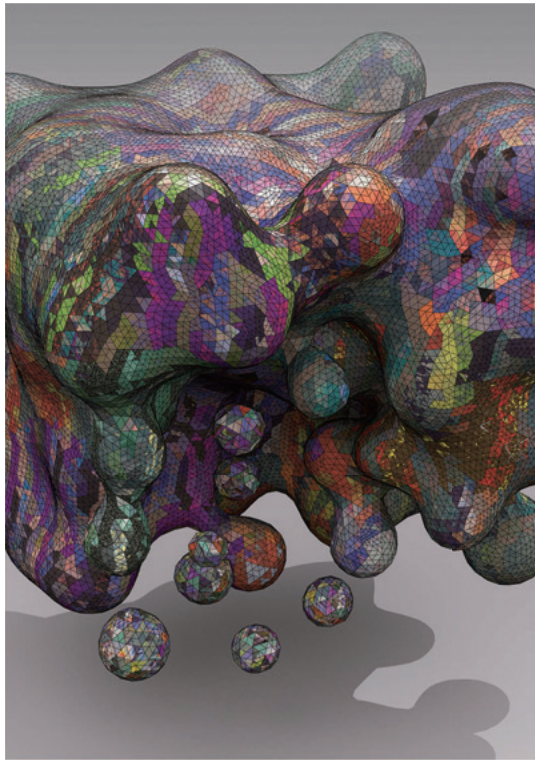


Fluid & Powder

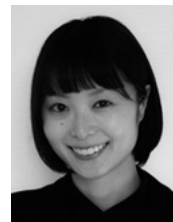
Technical Review
Vol.34 No.2

October 2022

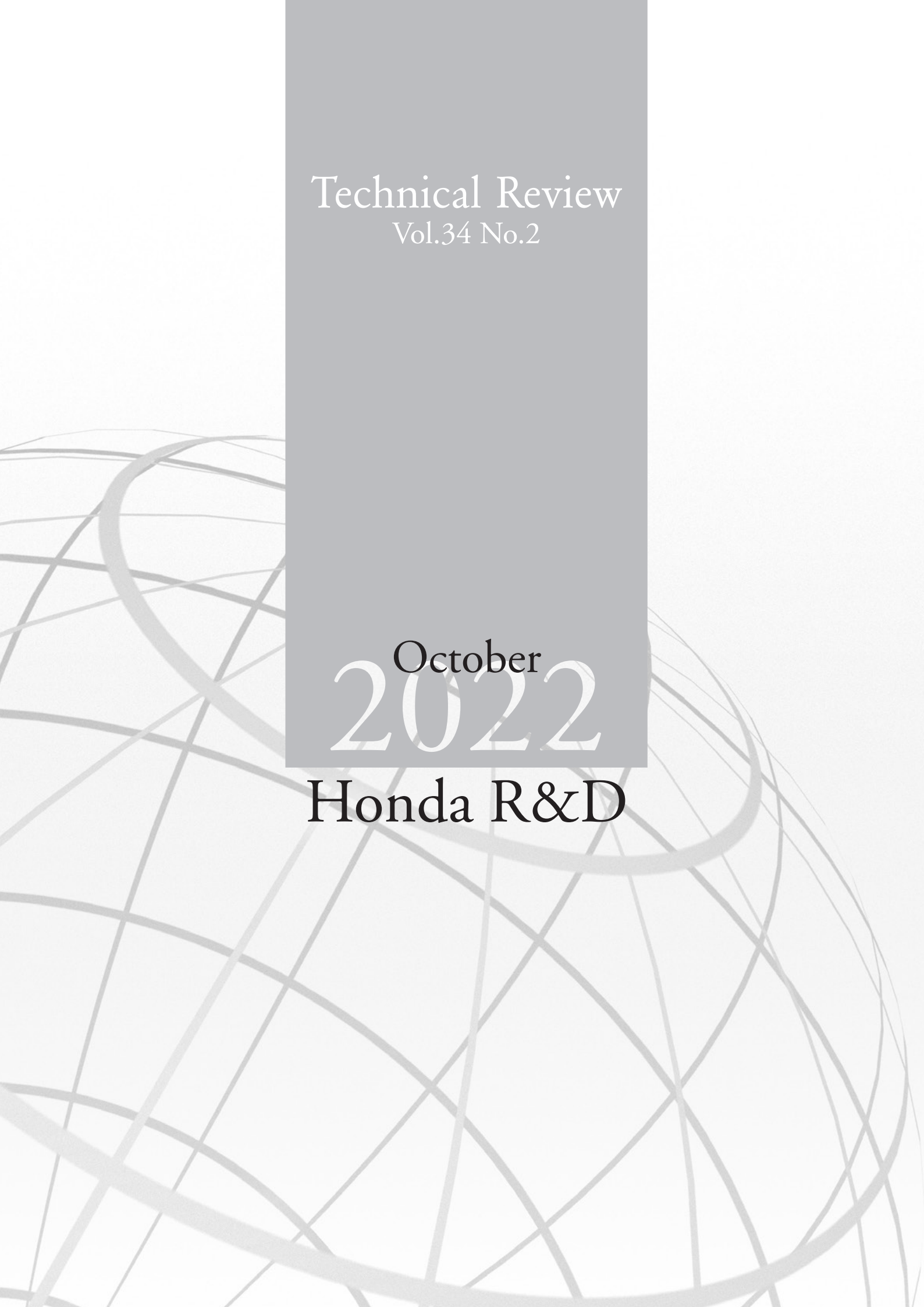


==== 表紙の言葉 =====

多彩なアイデアが融合し合い一つの技術が形成されていく様を、具象的に表現しました。アイデアは融合を重ね、時に分解しながら最終的な技術が形づくられると感じています。その様を可視化し表現するならば、私は蠢く有機的な物体のようなものと捉え、その物体を多彩な色と形で表現しました。



デザインセンター
齋藤 美波

The background features a light gray wireframe sphere. A solid gray vertical bar is positioned in the center, serving as a backdrop for the text.

Technical Review
Vol.34 No.2

October
2022
Honda R&D

目次

技術紹介

- ◇ 大気中の二酸化炭素の資源化に向けた微細藻類の屋外安定培養技術の研究.....木下翔平・福島のぞみ
土肥瑞穂・後藤 稔 1
- ◇ リチウムイオン電池の内部状態を予測して劣化挙動を高精度に算出する Semi-Physical Model
富永由騎・大道 馨
加我 正・西本有里佳 10
- ◇ アルミニウム鋳物合金の熱伝導率に及ぼす熱処理条件の研究.....上田順一・家永裕一・須藤建次 18
- ◇ 量産組立工程での超音波によるリアルタイムボルト軸力締結システム.....津崎一浩・榊原利次
原 安史・石田 司 24

論文

- ◇ バッテリ電圧推定を目的とした機械学習モデルにおける精度評価指標の提案
川原卓磨・佐藤優気・佐藤功二 32

CONTENTS

Introduction of new technologies

- ◇ Study of Technology for Outdoor Stable Culture of Microalgae for Recycling of CO₂ in Atmosphere
..... Shohei KINOSHITA・Nozomi FUKUSHIMA
Mizuho DOI・Minoru GOTO 1
- ◇ Semi-physical Model that Predicts Internal State of Lithium-ion Batteries and
Calculates Degradation Behavior with High Accuracy Yuki TOMINAGA・Kaoru OMICHI
Tadashi KAGA・Yurika NISHIMOTO 10
- ◇ Study of Heat Treatment Conditions that Impact Thermal Conductivity of Aluminum Casting Alloy
..... Junichi UEDA・Yuichi IENAGA・Kenji SUTO 18
- ◇ Real-time Bolt Axial Force Fastening System Using Ultrasonic Waves in Mass Production Assembly Process
..... Kazuhiro TSUZAKI・Toshitsugu SAKAKIBARA
Yasushi HARA・Tsukasa ISHIDA 24

Technical papers

- ◇ Proposal of Evaluation Metric for Machine Learning Model for Battery Voltage Estimation
..... Takuma KAWAHARA・Yuki SATO・Koji SATO 32

大気中の二酸化炭素の資源化に向けた 微細藻類の屋外安定培養技術の研究

Study of Technology for Outdoor Stable Culture of Microalgae for Recycling of CO₂ in Atmosphere

木下 翔平¹

Shohei KINOSHITA

土肥 瑞穂¹

Mizuho DOI

福島 のぞみ¹

Nozomi FUKUSHIMA

後藤 稔¹

Minoru GOTO

要 旨

カーボンニュートラル社会構築に向け、大気中の二酸化炭素を有価物へ転用可能な微細藻類を用いた二酸化炭素固定化技術の構築を目的とし、Honda オリジナル株とフラットパネル式培養槽を用い、培養条件と培養槽構造の適正化の検討をおこなった。培養条件は、栄養塩成分である窒素、カリウム、リン濃度の設定をおこなった。かくはんガイド形状を、一方向に液とガスを吐出する形状を採用することで、培養液の流れ場流速を 0.02 [m/sec] 以上を達成した。以上の培養条件の適正化により、微細藻類の生産量が向上できた。培養槽構造については、断熱層構造により、年間を通じて管理温度範囲に制御が可能となった。また、培養槽の 45 [°] チルト設置により培養槽に入射する光量を増大することができた。これらを反映した屋外培養試験から藻生産量 13.5 [g/m²/day] の見通しが得られた。この結果から DREAMO は、カーボンニュートラル燃料であるサトウキビ由来のバイオエタノールと同等以上の作付面積当たりのエタノール生産量を達成する可能性が示された。

ABSTRACT

The optimization of culture tank structure and culturing conditions was investigated using Honda's own strain of microalgae and a flat panel photobioreactor for the purpose of creating carbon dioxide fixation technology using microalgae capable of repurposing carbon dioxide in the atmosphere as a valuable resource. The aim is to build a carbon-neutral society. The culturing conditions were configured in terms of the concentrations of the nutrient salt components of nitrogen, potassium, and phosphorus. By adopting a flow guide shape that discharges liquid and gas in a single direction, a flow-field velocity of 0.02 m/sec or higher was achieved for the culture solution. This optimization of the culturing conditions successfully increased microalgae production volume. Regarding the culture tank structure, the heat insulating layer structure made it possible to maintain temperatures within the control range throughout the year. The culture tank was also installed at a 45° tilt, which successfully increased the amount of incident light in the culture tank. Outdoor culture tests incorporating these factors yielded an expectation of algae production volume of 13.5 g/m²/day. These results indicate the possibility that DREAMO will be able to achieve ethanol production volume per planted area that is equal to or better than bioethanol from sugarcane, which is a carbon-neutral fuel.

1. ま え が き

近年、カーボンニュートラル社会構築の動きや環境問題を背景に、大気中へ排出される二酸化炭素 (CO₂) を回収し、有価物へ転用する Carbon Capture and Utilization (CCU) 技術が注目されている。CO₂ の回収手法としては、

大気から直接回収する Direct Air Capture (DAC) や、火力発電所などの高濃度 CO₂ の回収をターゲットとした技術、化学吸収法、物理吸着法など様々な手法が検討されている。回収した CO₂ はドライアイス、溶接など直接的な利用やプラスチックなど化学製品や燃料、コンクリート製品などの原料として利用⁽¹⁾される。微細藻類を活用した CCU

¹ 先進パワーユニット・エネルギー研究所

E-mail: shohei_kinoshita@jp.honda

技術は、光合成反応で CO_2 吸収し、生物機能で CO_2 から有価物へ変換がおこなわれるため、低エネルギーでの有価物化が期待される。

微細藻類はバイオマス間の比較において、陸上植物に比べ作付面積当たりの年間 CO_2 固定量が多い。光エネルギー利用効率は一般的な陸上植物が 4.6 [%]⁽²⁾ なのに対して、微細藻類が最大理論効率 12.0 [%]⁽²⁾ と高効率であり、 CO_2 吸収性能が優れている。前述したように微細藻類は細胞内で吸収した CO_2 を様々な有価物に変換することができる。微細藻類体内で炭水化物などの有価物原料に変換、貯蔵され、その原料からジェット燃料⁽³⁾やバイオエタノール⁽³⁾、プラスチック原料⁽⁴⁾などの工業利用や食品、医療分野に転用することが可能である。

微細藻類の培養方法は、オープンポンド方式やレースウェイ方式、フラットパネル方式などを代表とする培養方式が一般化されており、各方式について培養槽構造やシステムに関する研究の取り組みが報告⁽⁵⁾されている。本研究では、設置面積あたりの藻生産量向上を目的にフラットパネル方式を採用した。培養装置のイメージを Fig. 1 に示す。

本稿は独自開発した微細藻類株と培養槽を複数並べたフラットパネル式培養槽を用いた屋外安定培養技術の構築に向けて、培養条件と培養装置の観点で取り組みを紹介する。

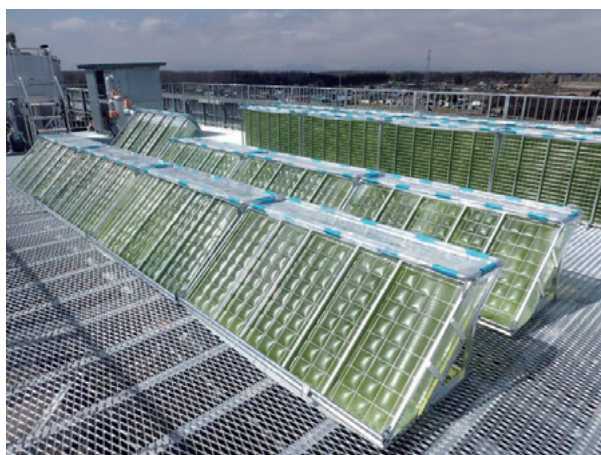


Fig. 1 Image of culture tank equipment

2. Honda DREAMO の特徴と屋外培養技術

2.1. Honda DREAMO 株の特徴

本研究で用いる微細藻類の特徴について紹介する。Honda オリジナル株 (Honda DREAMO: DREAMO) は、*Chlamydomonas reinhardtii* UTEX 90 (国立環境研究所: 受託 NIES-2236) を親株とし、遺伝子改変をおこなわないスクリーニングによって取得されている。主な特徴^{(6), (7)}につ

いて紹介する。一つ目に、他の微細藻類と比べて単位面積当たりの藻生産量が高い点である。微細藻類は種類によって生産量は異なるが、DREAMO と同種の *Chlamydomonas* については、0.10 から 0.25 [g/L/day]⁽⁸⁾ であるのに対して屋外の環境外乱影響を受けない屋内の理想環境ではあるが、0.50 [g/L/day] と高いポテンシャルを有する。二つ目に、有価物原料となる澱粉生産量を高めることが可能である。一般的に、藻生産速度と澱粉含有率はトレードオフの関係にあるが、DREAMO は藻生産速度を維持したまま澱粉含有率向上⁽⁶⁾が可能である。三つ目に、DREAMO 親株である *Chlamydomonas reinhardtii* UTEX 90 の細胞壁は 0.3 [μm] に対して DREAMO 細胞壁が 0.09 [μm] と薄く DREAMO 細胞内に蓄える有価成分をショートプロセスで抽出⁽⁷⁾が可能なことである。

2.2. フラットパネル式培養槽

DREAMO の培養は設置面積あたりの藻生産量向上を目的にフラットパネル式培養槽でおこなわれる。Fig. 2(a), (b) に一般的なフラットパネル式培養槽と Honda の特徴的なフラットパネル式培養槽の構造を示す。Fig. 2(a) の一般的なフラットパネル式培養槽は、槽の奥行きが 1 から 10 [cm]⁽⁵⁾ と薄く、水深を 100 [cm]⁽⁵⁾ 以下で設定した構造をとる。また、培養槽底部に設置した配管から CO_2 ガスを吐出し、培養液をかくはんすることで曝気をおこなっている。この仕組みにより、微細藻類の自然沈降を抑制している。一方、Fig. 2(b) の Honda オリジナルのフラットパネル式培養槽は、冷却水を培養槽内に貯留し水の熱容量を利用した培養液の温調エネルギーを最小限とする構造と培養液のかくはんガイドを備えた構造を特徴とする。培養槽構造は、冷却水を充填するビニール水槽と培養液を投入する培養パックがきょう体に固定され、冷却水を充填した冷却槽内に培養パックを設置した構造である。培養液のかくはんは、かくはんエネルギー削減のため、供給ガスを利用したエアリフトかくはんとしている。

Fig. 3 に装置付帯設備を示す。培養した DREAMO の回収や投入をおこなう送液ポンプと DREAMO を含む培養液を回収する沈降タンク、排ガスなど CO_2 ガスを含むガス供給に使用するブロワーで構成する。沈降タンクは、培養した DREAMO を一次濃縮として自然沈降の機能を付加させた装置である。

2.3. DREAMO 屋外培養における課題

微細藻類の生産量の向上には多くの課題⁽⁹⁾がある。Table 1 に一般的な微細藻類培養に影響を与える因子のうち、DREAMO に重要な培養因子^{(6), (7), (9)}と培養影響⁽¹⁰⁾を示す。重要因子として、栄養塩、培養液かくはん、培養液温度、光が挙げられる。

栄養塩については、栄養成分濃度を変化させることで微

Table 1 Important factors and issues of DREAMO

Factor	Culture effect	Issue	Theme
Nutrients	Nutrient depletion	Contamination proliferation	Nutrient concentration optimization
Broth stirring	Algae subsidence	CO ₂ dissolution amount, O ₂ dissolved amount, reduced light reception	Stirring speed optimization and structure
Water temperature	Water temperature rise	Increased temperature control energy	Temperature control energy minimization
Incident light	Reduced production efficiency, water temperature rise	Low utilization of incident light, water temperature rise	Incident light utilization rate upward, temperature control energy minimization

細藻類の生産量の制御が可能⁽¹¹⁾であることから、その濃度設定は重要な課題である。

培養液かくはんは、DREAMO の自然沈降による生産阻害を抑制するうえで重要な因子である。

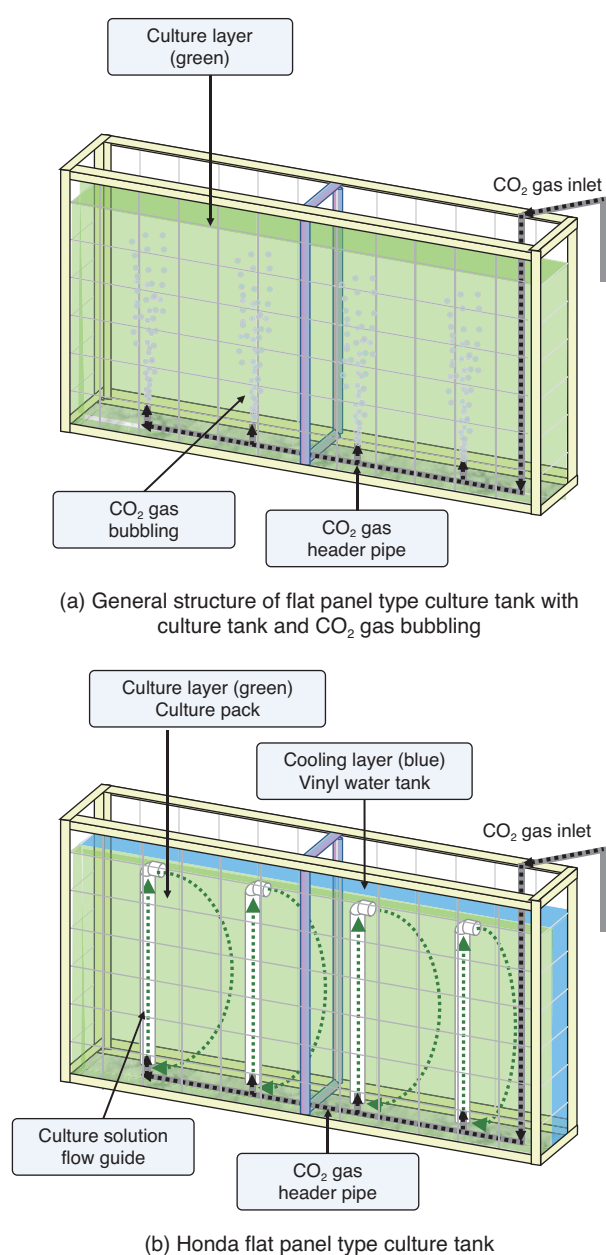


Fig. 2 Structural comparison of flat panel type culture tanks (a) and (b)

また、培養液温度は藻の生産量の減少や生態活動の低下に影響する。Fig. 4 の1週間あたりの生産量の試験結果から、DREAMO の至適温度は 20 [°C] から 35 [°C] であり、成長阻害が生じない限界温度が 40 [°C] であること、低温域は 10 [°C] 以下で生産量が低下することが明らかになっている。したがって安定した培養をするためには 10 [°C] から 35 [°C] の範囲で培養液温度を制御することが課題である。

光合成反応のエネルギー源である光は、強度を強めることは容易ではないため、多くの光量を藻にあてる検討が重要である。

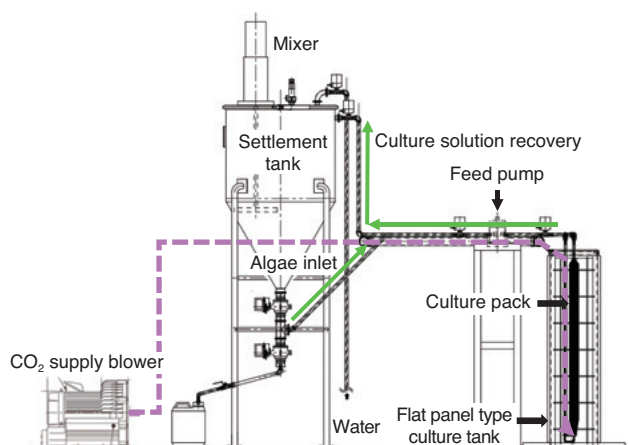
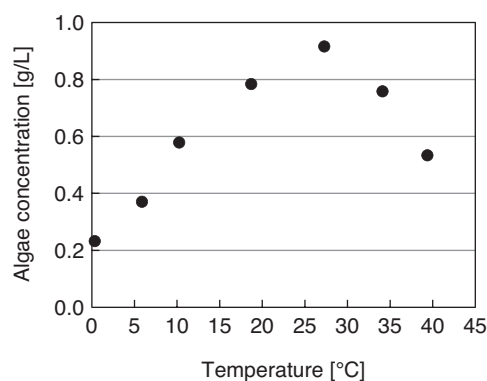

 Fig. 3 Ancillary equipment for harvesting and CO₂ supplying


Fig. 4 Temperature dependence of DREAMO production

3. 開発のねらい

本研究では、独自開発した DREAMO とフラットパネル式培養槽を用いて下記項目を検討した。

- (1) 微細藻類培養条件 (栄養塩割合および培養液かくはん速度) の検討
- (2) 温度制御と入射光量最大化が可能となる培養槽構造の検討

バイオエタノールはコーン、サトウキビを原料とすることが主流である。サトウキビ由来のエタノールはコーンに対して作付面積あたり 3 倍⁽¹²⁾の生産能力を持ち、高効率であることが知られている。そこで本研究は、サトウキビ由来のエタノール生産量 $11.2 \text{ [m}^3/\text{ha/year}]$ ⁽¹²⁾と同等の効率となる微細藻類量 $10.0 \text{ [g/m}^2/\text{day}]$ (占有面積換算)を目標値とした。

4. 微細藻類培養条件の検討

4.1. 栄養塩の検討

微細藻類培養における重要な栄養素として窒素 (N)、リン (P)、カリウム (K) などの元素が挙げられる。P は代謝反応のエネルギーとされる Adenosine Tri-Phosphate (ATP) として利用され、K などのミネラルは細胞内の化学反応を補う働きがあり、代謝反応に重要な位置付けである。一方で、細胞を構成する重要成分である N は、既に適正化した培地⁽⁷⁾を調整している。本研究では DREAMO 培養に適した P、K 濃度について検討をおこなった。

ベースとする培養液成分を Table 2 に示す。P、K はリン酸塩培地で構成されるため、P/K 比率は変更せずに、リン酸カリウム濃度を水準として DREAMO 生産量が最大となる P、K 濃度の見極めをおこなった。本試験条件と試験結果をそれぞれ Table 3、Fig. 5 に示す。リン酸カリウムが $2,000 \text{ [ppm]}$ 以下においては、リン酸カリウム濃度の低下とともに、生産量が減少する。一方で、リン酸カリウム濃度 $2,000 \text{ [ppm]}$ 以上では生産量が横ばいとなるため、リン酸カリウム濃度 $2,000 \text{ [ppm]}$ を下限値として設定した。

4.2. 培養液のかくはん条件の検討

DREAMO 生産に適した培養液のかくはんについて、培養液の流れ場流速を指標に検討をおこなった。流れ場流速の要件は DREAMO 生産効率の指標である、光合成効率 (Photosynthesis efficiency: PE) と、流れ場流速の関係から設定する。PE は式 (1) に示すように、DREAMO 生産量のエネルギー換算値と、培養期間中に受けた光量との割合と定義する。

$$\text{PE [\%]} = \frac{\text{DREAMO 生産量 [MJ/m}^2/\text{day}]}{\text{光合成有効光エネルギー [MJ/m}^2/\text{day}]} \quad (1)$$

Table 2 Nutrient components of culture solution

Stock liquid	Chemical formula
UREA	$\text{CH}_4\text{N}_2\text{O}$
	$\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$
	$\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$
Phosphate	K_2HPO_4
	KH_2PO_4
Hutner's trace elements	$\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$
	H_3BO_3
	$\text{MnCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$
	$\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$
	$\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$
	$(\text{NH}_4)_6\text{Mo}_7\text{O}_{24} \cdot 4\text{H}_2\text{O}$

Table 3 Typical conditions for lab-scale DREAMO culture

Factor	Unit	Value
Water temperature	[°C]	28
Incident light	[mol/day]	16
Light irradiation time	[hour-light / hour-dark]	10 / 14
Air-CO ₂ mixed gas airflow	[vvm]	0.15
CO ₂ concentration	[%]	5
Amount of culture medium	[L]	2

培養液のかくはん性向上は、自然沈降を抑制し DREAMO の生産阻害を抑制することを目的としている。目標の藻生産量を達成するために、PE の改善効果を各実施項目に割り付けた結果、かくはんによる PE 改善は 3.2% あればよいことがわかった。

培養液の流れ場流速の可視定量化は粒子画像流速測定法 (Particle Image Velocimetry: PIV 法) を用いた。測定は Fig. 6 の写真に示すかくはんガイド (a) を組付けた培養容器 (b) を用いて培養槽を模擬した測定をおこなった。培養液中に DREAMO 同等の比重及びサイズのトレーサー粒子を用いておこなった。測定においては、ガス通気をおこない、トレーサー粒子のかくはんをおこなった。高速度カメラ

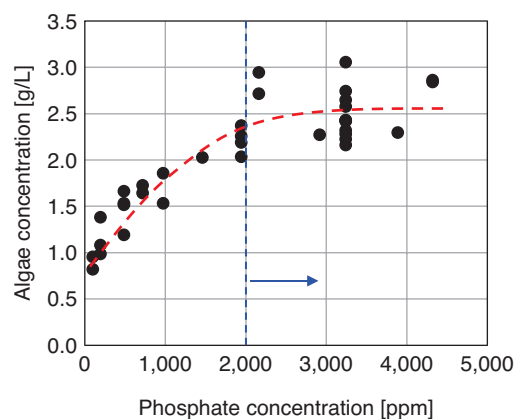


Fig. 5 Phosphate dependence of DREAMO production

ラを用いて、X 軸、Z 軸方向の粒子の速度測定をおこなった。水位による気泡拡散性の影響による、容器中の流速ばらつきを想定し、Fig. 7 の赤い四角で囲んだように高さ方向3カ所で測定を実施した。

以上の測定によって得た培養容器中の平均流速と、PE改善しとの関係を、Fig. 8 に示す。必要流れ場流速は0.02 [m/sec] 以上であれば、PE が3.2 [%] 以上改善されることを確認した。

次に、流れ場流速が0.02 [m/sec] を要件として培養液のかくはん構造について検討をおこなった。

Fig. 9 に示す (a), (b) の二種類のガイド形状の検討をおこなった。両案ともに、培養パック底部からかくはんガイド内にガス供給をおこない、かくはんガイド中に上昇速度を付け培養液に流れを作る。形状 (a) は培養槽設置面に対して垂直にガスと液体が吐出される構造である。本構造は、設置するかくはんガイドを中心に左右方向にそれぞれ流れを作り出すことを狙いとしている。形状 (b) は、一方方向に液とガスを吐出する構造とした。これは、流れを一方方向にすることで流速を強めることを狙いとした。

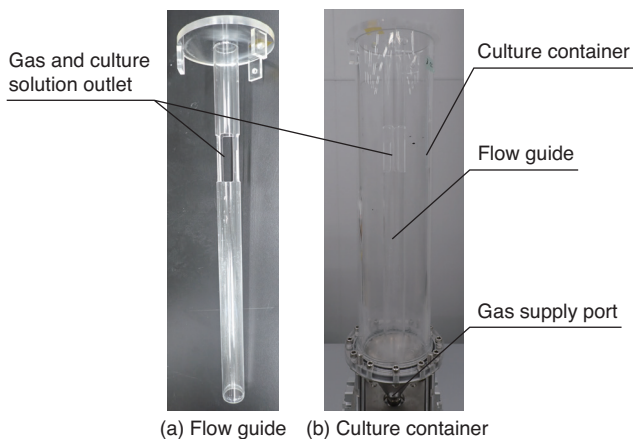


Fig. 6 Simulated culture tank test container

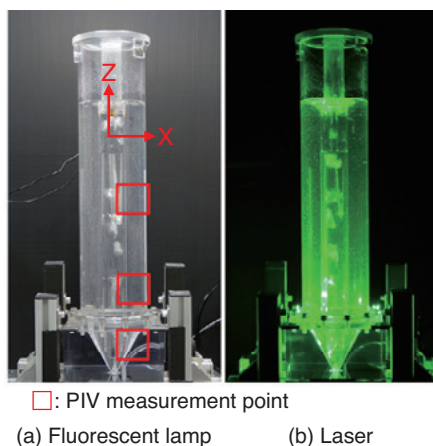


Fig. 7 Flow velocity measurement by (a) and (b)

かくはんガイド形状 (a), (b) を用いた時の流れ場流速について、Ansys 社製の Fluent を用いて数値流体計算 (CFD) により予測をおこなった。本シミュレーションは、PIV 法によって得られたガス供給を動力としたエアリフトによる培養液の体積力と藻の比重及びサイズ同等の粒子分散性を反映した培養槽全体の流れ場を予測するものである。

ガイド形状 (a), (b) のシミュレーション結果を Fig. 10 に示す。エアリフトによってかくはんガイド内の流速は

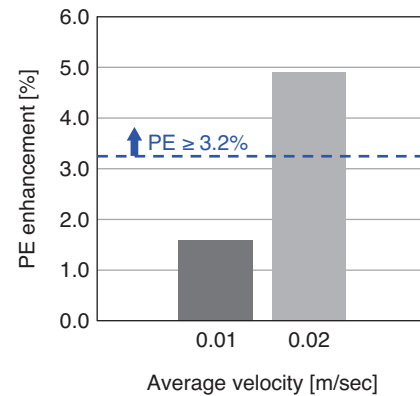


Fig. 8 Relationship between flow velocity and PE

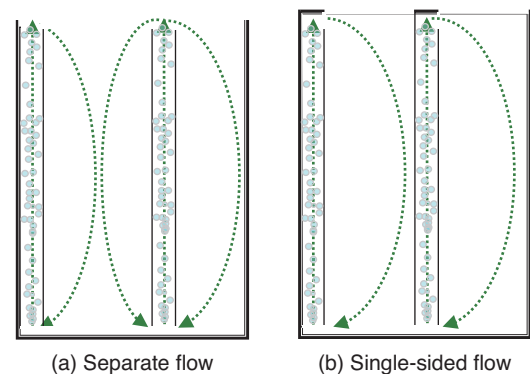


Fig. 9 Guide shape designs to make flows (a) and (b) in culture tank perpendicular to gas exhaust port

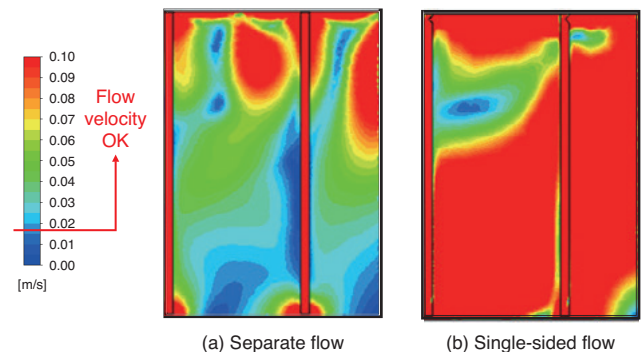


Fig. 10 Results of culture fluid flow simulations for guide shape effect

0.10 [m/sec] 以上となる。形状 (a) では、その流速が維持できる位置はかくはんガイドのガス吐出口周辺のみであり、培養パック底面周辺とガイド背面の流速は極めて低くなることが分かった。一方で、形状 (b) は培養パック全体で流速が維持できることが分かった。これは、かくはんガイドの水、ガス吐出口を一方向にしたことで、エアリフトによる流速が分散せず、減速することなくかくはんした結果と考えられる。以上の結果より、かくはんガイド形状は形状 (b) を採用した。

5. 培養槽構造の検討

5.1. 断熱層構造による温度保持

DREAMO の培養管理温度は 10 [°C] から 35 [°C] であることが明らかになっており、管理温度範囲内で制御可能な培養槽の構造について検討した。

フラットパネル式培養槽の培養液温度性能を Fig. 11 に示す。本試験は、夏季検証として国内の日射量、外気温が高い沖縄と冬季は氷点下に達する北関東で実施した。

夏季においては管理温度の上限値 35 [°C] 以下となることが確認された。一方で、低温側では管理温度との差が大きい。そこで、太陽エネルギーを活用して培養液温度を上げる装置構造を検討した。

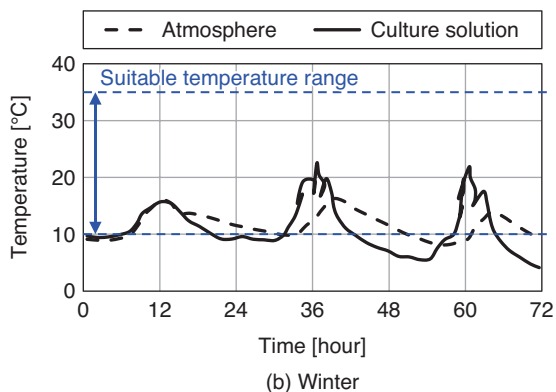
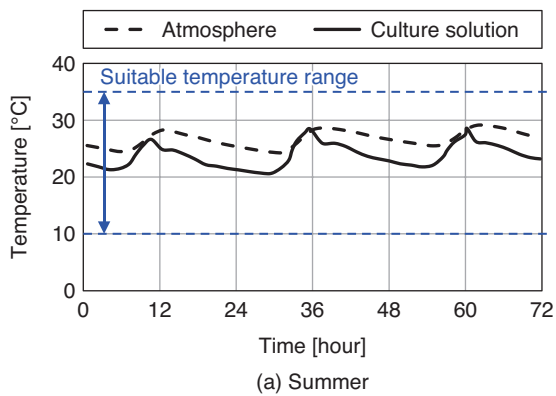


Fig. 11 Temperatures of culture tank culture solution and ambient air measured in summer and winter

手法は Fig. 12 に示すように培養槽周囲に断熱層を設け培養液温度を保持する構造とした。

断熱効果について、国立研究開発法人新エネルギー産業技術総合開発機構で開示される日射量⁽¹³⁾及び外気温⁽¹⁴⁾データを用い、培養液年間温度を算出⁽¹⁵⁾した。培養液温度の変化は、太陽エネルギーによる入熱量と各時間における空気、地面への放熱量を反映しておこなった。なお、外気への放熱率など一部係数は屋外に培養槽を設置し測定した数値を反映している。

年間予測培養液温度を Fig. 13 に示す。10 月から 3 月は断熱構造を付帯し、4 月から 9 月は断熱構造を取り外すことで、年間を通じて管理温度範囲に制御可能な見通しが得られた。

5.2. 入射光量を増大させた培養槽構造

光合成反応のエネルギー源である光の入射量を増大させる培養槽構造を検討した。

光量の要件は、目標とする DREAMO 生産量から算出した必要光量を 20 [mol/day] 以上と設定した。

太陽光エネルギーを DREAMO が受光するまでの入射経

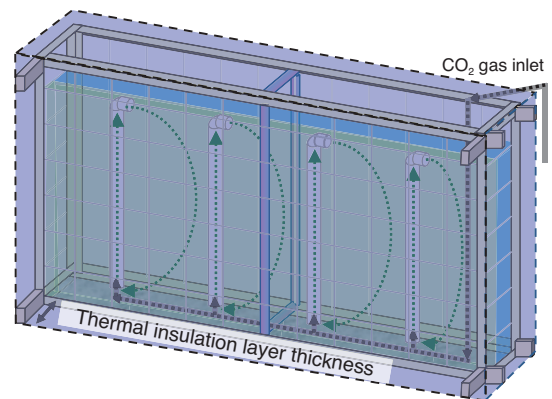


Fig. 12 Schematic representation of flat panel culture tank with heat insulating layer

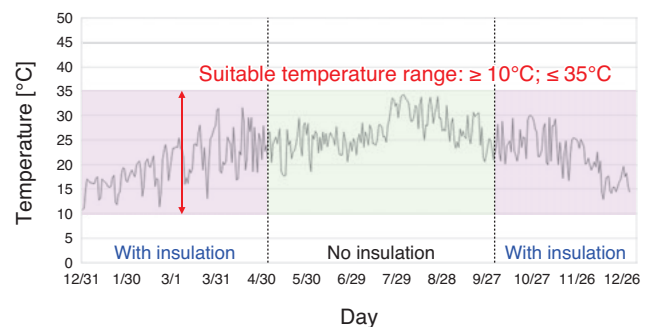


Fig. 13 Estimated annual temperatures of culture solution in North Kanto region with thermal insulation for winter period considered

路と光損失を Fig. 14 に示す。光量は培養槽を設置する面積と培養槽高さで決まる。また、各培養槽に均一な光を入射させるために、培養槽を等間隔（以下、離隔距離）で配置した。本検討では離隔距離一定を前提条件とした。検討構造案は Fig. 15 で示すように、培養槽にリフレクターを設

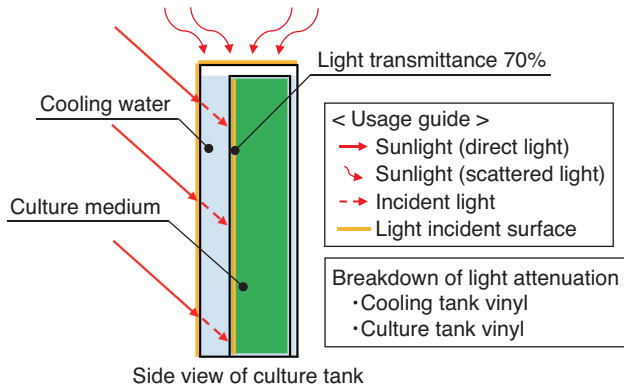


Fig. 14 Schematic representation of light loss caused by culture medium and culture tank structure

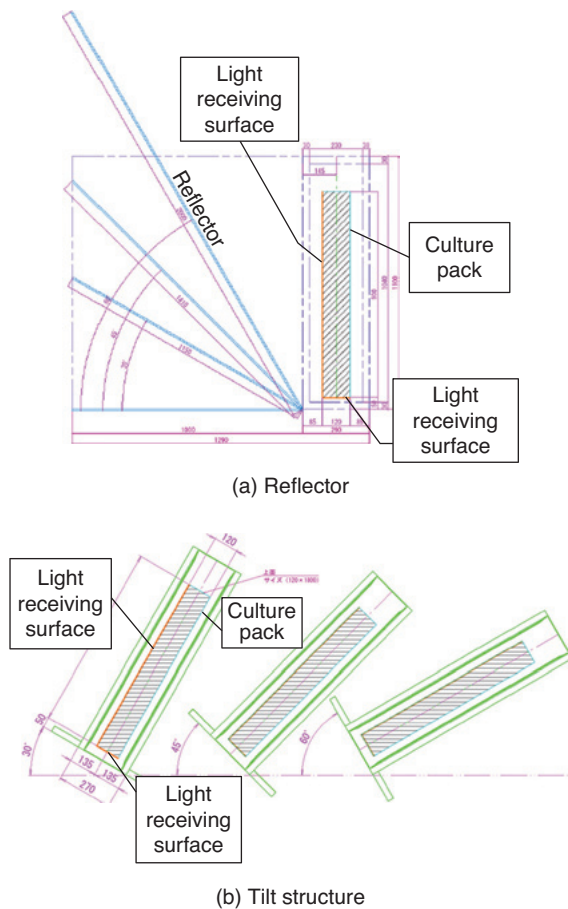


Fig. 15 Schematic representation of simulation models used for estimation of effects of (a) and (b) on flat panel photobioreactor

Table 4 Basic shape, light source, and incident light conditions for simulation model

Factor	Unit	Value
Simulation software	[-]	Zemax OpticStudio
Housing conditions		
Housing size	[mm]	L 1,800 × W 210 × H 1,000
Separation distance	[mm]	1,000
Light loss conditions		
Light transmittance	[%]	72.3
Solar conditions		
Light source	[Sun] (W/m ²)	1 (1,000)
Direct light	[%]	70
Scattered light	[%]	30

置する構造 (a) と培養槽を傾斜設置（以下、チルト）した構造 (b) の二案について検討をおこなった。

構造 (a) はリフレクターを培養槽前面（南面）に付帯し、離隔距離内に入射する光を反射によって培養槽へ入射させる構造である。構造 (b) は培養槽そのものをチルト化し培養槽への光取込効率向上を狙った構造となる。いずれの構造も角度水準 30 [°], 45 [°], 60 [°] とした。

培養槽構造ごとの光量検討は光シミュレーションによりおこなった。Zemax 社製の OpticStudio を用い、設置する培養槽に対して季節に応じた太陽高度及び日の出から日の入りまで 1 日当たりの時間変化による太陽軌道を反映し、培養パック表面に入射する光量を予測している。本検討におけるシミュレーション条件を Table 4 と Fig. 16 に示す。光源は太陽電池の性能評価規格で用いられる 1 Sun としている。なお、培養槽設置地域は栃木県宇都宮市を想定し太陽高度 / 方位は季節、時間影響⁽¹⁶⁾を反映した。

構造 (a), (b) について、実施したシミュレーション結果を Fig. 17 に示す。培養槽そのものに傾斜をつけて設置するチルト構造 45 [°] 条件が最も光量が得られ、目標である 20 [mol/day] を超えることが分かった。

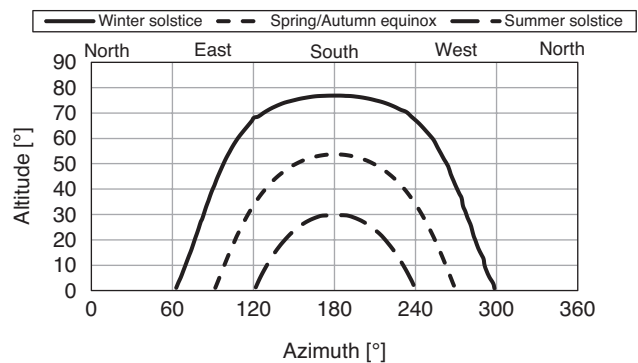


Fig. 16 Sun orientation and altitude used for optical simulations for spring and autumn, summer, and winter conditions

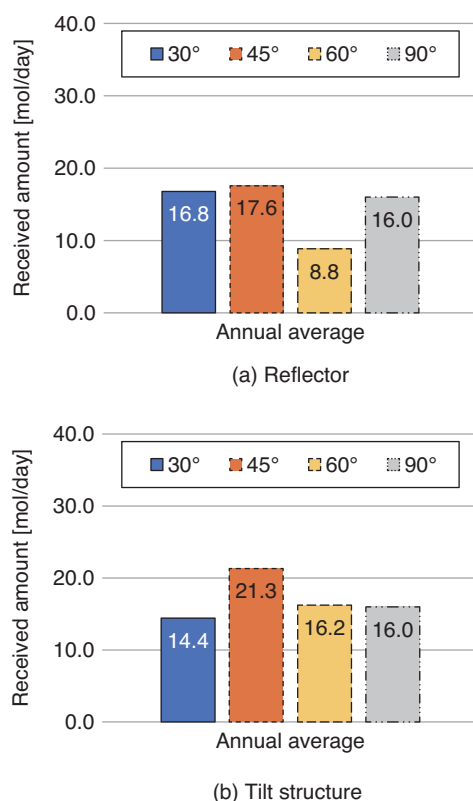


Fig. 17 Estimation of effects of (a) and (b) to enhance incident light on culture tank surface

6. DREAMO 生産量の向上結果

栄養塩成分濃度の適正化、培養液のかくはんガイド構造の検討結果を反映し、Fig. 18 のように DREAMO の屋外培養を栃木県にて実施した。本試験結果から算出した年間平均生産量 (a) および、断熱構造とチルト構造の効果を含めた場合の年間平均生産量の推定値 (b) を Fig. 19 に示す。設定した培養条件では、8.6 [g/m²/day] の生産量が得られた。さらに先述した検証結果より、培養槽の断熱層構造による培養管理温度の範囲にすることと、チルト構造



Fig. 18 Flat panel photobioreactors placed outdoors

による培養槽への光取込み量を増加させることで目標の 10.0 [g/m²/day] を上回る、13.5 [g/m²/day] の生産量が得られる見通しが立った。

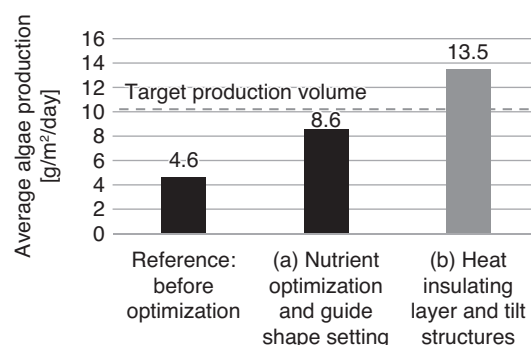


Fig. 19 Results of annual production of DREAMO estimated from outdoor experiments and public climate database

7. まとめ

屋外安定大量培養技術の構築を目的に、DREAMO とフラットパネル式培養槽を用いて、培養条件適正化と培養槽構造の適正化の検討をおこない以下の結果が得られた。

(1) 培養条件においては、栄養塩成分である P, K 濃度の適正化により生産量を向上させた。

また、培養液の流れ場流速を 0.02 [m/sec] 以上とし、一方向に液とガスを吐出するかくはんガイド形状を採用することで、効率を向上させ生産量を増加させた。

(2) 断熱層構造により、栃木県においても培養槽の温度が、年間を通じて管理範囲内に制御できることを検証した。このことにより DREAMO の成長が阻害されることなく培養できることを確認した。また、培養槽を 45 [°] チルト設置することにより、入射する光量を増大することができた。

以上の知見と培養槽構造を反映した屋外培養試験から生産量 13.5 [g/m²/day] の見通しが得られた。

DREAMO はカーボンニュートラル燃料であるサトウキビ由来のバイオエタノールと同等以上の作付面積当たりのエタノール生産量を達成する可能性が示された。

参考文献

- (1) 経済産業省: カーボンリサイクル技術ロードマップ, p. 2, (2019)
- (2) <https://www.intechopen.com/books/photosynthesis/bioenergy>
- (3) 中原剣, 尾張智美, 星野孝仁, 川原田雄希: 第 2 章 藻

- 類の産業利用の現状と展望, これからの藻類ビジネス, 情報機構, p. 106-203, (2020)
- (4) 特願 2011-538386
- (5) de Vree, J. H., Bosma, R., Janssen, M., Barbosa, M. J., Wijffels, R. H.: Comparison of four outdoor pilot-scale photobioreactors, *Biotechnology for Biofuels*, p. 6, (2015)
- (6) 特願 2018-523549
- (7) 福島のぞみ, 木下翔平, 町田賢司, 後藤稔, 塩崎諭, 土肥瑞穂: *Chlamydomonas* 変異株 (Honda DREAMO 株) の機能性と連続培養特性, *藻類*, 第 70 巻, 第 1 号, p. 72, (2022)
- (8) Gifuni, I., Olivieri, G., Pollio, A., Franco, T. T., Marzocchella, A.: Autotrophic starch production by *Chlamydomonas* species, *Journal of Applied Phycology*, Vol. 29, Issue 1, p. 105-114, (2017)
- (9) 中原剣, 尾張智美, 星野孝仁, 川原田雄希: 第 3 章 ビジネス応用に向けた藻類の培養と生産, これからの藻類ビジネス, 情報機構, p. 209-232, (2020)
- (10) 中原剣, 尾張智美, 星野孝仁, 川原田雄希: 第 3 章 ビジネス応用に向けた藻類の培養と生産, これからの藻類ビジネス, 情報機構, p. 280-287, (2020)
- (11) Brányiková, I., Maršáľková, B., Doucha, J., Brányik, T., Bišová, K., Zachleder, V., Vítová, M.: Microalgae—Novel Highly Efficient Starch Producers, *Biotechnology and Bioengineering*, Vol. 108, Issue 4, p. 766-776, (2010)
- (12) https://ecen.com/eee59/eee59e/sugarcane_the_best_alternative_for_converting_solar_and_fossil_energy_into_ethanol.htm
- (13) <https://appww2.infoc.nedo.go.jp/appww/index.html>
- (14) <https://appww2.infoc.nedo.go.jp/appww/metpv.html?p=41277>
- (15) D. ハリディ, R. レスニック, J. ウォーカー, 野崎光昭 監訳: 物理学の基礎 [2] 波・熱, 株式会社培風館, p. 121-133, (2002)
- (16) <http://k-ichikawa.blog.enjoy.jp/etc/HP/js/sunShineAngle/ssa.html>

■ 著 者 ■



木下 翔平



福島のぞみ



土肥 瑞穂



後藤 稔

リチウムイオン電池の内部状態を予測して劣化挙動を高精度に算出する Semi-Physical Model

Semi-physical Model that Predicts Internal State of Lithium-ion Batteries and Calculates Degradation Behavior with High Accuracy

富永 由 騎¹

Yuki TOMINAGA

加 我 正¹

Tadashi KAGA

大 道 馨¹

Kaoru OMICHI

西 本 有里佳¹

Yurika NISHIMOTO

要 旨

車載用リチウムイオン二次電池の長期間における耐久性を高精度に予測するため、リチウムイオン二次電池性能の性能発現メカニズムに基づいた劣化シミュレーションモデルを開発した。これまで、リチウムイオン二次電池の長期耐久性を担保するにはそれに相応する長期間のテストや設計値に予測精度の観点から大きなマージンが必要であった。本モデルの性能を算出するモデル部は劣化メカニズムに影響する物理量を説明変数に用いた Physical Model とし、各因子の劣化挙動は実験結果から学習する Empirical Model としたハイブリッド構造を有する Semi-Physical Model を提案した。その結果、耐久性の予測精度が向上し、長時間における性能劣化遷移の非線形挙動を表現できることを示した。しかし、その内部状態を解体解析によって取得する場合、モデル学習に多くの開発コストが必要となるため、本検討では学習コストの低減による適用性の向上も狙い、内部状態の測定はリチウムイオン二次電池を解体せずに電圧、電流データから算出するアプローチを選択した。これにより、設計に必要な余裕度を小さくし、利便性を向上することが可能になる。

ABSTRACT

A degradation simulation model based on the mechanism of lithium-ion rechargeable battery performance expression was developed in order to predict the long-term durability of on-board lithium-ion rechargeable batteries with high accuracy. Up to now, guaranteeing the long-term durability of lithium-ion rechargeable batteries required correspondingly long-term testing and design values with a large margin in terms of prediction accuracy. In the developed model, the model portion that calculates the battery performance was made into a physical model using the physical quantities that influence the degradation mechanism as explanatory variables, and the degradation behavior of each factor was made into an empirical model that is trained from the test results. The model with this hybrid structure was proposed as a semi-physical model. As a result of this, accuracy in predicting durability was increased, and a capability to represent the non-linear behavior of performance degradation transition over long periods of time was indicated. When the internal state of that model is to be acquired by disassembly analysis, however, model training incurs a high development cost. For this investigation, therefore, the approach of determining the internal state by calculation from voltage and current data was chosen rather than that of disassembling lithium-ion rechargeable batteries to measure their internal state. This choice was also intended to increase the applicability of the approach by reducing the training cost. In this way, it becomes possible to reduce the size of the extra margin necessary in design as well as to enhance convenience.

1. ま え が き

近年、リチウムイオン二次電池 (LiB) はエネルギー密度の高さから、脱カーボン社会に向けた電気自動車の動力源としてニーズが高まっている⁽¹⁾⁻⁽³⁾。車載用 LiB は 10 年以上の長期間にわたる耐久性能が求められる⁽¹⁾。LiB の長

期間における性能劣化遷移は時間や充放電回数のべき乗に対する直線挙動から屈曲する非線形な挙動を示すことがあり、その耐久性の見通しを正確に予測することが容易ではない (Fig. 1)^{(4),(5)}。LiB の性能劣化遷移が非線形を示す理由として、LiB の性能を発現させる複数の因子の経過時間に対する劣化挙動がそれぞれ異なるからと我々は考え

¹ 先進パワーユニット・エネルギー研究所

E-mail: yuki_tominaga@jp.honda

た^{(4),(6)}。一般的に、LiB の性能劣化は、取得したデータを用いて経験的 (Empirical) に外挿する手法や、温度や State of Charge (SOC) といった劣化因子の強度を上げて劣化挙動の確認時間を短縮する手法 (濃縮試験) を用いて予測している^{(7),(8)}。前者の場合、短い学習期間の教師データで学習した Empirical Model で長期間の予測をおこなうと、予測結果の信頼性が低下するリスクがある^{(3),(4),(9)}。また、後者の場合、複数ある LiB 性能の発現因子の劣化バランスが変わるため、単純な耐久時間の濃縮にはならず、劣化見通しの判断が容易ではないことをこれまでに示唆してきた⁽¹⁰⁾。これらのリスクに対応するため、長期の開発期間や耐久性の設計に大きな余裕代が必要な開発となっていた。

一方、それら課題を解決するために、物理現象 (Physical) に基づいた Physical Model が研究されている⁽¹¹⁾。しかし、下記二つの課題があり、純粋な Physical Model になっていない⁽⁹⁾。一つ目は、モデル学習には極板厚みや電解液の塩濃度など各種物性値が必要になる。そのため、LiB を設計、製造していないユーザはそれら情報の入手が難しく、モデルの作成が容易ではない。二つ目は、原理式は理想的な状態であり、現実の挙動とは合わないことが多い。そのため、モデル式はその差異を調整する補正係数を使い、各挙動を相似形で表現している。

そこで、我々は、LiB 性能の発現因子をもとに LiB 性能を算出するモデル部を Physical Model にし、それら発現因子の劣化挙動は実験結果から学習する Empirical Model にした Semi-Physical Model⁽⁴⁾を提案し、それら課題の解決を試みた。本論文では、以下 2 章で非線形な劣化挙動を表現可能にする劣化シミュレーションモデルについて、3 章でその学習方法と精度検証結果について、4 章で加温による濃縮試験におけるモデル技術を用いた考察について述べる。

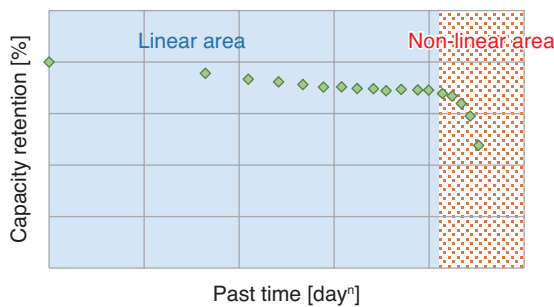


Fig. 1 Degradation transition into non-linearity

2. 劣化シミュレーションモデルの構築

2.1. 劣化モデルの狙いとコンセプト

Semi-Physical Model の構築手法について説明する。まず、LiB において使用する材料や設計値に依存しない性能

発現メカニズム部分を Physical Model 部として扱う。次に、使用する材料や設計値に依存する因子部分はテスト結果に基づいて数学的に学習する Empirical Model 部として扱う。Empirical Model の学習は、それら因子ごとに劣化原因となる負荷に対する変化挙動を耐久テストにより測定し、モデルを学習するための教師データとする。各因子の劣化挙動を経験的にモデル学習することで理論的、理想的な状態に合わない部分を補正可能にし、かつ、Physical Model で必要な各種物性値を必要としないため、Physical Model と比べて適用性を高めることが可能になる。加えて、LiB 性能の発現因子ごとに注目すると、それら因子は単一メカニズムであり、それぞれのセオリーに従った線形な劣化遷移を示す。例えば、負極活物質表面と電解液界面に生成される Solid Electrolyte Interphase (SEI) 被膜の成長挙動はルート則に則する⁽¹²⁾。従って、教師データより長期間の領域の予測は時間の平方根に直線を外挿をして推定しても誤差の小さい予測ができる。これらにより、時間や充放電回数に対して非線形な劣化挙動を表現可能にする。LiB 性能は複数因子の組合せで発現するため、一つの因子が劣化挙動を支配的に決定している場合は線形劣化を示す。しかし、その支配因子が別因子に切り替わる場合は非線形な劣化挙動になる。そのため、性能発現因子を個別にモデル化し、メカニズムに基づき因子を組み合わせて性能を算出すれば非線形な劣化挙動を表現できる。また、計算で劣化を仮想的に試算するため、テストと比較して時間の制約を無くした検討が可能になる。

モデル中の説明変数となる LiB 性能の発現因子の変化は解体解析により測定されることが一般的である。このような手法では、解体した時点で供試体の耐久テストはそれ以降おこなうことができない。従って、一つの劣化遷移挙動を学習するために複数の供試体を同じ条件で劣化させ、劣化進度の異なる供試体を作成する必要がある。この方法では教師データの取得に多くの供試体と解析が必要になる。そこで、本検討では、電池を解体せずに取得できる、電流、電圧データを用いて解析するアプローチで実施した。

2.2. シミュレーションモデルの構造

2.2.1. 定格容量モデル

本項では、容量の発現メカニズムを基にした定格容量モデルの構成を説明する。LiB の定格容量の発現メカニズムと算出の概念図を Fig. 2 に示す。図で示すように、定格容量は次の四つの説明変数が関係して発現している。この関係性に従えば定格容量を算出する⁽¹³⁾ことができる。

- (A) 正極 Ah-Open Circuit Potential (Ah-OCP) カーブ
- (B) 負極 Ah-OCP カーブ
- (C) $OCV_{\max}$ [V]
- (D) $OCV_{\min}$ [V]

つまり、定格容量の劣化は、これら (A)-(D) が変化する

ことで生じると定義できる。本検討ではこれら (A) - (D) の変化挙動を Empirical に学習させる。ただし、(C) は仕様で定められた電圧値で定義できるため、今回は定数として扱った。(D) は仕様で定められた電流値における、同様に仕様で定められた電圧値まで Constant Current 放電された際の Open Circuit Voltage (OCV) であり、LiB の内部抵抗の劣化に伴いその値は耐久中に変化するため、本検討では $OCV_{\min}$ は劣化に伴う LiB の内部抵抗の関数とした。 $OCV_{\min(t)}$ のモデル式は初期値 ($OCV_{\min(t_0)}$) からの変化量をセルで取得したインピーダンス (IMP) との相関が一番高い周波数の抵抗成分 ($R_{IMP(t)}$) を抽出し、式 (1) でモデル化した⁽¹³⁾。式 (1) 中の $R_{IMP(t)}$ は後述する内部抵抗モデルの算出結果によって与えられる。式中 d は実測した $OCV_{\min(t)}$ に式 (1) で合うように学習した補正係数である。

$$OCV_{\min(t)} = OCV_{\min(t_0)} + d \times R_{IMP(t)} \quad (1)$$

本検討では、Ah-OCP の Ah 軸は初期の 0% SOC 時を基準の 0 Ah として表現し、基準 Ah と表現する。これらより定格容量は下記の式 (2) の関係で表すことができる。

$$\begin{aligned} \text{定格容量}_{(t)} &= f(\text{正極 Ah-OCP カーブ}_{(t)}, \\ &\quad \text{負極 Ah-OCP カーブ}_{(t)}, OCV_{\max}, OCV_{\min(t)}) \quad (2) \end{aligned}$$

t 時点における定格容量_(t) は、同時点での正極の電気特性 (正極 Ah-OCP カーブ_(t)) と負極のそれ (負極 Ah-OCP カーブ_(t)) の組合せから LiB の Ah-OCV 特性が決まり、かつ、100% SOC 時の OCV ($OCV_{\max}$) と式 (1) で算出した 0% SOC 時の OCV ($OCV_{\min(t)}$) で LiB の定格容量として使用可能な Ah 範囲を算出する。

劣化に伴う (A) の変化は初期のそれに正極の容量維持率を乗じて基準 Ah 軸を変化させることで表現する。Ah-OCP カーブを変化させる際は耐久時のセル電圧に応じた正負極それぞれの電位の位置を基準 Ah 軸方向に固定し、Ah-OCP カーブ形状を基準 Ah 軸方向に変化させる (Fig. 3)。また、(B) は (A) と同様に負極の容量維持率による変化に加え、SEI 生成の副反応により、正極 Ah-OCP カーブに対し負極

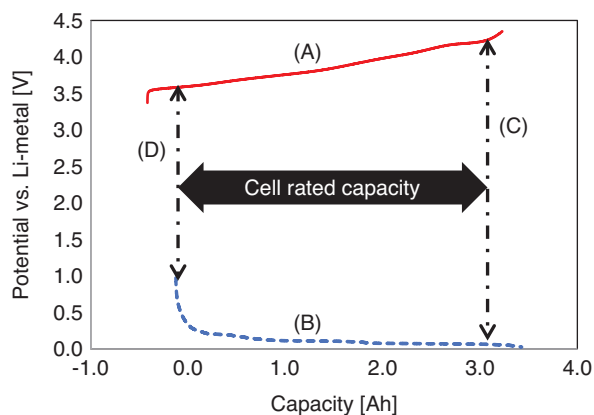


Fig. 2 Mechanism of capacity calculation

Ah-OCP カーブが高電位側にシフトするため (以降、負極 Ah シフト)、負極 Ah-OCP カーブを基準 Ah 軸に対し平行移動させることで、劣化後の (B) を表現した⁽⁴⁾ (Fig. 4)。

2.2.2. 内部抵抗モデル

本項では、内部抵抗の発現メカニズムを基にした定格容量モデルの構成を説明する。LiB の内部抵抗の発現メカニズムの概念図を Fig. 5 にセルの断面図にて示す。LiB の内部抵抗は複数成分が合成されて発現しており、通電することで、電子の移動 (i) (viii)、Li イオンの挿入脱離反応 (ii)

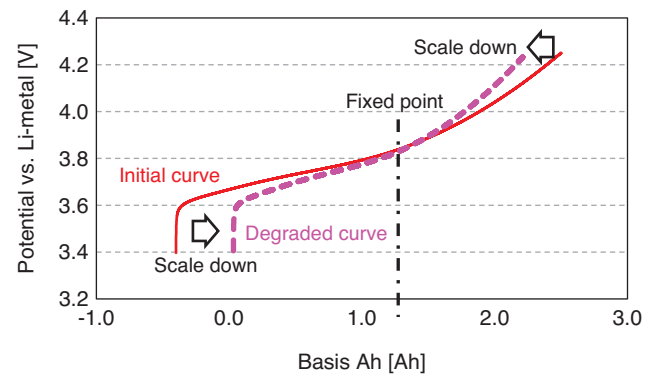


Fig. 3 Calculation of aging cathode curve

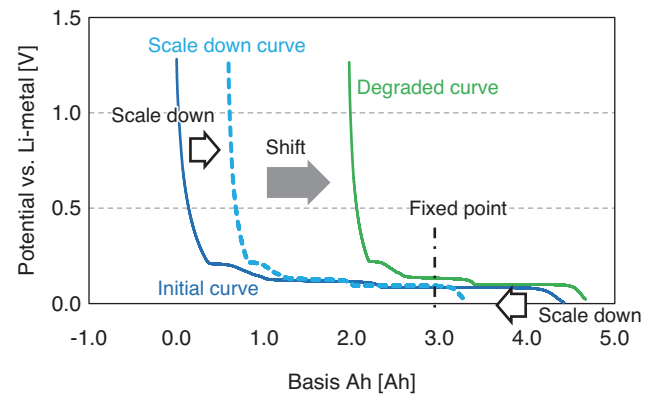


Fig. 4 Calculation of aging anode curve

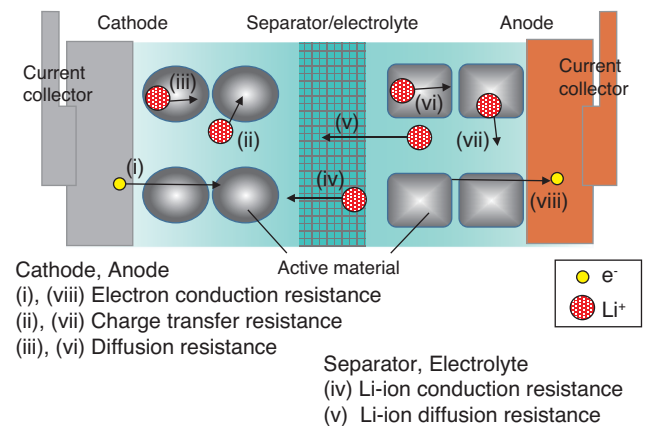


Fig. 5 Mechanism of internal resistance calculation

(vii), Li イオンの拡散移動 (iii)-(vi) の順でそれぞれに由来する内部抵抗が発生する。

本検討では Fig. 6 に示す等価回路で LiB の内部抵抗を表現し、次の六つを説明変数として扱った⁽¹⁴⁾。

- (R_0) 電子伝導抵抗とイオン伝導抵抗 [Ω]
- (R_1) 負極の反応抵抗の抵抗成分 [Ω]
- (CPE_1) 負極の反応抵抗の電気二重層成分
- (R_2) 正極の反応抵抗の抵抗成分 [Ω]
- (CPE_2) 正極の反応抵抗の電気二重層成分
- (CPE_3) 拡散抵抗

これら六つの成分で発現する抵抗の総和が LiB の内部抵抗となり、その劣化は 2.2.1. 項と同様、これら成分が変化することで生じる。六つの抵抗は通電時間に依存性を有し、それらは等価回路を用いた通電時間の関数で表現できるため、それら組合せによる LiB 全体の内部抵抗の算出を Physical に実施する。一方、説明変数となる各内部抵抗はテストにより取得した変化挙動を Empirical に学習させる。内部抵抗の成分ごとにモデル化した構造を有することで、劣化に伴う正負極の反応抵抗や拡散抵抗の時間依存性の変化を表現可能にし、より精度の高い内部抵抗推定を可能にした。

内部抵抗は一般的に電流 - 電圧 (I-V) 特性の傾きから算出する Direct Current Resistance (DCR) で評価されるため、本モデルは Fig. 6 の等価回路から DCR に変換して出力する。I-V 特性は、その評価方法の都合上、純粋な抵抗値だけではなく通電に伴う OCV の変化も計測される。そこで、本モデルにおいても電流の印加により発生する Closed Circuit Voltage (CCV) の算出には、過電圧に加え、通電した際の SOC の変化に伴う OCV の変化を加味した。先述した 2.2.1. 項の算出結果を用いることで、通電による電荷量の変化に伴う OCV の変化量 (ΔOCV) を算出し、内部抵抗による過電圧 (ΔV) との和 (ΔV_{total}) から I-V 特性を算出することで正確な DCR を算出した (Fig. 7)。また、内部抵抗による過電圧 (ΔV) は、Fig. 6 の等価回路から時間 (t) の関数として解くことで算出した [式 (3)]⁽¹³⁾。

$$CCV = OCV - I \times \left[R_0 + R_1 \times \left\{ 1 - \exp \left(\frac{-t}{R_1 \times C_1} \right) \right\} + R_2 \times \left\{ 1 - \exp \left(\frac{-t}{R_2 \times C_2} \right) \right\} + \frac{t^{CPE_3}}{CPE_{3-T} \times CPE_{3-p}} \right] + \Delta OCV \quad (3)$$

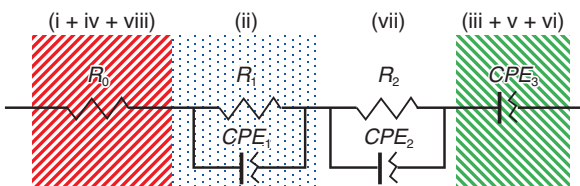


Fig. 6 Equivalent circuit of internal resistance

CPE は電気二重層容量を表す T 値とナイキスト線図の円弧の潰れ具合を表す p 値をもつため、 CPE_n ($n = 1 - 3$) のそれらを CPE_{n-T} , CPE_{n-p} で式中に示す。

電流印加に伴う電圧過渡応答を計算する際、Fig. 6 の等価回路で用いている CPE と R の並列回路では計算ができない。そこで、式 (4) を用いることで CPE_n とそれに並列接続されている抵抗成分の R_n を用いて C_n に変換して過渡応答計算を実施した。

$$C_n = CPE_{n-T} \frac{1}{CPE_{n-p}} \times R_n \frac{1 - CPE_{n-p}}{CPE_{n-p}} \quad (4)$$

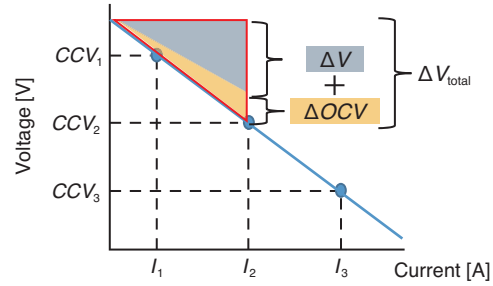


Fig. 7 How to calculate I-V characteristics

3. モデルの学習とシミュレーション結果

3.1. 学習方法

本章では、各モデルの Empirical Model 部の学習方法の概要を説明する。本検討では実験計画法をベースに単一因子実験法により劣化に影響する要因ごとに複数水準で耐久テストを実施し、教師データを取得した⁽¹⁵⁾。各説明変数に対応する劣化要因以外の負荷条件を一定にして耐久テストを実施した。本検討で想定した LiB の劣化要因を Table 1 に示す。

各モデルの説明変数を抽出する非解体による分析方法はそれぞれの項で後述する。取得した各説明変数の劣化挙動は下記の式 (5) と (6) を候補式としてフィッティングをおこない、当てはまりの良い方を選択した。

$$y = a \times x^b + c \quad (5)$$

$$y = a \times \ln(x) + c \quad (6)$$

この際、 a は耐久条件ごとに、 b は放置劣化条件と通電劣化条件でそれぞれ共通に一つの値をもつ定数として説明変数ごとに導出した。次に、導出した係数 a を劣化要因の数を次元数に持つ多次元面において曲面フィッティングをおこない、劣化係数マップを作成した。本検討では、モデル学習のための耐久テストは負荷を印加する耐久期間の 4 ヶ月と、その間の性能変化を測定に必要な 2 ヶ月の計 6 ヶ月を実施し、耐久開始時と耐久途中は耐久時間の 1 週目、2 週目、4 週目、以降 4 週刻みで計 8 回の性能測定を実施した。

Table 1 List of degradation factors

Factor	Degradation factor	
	Rated capacity	Degradation factor
Rated capacity	Cathode capacity	Temperature, Average cathode SOC, Cathode SOC width, Cathode current density (Charge, Discharge)
	Anode capacity, Ah shift	Temperature, Average anode SOC, Anode SOC width, Anode current density (Charge, Discharge)
Internal resistance	R_0	Temperature, Average cell voltage, Cell voltage width, Cell current density (Charge, Discharge)
	R_{1i}, CPE_{1i}	Temperature, Average anode SOC, Anode SOC width, Anode current density (Charge, Discharge)
	R_{2i}, CPE_{2i}	Temperature, Average cathode SOC, Cathode SOC width, Cathode current density (Charge, Discharge)
	CPE_3	Temperature, Average cell voltage, Cell voltage width, Cell current density (Charge, Discharge)

3.1.1. 定格容量モデルの説明変数の解析方法

本項では定格容量モデルに用いる各説明変数の解析方法について説明する⁽¹³⁾。2.2.1. 項にて先述した説明変数(A)-(D)を、電池を解体せずに取得するため、dV/dQ解析と充放電曲線解析を用いた。セルで取得したAh-dV/dQカーブから得られる負極由来のピーク(同図中矢印)位置が合う様に、あらかじめ同じ仕様のセルの初期品から切り出した負極板から取得したAh-dV/dQカーブをフィッティングすることで負極容量を抽出した(Fig. 8)。

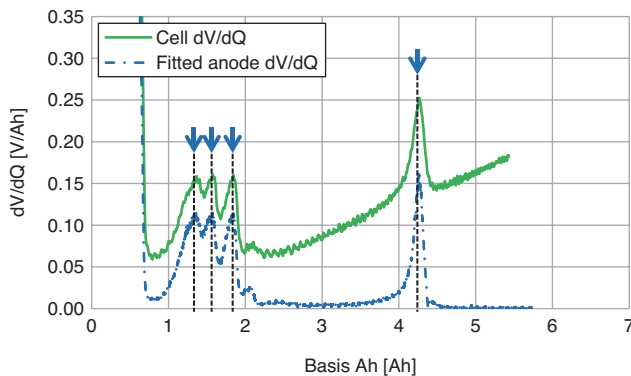


Fig. 8 Anode fitting

次に、セルで取得した充電カーブから Fig. 8 で定義した負極 Ah-Closed Circuit Potential (CCP) カーブを減じて、セル内の正極電位カーブを算出する。これに合う様に、負極同様、あらかじめ取得した正極の Ah-CCP カーブをフィッティングすることで正極容量を抽出した。Ahシフト量は上記で定めた正極と負極 Ah-CCP カーブを用いて、耐久前後の同じ電位における Ah 位置の変化量から抽出した。

3.1.2. 内部抵抗モデルの説明変数の解析方法

本項では内部抵抗モデルに用いる各説明変数の解析方法⁽¹⁴⁾について説明する。一般的に LiB の内部抵抗成分の分離手法には電気化学インピーダンス分光法 (EIS) が用いられるが、車載用 LiB の内部抵抗値は数 mΩ と非常に小さく、かつ、常温においては正負極の反応抵抗の発現周波数が非常に近いため、常温で取得した IMP データから正負極それぞれの反応抵抗を導出することは容易ではない。加えて、出力要求が大きく、出力時に流す電流レートや時間も大きいため、拡散抵抗成分は IMP を静的な状態で取得する EIS では出力時の動的な値を正確に取得することができない。そこで、本検討では伝導抵抗 (R_0) は常温の EIS による IMP 解析、各反応抵抗 ($R_{1i}, CPE_{1i}, R_{2i}, CPE_{2i}$) は低温 IMP 解析⁽¹⁶⁾、拡散抵抗 (CPE_3) は常温の I-V 特性評価時の電圧過渡応答データの解析と各抵抗成分の特性に合わせて取得する方法を用いて抽出した。各抵抗成分を同定するための回路は Fig. 6 に示す等価回路を用いた。CPE₃ は、各種 IMP 解析により同定した $R_0, R_{1i}, CPE_{1i}, R_{2i}, CPE_{2i}$ の値を設定した等価回路を用いて、電流印加に対する電圧の過渡応答に合う値を最小二乗法により導出した。

3.1.3. シミュレーション方法

シミュレーションフローを Fig. 9 に示す。負荷条件の

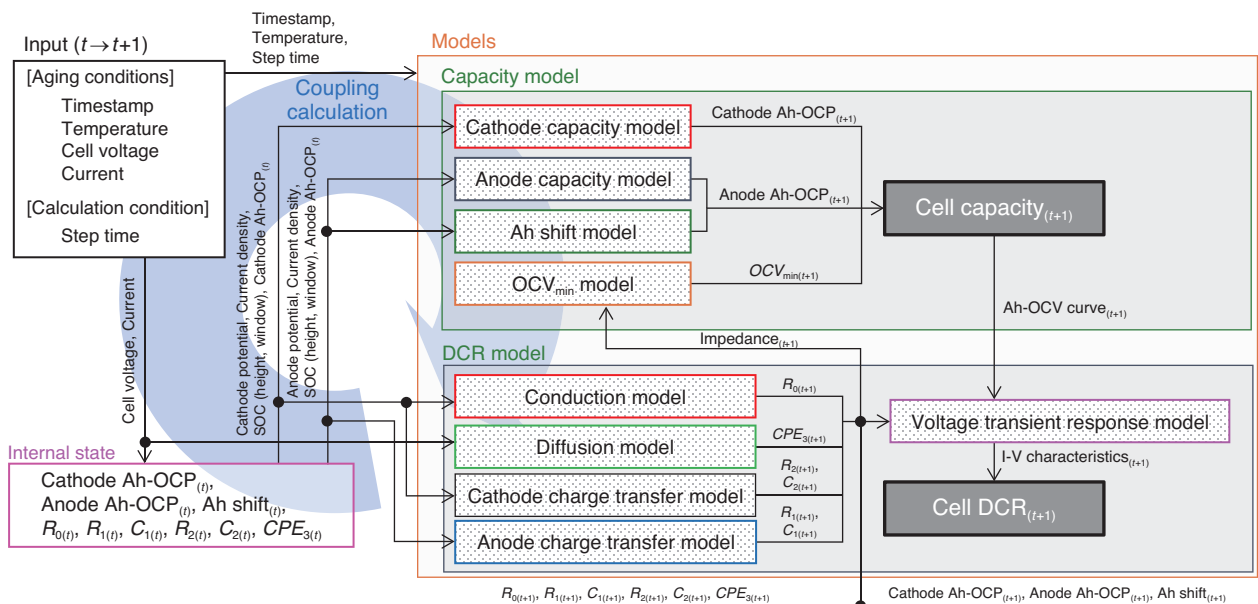


Fig. 9 Simulation flow

Table 2 Model formula and differential equation

	Model formula	Differential equation
n-th power type	$y = a \times x^b + c$	$\frac{dy}{dx} = \frac{a^{1/b} \times b}{(y-1)^{(1/b-1)}}$
Natural log type	$y = a \times \ln(x) + c$	$\frac{dy}{dx} = a \times e^{-(\frac{1-y}{a})}$

Time model : $x = \text{time}$
 Energization model: $x = \text{Ah}$

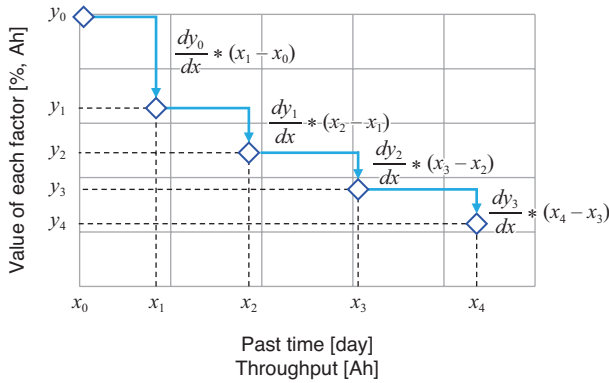


Fig. 10 Factor amount calculation method

電圧と電流は、その時点 (t) での LiB の内部状態から正負極それぞれに対する負荷に換算し、各モデル式へインプットする。また、各モデル式において算出された結果で内部状態の更新をおこない、次の時点 ($t+1$) の計算をおこなう。各モデルは、説明変数ごとに決定したモデル式に応じて定義できる単位期間あたりの変化量を算出する微分式 (Table 2) を用い、それに負荷条件により決定される係数 a を読み込むことで単位時間あたりの変化量を算出し、その結果を積分していくことで劣化挙動を算出する (Fig. 10) ⁽¹⁵⁾。

経時による劣化はシミュレーションで劣化積算するステップ期間でマイナー則を用いて、時間の加重平均により劣化係数と基準 SOC を、通電による劣化はそれぞれ抽出したパルス負荷に応じて劣化係数と基準 SOC を算出し、算出する単位区間あたりの変化量を積算した ⁽¹³⁾。

3.2. シミュレーション結果

3.2.1. 容量モデル

耐久テストにおける劣化推移の算出結果を Fig. 11 に示す。Empirical Model (本検討ではべき乗則モデルを用いて比較評価を実施) での劣化推定は耐久が進むにつれ実測結果から外れていくのに対し、本モデルの算出結果では耐久末期の劣化が非線形を示す領域においても、実測結果に則した算出ができています。

3.2.2. 内部抵抗モデル

3.2.1. 項と同様に劣化推移の算出結果を Fig. 12 に示す。容量モデルと同様、Empirical Model と比べ、耐久末期においても実測結果に則した算出ができています。

3.3. まとめ

検証結果から、本シミュレーションモデルが従来の Empirical Model では表現できなかった長期間の劣化遷移における非線形挙動の表現を可能にしたことを実証した。また、耐久条件の負荷を上げた条件において、劣化遷移の形状や LiB 内部の劣化状態が異なることを示すことができた。

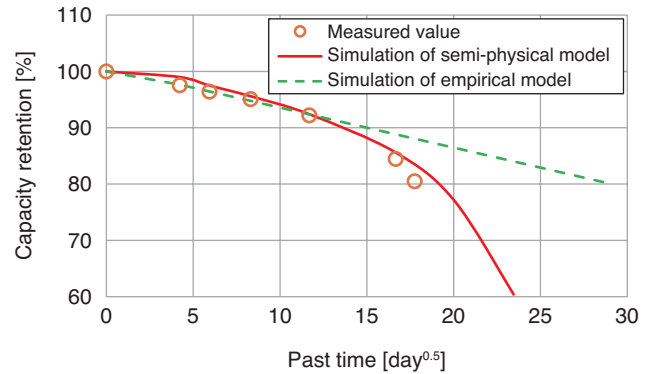


Fig. 11 Verification result of capacity model

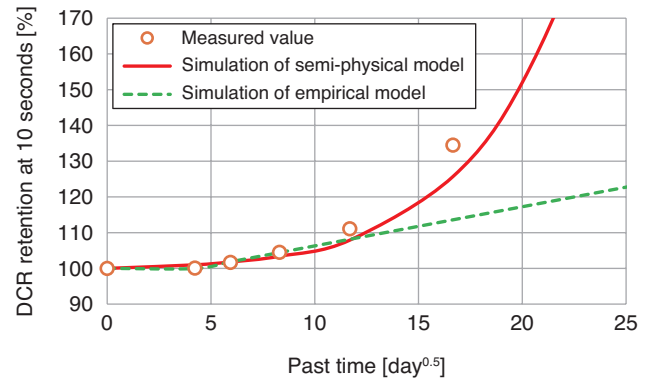


Fig. 12 Verification result of DCR model

4. 濃縮条件における内部劣化状態の表現

4.1. 容量モデル

濃縮試験による内部劣化状態の違いを確認するため、温度の負荷のみを変えてモデル試算した劣化挙動の比較を Fig. 13 に示す。劣化遷移を比較すると、高温条件での劣化挙動は容量維持率 85% 付近で屈曲するタイミング (図中矢印) が発生して非線形挙動を示しているのに対して、低温では屈曲するタイミングが発生せず線形挙動を示している。これは、加温による濃縮試験において同じ劣化形態ではないことを示唆している。両条件の容量維持率 60% 時点における各因子の劣化状態を Table 3 に示す。これより、

Table 3 Simulation result at capacity retention of 60%

	Aging condition	
	High temperature	Low temperature
Cathode capacity retention	85.2%	87.0%
Anode capacity retention	31.7%	59.6%
Ah shift value	0.11 Ah	0.09 Ah

容量維持率が同じでも、各因子の劣化量は異なり、温度が異なる両試験では劣化状態が同じではないことが分かる。これらの検討結果から、耐久負荷を上げた濃縮試験における、内部の劣化状態とそれに伴う劣化遷移形状が異なる挙動を本シミュレーション技術で表現が可能であることを示した。

4.2. 内部抵抗モデル

容量モデルと同様、濃縮試験による劣化挙動の違いの試算結果を Fig. 14, Table 4 に示す。内部抵抗の劣化挙動においては両条件で劣化遷移の屈曲が発生したが、その発生するタイミング (DCR 維持率値) が異なる挙動が算出された (Fig. 14 中矢印)。両条件の DCR 維持率 150% 時点にお

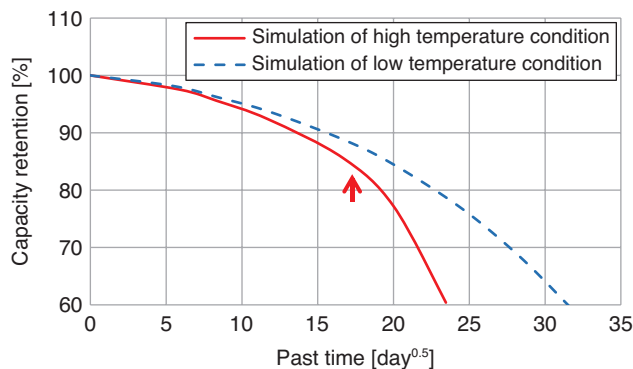


Fig. 13 Difference in capacity degradation behavior due to acceleration test

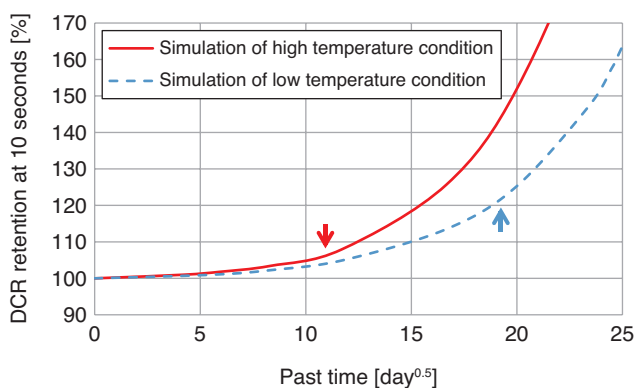


Fig. 14 Difference in capacity degradation behavior due to acceleration test

Table 4 Simulation result at DCR retention of 150%

	Aging condition	
	High temperature	Low temperature
Ohmic resistance retention	100.0%	100.0%
Cathode's reaction resistance retention	111.0%	117.7%
Anode's reaction resistance retention	211.0%	179.9%
Diffusion resistance retention	181.9%	273.7%

ける各因子の劣化状態を Table 4 に示す。これより、容量モデル同様、DCR 維持率が同じでも温度が異なる両試験では劣化状態が同じではないことが分かる。

この結果から、内部抵抗においても濃縮条件では劣化挙動 (Fig. 14) と劣化後の内部状態 (Table 4) に違いがあり、本シミュレーション技術ではそれが可能であることを示した。

5. 結言

性能発現メカニズムに基づいた Physical な構造と、テストにより実測したデータから学習する Empirical な構造を持つ Semi-Physical Model の構築により、長期間の劣化挙動を、一般的な Empirical Model であるべき乗則モデルと比べ、高精度に予測可能にした。加えて、負荷を上げた濃縮試験では実現が容易ではなかった、劣化遷移の表現や、内部劣化状態の把握ができるため、耐久性能評価に活用できる手法であることを示唆できた。本技術の活用により、新規 LiB 開発において、精度良く耐久性の見通し判断をおこなうことができ、加えて、耐久性設計の余裕代を確保するため、これまで電圧や電流、温度の使用範囲に大きな制限を設けていたが、本技術によりこの制限を減らすことで電気自動車の走行可能距離の拡大や加速性能といった利便性の向上が期待できる。また、この技術は開発時の利用だけでなく中古車市場やリユース市場において、LiB の長期間の余寿命推定だけでなく、内部劣化状態の違いを加味した寿命予測による用途とのマッチングなど、視点を変えた残価値診断にも応用できる。本技術は、電動自動車の普及や LiB のリユース活用をサポートすることができるツールとして期待できる。

参考文献

- (1) (独) 新エネルギー・産業技術総合開発機構: 二次電池技術開発ロードマップ 2013, (2013)
- (2) 富士経済: エネルギー・大型二次電池・材料の将来展望 2021- 電動自動車・車載電池分野編 -, (2021)
- (3) 経済産業省: 第 1 回 蓄電池産業戦略検討官民協議会, 資料 3 蓄電池産業の現状と課題について, (2021)
- (4) 富永由騎, 千葉裕, 三木雅信: 性能発現メカニズムに基づいたバッテリー性能の容量劣化推定モデルの構築,

- 第 58 回電池討論会, 2I14, p. 566, (2017)
- (5) 本藏耕平: リチウムイオン電池の劣化予測に向けた放電曲線の数理モデル構築, 九州大学大学院工学府博士論文, (2015)
- (6) 銭朴, 木下智博, 酒井洋, 古田照実, 川合光幹: 高出力用リチウムイオン二次電池の容量劣化解析, Honda R&D Technical Review, Vol. 30, No. 2, p. 89-98
- (7) 加地健太郎, 田中謙司, 秋元博路, 張静, 今村大地: リチウムイオン電池の劣化のモデル化に関する研究—劣化加速試験一年経過時点における報告—, 自動車技術会論文集, Vol. 44, No. 2, p. 429-434, (2013)
- (8) Park, J., Appiah, W. A., Byun, S., Jin, D., Ryou, M.-H., Lee, Y. M.: Semi-empirical long-term cycle life model coupled with an electrolyte depletion function for large-format graphite/LiFePO₄ lithium-ion batteries, Journal of Power Sources, Vol. 365, p. 257-265, (2017)
- (9) 銭朴, 遠藤広考, 古田照実, 川合光幹: リチウムイオン二次電池のカレンダー劣化モデル開発, Honda R&D Technical Review, Vol. 31, No. 1, p. 94-101
- (10) 富永由騎, 川村雅之, 武政幸一郎: 内部劣化状態を加味した容量劣化推定モデルの構築, 第 54 回電池討論会, 2B06, p. 101, (2013)
- (11) 山上達也, 高岸洋一: Li イオン二次電池における充放電 Li 輸送と劣化現象のモデル解析, R&D 神戸製鋼技報, Vol. 64, No. 2, p. 99-104, (2014)
- (12) Ploehn, H. J., Ramadass, P., White, R. E.: Solvent Diffusion Model for Aging of Lithium-Ion Battery Cells, Journal of The Electrochemical Society, Vol. 151, No. 3, A456-A462, (2004)
- (13) 加我正, 荒井洸, 堀満央, 富永由騎: 性能発現メカニズムに基づいたバッテリー性能の容量劣化推定モデル構築 第二報, 第 61 回電池討論会, 3A01, (2020)
- (14) 西本有里佳, 大道馨, 荒井洸, 富永由騎: 性能発現メカニズムに基づいたバッテリー性能の抵抗劣化推定モデルの構築, 第 61 回電池討論会, 3A02, (2020)
- (15) 富永由騎: 電気性能発現メカニズムに基づいたリチウムイオン電池性能の劣化推定モデルの構築, 電気化学, 第 89 巻, 2 号, p. 125-132, (2021)
- (16) Momma, T., Matsunaga, M., Mukoyama, D., Osaka, T.: Ac impedance analysis of lithium ion battery under temperature control, Journal of Power Sources, Vol. 216, p. 304-307, (2012)

■著 者■



富永由騎



大道馨



加我正



西本有里佳

アルミニウム鋳物合金の熱伝導率に及ぼす 熱処理条件の研究

Study of Heat Treatment Conditions that Impact Thermal Conductivity of Aluminum Casting Alloy

上 田 順 一¹
Junichi UEDA

家 永 裕 一²
Yuichi IENAGA

須 藤 建 次¹
Kenji SUTO

要 旨

アルミニウム鋳物合金製の部品に要求される機械的特性を達成した上で、熱伝導率を高める熱処理条件を設定するアプローチを研究した。シリンダヘッドの材料として使用されるアルミニウム鋳物合金 AC4B において、アルミニウム金属マトリクスに固溶して熱伝導を阻害する溶質原子の挙動に着目することで熱伝導率を高める熱処理条件を検証した。本研究は熱処理型アルミニウム合金全般への応用性があり、放熱特性の要求が高いアルミニウム合金製部品への展開が可能である。また、熱伝導率と電気伝導率の密接な関係から熱伝導率の簡便な代替測定方法の可能性を示した。

ABSTRACT

An approach was studied that sets the heat treatment conditions to increase thermal conductivity after achieving the mechanical properties demanded of aluminum casting alloy parts. The heat treatment conditions that increase thermal conductivity were verified by focusing on the behavior of solute atoms that solid solute in the aluminum metal matrix and obstruct thermal conduction in AC4B, an aluminum casting alloy used as a material for cylinder heads. This study is applicable to heat treatment type aluminum alloy in general, and can also be expanded to aluminum alloy parts with high demand for heat dissipation properties. In addition, the close relationship between thermal conductivity and electrical conductivity indicated the potential for a simple alternative method of measuring thermal conductivity.

1. はじめに

アルミニウム合金の熱処理仕様が熱伝導に影響することとは知られており、Table 1 にアルミニウム展伸材における熱処理の質別と熱伝導率について示す⁽¹⁾。熱伝導率はアルミニウム金属マトリクスに固溶する溶質原子の量(固溶量)に影響を受ける。固溶する溶質原子が室温時効の析出のみで消費され、残存する固溶量の多い T4 処理は最も熱伝導率が低い。T6 処理では後述する人工時効処理で溶質原子が更に消費されて熱伝導率が回復し、O 材ではほとんどの溶質原子が粗大な析出物に消費されて最も高い値となる。Cu 系の析出物で強化される代表的な 2000 系合金と、Mg₂Si の析出物で強化される代表的な 6000 系合金は同様な傾向にあり、熱伝導率は溶質原子の種類にかかわらず残存する溶質原子の固溶量に影響を受ける結果となっている。一方、アルミニウム合金の熱処理条件は材料強度の設

Table 1 Thermal conductivity of aluminum alloy with various temper designations

Alloy	Temper designation	Thermal conductivity (20°C) kW/(m·°C)
2014	T4	0.13
	T6	0.15
	O	0.19
2024	T3, T4	0.12
	T6, T81	0.15
	O	0.19
6061	T4	0.15
	T6	0.17
	O	0.18
6051	T4	0.16
	T6	0.17
	O	0.20

¹ ソリューションシステム開発センター

² ソリューションシステム開発センター、博士(工学)

定が主であり、特にリサイクル材で作られる鋳物用のアルミニウム合金では熱伝導率への影響の詳細に関しては言及されていなかった。内燃機関などの放熱性能が要求されるパワーユニットではアルミニウム鋳物合金製の部品が多く使われている。小型化が進むことで熱的負荷が増加する傾向にあるため、アルミニウム鋳物合金の熱伝導は今後の部品開発を考える上で重要な機能要素になると考える。

2. 目的

熱伝導率に対する熱処理の影響を知るためには、アルミニウム合金における溶質原子の固溶と析出の挙動を理解する必要がある。本研究では乗用車、二輪車、船外機用エンジンのシリンダヘッドに用いられる AC4B 合金について、要求される材料特性を達成した上で熱伝導率を高める熱処理条件設定のアプローチを探る。また、他のアルミニウム合金も含めて熱伝導率のコントロールに関する考え方を提言する。

3. 熱伝導率を高める熱処理条件

3.1. 熱処理における溶質原子の固溶と析出の挙動

まず、アルミニウム合金の材料強度を引き出す熱処理で起こる溶質原子の固溶と析出の概略を説明する。Fig. 1 はアルミニウム合金に施す代表的な T6 や T7⁽¹⁾ の熱処理パターンを示す。溶体化処理温度に保つことで溶質原子をマトリクス中に固溶させ、水焼入れなどで急冷することで溶質原子を過飽和な状態にすることを溶体化処理と言う。その後、時効処理温度に保つことで過飽和な溶質原子を人工的に析出させ、金属マトリクスの転位移動を阻害させることで金属の変形挙動を抑制して材料強度を向上させることを人工時効処理（以下、時効処理）と言う。

Fig. 2 に Fig. 1 の処理過程 (a), (b), (c) におけるアルミニウム金属マトリクス中での溶質原子の各状態を模式図で示す。Fig. 2 の (a) はアルミニウム合金の鋳造素材におい

て遅い凝固速度のために初期に形成された粗大な析出物を単純化したモデルである。(b) は溶体化処理によって溶質原子がマトリクス中に固溶していく状態で、(c) は時効処理によって溶質原子が材料強度向上に寄与する析出物として形成される状態である。

溶質原子の移動と析出によって起こる時効硬化特性は、溶体化保持時間によって変わる溶質原子の固溶量の影響を受けず、溶体化処理温度に基づいてマトリクス中に形成される原子空孔濃度に影響されることが知られている⁽²⁾。式 (1) は原子空孔濃度 C_v を表す^{(3), (4)}。 A は定数 (2 から 5), H_F は原子空孔形成エネルギー, k はボルツマン定数, T は絶対温度である。

$$C_v = A \cdot \exp[-H_F/(k \cdot T)] \quad (1)$$

原子空孔濃度は温度の関数であるために溶体化処理の保持温度で決まり、その空孔は水焼入れによってマトリクス中に凍結される。Fig. 3 は溶質原子が原子空孔によって移動する様子を模式図で示したものである。原子の移動に関しては原子空孔を介することでエネルギー障壁が低くなるため、アルミニウム原子や溶質原子が単位時間あたりに移動する量は原子空孔濃度に依存することになる⁽⁵⁾。

ここで時効硬化特性が溶体化処理温度に基づいてマトリ

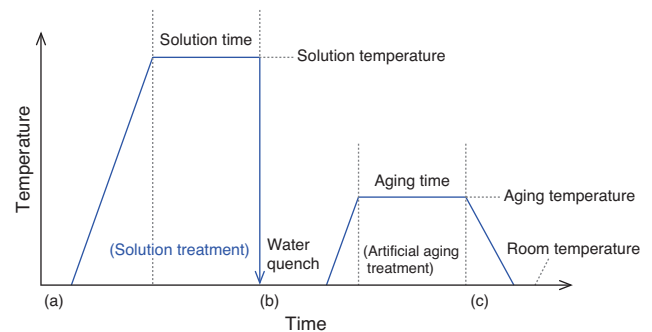


Fig. 1 Typical pattern of T6 and T7 heat treatments for aluminum alloy

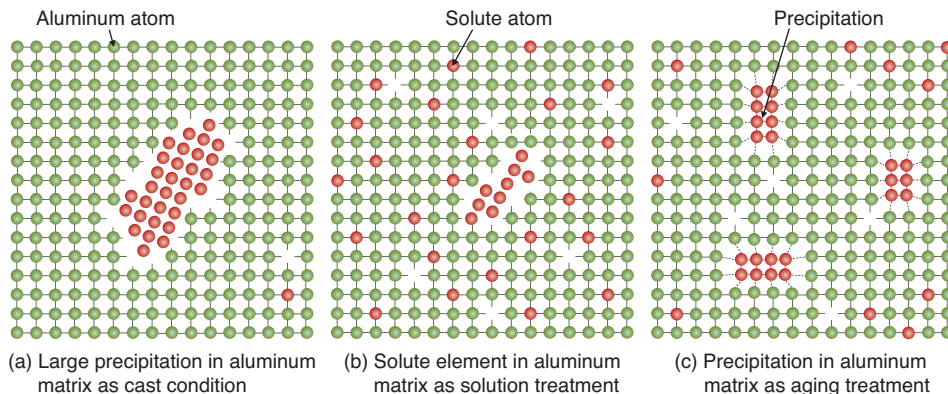


Fig. 2 Diagram of solid solution and precipitation in aluminum alloy

クス中に形成される原子空孔濃度のみに依存し、溶体化保持時間で決まる溶質原子の固溶量に依存しないことを検証する。Fig. 4 はキャストホイールに使われる AC4CH 合金における溶体化保持時間と機械的特性の関係を示す。溶体化処理温度は 540℃ で、時効処理条件は 140℃ × 150 分間で統一した。AC4CH 合金の析出硬化は Mg_2Si の析出物による。溶体化保持時間が長いほど溶質原子の固溶が増加するが、溶体化保持時間を延ばしても機械的特性への影響が少ない。これは時効硬化特性が溶体化処理温度で決まる原子空孔濃度に影響されることを示す。Fig. 5 は Fig. 4 と同じ熱処理条件での溶体化保持時間と伸びの関係

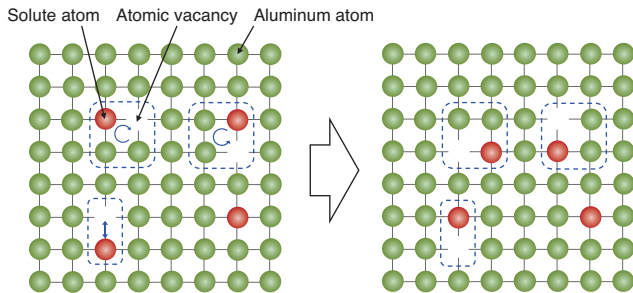


Fig. 3 Diagram of atomic vacancy and atomic diffusion

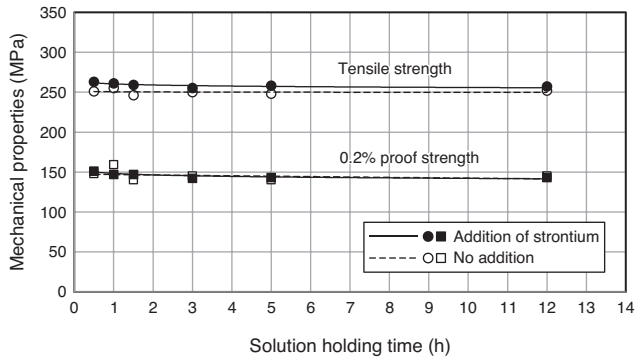


Fig. 4 Effect of solution temperature holding time on mechanical properties of AC4CH-T6

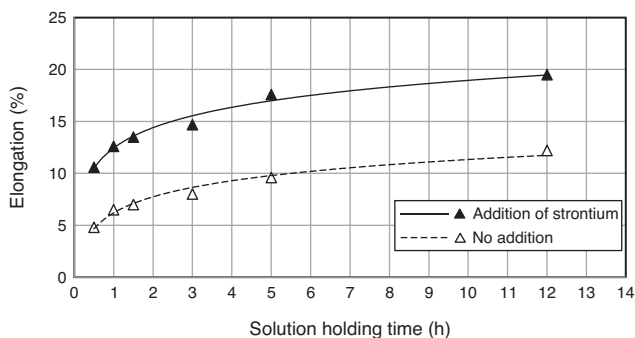


Fig. 5 Effect of solution temperature holding time on elongation of AC4CH-T6

Table 2 Chemical composition of AC4B alloy test sample

	(wt%)					
	Si	Cu	Mg	Fe	Zn	Mn
AC4B sample	8.2	2.7	0.34	0.76	0.67	0.24

を示す。溶体化保持時間と共に伸びが向上するのは、共晶 Si の球状化が進んで亀裂伝播速度が遅くなることが要因である。なお、キャストホイールにおける Sr 添加は共晶 Si を微細にして伸び特性を安定化させ、求められる衝撃吸収特性を保証することが目的である。キャストホイール用の材料では、部品要求特性上で重要な伸び値を保証できる範囲内で溶体化保持時間を短縮することにより生産効率の向上が図れるため、Sr 添加は有効な手法として使われている。

3.2. AC4B 合金の時効硬化特性と熱伝導率

シリンダヘッドの材料として、鋳造性や機械的特性および高温特性のバランスに優れたアルミニウム鋳物用 AC4B 合金が広く使われている。Table 2 に本研究における供試材 AC4B 合金の組成を示す。

Fig. 6 は 500℃ × 360 分間の溶体化処理をおこなった AC4B 合金の時効処理温度による時効硬化特性を示す。溶体化処理から時効処理の間にかかる室温時効の影響を排除するために、水冷による溶体化処理直後から時効処理炉に投入までの間は全ての試験片を -20℃ で保管した。また時効処理では温度が一定に保持されるように熱風循環型の乾燥炉を使用した。AC4B 合金の主たる析出硬化は Cu 系の析出物による。

150℃ から 180℃ の時効では、GP (1) ゾーンと呼ばれる準安定な析出物による HRB 60 程度の硬度から GP (2) ゾーンと呼ばれる中間相の形成によって硬度が上昇する⁽⁶⁾⁻⁽⁹⁾。200℃ から 235℃ の時効では、初期段階から中間相の析出による硬化が進むことで HRB 75 程度の硬度とな

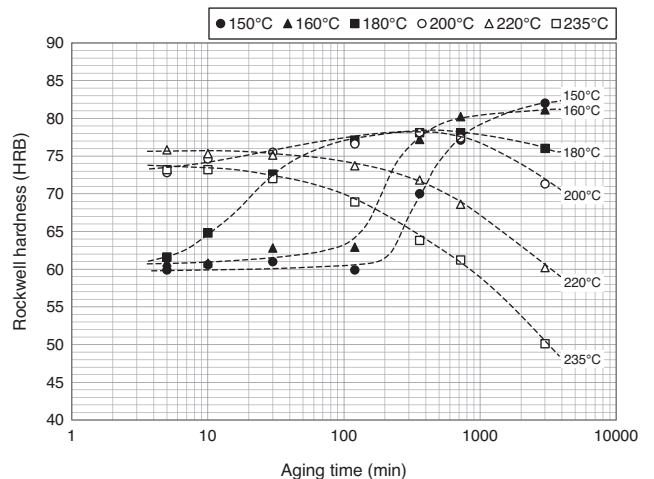


Fig. 6 Aging curve of AC4B alloy

り、時効時間が長くなると中間相が粗大化して安定相となり軟化が起こる。

ここで固溶している溶質原子が時効析出で消費される過程で熱伝導率がどのように変化するかを検証する。Fig. 7 は Fig. 6 と同じ条件で溶体化処理をおこない、時効硬化特性が異なる 160℃、180℃、220℃ での時効時間と熱伝導率の変化を示す。熱伝導率 λ は、レーザーフラッシュ法によって熱拡散率 α を測定し、室温での密度 ρ と DSC 法で測定した比熱 C_p を乗じて算出した。式 (2) に熱伝導率 λ を示す。

$$\lambda = \rho \cdot \alpha \cdot C_p \quad (2)$$

λ : 熱伝導率 [W/(m·K)]

ρ : 密度 [g/cm³]

α : 熱拡散率 [m²/s]

C_p : 比熱 [J/(g·K)]

時間と共に固溶している溶質原子が析出に消費され、それによって熱伝導率が向上していくことが確認された。時効温度が高いほど析出はより速く進み、溶質原子が多く消費されて熱伝導率が高くなる傾向がある。また、硬度が低下する過時効領域においても熱伝導率が向上し続けていることから、残存する溶質原子が熱伝導を阻害していると推定される。

3.3. AC4B 合金の熱伝導率を高める熱処理条件設定

ここで残存する固溶量を少なくして熱伝導率を高める条件設定へのアプローチを検証する。Fig. 8 は AC4B 合金の 200℃ の時効硬化特性に与える 500℃ の溶体化保持時間の影響を示す。200℃ の時効硬化特性は観察時間の中で硬度が上昇する亜時効領域と硬度が低下する過時効領域を有し、変化が分かり易い条件として選定した。硬度が上昇する亜時効の領域において、溶体化保持時間が 10 分間、180

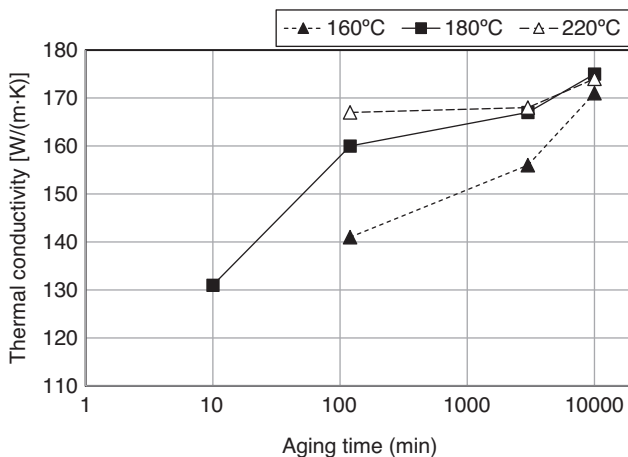


Fig. 7 Thermal conductivity with various aging treatments

分間、360 分間で硬度に差は認められなかった。耐力と密接な相関性がある硬さに差が無いことより、Fig. 4 において AC4CH 合金の機械的特性に対して溶体化保持時間が影響を及ぼさない結果と同様な状況であることが確認された。硬度が低下する過時効の領域で、溶体化保持時間 10 分間のものが 180 分間と 360 分間に対して硬度が低いのは、固溶量が少ないために析出に必要となる溶質原子が枯渇したためと考えられる。

Fig. 9 は 500℃ でそれぞれ 10 分間、180 分間、360 分間保持して溶体化処理をおこなった直後のものと、その後に 200℃ × 120 分間の時効処理を加えて硬度が等しいもので熱伝導率を測定した結果を示す。溶体化直後の固溶量が室温時効で減少しないように全ての試験片を -20℃ で保管した。更に溶体化処理直後の状態を測定する試験片は、熱伝導率の測定までの間に室温時効によって固溶した溶質原子が消費されることを防ぐために、-20℃ での保管に加えて

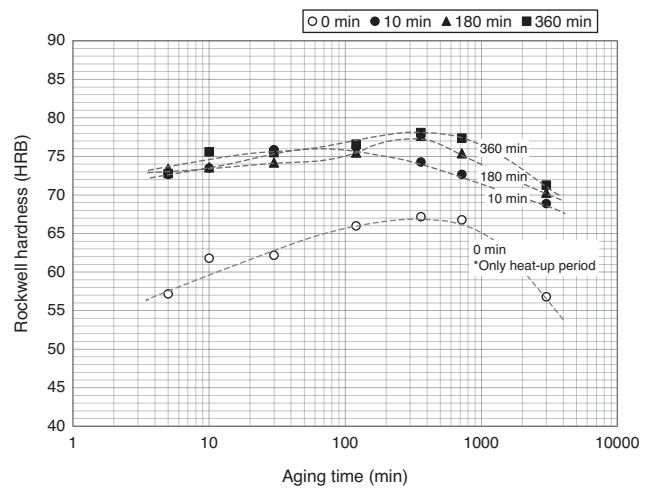


Fig. 8 200°C aging curve of AC4B alloy with various solution holding times

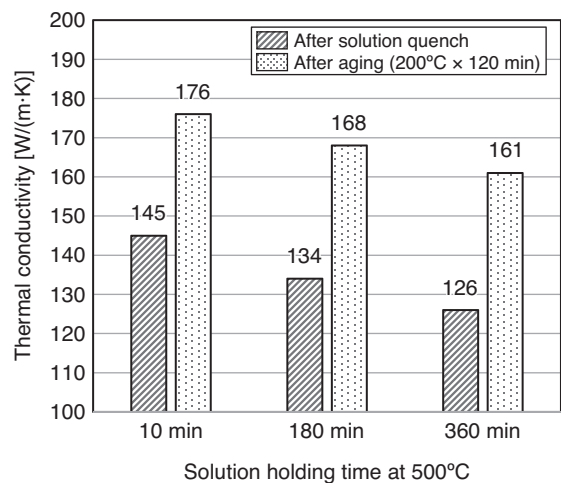


Fig. 9 Thermal conductivity with various solution holding times

100℃の炉へ10分間投入して常温より高い温度にさらし、室温時効の進展を防ぐ処理を施した。

溶体化処理直後では溶体化保持時間の増加に従って熱伝導率は低下し、溶質原子の固溶量が増加していることが分かる。200℃×120分間の時効処理後では時効処理で溶質原子が消費されて、それぞれ熱伝導率が回復しているが、時効処理後も溶体化保持時間が長いほど熱伝導率が低いことから、溶体化保持時間が長いほど残存する溶質原子の固溶量が多いことが想定される。このことから時効処理で消費される量を超えて固溶された溶質原子は時効処理後も残存して熱伝導を阻害する要因になると考えられる。

従って、要求される材料特性を達成した上で熱伝導率を高めるためには、時効処理後に残存する溶質原子の固溶量を低減する必要がある、そのためには時効析出に必要十分な固溶量になるよう溶体化処理条件を設定することが重要となる。Fig. 8のように定められた時効条件で溶体化保持時間を変えた検証をおこなうことにより、時効析出に必要十分な溶質原子の固溶量を把握することができる。部品から切出した試験片で検証できるこのようなアプローチは熱伝導率を高める溶体化処理条件の設定において有効である。

4. 考察

4.1. 他合金系への応用

ここでCu系析出物によって析出硬化するAC4B合金と同様に、Mg₂Siの析出で強化するAl-Si-Mg系合金においても熱伝導率を高める熱処理条件設定の考え方が当てはまるのかを検証する。Fig. 10はAC4CHと同じように耐衝撃性が求められるAl-5%Si-0.3%Mgアルミニウム鋳物合金において、標準的な535℃と500℃で溶体化処理をおこなった場合の時効特性の比較を示す。500℃に対して535℃で溶体化処理をおこなった方が時効硬化の硬度が高く、溶体化保持時間が2時間と5時間で差が無いため、時

効硬化特性に対してはAC4Bと同様に原子空孔濃度が支配的であることが分かる。従って、時効析出に必要十分な溶質原子の固溶量を把握することがAC4B合金と同様に可能である。残留する溶質原子の固溶量を制御することで熱伝導率を変えるアプローチは、溶質原子の種類に関らずに熱処理型アルミニウム合金全般への応用性があり、放熱性が求められるアルミニウム合金製部品への展開や逆に断熱性が求められる部品への展開も考えられる。

4.2. 実用化への課題

現状、熱伝導率の測定には専用の装置と技能を有するオペレータが必要であり、熱伝導率を要求特性として保証するためにはより簡易な方法が求められる。ここで熱伝導率と相関性のある電気伝導率を用いて代替する方向性を考える。Fig. 11に各種アルミニウム展伸材合金における熱伝導率と電気伝導率の相関関係を示す⁽¹⁾。

金属の熱伝導では格子振動(フォノン)による熱伝導よ

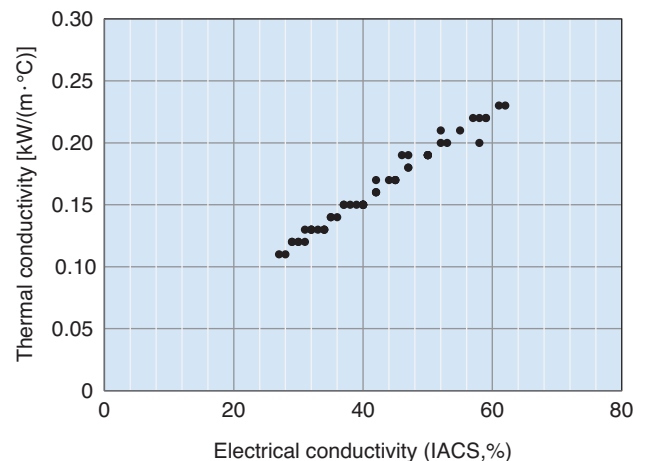


Fig. 11 Relation between thermal conductivity and electrical conductivity

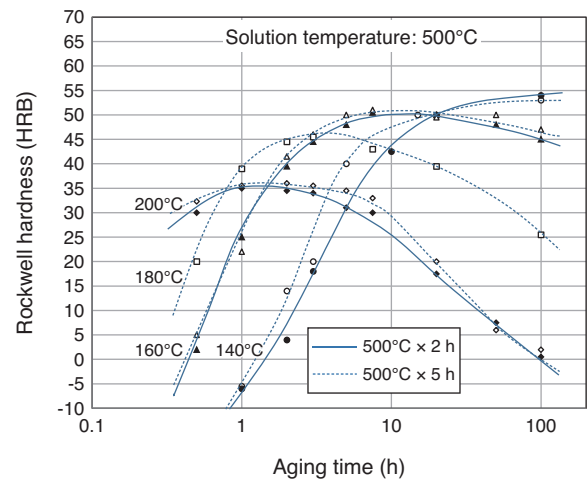
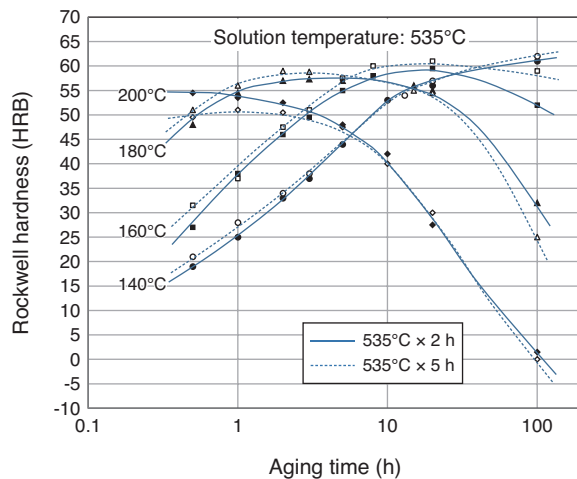


Fig. 10 Aging curve with solution temperatures of 535°C and 500°C of Al-5%Si-0.3%Mg alloy

りも電子の寄与が支配的であることが知られており、電子が電気伝導と熱伝導の両方を担っていることから相関性が現れる⁽¹⁰⁾。

式(3)は一般にヴィーデマン-フランツ則と呼ばれる金属の電気伝導率と熱伝導率の関係を示す。 λ は熱伝導率、 σ は電気伝導率、 L はローレンツ数、 T は温度である。

$$\lambda / \sigma = L \cdot T \quad (3)$$

これは温度が同じであれば、金属の種類が異なっていても熱伝導率と電気伝導率の比がほぼ同じであることを示す。今後は比較的簡便な電気伝導率の測定で熱伝導率の測定を代替できる可能性があり、熱伝導率を要求特性として実用化すると共に、更に詳細な熱伝導率の変化を検証する一助となりうる。

アルミニウム合金は資源のリサイクル環境が整っており、AC4B合金を含めてリサイクル材料が多く使われ、サステナブルマテリアルとしての要素を有する。そこに熱伝導率のコントロールという技術が加わることで、既存部品の性能向上や用途の拡大が期待される。

5. まとめ

アルミニウム合金 AC4B を用いた熱伝導率に関する検証および考察により、以下の結論が得られた。

- (1) 要求される材料特性を達成した上で熱伝導率を高めるためには、時効処理後に残存する溶質原子の固溶量を低減する必要がある、そのためには時効析出に必要十分な固溶量になるよう溶体化処理条件を設定することが重要である。
- (2) 時効析出に必要十分な固溶量を把握し、残留する溶質原子の固溶量を制御することで熱伝導率を変えるアプローチは、溶質原子の種類に関わらずに熱処理型アルミニウム合金全般への応用性がある。
- (3) 今後熱伝導率の実用化を想定すると測定方法に課題があるが、比較的簡便な電気伝導率の測定で代替できる可能性があることを示した。

参考文献

- (1) 日本アルミニウム協会標準化総合委員会 編：アルミニウムハンドブック第6版，日本アルミニウム協会，358p., (2001)
- (2) 平野賢一：アルミニウムおよびアルミニウム合金中の拡散，軽金属，Vol. 19, No. 12, p. 577-590, (1969)
- (3) 紀隆雄，小野興太郎：金属中の原子空孔源，日本金属学会会報，Vol. 21, No. 7, p. 518-522, (1982)
- (4) 白井泰治：陽電子でみるアルミニウム合金中の原子空孔の挙動，軽金属，Vol. 56, No. 11, p. 629-634, (2006)

- (5) 成田麻未：アルミニウム合金の時効硬化現象における原子空孔の役割，まてりあ，Vol. 61, No. 3, p. 160-165, (2022)
- (6) 里達雄，北岡山治，神尾彰彦：Al-Cu系合金，軽金属，Vol. 38, No. 9, p. 558-578, (1988)
- (7) 吉田英雄，内田秀俊：アルミニウムの熱処理，軽金属，Vol. 45, No. 1, p. 41-55, (1995)
- (8) 鈴木寿，菅野幹宏：アルミニウム合金の析出時効，軽金属，Vol. 31, No. 4, p. 277-298, (1981)
- (9) 里達雄：アルミニウム合金の時効析出研究の歴史と今後の展望，軽金属，Vol. 69, No. 3, p. 138-148, (2019)
- (10) 川路均：固体の熱伝導，化学と教育，Vol. 59, No. 10, p. 488-491, (2011)

■著 者■



上田 順一



家 永 裕 一



須 藤 建 次

量産組立工程での超音波による リアルタイムボルト軸力締結システム

Real-time Bolt Axial Force Fastening System Using Ultrasonic Waves
in Mass Production Assembly Process

津 崎 一 浩¹

Kazuhiro TSUZAKI

原 安 史²

Yasushi HARA

榊 原 利 次¹

Toshitsugu SAKAKIBARA

石 田 司²

Tsukasa ISHIDA

要 旨

量産組立工程における締結力ばらつきを削減するため、自動設備や人による作業に係わらず、締結力が安定するリアルタイムボルト軸力締結システムを開発した。軸力の測定は、超音波方式を用い、精度向上のため、ボルト頭部とプローブ間にギャップを設けた。測定用のボルトは、既存製造工程で成形ができる仕様とした。プローブは超音波を発振し、それが新たに開発した固形式伝搬媒質を介し伝搬され、ボルトの頭部と底面からのエコーをそれぞれ受信する。受信した二つのエコーを同時演算することにより締結中でも測定が安定し、リアルタイムでの軸力測定を実現している。その結果、生産タクトタイムやボルトの製造コストなど、既存条件を変えることなく締結中の軸力測定を実現した。

本技術は、量産締結工程で広く普及しているナットランナー電動締結設備との双方向通信をおこなうことができる。締結力は、あらかじめ設定した軸力値に制御することができ、既存トルク法締付に対し、軸力ばらつきを 1/10 以下まで低減することができた。

ABSTRACT

In order to reduce variations in fastening force in mass production assembly processes, a real-time bolt axial force fastening system was developed to provide fastening force that is stable, whether the work is done by automated equipment or by humans. An ultrasonic wave method is used to measure axial force, with a gap between the bolt head and the probe for increased accuracy. Bolts used for measurement were bolts with specifications that allow for forming by existing manufacturing processes. The probe emits an ultrasonic beam that is propagated by means of a newly developed solid propagation medium and receives echoes separately from the head and bottom of the bolt. Operations on the two received echoes are carried out simultaneously so that measurements are stable even while fastening is underway, realizing real-time axial force measurement. As a result, measurement of axial force during fastening is realized without changing production takt time, bolt manufacturing costs, and other such existing conditions.

This technology is capable of bidirectional communication with nutrunners, the electric fastening equipment that has been widely adopted for mass production fastening processes. It can control fastening force to a preset axial force value, and it has successfully reduced axial force variations to one-tenth or less than what is experienced with existing torque methods of tightening.

1. はじめに

近年、脱炭素への社会的な要請により、車両の電動化が加速している。電動化車両では、通常バッテリーユニットがフロア部にボルト締結されている。そのため、バッテリーの発熱によるボルトの膨張や、走行入力による軸方向応力などによって締結部に、ゆるみや、疲労が生じないよ

う製造時の締結軸力管理が求められる。ほかにも自動車の製造では類似の締結軸力管理工程が多く存在するため、高精度な軸力管理ニーズは増加の一途をたどっている。

現在の軸力測定手法はボルト軸部の伸びを測定する超音波方式や、ひずみゲージ方式、電磁界方式⁽¹⁾などがある。量産組立工程における軸力測定は時間的な制約を伴うため、ソケットによる締付と、測定センサの使用が同時に求

¹ 本田技研工業株式会社

E-mail: kazuhiro_tsuzaki@jp.honda

² 菱電湘南エレクトロニクス株式会社

Table 1 Challenges of axial force measurement methods in mass production assembly

	Measurement during fastening	Layout constraints	Bolt machining	Human judgment
Ultrasonic wave method	Available (Good)	None (Good)	Surface only	Needed
Strain gauge method	Available (Good)	Wiring process (Not good)	Machining and gluing	Needed
Electro-magnetic field method	Not available (Not good)	Sensor size (Not good)	Not needed (Good)	Needed

められるが、Table 1 に示すように電磁界方式で同時に使うことは構造的に容易ではない。また他方式でも測定時のレイアウト制約、ボルトの機械加工やセンサの接着、測定結果の判定においても容易ではない。

それらの要因から、量産ラインでは一般的にトルク法が代用されてきた。しかし、トルク法では部品固有の摩擦係数や接触面積などの個体差影響を受けるため、軸力値が安定せず、通常±30%程度の軸力ばらつきが発生する課題があった⁽²⁾。そのため、下限値でも十分な軸力を保持できるような設計が求められるが、締結物が大きくなると締結に必要な空間や重量が増えることが課題となる。

そこで量産工程でのリアルタイムボルト軸力締結の実現を狙いとして、ひずみゲージ方式や電磁界方式のように工程の複雑化や特殊な計測用ボルト加工、測定結果の判定作業を伴わずに軸力締結実現の可能性を有していると考えられる超音波方式での開発をおこなった。開発目標として、現在の量産条件である締付ソケットレイアウト、タクトタイム、ボルトコストに影響を与えないこととした。加えて既存工程を変更せず、ナットランナーと超音波軸力計の一体化により、ボルトの締結と軸力コントロールを同時におこなえることを必要条件とした。

2. 超音波による軸力測定原理と課題

2.1. 超音波方式の軸力測定原理

軸力とは締付により伸びたボルト軸部が元に戻ろうとする力であり、ボルト長変化による伸び量を測定することで軸力が把握できる。伸び量と、ボルト中を伝わる超音波の伝搬時間変化量は比例関係にあるため、超音波測定では伸び量に代え、締付前後の伝搬時間差を利用している。

Fig. 1 に超音波による基本的な軸力測定原理を示す。

最初は無負荷ボルトの頭部にプローブを密着させ、超音波を発振し、底面エコー受信までの伝搬時間(t_1) μ s を記録する。締付後も測定をおこない伝搬時間(t_2) μ s を取得することで締付前との伝搬時間差が算出される。伝搬時間は材料固有の音速を乗算することで長さ(x) mm に換算するこ

とができる。この値にボルトのばね定数(k) N/mm を乗算することで軸力値(F) kN が算出される。

軸力値の算出は、式(1)のようにあらわされる。

$$F = k(x_2 - x_1) \quad (1)$$

2.2. 測定基準点の設定方法

測定の基準点は、取得された数波長分のエコーにゲートを設定して取得する。ゲートとは、波形を監視する時間位置と区間、及び高さレベルのことを指している。通常の設定位置は、ボルトの締付に伴うエコーの時間方向移動や、測定長の変化などによる減衰を補うため、1波目から3波長幅程度の広い区間かつ、波形ピーク位置より低く配置する。

測定基準点の設定方式は一般的に波形の変化影響が少ないゼロクロス方式が使用されている⁽³⁾。ゼロクロス方式はゲート位置を超える高さの波長が、ゼロ基線と最初に交差する位置(Zero-cross point)を基準点として設定する方式である。基準点の設定方法を Fig. 2 に示す。

2.3. 超音波方式の課題

超音波による測定はプローブをボルト頭部面に一定圧で密着させておこなう。しかし至近距離にある頭部エコーの識別ができないため、純粋なボルト長ではなく、プローブに内蔵された振動子(T)と、底面エコー(B1)間の距離(T-B1)を測定している。

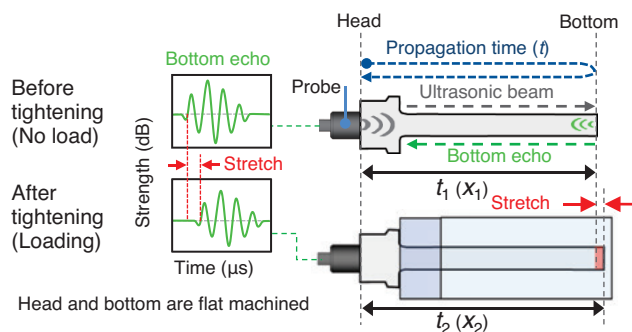


Fig. 1 Principle of axial force measurement by ultrasonic waves

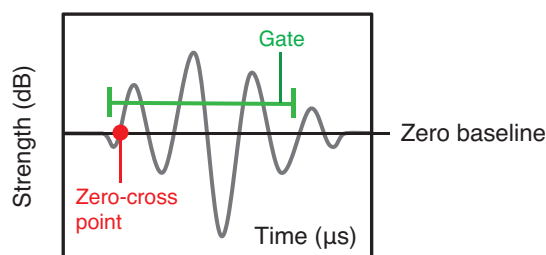


Fig. 2 Reference point setting method for echo

Fig. 3 にプローブ構造とボルト接触の概要を示す。

振動子は一般的に圧電セラミックス (PZT) を用い保護板層で覆われている^{(4), (5)}。振動子から発振された超音波は保護板と伝搬媒質の柔軟層を経て、ボルトに伝搬する。この際、プローブの押付荷重や搭載位置が変化すると、柔軟層の厚みが変化し、測定距離に影響を与える。

対策としてボルトの平面度、直角度、面粗度などについて高い形状精度が求められる⁽⁶⁾。それにより超音波測定用ボルトは高精度な切削加工を施す必要があった。

更にプローブと測定面間に空気が存在すると、音響インピーダンス特性の急激な変化から超音波が減衰し、測定不良が発生する⁽⁷⁾。空気層排除には柔軟な伝搬媒質が必要となるため、微細な空気層まで充填できる液体伝搬媒質が用いられている。しかし、既存量産組立工程に液体塗布工程を加えるには、追加のタクトタイムや、コストがかかるため容易ではない。

またプローブ位置や、ボルトの形状精度が確保された場合でも、軸力印加によるボルト内応力や、ひずみ影響による音響特性の変化⁽⁸⁾から、エコー出力や時間位置が安定しなくなることがある。Fig. 4 に代表的な変化例を示すように、締付により 1 波目のエコー出力が低下した場合、ゲートから外れ、ゼロクロスポイントが 2 波目に移動し、測定距離が 1 波長分ずれてしまう課題があった。このような計測基準のずれは、誤測定につながるため、測定者による確認やゲート位置調整などによる修正が必要であった。

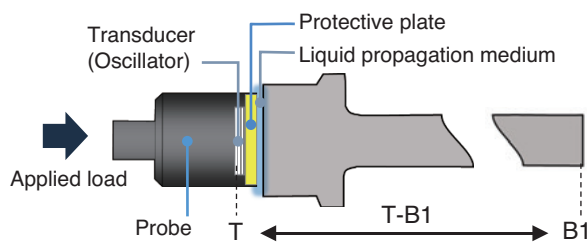


Fig. 3 Overview of probe structure and bolt contact

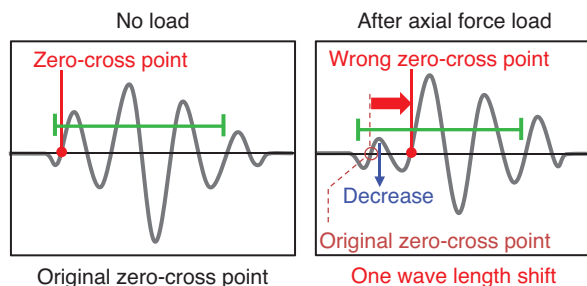


Fig. 4 Effect of changes in echo output on measurements

3. 超音波によるリアルタイム軸力締結システム概要

量産組立工程における締結力ばらつき削減のため、超音波方式によるリアルタイム軸力締結システムを開発した。基本的なシステムの構成を Fig. 5 に示す。

超音波軸力計は、締付用ナットランナーと一体化させ、相互通信による協調制御を取り入れた。

軸力測定用のプローブはナットランナー先端にある交換式の締付ソケット内部に、ばねで保持される。ボルト頭部に接触させると密着し、即時ボルト長を計測する。プローブはスリップリングを経由し超音波軸力計と電氣的に接続されており、ナットランナーに締結開始の信号を送る。ボルト長は締結中もリアルタイムに測定され、軸力値に変換される。規定軸力に達すると、締結力を制御し停止させる。

測定方式は、プローブ位置や、ボルト形状精度に影響されない手法を開発した。プローブとボルト間にギャップを設け、ボルト底面エコーに加え、新たに頭部面エコー (S) も測定できるようにした。

これにより、プローブ位置に関わらず、常に純粋なボルト長を得られる測定手法を考案した。

更にゼロクロスポイント移動の課題に対し、波形変化時でも、ポイントを追従し続けるプログラムにて解決した。

伝搬媒質は、液体に代え柔軟なエラストマー素材とすることで、繰り返し使用することができ、塗布工程を不要とした。加えて高硬度樹脂材と一体構造とすることで、非変形部を設け、対ボルト面への搭載状態を安定化させた。

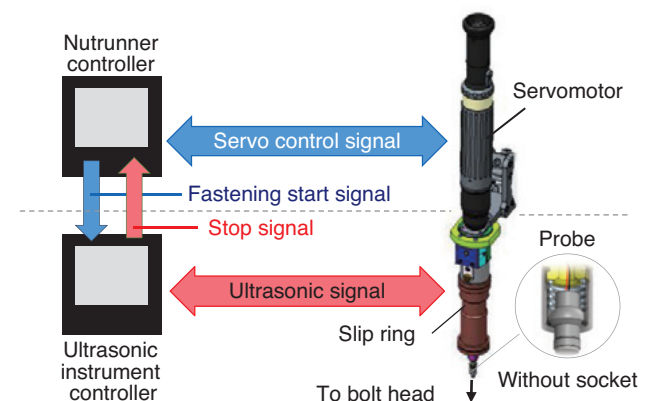


Fig. 5 Basic system configuration

4. 新しい測定方式と適用技術

4.1. 量産工程適用のための測定方式

4.1.1. ギャップを設けた測定方式の効果

量産締結工程は、自動設備や人的スキルのばらつきな

ど、プローブ位置の変動要因が存在する。それらに影響されない測定手法として、ボルト頭部にへこみ形状を設け、頭部と底面エコーを同時に測定する S-B1 測定方式を開発した⁽⁹⁾。Fig. 6 にギャップ構造と測定方式を示す。

これにより、ボルト両端エコーの相対な時間差がリアルタイムで把握できるようになり、プローブ位置に関わらず、純粋なボルト長を測定できるようになった。

その結果、作業スキルなどに影響されることなく、ボルト長の変化を正確に捉えることができ、プローブ位置や部品精度の課題を解決した。また既存方式はプローブ振動面が鋼材のボルトに接触するため、振動子の割れを誘発することがあった。S-B1 方式採用の結果、剛体物への直接的な接触を避けることができるようになった。

4.1.2. 測定基準点のずれ防止機能

軸力測定時の波形変化に自動追従するオートトラッキング機能を開発した。従来測定方式は作業者が波形を注視し、ゼロクロスポイントに変化が見られた場合、波形ゲインやゲート位置調整などの修正を手動で実施していた。同機能は、超音波探傷用途では既使用されており、エコー変化に対しゲート位置を追従させる方法が使用されていた。

しかし軸力測定では、ボルト頭部と軸部の変化量が異なるため、それぞれの変化量に応じてゲート位置を追従させる 2 ゲートトラッキング機能を新たに開発した⁽¹⁰⁾。

Fig. 7 に 2 ゲートトラッキング方式の概要を示す。

本機能は、1 kHz 程度の高周波で発振されている超音波パルスに同期して、各ゲートが個別に伝搬時間を取得する。各ゲートでは前回取得した伝搬時間との差を算出し、ゲート位置を補正している。この結果、ボルト締結に伴うエコー時間位置の変化量に対し、ゲート位置も追従するため、ゼロクロスポイント設定に必要な 1 波長幅までゲートを狭く設定することができる。したがって誤測定要因の発生を抑え、計測基準点の確認や修正作業を不要とした。

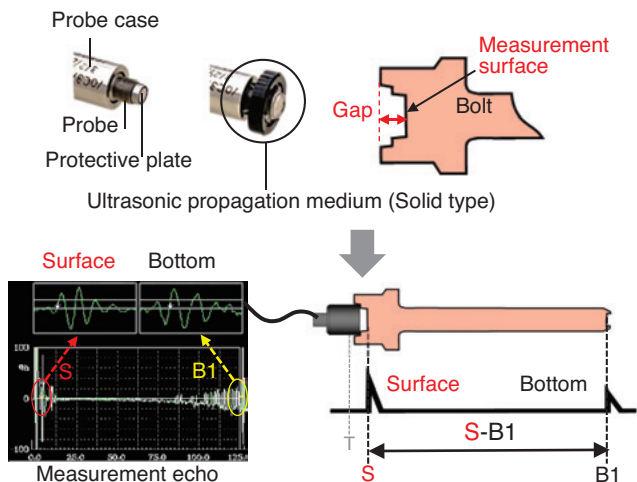


Fig. 6 Gap structure and measurement method

4.1.3. 締結状態の安定性判断機能

軸力値で締結管理を実施するにあたり、作業者の技量によらず軸力締結をおこなえることが必要となる。2 ゲートトラッキング機能などにより作業者の負担を軽減しているが、締付や、測定の異常を検出し、締結状態の判断を自動でおこなえる機能が求められている。

締結状態を判断する手法として、取得エコーの周波数特性を用いたエラー判別機能を開発した⁽¹¹⁾。本機能は、プローブの傾きや、振動子摩耗、異物、ボルト異常など、周辺状態の変化により、波形形状が変化することに着目している。あらかじめエラー状態の波形を高速フーリエ変換 (FFT) し、中心周波数、ピーク周波数、比帯域幅⁽¹²⁾の 3 項目をデータベース化した。そして締付時の測定波形と比較してエラーの有無を自動的に判別する。

Fig. 8 に正常時とエラー時の FFT 分析例を示す。

エラー判別は、プローブがボルトに接触した時点から、締付完了までおこなわれる。エラーと判断された際は、ナットランナーを停止する制御とした。

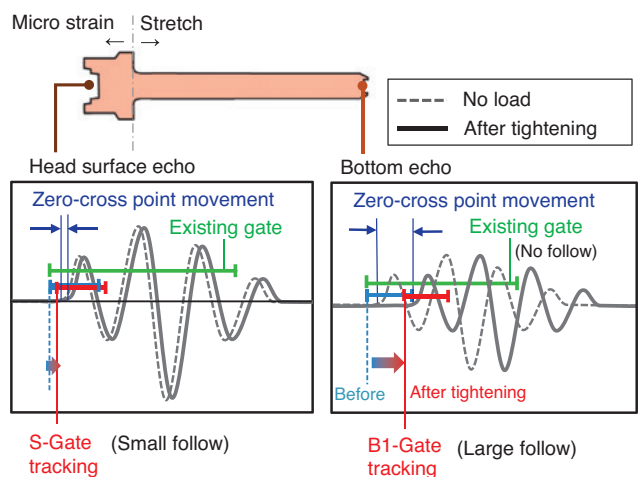


Fig. 7 Operational schematic diagram of newly developed two-gate tracking method

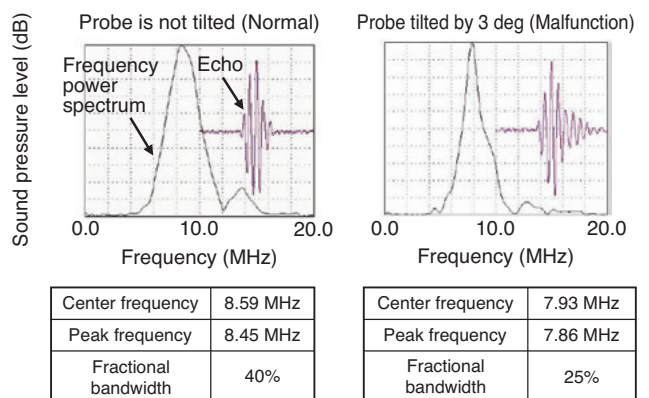


Fig. 8 Examples of normal and malfunction FFT analysis

4.2. 量産工程適用のための固形式超音波伝搬媒質

締結作業工程を増大させないため、液体に代わる固形式の伝搬媒質を開発した。Fig. 9 にその形状を示すように本媒質は硬度 15⁽¹³⁾ 程度の比較的柔らかなエラストマー素材を用いた超音波伝搬部と、高硬度樹脂材 (ポリプロピレン: PP) を用いた固定部のハイブリット構造としている。

エラストマー素材は容易に形状を変化させる特性のため、プローブとボルト頭部間の充填に適している。しかしエラストマー単体を用いた先行確認では、50% を越える圧縮状態が数十回程度繰り返されると、亀裂や塑性変形が生じ短期間で伝搬媒質としての機能を損なう可能性があった。また軟材のため、一定形状の維持が容易ではなく、プローブ位置がボルトに対し不安定になってしまうことや、エラストマー素材自体の固定方法にも課題があった。そのため PP 材との二色成型パーツとすることで課題を解決した。

4.2.1. 媒質固定方法とプローブ位置安定化の効果

固定方法は Fig. 10 に構造を示すようにねじ式とした。PP 材部に適切な長さの雌ねじ形状を設け、雄ねじ形状が設けられたプローブ先端にねじ込むことで、エラストマー材と振動面が接触する位置で固定される。固定された伝搬媒質の PP 材部はボルト側に設けられたへこみ (リセス) 形状一段目の位置決め部とかん合し、プローブ位置の安定性を確保している。エラストマー材部は二段目のへこみである測定面に接触し、超音波伝搬をおこなう。ねじによる着脱式とすることで、交換性にも配慮した。

4.2.2. エラストマー素材の耐久性

エラストマーの耐久性を確保するため、PP 材のボルト接触面 (Fig. 10 の a 面) からエラストマー材の飛び出し量を規制し、50% 以下の圧縮率としている。耐久性確認のため、ボルト形状への圧縮を繰り返す試験を実施した。その

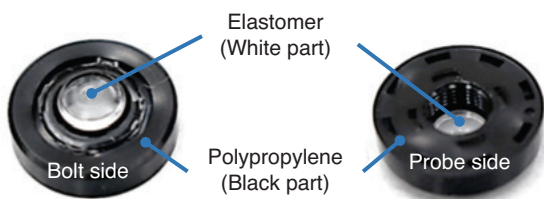


Fig. 9 Solid type ultrasonic propagation medium

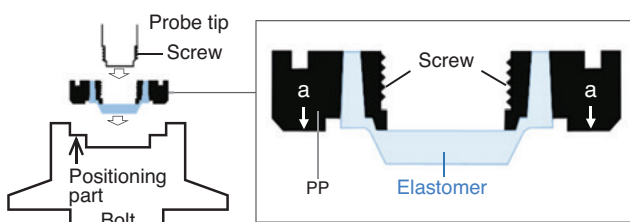


Fig. 10 Cross-section and peripheral layout of ultrasonic propagation medium

結果 15 万回経過後に一部分が白化する事象を確認したが、形状や伝搬特性は正常な測定機能を有していた。仮に 1 日 1,000 回の締付作業を伴う量産工程であった場合、延べ 150 日分の締付作業に相当する耐久性を確認した。試験後の固形式伝搬媒質状態を Fig. 11 に示す。

4.3. 量産工程適用のためのプローブ浮き防止構造

締結工程では、作業状態などの外的要因により、締結設備に傾きが発生することが考えられる。この時プローブの一部に浮きが発生すると密着が外れ測定不良となる可能性がある。対策として、プローブと設備の接続部分をばねによりフローティング保持することで、設備の傾きに影響されない構造とすることができる。しかし Fig. 12 に一般的な円筒状プローブをベースにした構造を示すように、汎用プローブを用いてフローティング機能を設けると、ボルトの端部から離れた場所に支点を設ける構造となってしまう。そのため、ボルト測定面からのプローブ可動域が 1.5 deg 程度と狭く、外的要因に対する傾きの対応には限界があった。

そこで大きな傾きに対応するため、プローブ構造を見直し、ボルト端部に近い位置にもフローティング機能を追加した。

Number of samples: 48

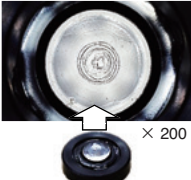
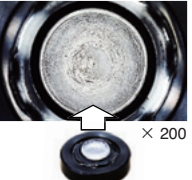
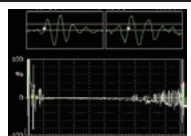
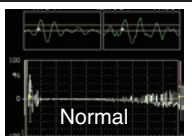
Number of compressions	0	150,000
Elastomer state	 × 200	 × 200
Change in outer diameter	(Standard ± 0.05)	-0.01 to +0.03
Change in thickness (mm)	(Standard ± 0.05)	-0.02 to +0.02
Measured echo		

Fig. 11 Results of repeated compression durability test

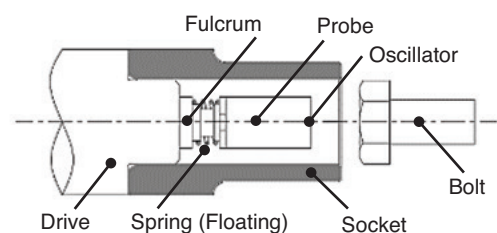


Fig. 12 General structure of probe in tool

更に追加したばねとの接触部分を球状にすることで、全方向に 5 deg の追加可動域を確保した。これにより締結設備のがたつきや、人為的操作による傾きに対し柔軟なプローブの密着性を確保している^{(14), (15)}。

新しいフローティング保持構造を Fig. 13 に示す。

4.4. 量産適用可能な軸力測定ボルト

本開発では軸力測定とプローブ位置の安定化を図るため、ボルト頭部に二つの機能を設ける必要があった。それらに対応するため、量産ボルトをベースに、二段階のリセス形状を追加した。

しかし、汎用プローブ形状をベースとしたレイアウトでは、Fig. 14 に形状を示すように、ボルト軸方向への深ザグリ形状が必要となる。そのため、圧造時の据込み加工限界^{(16), (17)}に影響され、成型が容易ではない。自動車部品の分野では、強度区分 10.9 以下のボルトには、ボロン鋼が多く使用されている^{(17), (18)}。そこで、ボロン鋼でも測定精度を保つことができるボルト頭部リセス形状を設定した⁽¹⁹⁾。

4.4.1. 成形形状の最適化

深ザグリ形状の成型は、材料流動の追従が容易ではない。Fig. 15 に成型解析結果の比較を示すように、金型が鋼材に接触しない領域が出現するなど、成型課題があった。

対策として、圧造成形解析 (DEFORM ver. 11.1, 株式会社ヤマナカコーキン製) にてボルト頭部形状別のパラメトリックスタディによる最適形状を検証した。その結果、リセス径の拡大と測定面の浅底化により、量産同等の均一な加工面圧を得られる形状とした。本形状により既存量産工程や材料を変えることなく、成型性を確保できる見通しがたった。またボルト頭部の形状変更に伴い、対向するプ

ローブ形状も変更が必要となるが、本測定方式では、ボルトとの接触面はプローブではなく、伝搬媒質が担っている。伝搬媒質は樹脂材で成型され、着脱式としているため、ボルト頭部形状に合わせた変更が容易となる。

4.4.2. ボルト量産工程での成型検証

成型解析結果より金型を製作し、量産ラインでの成型検証 (サンプル 1,000 本) をおこなった。Fig. 16 に設定寸法公差に対する各工程能力を示すように、超音波軸力測定で重要となるリセス径及びギャップ深さと測定面間の平行度について一般的な工程能力指数 1.33⁽²⁰⁾ を大きく上回り、成型解析と同等の成形性を得られた。

これらの結果により、超音波軸力測定に必要なボルトの寸法精度が確保できた。追加工程を設けることなく既存量産形状ボルトと同じ成型工程で製造できるようになった。

4.4.3. 疲労強度特性

ボルト軸力印加により、ねじ部からの張力と、フランジ座面部の反発力が交差し、フランジ終端である首下へ応力集中が発生する。Fig. 17 に開発ボルトの断面形状を示す

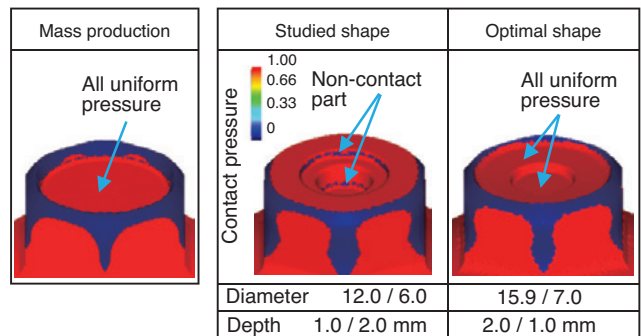


Fig. 15 Comparison of molding analysis

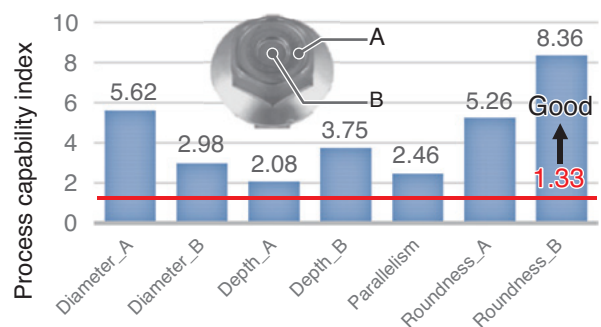


Fig. 16 Tolerance process capability index

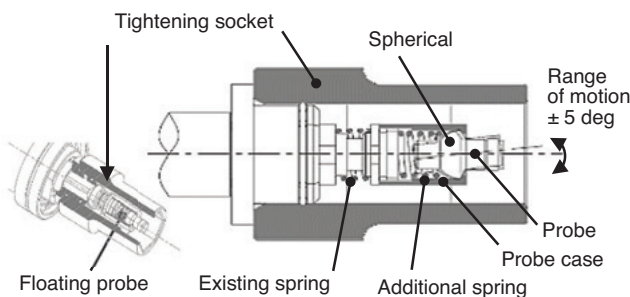


Fig. 13 New floating holding structure for probe

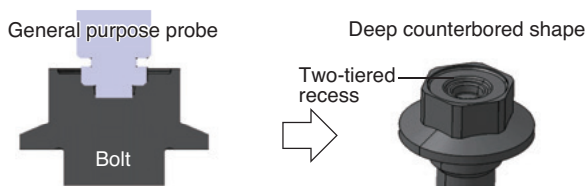


Fig. 14 Deep counterbored shape of bolt head

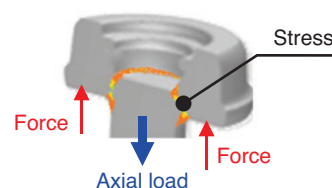


Fig. 17 Stress concentration by bolt fastening

ように、ボルト頭部に2段リセス形状を備えた開発ボルトは、リセス底面からフランジ下面までの距離が、一般的なボルト形状に対し短く、応力集中しやすくなる。そのため長期間の使用による破断に対し十分な性能を確保するため、疲労強度を保証する必要がある。

そこでJIS B 1081⁽²¹⁾に定める引張疲労試験にて、開発ボルト及び量産ベースボルトの疲労強度と破断箇所の比較検証試験をおこない Fig. 18 にその結果を示す。

試験結果は0.2%耐力に対し規格降伏荷重の70%平均応力(ボルトの場合は軸力)条件⁽²²⁾では、量産ベースボルトと同等の疲労強度結果を得られた。更に破断部位は全てネジ部で発生しており、ボルトの頭部へのリセス形状追加による疲労強度への影響がないことを確認した。

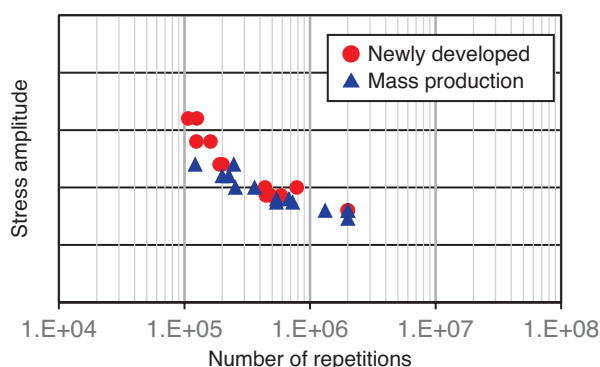


Fig. 18 Fatigue strength comparison test results

5. 締結検証結果

リアルタイムボルト軸力締結システムの締付精度を確認するため、検証を実施した。検証にあたり超音波軸力測定への影響が考えられる六つの誤差因子を抽出し、品質工学手法⁽²³⁾に基づいて実験をおこなった。その結果、ボルト有効径、グリップ長、雌ねじ長、の三つの因子について感度特性が得られた。グリップ長とはボルト首下フランジ部から雌ねじ噛み合い開始位置までの長さ、雌ねじ長とは、雌ねじと雄ねじが噛み合っている部分の実長である。これらの誤差因子は製品単品寸法のばらつきにより発生する。

締付精度の確認においては、量産エンジンに使用され、精度要求が高いM8サイズのボルトをベースとした。またこれら三つの誤差因子について図面の上、中、下限を反映した検証用ボルトを製作した。

確認は検証用ボルトを使用し、各因子のみと、それらの組合せを各5回($n = 5$)ずつ測定した。更に量産工程で1,000本製造した測定用ボルトから30本を追加し、計130回($n = 130$)の軸力制御による締付確認をおこなった。

超音波軸力測定精度の確認は、Fig. 19に構造を示すように、校正されたロードセルを内蔵した締付試験治具を用いておこなった。試験治具は、雌ねじ部の移動や交換が可能で、グリップ長や雌ねじ長の調整ができる。これにより、ロードセルの測定値と超音波システムの測定値の差から測定精度を求めた。

その結果、M8ボルトの目標締付軸力値22.5 kNに対しばらつき幅が0.96 kN($\pm 3\sigma$)と良好な結果が得られた。

Fig. 20にリアルタイムボルト軸力締結システムの締結精度検証結果を示す。

これは目標とする軸力値に対して $\pm 2.1\%$ のばらつきであり、トルク法締付時の $\pm 30\%$ ⁽²⁾との比較では、1/10以下まで減少した。

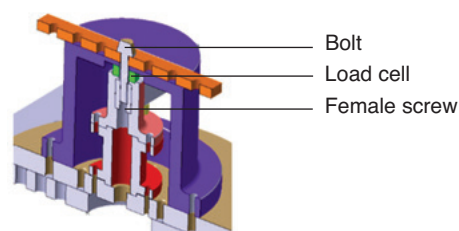


Fig. 19 Structure of test jig

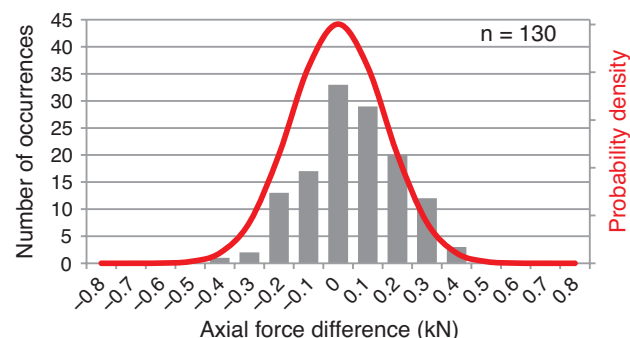


Fig. 20 Accuracy verification results for bolt axial force with this system

6. まとめ

量産組立条件下での軸力測定に適合するリアルタイムボルト軸力締結システムを開発した。

- (1) ボルト頭部にギャップを設けた2ゲート測定方式を開発した。
- (2) 2ゲートトラッキングと、エラー判定機能により、安定した測定結果を得られるようにした。
- (3) 液体に替えエラストマー材を使用した固形式の伝搬媒質の開発と、測定設備の傾きに対応したプローブ保

- 持構造により、量産環境での使われ方に適合させた。
- (4) 既存の製造方法を変えることなく生産できる測定用のボルト仕様を構築し、製造コストの上昇を抑えた。
- (5) トルク法と比較し、締結時の軸力ばらつきを、1/10以下に抑えることができた。

本技術は幅広い工業製品の生産工程における課題対応や、製品力向上に対する、重要な技術となり得ると考える。

参考文献

- (1) 手嶋康暁, 後藤雄治, 高橋則雄: 電磁現象を利用した高張力ボルトの緩み非破壊検査手法, 非破壊検査, 第61巻, 5号, p. 227-234, (2012)
- (2) 大橋宣俊, 萩原正弥, 吉本勇: 塑性域ねじ締結の特性, 精密機械, 51巻, 7号, p. 1383-1389, (1985)
- (3) JIS Z 2353: 超音波による固体中の音速の測定方法, (2021)
- (4) <http://usmaj.o.oo7.jp/shindoshi.html>
- (5) 重野直樹: 3.5.2 探触子の種類と用途, 非破壊検査技術シリーズ 超音波探傷試験Ⅱ, 日本非破壊検査協会, p. 36-37, (2000)
- (6) 牧野孝之, 酒井智次, 鳥山晴彦: 超音波を利用したボルト軸力測定装置の開発と実用化, 精密機械, 43巻, 2号, p. 227, (1977)
- (7) 伊藤洋一: 強力空中超音波の発生方法とその応用技術, IEICE Fundamentals Review, Vol. 9, No. 3, p. 205-213, (2016)
- (8) 保坂儒人, 今野和彦: ストロボ光弾性法による固体中のき裂と残留応力中を伝搬する超音波の可視化, 素材物性学雑誌, 第27巻, 第1/2号, p. 20-24, (2016)
- (9) 特開 2020-020749 (2020)
- (10) 特開 2020-020763 (2020)
- (11) 特開 2021-148629 (2021)
- (12) JIS Z 2350: 超音波探触子の性能測定方法 (2002)
- (13) JIS K 6253-3: 加硫ゴム及び熱可塑性ゴム—硬さの求め方—第3部: デュロメータ硬さ (2012)
- (14) 特開 2020-019124 (2020)
- (15) 特開 2021-196268 (2021)
- (16) <https://www.nittokog.co.jp/fastenerscatalog/F-TOKUHIN-R.pdf>
- (17) 阿南吾郎, 並村裕一, 長谷川豊文, 隠岐保博: 冷間圧造性に優れた線材の開発, R & D 神戸製鋼技報, Vol. 48, No. 1, p. 39-42, (1998)
- (18) JIS B 1051: 炭素鋼及び合金鋼製締結用部品の機械的性質—強度区分を規定したボルト, 小ねじ及び植込みボルト—並目ねじ及び細目ねじ (2014)
- (19) 特開 2020-020453 (2020)
- (20) 永田靖, 棟近雅彦: 第1章 工程能力指数の定義と評

価規準, 工程能力指数 実践方法とその理論, 日本規格協会, p. 17-24, (2011)

- (21) JIS B 1081 (ISO3800:1993): ねじ部品—引張疲労試験—試験方法及び結果の評価, (1997)
- (22) 萩原正弥: ねじの疲労破壊, 精密工学会誌, Vol. 81, No. 7, p. 623-627, (2015)
- (23) 矢野耕也: 品質工学の基礎とパラメータ設計, 精密工学会誌, Vol. 81, No. 11, p. 1008-1012, (2015)

著 者



津崎 一 浩



梶原 利 次



原 安 史



石 田 司

バッテリー電圧推定を目的とした機械学習モデル における精度評価指標の提案

Proposal of Evaluation Metric for Machine Learning Model
for Battery Voltage Estimation

川 原 卓 磨¹
Takuma KAWAHARA

佐 藤 優 気²
Yuki SATO

佐 藤 功 二²
Koji SATO

要 旨

リチウムイオンバッテリーの電圧を推定する機械学習モデルの評価を目的として、アレニウス則に基づいた精度指標を新たに構築し、機械学習モデルの優劣を判断できるか検証した。機械学習モデルとして、データが存在しない領域で離散的な推定をするモデルと、連続的な推定が可能なモデルの二種類を選定した。その上で電動車から収集したフローティングカーデータを基に温度が離散的なデータを生成し、モデルの学習と評価をおこなった。その結果、一般的に用いられる評価指標であるテストデータに対する誤差評価では、二種類のモデルの評価結果に明確な差が出ないことを確認した。その一方で、我々が新たに構築したアレニウス則に基づいた評価指標では、モデル評価の差がより明確となることを確認した。本指標の導入により、収集データが限られる場合でも機械学習モデルの評価が可能となり、機械学習モデルを活用したバッテリー電圧推定技術の実用化に向けて前進できた。

ABSTRACT

In order to evaluate a machine learning model that estimates the voltage of a lithium-ion battery, we built a new accuracy evaluation metric based on the Arrhenius law, and tested it to see if it could be used to judge the relative merits of machine learning models. Two types of machine learning model were selected. One was a type that performed discrete estimates in regions where data are not available, while the other was capable of performing continuous estimation. Then, discrete temperature data based on floating car data collected from electric vehicles were generated, and the models were trained and evaluated. The results confirmed that the commonly used evaluation metric for evaluating deviation from test data showed no clear differences in evaluation results between the two model types. On the other hand, the authors' new evaluation metric based on the Arrhenius law showed clearer differences in the evaluations of the two models. Implementing this metric made it possible to evaluate a machine learning model even with limited collected data, thereby advancing the practical application of battery voltage estimation technology using machine learning models.

1. まえがき

Hondaは2050年カーボンニュートラルの実現に向けて、バッテリー電気自動車(以下BEV)・燃料電池車の開発を進めている。BEVのエネルギーストレージとして、リチウムイオンバッテリー(以下バッテリー)が広く採用されている⁽¹⁾。一般的にバッテリーは温度などの使用環境条件や車両からの要求エネルギー条件に応じて過電圧(閉回路電圧と開回路

電圧の差)が変化し出力可能なエネルギーが変化することが知られている^{(2), (3)}。任意の条件下におけるバッテリーの過電圧を高精度に推定できれば、あらゆる環境下においてBEVの航続可能距離を高精度に求めることにつながり、電欠のリスク低減や電欠に対するお客様の不安解消に貢献できると考える。

近年、実際に走行している車両からデータ(フローティングカーデータ)を大量に取得できるようになり、バッテ

¹ 先進パワーユニット・エネルギー研究所

E-mail: takuma_kawahara@jp.honda

² 株式会社テクノプロ テクノプロ・デザイン社

りの Big Data と機械学習を活用したバッテリー電圧推定技術の研究が盛んにおこなわれている⁽⁴⁾⁻⁽⁶⁾。先行研究事例として、電動バスから収集したバッテリーの時系列データを基に、Deep Learning を活用して電圧を推定するアルゴリズムを構築した研究が報告されている⁽⁴⁾。Shuangqi Li らは、時系列データを基に生成したテストデータで電圧推定精度を検証した結果、絶対パーセント誤差 (MAPE) 2.42% で電圧を推定可能であったと報告している。また、他の先行研究事例として、充放電試験装置でバッテリーの充放電サイクル試験をおこない、収集したデータを基に機械学習でバッテリーの電圧と温度を推定するアルゴリズムを構築した研究も報告されている⁽⁵⁾。Manh-Kien Tran らは収集したデータの 30% をテストデータとして活用し精度を検証した結果、決定木モデルは決定係数 0.99 で電圧と温度を推定可能であったと報告している。我々は、機械学習は複数因子が関与する非線形なバッテリーの電圧挙動を高精度に再現可能な技術であるとして、注目している。

しかし、実際に適用する場合には、市場においてバッテリーがどのように使われるか、十分な検証が必要である。例えば BEV、ハイブリッド、プラグインハイブリッドといったパワーユニットの形式や、シティコミューターか長距離移動用などの車両の特性によって、バッテリーの使用条件が異なることが想定される。さらには、学習データが十分に得られないことも考えられる。このようなバッテリーの使用状況の相違から、機械学習のアルゴリズムタイプによって、推定精度に違いが出ると思われる⁽⁷⁾。そのため、車両の特性や市場によって異なるバッテリーの使われ方データの特性に対応した、適切な機械学習手法を選択する必要があると考える。

本研究では、機械学習モデルの評価に電気化学の知見を活用する試みをおこなった。その結果として本稿では、一般に知られている化学反応法則であるアレニウス則を用いて、バッテリー電圧推定の機械学習モデルを評価する手法を提案する。

2. 課題とアプローチ

2.1. データによる課題

機械学習モデルは演えきのに推定値を算出する物理モデルとは異なり、収集したデータを基に帰納的にデータの傾向を学習し推定値を算出する手法である。そのため、収集データが存在しない条件での推定は、精度が低下する可能性がある。

一例として Fig. 1 に、収集データが存在しない領域で機械学習モデルがどのような推定をするか比較した結果を示す。比較した機械学習モデルはタイプの異なる以下四種類のモデルであり、説明変数は x 、目的変数は y で共通である。

- ・ Random Forest Regressor (RF)
- ・ K-Nearest Neighbors Regressor (KNN)
- ・ Gaussian Process Regressor -RBF kernel (GP)
- ・ Support Vector Regressor -RBF kernel (SVR)

ここで RF と KNN はデータが存在しない領域で離散的な推定をおこなうモデル、GP と SVR は連続的な推定が可能なモデルの代表例として示した。

Fig. 1 図中の破線は $y = x^2$ の真のトレンドを、点線は機械学習モデルの推定値を表している。また、丸点は学習データ、四角点はハイパーパラメータチューニング用の検証データを表しており、共に真のトレンドから離散的にサンプリングしたものである。この結果より、いずれの機械学習モデルでもデータが存在する条件では真のトレンドに近い値で推定できていることが確認できる。一方、学習・検証データが存在しない条件に関して、RF と KNN の推定値は真のトレンドから逸脱していることが確認できる。RF は学習データを参考に決定木のノード分岐を生成しデータの傾向を学習するため、学習データが離散的に与えられると推定値が離散的となる性質がある。KNN は学習データ中の近傍データを基に推定値を算出するアルゴリズムであるため、RF と同様に学習データが離散的に与えられると推定値が離散的となる性質がある。よって、真のトレンドが連続的に変化する場合、RF と KNN はデータが存在していない条件で真のトレンドからかい離する傾向となる。GP と SVR に関しては、検証データが存在しない範囲でも推定値が真のトレンドから逸脱していないことが確認できる。これは、推定値が連続的な値となる GP と SVR の性質が、連続的な真のトレンドを学習するために効果的に作用

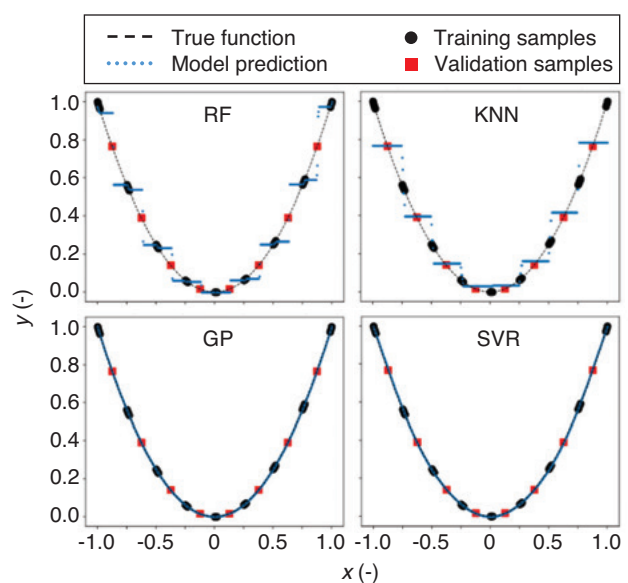


Fig. 1 Comparison of estimation results of machine learning models when data are given discretely

したためと考える。本結果から、機械学習モデルが真のトレンドを学習できているかを検証するためには、離散的なデータでの検証のみでは不十分であり、説明変数を連続的に変化させた上での網羅的な検証が必要である。

2.2. アプローチ

前節に記載したように、機械学習モデルを活用したバッテリー電圧推定技術を適用するためには、機械学習モデルを連続的かつ網羅的に評価をおこなうという課題を解決する必要があると考える。

本課題への対応として、フローティングカーデータをあらゆる条件で網羅的に収集して、機械学習モデルの検証を網羅的に実施するアプローチが考えられる。しかし、フローティングカーデータから得られる条件は車両の使用環境に大きく依存する。例えば、温度データは車両が使用される気候に依存し、低温から高温まで連続的かつ網羅的にデータを得られる保証がない。そのため、必要十分なデータを収集するために大量の車両と長期間のデータ蓄積が必要となる可能性がある。実用性の観点からそのアプローチは現実的ではないため、別のアプローチによる検証が必要である。

上記の課題を解消するため、本稿で我々は電気化学的知見を用いた新たな評価指標を提案する。本評価指標は、仮想的に生成した連続的かつ網羅的なデータを機械学習モデルに入力し、その出力値の入力データに対する応答を評価するものである。入力データを仮想的に生成する場合、モデル出力値に対応する真の値は存在していないため、出力値と真の値の誤差を定量化することは不可能である。しかしながら、入力データの変化に対する出力値の応答は、電気化学的な理論式でトレンドを表現することが可能である。提案するアプローチは、入力データの変化に対するモデルの出力値の応答と理論式とを比較することで、定量的な評価指標を算出するものである。

本研究では収集したフローティングカーデータをもとに、温度が離散的なデータを生成し、四種類の機械学習モデル (RF, KNN, GP, SVR) の学習と評価をおこなった。その上で、学習データが離散的に与えられた場合に、離散的な推定をおこなう RF, KNN と連続的に推定が可能な GP, SVR の差を判断できるか検証した。

3. 検証のフロー

Fig. 2 に本研究全体の検証フローの概略を示す。解析全体は Step 1: モデルの学習, Step 2: モデルの評価、の二つのステップで構成した。Step 1 では、車両から収集したバッテリーのフローティングカーデータを基に、機械学習モデルの学習に必要なデータを生成した。その上で、四種類の機械学習モデル (RF, KNN, GP, SVR) の学習を

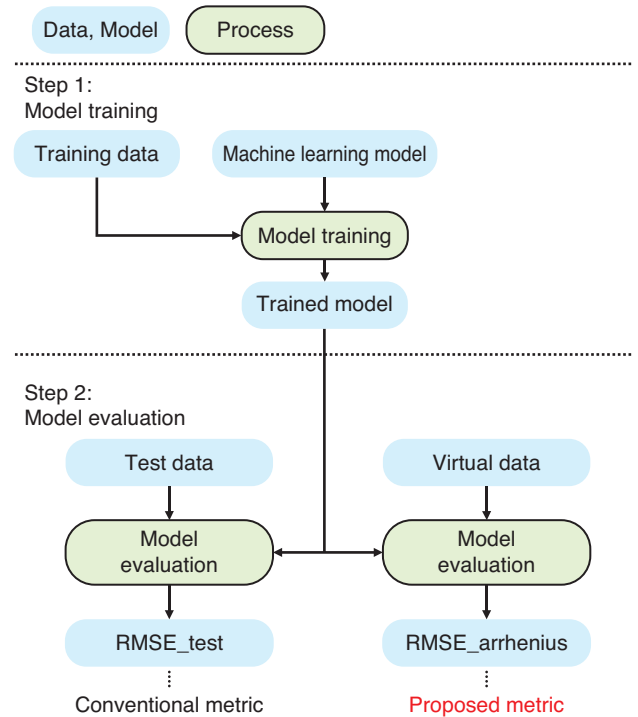


Fig. 2 Flowchart of entire evaluation in this study

おこなった。Step 2 では学習済の機械学習モデルの精度を、一般的な評価指標と新たに提案する評価指標とで定量化した。

以下本稿においては、第 4 章で Step 1 について詳細を記述する。第 5 章では Step 2 について、二つの評価指標の詳細を説明する。第 6 章では検証結果を示した上で、双方の評価指標の違いを議論する。最後に第 7 章で本研究の結論を述べる。

4. モデルの学習

Step 1 は、以下のプロセスで構成した。

- (1) 学習データの生成
- (2) 機械学習モデルの学習

本章では、各プロセスの詳細を記述する。

4.1. 学習データの生成

本研究では、Plug-in Hybrid 車から収集したバッテリーのフローティングカーデータ (レコード数 21,765,370) を活用して、学習データを生成した。データ収集対象の車両は、使用開始後 30 日以内の車両であり、初期からのバッテリー性能変化が小さい車両である。収集したデータ項目はバッテリーの過電圧、温度、電流、開回路電圧である。本研究の目的は、離散的なデータで学習した機械学習モデルに対して、モデルの優劣を適切に判断可能な評価指標を見出すことである。そのため上記データを基に離散的なデータを

生成し、モデルの学習データとして使用した。本研究では離散化は温度に対しておこない、 ± 0.5 deg. C の幅で -20, -10, 0, 10, 20, 30, 40 deg. C のデータを各々500レコードずつランダムに抽出した。抽出したデータの温度分布は Fig. 3 に示す通りである。

4.2. 機械学習モデルの学習

バッテリーの過電圧を推定するモデルの構造を Fig. 4 に示す。車両から取得したデータと機械学習モデルを用いて、バッテリーの過電圧を推定する。機械学習モデルの説明変数は開回路電圧、電流、温度の3変数であり、目的変数と説明変数は時間が同期しているデータとした。機械学習モデルは教師あり回帰モデルの内、タイプの異なる四種類のモデルを採用した。学習データが存在しない領域の推定値が離散的になる機械学習モデルとして RF, KNN を採用し、学習データが存在しない領域でも推定値が連続的になる機械学習モデルとして、GP, SVR を採用した。機械学習モデルのハイパーパラメータは学習データを活用して Hold-out 法で最適化をおこない決定した。最適化したパラメータを Table 1 に記す。なお Table 1 に記載していないその他のハイパーパラメータは、scikit-learn 1.0.1 の既定のものを用いた⁽⁸⁾。

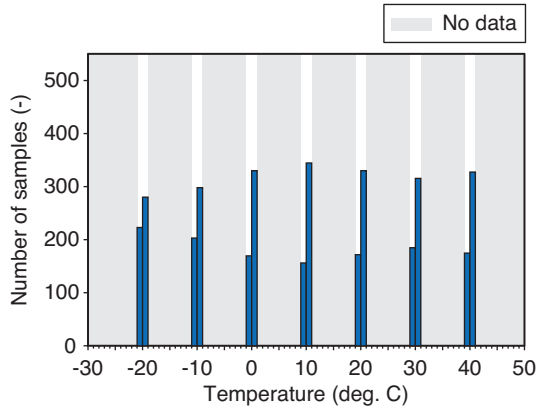


Fig. 3 Frequency histogram for temperature of training data

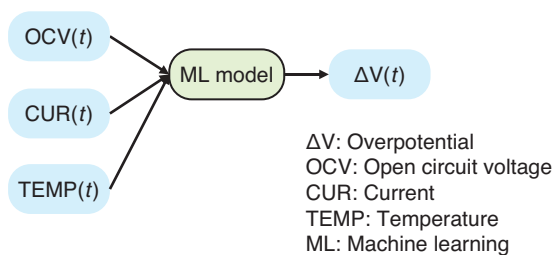


Fig. 4 Structure of machine learning model

Table 1 Optimized hyperparameters of machine learning models

ML model	Hyperparameters
RF	n_estimators: 10; max_depth: 50
KNN	n_neighbors: 6; weights: uniform
GP	kernel function: RBF length_scale: 200; length_scale_bounds: fixed
SVR	kernel function: RBF epsilon: 0.01

5. モデルの評価

Step 2 では、一般的に用いられる評価指標と、新たに提案する評価指標の差を検証するため、以下二つの指標で学習済モデルの精度を評価した。

(1) テストデータに対する精度

(2) 過電圧が従う理論式に対する精度

本章では、各評価指標の詳細を記述する。

5.1. テストデータに対する精度

テストデータに対する精度は、Fig. 5 に示すフローにより定量化した。なお、本評価指標は機械学習モデルの精度評価において一般的に採用されているものである。まず、テストデータの説明変数を学習済モデルに入力し、モデルの推定値を取得する。その上で、モデルの推定値とテストデータの目的変数を比較し、推定誤差を算出する。推定誤差は、以下の式(1)で表される平均二乗平方根誤差(RMSE)で定量化した。

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (f_i - y_i)^2} \quad (1)$$

ここで n は総レコード数、 f は機械学習モデルの推定値、 y はテストデータの目的変数の値である。以降、本評価指標を $RMSE_{test}$ と表記する。

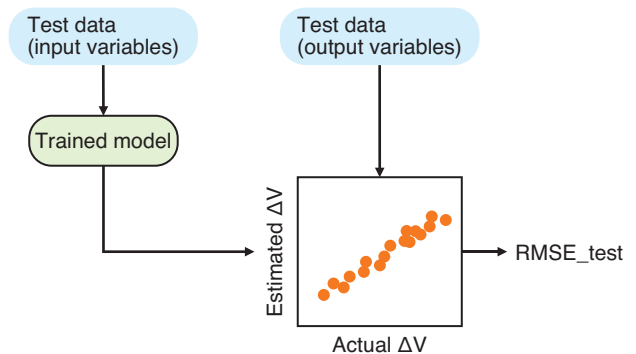


Fig. 5 Flow chart of evaluation of $RMSE_{test}$

テストデータは、学習データの生成と同様に、フローティングカーデータから±0.5 deg. C の幅で-20, -10, 0, 10, 20, 30, 40 deg. C のものを各々500レコードずつランダムに抽出した (Fig. 6). 但し、学習データで抽出したデータとは重複しないように抽出した。

5.2. 過電圧が従う理論式に対する精度

過電圧が従う理論式に対する精度は、Fig. 7 に示すフローにより定量化した。なお、本評価指標は機械学習モデルを連続的かつ網羅的に評価する目的で、今回新たに提案する評価指標である。本研究では、理論的な式を比較的簡易的に定めることができる、過電圧の温度依存性を評価の対象とした。

評価は連続的かつ網羅的に説明変数データを生成した上で、生成したデータを学習済モデルに入力し、モデルの推定値を取得した。次に横軸を入力した仮想データの温度値、縦軸をモデルの推定値としてプロットした。その結果

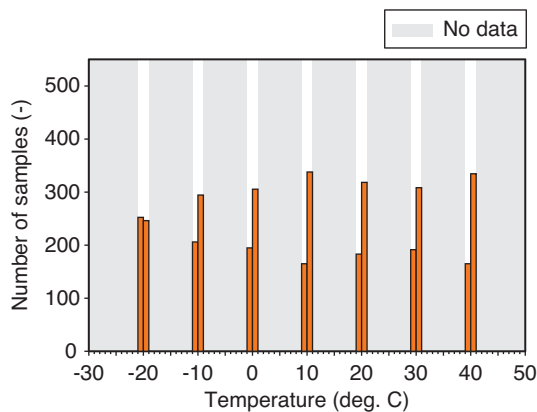


Fig. 6 Frequency histogram for temperature of test data

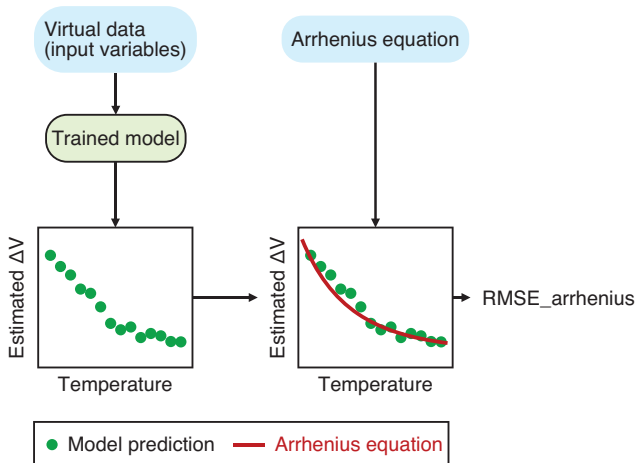


Fig. 7 Flow chart of evaluation of RMSE_arrhenius

に対して、アレニウスの式から導いた関数でフィッティングをおこない、その誤差を RMSE で定量化した。以降、本評価指標を RMSE_arrhenius と表記する。

仮想データは、バッテリーの想定使用条件範囲内において連続的に条件を変化させて生成した。具体的には、以下のパターン (各温度 671 パターン) でデータを生成した。

- ・ 電流: 0.5 から 1.5 C, 0.1 C ごと (11 パターン)
- ・ 開回路電圧: 3.5 から 4.1 V, 0.01 V ごと (61 パターン)
- ・ 温度: -20 から 40 deg. C, 1 deg. C ごと (61 パターン)

生成したデータの温度分布を Fig. 8 に示す。テストデータの温度分布である Fig. 6 と比較して、データが連続的かつ網羅的であることが確認できる。各温度の全パターンにおける機械学習モデルの平均推定値を、各温度の代表値として採用した。

機械学習モデル推定値の温度依存性の評価のための理論式はアレニウスの式を活用した。バッテリーの内部抵抗のうち、界面電荷移動抵抗やイオン拡散速度の低下に伴う抵抗の温度依存性は、アレニウスの式に従うことが知られている⁽⁹⁾。一方で集電体や電極中の導電材を流れる電流の電気抵抗はアレニウスの式に従わない。これら抵抗の温度依存性を考慮し、過電圧の温度依存性は、アレニウスの式に定数項を加えた以下の式 (2) に従うと考えた。

$$\Delta V = A \exp\left(\frac{-E_a}{RT}\right) + \Delta V_0 \quad (2)$$

ここで、 ΔV は過電圧、 R は気体定数、 T は温度、 E_a は活性化エネルギー、 A は温度に依存しない係数、 ΔV_0 はアレニウスの式に従わない過電圧を表現する定数である。機械学習モデルの推定値の温度依存性を、式 (2) でフィッティングする際の最適化パラメータは A , E_a , ΔV_0 である。

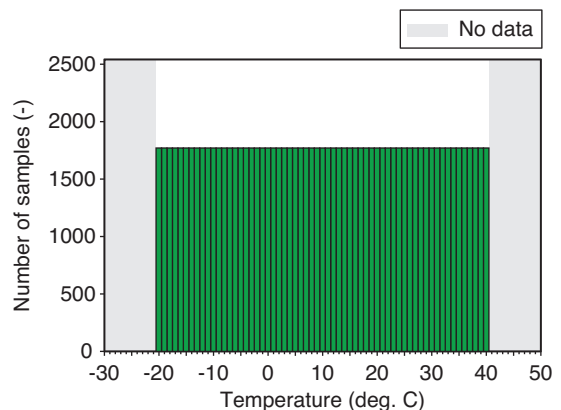


Fig. 8 Frequency histogram for temperature of generated data

6. 結果と考察

データがない領域で離散的な推定をおこなうモデル RF, KNN と、データがない領域でも連続的な推定が可能なモデル GP, SVR との優劣を判断できるかを検証するため、Fig. 9 に四種類の機械学習モデルを二種類の評価指標で評価した結果を示す。なお、学習データとテストデータの生成において、ランダムパターン（ランダムシード）を 32 回繰り返して学習と検証を実施した。また、RMSE 32 回分の平均を機械学習モデルごとに Table 2 に整理して示す。本結果から、RMSE_test に関しては、RF, KNN の誤差（平均 20.8 mV）と GP, SVR の誤差（平均 20.4 mV）の差が小さく、優劣の判断ができないことが確認できた。一方で、今回新たに提案した指標である RMSE_arrhenius では、RF, KNN の誤差（平均 12.3 mV）は GP, SVR の誤差（平均 1.2 mV）に比べ 10 倍大きく算出され、両者の差が明確に判断できることを確認した。

機械学習モデルの予測値とテストデータの実測値を比較した結果を Fig. 10 に示す。なお、本結果ではランダムパ

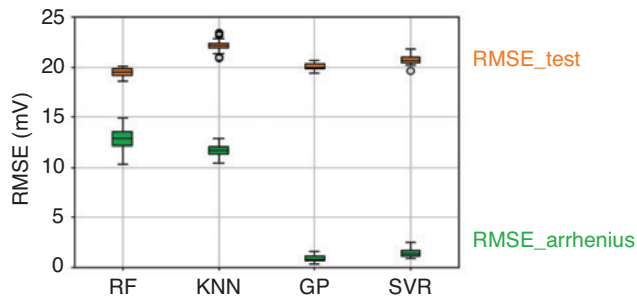


Fig. 9 Evaluation results of machine learning models

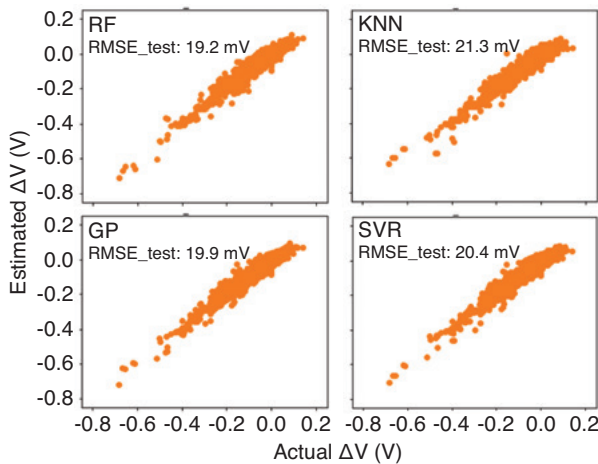


Fig. 10 Comparison of estimations of machine learning models with actual values of test data

Table 2 Evaluation results of machine learning models

ML model	RMSE_test	RMSE_arrhenius
RF	Average: 20.8 Standard deviation: 1.4	Average: 12.3 Standard deviation: 1.1
KNN		
GP	Average: 20.4 Standard deviation: 0.5	Average: 1.2 Standard deviation: 0.5
SVR		

(Unit: mV)

ターンを一つに固定してある。この結果から、テストデータに対する推定において、各モデルにおいて特徴的な傾向は確認できず、各モデル差が無いと判断した。テストデータの温度範囲は、学習済モデルの温度範囲と同様であるため、全てのモデルがデータの傾向を適切に学習できたことが理由と考える。

機械学習モデルの推定値の温度依存性と式 (2) との比較結果を Fig. 11 に示す。ここで丸点は学習済モデルに仮想データを入力して得られた推定結果の、1 deg. C ごとの平均値である。実線は、式 (2) で上記平均値をフィッティングしたものである。この結果から、RF, KNN は、GP, SVR と比較してモデルの推定値が温度変化に対して不連続に変化しており、式 (2) から予測される理論値から相対的に明らかに逸脱していることが確認できた。一方で、GP, SVR は、モデルの推定値が温度変化に対して、連続に変化しており、低温から高温にかけて、式 (2) とよく一致していることが確認できた。

本結果より、従来の評価指標 (RMSE_test) ではデータが存在しない領域での精度の優劣を判断できなかったが、新たに提案した評価指標 (RMSE_arrhenius) では、優劣を明確に判断できることを確認した。

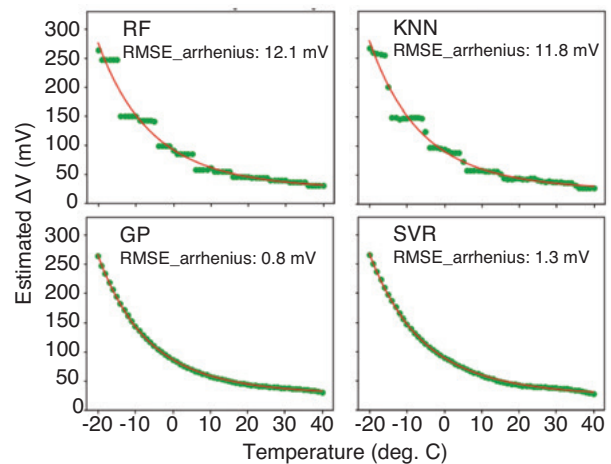


Fig. 11 Temperature dependence of machine learning model estimations compared to curves predicted from Arrhenius equation

7. まとめ

本稿では、機械学習を活用したバッテリー電圧推定モデルの評価に関し、電気化学的な理論式(アレニウスの式)に基づいた評価指標を新たに提案した。我々は車両から収集したデータをもとに、温度が離散的なデータを生成し四種類の機械学習モデル(RF, KNN, GP, SVR)の学習と評価をおこなった。その結果、従来の評価指標(テストデータに対するRMSE)ではRF, KNNとGP, SVRの差が明確に判断できない一方で、提案する新たな評価指標では差が明確に判断できることを明らかにした。

従来の評価指標を用いた機械学習モデルの評価では、モデルの評価に大量の車両から長期間のデータを収集することが必要であり、実用性の観点から課題があった。しかし、提案する評価指標により、収集データが限られる場合でも機械学習モデルの評価が可能となり、機械学習モデルを活用したバッテリー電圧推定技術の実用化に前進できたと考える。本研究においては、理論的な式を簡易的に定めることができる、過電圧の温度依存性を評価に活用した。しかしながらトレンドを表現できる支配的な理論式を定めることができれば、他の変数(電流、充電率など)も評価に活用が可能であると考え。今後の研究においては、過電圧の温度依存性だけでなく、その他の変数の依存性評価も進めていく予定である。

参考文献

- (1) Chian, T. Y., Wei, W. L. J., Ze, E. L. M., Ren, L. Z., Ping, Y. E., Abu Bakar, N. Z., Faizal, M., Sivakumar, S.: A Review on Recent Progress of Batteries for Electric Vehicles, International Journal of Applied Engineering Research, Vol. 14, No. 24, p. 4441-4461, (2019)
- (2) Vidal, C., Gross, O., Gu, R., Kollmeyer, P., Emadi, A.: xEV Li-Ion Battery Low-Temperature Effects—Review, IEEE Transactions on Vehicular Technology, Vol. 68, No. 5, p. 4560-4572, (2019)
- (3) Meyer, N., Whittall, I., Christenson, M., Loiselle-Lapointe, A.: The Impact of Driving Cycle and Climate on Electrical Consumption & Range of Fully Electric Passenger Vehicles, EVS26 - International Battery, Hybrid and Fuel Cell Electric Vehicle Symposium, (2012)
- (4) Li, S., Li, J., He, H., Wang, H.: Lithium-ion battery modeling based on Big Data, Energy Procedia, Vol. 159, p. 168-173, (2019)
- (5) Tran, M.-K., Panchal, S., Chauhan, V., Brahmabhatt, N., Mevawalla, A., Fraser, R., Fowler, M.: Python-Based

Scikit-Learn Machine Learning Models for Thermal and Electrical Performance Prediction of High-Capacity Lithium-Ion Battery, Int. J. Energy Res., Vol. 46, Issue 2, p. 786-794, (2022)

- (6) Heinrich, F., Klapper, P., Pruckner, M.: A comprehensive study on battery electric modeling approaches based on machine learning, Energy Informatics, Vol. 4, Article No. 17, (2021)
- (7) 国立研究開発法人産業技術総合研究所:機械学習品質マネジメントガイドライン 第2版, (2021)
- (8) <https://scikit-learn.org/stable/modules/generated/sklearn.tree.DecisionTreeRegressor.html#sklearn.tree.DecisionTreeRegressor>, 2021/1/15
- (9) Rangarajan, S. P., Barsukov, Y., Mukherjee, P. P.: In Operando Impedance Based Diagnostics of Electrode Kinetics in Li-Ion Pouch Cells, Journal of The Electrochemical Society, Vol. 166, No. 10, A2131-A2141, (2019)

■ 著 者 ■



川原 卓磨



佐藤 優気



佐藤 功二

正誤表

No.	Vol. No.	ファイルNo.	論文タイトル	ページ	訂正箇所	内 容		
1	Vol.34 No.1	34-1_04	ハンディポータブル 発電機 EU3200i の 開発	p. 29	Table 1 単位	誤		
							Model name	EU2200i
							Max power [kVA]	2200
							Rated power [kVA]	1800
						正		
							Model name	EU2200i
							Max power [VA]	2200
							Rated power [VA]	1800

編集長	漆山 雄太	先進技術研究所
副編集長	渡邊 生	先進パワーユニット・エネルギー研究所
	石橋 正明	本田技研工業 二輪パワープロダクツ事業本部ものづくり統括部
	伊藤 浩	本田技研工業 二輪パワープロダクツ事業本部ものづくり統括部
	桂井 隆	本田技研工業 四輪事業本部ものづくりセンター
	北村英二郎	先進パワーユニット・エネルギー研究所
	古賀 響	ソリューションシステム開発センター
	鈴木 俊次	先進技術研究所
	須藤 晶	先進技術研究所
	直江 学	ソリューションシステム開発センター
	中原 淳	本田技研工業 四輪事業本部ものづくりセンター
	松浦 浩海	先進パワーユニット・エネルギー研究所
	山本 若登	先進技術研究所

編集協力

本田技術研究所	先進技術研究所 論文委員会 先進パワーユニット・エネルギー研究所 論文委員会 ソリューションシステム開発センター 論文委員会
本田技研工業	二輪・パワープロダクツ事業本部 ものづくり統括部 論文委員会 四輪事業本部 ものづくりセンター論文委員会

Honda R&D Technical Review Vol.34 No.2 を最後まで読んで頂きありがとうございました。本誌に寄稿頂いた著者の皆様、編集・発行に尽力された皆様大変お疲れ様でした。

私は、本誌の査読・編集に携わって2年となります。正直ここまで丁寧に発行まで進めているとは想像していませんでした。論文の構成確認から始まり、初稿、第2稿と数名の査読委員と事務局で議論を進めながら推敲がなされます。最終的に、編集委員の確認をもって発行へと進んでいく事になります。日頃から文章を書き慣れていない著者の方には、大きな負担となっている事が想像されます。しかしながら、最終的に出来上がった自身の作品を改めて眺めてみると、充実感を持たれる著者の方が多いようです。本誌発行後に著者の方からメールを頂く時は査読をやっていて良かったなと感じる瞬間です。

論文執筆が未経験の方には、文章を書く大切さと思い表現する楽しさを味わって頂きたいなと思います。文書化して形式知する事により、暗黙知があぶり出されて整理される事、新たな課題が見えてくる事、もっとあの時こうしておけば良かった、など非常に気づきの機会が多く次につながる経験が出来ます。何よりも自分の足跡が論文や技術紹介という形で後世に残る事は、書き記す事のメリットではないでしょうか？

少し別の道を経験してみようか、久しぶりに再度研究・開発内容をまとめてみようかと感じた方は、是非投稿を考えてみて下さい。

観測史上最も早く梅雨明けした夏に、扇子をパタパタしながら、弊社食堂にて、

—(鈴木)—

発行所 株式会社 本田技術研究所

発行人 大 津 啓 司

編集人 Honda R&D Technical Review 編集委員会

事務局 〒321-3393 栃木県芳賀郡芳賀町下高根沢4630番地
株式会社 本田技術研究所 統括機能センター
企画室 戦略ブロック 論文事務局
TEL: 028-677-3311(代表) FAX: 028-677-7775
E-mail: Tr_randd@n.t.rd.honda.co.jp

印刷所 〒351-0024 埼玉県朝霞市泉水2-8-21
協永堂印刷株式会社

Honda R&D Co., Ltd.