

研究成果報告書

研究題目		非線形科学に立脚した充放電システムの評価と最適化	実施年度 2017-2018年度
代表研究者	所属	広島大学大学院統合生命科学研究科	
	氏名	中田 聡	印
<p>1. 研究の目的・背景</p> <p><b>研究の目的：</b>本研究では、スマートフォンやパソコンなど幅広く使用されているバッテリーを題材とする。動作状況、充放電、バッテリーの老朽化を診断するとともに、過剰な負荷やそれに伴う発熱を軽減して最適な動作環境に自律制御できるシステムを開発することを目的とする。そして診断の指標となる応答性と最適な動作環境を導く自律性を高めるために、システムに非線形性を導入する。具体的には、(1) 非線形性を指標としたバッテリーの自己診断、(2) バッテリーにやさしいリミットサイクルの活用、(3) 同調現象を利用した双方向フィードバックシステムの活用、について研究を行う。</p> <p><b>研究の学術的背景：</b>従来のバッテリーは、限られた条件と交換時期の下で使用されてきた。しかしバッテリー自身には自律性がないので、想定外の環境に遭遇しても自身で制御できず、負荷がかかったまま充放電が行われ、発火等の事故を誘発する。一方、「非線形科学」は、リズムとパターンなど自律的な時空間発展現象を取り扱い、それらの機構が解明されてきた。そしてこれらの現象を、ミクロな要素が協同的に働いてシステム全体としてマクロに自己組織化する事象と捉え、学術的に深化してきた。そこで本研究では、非線形科学に基づいて、バッテリーの情報次元、自律性、応答性、及び柔軟性を高める着想に至った。</p> <p>本研究の特色は、(1) バッテリーに周期的摂動を入力し、出力の非線形応答に基づいて高次元情報を得ること、(2) リミットサイクル（初期値や刺激に依存しない同じ軌道への復元）と同調現象（位相と周期が揃う現象）等、非線形現象を活用して多様な動作状況の変化に柔軟に対応できるバッテリーシステムにすることである。</p> <p>図1に本研究の概要を模式的に示す。</p>			
<p>図1. 本研究の概要. (a) 非線形性を指標とした自己診断、(b) リミットサイクルによる安定状態への復元、(c) 同調現象を活用した周期と位相のチューニングによる最適化、(d) 時空間情報の活用等、非線形科学に基づいてシステムの自律性と応答性を向上する。</p>			

## 2. 研究成果及び考察（申請時の計画に対する達成度合を織込む）

### (1) 非線形性を指標としたバッテリーの自己診断

本実験では、周期的電圧摂動をバッテリー（デジタルカメラ、携帯電話、ノートパソコン）に入力し、出力の非線形応答から得られる高次元情報を指標として、バッテリーの動作状況、老朽化、発熱との関係、充放電における過剰負荷を診断した。まずデジタルカメラのバッテリーを家庭のコンセントから一定電圧の充電（5 V）を行い、サーモカメラで撮影すると、バッテリーと共に変圧器の温度が 50°C まで上昇した。なおこの実験における冷却は自然冷却でおこない、デジタルカメラが駆動できない電圧のバッテリー電圧から充電をスタートした。また充電されたバッテリーに充電を行うと、同じ通電ルートを使用するためバッテリーからの放電と競合した。この状態での充電は、負荷のある充電となるため、温度上昇を招き、特に家庭用の充電器では、接続部での局所的な温度上昇につながる事が判明した。これらの結果から直接の電圧印加ではなくアンプを介して充電を行うこととした。

### (2) バッテリーにやさしいリミットサイクルの活用

バッテリーの動作状況や過負担な充放電を自律的に抑制するために、自律的な軌跡を形成するリミットサイクルを活用した。まず 37°C を上限温度として充電 ON/OFF を自動スイッチングしたところ、周期 10 分（振幅 2°C）で温度が振動した。これは自然放冷によるもので充電時間がかかる問題が発生した。次に温度上昇を軽減するために、アンプを介したパルス充電（周波数：0.01, 0.02, 0.04 Hz）に切り換え、最も軽減されるパルス波のベース電圧、振幅、パルス波形、Duty 比を探索した。その結果、Duty 比 1:1 において、バッテリーと充電回路の接続部分の温度が最も高くなり、3 種類の周波数の中では 0.01 Hz が最も温度上昇が高く（最高 50°C）、0.04 Hz が最も温度上昇が低かった（最高 42°C）。一方、0.01 Hz の充電時間の方が 0.04 Hz よりも短かった。

### (3) 同期を利用した双方向フィードバックシステムの活用

複数の振動子を結合すると、振動子間の位相差が一定に保たれ、周期がある整数比で揃う現象を同期と呼び、非線形現象の 1 つの特徴である。(2)の実験において、直流電圧では温度上昇が見られるのに対して、パルス充電では高周波数の 0.04 Hz が温度上昇を抑制したことから、パルス充電の有効性と適切な周波数の存在が示唆される。これを明らかにするためにパルス充電に対する温度変化の数値計算 ( $dT/dt = -\alpha(T - T_0) + \beta V^2$ ,  $\alpha = 0.03$ ,  $\beta = 0.045$ ,  $T_0 = 25^\circ\text{C}$ ) を行った。その結果、実験と同様に 0.01 Hz よりも 0.04 Hz のパルス充電の方が温度上昇を軽減する結果が定量的に再現された。また関連実験として、化学振動反応の電気化学制御や自己駆動への応用についての研究も行った。

以上の研究により、バッテリーと接続部の温度上昇が充放電において最も負荷のかかる場所であり、これらを軽減するとともに適切な充電を行うためにパルス充電は有効であることが判明した。また数値計算により適切なパルス周波数が存在することを見出した。

### 3. 経費の使用状況（申請時の計画に対する実績を記述）

#### 申請時の計画

<1年目>設備備品費 0 円、消耗品費 54 万円（器具 29 万円、試薬 25 万円）、印刷費 5 万円、旅費 6 万円、謝礼金 6 万円、その他 4 万円、合計 75 万円。

<2年目>設備備品費 0 円、消耗品費 29 万円（器具 19 万円、試薬 10 万円）、印刷費 5 万円、旅費 6 万円、謝礼金 6 万円、その他 4 万円、合計 50 万円。

#### 実績

<1年目> 設備備品費 0 円、消耗品費 658,599 円（器具 499,264 円、試薬 158,755 円）、印刷費 0 円、旅費 56,720 円、謝礼金 32,800 円、その他 2,461 円、計 75 万円。

<2年目> 設備備品費 0 円、消耗品費 295,220 円（器具 263,622 万円、試薬 31,598 円）、印刷費 0 円、旅費 159,880 円、謝礼金 42,200 円、その他 2,700 円、計 50 万円。

合計 125 万円

### 4. 将来展望（今後の発展性、実用化の見込み等について記述）

現在の課題として、充電と放電のバランスがバッテリー本体からは認識ができないことが挙げられる。一方で高速充電装置のニーズがあるために、充放電のバランスが崩れ、発熱を誘発する場合がある。本研究を通じて、パルス充電と適切な周波数が温度上昇を軽減することを見出した。これらの結果を元により適切な周期的電圧の波形とともに充電状況（特に充電が十分行われているときに充電する負荷の軽減）を理解した充電システムの開発が必要と考えられる。

モバイルバッテリーによる発火事故や充電中による火災発生等、現在においても報道がされている。これらの研究により、自然放冷下においてもバッテリーによる火災等の事故のないシステムにつながることを今後も目指したいと考えている。

5. 成果の発表（学会での発表、学術誌への投稿等を記載。予定を含む）

1. M. Kuze, M. Horisaka, N. J. Suematsu, T. Amemiya, O. Steinbock, S. Nakata, Chemical wave propagation in the Belousov-Zhabotinsky reaction controlled by electrical potential, *The Journal of Physical Chemistry A*, 2019, 123, in press.
2. S. Nakata, Y. Irie, N. J. Suematsu, Self-propelled motion of a coumarin disk characteristically changed in couple with hydrolysis on an aqueous phase, *The Journal of Physical Chemistry B*, 2019, 123, 4311–4317, DOI: 10.1021/acs.jpcc.8b11534.
3. T. Amemiya, K. Shibata, Y. Du, S. Nakata, T. Yamaguchi, Modeling studies of heterogeneities in glycolytic oscillations in HeLa cervical cancer cells, *Chaos*, 2019, 29, 033132/1-10, DOI: 10.1063/1.5087216.
4. S. Nakata, K. Nasu, Y. Irie, S. Hatano, Self-propelled motion of a camphor disk on a photosensitive amphiphilic molecular layer, *Langmuir*, 2019, 35, 4233–4237, DOI: 10.1021/acs.langmuir.8b04285.
5. S. Nakata, M. Nomura, Y. Yamaguchi, M. Hishida, H. Kitahata, Y. Katsumoto, M. Denda, N. Kumazawa, Characteristic responses of a 1,2-dipalmitoleoyl-sn-glycero-3-phosphoethanolamine molecular layer depending on the number of CH(OH) groups in polyols, *Colloids and Surfaces A*, 2019, 560, 149-153, DOI: 10.1016/j.colsurfa.2018.10.012.
6. K. Shibata, T. Amemiya, Y. Kawakita, K. Obase, K. Itoh, M. Takinoue, S. Nakata, T. Yamaguchi, Promotion and inhibition of synchronous glycolytic oscillations in yeast by chitosan, *The FEBS Journal*, 2018, 285, 2679–2690, DOI:10.1111/febs.14513.
7. S. Nakata, K. Kayahara, M. Kuze, E. Ginder, M. Nagayama, H. Nishimori, Synchronization of self-propelled soft pendulums, *Soft Matter*, 2018, 14, 3791-3798, DOI: 10.1039/c8sm00517f.
9. R. Tenno, Y. Gunjima, M. Yoshii, H. Kitahata, J. Gorecki, N. J. Suematsu, S. Nakata, Period of oscillatory motion of a camphor boat determined by the dissolution and diffusion of camphor molecules, *The Journal of Physical Chemistry B*, 2018, 122, 2610–2615, DOI: 10.1021/acs.jpcc.7b11903.
10. Satoshi Nakata, Véronique Pimienta, István Lagzi, Hiroyuki Kitahata, Nobuhiko J Suematsu (Eds.), “Self-organized Motion: Physicochemical Design based on Nonlinear Dynamics”, Royal Society of Chemistry, 2019 (Print ISBN: 978-1-78801-166-2, doi.org/10.1039/9781788013499).
11. 中田聡、「安全なバッテリー充電のための非線形科学」、第28回非線形反応と協同現象研究会（2018年12月、東京工科大学）。