

平成 21 年 6 月 26 日現在

研究種目：基盤研究（C）  
研究期間：2007～2008  
課題番号：19560360  
研究課題名（和文） 次世代超小型電池駆動電子システム最適化設計のための基盤技術の研究  
研究課題名（英文） A research for building a design platform for future ultra small size electric systems  
研究代表者  
福井 正博（FUKUI MASAHIRO）  
立命館大学・理工学部・教授  
研究者番号：50367992

研究成果の概要： 電池の電気化学反応および、蓄電状態に依存した電池の内部抵抗、起電力等の特性を明らかにし、時間変化に基づき解析できるシミュレータを開発した。電池の充放電特性を計算機上で実現し、電池と周辺回路を組み合わせた動作検証環境の構築を行った。以上により、将来の超小型電池駆動システムの設計基盤を確立した。

交付額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	2,300,000	690,000	2,990,000
2008年度	1,200,000	360,000	1,560,000
総計	3,500,000	1,050,000	4,550,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電気電子工学・電子デバイス・電子機器

キーワード： 超小型システム，電池駆動システム，最適化設計，低電力化設計，電池モデル，電池特性抽出

## 1. 研究開始当初の背景

- (1) 多くの設計パラメータを同時最適化する効果的アルゴリズムの開発。Genetic Algorithm や Evolutionary Algorithm による一般解は提案されているが、効率的、効果的な手法は提案されていない。
- (2) 周辺装置の高精度モデル化： 電池、コンバータ、センサ、制御対象（人体、自動車等）等の電子回路周辺の高精度モデル化手法に関しては、未開拓の領域が多い。欧州では、ESPRIT プロジェクトなどにおいて、システムモデル化技術。米国では、アリゾナ大学、ジョージア工大他での電池モデル化技術、UC サンディエゴ他での、電池駆動システム低電力化に関する

興味深い研究がされているが、まだい  
ずれも実用化レベルには達していない。

- (3) 実システム開発による実証： 以上の革  
新的な手法の効果とモデル精度を評価す  
るためには、実システムの試作評価が重  
要であるが、有効な事例は報告されてい  
ない。

## 2. 研究の目的

- (1) 効率的な多次元最適化アルゴリズムの  
開発と評価：システム最適化における多  
次元最適化問題において、最適化の操作  
点と観測点を明確にし、最適性の精度を  
高める方法を明らかにする。たとえば、

複数のタスクをこなすシステムであれば、電池残量が少なくなったときに選択すべきタスクの優先順位を確定する。電池の出力電圧が下がってきた場合に、コンバータのパラメータを動的制御する手法の確立を行う。

- (2) 電気化学反応によって表される電池の IV 特性、温度特性および製造ばらつき特性を含めた定式化と、その特性抽出（キャラクタライゼーション）技術の確立。電池の高精度モデルとして、現在明らかになった、消耗と回復を表現する 2 個のパラメータに加え、出力 IV 特性、温度特性、ばらつき特性を表現する数学的パラメータの表現と、実電池を用いて、それらの特性抽出手法を明らかにする。
- (3) 超低電力 LSI の制御パラメータの決定と、それらを用いて LSI の高精度電力モデル化および最適化手法を確立し、超低電力 LSI 向け CPU に有効な新アーキテクチャを明らかにする。
- (4) 高精度電池モデル + FPGA ボードを用いて、電池駆動超小型システムを試作し、評価を行う。

### 3. 研究の方法

- (1) 多次元同時最適化の効果的アルゴリズムの開発においては、システム最適化のために数多くのパラメータの中からどれを選択し、どのように変化させるかということをも明解に定式化することが困難であると予想される。実際の物理量は一律的に変化するが、設計評価のための指標は、物理量のあるポイントで急に評価が変わる変局点があり、その前後での最適化スケジューリングが重要である。一律変化する物理量を最適性の観点からわかりやすい変化量に置き換える応答曲面の考案と説明性のある評価方法に注力する。Genetic Algorithm や Evolutionary Algorithm による一般解を単に適用するだけでは、十分に説明できない最適化のスケジューリング方法に関して明確にする。

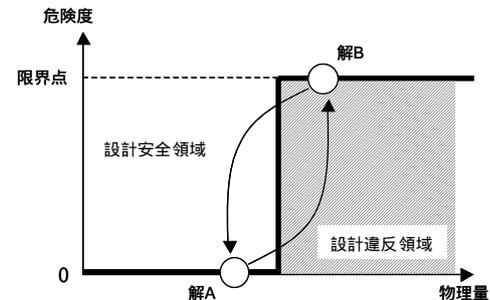
- (2) 電池の高精度モデル化手法に関しては、まず、電気化学反応によって表される電池の IV 特性の数式表現と MATLAB 等の数学的シミュレーションモデルの確立を行う。複数種類の実電池を用いて、様々な環境の下での計測実験を行い、数学的モデルとの誤差を観測し、その理論的説明を行う。

- (3) 電池の特性抽出（キャラクタライゼーション）技術の確立に関しては、上記電池モデルの確立後、複数の実電池を様々な回路接続条件（直列、並列、高負荷、低負荷、など）において実験を行うことにより特性抽出手法を明らかにする。

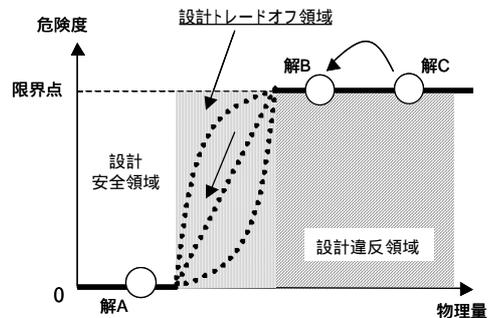
### 4. 研究成果

#### (1) 多次元同時最適化アルゴリズム

従来のアプローチでは、個々の設計制約間のトレードオフ関係は考慮されなかった。この状況を表現したのが、図 1(a)である。横軸はある 1 つの物理量であり、縦軸は設計違反の危険度を表す。設計制約違反が起きている状態を限界点（危険度“100”）と定義する。図 1(b)のように、設計値が設計制約を満たしていない領域を“設計違反領域”，設計制約を満たしている領域を“設計安全領域”と定義する。従来のアプローチでは、設計制約を守れば良いので、設計安全領域と設計違反領域の境界が隣接する。



(a) 従来のアプローチ



(b) 新手法のアプローチ

図 1 最適化アプローチ

このような状況で最適化を行うと、設計制約に対するマージンのとり方が一律でない解が得られる。新しく開発した手法では、図 2(b)に示すように、解 A と解 B の間に“設計トレードオフ領域”を新たに定義し設ける。つまり、解 B の状態から限界点を脱したとき、直ぐに設計違反度を 0 としないで、設計違反の度合いを評価する領域をつくる。この領域の設計違反度は、設計違反状態へ戻る確率と

相関性をもつ．設計の解空間の探索において，全ての設計制約をこの設計トレードオフ領域へ落とし込んでから，それぞれの設計指標を最適化目的関数として扱うことにより，各設計制約の危険度を平準化した最適解を得ることに成功した．

## (2) 電池の高精度モデル化

電池の放電特性，充電特性やパフォーマンスを予測，最適化できるシミュレータを開発し提案した．消耗・回復モデル，電圧降下モデルを統合した．これにより，従来の電池モデルの理論を確認することが可能になり，充放電時両方で実動作に近い条件下で実験できることを示した．

電流条件を変化させた場合の SOC 曲線の推移を図 2 に示す．図 3，および，図 4 には，電池の消耗を表現する無効電荷量の時間変化と，出力電圧の時間変化に関するシミュレータの出力結果を示す．電池特性を忠実に表現できていることを確認した．

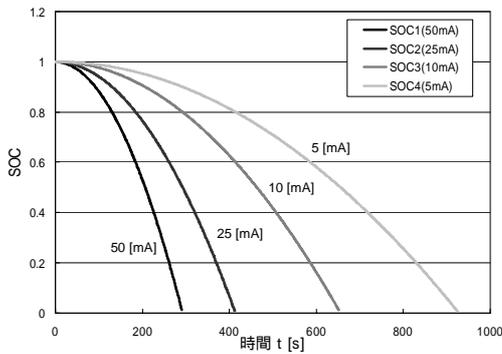


図 2 電池残留電荷比率 SOC 曲線

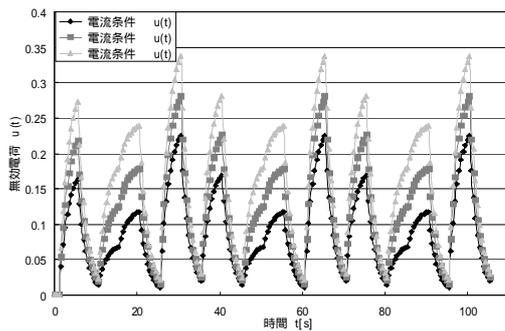


図 3 無効電荷  $u(t)$

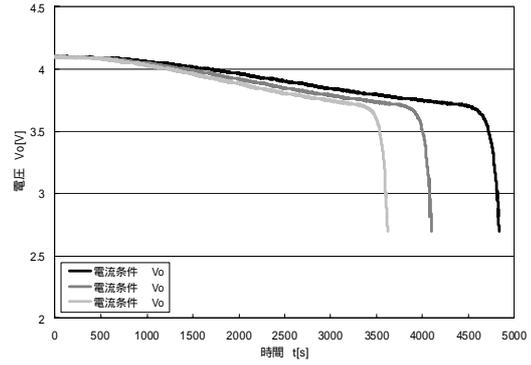


図 4 出力電圧

更に定電流定電圧充電方法 (CVCC) を正確にシミュレートすることも計算機実験により確認した．CVCC 法は，定電流充電である電圧値に到達した後，定電圧充電する方法である．比較的高速に充電することができ，過充電の防止にも有効である．高電圧の過充電状態において有機電解質が分解する恐れの高いリチウム系二次電池では，この定電流・定電圧充電技術が採用される．リチウムイオン電池は充電電流と充電電圧の両方を管理する必要がある．そのため，リチウムイオン電池では，定電流定電圧充電方法が採用されている．

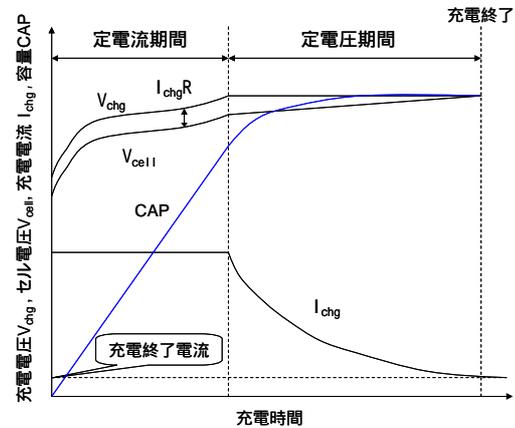


図 5 CVCC 充電回路の充電特性

## (3) 電池の特性抽出

電池の各パラメータの取り得る範囲を決定する．決定された範囲内で乱数を発生させることにより，パラメータの組を作成し，電池の充電曲線と放電曲線を表す数式に代入する．パラメータの組を各決められた数式に代入して，充電曲線と放電曲線などを計算する．次に評価関数  $H(x)$  を使用して，数式によって計算された計算値と充電曲線と放電曲

線から得たサンプル値との評価値（誤差）を計算する。

これらの操作が一定回数繰り返されると、評価したパラメータの組のうち、最も誤差が小さかったものを選び出し、最急勾配法でその組の各パラメータ値の近傍の値を順次代入する。その結果、最も評価関数の値が小さかったパラメータの各値が抽出され、その値によって、電池の特性を決定する。以上のフローを確立し、実電池の特徴パラメータを抽出するシステムを構築した。

#### (4) 高位レベル消費電力解析システム

高位レベルにおけるLSIの消費電力解析システムを開発した。同システムは超低電力LSIの設計に用いる。従来例で使用していたパラメータ  $S_{in}$ ,  $T_{in}$  の代わりに新たなパラメータ  $ST_{in}$  を定義した。その結果としてライブラリ構築時間の高速化と電力推定の高精度化を実現した。

新提案の電力パラメータ、空間時間同時考慮相関確率  $ST_{in}$  を以下に説明する。

$ST_{in}$  は新しく考慮したパラメータであり、入力信号を高さ  $L$ 、幅  $W$  の正方形のボックスを用いて走査するものである。入力信号群をボックス単位で捉えた場合を考えると、ボックスの中心にある値と周辺にある値  $x_{lw}$  ( $l=1 \sim L, w=1 \sim W$ ) との相関関係を表す。また、式の  $b_{ij}$  はボックスの中心の値を表す。ボックスサイズは実験により、 $L \times W=3 \times 3$  を採用した。

$$ST_{in} = \frac{\sum_{i=(L-1)/2}^{M-(L-1)/2} \sum_{j=(W-1)/2}^{N-(W-1)/2} (b_{ij} \oplus x_{lw})}{(N-W+1) \times (M-L+1)}$$

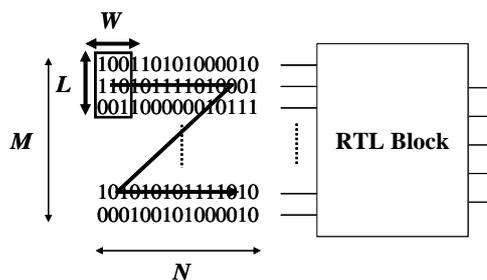


図6 STのボックスサイズ ( $L \times W$ )

従来例と提案手法において、論理シミュレーションによる結果と高位モデルでの推定結果の比較を示す。従来手法では推定誤差が平均37%であったのに対し、提案手法では、5.6%に改善した。

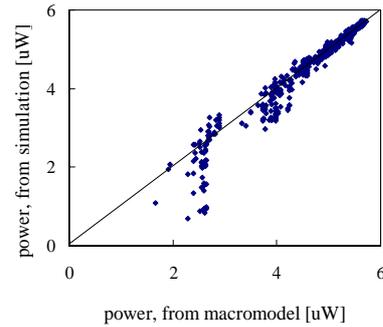


図7 従来法による電力推定結果

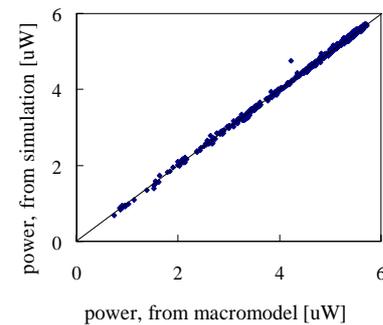


図8 提案手法による電力推定結果

(5) 高精度電池モデル + FPGA ボードを用いて、電池駆動超小型システムを試作、評価を実施した。シミュレーションとの比較を行い、高精度、実用的であることを確認した。

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計 3 件)

M. Ohtsuki, M. Kawai, and M. Fukui, "An efficient algorithm for RTL power macro-modeling and library building," IEICE Transactions on Electronics, vol.E92-C, no.4, pp.500-507. (Apr. 2009), 査読あり

川上善之, 草野健次, 寺尾誠, 石嶋宏亘, 福井正博, "製造不確実時代における回路のディペンダブル動作を保障する電源配線最適化手法," 情報処理学会論文誌, vol.49, no.6, pp.2144-2154. (2008年6月), 査読あり

M. Fukui, S. Iwakoshi, and T. Koyagi, "A power modeling and optimization scheme for future ultra small size

electric systems," IEICE Transactions on Electronics, vol.E90-C, no.10, pp.1900-1908. (Oct. 2007) , 査読あり

(2)研究分担者

(3)連携研究者

〔学会発表〕(計 7 件)

K. Kojima, S. Iwakoshi, I. Taniguchi, and M. Fukui, "A practical battery charge/discharge simulator for portable system design", in Proc. International Technical Conference on Circuits/Systems, Computers and Communications, ITC-CSCC2009, July 2009, Jeju, Korea , 査読あり

岩越さやか, 小島圭太, 戸井和憲, 福井正博, "実動作に近い電池充放電シミュレータの開発," 信学技報, vol. 108, no. 478, VLD2008-157, pp.183-188, 2009年3月, 沖縄, 査読なし

河合真登, 川内裕文, 森川敏雄, 大槻正明, 福井正博, "RTL 電力ライブラリ構築の一手法," 信学技報, vol. 108, no. 478, VLD2008-156, pp.177-182, 2009年3月, 沖縄, 査読なし

M. Ohtsuki, M. Kawai, H. Kawauchi, and M. Fukui, "An efficient RTL power macro modeling and power estimation scheme," in Proc. Synthesis and System Integration of Mixed Technologies, SASIMI2009, pp.11-16. (Mar. 2009) , 沖縄, 査読あり

大槻正明, 河合真登, 福井正博, "RTL 電力マクロモデルの高精度化の一手法," 信学技報, vol. 107, no. 506, VLD2007-139, pp. 13-18. (2008年3月), 沖縄, 査読なし

戸井和憲, 岩越さやか, 福井正博, "小型電池駆動機器における電池寿命モデルの高精度化と最適化," 情処関西支部大会予稿集, pp.125-126 (2007年10月), 大阪, 査読なし

M. Fukui, S. Iwakoshi, and T. Koyagi, "An algorithm for battery modeling and life time maximization of small size electric systems," in Proc. 18th European Conference on Circuit Theory and Design, ECCTD2007, pp.759-762. (Aug. 2007), Sevilla, Spain, 査読あり

## 6. 研究組織

### (1)研究代表者

福井 正博 (FUKUI MASAHIRO)  
立命館大学・理工学部・教授  
研究者番号: 50367992