7 Calculation result of lead-melt flow during strap casting

4. これからの流動解析

鉛蓄電池の性能を大きく左右するのに、鉛粉と硫酸水溶液を混練して、ペーストを生成する工程があるが、ペーストが高粘性で塊状になり複雑な2層系になる。またチクソトロピー性をもつこと、化学反応が進むことで性状が変化するなど、現状での解析は困難な状況にある。しかし、最近では、粒子法を用いた流動解析を行う商用ソフトウェア、化学反応を同時に計算するソフトウェアなども登場しており、解析が可能となる日も近いと思われる。蓄電池全般に対するバーチャルもの造りができるように応用展開を進めていく予定である。

参考文献

- 1) 飯塚博幸, FB テクニカルニュース, No.56, 35 (2000)
- 2) 飯塚博幸, FB テクニカルニュース, No.58, 19 (2002)
- 3) 飯塚博幸, FB テクニカルニュース, No.60, 8 (2004)
- 4) 第45回電池討論会要旨集, 500 (2004)
- 5) D. Berndt, Maintenance-Free Batteries Third Edition (2003)
- 6) スハス V. バタンカー, コンピュータによる熱移動と流れの数値解析 (1985)