

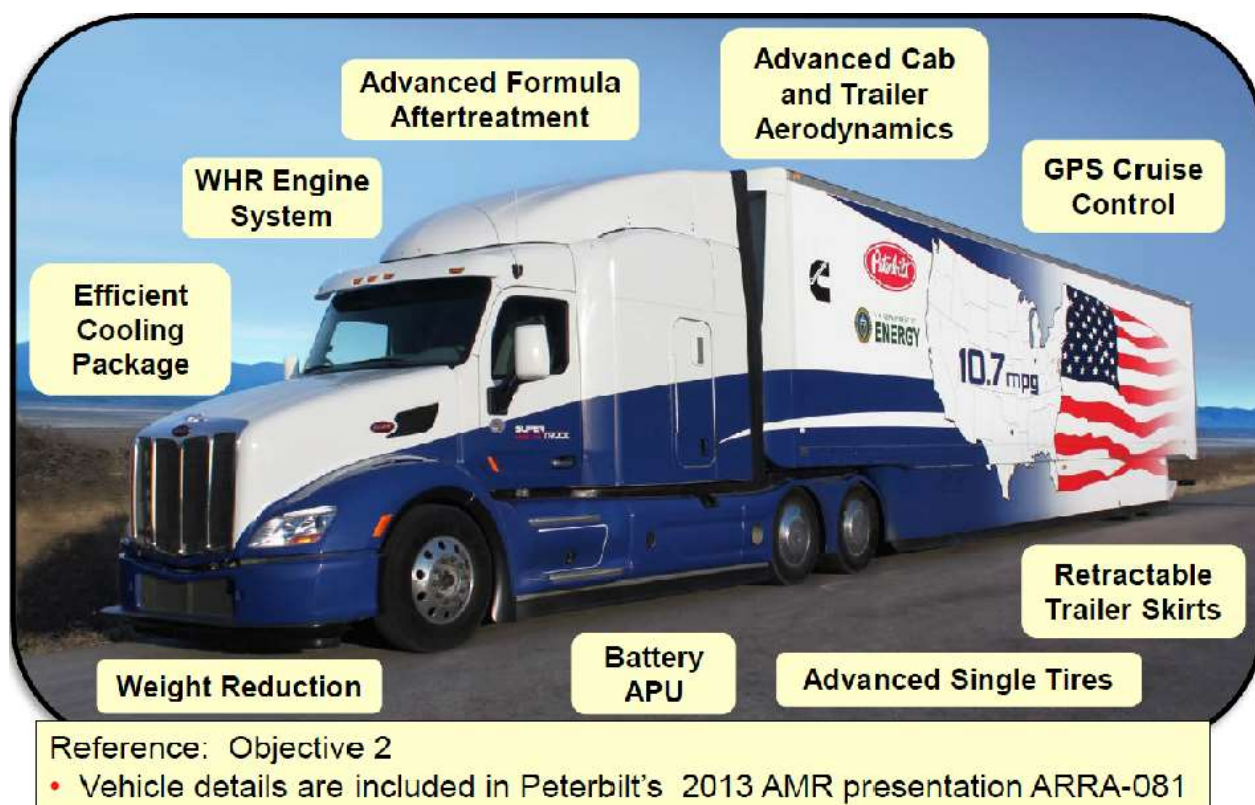
# ENGINE REVIEW

*SOCIETY OF AUTOMOTIVE ENGINEERS OF JAPAN Vol. 8 No. 8 2018*

JSAE エンジンレビュー

特集 : 次世代自動車の要素技術

コラム : マジョリティ=自家用車としてアフォーダブル



Source: 2014 Annual Merit Review and PEER Evaluation Meeting, Project-ID:ACE057,  
"Cummins Super Truck Program" David Koeberlein



公益社団法人 自動車技術会

コラム : マジヨリティ=自家用車としてアフォーダブル

*Majority=Affordable as a personal car*

村中 重夫 (編集委員会副委員長, 元日産自動車)

Shigeo MURANAKA (JSAE Engine Review Editorial Committee)

SIP「革新的燃焼技術」ガソリン燃焼チームにおける若手研究者の研究開発紹介

3

小酒 英範 (編集委員, 東京工業大学)

Hidenori KOSAKA (JSAE Engine Review Editorial Committee, Tokyo Institute of Technology)

エンジン燃焼室壁面における熱流束定量計測のための高精度同軸型薄膜温度センサの開発

5

*Development of high precision coaxial type thin film temperature sensor for quantitative measurement of heat flux on combustion chamber wall of the engine*

石井 大二郎 (東京都市大学大学院)

Daijiro Ishii (Tokyo City University)

三原 雄司 (東京都市大学 工学部/総合研究所 HEET)

Yuji Mihara (Tokyo City University)

隣接3点センサによるエンジン燃焼室における熱流束の計測および解析

11

*Heat Flux Measurement and analysis in an engine combustion chamber with an adjacent three-point sensor*

出島 一仁 (明治大学大学院)

Kazuhito Dejima (Meiji University Graduate School)

中別府 修 (明治大学)

Osamu Nakabeppu (Meiji University)

エンジン燃焼室の壁温計測のためのMEMS無線温度センサの開発

16

*Development of the MEMS Wireless Temperature Sensor for Engine Cylinder Wall Temperature Measurements*

李 敏赫 (東京大学)

Minhyeok Lee (The University of Tokyo)

權 兌鎮 (東京大学)

Taejin Kwan (The University of Tokyo)

森本 賢一 (東京大学)

Kenichi Morimoto (The University of Tokyo)

鈴木 雄二 (東京大学)

Yuji Suzuki (The University of Tokyo)

米国エネルギー省(DOE)におけるスーパートラックプロジェクトの熱効率50-55%への挑戦 21

*The Path of a 50-55% Thermal Efficient Engine of Super Truck Project Organized by DOE*

下田 正敏 (編集委員, 元・日野自動車)

Masatoshi SHIMODA (JSAE Engine Review Editorial Committee)

リチウムイオン電池を凌駕する次世代・革新型蓄電池の開発状況 27

*R&D Status of Advanced and Innovative Batteries as the Battery beyond Li-ion*

栄部 比夏里 (国立研究開発法人 産業技術総合研究所)

Hikari SAKAEBE (National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST))

■ JSAE エンジンレビュー編集委員会

委員長: 飯田 訓正 (慶應義塾大学)

副委員長: 村中 重夫 (元・日産自動車)

幹事: 飯島 晃良 (日本大学)

委員: 遠藤 浩之 (三菱重工エンジン&ターボチャージャ)

大西 浩二 (日立オートモティブシステムズ)

奥井 伸宜 (自動車技術総合機構)

菊池 勉 (日産自動車)

小池 誠 (豊田中央研究所)

小酒 英範 (東京工業大学)

清水 健一 (元・産業技術総合研究所)

下田 正敏 (元・日野自動車)

西川 雅浩 (堀場製作所)

野口 勝三 (本田技術研究所)

平井 洋 (日本自動車研究所)

細谷 満 (日野自動車)

山崎 敏司 (編集)

渡邊 学 (JXTG エネルギー)

発行所: 公益社団法人 自動車技術会

発行日: 2018年12月24日

発行人: 大下守人 (アイシン精機)

〒102-0076 東京都千代田区五番町 10-2

電話: 03-3262-8211

ENGINE REVIEW

SOCIETY OF AUTOMOTIVE ENGINEERS OF JAPAN

Vol. 8 No. 8 2018

## マジョリティ＝自家用車としてアフォーダブル

*Majority=Affordable as a personal car*



村中重夫

Shigeo MURANAKA

JSAE エンジンレビュー編集委員会副委員長

元日産自動車

Former Nissan Motor Co., Ltd.

量販EVが市販された2010年、「エンジンテクノロジーレビュー」誌（以下ETR誌）のVol.2 No.3（2010/8）のオピニオン欄で「アフォーダブルでないとマジョリティになれない」というタイトルの記事を書いた。当時の国内保有車両のエンジン種別シェアトップ3である、ガソリン、ディーゼル、LPG車がそれぞれのユーザーにとってアフォーダブル（経済合理性がある）であるから選ばれているということを述べた。

ディーゼル車は、車両価格は高いがガソリン車と比べ運行費は約半分で、ライフで長距離を走るトラック、バス等は総経費が安くなるため選ばれる。LPG車も燃料税が政策的に安いと燃料価格はガソリンの6割程度である。LPGスタンドの少なさ、高圧燃料系のメンテ代等のデメリットを吸収できるタクシー業界が選択している。

購入層で分類すると、個人自家用は多様なガソリン車、バス、トラックの運輸業界はディーゼル車、タクシー業界はLPG車となる。しかし各エンジンをアフォーダブルであるとして購入する市場規模は、ガソリン9割、ディーゼル1割弱、LPG 0.3%と一桁ずつ減少すると書いた。

今回は2001、2006、2012、2018年（3月末データ）の比較データを図に示す。約6年ごとのデータは資料的意味で掲載したが、ここでの論議は2001年と2018年の比較を通して、各項目の変化とその要因について考察する。

・総保有台数                      7250万台 → 7775万台（+10%）

総人口は減少しているが免許人口は微増が続く、団塊世代が車を持たなくなると今後減少に転じるか。

ガソリン車                      83.4% → 91.4%（約1割増）

ディーゼル車                    16.2% → 8.2%（半減！）

LPG車                            0.4% → 0.25%（4割減）

ハイブリッド車（HEV）の大半はガソリンHEVであり、上記分類ではガソリン車の区分に入る。HEVのシェアは9%あるため、純ガソリン車のシェアはやや減少している。ディーゼル車のシェア半減は排気規制の影響が大きく2001年からのNOx・PM法で2005年までに大都市での使用ができなくなった、ワンボックス車やRV、SUVのガソリン代替によるものが主因と考えられ、乗用車用ディーゼルの保有台数は約500万から100万に激減。トラックも2/3程度に減少している。

ガソリンおよびディーゼルのシェア合計は99.6%で約20年間変わらず、LPGを加えたシェア計も99.9%と変わらない。結局HEVアフォーダブル層が増え、純ガソリン、ディーゼル、LPG車の市場の一部を奪ったと理解できる。

# ENGINE REVIEW

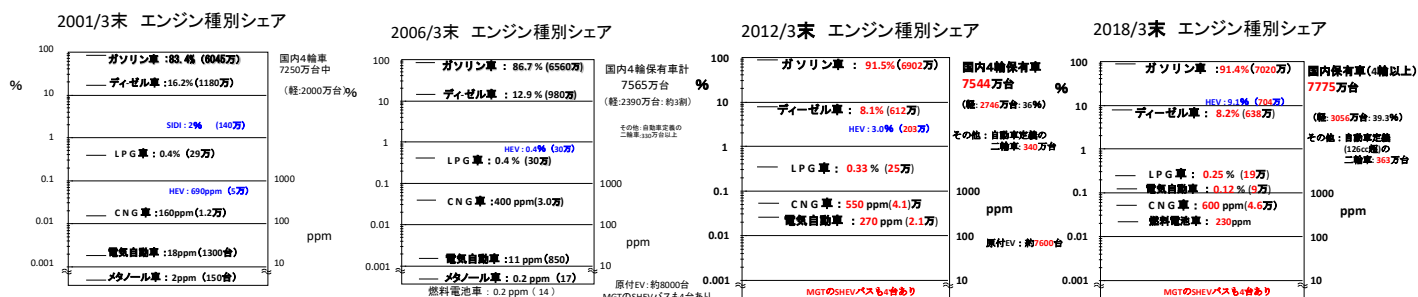
SOCIETY OF AUTOMOTIVE ENGINEERS OF JAPAN Vol. 8 No. 8 2018

エンジン種ではなく、車両区分で見ても目立つのが軽比率の上昇である。2001年の保有2000万台、シェア28%から2018年では3000万台を超えシェアは4割に近づいている。軽の規格は'55年の360ccから'76年の550cc、'90年の660cc、'98年からは車体寸法も現行サイズと、エンジン排気量、車体サイズも拡大しながら、維持費の安さと取り回しの楽さを武器に、登録車より大きな伸び率で今日に至っている。あと20年以内に日本特有規格の軽が、保有の半数を超える可能性もある。その他道交法で自動車と定義される125cc超の二輪車は360万台近くあり、4輪の数を加えると国内の保有車両総計は8000万台超という数字になる。

HEVおよびEVの2018/3の保有総数は720万弱、シェアは9.2%である。2017年度単年では523万台の新車販売のうち135万台がHEVおよびEVであり、単年シェアは26%である。7000万台を超える従来エンジン車が、一例としてこの先135万台ずつ代替されると計算すると、電動化率が50%を超えるには25年以上かかる計算になる。

今後の燃費(CO<sub>2</sub>)規制の強化に対応して、電動車の設定を各社が増やしている状況では、もっと早く全保有車両のエンジン種別で「電動車」がマジョリティ(50%超)になる可能性がある。しかし電動車の大半はHEVとみられ、ガソリンエンジンが搭載されており、図の表記ではガソリンエンジンが9割前後でないかと予測される。

走行時はゼロエミッション車と言われるEV、FCEVのシェアの現状は0.12%と230ppmである。これらのシェアを拡大するためには、本号の特集で幾つかの技術紹介がある革新的要素技術を多数開発して、コストの大幅低減、性能向上を図る必要がある。ゼロエミッション車がマジョリティになる時代はまだ語れない。革新技術の実用化・コスト低減にかかっている。ETR誌Vol.1 No.2(2009/6)コラムに書いたように、高コスト=LCAで見た環境負荷大ということ認識して研究開発を進めることが重要である。



## SIP「革新的燃焼技術」ガソリン燃焼チームに おける若手研究者の研究開発紹介

小酒英範

東京工業大学

Hidenori KOSAKA

Tokyo Institute of Technology

本特集号では、次世代自動車用パワートレインのための要素技術を紹介しているが、自動車用エンジンの熱効率を50%以上にまで引き上げることを目指し、2014年から開始された総合科学技術・イノベーション会議のSIP（戦略的イノベーション創造プログラム）「革新的燃焼技術」<sup>1)</sup>における研究開発の成果は、次世代の高効率自動車用エンジンを担うものとして注目されよう。当該プログラムでは、産業界の強いニーズに基づき研究課題が設定され、多くの大学の研究者が協働して目標達成を目指していることが大きな特徴である。当該プログラムは最終年度を迎えており、全体の成果内容はプログラム終了後に公開されるであろう。したがって、成果全容を紹介するのは、次年度以降の特集号に期待していただくとし、ここでは一部の研究開発事例を紹介するにとどめる。このプログラムには将来自動車産業を担う若手研究者も多く参加しており、本号では、特に、これら若手研究者の活躍に注目し、彼らの研究の一部を紹介することとする。

SIP「革新的燃焼技術」は、ガソリン燃焼チーム、ディーゼル燃焼チーム、制御チーム、損失低減チームの4チームで構成され、ガソリン燃焼チーム<sup>2)</sup>では、22大学から55名の研究者によりガソリンエンジンの熱効率を50%以上にするための研究開発を推進している。今回は、エンジンの冷却損失を低減する要素技術の開発に必要な、冷却損失を定量評価する高精度な壁面熱流束センサを開発している若手研究者に、それぞれ開発している熱流束センサの概要を解説いただいた。ガソリン燃焼チームでは、特色が異なる3種類の熱流束センサの開発を進めている。それぞれの開発センサの詳細については、開発者自身の解説記事をご覧ください。ここでは、以下に三つの開発センサの特色について簡単に述べる。

(1) 薄膜熱電対熱流束センサ(石井大二郎): 燃焼室内壁面における熱流束を高精度に計測するために開発しているセンサである。薄膜熱電対熱流束センサは従来から存在するが、新開発センサでは薄膜厚さを従来の数分の一にまで薄くし、高応答化している。さらに材料選択、薄膜形成技術、熱流束計測のための配線、増幅器、電源の全要素について精査し、高精度冷却損失定量評価システムとして開発している。高精度熱流束センサの開発にとどまらず、その製作パラメータの設定指針や信号取得システムの設計指針の確立を目指しており、これらが達成されれば、従来、ごく限られた研究者のみが実施可能であった高精度冷却損失定量評価を、より多くの研究者、技術者が実施することが可能となり、この分野の発展に大きく貢献すると期待される。

(2) 隣接3点熱流束センサ(出島一仁): MEMS技術を駆使して、直径0.9mm内に3点の計測部を形成した熱流束センサである。感温部は白金抵抗体である。自己加熱を用いたキャリブレーション機能を有する。サブミリスケールで3点の熱流束を同時計測できるため、熱流束の変動成分の空間スケール解析、面内熱流束ベクトル解析等、従来センサでは不可能であった解析を可能としている。従来の熱伝達機構解明のための研究において、流れ場の乱流特性の計測例は多いが、これに対応する壁面熱流束の変動計測では変動強度程度の情報しか計測されておらず、このセンサにより壁面熱流束の変動の空間スケール等の情報が計測できるようになれば、乱流が壁面熱伝達に与える影響についてより詳細な機構解明が展開されるようになると期待される。

(3) 無線伝送熱流束センサ(李敏赫ら): 燃焼室内壁面の熱流束計測を行う場合、燃焼室内に設置されたセンサからの測定信号を、燃焼室外部へ伝送することが問題となる。冷却系等に覆われているエンジンにおいて燃焼室内部から信号出力用ケーブルを外部へ取り出すための加工を施すことは難しく、無線で信号を外部へ伝送できれば、測定点の自由度が大きく増すと期待される。ここでは、燃焼室内部に設置される計測センサと送信回路、外部に設置される受信回路をLCR共振回路とし、センサ感温部の抵抗体の温度による抵抗値変化をこの

# ENGINE REVIEW

SOCIETY OF AUTOMOTIVE ENGINEERS OF JAPAN *Vol. 8 No. 8 2018*

LCR 回路の共振点の変化として検出することで表面温度を計測する。また、燃焼室内部に設置されるセンサと送信回路は、MEMS 技術により数ミクロン厚の柔軟な樹脂板上に形成され、これにより曲面を有する壁面に設置可能となる。現在の試作品では信号伝送距離が短いため、エンジン内への適用には課題を有するが、設置場所を選ばない熱流束センサが開発されれば、エンジンに限らず、エネルギー変換システムの冷却損失計測に広く利用されることになろう。

## 【参考文献】

- 1) <http://www.jst.go.jp/sip/k01.html>
- 2) <http://sip.st.keio.ac.jp/>

## エンジン燃焼室壁面における熱流束定量計測のための 高精度同軸型薄膜温度センサの開発\*

Development of high precision coaxial type thin film temperature sensor for quantitative measurement of heat flux on combustion chamber wall of the engine

石井 大二郎  
Daijiro Ishii  
東京都市大学大学院

三原 雄司  
Yuji Mihara  
東京都市大学 工学部/総合研究所 HEET

**KEY WORDS:** Heat Engine, Wall Temperature, Thin-Film Temperature Sensor, Heat Flux

### 1 まえがき

近年、地球温暖化への対応のために、ガソリンエンジンの熱効率向上が益々求められている。これらの課題に対して、内閣府戦略的イノベーションプログラム(SIP)「革新的燃焼技術」では熱効率 50%の実現を目標として、新規技術の創出を前提とした基礎研究から応用研究が推進されている。その熱効率 50%を実現するにはエンジンの各種損失を低減することが重要で、エンジンに投入される全熱量のうち 3 割程度を占める冷却損失の低減は非常に重要である。一般的には、燃焼室ガスから壁面への損失(冷却損失)を定量的に把握するために、Woschni の式<sup>1)</sup>に代表される燃焼室全体の空間平均熱伝達率の予測式が利用される。一方で、燃焼室壁面材料および形状の改良による局所的な冷却損失低減技術<sup>2)</sup>やノック改善のための熱伝達促進技術<sup>3)</sup>等が局所的な冷却損失の分布に与える影響を検証および解析するためには、局所的な壁面温度および熱流束を高精度に計測する必要がある。筆者らは独自に開発した機械の摩擦しゅう動面の圧力・ひずみ・距離計測用の薄膜センサ技術<sup>4), 5)</sup>を応用して、図 1 に示すような燃焼室表面およびしゅう動面に K 型薄膜熱電対(クロメル、アルメル)や測温抵抗体(チタン)を直接形成する壁面直接計測用薄膜温度センサと燃焼室壁面に挿入して表面の瞬時温度や熱流束の計測が可能な同軸型薄膜温度センサを開発<sup>6) - 8)</sup>し、エンジンや急速圧縮膨張装置(Rapid Compression Expansion Machine: RCEM)に適用してきた。特に、SIP 研究では様々なエンジン部品(ヘッド、ライナー、ピストン等)での計測を対象としており、さらに多気筒エンジンとなると成膜装置に取り付けられるサイズにも制約があり、汎用性の高い同軸型センサの開発を進めてきた。本報ではそのセンサの構造、精度および実験に必要な瞬時応答性に関する検討事例および計測例について述べる。

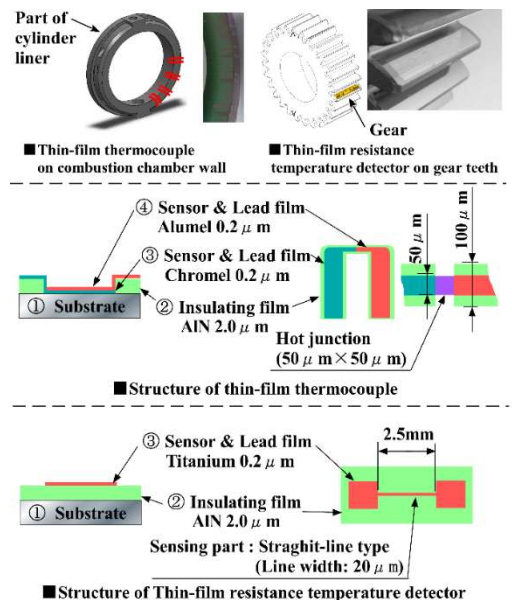


Fig.1 Temperature sensor using thin-film

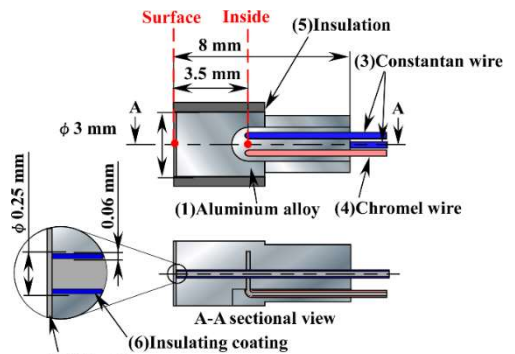


Fig.2 Coaxial type thin-film temperature sensor



# ENGINE REVIEW

SOCIETY OF AUTOMOTIVE ENGINEERS OF JAPAN Vol. 8 No. 8 2018

## 2 同軸型薄膜温度センサの基本構造と特徴

本センサは、温度に対して電圧(熱起電力)変化する熱電対法を原理としており、代表的なセンサ構造は図2に示すように、本来の壁面温度分布を極力乱さないようにセンサボディ(1)は燃焼室と同等材質(例えば、エンジンヘッド用アルミ合金 AC2B 等)を使用し、外径は 3mm、長さ 8mm としている。センサ中心に心線となるコンスタンタン線(3)を挿入しボディ表面と面一として、その表面にスパッタリング法(PVD, Physical Vapor Deposition)を用いて数 100nm~1 $\mu$ m の薄膜(2)を形成する(薄膜材料については、2.2 章以降で述べる)。表面から任意の深さ位置(3.5mm)には、クロメル線(4)とコンスタンタン線(3)を挿入して、深さ位置の定常温度を計測する。センサを埋め込む際は熱伝導率の極めて小さい熱硬化樹脂接着剤(断熱層)(5)を用いて被測定物に埋め込み、深さ方向への一次元熱流れを仮定した。

## 3 低雑音および高応答計測システムの開発

図3に示すように計測システムの構成は、同軸型薄膜温度センサ(a)から壁面(表面)の温度上昇により微小電圧変化が生じ、瞬時温度計測用に開発された高応答(~600kHz)および低雑音の差動増幅器(b)によってその微小電圧を増幅させ、データロガーもしくは燃焼解析装置(d)に記録している。また、差動増幅器(d)は直流電源(c)により電源を供給し、直流電源(c)とデータロガー(d)は無停電電源装置(e)(以下、UPS)によって電源を供給している。UPS(e)は、内蔵バッテリーにて各計測器に電源を供給することによって、図4に示すように実験装置の稼働時における電源からのノイズを大幅に低減し、S/N 比および応答性(~600kHz)が大きく向上した。

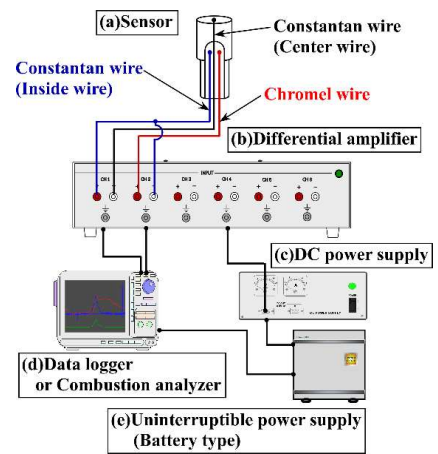


Fig.3 Low noise measurement system

## 4 熱電対法則(熱電回路)に基づく熱接点位置の検討

同軸構造の薄膜温度センサは、①:表面と任意の深さ位置の瞬時温度差と②任意の深さ位置の定常温度(内壁面温度)を2組熱電対(片側1本は共通)で計測可能である。図5(A)に示すように、センサは薄膜、母材、心線(内壁面線)で構成され、それらの三つの材料が異なると三つの接点( $T_a$ ,  $T_b$ ,  $T_c$ )が形成され、3点の温度関係によって熱起電力が発生するため、薄膜-心線の接触面内(円形状)の平均温度( $T_a$ )と薄膜-母材の接触面内(円環形状)の平均温度( $T_b$ )に温度差が生じると、表面と深さ位置の温度( $T_c$ )差を正しく計測できない。一方で薄膜と母材が同材質の場合(図5(B))は $T_a$ と $T_c$ の温度差、薄膜と心線が同材質の場合(図5(C))は $T_b$ と $T_c$ の温度差を測定可能である。以上より、測定起電力Eはそれぞれ材料の接触面温度( $T_a$ ,  $T_b$ ,  $T_c$ )と熱電能( $\sigma_t$ ,  $\sigma_b$ ,  $\sigma_w$ )を用いて(1)式のように表される<sup>9)</sup>。

$$E = \int_{T_2}^{T_1} \sigma_t + \int_{T_3}^{T_2} \sigma_b + \int_{T_1}^{T_3} \sigma_w = \int_{T_2}^{T_1} (\sigma_t - \sigma_b) + \int_{T_1}^{T_3} (\sigma_w - \sigma_b) \quad (1)$$

ただし、 $\sigma_t$ ,  $\sigma_b$ ,  $\sigma_w$ : それぞれの材料の絶対熱電能  $T_1$ ,  $T_2$ ,  $T_3$ : 各部の接触面(接点)内平均温度

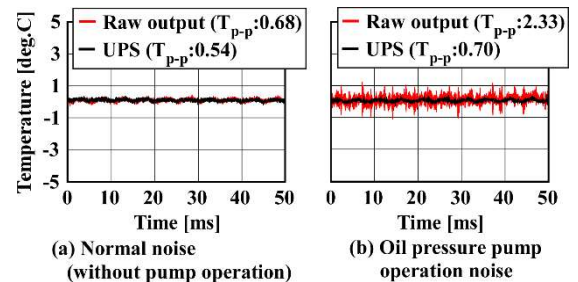


Fig.4 Uninterruptible power supply noise test

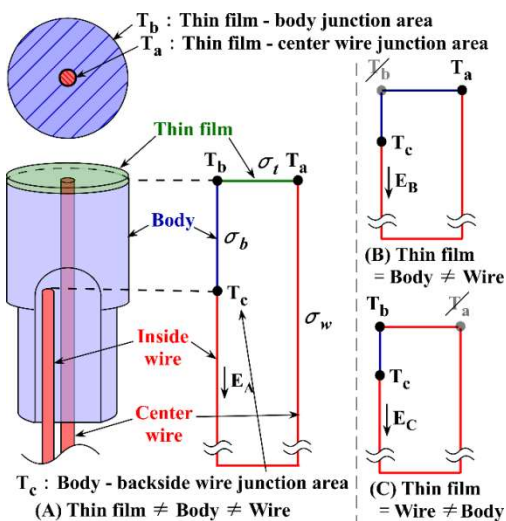


Fig. 5 Thermal electromotive circuit

このように、図 2(a)のように薄膜、母材、心線の材料が異なると計測位置(領域)も特定できず、表面と任意の深さ位置も正確に計測出来ないことが考えられる。

## 5 数値解析による熱接点(面)位置の検討

表面と深さ位置の温度差を高精度に計測するためには、母材と同材質である薄膜(アルミ合金薄膜、以下、Al 薄膜)、心線と同材質である薄膜(コンスタン薄膜、以下、Con 薄膜)をそれぞれ形成した場合に得られる  $T_a$ 、 $T_b$  のどちらの接点温度を選択することで本来の壁面温度に近い計測が可能か数値解析によって検討した。解析方法は、燃焼室壁面にセンサが埋め込まれた場合の二次元円柱座標系網目要素モデルを用いて各格子点の熱エネルギーバランスよりモデル内の温度分布を求める階差式<sup>10)</sup>を導出し、ガス温度および熱伝達率をセンサ表面の境界条件として与えて、モデル内の温度分布を求めた。この結果、図 6(a)のように Con 薄膜の場合には燃焼室壁面のみ計算結果とほぼ同等の温度振幅が得られたが、Al 薄膜の場合には、心線上が計測点となり、温度振幅は 3~4 倍大きい結果となった。次に、これらの表面温度と内壁面(3.5mm)温度を境界条件として、フーリエの一次元熱伝導基礎微分方程式から差分近似し、センサ母材(壁面材料)の熱物性値を用いて熱流束を求めた結果、図 6(b)に示すように Con 薄膜を用いた場合は燃焼室壁面のみ熱流束解析結果とほぼ一致したが、Al 薄膜の場合は熱流束の最大値が 2.5 倍程度大きくなり、さらに膨張行程では熱流束が大きく減少した。この結果、母材を燃焼室と同材質とする場合は心線と同材質の薄膜を形成することで熱接点(測温点)位置が母材上となるので高精度な計測が可能であることが示唆された。

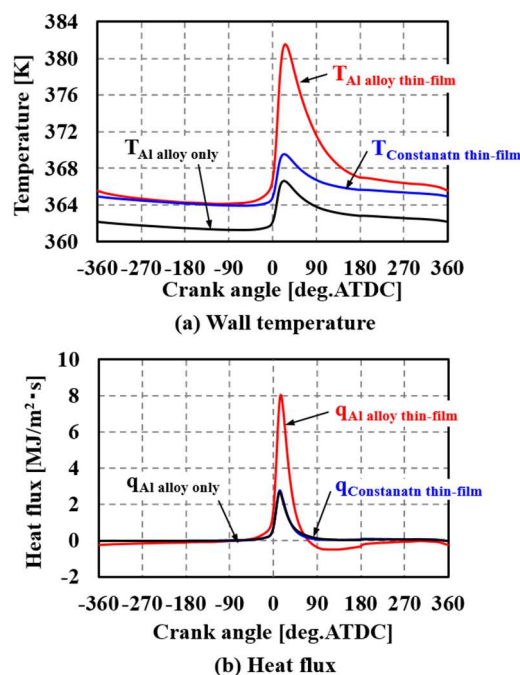


Fig. 6 Influence of difference of thin film material on numerical analysis result

## 5.1 実験検証に必要な応答特性評価

同軸型薄膜温度センサの応答性評価のために、熱流束の立ち上がりを評価可能な検証装置を開発した。この検証装置は図7に示すようにセンサ(d)を精密サンプルホルダ(c)に固定し、センサ(d)表面に一定熱量のレーザ(a)を照射させ、そのレーザ光(a)を一定に回転するチョップパ(b)で遮ることによりレーザ熱量の矩形波を形成できる。レーザの波長は比較的金属の吸収率が高い532nmのYAGレーザを使用し、チョップパのスロット数と回転数を調整することで、与える熱量の周波数を設定することが可能である。チョップパの開閉時期(センサ表面へのレーザ照射時期)は、センサ表面から反射したレーザ光をフォトダイオードによって計測している。なお、反射するレーザ光の速度は無視し、フォトダイオードの応答特性(立ち上がり周波数)は1GHzである。図8にチョップパ周波数が500Hzにおける同軸型薄膜温度センサの熱流束解析結果とチョップパの開閉時期(フォトダイオードの信号)を示す。レーザが照射されている際の熱流束平均値を100%とし熱流束の遅れ時間(63.2%値)は、フォトダイオードの立ち上がり時間を基準として20 $\mu$ s以下(=50kHz)となることがわかった。以上より、本エンジン実験では1000rpm, 0.5deg. CA(=12kHz)で取得しているため、本センサは十分な時間分解能を有していることを確認した。

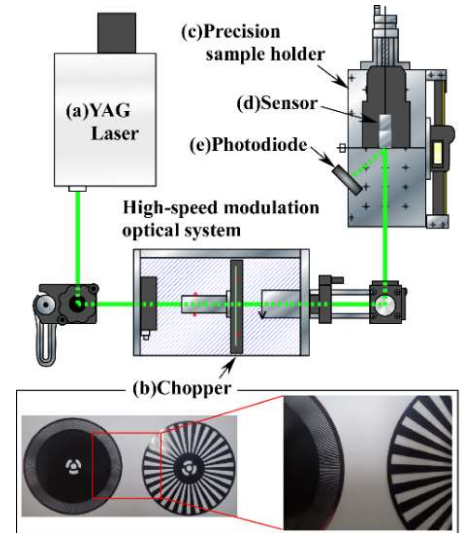


Fig. 7 Instantaneous responsiveness evaluation system

## 5.2 実測(実験)解析による熱接点(面)位置の検討

5章の数値解析結果の妥当性を検証するために、試験用単気筒エンジンのシリンダヘッド壁面にセンサを取り付け、壁面温度計測と熱流束解析を実施した。

実験装置は、水素を燃料とする試験用単気筒エンジンを使用した。図9に示すように、センサは噴流飛翔 Leading 側と反飛翔 Trailing 側に2箇所埋め込んだ。筒内圧力および壁面温度の実験結果を図10に示す。同条件下でAl薄膜とCon薄膜のセンサをそれぞれ取り付けた際の筒内圧力の差は、最大値に対して2%未満(100kPa程度)で大きく燃焼状態は変化していないと考えられる。壁面温度は両センサともにAl薄膜の場合、Con薄膜に対して約3倍の温度振幅を示しており、熱流束も図11に示すように約3倍大きく、膨張行程における熱流束は大きく減少した。これらの結果は数値解析とほ

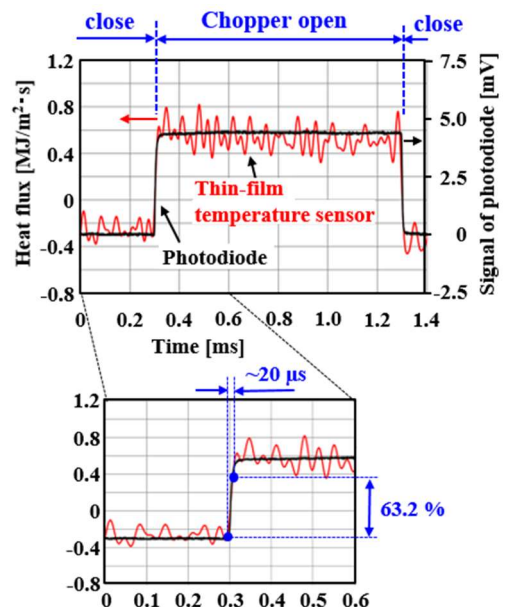


Fig. 8 Instantaneous responsiveness of the sensor

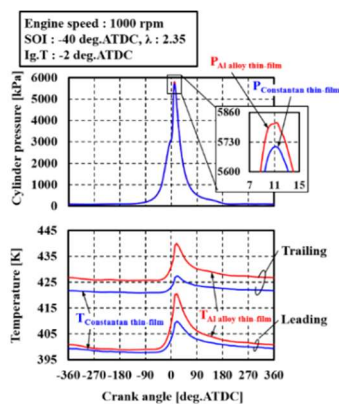


Fig. 10 Cylinder pressure and wall surface temperature

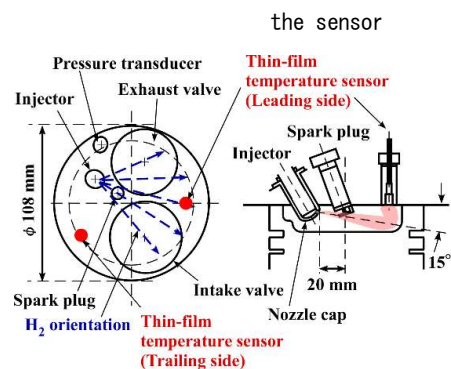


Fig. 9 Location of thin-film temperature sensor

# ENGINE REVIEW

SOCIETY OF AUTOMOTIVE ENGINEERS OF JAPAN Vol. 8 No. 8 2018

ば同等の傾向を示しており、同軸型薄膜温度センサでの計測精度の向上のためには、センサボディを燃焼室壁面と同じ材料にし、この材料の表面にコンスタンタン心線の場合はコンスタンタン薄膜を表面にスパッタリングすることでセンサボディ表面の高精度な瞬時温度および熱流束を計測することができることがわかった。

## 4 結言

冷却損失低減技術の検証および最適化のために、筆者らは燃焼室壁面温度および熱流束の高精度計測を目的として、同軸型薄膜温度センサの代表的な形状例および解析例、計測例について紹介してきた。得られた主な結果を以下に示す。

- (1) 同軸型薄膜温度センサは、燃焼室壁面での熱流束計測に多く用いられてきたが、計測原理に基づき計測精度を数値解析および実測解析から明らかにした事例は少なく、本研究では、センサボディを燃焼室壁面と同じ材料にし、この材料の表面に心線と同材質の薄膜を形成することでセンサボディ表面の高精度な瞬時温度および熱流束を計測することができることがわかった。
- (2) 計測システムは、各計測器の電源を無停電電源装置で供給することによって、実験装置の稼働時における電源からのノイズを大幅に低減し、S/N 比および応答性(～600kHz)を大きく向上させた。
- (3) 応答特性評価装置によって、センサの熱流束の立ち上がり時間(63.2%値)を検証し、 $20\mu\text{s}$ 以下(=50kHz)となることがわかった。ただし、本検証は輻射による伝熱のため、センサ表面の粗さや色によるセンサ表面の反射率等の影響も今後検討を進めていく。

このように、著者らは「実証第一」を目的として、定量的な熱流束を実験中に直読できる(実験後に補正のない)高精度な熱流束計測システムの構築を進めてきた。今後は、これらのセンサを用いた冷却損失低減効果の検証および最適化を進めていく。

## 謝辞

本研究は内閣府戦略的イノベーション創造プログラム(SIP)革新的燃焼技術での研究成果をまとめた内容である。本研究の推進にご協力頂いた各関係者に深く感謝する。

## 【参考文献】

- 1) G. Woschni : A Universally Applicable Equation for the Instantaneous Heat Transfer Coefficient in the Internal Combustion Engine, SAE Paper670931 (1967)
- 2) 脇坂佳史ほか : 壁面スイング遮熱法によるエンジンの熱損失低減(第2報), 自動車技術会学術講演会前刷集, (2015)
- 3) 松浦勝也ほか : 局所熱伝達促進によるノック限界改善手法の提案, 自動車技術会学術講演会前刷集, (2016)
- 4) 三原雄司ほか : 薄膜センサーによる内燃機関主軸受の油膜圧力測定法の開発に関する研究, 自動車技術会論文集
- 5) 三浦宏太ほか : 油膜を計測する薄膜型センサの開発, 日本機械学会 2015 年度年次大会
- 6) 石井大二郎ほか : 燃焼室壁面温度計測用薄膜温度センサの開発に関する研究, 第 34 回センシングフォーラム(計測部門会)
- 7) 石井大二郎ほか : しゅう動部の表面温度を計測する薄膜温度センサの開発, 日本機械学会 2015 年度年次大会
- 8) Ishii, D. et al : Instantaneous Surface Temperature Measurement in Internal Combustion Engine Using Newly Developed Coaxial

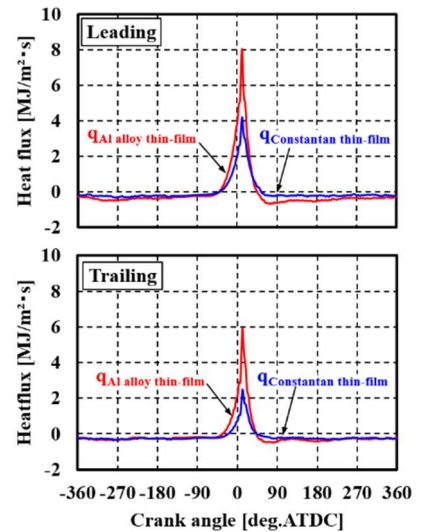


Fig.11 Heat flux (Leading and trailing)

# ENGINE REVIEW

SOCIETY OF AUTOMOTIVE ENGINEERS OF JAPAN *Vol. 8 No. 8 2018*

Type Thin-film Temperature Sensor, SETC2017

9) 柳澤一郎ほか：伝熱研究における温度測定(1985)，pp. 28-29，養賢堂

10) 榎本良輝ほか：内燃機関の燃焼室表面瞬間温度測定用熱電対に関する研究，日本機械学会論文集（B編），Vol. 50，No. 453，pp. 1353-1362(1984)

## 隣接 3 点センサによるエンジン燃焼室における熱流束の計測および解析

Heat Flux Measurement and analysis in an engine combustion chamber with an adjacent three-point sensor

出島 一仁

Kazuhito Dejima

明治大学大学院

Meiji University graduate school

中別府 修

Osamu Nakabeppu

明治大学

Meiji University

A three-point heat flux sensor has been developed with MEMS (Micro-Electro-Mechanical Systems) technologies for evaluating turbulent heat transfer on engine inner walls. This sensor has three RTDs (Resistance Temperature Detector) with the size of 315  $\mu\text{m}$  on a 900  $\mu\text{m}$  diameter circle. The RTD has two important advantages, that is, self-heating for heat flux calibration and a high signal to noise ratio. In measurement tests using a spark ignition type engine, the sensor detected a wide cyclic variation of instantaneous heat fluxes. In addition, turbulent properties were estimated from the adjacent three heat fluxes.

**KEY WORDS:** Heat Engine, Spark ignition engine, Measurement/Diagnosis/Evaluation, Heat flux measurement (A1)

### 1 ま え が き

環境・エネルギー問題を背景として、電気自動車や燃料電池自動車の開発が進められている。しかしながら、価格やインフラ整備、航続距離、加えて電気自動車では充電時間等に課題があり、すぐさま内燃機関（エンジン）に代わることは難しい。国際エネルギー機関（IEA）の予測<sup>1)</sup>によれば、2050年においても世界の自動車の半数以上はエンジンを動力源として利用する。従って、エンジンの高効率化は電気自動車等の研究開発と同等に重要な課題といえる。

日本では内閣府の主導によって2014年に戦略的イノベーション創造プログラム（SIP）「革新的燃焼技術」<sup>2)</sup>が発足し、エンジンの最高熱効率率50%の達成を目標として国を挙げた総合的な研究が行われている。熱効率向上のためには各種損失の低減が必要であるが、中でも燃料の持つエネルギーの20 - 40%を占めるといわれる冷却損失の低減が不可欠である。しかし、エンジンの燃焼室壁面における熱伝達特性には未だ不明な点が多く、詳細な実験データに基づく熱伝達メカニズムの解明が求められている。また、SIPのもう一つの目的に高精度エンジンシミュレータ「HINOCA」の開発がある。エンジン内で生じる現象は高速かつ複雑なため、高精度な数値シミュレーションを行うためには信頼できる実験データとの十分な比較・検証が不可欠である。

以上のような背景から、本研究ではエンジン壁面における伝熱現象を詳細に測る熱流束センサの開発を行っている<sup>3)-6)</sup>。開発したセンサによる測定を通じ、数値シミュレーションの妥当性検証および熱伝達メカニズムの解明を目指している。本稿では、著者らの熱流束センサおよび熱伝達評価法に関する最新の取り組みについて紹介する。

### 2 隣接 3 点熱流束センサの開発

#### 2.1 隣接 3 点熱流束センサ

エンジン壁面熱伝達メカニズムが解明されない原因として、現象の複雑さと測定の高難しさが挙げられる。燃焼室内の環境は、ピストンによる圧縮膨張および燃焼によって温度、圧力、化学種が高速に変化する上、ガス側にはマイクロ～ミリメートルオーダーの様々なスケールの乱れが存在する。このような背景から、実験による詳細な測定や数値計算によるアプローチが難しく、熱伝達メカニズムの解明が困難なものとなっている。

# ENGINE REVIEW

SOCIETY OF AUTOMOTIVE ENGINEERS OF JAPAN Vol. 8 No. 8 2018

エンジン熱伝達を調べるには高い精度と時空間分解能および耐久性を有し、低ノイズな測定技術が求められる。しかしながら、従来センサの多くは測定点の一つしか有していない上にノイズが大きく、熱伝達現象の実像を捉えることができていない。そのため、時間あるいは空間平均的な熱伝達特性の議論に終始せざるを得なかった。

そこで本研究では、MEMS (Micro-Electro-Mechanical Systems) 技術を用いてセンサ製作を行った。MEMS 技術とは微細加工技術の一つであり、厚さ数百ナノ～数マイクロメートルの薄膜を数マイクロメートルの分解能で成膜することができる。これにより、燃焼場の乱れと同等の空間スケールに複数の測定点を形成することが可能である。

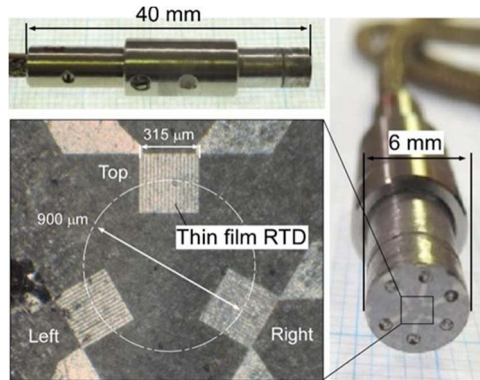


Fig.1 Three-point MEMS heat flux sensor.<sup>6)</sup>

図1に開発した隣接3点熱流束センサを示す。本センサはエンジン壁面材料として広く利用されるAl合金基板(直径6mm, 厚さ4mm)上に、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>絶縁層(厚さ2μm)、Ptセンサ層(厚さ0.65μm)、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>保護層(厚さ2μm)が成膜された構成となっている。本センサの特徴は、測定手法として薄膜抵抗体方式を採用したこと、隣接する三つの測定点を有することである。以下に、それぞれの利点と狙いを示す。

## 2.2 測温抵抗体による壁面温度測定

一般に、エンジン用熱流束センサは熱電対により壁面温度を測定し、非定常熱伝導解析から熱流束を算出する。しかし、熱電対型では熱起電力に関する不確かさ、センサ内部構造を反映した熱伝導解析における熱抵抗の不確かさ、センサの個体差に対応できないこと等が懸念され、正確な熱流束測定法が求められている。

本センサでは、壁面温度測定法として抵抗値の温度依存性を利用した測温抵抗体(RTD: Resistance Temperature Detector)を採用した。RTDは外部から電圧を印加することにより、既知の発熱を生じさせることができる。そこで、壁面温度から求められる測定熱流束と、供給する電流・電圧およびRTDの面積から求められる付与熱流束を比較し、両者が一致するように熱伝導モデルを修正する熱流束較正法を開発した<sup>7)</sup>。従来の熱流束センサでは熱流束較正法が確立されていないため定量性に懸念があったが、本センサでは較正を実施することで、信頼性の高いデータを取得できるようになった。

また、RTDは外部から電流を供給して能動的に温度を測るため、熱電対に比べて感度を高くすることができ、良好なS/N比での測定が可能というメリットもある。例えば、熱電対の中で最も一般的なK型熱電対(アルメル-クロメル)の熱起電力は約40μV/Kであるが、本センサ(抵抗値200Ω、抵抗温度係数0.002K<sup>-1</sup>、測定用電流2μA)の出力は約800μV/Kであり、K型熱電対と比べて20倍程度の感度を有する。

## 2.3 隣接3点センサによる局所熱流束分布の取得

開発したセンサには、一辺315μmのRTDが直径900μmの円周上に三つ(Top, Left, Right)形成されている。三つのRTDを同一直線上から外して配置することで面内の二次元熱流束分布を取得し、流速や乱れスケールといった気相側の情報を抽出することを狙っている。熱伝達メカニズムを明らかにする上で流動場の情報は不可欠であるが、エンジンの場合は光学的アクセスが難しく、特に壁面近傍の流動特性には不明な点が多い。従って、本センサにより熱伝達特性と同時に流動特性を取得できれば、熱伝達メカニズム解明へ向けて新たな知見が獲得できると期待される。

## 3 実験用エンジンにおける熱流束測定

### 3.1 実験装置および条件

開発した熱流束センサを用い、実験用エンジンにおいて測定試験を行った。図2に本研究で使用した単気筒火花点火式ガソリンエンジンの概略図を示す。ボア×ストロークは75mm×112.5mmであり、圧縮比は13:1である。MEMSセンサはシリンダヘッド部の中央から32mmの位置に

# ENGINE REVIEW

SOCIETY OF AUTOMOTIVE ENGINEERS OF JAPAN Vol. 8 No. 8 2018

設置した。

実験条件を表1に示す。エンジン回転数 2000 rpm, 当量比 0.8 とし, 図示平均有効圧力 (IMEP: Indicated Mean Effective Pressure) 400 kPa の低負荷条件にて測定を行った。点火時期は MBT (Minimum advance for the Best Torque) とした。RTD からの信号はカットオフ周波数 10 kHz のローパスフィルタおよびゲイン 100 のアンプを介して出力した。測定は連続 200 サイクルの間行い, クランク角度 0.1° 毎 (120 kHz 相当) に壁面温度を取得した。得られた温度データを 5 点平均 (24 kHz 相当) し, 三次元非定常熱伝導解析<sup>6)</sup>により熱流束を求めた。

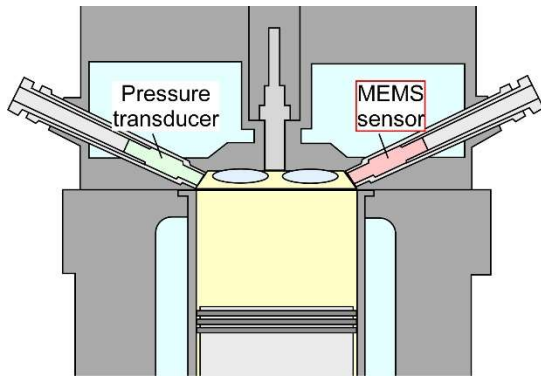


Fig. 2 Schematic diagram of spark ignition type gasoline engine.<sup>6)</sup>

Table 1 Experimental conditions

IMEP	400 kPa
Engine speed	2000
Equivalence ratio	0.8
Compression ratio	13:1
Ignition timing	MBT (-24 CAD ATDC)
Intake valve open / close	-362° / -123° after TDC
Exhaust valve open / close	147° / 349° after TDC
In-cylinder flow	Enhanced tumble flow(with intake port adapter)
Coolant temperature	80 °C

### 3.2 瞬時熱流束のサイクル変動

まず, 単点で測定された瞬時熱流束 (下段), 条件付きアンサンブル平均熱流束 (中段), 200 サイクルアンサンブル平均熱流束 (上段) を図 3 に示す。ここで, 条件付きアンサンブル平均では 200 サイクルの瞬時データからピークを取るクランク角度が $\pm 2^\circ$ 以内で一致するものを抽出し, アンサンブル平均を取った。瞬時熱流束について測定ノイズを評価すると, 標準偏差で  $13.2 \text{ kW/m}^2$  であった。MW/m<sup>2</sup> オーダーの熱流束が生じるエンジン熱伝達において, このノイズレベルは十分小さいと判断できる。

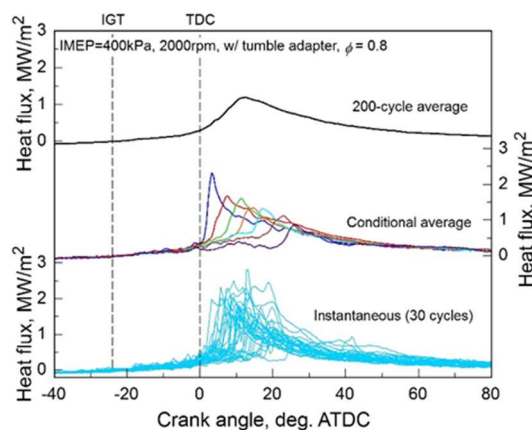


Fig. 3 Instantaneous (lower), conditional ensemble average (middle) and 200-cycle ensemble average (upper) heat fluxes.<sup>6)</sup>

従来研究ではアンサンブル平均のみの議論が大半であったが, 本センサは低ノイズ化により, 評価に足る瞬時値を得ることに成功した。アンサンブル平均熱流束のピーク値は  $1.2 \text{ MW/m}^2$  であったが, 瞬時値のピーク値を平均すると  $1.8 \text{ MW/m}^2$  となり, アンサンブル平均に対して有意に大きく評価された。これは, センサへの火炎到達時期がサイクル毎に異なるので, 単純にアンサンブル平均を取ると波形が過度に鈍化するためである。すなわち, アンサンブル平均値のみでエンジン熱伝達特性を評価することは, 現象の本質を見誤る危険があり, 十分とはいえない。



一方で、瞬時値のみではデータ量が多く、扱いが煩雑となる。そこで、条件付きアンサンブル平均を取ることで、火炎到達時期に対する熱伝達特性を理解しやすくなる。図3ではピーク位置が上死点に近いほど熱流束が大きくなる傾向が見られ、火炎到達時の圧力が熱流束の大きさを決める重要なパラメータであることが推察される。

本センサは熱流束をサイクル毎に評価できるほどの低ノイズ化に成功し、従来のアンサンブル平均ベースの議論では見落とされていた瞬時熱伝達特性を明らかにする上で有用なツールとなり得る。また、熱伝達特性の評価や数値シミュレーションの妥当性検証をする場合は、アンサンブル平均だけでは不十分であり、条件付きアンサンブル平均や瞬時値も利用するべきであることが示された。

### 3.3 瞬時熱流束の局所分布と乱流特性の抽出

次に、隣接3点で同時測定された瞬時熱流束を図4に示す。Cycle A（下段）では3点でよく似た波形が得られており、測定領域に概ね一様な燃焼場が伝播したと推察される。一方で、Cycle B（上段）ではピーク値や位相が互いに異なっている。直径  $900 \mu\text{m}$  の測定領域において異なる傾向の波形が得られたことは、気相側にサブミリメートルオーダーの乱れが存在することを示唆している。

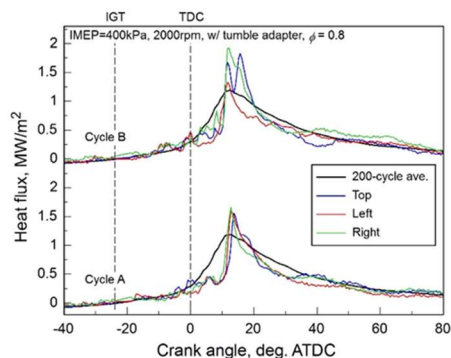


Fig. 4 Local heat fluxes simultaneously measured with the three RTDs.<sup>6)</sup>

3点の熱流束データから、流速の推定を行った。図5に、フーリエ変換を用いて周波数分離した瞬時熱流束を示す。ここで、低周波数成分はピストンによる圧縮膨張や対流（主流）による熱流束を表し、高周波数成分は乱流渦（乱れ）による熱流束変動を意味すると仮定する。高周波数成分の振幅は  $0.1 \text{ MW/m}^2$  オーダーでありノイズに比べて有意に大きく、流動場の変動を反映した信号であると判断できる。火炎到達後の高周波数成分を見ると、三つのRTDのうち、LeftとRightはよく似た波形を示すが、Topは位相が遅れている。この遅れ時間を相互相関解析により求めると、約  $3^\circ$ であった。ここから、壁面熱流束に影響を与える流体塊がまずLeft・Right抵抗体に到達し、その後Topへ伝播したと推察できる（図6）。抵抗体間の距離（ $780 \mu\text{m}$ ）は既知であるため、遅れ時間（ $3^\circ \rightarrow 0.25 \text{ ms}$ ）から流速を推定（ $780 \mu\text{m} / 0.25 \text{ ms} = 3.1 \text{ m/s}$ ）することが可能である。各抵抗体間の流速を合成すれば、測定領域の代表流速を求められる。図7は連続200サイクル分の流速分布を示しており、平均値は  $6.8 \text{ m/s}$ であるがサイクル毎に大きくばらつくことがわかった。

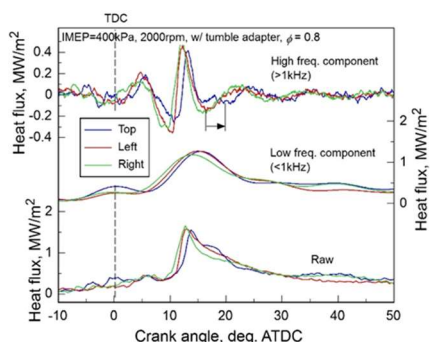


Fig. 5 Frequently-separated heat fluxes.

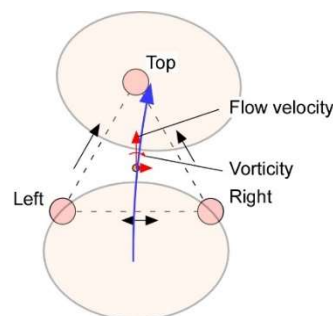


Fig. 6 Schematic diagram of flow field estimated from the local heat fluxes.<sup>6)</sup>

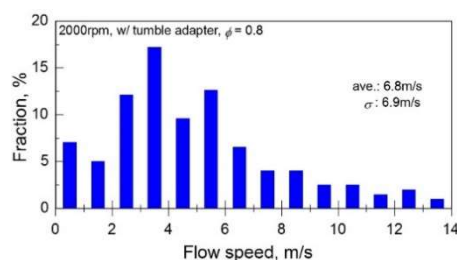


Fig.7 Flow speed estimated from local heat fluxes.<sup>6)</sup>

そのほか、熱流束データから乱流渦スケールや渦度の推定にも取り組んでいる。図3に示したように、瞬時熱流束はサイクル毎に変化するため、1サイクルあたりの冷却損失も大きくならつきを持つ。この熱伝達特性と、壁面熱流束データから推定される乱流特性との関係を調べることで、どのような流動条件においてどの程度の冷却損失が生じるかを明らかにしたいと考えている。どのような条件で冷却損失が少なくなるかを見出すことができれば、そのような状況を作り出すための策を講じることで、冷却損失を低減できることになる。

#### 4 まとめ

エンジン壁面の熱流束を詳細に測ることを目的とし、MEMS技術を用いて隣接3点熱流束センサを開発した。本センサは測温抵抗体方式を採用することで、瞬時熱流束を評価できるほどの低ノイズ化と、定量性を確保するための熱流束較正を可能とした。実験用エンジンでの測定試験では、瞬時熱流束のピーク値、ピークを取るクランク角度がサイクル毎に大きく変化する様子が捉えられた。これは従来のアンサンブル平均ベースの議論では見落とされていた点であり、熱伝達特性の評価や数値シミュレーションの妥当性検証においては、瞬時値や条件付き平均値も利用する必要があるといえる。また、隣接3点で同時に測定された熱流束から流速等の乱流特性の推定を行った。今後本手法で推定される乱流特性の検証は必要であるが、光学的アクセスの難しいエンジンにおいて流動場の情報は貴重であり、熱伝達特性と乱流特性を結び付けて評価することで、エンジン壁面熱伝達の実像を明らかにしたいと考えている。

#### 謝辞

本研究は、総合科学技術・イノベーション会議のSIP（戦略的イノベーション創造プログラム）「革新的燃焼技術」（管理法人：JST）によって実施したものである。また、センサ製作には東京工業大学メカノマイクロプロセス室の設備を利用した。ここに記し、謝意を表す。

#### 【参考文献】

- 1) International Energy Agency, “Energy Technology Perspectives 2012 available from <<https://www.iea.org/>> (2012) (参照日：2018年5月20日)。
- 2) 内閣府, 戦略的イノベーション創造プログラム (SIP) available from <<http://www8.cao.go.jp/cstp/gaiyo/sip/>> (2014) (参照日：2018年5月20日)。
- 3) 中別府修ほか：燃焼場の壁面熱流束を計測する薄膜抵抗センサに関する研究, 日本機械学会論文集, Vol. 82, No. 840 (2016), DOI: 10.1299/transjsme.16-00083.
- 4) 出島一仁ほか：エンジン内壁面の熱流束を測定する金属基板 MEMS センサの開発, 日本機械学会論文集, Vol. 84, No. 858 (2018), DOI: 10.1299/transjsme.17-00414.
- 5) K. Dejima et al.: Three-point MEMS heat flux sensor for turbulent heat transfer measurement in internal combustion engines, Int. J. of Engine Research (2018) (accepted).
- 6) 出島一仁ほか：エンジン用隣接三点 MEMS 熱流束センサの開発, 日本機械学会論文集 (accepted)。
- 7) 中別府修：熱流束センサおよびその較正方法, 被測定物の異常検知方法並びにエンジンの動作異常検知方法, 特願 2015-209118.

## エンジン燃焼室の壁温計測のための MEMS 無線温度センサの開発

Development of the MEMS Wireless Temperature Sensor for Engine Cylinder Wall Temperature Measurements

李 敏赫

Minhyeok Lee

東京大学

The University of Tokyo

權 允鎮

Taejin Kwan

東京大学

The University of Tokyo

森本 賢一

Kenichi Morimoto

東京大学

The University of Tokyo

鈴木 雄二

Yuji Suzuki

東京大学

The University of Tokyo

A MEMS-based flexible wireless temperature sensor was proposed for wall temperature measurements in combustion engines. The sensor corresponding to an LCR resonant circuit is inductively coupled with a read-out coil. Resistance changes of the sensor resistor in response to the temperature change can be quantified with the resonant frequency shift of the circuit. A prototype sensor using a glass substrate was fabricated with standard MEMS processes, and a flexible sensor was also made using a copper-plated polyimide printed-circuit board. A monotonic increase in the resonant frequency was observed with increasing the temperature at the sensitivity of 6.2 kHz/°C. The flexible sensor was attached on the inner surface of a glass cylinder, and the read-out coil was fixed on the outer surface of an optical engine. Crank-angle-resolved measurements of the cylinder wall temperature were performed with a time interval of 1.2 ms. When the engine rotation speed was 718 rpm, the measurement results show approximately 44 °C increases in the wall temperature after the ignition.

**KEY WORDS:** Electronics and control, MEMS, Vehicle sensor, Wireless sensing (E1)

## 1 序言

近年、内燃機関のさらなる高効率化と環境負荷物質排出の低減が要求されている。内燃機関における熱バランスの中で、冷却損失が占める割合は20ないし30%と高い<sup>1)</sup>、冷却損失の低減は重要である。その実現のためには、燃焼室内における火炎の伝播、火炎から壁面への伝熱の正確な把握が不可欠であり、壁面温度と壁面熱流束の情報が必要となる。一般的な温度計測には、熱電対や測温抵抗体が汎用的に用いられるが<sup>2)</sup>、センサと被測定物との間に物理的な接触が必要のため、エンジンのような閉空間内では適用可能な場所が限定される。一方、赤外線温度計、サーモグラフィ、リン光物質の発光減衰時間の温度依存性を用いる Phosphor Thermometry<sup>3), 4)</sup> などによる壁温計測も試みられているが、「光学的アクセス」を得るための窓が必要となる。

そこで、著者らはエンジンシリンダ壁温計測を目的とした無線温度センサの開発を行ってきた<sup>5) - 8)</sup>。本稿では、センサの原理と製作方法、そして本センサの可視化エンジン壁温計測への応用に関して紹介する。

## 2 センサの原理

### 2.1. 無線センサの分類

無線センサは、センサ駆動電源の有無によって二つ方式に分離することができる。能動式センサは、バッテリーのような内部電源を搭載し、測定信号を自ら発信することが可能である。一方、受動式センサは、内部電源を持たないため、外部からの電力供給を必要とする。燃焼場のような過酷な環境での使用を想定すると、回路の耐久性などが問題になる可能性が高いため、単純な回路で構成可能な受動式センサがより適しているといえる。さらに、受動式センサは無線センシングの原理に基づき、電波方式と電磁誘導方式に分類することができる<sup>9)</sup>。一般に、電波方式には、極超短波(UHF: Ultra High Frequency)領域の周波数帯が用いられ、アンテナの小型化が容易で測定可能距離が1m以上と長いメリットがある。一方、電磁誘導方式には、短波(HF)あるいは超短波(VHF: Very HF)が利用される。後者の代表的な例として、13.56 MHzの周波数帯を用いる非接触型ICカードが挙げられる。この方式は、測定距離は短い<sup>6)</sup>、外乱の影響を受けにくい。

### 2.2 電磁誘導式無線センサの動作原理

著者らは、電磁誘導方式に基づいた無線温度センサの開発を行ってきた<sup>7)</sup>。センサは、アンテナの役割をするコイルと、状態の変化を検出するためのLCR共振回路で構成される。図1は、センサと読み取り用コイルの等価回路と、これらの相互関係に基づいた動作原理を模式的に表したものである。センサ側のコイルが読み取り用コイルと電磁結合しているため、センサ回路で起こる共振が読み取り用コイル回路における複素インピーダンスの位相角の落ち込みとして現れる。従って温度変化によりセンサ回路のインピーダンスが変化すると、回路の共振周波数が変化し、そのシフト量から温度変化を間接的に算出することが可能である。

LCR回路を用いるセンサとしては、抵抗値変化型と静電容量変化型の2通りの構成が可能である。コンデンサ電極間距離の変化による静電容量値の変化を読み取る圧力センサが、この原理に基づいたセンサの代表例として挙げられる<sup>10)</sup>。著者ら<sup>7)</sup>は、温度に対する共振周波数変化の感度解析を行い、共振の鋭さを表すQ値が高い場合は静電容量変化型が、低い場合は抵抗値変化型のセンサがより高い測定感度をもたらすことを明らかにした。ここでは、金属の抵抗率が線形な温度依存性を有する性質に着目し、抵抗値変化型の無線温度センサを試作した結果について述べる<sup>7)</sup>。

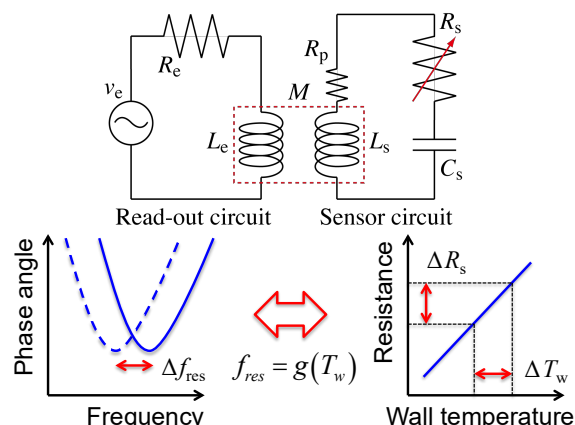


Fig. 1 Equivalent circuit models for the read-out coil and sensor. Correlation between the resonant frequency and the wall temperature is also depicted schematically.

## 3 センサの製作と性能の向上

### 3.1 センサ製作プロセス

センサの試作のため、MEMS (Micro-Electro-Mechanical Systems) 技術を導入した。MEMS とは、転写技術を用いて基板上に電氣的、機械的な小型デバイスを製作する技術である。図 2 は、センサ試作プロセスを模式的に表したものである。まず、スパッタリング法を用いて基板上に 500 nm 厚の金薄膜を形成する。その上に、数ミクロン程度の厚さを持つ感光性樹脂 (フォトリソ) を一様に塗布した後に、転写パターンをガラス基板上に形成したマスクを通して紫外線を照射する。ポジ型のレジストを用いる場合、露光部の現像液に対する溶解度が増大するため、光が当たった部分だけが現像により除去される。次に、金属薄膜のエッチングを行い、レジスト膜を完全に除去することで、設計通りの金属パターンが得られる。以上の一連の過程を「フォトリソグラフィ」といい、MEMS 工程の基本となる。

上記のプロセスで下部電極を形成した後に、化学気相蒸着法を用いて 100 nm 厚の SiO<sub>2</sub> 薄膜を形成する。この SiO<sub>2</sub> 層は、キャパシタの誘電体および上下電極を分離するための絶縁膜としての役割を果たす。上下電極間に導通を取るための部分をエッチングした後に、金薄膜をもう一度形成し、フォトリソグラフィを用いて螺旋状の平面コイルを含めた上部電極部をパターンニングする。試作したセンサの写真を図 3 に示す。

### 3.2 センサの高性能化

センサ回路の抵抗値は、コイルから発生する寄生抵抗 ( $R_p \gg R_s$ ) がほとんどを占めるため、温度センサの検知部面積はコイルの大きさに等しい。センサの空間分解能を向上させるためには、温度測定のための抵抗部をコイルから分離する必要がある。しかし、MEMS 工程に用いられる一般的な金属膜形成法で形成可能な最大膜厚は、せいぜい数ミクロン程度であり、低抵抗のコイルの製作は難しい。

そこで、フレキシブル PCB (Printed Circuit Board) 技術を導入した。図 4 に、センサ試作プロセスの概略を示す。まず、両面銅箔付きポリイミド基板を用いてコイルとキャパシタを形成する。銅箔の厚みが 18 μm 程度と厚いため、寄生抵抗値 ( $R_p$ ) を 1 Ω 以下に抑えることが可能である。温度を測定するための抵抗部 ( $R_s$ , 図 5b) は、図 4c に示すように、ハードマスクを基板上に密着させた状態で金スパッタリングを行って形成した。温度検知部の抵抗値をコイル寄生抵抗値より 20 倍以上にすることで、温度変化による寄生抵抗変化が共振周波数に与える影響を 1%未満に抑えることができる。ポリイミド基板センサの写真を図 5 に示す。ポリイミドは熱的・

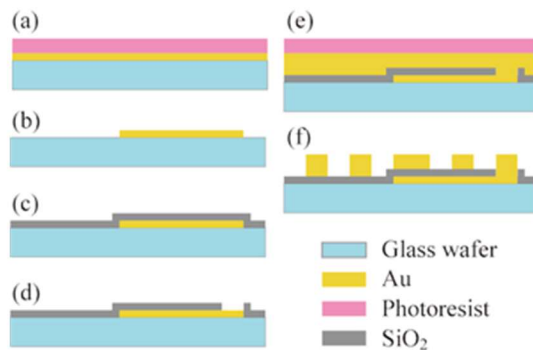


Fig. 2 MEMS fabrication process: (a) Au sputtering and resist-coating, (b) bottom metal layer patterning, (c) SiO<sub>2</sub> layer deposition, (d) SiO<sub>2</sub> etching, and (e), (f) upper metal layer patterning<sup>5), 7)</sup>.

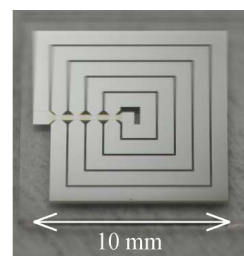


Fig. 3 Photograph of the MEMS-based wireless temperature sensor<sup>5), 7)</sup>.

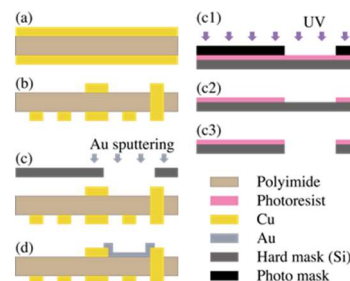


Fig. 4 Sensor fabrication process: (a), (b) Cu layer patterning, (c), (d) Au sputtering for deposition of the resistor part, and (c1)-(c3) Si hard mask fabrication process<sup>6)</sup>.

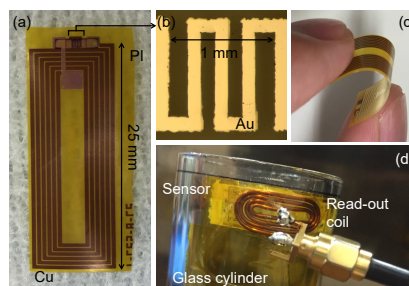


Fig. 5 Photograph of (a) the Polyimide-based MEMS wireless temperature sensor, (b) magnified sensing resistor, (c) flexibility of the sensor, and (d) the glass cylinder fixed with the sensor and read-out coil<sup>6), 8)</sup>.

# ENGINE REVIEW

SOCIETY OF AUTOMOTIVE ENGINEERS OF JAPAN Vol. 8 No. 8 2018

化学的安定性に優れるため、燃焼場での使用に適合しており、図 5c に示すように高い可撓性を有する長所もある。

## 4 センサの性能評価とその応用

### 4.1 センサの性能評価

温度変化に伴うセンサの共振周波数の変化を測定した。図 5d に示すように、

温度センサと読み取り用コイルを、後述する可視化エンジン用のガラスシリンダの両面に固定した状態で、電気オープンに入れた。常温から 200 °C まで 25 °C 間隔で昇温させながら、各温度における共振周波数の測定を行った。

図 6 に、温度と共振周波数の関係を示す。等価回路解析から予測されるように、温度の上昇につれ共振周波数が単調に増加する結果を得た。平均的な感度は、約 6.2 kHz/°C である。

エンジンのように高速で変動する温度場での使用を想定した場合、温度測定部の熱応答時間、一回の測定に必要な測定時間を変動温度場の時間スケールよりも十分小さくする必要がある。前者に関しては、センサを薄型化することにより改善できるが、後者は測定機器の性能に依存する。著者らは、測定点の数を減らし、理論式を用いた最小二乗法により得られる近似曲線から共振周波数を定めることで、測定速度の向上を図った。その結果、最短で 1 ms の時間間隔での測定を実現した<sup>8)</sup>。

### 4.2 可視化エンジン壁温測定への応用

試作したセンサを用いて、可視化エンジンのガラスシリンダ壁面温度計測を行った。測定系の模式図とエンジン (Mark III, Megatech) の仕様を、それぞれ図 7 と表 1 に示す。センサと読み取り用コイルが固定されたガラスシリンダ (図 5d) をエンジンに装着した。測定時には、エンジンピストンの動きと温度測定のタイミングを同期化させる必要がある。そこで、クランク軸に位相計をつけ、ピストンの上死点の位置でパルス信号を生成した。この信号を受けたファンクションジェネレータにより作られた 1.2 ms 間隔のバースト信号を用いて、ネットワークアナライザ (ZNB20, Rohde & Schwarz) をトリガーさせた。

一方、金属製ピストンの動きによりコイル周辺の透磁率が変化し、その影響で共振周波数が変化する。実際にエンジンを駆動しない状態で、クランク角を変化させながら共振周波数を測定した結果、下死点から 90° CA まではほとんど変化がないものの、上死点付近においては下死点对比約 1%の変動が見られた。そこで、エンジン駆動時の測定結果に対して、ピストンの位置を考慮した共振周波数の補正を行った。

図 8 に、点火時期前後における壁温測定の結果を示す。エンジンの回転速

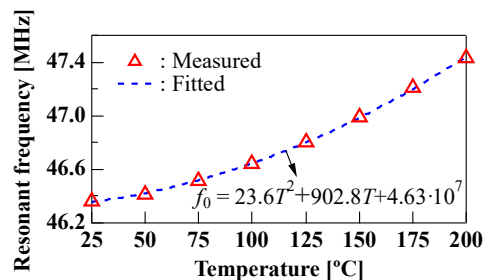


Fig. 6 Measured resonant frequency as a function of the temperature<sup>8)</sup>. The blue dashed line is a quadratic fitting curve.

Table. 1 Specification of the engine.

Engine	Specification
Cycle	4-stroke
Bore × Stroke	41.2 mm × 50.8 mm
Compression ratio	3:1
Fuel	CH <sub>4</sub> 1.5 L/min
Ignition timing	~6° ATDC

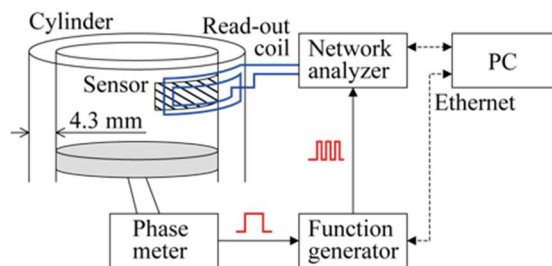


Fig. 7 Schematic of the crank angle-resolved wall temperature measurement system<sup>8)</sup>.

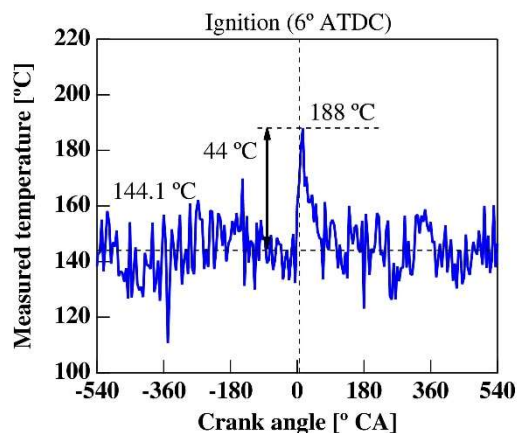


Fig. 8 Measured temperature as a function of the crank angle after compensating the effect of piston movements<sup>8)</sup>.

# ENGINE REVIEW

SOCIETY OF AUTOMOTIVE ENGINEERS OF JAPAN Vol. 8 No. 8 2018

度は、718 rpmである。平均的に144 °Cを示す壁面温度が、着火後に約44 °C程度上昇していることがわかる。一方、壁面温度測定と同時に、高速度カメラを用いてシリンダ内部を撮影した。点火の瞬間と、その7ミリ秒、16ミリ秒後の写真を、図9に示す。点火後の火炎伝播の様子が、十分に捉えられていることが判る。今後、火炎の伝播の傾向と本センサを用いた壁温計測結果を結びつけることにより、シリンダ冷却損失の低減のための知見を得ることができると考えられる。

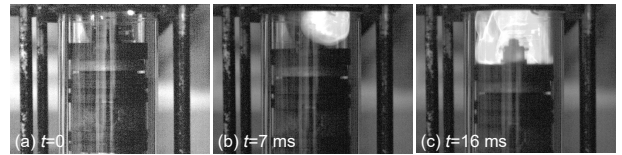


Fig. 9 Flame propagation after ignition inside the glass cylinder captured with 1000 frames per second.

## 5 結言

本稿では、無線温度センサの開発とその応用に関して紹介した。コイル間の電磁結合を用いてセンサ回路の共振周波数を読み取ることで、非接触の温度計測を実現した。センサの試作には、MEMS技術、およびポリイミド基板を用いたPCB技術を導入した。ネットワークアナライザの測定パラメータを最適化することにより、6.2 kHz/°Cの測定感度と、1 msの繰り返し測定時間を実現した。本センサを用いて、可視化エンジンのシリンダ壁温計測を行い、着火直後に約44 °C程度温度が上昇する結果を得た。

## 謝辞

本研究は、総合科学技術・イノベーション会議のSIP（戦略的イノベーション創造プログラム）「革新的燃焼技術」（管理法人：JST）の支援を受けた。ここに記して謝意を表す。

## 【参考文献】

- 1) 石野勲雄, 伊藤あずさ: 新世代技術「SKYACTIV パワートレイン」, マツダ技報, No. 29, p. 29-35 (2011)
- 2) J. Chang, O. Güralp, Z. Filipi, and D. Assanis: "New Heat Transfer Correlation for an HCCI Engine Derived from Measurements of Instantaneous Surface Heat Flux," SAE Pap., 2004-01-2996 (2004)
- 3) N. Fuhrmann, M. Schneider, C.-P. Ding, J. Brübach, and A. Dreizler: Two-dimensional Surface Temperature Diagnostics in a Full-metal Engine Using Thermographic phosphors," Meas. Sci. Technol., Vol. 24, No. 9, p. 095203 (2013)
- 4) S. Someya, Y. Okura, T. Munakata, and K. Okamoto: Instantaneous 2D Imaging of Temperature in an Engine Cylinder with Flame Combustion, Int. J. Heat Mass Transf., Vol. 62, No. 1, p. 382-390 (2013)
- 5) M. Lee, K. Morimoto, and Y. Suzuki: Evaluation of Non-Contact Wall Temperature Measurement Using MEMS Wireless Sensor, SAE Tech. Pap., 2015-01-1997 (2015)
- 6) M. Lee, K. Morimoto, and Y. Suzuki: Flexible Wireless Wall Temperature Sensor for Unsteady Thermal Field, J. Phys.: Conf. Ser., Vol. 660, p. 012019 (2015)
- 7) M. Lee, K. Morimoto, and Y. Suzuki: Development of MEMS Wireless Wall Temperature Sensor for Combustion Studies, Meas. Sci. Technol., Vol. 28, No. 3, p. 035101 (2017)
- 8) T. Kwan, M. Lee, K. Morimoto, and Y. Suzuki: Wall Temperature Measurement in a Visualization Engine Using a Flexible Wireless Sensor, Asian Conf. Therm. Sci., Jeju, ACTS-P00670 (2017)
- 9) 高橋応明: RFID用アンテナ技術の基礎と応用設計事例—電磁誘導方式アンテナとUHF帯アンテナ—, シーエムシー出版(2010)
- 10) O. Akar, T. Akin, and K. Najafi: "A Wireless Batch Sealed Absolute Capacitive Pressure Sensor," Sensors Actuators A Phys., Vol. 95, p. 29-38 (2001)

## 米国エネルギー省 (DOE) におけるスーパートラックプロジェクトの エンジン正味熱効率 50-55% への挑戦

*The Path of a 50-55% Thermal Efficient Engine of Super Truck Project Organized by DOE*

下田 正敏

Masatoshi SHIMODA

### 1 スーパートラックプロジェクト概要

米国において、エネルギー省 (DOE, United States Department of Energy) が中心になり、大型トラック (クラス 8) の燃費低減 (CO<sub>2</sub> の低減) を主目的としてスーパートラックというプロジェクトが 2010 年 4 月より 2015 年 3 月まで 5 か年実施された。現在それが第二次研究として 2016 年 10 月から 2021 年 9 月まで継続されている。本研究は第一次研究、第二次研究ともに、カミンズ、ダイムラー、ボルボ、ナビスターがそれぞれ中心になり、各々の研究開発部門、米国の国立研究所、大学、部品サプライヤーを含めた大規模なチームを結成して推進している。第一次研究の予算の規模としては、5 年トータルで、カミンズ、ナビスターが約 80 億円、ダイムラー、ボルボが約 40 億円レベルであり、その半分を DOE が負担している。カミンズ社はこれに関連した正味熱効率 55% を狙った別のプロジェクトを第一次研究と第二次研究の間 (2015 年 10 月~2017 年 9 月) に予算規模約 9 億円で実施している。これらの研究の進捗報告は、毎年 6 月に DOE 全体の委託研究の報告として Annual Merit Review Meeting が開催され大学、国立研究所等の識者の審査員より実施計画の評価、実施内容、研究の継続、中止、方針転換の審議が行われる。この Meeting は非常に大規模で、昨年も 4.5 日、10 会場であり、表 1 に示すように、大きく分けて車両技術の領域と水素・燃料電池の領域に分かれており、その中に多くの細分化した Session を含んでいる。スーパートラックのプロジェクトは車両技術の領域の中の Advanced Combustion Systems の Session に含まれる。発表資料は Power Point 20 枚程度のものが公開される。しかしこの Power Point には、機密性、守秘義務がないことが明記されており、逆から見れば機密性の高い大事な点、ノウハウ等が開示されていないといえる。そのため各研究項目は示されているが、その結果だけしか記載されておらず、設計、実験の水準等は不明の場合が多い。また、エンジンの実験に関しては、単筒、多筒の複数のエンジンが使われており、実験結果の統一性に欠ける場合が多い。同時に燃費の低減効果も、計算による予測、実験による確認が混在しており、どこまでが実験で確認されているかが不明の場合が多い。以上のように、スーパートラックの発表資料は、技術論文とは少し異なる面があるが、研究実施内容の中で車両分野ではなく、ディーゼルエンジンの熱効率向上に関する部分を中心として、概略の解説を私見を交えて試みる。

Table1 各研究領域の分野

(2017 Annual Merit Review and PEER Evaluation Meeting のプログラムより引用)

VEHICLE TECHNOLOGIES OFFICE PROGRAM AREAS		HYDROGEN & FUEL CELLS PROGRAM AREAS	
ACS	Advanced Combustion Systems	FC	Fuel Cells
EDT	Electric Drive Technologies	H2IN	Hydrogen Infrastructure
EEMS	Energy-Efficient Mobility Systems	H2S	H2@Scale
ES	Electrochemical Storage	MN	Manufacturing R&D
FT	Fuel & Lubricant Technologies	MT	Market Transformation
GI	Grid and Infrastructure R&D	PD	Hydrogen Production & Delivery
LM	Lightweight Materials	SA	Systems Analysis
PM	Propulsion Materials	SCS	Safety, Codes & Standards
TI	Technology Integration	ST	Hydrogen Storage
VAN	Vehicle Technologies Analysis	TV	Technology Validation



# ENGINE REVIEW

SOCIETY OF AUTOMOTIVE ENGINEERS OF JAPAN Vol. 8 No. 8 2018

## 2 スーパートラックの目標値

### 1) 第一次研究の目標値

- ・エンジンでの正味熱効率 50%、またはそれ以上のエンジンベンチでの実証
- ・車両のドライブサイクルでの貨物輸送効率（車両の走行燃費に相当）の 50%またはそれ以上の改善の実証
- ・車両の 24 時間作動サイクル（ドライバーの車中泊を想定）での貨物輸送効率の 68%またはそれ以上の改善の実証
- ・エンジンの正味熱効率 55%の道筋をつける。

### 2) 第 2 次研究の目標値

- ・ 65 マイル走行時において、最低でもエンジン正味熱効率 55%のエンジン動力計試験
- ・最低 125%Freight Ton Efficiency (MPG \* Tons of Freight)の改善
- ・コストエフェクティブな解答の提案
  - ――3 年でのペイバックの優先順位つけ
  - ――利用するカスタマーへの助言

以上のように、第 1 次研究、第 2 次研究ともに図 1 に示すようにエンジンの正味熱効率向上に関する部分と、図 2、3 に示すような車両としての走行燃費の向上に関する部分に大きく二つに分けられる。本報告は、エンジンの正味熱効率向上の部分に限って記述を試みる。

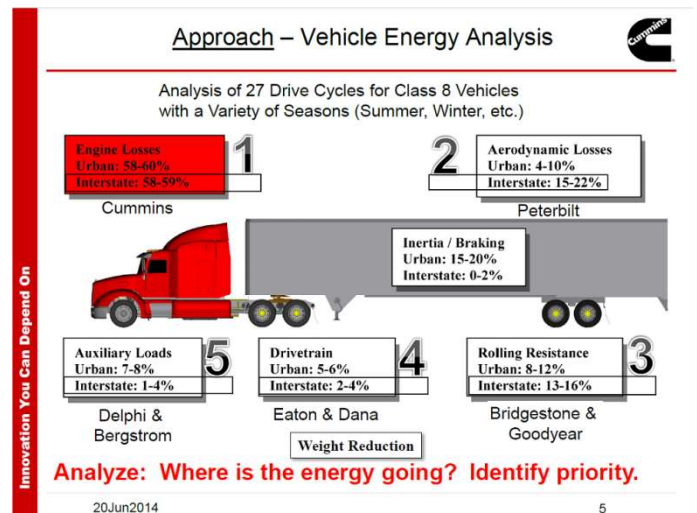
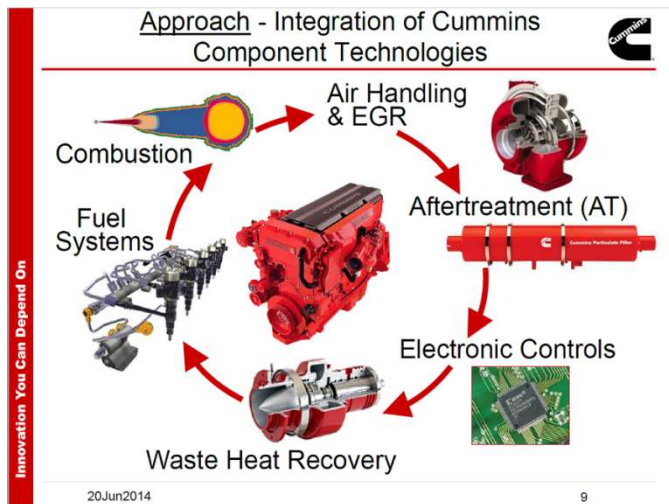


Fig. 1 エンジンの正味熱効率向上に関する研究の要素技術 (2014 Annual Merit Review and PEER Evaluation Meeting, Project-ID:ACE057, "Cummins Super Truck Program" David Koeberlein より引用. 以下 Fig. 2~Fig. 8 も同様)

Fig. 2 車両のエネルギー解析

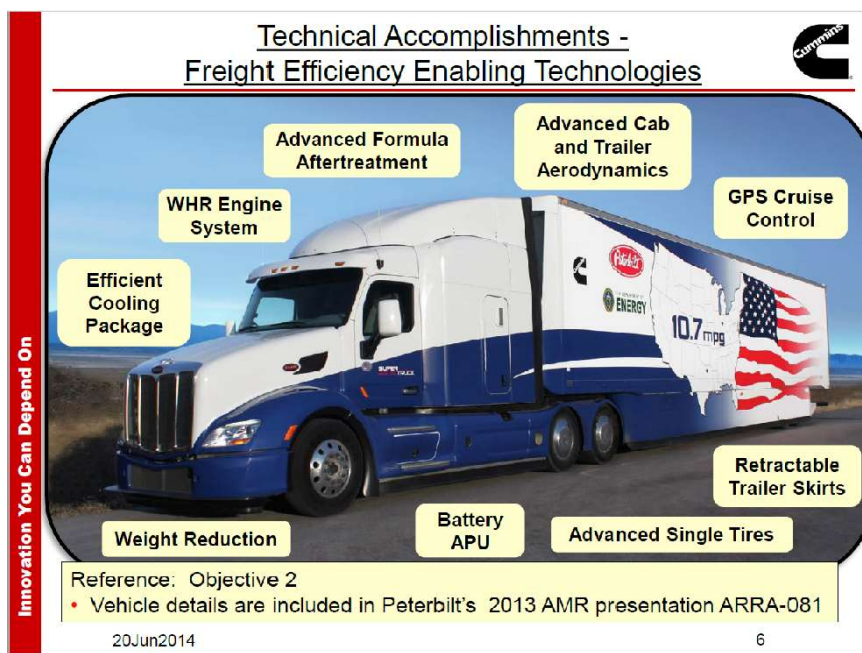


Fig. 3 走行燃費を改善したスーパートラック

### 3 スーパートラックの研究実施内容

次ページの表 2 に、各社で実施している研究内容を第 1 次研究（正味熱効率 50% 狙い）、第 2 次研究（正味熱効率 55% 狙い）に分類して示す。カミンズ社においては、前述したように、その中間で実施している正味熱効率 55% 狙いのプロジェクトについても示す。

#### 1) 第 1 次研究（正味熱効率 50% 狙い）

- ① 各社ともに第 1 次研究の到達レベルは 47~48% と推定する。（ベースエンジンのレベルは 42~44% レベルと思われる）
- ② いずれの場合もディーゼルの高圧噴射（270~300MPa）を中心として、図 4 に示すようなノズル、燃焼室の最適化及び図 5 に示すような噴射率、熱発生率の最適化を図る燃焼改善が主。

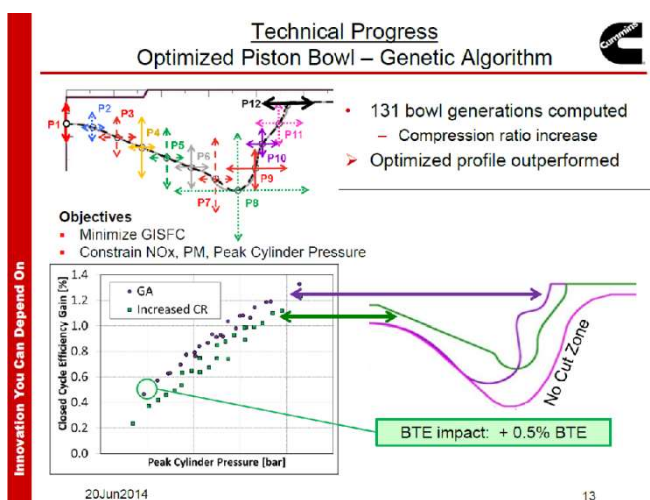


Fig. 4 燃焼室形状の最適化

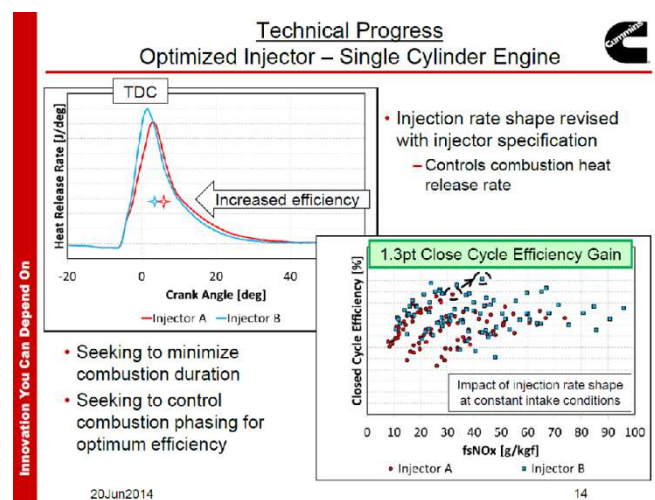


Fig. 5 インジェクタの最適化（単筒エンジンの噴射率、熱発生率）

Table 2 スーパートラックプログラムの各社研究内容

	Engine	Cummins			Daimler		Navistar		Volvo	
		スーパートラック第一次	スーパートラック第二次	正味熱効率 55%狙い	スーパートラック第一次	スーパートラック第二次	スーパートラック第一次	スーパートラック第二次	スーパートラック第一次	スーパートラック第二次
		BTE50%	BTE55%	BTE55%	BTE50%	BTE55%	BTE50%	BTE55%	BTE50%	BTE55%
ベース	ISX 15 42.0	—	—	DD15 42.0	—	MAXFORCE13 41.3	—	D13 42.0	—	
到達値	Engine 47.5 with WHR 3.6 Total 51.1	—	49.2	47.9	—	49.6	—	48.0	—	
基本コンセプト	ダウンサイジング ダウンスピーディング	○	15L⇒13L	15L⇒11L 1550⇒1150	○	○	○	13L⇒11L ○ (400rpm)	○	
排気ストラテジ	EGR率低減 E/O NOx 浄化率向上	○ 4.7g/kWh	○	○ Baseの3~5倍	○	○ 0.4⇒1.0g/kWh	○	○	○	
燃焼系	筒内圧UP	(25MPa)	○	15%UP	○	22MPa	○	○	スプリットサイクル 30MPa 50:1 (+2.3ptBTE)	
	高圧縮比	19	○	○	+○	○	○	○	Lund Uni. 形状 +噴射最適化 (+0.3ptBTE)	
	燃焼室形状	○	○ (+0.5ptBTE)	○	○	○	○	Wave Piston (+1.0ptBTE)	○	
	遮熱	○	遮熱膜 (+0.8ptBTE)	遮熱膜 Low Cooling 高水温	○	遮熱膜	○	遮熱膜	遮熱膜 (+2.0ptBTE)	
	協力	○	○	○	○	○	Adiabatics Inc.	○	○	
	Alt. 燃焼	○	LTC or Dual Fuel	○	○	D/F LTC Diesel-CNG	○	D/F RCCI Diesel-CNG (+1.6ptBTE)	○	(構想のみ) Tri Fuel PCCI Diesel-DME- Propane Exxon Mobil
燃料噴射	高圧噴射 特性 ノズル最適化	300MPa XPI 高噴射率	高噴射率 (等容度向上)	超高噴射率 (噴射期間 1/3)	270MPa Bosch増圧 高噴射率 多段噴射 Boot噴射	290MPa Bosch C/R	○	300MPa Delphi F3E	10回噴射	
給排気	過給効率改善	○ (VG)	○ (VG)	Twin Entry WG	アシンメトリ	○	2stage BorgWarner	○	○	
	ポート改善	○	○	○	○	○	○	○	○	
	EGR系	低圧損化	○	Dual Loop	○	○	冷却強化 (2段冷却)	○	○	
	VVA	○	LTC領域拡大	○	減筒運転	○	IVC最適化	○	○	
フリクション	シリンダ周り	○	○	○	○ (オイルリング他)	○	○	○	○	
	冷却系	可変W/P	○	○	可変W/P ライク冷却見直し	○	ライク遮熱	○	W/P 冷却サーキット	
	潤滑系	可変O/P	○	○	低粘度オイル 油温UP	○	次世代オイル 潤滑サーキット	○	O/P 潤滑サーキット	
	キヤトルイン	○	○	○	クラッチ付エアコン	○	○	○	○	
WHR	ターボコンパウンド	(構想のみ)	○	○	○	○	○	○	○	
	効果	○	○	○	○	○	○	○	○	
	ランキン	機械式	○	○	電気回収	○	電気回収	○	電気回収	
	熱源	排気+EGR+CAC	○	+LP EGR	排気+EGR	○	+CAC	○	排気+EGR	
	膨張機	タービン	改善	○	スクロール	○	タービン	○	Axialタービン(5段)	
	媒体	???	○	○	エタノール	○	エタノール	○	エタノール	
凝縮器	○	○	○	○	改良	○	○	○		
協力	(Modine)	○	○	○	○	○	Bosch MAHLE(熱交換)	○	Ricard	
効果	+3.6pt	+0.7pt	+0.2pt	+2.3pt	+1.3pt	+0.8pt	+1.2pt	+2.0pt	-	

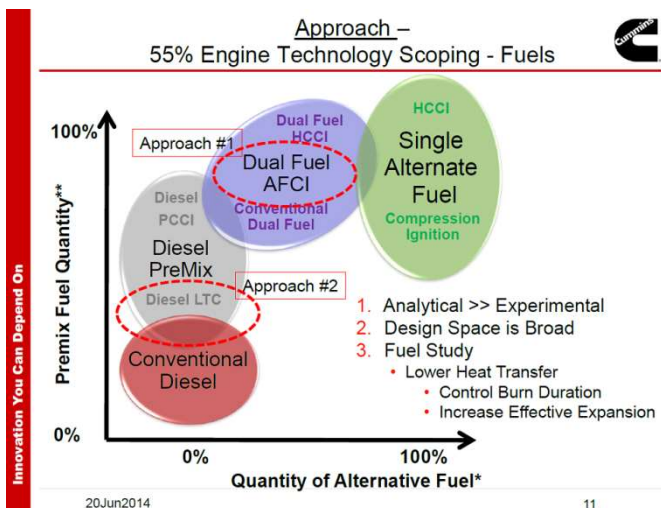


Fig. 6 正味熱効率 55%を狙った燃料の考え方

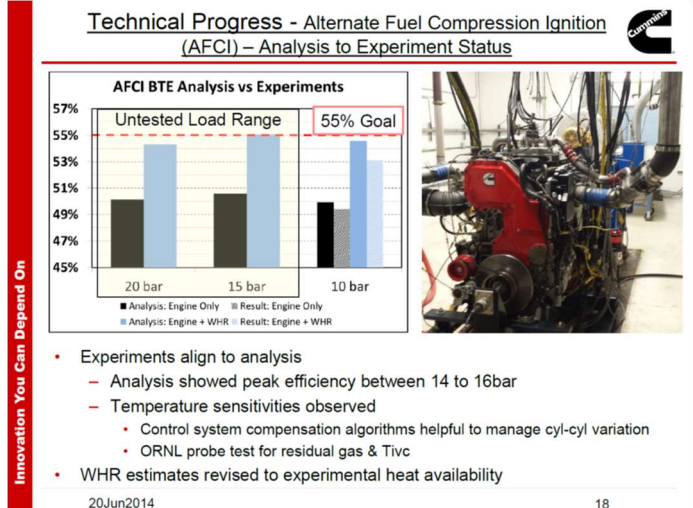


Fig. 7 2燃料, 2噴射系のAlternate Fuel Engine

# ENGINE REVIEW

SOCIETY OF AUTOMOTIVE ENGINEERS OF JAPAN Vol. 8 No. 8 2018

- ③ 図6に示すように、HCCI, PCCI 等の Alternative 燃焼は、上記のディーゼル燃焼研究と同時並行で進められているが、ディーゼル燃焼のほうに比重がかけられている。理由としては Heavy Duty Diesel の排出ガストモードがエンジン作動域全域にわたっており、高負荷まで Alternative 燃焼を成立させる難しさがある。同時に、広範囲に Alternative 燃焼を実現させるため図7に示すように、2燃料系、2噴射系の燃焼研究も検討中であり、カミンズでは、Dual Fuel Approachで10 bar BMEPにおいて49.4%が得られている。
  - ④ ダウンサイジング、ダウンスピーディング、それに伴うシリンダー内圧の上昇(22 MPa~25MPa)とその対応策(ヘッド、ピストン、ブロック等の構造、材質の見直し)
  - ⑤ 冷却損失の低減を狙って、燃焼室形状の最適化とその遮熱膜の開発。カミンズでは、遮熱膜の開発と並行して、ピストンの Low Cooling、高水温によりピストンを高温にして冷却損失を低減する両面を試みている。
  - ⑥ 吸排気系として
    - ・ターボチャージャ  
VG, 2Stage
    - ・EGR  
EGR 率の低減  
低圧損化  
冷却強化  
Dual Loop (High Pressure Loop と Low Pressure Loop の組み合わせ)
  - ⑦ フリクションの低減
    - ・ピストンリング張力低下
    - ・可変水ポンプ, 可変オイルポンプ
    - ・低粘度オイル
    - ・油温アップ
    - ・クラッチ付きエアコンプレッサ
  - ⑧ WHR としてのランキンサイクル
- 図8に示すように、エンジン単体の熱効率向上と組み合わせて正味熱効率55%を狙うものである。

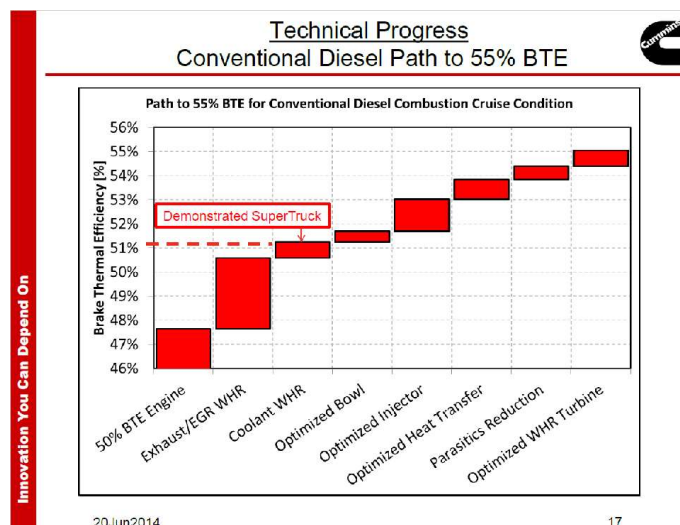


Fig. 8 正味熱効率55%へのプロセス

# ENGINE REVIEW

SOCIETY OF AUTOMOTIVE ENGINEERS OF JAPAN Vol. 8 No. 8 2018

- ⑨ 高効率 SCR と組み合わせて、EGR 率低減、エンジンアウト NOx を高めに設定して熱効率アップを狙う。
- ⑩ 走行燃費の改善策としてハイブリットシステムの適応
  - ・発進、停止の運転パターンではなく、道路の勾配を利用した充電、アシストを GPS の先読み制御と組み合わせる。

## 2) 第 2 次研究 (正味熱効率 55% を狙い)

まだ第 2 次研究は 2 年目であるので方向性が収束していない感があるが、カミンズの先行した BTE55% を狙った研究内容と私見を含めて考察する。

- ① 噴射系の中でインジェクタおよびノズル流路の設計と高性能化
  - キャビテーションのない流路の設計
  - 噴射のサイクル毎の再現性の向上
  - 高噴射率 (噴射期間の短縮と等容度の向上)
  - 初期噴射率の向上 (噴霧への空気導入のより活性化、希薄燃焼の一層の向上)
  - 噴霧モデルへの高過給時の超臨界状態の組み込みと影響度解析
- ② 上記、噴射系の高性能化と関連した低冷却損失を実現する燃焼室
  - 燃焼室口径は、上部を大きくし、スワール、スキッシュを抑へ、同時に噴霧火炎の燃焼室壁への衝突及びライナーへの反射衝突を防止する。(2 段スキッシュリップまたはリブ付きトロイダル)
  - ノズル噴口は、小噴口径化と多噴口数をどう組み合わせるか? 多噴口は、噴霧間での干渉や豊田中央研究所、冬頭等の指摘した逆流の発生をどう回避して最適化をするか?
  - それにより等容度の向上が図れるか?
  - 燃焼室遮熱膜の燃費低減効果の一層の拡大と実用化
- ③ 吸排気系タービン効率、コンプレッサ効率、総合効率を船用エンジン並みの向上
  - 高効率ホイールデザイン
  - 先進コーティング技術の開発
- ④ WHR としてのターボコンパウンド、タービンジェネレータ
  - 低圧損の高性能 NO 後処理で EGR 率が大幅に低減できれば搭載性、コスト比較でランキンサイクルとどちらが有利か?
  - ランキンサイクルのバルキーさ、コストは本当に実用化まで発展が可能か?
  - ハイブリットシステムとの共存性ではどちらが有利か?

## 4 まとめ

以上、スーパートラックプロジェクトの正味熱効率向上に関する部分の実施内容と今後の展開について私見を含めて述べてきた。スーパートラックで代表される大型商用車のエンジンは、高圧噴射を中心としてノズル、燃焼室の最適化およびそれに関連した低冷却水損失を実現するディーゼル燃焼で正味熱効率 55% に挑戦するものと思われる。DOE の同じ Vehicle Technologies Office Program Areas の中で、熱効率の周辺技術として Fuel & Lubricant Tec. で実施している Co-Optimization of Fuel and Engines のプロジェクトが燃料の特性まで含めて米国国立研究所、石油会社を中心として研究領域を拡大している。スーパートラックでは、HCCI, PCCI は Alternative 燃焼としての扱いであったが今後の展開を注目したい。また同時に Advanced Combustion Systems の中で、燃費低減に伴う排気温度低下に対応する、低温型、高機能排気触媒 (ガソリン及びディーゼル用) の研究が米国国立研究所、触媒会社を中心にして研究領域を拡大しており、これにも注目が必要である。

## リチウムイオン電池を凌駕する次世代・革新型蓄電池の開発状況

### R&D Status of Advanced and Innovative Batteries as the Battery beyond Li-ion

栄部 比夏里

Hikari SAKAEBE

国立研究開発法人 産業技術総合研究所

National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST)

#### 1 はじめに

リチウムイオン電池 (LIB) が小型民生用として市場に登場して約 25 年経過し、現在では移動体用や大型の蓄電システム用の電源としての適用が進んでいる。これらのアプリケーションの拡大のためリチウムイオン電池はさらなる高性能化と低コスト化が求められている。特に移動体用として、NEDO (国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構) から提示された蓄電池開発のロードマップ (ロードマップ 2013<sup>1)</sup>) では、純電気自動車を普通乗用車並みに普及させるためには、2030 年を目途としてエネルギー密度をバックレベルで 500Wh/kg まで高める必要があると示されている。またさらにコストを現状の 3 分の 1 から 6 分の 1 とすることも同時に提言されており、両者の同時達成のために多くの機関が新しい電池系の開発に取り組んでいる。図 1 に革新電池の技術マップを、表 1 に候補となっている電池系の概要を示す。(本稿では革新型蓄電池はエネルギー密度が大きく LIB より向上することができる電池のことを指し、それ以外の点の改善を主目的とした新しい電池系は次世代電池と呼ぶこととする。)

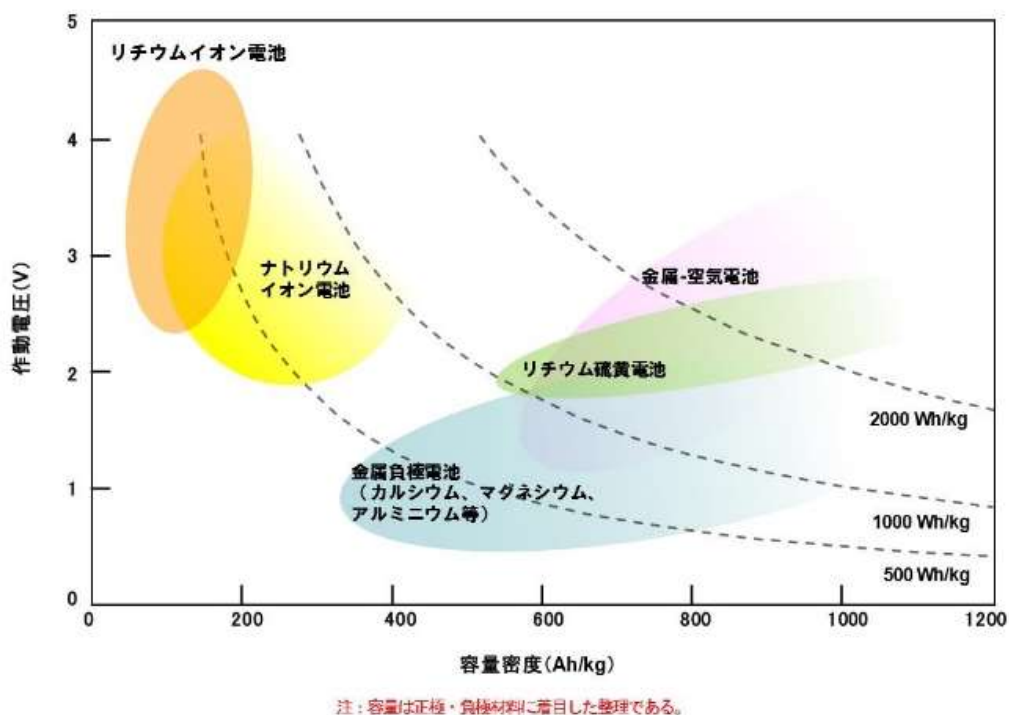


Fig. 1 革新電池の技術マップ

(NEDO 蓄電池ロードマップ<sup>1)</sup> P16 より引用)

Table1 リチウムイオン電池を超える性能を期待される電池の概要

電池系	ナトリウムイオン二次電池	金属-空気電池		リチウム硫黄電池	マグネシウム(イオン)二次電池
		Li系有機溶媒系	Zn系水溶液系		
エネルギー密度* (Wh/kg)	(正極材料によって変化)	11966	1350	2300	(正極材料によって変化)
		(酸素を含まない理論値)			
主な各電池系での課題	材料探索(正負極、電解液) サイクル特性 安全性	空気極触媒の性能向上 負極デンドライト状析出抑制 サイクル特性・低温特性		電子伝導性の確保 電池開放時、水との反応によるH <sub>2</sub> S発生の抑制	材料探索(正極・電解液) サイクル特性 室温駆動
		エネルギー効率改善 安全性	エネルギー効率改善	有機電解液への硫黄の溶出	
共通課題	実用セルベースの電池設計での高エネルギー密度と高出力密度の両立				
研究ステージ	実用化へ向けた取り組み	基礎研究	基礎研究	一部、実用セル試作	基礎研究

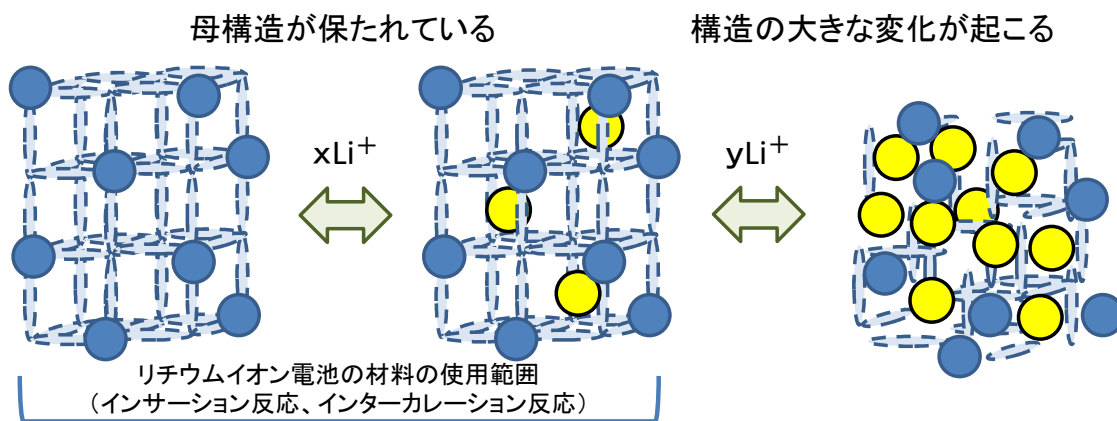
\*エネルギー密度は材料レベルでの理論エネルギー密度を記載

ポテンシャルは高いものの基礎研究の域を脱するのが難しい電池系も多い中で、実用レベルの試作セルの開発の公表も行われている。これらの新しい電池と比較されるLIBは電池として成熟してきているが、実際には製造するメーカーの考え方や用途に応じて電池の構成がそれぞれ少しずつ異なっており特性はバラエティが増す方向にある。さらにLIBの中でもこれから展開が期待される次世代型LIBも開発が進められており、エネルギー密度も向上してきている。本論文では新しい電池系の特徴・課題をLIBとの比較も行いながら紹介する。

## 2 電池のエネルギー密度

車載用電池に要求される特性は種々あり、それらのうち電池製造技術で改善できる特性と根本的に変更が必要な特性がある。一定以上のエネルギー密度改善は後者の代表例である。エネルギー密度の向上により車内でのスペース削減あるいは航続距離の延長等、自動車の設計に自由度が高まる方向となるため、エネルギー密度は車載用電池の重要な特性の一つである。エネルギー密度は主に正極と負極に用いる材料で理論的な値が決まる。ラフに言えばその組み合わせから発現する電池の平均電圧と、重量/体積あたり取り出せる電気容量(電流値と時間の積)の積で表される。LIBはコバルト酸リチウムに代表される正極材料と黒鉛を中心とした炭素負極を用い、電池内に充填する正極・負極材料の量とバランス、使用する範囲を改良し、使えるエネルギーを向上させてきた。従来の材料の組み合わせでは理論的にLIBのエネルギー密度の限界値は300Wh/kg前後という見積もりがある。市販の民生用電池の高エネルギー密度タイプでは限界に近づいており、そのため最近では負極材料に高容量のSi系材料を少量添加するなどの工夫も行われているが、さらにエネルギー密度の向上を実現できる可能性のある新しい電池の開発が望まれている。

LIBの発明と市場への投入以前には、金属Li負極を主に用いた電池が開発されていたところであった。実用化も一部行われたが十分な寿命と安全性が確保できなかったことで、その大きな課題をクリアできる電池としてLIBが開発された。LIBの場合、正極も負極も元の材料の構造を壊さない量のLiイオンを出し入れすることで充放電反応が進んでいる。この仕組みのために寿命(と安全性)が改善されたが、逆に使えるエネルギーをある範囲に限定していることになる。そこで、金属Li負極のような溶解析出型や、Liを構造が壊れるところまで挿入してLiが脱離すると再構築するような、コンバージョン型と呼ばれる材料を用いる方向で高エネルギー密度化が図られ、革新型蓄電池の開発がすすめられている。高容量を得るための機構の差について模式図を図2に示す。



**革新型蓄電池の材料の使用範囲 (コンバージョン反応と呼ばれることが多い)**

Fig. 2 LIBと革新型蓄電池に用いられる材料の充放電反応の考え方の違いを示す模式図

コンバージョン反応を起こすと構造の変化が大きいため、耐久性の維持が課題となる。また材料そのもの、あるいは放電生成物に抵抗の高いものを含むことが多いため、出力を取り出せるような電池の構成が必要となり、使いこなしの技術的ハードルは高い。

エネルギー密度の向上だけでは車載用の電池としての高性能化が十分とは言えない。長寿命化、低コスト化、安全性向上、高出力化などのための材料・電池系の開発が進められている。必要な性能がバランスする材料と使い方をうまく構築する必要がある。これらは電池の製造技術に依存する面が大きいため、本稿では詳しくは触れない。

### 3 固体系か液体系か？

最近では固体電池に大きな注目が集まっている。LIBで課題となっていた安全性向上や高出力化の期待が寄せられている。高エネルギー密度化が可能とも主張されているが、エネルギー密度は電極材料の組み合わせでおおよそ決定され、電池構成部材の使用割合で最終的に決まるため、固体電池にすると必ずしも電池のエネルギー密度が向上するとは限らない。しかしセル内で積層が可能で外装の割合を低減できることや、安全に関する監視回路が省略できる可能性などもありシステム簡素化が可能であるという利点はある。また特に酸化物系の場合には多少高温となっても安全性と耐久性が大きく損なわれないと想定されるため、自動車の設計に自由度が増す。

固体電池と通常の電池の大きな違いは電解質である。また固体電解質にも大きく分類して2種類の開発が行われている。それらのおおよそその特徴を表2にまとめた<sup>2),3)</sup>。

Table 2 固体電解質と電解液の特徴

電解質	固体系		液体系
	酸化物系	硫化物系	
代表的な材料	Li <sub>3</sub> BO <sub>3</sub> -Li <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> <sup>2a)</sup> Li <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> -Li <sub>3</sub> BO <sub>3</sub> <sup>2b)</sup> Li <sub>6.4</sub> La <sub>3</sub> Zr <sub>1.4</sub> Ta <sub>0.6</sub> O <sub>12</sub> <sup>2c)</sup>	Li <sub>2</sub> S-P <sub>2</sub> S <sub>5</sub> <sup>2d)</sup> Li <sub>9.54</sub> Si <sub>1.74</sub> P <sub>1.44</sub> S <sub>11.7</sub> Cl <sub>0.3</sub> <sup>3)</sup> 等	1.0 M LiPF <sub>6</sub> /EC-DMC等
常温付近での Liイオン伝導性	△～○	◎	◎
Liイオン輸率*	◎	◎	△
塑性変形性	×～△	○	-
電位窓	◎	△	○
耐湿性	◎	△	△

\* : 流れる電流のうち、Liイオンが担う割合



# ENGINE REVIEW

SOCIETY OF AUTOMOTIVE ENGINEERS OF JAPAN Vol. 8 No. 8 2018

固体電池で大きく課題となる点は、かつては電解質のリチウムイオンの伝導性であった。そのため薄膜化や高温作動が常套手段であったが、現在は  $\text{Li}_2\text{S}-\text{P}_2\text{S}_5$  をはじめとする硫化物系や、金属  $\text{Li}$  に対する安定性が高くかつ  $\text{Li}$  イオン伝導性の高いガーネットタイプの酸化物系のように室温でリチウムイオンが良く伝導する材料が幾つも見出されているため、固体-固体間の接触を保持する技術がより重要となっている。この点硫化物系固体電解質は、常温での加圧で電解質が容易に変形し、電極材料と電解質の接触を十分取ることができる。しかし電池の作動中にダイナミックに電極材料の体積が変化するため、それに追従するための技術は必要である。硫化物系には大気暴露時の安定性に若干懸念があるため、より安定な酸化物系の開発も望まれている。酸化物系においても比較的柔軟な材料はあるものの、硫化物系と比較すると固体間の接触が取りにくく厚い電極での常温作動が困難である。

液体電解質（電解液）では  $\text{Li}$  イオンが実際には全量がイオン化しているわけではなく、また溶媒分子に強く取り囲まれ実は身動きがとりにくい状態である。電流が流れると対イオンも逆方向に動き、全体としては分布が偏った状態になるため、ある一定値以上の電流を取り出すのが難しい場合がある。固体電解質の場合は  $\text{Li}$  イオンだけが動き分布の偏りもない（はずである）ので、実は大きな出力が取れる可能性がある。この点を検証した結果が最近論文にて報告されている<sup>3)</sup>。実際には前述した接触抵抗の問題があるため、現段階では電極の作動条件、セルの製造プロセスの技術などに高度な工夫が必要と考えられる。電極材料の体積変化が生じて固体-液体界面は比較的接触を保持しやすいため、固体電池が本格的に市場に広がるまでは電解液を用いた従来電池が製品の主力となっていくと想定される。

現在全世界的に固体電池の開発プロジェクトが多く立ち上がっている。国内では JST（Japan Science and Technology Agency、国立研究開発法人 科学技術振興機構）の ALCA-SPRING（Advanced Low Carbon Technology Research and Development Program - Specially Promoted Research for Innovative Next Generation Batteries、先端的低炭素化技術開発 - 次世代蓄電池）において 2013 年より酸化物系・硫化物系固体電池の開発がすすめられ、この発展系として硫化物系については 2018 年度より車載用電池を構築するという NEDO のプロジェクトが開始された。固体電池の開発がこのプロジェクトによって加速されることが期待される。日本以外では酸化物系の開発が比較的盛んであったが、最近では硫化物系の詳しい報告例も増えているようである。硫化物系に多くのリソースを割いているのが日本の特徴と思われる。

## 4 現在開発が進められている蓄電池

以下に高エネルギー密度化を目指して開発が行われている主な電池系について概説する。それぞれ車載用として実用化する際にメリット或いは主な問題となりうる点に絞っている。

### 4.1 金属空気電池

高エネルギー密度が期待できる電池は亜鉛-空気電池と  $\text{Li}$ -空気電池である。空気電池の場合は正極材料となる酸素を予めセルの中に閉じ込めなくともよく、特に  $\text{Li}$ -空気電池は非常に大きなエネルギー密度が期待できるため、革新型蓄電池として大きな期待を集めた。実用化できれば自動車の一充電の走行距離は大きく改善するはずである。それぞれ電池反応式を次式に示す。

亜鉛空気電池： $2\text{Zn} + \text{O}_2 \leftrightarrow 2\text{ZnO}$  ( $E_0 = 1.65 \text{ V}$ ):  $E_0$  は理論的な電池の起電圧

$\text{Li}$ -空気電池： $4\text{Li} + \text{O}_2 \leftrightarrow 2\text{Li}_2\text{O}$  ( $E_0 = 2.91 \text{ V}$ )

亜鉛-空気電池はアルカリ性の水溶液を、 $\text{Li}$ -空気電池は主に有機電解液を用いて電池を構築する。負極の  $\text{Li}$  が酸素や水と反応して失活（電極としての機能を失う）するためであるが、固体電解質の隔膜でセル内を区切って正極側に水溶液系の電解液を使用する研究例も見られる。有機溶媒を用いた場合は放電生成物の  $\text{Li}_2\text{O}$  や  $\text{Li}_2\text{O}_2$  が電極に用いる（触媒としても作用する）空気極の炭素上に析出するため、反応点である電解液・触媒・酸素の三相界面が徐々に減少してしまう。水溶液系では放電生成物は液相に溶解するためこの点は改善できるが、セル構成が複雑になりエネルギー密度的に利得が小さくなる可能性がある。金属-空気電池の一般的な構造を図 3 に示す。

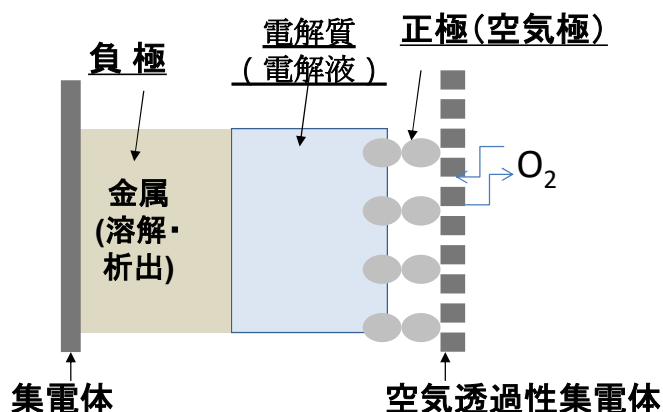


Fig. 3 金属-空気電池の一般的な構造

両者に共通する最も大きな課題としては、負極の形態安定性と放電と充電の電圧差が大きく、エネルギー効率改善の余地がある点である。前者は Zn と Li が平坦な析出形態となりにくいため、電極の変形が起こることが良く知られている。特に Li の場合には安全性に重大な影響を及ぼしかねない。電解液の添加剤や構造の工夫が検討されている。後者は電池系により充電時の反応経路は異なるが、放電生成物が酸化されて酸素が発生する際に、電極単体と触媒を兼ねる炭素が酸化されるプロセスや電解液の副反応が絡んでおり、余計なエネルギーを必要とすることに起因する。Li-空気電池の典型的な充放電カーブを図 4 に示す<sup>4)</sup>。充電と放電で電圧差が 2V 近くあり、これを低減するために電解液の副反応を詳しく調査したり<sup>5)</sup>、メディエータと呼ばれる添加剤を電解液に加える<sup>6)</sup>などの検討が進められている。亜鉛-空気電池の場合には炭素を用いない電極の開発も検討されている。

Li-空気電池に特有の問題として、水分や酸素と反応して失活する Li を使う一方で、セルの空気極に気体を外部から供給するため密閉型にすることができない点である。前述の固体電解質を隔膜として利用する考え方は、電池内で水分・酸素が負極に達するのを防ぐ効果はある。

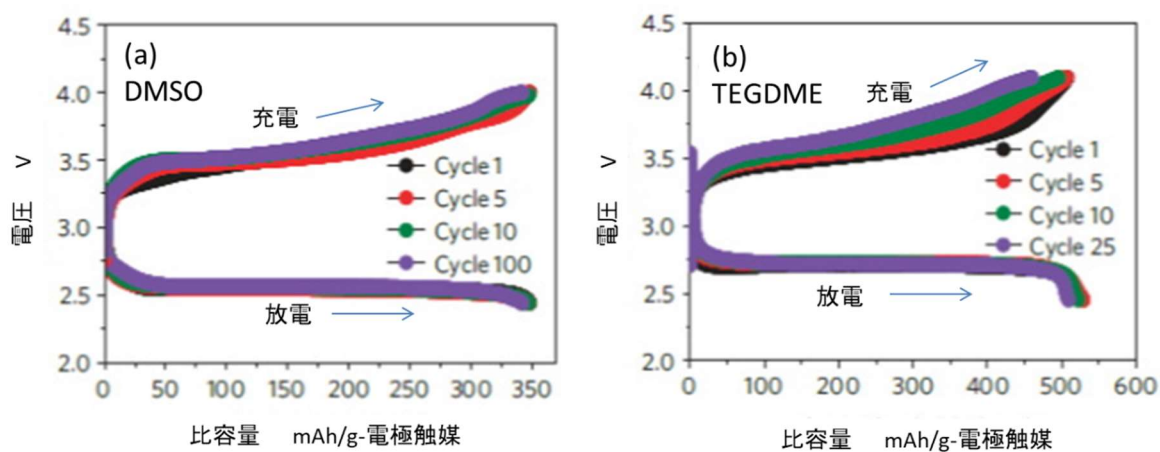


Fig. 4 典型的な空気電池の充放電曲線<sup>4)</sup>

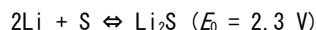
(a) 0.5MLiClO<sub>4</sub> /ジメチルスルホキシド @ 1mA/cm<sup>2</sup> (b) 0.5MLiPF<sub>6</sub> /テトラグライム @0.5mA/cm<sup>2</sup>

この電池系は非常に有望ではあるが、両電極ともかなり技術的ハードルの高い課題を抱えており、実用化までには時間を要するという見解が多い。Li-空気電池は Abraham が 1996 年にゲル電解質を用いた作動の報告をした<sup>7)</sup> のち 2000 年以降に論文数が急激に増え、大きなブームとなったが現在は落ち着いている。

## 4.2 Li-硫黄電池

現在革新型蓄電池として最も自動車向けの電源としての開発が活発となっている電池系である。負極に金属 Li、正極に硫黄を使用し、密閉系としては重量当たり最大のエネルギー密度を示す。Li の資源量に関しては種々議論があるが、現在のところ急激に枯渇する危険性は指摘されていないようである。硫黄は安価で資源量も多く、低コスト電池として普及させることも期待される。

全電池反応式は次のとおりである。



硫黄は 1970 年代ごろより有機溶媒中での電気化学反応の調査が始まっており、その意味では研究開発の歴史は長い。この電池の問題点は硫黄が絶縁性で有機電解液に溶出する点と Li-空気電池と同様 Li 負極の耐久性と安全性である。前者の改善にあたり多孔質炭素材料中に硫黄を閉じ込める手法がとられている。ここでは個々の技術まで紹介しないが、詳細は総説を参照されたい<sup>8)</sup>。このような手法を用いても完全に硫黄の溶出を止めることは困難であり、電解液側や溶出した硫黄成分をトラップするセパレータの開発が行われている。また硫黄成分が負極に到達すると負極表面に堆積し、充放電反応を阻害するため負極の保護も進められている。

さらに固体電池としての開発の方向もあるが、現在は液体系が主流である。

最近では硫黄が溶出しない材料も見出されている。産総研では有機分子との複合化、或いは炭素でなく金属との複合化により溶出抑制できる材料を開発してきた<sup>9)-13)</sup>。どの材料を用いた場合も LIB と比較して容量は大きく取れるものの電圧は 2V 付近と低くなる。硫黄-炭素複合材料、金属と硫黄の複合材料の典型的な充放電曲線の例を図 5 に示す<sup>10), 14)</sup>。

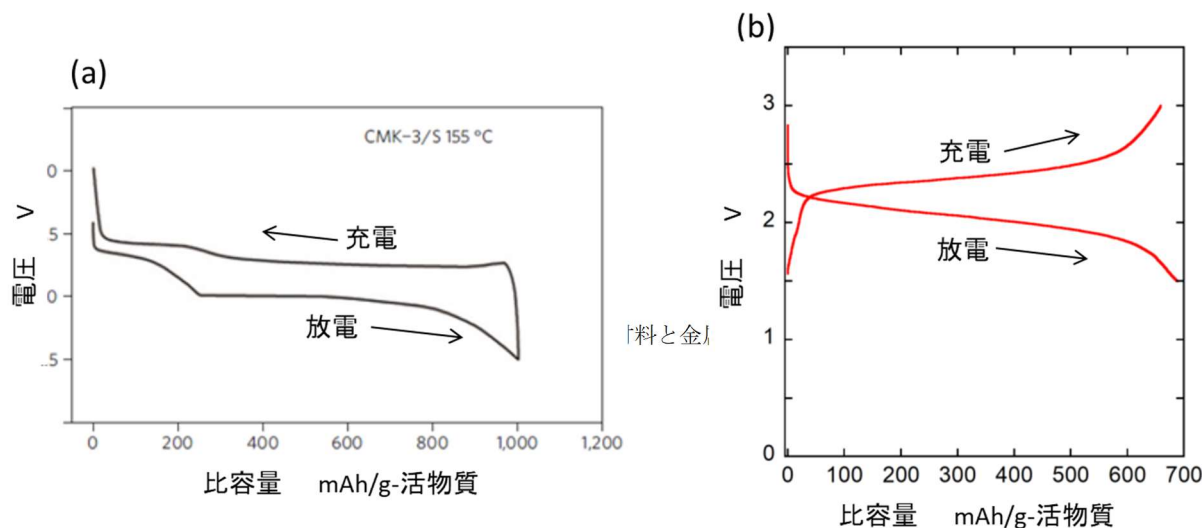


Fig. 5 Li-硫黄電池用の典型的な硫黄電極材料と金属多硫化物電極材料の充放電曲線

(a) 多孔質炭素材料に硫黄を 155°C で含浸した電極の

168 mA / g での初期充放電曲線<sup>14)</sup>

電極組成 : CMK-3/S : 炭素:PvDF = 84:8:8 (wt%)

電解液 1.2 M LiPF<sub>6</sub>/エチルメチルスルホン

(b) 非晶質 TiS<sub>4</sub><sup>10)</sup> の 20 mA / g での初期充放電曲線

電極組成 : TiS<sub>4</sub> : AB : PTFE = 86 : 9 : 5 (wt%)

電解液 : 1.0 mol dm<sup>-3</sup> LiTFSI in DOL (ジオキソラン)/DME (ジメトキシエタン)、セル周囲温度 : 30°C

図 5(a) に示した硫黄-炭素複合材料の場合、一部溶出した硫黄成分の液相での充放電反応も含むため比較的输出がとりやすい場合がある。硫黄成分が溶出せず固相で反応が進む場合には、電極の集電の取り方などの工夫で出力を確保する必要がある。

金属多硫化物を用いた液体系の電池は現在 RISING2 (Research & Development Initiative for Scientific Innovation of New Generation

# ENGINE REVIEW

SOCIETY OF AUTOMOTIVE ENGINEERS OF JAPAN Vol. 8 No. 8 2018

Batteries 2, NEDO 事業, 革新型蓄電池実用化促進基盤技術開発)における開発拠点である産総研以外では開発されていないが, 硫黄-炭素複合体を用いた電池は世界中で開発が盛んに行われている. イギリスの OXIS Energy というベンチャーが自動車への搭載を目指した電池の開発を進めており, 2018 年 6 月現在表 3 に示すような 2 タイプの電池をターゲットとして開発を進めている<sup>15)</sup>. 中国では CAS が 37Ah 級セルを試作し室温で 566Wh/kg を超すエネルギー密度の電池を試作したと報告している<sup>16)</sup>. こちらは車載用ではなくドローンなど飛行体への展開を目指しているらしい. Li-硫黄電池は構成材料がすべて低密度であり, 体積エネルギー密度の面で LIB に比較してメリットが出にくい可能性があるためと考えられる. また米国で Battery500 というプロジェクトが推進されているが, その中で Li-硫黄電池は主要な開発対象となっている. 金属 Li 負極や硫黄電極を安定に動かすための材料の提案を活発に行っている Stanford 大学など有力な大学などが参加し, PNNL (Pacific Northwest National Laboratory) が研究拠点となっている. 日本ではこれも JST の ALCA-SPRING で研究対象となっており, 硫黄成分の溶出を抑制する電極材料と電解液の両輪で電池を構成している. これら実用セルに近い形での電池試作が進んでいるが, 現在安全性にまで深く言及した報告があまり行われていないため, 今後の検討が必要と考えられる.

Table 3 現在仕様が公開されている Oxis Energy 社の Li-S 電池の性能諸元

	OXIS ENERGY (軽量型)	OXIS ENERGY (長寿命型)
公称電圧 (V)	2.1	2.1
電圧範囲 (V)	1.9-2.6	-
公称容量 (Ah)	19	10
重量エネルギー密度 (Wh/kg)	400	152
体積エネルギー密度 (Wh/L)	321	141
サイクル特性(80% DoD)	50	~1400
セル形状	積層ラミネート	積層ラミネート
サイズ (mm)	145 x 80 x 11	174 x 112 x 6.9
重量 (g)	101	-
備考		UN38.3 /IEC62133

## 4.3 ナトリウムイオン電池

Li の資源偏在化の問題があり日本では代替金属として Na を使用できれば大量普及時に有利であるため, LIB と同様の充放電反応で電池を構成できるナトリウムイオン電池 (NIB) も開発が進められている. LIB と決定的に異なる点は負極に黒鉛を使えない点である. Na イオンは Li イオンと異なり黒鉛にはほとんど挿入することができない. そのためハードカーボンか合金を用いることとなる. 金属 Na は金属 Li よりも水分と激しく反応するためそのまま負極に用いるのは危険と考えられる.

Na の有する電位が Li よりも高く電池電圧が若干低下する傾向にある. そこで NIB の開発はエネルギー密度の向上を主目的とするものではない. ただし Li イオンと比較して Na イオンは電解液中での束縛が緩いことから, 出力の面では有利と考えられる.

過去にはアルカリ金属溶融塩を用いた小型実電池が試作され, 住友電工株式会社よりプレス発表が行われた. またヨーロッパでも

# ENGINE REVIEW

SOCIETY OF AUTOMOTIVE ENGINEERS OF JAPAN Vol. 8 No. 8 2018

J. M. Tarascon 教授のかかわるベンチャーで円筒型電池の試作が行われている。こちらは車載用も視野に入れているが、全般的にはエネルギー密度の観点から、車載用というよりは定置用向けの開発が進められている。

## 4.4 その他

表1に示したMg電池は、負極に金属Mgを用いる電池である。重量エネルギー密度においては大きな改善は難しいが、体積エネルギー密度でメリットを出せる可能性がある。またMgは2価のイオンとなるため、電解液中、電極材料中で表面電荷密度が大きく非常に動きにくい。負極の作動に大きな過電圧（電極反応を起こすためにエネルギー障壁を超えるのに必要なエネルギーで電圧を指標として現したもの）が必要で、現在はその改善のため電解液の探索が進められている。正極材料も同様にMgイオンが動きやすく多く収容できる材料の探索段階で、電池の性能がイメージできる全電池の構築はこれからである。

Naイオン、Mgイオン以外の電池で電荷を運ぶキャリアの検討としては、Kイオン、Caイオン、塩化物イオン、フッ化物イオンなどの研究が進められているが、現在はどれも基礎検討段階である。

## 5 将来的な見通し

LIBを凌駕する次世代・革新型蓄電池はこれまで述べてきたとおり種々開発が進められており、実用セルの試作も進んでいる電池系は存在する。大幅に高エネルギー密度化が期待できる電池はNEDOの見通しでは2030年以降の実用化が見込まれるもので、NEDOのRISING2プロジェクトやJSTのALCA-SPRINGでも実用化のターゲットは2030年を一つのマイルストーンに据えている。たとえばLi-硫黄電池で実用化が見える形が提案されていても耐久性や出力、安全性の十分な検討がされたという報告は現時点ではほぼ見られない。Li-硫黄電池は世界各国で開発が進められているのでこれからこのあたりの検討が加速するものと思われる。またそれまでにはLIBの固体化が進み、安全性の向上したLIBが提案される可能性が期待できる。本稿で紹介した電池が市場に投入され始めても、LIBも高エネルギー密度化の材料変更が並行して進められ、LIBの製造技術の成熟度も高いため、当分は（改良型）LIBと次世代・革新型電池の共存が想定される。

### 【参考文献】

- 1) NEDO 蓄電池ロードマップ2013、<http://www.nedo.go.jp/content/100535728.pdf>
- 2) (a)M. Tatsumisago, R. Takano, K. Tadanaga, A. Hayashi, J. Power Sources, 270, 603 (2014).  
(b)T. Okumura, T. Takeuchi, H. Kobayashi, Solid State Ionics, 288, 248 (2016).  
(c)V. Thangadurai, S. Narayanan, D. Pinzaru, Chem. Soc. Rev., 43, 4714 (2014).  
(d)A. Hayashi et al., J. Am. Ceram. Soc., 84, 477-479 (2001)
- 3) Y. Kato, S. Hori, T. Saito, K. Suzuki, M. Hirayama, A. Mitsui, M. Yonemura, H. Iba, R. Kanno, Nature Energy, 1, 16030 (2016).
- 4) M. M. O. Thotiyl, S. A. Freunberger, Z. Peng, Y. Chen, Z. Liu, P. G. Bruce, NATURE MATERIALS, 12, 1050, (2013).
- 5) F. Mizuno, K. Takechi, S. Higashi, T. Shiga, T. Shiotsuki, N. Takazawa, Y. Sakurabayashi, S. Okazaki, I. Nitta, T. Kodama, H. Nakamoto, H. Nishikoori, S. Nakanishi, Y. Kotani, H. Iba, J. Power Sources, 228, 47-56 (2013).
- 6) Y. Chen, X. Gao, L. R. Johnson, P. G. Bruce, Nat. Commun., 9, 1 (2018).
- 7) K. M. Abraham and Z. Jiang, J. Electrochem. Soc. 143, 1(1996).
- 8) A. MANTHIRAM, Y. FU, Y.-S. SU, ACCOUNTS OF CHEMICAL RESEARCH, 46, 1125 (2013).
- 9) T. Miyuki, T. Kojima, Y. Okuyama, T. Sakai, SEN-I GAKKAISHI, 68, 179 (2012).
- 10) A. Sakuda, N. Taguchi, T. Takeuchi, H. Kobayashi, H. Sakaebe, K. Tatsumi, Z. Ogumi, Electrochemistry Communications, 31,

# ENGINE REVIEW

SOCIETY OF AUTOMOTIVE ENGINEERS OF JAPAN *Vol. 8 No. 8 2018*

71 (2013).

11) A. Sakuda, N. Taguchi, T. Takeuchi, H. Kobayashi, H. Sakaebe, K. Tatsumi, Z. Ogumi, ECS Electrochem. Lett., 3, A79 (2014).

12) T. Takeuchi, H. Kageyama, K. Nakanishi, M. Ogawa, T. Ohta, A. Sakuda, H. Sakaebe, H. Kobayashi, Z. Ogumi, J. Electrochem. Soc., 162, A1745 (2015).

13) K. Koganei, et al., Solid State Ionics, 323, 32 (2018).

14) X. Ji, K. T. Lee, L. F. Nazar, Nat. Mater., 8, 500, (2009).

15) Oxis Energy : <https://oxisenergy.com/>

16) Hong Li, abstract of ABAA10, P-79, Oct. 2017, Chicago, USA.