据置鉛蓄電池開発におけるCAE技術

A CAE Technology for the Development of Stationary VRLA Batteries

向谷一郎^{*} Ichiroh Mukaitani 下浦一朗^{*} Ichiro Shimoura 覚野博司^{*} Hiroshi Kakuno 坂本剛生^{**} Takeo Sakamoto 高橋 勇^{***} Isamu Takahashi

制御弁式鉛蓄電池の寿命の主要因として正極格子の腐食変形があ り,制御弁式鉛蓄電池の特性向上のためには,腐食変形の少ない正 極格子を合理的かつ効率的に開発できる手法が必要である。新神戸 電機(株)と(株日立製作所日立研究所は共同で,鉛蓄電池の開発・解析 に適した鋳造シミュレーションシステムであるADSTEFANと格子の 腐食変形シミュレーションプロラム等を統合した改良型ADSTEFAN を開発した。改良型ADSTEFAN は3次元CADを用い,格子の設計段 階で,鋳造(凝固・湯流れ),集電性及び腐食変形抑制に関する最適 化ができるものである。改良型ADSTEFANを用いて,風力発電所の 出力変動緩和用制御弁式据置鉛蓄電池LL1500-W形の開発時間を短縮 することができた。

The development of positive electrode grids with reduced corrosion deformation, which is the main mechanism restricting battery life, is a key technology for improving VRLA batteries. Hitachi Research Laboratory, Hitachi, Ltd. and Shin-Kobe Electric Machinery have worked together to develop an advanced software package "ADSTEFAN" for improving lead-acid battery design. Developed simulation technology with a three-dimensional CAD has made it possible to optimise casting design of grids, electrical properties and corrosion deformation in design phase of grids. The advanced ADSTEFAN enables engineers to shorten the development period to develop LL-W type VRLA batteries for the mitigation of power output fluctuations of a wind power generation system.

〔1〕緒 言

現在の制御弁式鉛蓄電池に関する技術は,電池の特長 を最大限発揮するために,使用目的,用途に応じて最適 化される傾向である^{1)~5)}。

新神戸電機(㈱は以前より高効率化による開発期間の短縮,開発技術の高度化を目的とし,CAE (Computer Aided Engineering)技術の開発を日立製作所日立研究所と共同で推進してきた。格子の腐食変形を予測するシミュレーション技術については既報で述べた通りである⁶⁾。(㈱日立製作所日立研究所において開発されてきた

鋳造シミュレーションシステムADSTEFAN(以下, ADSTEFAN)と腐食変形を予測シミュレーションする技術を統合することで,CAE技術の高度化が可能となる。 ADSTEFANを基盤とし,鉛格子の腐食変形及び電位・電流分布⁷⁾,電流による発熱・伝熱現象など,電池内で起きている物理現象を定量的に予測するシミュレーション ソフト(以下,改良型ADSTEFAN)を開発した。

改良型ADSTEFANを用い,風力発電の出力変動緩和用 制御弁式据置鉛蓄電池LL1500-W形の開発時間を短縮する ことが出来た。

新神戸テクニカルレポートNo.21(2011-3)

〔2〕改良型ADSTEFAN

ADSTEFANは金属の湯流れ・凝固解析のシミュレーションソフトである⁸⁾。改良型ADSTEFANは、ADSTEFAN に電位解析シミュレーション、温度解析シミュレーショ ン及び腐食変形解析シミュレーションプログラムを追加 した当社オリジナル仕様の電池CAEシステムである。

2.1 電位解析シミュレーションプログラムの概要及び適用例 制御弁式鉛蓄電池の鉛格子に要求される重要な役割の 一つは,極板活物質の電気化学反応で発生した電気を集 電格子耳部まで効率的に導くための電気的な集電機能で ある。このため,電流密度に合わせて格子の太さや格子 位置を適切に設定することで,格子設計の最適化が可能 となる。電位解析シミュレーションプログラムは,鉛格 子の電気的な最適集電特性をシミュレーションできる機 能を有する。

図1は、二つの格子モデルa(778g),b(1120g)に 対して電位解析シミュレーションプログラムを適用した ときの電圧降下分布である。解析条件は抵抗率0.0001Ω・ cm,電流値100Aとした。モデルaに対してモデルbは 鉛使用量が増加し格子骨の断面積が大きくなり、35%程 度の電圧降下の低減が示された。

図2は電流分布をベクトルで表示した解析結果である。 図中の表示は差分メッシュの1分割要素あたりに流れる 電流ベクトルである。モデルaでは電流の突入端である 集電体の耳部付近の格子周辺部に電流が集中しているの に対して,モデルbではモデルaに比べて全体的に電流 は分散している。電流密度は集電体の耳部付近の格子周 辺部で大きくなり,集電耳部から離れるほど小さくなる 傾向である。したがって,格子設計においては,これら の電流分布に基づき格子の太さ,格子設計を適切に検討 する必要がある。改良型ADSTEFANの電位解析シミュレ ーションプログラムに基づく電圧降下分布,電流密度分 布情報を用いて格子の集電特性に立脚した格子設計の最 適化が可能となり,開発プロセスの高効率化により開発 時間を短縮できるようになった。





Fig.2 Vector expression in terms of current distributions analysis of grid model a and b.



図1 電圧降下分布解析 結果

Fig.1 Analyzed voltage drop distributions of grid model a and b.

2.2 温度解析シミュレーションプログラムの概要及び適用例 温度解析シミュレーションプログラムは、前述の電位 解析シミュレーションプログラムを発展させたものであ る。すなわち、本解析プログラムはジュール熱に起因す る集電格子内における発熱現象をモデル化し、集電格子 内の発熱による格子の温度分布を解析できる。発熱現象 をモデル化した結果は、電流分布の不均一分布を示すも のに対応する。格子の各座標に対応する電流分布を発熱 源とみなし、電流分布情報を基に温度分布をシミュレー ションすることが出来る。改良型ADSTEFANにおける温 度解析シミュレーションプログラムはこれらの演算アル ゴリズムから成り立っている。

制御弁式鉛蓄電池には,複数の集電部を集めて溶接し たストラップがあり,このストラップを相互に溶接した セル間接続部が存在する。セル間接続部は電流の集中す る部分であり,発熱が顕在化し易い部分である。したが って,セル間接続部は発熱による温度解析シミュレーシ ョンの対象部として特に有効であると考えられる部分で ある。以下,温度解析シミュレーションプログラムを用 いて制御弁式鉛蓄電池のセル間接続部を対象にした発熱 分布の解析例を示す。

図3はセル間接続部の3次元CADモデル及びセル間接 続部を差分メッシュ化したモデルである。なお、メッシ



図3 セル間接続部の3次元CADモデルと差分メッシュモデル Fig.3 Schematic drawing of inter-cell welding 3D-CAD model of strap (a) and difference mesh (b).

ユはCADモデルを基に0.5mmピッチで刻んだものである。 電池の実構造におけるストラップ部と鉛格子は集電耳部 を介して溶接で結合され,格子から及び格子への電流は ストラップを経由し,セル間溶接部に集中する。ストラ ップ部の抵抗率を0.0001Ω・cm,電流値を600Aとし,温 度解析シミュレーションプログラムにより発熱量分布に 基づいた温度分布の解析を実施した。なお,ストラップ は温度25℃の空気雰囲気にあるものとして,熱伝達係数 0.001cal/(cm・℃・s)の境界条件で放熱されるものとし た。

図4はセル間溶接部の通電開始後100秒目の温度分布で ある。電流の集中部であるセル間溶接部に発熱が集中す るため、セル間溶接部を中心に温度上昇が見られる。 図5はセル間溶接部の溶接断面積を大きくすることで温 度上昇を抑える設計に変更したモデルの通電開始後100秒 目の温度分布である。図5と比較して有効断面積が小さ い図4のセル間溶接部の最高温度は236℃に到達してい る。これに対して、図5のセル間溶接部の最高温度は、 図4に示される結果と比較して約20℃低く抑えられてい る。

次にセル間溶接部の温度を出来るだけ低くするために, セル間溶接部をより下方に移動したモデルを用いて,温



図 4 セル間溶接部の通電開始後100秒目の温度分布 Fig.4 Strap temperature distribution for control data after 100 seconds.



図5 セル間溶接部大面積化モデルの通電開始後100秒目の温度 分布

Fig.5 Strap temperature distribution for large joint part model after 100 seconds.

新神戸テクニカルレポートNo.21 (2011-3)

度分布をシミュレーションした。図6はセル間溶接部の 位置を下方に移動したモデルの通電開始後100秒目の温度 分布である。セル間溶接部の位置を下方に移動すること により,発熱分布の集中部を軽減することが可能となり, セル間溶接部の最高温度を173℃に低減できることが示さ れた。

これら一連の解析から改めて以下(1)から(3)が 基本的なポイントであることが明らかになった。

(1) 電流は抵抗の低い経路を流れようとする性質を有す るため、電流が流れる経路を短くかつ太くする。

(2) 起伏,断面積の急変を伴う形状は電流及び発熱の集中が生じ易い。このため,急変を伴う形状部分の集電部材,集電格子を設計する場合,特に慎重を要する。

(3)発熱部で発生した熱を効果的に放熱するためには, 伝熱のための有効な断面積を確保する。

以上のように、電位分布解析から得られるジュール発 熱と温度解析を連携させることにより、発熱や温度上昇 抑制に関する検討が可能となった。

2.3 腐食変形解析シミュレーションプログラムの概要及 び適用例

改良型ADSTEFANは制御弁式鉛蓄電池使用時における 正極格子伸びをモデル化し腐食変形解析シミュレーショ ンから,格子設計と格子伸びとの関係を明らかにするこ とができる。正極格子伸びは,格子腐食による体積膨張 と,腐食に伴う格子の金属部の減少により格子の機械的



図 6 セル間溶接部移動モデルの通電開始後100秒目の温度 分布

Fig.6 Strap temperature distribution for joint part moved to lower position after 100 seconds.

図7 温度分布に基づく腐 食層分布解析

Fig.7 Corrosion layer formation distribution in terms of temperature distribution.

な材料強度が低下することに起因する。格子の腐食変形 は材料及び断面積に依存する次式で示される⁶⁾⁹⁾。

$$\delta = \frac{100 \ (L_a - L_0)}{L_0} = A \ \exp \ (B) \tag{1}$$

ここに、∂は変形率(%)、L0は腐食前の格子の長さ (mm)、Laは腐食後の格子の長さ(mm)、Aは材料係数 及びBは格子腐食率(%)(格子断面積での腐食比率)で ある。

(1) 式より,正極格子の変形率は腐食の進行により指数関数的に大きくなり,同じ平面形状の設計では断面積変化の大きい格子ほど,大きな不均一変形が生じることを示唆している。

格子が不均一に変形する理由は,格子の腐食厚さは均 ーに進むとしても,格子体を形成している部分(以下, 骨)の断面積が異なるために,格子の各場所によって腐 食率が異なることに起因する。すなわち,格子全体とし て,(1)式で示される変形率は格子の各座標において均 ーではなく,不均一な分布となるためである。

腐食による格子の実質的な伸びは熱膨張に置き換えて 計算した⁶⁾¹⁰。従来の解析⁶⁾では格子の枠骨,細骨に異 なる線膨張係数を与え,均一温度変化を与えることで, 腐食変形を評価していた。腐食現象は腐食反応に関係す る物質及び皮膜成長に関する一種の拡散現象とみなされ る機構を有することから,腐食変形を解析するために腐 食層形成を温度拡散現象に置き換える方法を採用した。

図7は温度分布に基づく腐食層分布解析である。断面 積の大きな外枠格子骨より,断面積の小さな内側の格子 ほど温度上昇が高く腐食率が高いことを示す。

図8は腐食後の変形ミーゼス相当応力*1)分布である。 図8より寸法の長い左右方向の変形が大きく,断面積の 小さな格子ほど変形が容易であることを示す解析結果に なっている。これらの腐食変形の結果,断面積が大きい 周縁部フレーム部分が変形させられていると推察される。 ミーゼス相当応力分布を示す色分布より,ストラップ部 に近い耳側ではなく,中央部や耳側と反対側に応力が高 い赤色が現れている。このことは,格子断面積の比較的 小さな部分に高い応力が発生していることを示している。

※1) ミーゼス応力:せん断ひずみエネルギーに比例する応力で延性材 料の破壊に関する指標¹⁰⁾





図 8 腐食後の変形ミー ゼス相当応力分布 Fig.8 Forecast of corrosion deformation and Mieses stress distribution.

したがって,図8におけるシミュレーション結果では, 電流分布の集中する格子耳部から遠い部分に応力集中が 生じる格子設計であることを示している。

〔3〕改良型ADSTEFANの効果

改良型ADSTEFANは、3次元CADに基づく格子の設計 段階で、鋳造(凝固・湯流れ)、集電性及び腐食変形抑制 に関する最適化ができる。

図9は風力発電の出力変動を緩和するための制御弁式 据置鉛蓄電池LL1500-W形における格子の開発設計期間の 比較である。格子設計の開発時間が従来の1/3となり,開 発時間を大幅に短縮することができた。このため,設 計-試作-実験-見直しの繰り返しを最小限度にとどめ ることができ,開発時間の短縮,開発コストの削減及び 格子設計の視点から製品信頼性の向上に関する検討を高 効率化することができた。

今後は、より短時間で腐食層分布を温度分布と定量的 に関連付けられる手法を確立し、解析精度を向上させた い。

〔4〕結 言

- (1)新神戸電機㈱と㈱日立製作所日立研究所は、鋳造シ ミュレーションシステムADSTEFANと腐食変形予 測シミュレーションプログラム等を統合した改良型 ADSTEFANを開発した。
- (2)改良型ADSTEFANは、3次元CADに基づく格子の 設計段階で、鋳造(凝固・湯流れ)、集電性(電圧 降下/電流分布)及び腐食変形に対する格子デザインの最適設計が可能である。
- (3) 改良型ADSTEFANを用いて,風力発電の出力変動 を緩和するための制御弁式据置鉛蓄電池LL1500-W 形の開発時間を短縮することができた。



図 9 CAE技術の適用有無による開発設計期間の比較 Fig.9 Comparison of battery development periods between conventional process and the process employing the developed CAE technology.

- 1) D. リンデン 編/高村勉 監訳:最新電池ハンドブック,朝倉 書店, P369 (1996).
- 2) 武政有彦 他:長寿命据置シール鉛蓄電池MST形の開発,新神 戸テクニカルレポート, No.9, P11 (1999).
- 3) 武政有彦 他:軽量化据置シール鉛蓄電池MST形の開発,新神 戸テクニカルレポート, No.10, P25 (2000).
- 4) 向谷一郎 他:サイクル専用小形制御弁式鉛蓄電池HC形の開発,新神戸テクニカルレポート, No.13, P15 (2000).
- 5) 高林久顕 他:サイクル長寿命制御弁式鉛蓄電池の風力発電へ の適用,新神戸テクニカルレポート, No.18, P9 (2008).
- 6) 向谷一郎 他:鉛蓄電池正極格子の腐食変形による長寿命設計 とMU,LL形電池への応用,新神戸テクニカルレポート,No.15, P23 (2005).
- 7) W.H. Tiedemann et al : Potential Distribution in the Lead-Acid Battery Grid, Journal of Power Sources, <u>6</u>, P15(1976).
- 8) 森成良佐他: CAEによる電池極板溶接時の凝固シミュレーション,新神戸テクニカルレポート, No.1, P7 (1988).
- 9) I. Mukaitani et. al : Positive grid corrosion elongation analysis using CAE with corrosion deformation transformed into thermal phenomenon, Journal of Power Sources, <u>14</u>, p528(2005).
- 10) 鷲津久一郎 他:有限要素法ハンドブック 応用編,培風館, P400 (1989).