

三次元有限要素法による 鉛蓄電池の内部抵抗の解析

Three-dimensional Finite Element Analysis of Internal Resistance of Lead-acid Batteries

濱野 泰如* 立川 修平** 平川 憲治** 亀田 毅***

Yasuyuki Hamano Shuhei Tachikawa Kenji Hirakawa Tsuyoshi Kameda

* Department II, Technical Development Division, Global Technical Center

** Technical Department, Technical Division, Automotive Battery Business Unit

*** Global Technical Center

Abstract

Three-dimensional finite element models were developed to describe the internal resistance of lead-acid batteries. Satisfactory agreement was obtained between computer simulation and experimental results with different types of automotive batteries. This method is used in estimating the effect of design modification and optimizing the designs of electrical conductive parts of lead-acid batteries.

Key words: CAE, Internal resistance, Design optimization

1 はじめに

一般的に鉛蓄電池は、全体の質量の50%~75%を鉛が占めており、ほとんどが鉛でできていると言っても過言ではない。環境負荷の低減のため、鉛蓄電池産業全体において、鉛の使用量を減らすことは重要である。また、軽量化の要求も強く、必要最小限の鉛量で高品質・高性能な鉛蓄電池製品が求められている。そこで、鉛蓄電池の最適設計の手法のひとつとして、コ

ンピュータによる設計検証、すなわちCAEが利用されている。

鉛蓄電池において、集電機能を持つ格子の形状最適化に関する研究は、過去からおこなわれてきた。格子設計は、各種製法による制約や、耐食性や耐久性での制約を受けるものの、その形状によって集電性能は大きく変わり、電池全体の内部抵抗に与える影響が大きいことが知られている。格子形状は複雑であるため、集電性能を推定することが難しいことから、コンピュータを用いた解析や設計検証がなされてきた。本報では、過去に実施されてきた手法について考察した後、鉛蓄電池のセル全体の三次元形状にもとづいた有限要素法による内部抵抗の解析手法を紹介する。現在の解析技術を駆使すれば、近似や簡略化したモデルを

* グローバル技術統括センター 技術開発本部
第二開発部

** 自動車電池事業部 技術本部 技術部

*** グローバル技術統括センター

使う必要はないが、これらは、鉛蓄電池の内部抵抗や電流分布を概念的に理解する上で有用である。

1.1 鉛蓄電池の内部抵抗計算

Fig. 1 に自動車用鉛蓄電池の模式図を示す。一般的な鉛蓄電池は、板状の正極板および負極板を交互に積層し、極板の上部にある極板耳からストラップを介して集電する構造を有している。この極板配置における電流の流れは、Fig. 2 に示すような抵抗のネットワークを持つ電気回路を、鉛蓄電池の等価回路とすることでモデル化できる。正極の極板耳から流れる電流は、極板面全体に広がると同時に負極側へ流れ、その後、

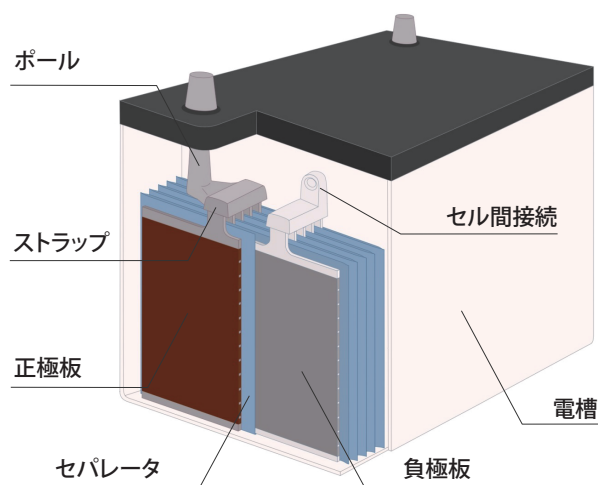


Fig. 1 Schematic illustration of automotive batteries.

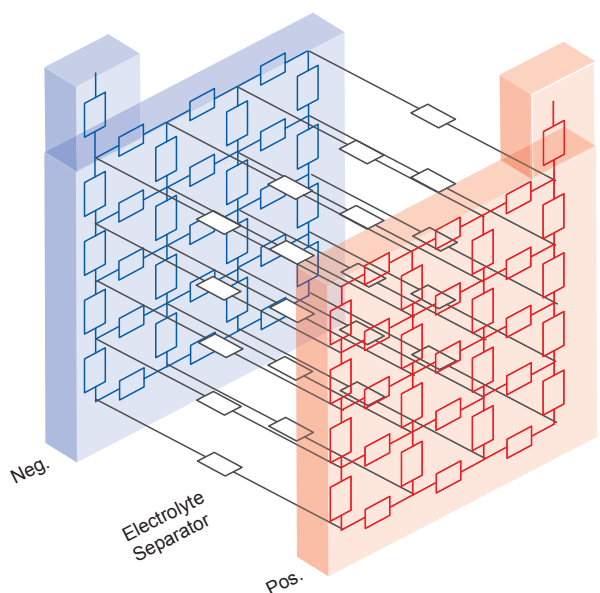


Fig. 2 Schematic illustration of three-dimensional resistive network model.

負極の極板耳に向かって集まっていく。三次元ネットワーク状の電気回路であるため計算は複雑になるものの、キルヒホッフの法則を使えば、電位分布や電流分布、回路全体の抵抗を計算することができる。CAEがまだ現在ほど進歩していなかったころは、この三次元抵抗ネットワークモデルに対して、様々な近似をおこない、目的とする格子設計の検証や最適化を実施してきた。

1.2 二次元モデル

Fig. 2 の三次元抵抗ネットワークの電気回路において、正負極片方の極板 1 枚だけを抜きとったモデルを Fig. 3 に示す。このとき、抵抗間のノードとなる部分 (Fig 中赤丸交点部) において、相手板とつながっている。格子あるいは極板のデザインに応じて、二次元ネットワーク上に抵抗を配置し、また、各位置にて比抵抗を実際の鉛や活物質の比抵抗と対応させるように電気抵抗の値を設定することにより、極板の電気的な特性を表現することができる。Tiedemann らは、この電気回路を用い、極板表面から相手板に向かって流れる電流が極板面で均一になると仮定して極板の電位分布を求め、格子の性能評価をおこなった¹。Meiwes によれば、この条件における活物質表面の平均電位 ϕ_{ave} と入力電流 I から得られる内部抵抗 $R_{eff} (= \phi_{ave} / I)$ は、この極板単体の性能指数と見なすことが可能であり、入力電流 I に対して極板単体による電圧降下 ΔV は、 IR_{eff} と推定できる²。極板 1 枚における高さおよび幅方向についての二次元モデルの長所は、格子デザインの解析が容易であることである。し

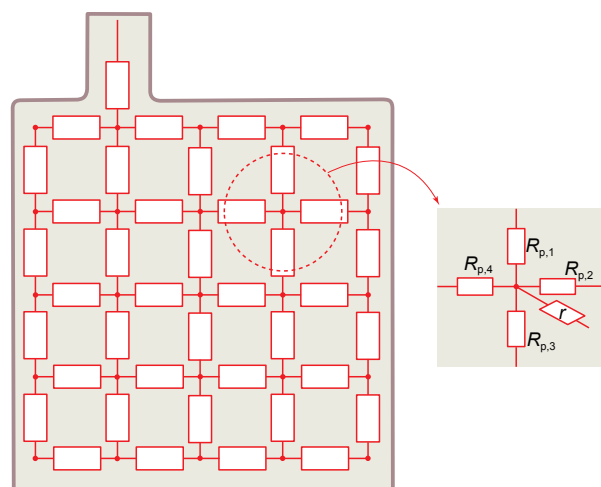


Fig. 3 Schematic illustration of two-dimensional resistive network model over plates.

かし、極板面内での電流密度が一定であると仮定する必要があるため、交流での内部抵抗測定や、高電流密度での充放電時のように、電流分布が極板上部の極板耳付近に偏る条件では、実際の電位分布と異なった結果を与える。なお、ここでいう電流分布とは、極板表面から相手板に向かって流れる電流の極板面内での分布を指す。

電流分布の不均一さを考慮する手法として、幅方向の抵抗成分の影響を無視した、極板高さと厚さ方向における二次元モデルが提案されている (Fig. 4)^{3,4}。このモデルでは、格子の二次元的なデザインを検討することは不可能であるが、正極と負極の極板高さ方向におけるマクロな抵抗成分を用いて内部抵抗と電流分布の計算を可能としている。

極板と電解液を比抵抗が一定の連続体とし、電解液の電流が極板に対して垂直にしか流れないと仮定したとき、この配置における内部抵抗および電流密度の解析解は、それぞれ式 (1), (2) となる⁵⁻⁷。

$$R = V(r_p + r_n) \coth(VH) \quad (1)$$

$$\frac{i(h)}{i_{ave}} = VH \frac{\cosh(Vh)}{\sinh(VH)} \quad (2)$$

$$V = \left(\frac{r_p + r_n}{L} \right)^{1/2} \quad (3)$$

ここで、 R , h , $i(h)$, は、それぞれ、内部抵抗、底

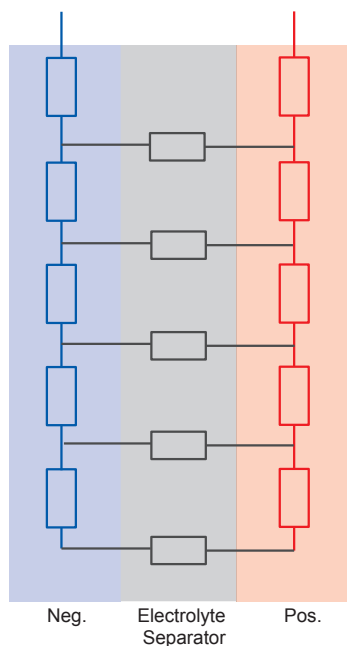


Fig. 4 Schematic illustration of two-dimensional resistive network model between positive and negative plates.

面からの極板高さ座標、および h における電流密度であり、 H , i_{ave} は、それぞれ、極板高さおよび電流分布が均一であるときの電流密度である。また、 r_p , r_n はそれぞれ、正極、負極の垂直方向の単位長さ当たりの抵抗 [$\Omega \text{ m}^{-1}$] であり、 L は、極板間の抵抗 [$\Omega \text{ m}$] である。 L には、電解液の抵抗や、電気化学反応による抵抗が含まれる。

式 (2) からわかるように、極板面内の電流密度は必ずしも均一とはならず、電流密度が均一になるためには、 V の値が小さい、すなわち極板の持つ垂直方向の抵抗値が、極板間の抵抗値よりも十分に小さいことが必要となる。また、式 (1) より、電池全体における内部抵抗は、各要素の持つ抵抗成分に対して非線形性が強いことがわかる。つまり、電池全体の内部抵抗は、各構成要素の持つ抵抗成分の線形結合であらわすことができず、正極板や負極板の設計、それら要素の配置などの設計因子の組み合わせやバランスによって定まるものとなる。したがって、たとえば負極格子の集電性能だけを向上した場合、その効果代は、その電池全体の設計に左右され、相手板となる正極の情報やセパレータの情報がなければ推定できない。

このモデルだけでは、格子のデザインについて検証することはできないが、極板の高さ方向の抵抗成分が内部抵抗や CCA といった電池性能に与える影響を推定するために用いることができる。

1.3 三次元モデル

Fig. 2 に示す三次元モデルを用いると、電流分布を考慮したうえで、格子デザインの検証をおこなうことができる⁸⁻¹²。中でも吉田らが開発した手法はもっとも洗練されており、直交する格子だけでなく、ラジアル状や分岐構造を持った格子デザインにおいても計算を可能としている。

従来では、計算能力の制約から、計算する要素数を減らした抵抗ネットワークモデルを用い、内部抵抗を計算する手法がほとんどであったが、近年では、抵抗ネットワークモデルを使わずとも、有限要素法を用いて計算できるようになってきた^{13,14}。有限要素法による内部抵抗計算をセル全体に拡張することができれば、ストラップ部の集電構造の非対称性も考慮した上で内部抵抗を計算することができる。

2 セル規模での三次元モデル

形式の異なる自動車用液式鉛蓄電池について交流内部抵抗 (AC-IR) の計算を実施した。形式の異なる鉛

蓄電池において、それぞれ1セルごとの3D-CADデータを作成し、有限要素法の解析ソフトウェアを使って内部抵抗の計算を実施した。支配方程式は、次式の通りである。

$$\text{オームの法則} \quad i = -\sigma \nabla \phi$$

$$\text{電流の保存則} \quad \nabla \cdot i = 0$$

ここで、 i 、 ϕ 、 σ は、それぞれ電流密度、電位および電気伝導率 [S m^{-1}] である。また、正極や負極といったそれぞれの部材の領域において、電気伝導率の値を変えることにより、異なる材料の電気的特性を表現している。交流を使った内部抵抗測定のため、活物質と電解液界面で分極は起こらないものとした。境界条件は、正極端子の境界面に1 A、負極端子の境界面に0 Vである。計算によって得られる端子間電圧から、 $E/I = R$ の関係よりAC-IRを求めた。

計算結果と実測値との比較のため、それぞれの電池に対して、周波数1 kHzにおけるAC-IRを室温下で測定した。

3 結果および考察

計算によって得られたAC-IRと、実際に測定したAC-IRを対比した結果をFig. 5に示す。計算によって得られるAC-IRは、実測値に対して、いずれの形式

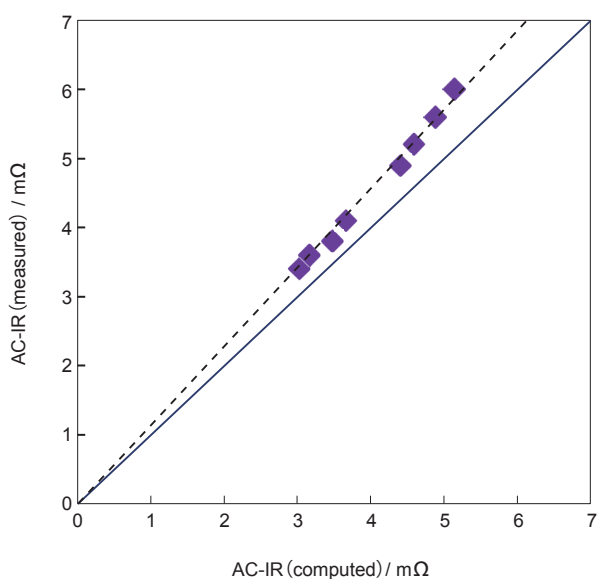


Fig. 5 Comparison between computed and measured AC-IR for the different types of automotive batteries.

においても15%ほど低い値となる。これは、実際の電池では、絶縁体である気泡やペースティングペーパーが極板間に存在するが、計算ではこれらを考慮していないためと考えられる。しかし、どの形式においても実測値との乖離はおおよそ一定の比率であることから、この乖離分を加味することで、内部抵抗を推定することが可能である。本手法では、セルの三次元形状にもとづき、実際の電池に即して計算をおこなうことができる。したがって、式(2)で示されるような電流分布の影響だけでなく、格子設計や、正極負極の組み合わせ、ストラップ設計の影響を加味してAC-IRを計算している。Fig. 6は、正極7枚、負極7枚の構成の電池において、計算によって得た各極板に対する電流の分配率を示したものである。端子間に流した電流は、均等に各極板に分配されず、極群外側に位置する極板に流れる電流は小さくなる。これは、極群外側の極板は相手板と片側しか接していないためである。また、端子から遠ざかるにつれて電流値は下がることがないことから、ストラップの伝導性は十分確保されていることが伺える。このように、本手法は、単純に分解できない設計因子間の組み合わせの効果を考慮して計算することができるため、内部抵抗のシミュレーションに有効であると考えられる。また、上述した過去のモデルと比較して、仮定や制約がないため、幅広く電池設計に関する検証に対応できる。

4 おわりに

本報では、鉛蓄電池の内部抵抗の計算について、三次元モデルを使った有限要素法が有効であることを示した。この手法では、実際の電池の形状をコンピュータ上で再現でき、三次元像を見ながら設計案を検討することができる。しかしながら、ここから得られる情報は膨大であるため、設計と効果の間の因果関係を理解することは難しい場合がある。これらの因果関係の理解のためには、簡略化した二次元モデルに立ち返ることも非常に有効である。本報で示したような解析技術の進歩に加えて、設計、製造法、素材の技術革新により、鉛蓄電池は今後も進化を続け、地球環境に調和した製品として、二次電池の中でも重要な役割を果たしていくと期待する。持続可能な社会の実現のため、当社はさらなる技術開発を進めていく所存である。



Fig. 6 Computed current distribution to plates during AC-IR measurement. The numbers below the graph and the right figure represent the position of plates.

参考文献

1. W. Tiedemann, J. Newman, and F. DeSua, *Power Sources* 6 (Ed. D. H. Collins), p. 15 (1977).
2. J. Meiwes, *ETZ Archiv.*, **8**, 79 (1986).
3. 浅井兼治, 畑中照弘, 坪田正温, 米津邦雄, *GS News Technical Report*, **41** (2), 76 (1982).
4. W. G. Sunu and B. W. Burrows, *J. Electrochem. Soc.*, **128**, 1405 (1981).
5. J. T. Crennell and F. M. Lea, *Journal of the Institute of Electrical Engineers*, **66**, 529 (1928).
6. C. W. Tobias and R. Wijnsman, *J. Electrochem. Soc.*, **100**, 459 (1953).
7. C. M. Shepherd, *J. Electrochem. Soc.*, **112**, 252 (1965).
8. L. E. Vaaler, E.W. Brooman, and H. A. Fuggiti, *J. Appl. Electrochem.*, **12**, 721 (1982).
9. 浅井兼治, 畑中照弘, 前谷祥夫, 坪田正温, 米津邦雄, *GS News Technical Report*, **41** (1), 15 (1982).
10. 吉田隆正, 山下讓二, 山口義彰, 平川憲治, *ユアサ時報*, **81**, 10 (1996).
11. Y. Morimoto, Y. Ohya, K. Abe, T. Yoshida, and H. Morimoto, *J. Electrochem. Soc.*, **135**, 293 (1988).
12. W. G. Sunu and B. W. Burrows, *J. Electrochem. Soc.*, **131**, 1 (1984).
13. E. Meissner, *J. Power Sources*, **42**, 103 (1993).
14. D. Nakhaie, P. H. Benhangi, A. Alfantazi, and A. Davoodi, *Electrochim. Acta*, **115**, 189 (2014).