

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成24年5月15日現在

機関番号：14401

研究種目：若手研究（B）

研究期間：2009～2011

課題番号：21700165

研究課題名（和文） 多角的データマイニングによる固体型電池の機械特性評価に関する研究

研究課題名（英文） Multi-Perspective Data Mining for Evaluation of Mechanical Property of Solid-Type Battery

## 研究代表者

福井 健一（FUKUI KENICHI）

大阪大学・産業科学研究所・助教

研究者番号：80418772

研究成果の概要（和文）：本研究では、固体酸化燃料電池（SOFC）を対象に、物理的劣化機構の解明と監視のための損傷事象のデータ分析基盤技術を開発した。各種データマイニング技術を応用し、(1)損傷事象の自動分類と損傷過程の可視化、(2)損傷過程の変化点検出、(3)構成部材間の力学関係の推定を行った。

研究成果の概要（英文）：This research developed a data analysis foundation of damage events for revealing mechanical property and monitoring Solid Oxide Fuel Cells (SOFC). By utilizing various data mining techniques, this work focused especially the following three points: (1) Automatic classification of damage events and visualization of damage process, (2) Detection of change points of damage process, and (3) Extraction of mechanical relations among members.

## 交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	600,000	180,000	780,000
2010年度	800,000	240,000	1,040,000
2011年度	600,000	180,000	780,000
総計	2,000,000	600,000	2,600,000

研究代表者の専門分野：データマイニング

科研費の分科・細目：情報学・知能情報学

キーワード：燃料電池、損傷過程、自己組織化マップ、近傍ネットワーク分析、キエグラフ、共起クラスター

## 1. 研究開始当初の背景

(1) 近年、世界的な地球環境問題への取り組みや、エネルギー資源の有効活用の必要性から、燃料電池に対する関心と実用化への期待は日々高まってきている。燃料電池は高発電効率、低公害、低騒音などの特長を持つ発電

システムであり、その使用用途は、家庭用、自動車用から発電所まで多岐に渡る。発電規模は数10KWから10MW級の電池が開発されており、やがては火力発電に代わる100MW級の新しい発電装置になることが期待されている。

その中でも固体酸化物型燃料電池 (SOFC) は、高発電効率な電池として注目されているが、SOFCは高温 (600°C~1000°C)・高酸化還元環境で作動するため、熱膨張や還元膨張によりセラミクスでできている電極や電解質に応力が生じる。その結果、き裂や剥離が生じ反応効率の低下につながる (図 1)。そのため、SOFCにおいては化学的な劣化に加えて物理的な劣化挙動 (損傷) を把握することが重要である。損傷物理的劣化を把握することは、安心・安全な新規燃料電池の開発や安定運転の監視システムの基盤となる。

(2) 燃料電池の物理的劣化に関しては、これまでほとんど研究が行われて来なかった。物理シミュレーションによって応力を解析することが行われているものの、定常状態の応力解析に限定されており、時間を追った損傷過程や、実際に起こった損傷そのものの解析はほとんどなされていない。損傷の計測に関しては、材料が損傷したり変形したりした際に生じる弾性波 (超音波) を計測するアコースティック・エミッション (AE) 法により損傷事象の計測に成功している。しかし、燃料電池は複数の部材から構成され、温度より材料の状態が変化するため、損傷の AE 事象から損傷部位の特定や損傷過程までは把握できていない。

## 2. 研究の目的

(1) 本研究は上述の問題に対して、AE 法により損傷計測技術を基にして、各種データマイニングによる固体型電池の機械的特性評価法の開発を目的とする。AE 法自体の歴史は古く、1960 年頃から主に建造物の非破壊検査法として研究・実用化されている。その多くは単一の部材を対象としているなど単純な対象を扱っているが、一方、SOFCは(1)電極・電解質が3層構造をしている、(2)熱や酸化還元により膨張・収縮する、(3)ガラスシール (電解質とアルミチューブをパックするため) は温度により状態が変化する、ことにより様々な応力が生じ、またほとんどの AE 信号は重なっていることから、損傷は連鎖し

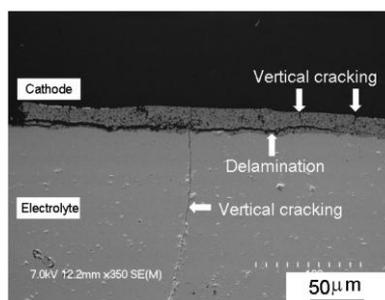


図 1 作動試験後のセル断面写真

ており非常に複雑な現象が起こっていると推察される。作動終了後に電子顕微鏡で損傷を確認した結果、電極や電解質の縦き裂、電極・電解質間のはく離、電解質・ガラスシール間のはく離など複数存在することも確認している (図 1 参照)。このように多様かつ複雑な AE 信号を解析する技術は未だ確立していない。これに対して、本研究では従来の信号処理に加えて、機械学習・複雑ネットワーク分析を取り入れた多角的なデータマイニングより損傷過程や構成部材間の力学関係の推定法の開発を行う。

(2) 本研究では、燃料電池の損傷メカニズムの解明や監視システムの共通基盤技術として、以下の3点において開発を行う。

### ・損傷過程の可視化

燃料電池専門化の損傷過程の理解を支援するため、大規模 AE 事象群の類似関係が把握可能な分類マップの自動生成法を開発する。

### ・損傷過程の遷移点の検出

大きな損傷や外部の状態変化により、ある時点を境に大きく内部状態が変化し、損傷過程が遷移することが知られている。この遷移点を検出するとともに、AE 事象の出現傾向の変化から損傷メカニズムを理解するための方法を開発する。

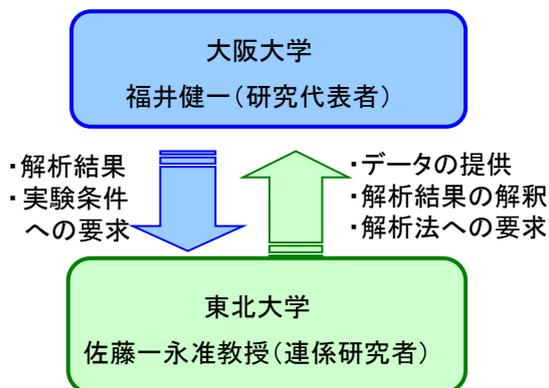
### ・構成部材間の力学関係の推定

一連の AE 事象系列から、頻出して共起する AE 事象のペアを発見することで、それらに対応する構成部材間の力学関係を推定する方法を開発する。

## 3. 研究の方法

### (1) 協力体制

役割: 固体型電池の機械特性評価法の確立



役割: 燃料電池の試作および損傷計測実験

### (2) 燃料電池の損傷試験

SOFC 損傷試験装置の断面模式図を図 2

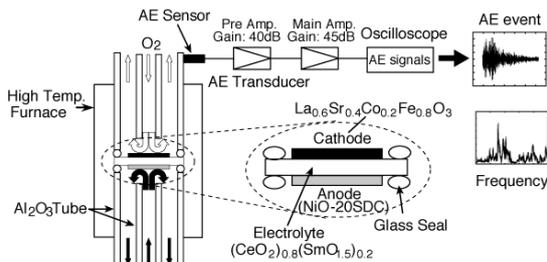


図 2 SOFC 試験装置模式図

に示す。SOFC としては標準的な構成である。まず、この試験では電池セルの支持材であるガラスシールを融解させるために 800°C まで上昇させ、約 10 時間運転した後、約 50 時間かけて室温まで降下させた。そして、広帯域圧電型トランスデューサを用いて、AE 信号を計測した。ここで、サンプリングレートは 1MHz であるため、観測可能周波数は最大 500kHz である。

### (3) 損傷評価方法の開発

#### ・ 損傷過程の可視化

類似 AE 事象の分類マップの生成には、自己組織化マップ (SOM) を用いた。AE 事象は周波数スペクトルの類似度により分類を行った。通常の SOM はユークリッド距離により事象間の類似性を計測するが、周波数スペクトルは分布構造を持ち、ノイズを多く含むためスペクトルの離散点を特徴ベクトルとして与えても適切な類似性の判定はできない。そこで、本研究では確率分布間の距離として知られる Kullback-Leibler(KL)情報量に基づく尺度を SOM に導入した。

次に、損傷の過程を把握するため、SOM により量子化され低次元に圧縮された特徴空間に、時間軸を合わせた時空間に対して、ノンパラメトリックな密度推定により類似 AE 事象の発生傾向を可視化した。

#### ・ 損傷過程の遷移点の検出

SOM によるデータ空間の量子化と位相関係の写像は、大局的な損傷過程の把握を可能にする。一方、個々の AE 事象の類似関係と全事象との関係を把握するには、近傍グラフが適している。そこで、AE 事象間の類似度から成る近傍グラフのネットワーク構造の変化から損傷過程の遷移点の検出とともに、損傷過程の分析を行った。

#### ・ 構成部材間の力学関係の推定

時系列で共起して発生する AE 事象のペアを抽出する方法を 2 つ開発した。(a) 事象間の主要な共起関係を可視化する KeyGraph を、SOM により量子化されたデータ空間の格子に適用することで、共起する重要事象 (図 3) を抽出する E<sup>3</sup>(Essential Event

Extractor)法を提案した。

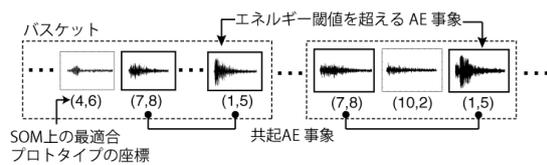


図 3 共起する AE 事象の抽出

次に、(b) 共起に起因する適切な事象集合を抽出するため、独自の共起クラスタマイニングアルゴリズムを開発した。本アルゴリズムは、事象の共起性と類似性を考慮して、共起するクラスタの対を効率良く抽出する方法である。

#### (4) 分類精度の評価

燃料電池の損傷事象に対しては、燃料電池専門家も対応する損傷部位の大半は不明であるため、SOM による分類精度を評価するのは困難である。そこで、まず各種木片を割った時の音 (き裂音に対応) や、厚紙でできた箱を滑らせた時の音 (はく離音に対応) を集音して模擬データを独自に用意し、分類性能を評価した。なお、この模擬データは、ホームページにて公開している。

#### (5) 評価尺度

SOM はデータ空間の量子化 (クラスタリング) と位相構造の保存の 2 つの特徴を有するが、既存のクラスタ妥当性指標は前者のみの評価である。そこで、既存のクラスタ妥当性指標にクラスタ間の位相構造を重みとして導入する評価尺度を提案した。

### 4. 研究成果

#### (1) 損傷事象の分類精度評価

図 4 に独自に用意した模擬データに対する分類性能の代表的な比較結果を示す。本研究で提案した KL 情報量に基づく SOM は、通常よく用いられるガウシアンカーネル(GS)、シグモイドカーネル(SG)、多項式カーネル(PL2,PL3)に基づく SOM や、通常の SOM と比較して大変優れた分類性能を示した。これは、KL 情報量が周波数スペクトル分布の局所構造を捉えているためと推察している。

本成果は、情報処理学会論文誌: 数理モデル化と応用に採録されている。また AI の応用に関する国際会議 IEEE ICTAI-2010 に full paper (採択率 27%程度) で採択され、口頭発表を行った。また、評価尺度自体の妥当性は公開ベンチマークを用いて検証した。SOM に関するワークショップ WSOM2011 にて口頭発表を行い、論文は Springer の Lecture Notes として出版されている。

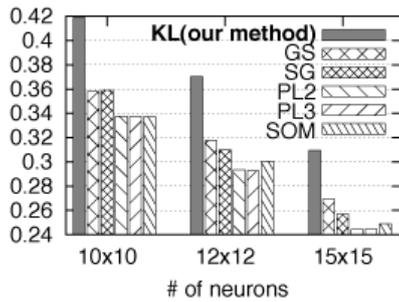


図 4 模擬データによる分類性能の比較

(2) SOM と密度推定による損傷過程の可視化

図 5 は SOM によるデータ空間の低次元写像(x-y 平面)上に、z 軸はある時刻における AE 事象の発生密度分布を示している。損傷過程の可視化結果とともに、頻出 AE 事象の波形、エネルギー、周波数スペクトルならびに発生時刻の温度帯を総合して、燃料電池専門家による損傷過程の解釈を行った。その結果、本研究により初めて燃料電池の大局的な損傷過程が明らかになるとともに、本手法の有用性が確認できた。

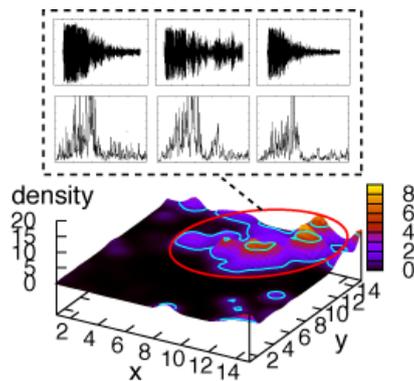


図 5 損傷過程の可視化結果

本成果は、Journal of Environment and Engineering に採録されている。また、(1)の成果と共に IEEE ICTAI-2010 にて発表を行った。

(4) 近傍グラフの成長過程による損傷分析

損傷が進むにつれて、近傍グラフのネットワーク構造(クラスタ係数、次数のべき指数、ネットワーク直径)が大きく変化する点が発見された(図 6)。類似 AE 事象の発生傾向をネットワーク構造の変化から分析した結果、興味深い示唆が得られたものの、ネットワーク構造の変化が表している物理現象の対応付けが大きな課題である。

本成果は、データマイニングに関する主要な国際会議 PAKDD-2009 に採択され、口頭発表を行った。

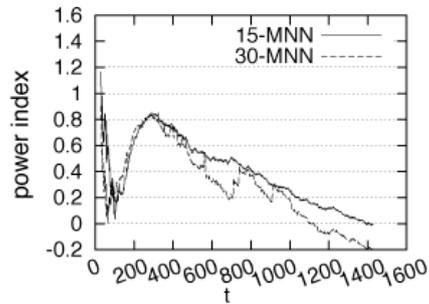


図 6 近傍グラフのネットワーク構造の変化

(5) E<sup>3</sup>法による重要損傷事象の抽出

図 7 のノードは頻出 AE 事象が属する SOM のノード座標を示し、エッジは共起関係を示している。エッジが密に結合している「島」は共起性の高い AE 事象群を示している。また、島と島を結ぶ AE 事象は単独の頻度はそれ程高くはないが、両者に関する重要事象と考えられる。この結果を SOM の低次元写像と照らし合わせて現象の解釈を行った結果、いくつかの新規の知見(仮説)が得られた。

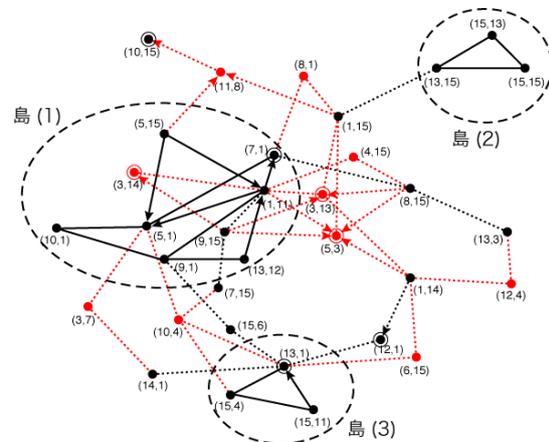


図 7 AE 事象の共起ネットワーク

本成果は、情報処理学会論文誌：数理モデル化と応用に採録されている。これまでの一連の成果をまとめて発表した 2011 年度人工知能学会全国大会では大会優秀賞を受賞した。また、2009 年度に関西エネルギー・リサイクル科学振興財団の研究助成金を受けた 19 件の内から代表 1 件に選ばれ、2011 年 3 月に行われたその後の進展に関する報告会にて招待講演を行った。

(6) 共起クラスタマイニングによる構成部材間の力学関係の推定

図8は共起クラスタマイニングにより抽出された代表的な共起するクラスタのペア3パターンをSOMによる低次元写像上に示している。燃料電池の専門家が妥当と判断できる損傷パターンとともに、これまで注目されていなかったがさらなる調査の価値があると判断された損傷パターンも発見された。本研究により、燃料電池の構成部材間の力学関係について一定の推定結果が得られていることを確認した。

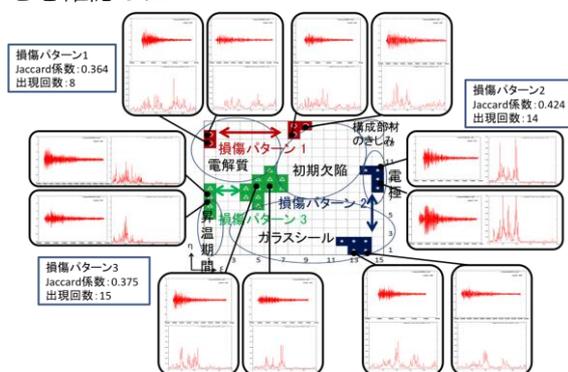


図8 代表的な共起パターン

本成果は、人工知能学会論文誌に採録されている。また、PAKDD-2012に採択され、2012年5月末に発表予定である。なお、本アルゴリズムは平成24年度～26年度科学研究費補助金挑戦的萌芽研究(24650068)へと発展している。

## 5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計4件)

- ① 稲場大樹、福井健一、佐藤一永、水崎純一郎、沼尾正行、燃料電池における損傷パターン抽出のための共起クラスタマイニング、人工知能学会論文、査読有り、27巻3号、2012、pp.121-132  
[http://www.jstage.jst.go.jp/article/tjsai/27/3/121/\\_pdf/-char/ja/](http://www.jstage.jst.go.jp/article/tjsai/27/3/121/_pdf/-char/ja/)
- ② Ken-ichi Fukui, Shogo Akasaki, Kazuhisa Sato, Junichiro Mizusaki, Koichi Moriyama, Satoshi Kurihara, and Masayuki Numao, “Visualization of Damage Progress in Solid Oxide Fuel Cells”, Journal of Environment and Engineering, with review, Vol. 6, No. 3, 2011, pp. 499-511  
[http://www.jstage.jst.go.jp/article/jee/6/3/499/\\_pdf/-char/ja/](http://www.jstage.jst.go.jp/article/jee/6/3/499/_pdf/-char/ja/)
- ③ 北川哲平、福井健一、佐藤一永、水崎純一郎、沼尾正行、キーグラフとSOMを用いた稀な重要事象抽出による燃料電池の損傷評価、情報処理学会論文誌:数理モデル化と応用、査読有り、4巻2号、2011、

pp.1-12

- ④ 福井健一、赤崎省悟、佐藤一永、水崎純一郎、森山甲一、栗原聡、沼尾正行、カーネルSOMによる損傷評価のための隣接性を考慮した分類性能評価、情報処理学会論文誌:数理モデル化と応用、査読有り、3巻1号、2010、pp.36-48

[学会発表] (計5件)

- ① Daiki Inaba, “Co-occurring Cluster Mining for Damage Patterns Analysis of a Fuel Cell”, The 16th Pacific Asia Conference on Knowledge Discovery and Data Mining (PAKDD2012), with review, May 30<sup>th</sup> 2012, Renaissance Hotel (Kuala Lumpur, Malaysia)
- ② 福井健一、Kernel SOMによる燃料電池の視覚的損傷評価、第25回人工知能学会全国大会、2011年6月3日、いわて県情報交流センター(岩手県) (全国大会優秀賞受賞)
- ③ 福井健一、視覚的データマイニングによる固体酸化燃料電池の損傷評価支援、(財)関西エネルギー・リサイクル科学研究振興財団平成23年助成研究発表会、2011年3月3日、大阪科学技術センタービル(大阪府)(招待講演)
- ④ Ken-ichi Fukui, “Kullback-Leibler Divergence Based Kernel SOM for Visualization of Damage Process on Fuel Cells”, 22th IEEE International Conference on Tools with Artificial Intelligence (ICTAI-10), with review, Oct. 27<sup>th</sup> 2010, Université d’Artois (Arras, France)  
Ken-ichi Fukui, “Growth Analysis of Neighbor Network for Evaluation of Damage Progress”, The 13th Pacific-Asia Conference on Knowledge Discovery and Data Mining (PAKDD-09), with review, Apr. 29<sup>th</sup> 2009, Imperial Queen Park Hotel (Bangkok, Thailand)

[図書] (計1件)

- ① Tepei Kitagawa, Ken-ichi Fukui, Kazuhisa Sato, Junichiro Mizusaki, and Masayuki Numao, Springer, Smart Innovation, Systems and Technologies, Chap. “Extraction of Essential Events with Application to Damage Evaluation on Fuel Cells”, Vol. 8, 2011, pp. 89-108

[その他]

- 損傷評価用模擬データ  
<http://www.ai.sanken.osaka-u.ac.jp/~fukui/wave-data/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

福井 健一 (FUKUI KENICHI)  
大阪大学・産業科学研究所・助教  
研究者番号：80418772

(2) 研究分担者

該当なし

(3) 連携研究者

沼尾 正行 (NUMAO MASAYUKI)  
大阪大学・産業科学研究所・教授  
研究者番号：30198551

佐藤 一永 (SATO KAZUHISA)  
東北大学・大学院工学研究科・准教授  
研究者番号：50422077

水崎 純一郎 (MIZUSAKI JUNICHIRO)  
東北大学・多元物質科学研究所・教授  
研究者番号：90092345