

# AISAN TECHNICAL JOURNAL

特集 「カーボンニュートラル」



# AISAN TECHNICAL JOURNAL

## 特集「カーボンニュートラル」

### Contents

#### 巻頭言

「環境技術で笑顔の未来を」 ..... P.02

#### 特集：カーボンニュートラル

##### 論文

- ・低濃度アンモニアの吸着シミュレーションモデル構築 ..... P.04
- ・アンモニア発電の低エネルギー起動に向けた  
常温水素化技術の研究開発 ..... P.09
- ・ステッピングモータを用いた密閉タンク封鎖弁の開発 ..... P.13

##### 取り組み

- ・キャニスタの樹脂材料変更 ..... P.17

##### 受賞技術

- ・カーボンニュートラル燃料対応電動ポンプ ..... P.19
- ・燃料電池システム用エア制御弁 ..... P.22

#### 一般

##### 論文

- ・マルチフェーズ方式PFCコンバータにおける  
相数切り替え制御の提案 ..... P.24
- ・デバイス内部のゲートソース間電圧の推定 ..... P.28
- ・機械振動法によるADC12合金  
セミソリッドダイカスト工法開発と実用化 ..... P.32

##### 取り組み

- ・小型モビリティ用モータコントローラ ..... P.37
- ・BEV車用 電池ケース深絞り技術開発 ..... P.39
- ・電動化に向けたソフトウェア人財育成 ..... P.41
- ・モデルライブラリによるMBD普及推進 ..... P.43
- ・連成解析によるソレノイドバルブ開発 ..... P.45
- ・知財ビジネスマッチング事業への参画 ..... P.47

##### 受賞技術

- ・EGR用二重偏心弁 ..... P.49

本技報に掲載された写真・図・イラスト等を含むすべてのコンテンツについて、著作権法に基づき、無断転載・複製・再配布を固く禁じます。

# 「環境技術で笑顔の未来を」

“Beaming Future by Environmental Technologies”



取締役副社長  
山中 章弘

Akihiro Yamanaka, Vice President

近年、地球規模での気候変動によって、甚大な災害が世界各地で多発しています。この原因の一つとして、温室効果ガス（CO<sub>2</sub>、メタンなど）による地球温暖化の影響が指摘されていますが、このような環境問題は、世の中で古くから認識され、様々な取り組みがなされてきました。

都市部で大気汚染が社会問題となった米国では、1963年に大気浄化法（Clean Air Act）が制定され、1970年に改正（通称マスキー法）された内容はとても厳しく、自動車の環境技術開発に大きな影響を与えました。また1973年の第四次中東戦争をきっかけに原油価格が高騰し、第一次オイルショックが発生した後、各国で自動車の燃費規制が策定され、省エネルギー化が進みました。結果として自動車一台当たりのCO<sub>2</sub>の排出は抑制されましたが、世界の経済成長とともにCO<sub>2</sub>の排出総量は増加を続けました。

その後、地球環境問題を考える大きな転機となったのは、1992年にブラジルのリオ・デ・ジャネイロで開催された「国連環境開発会議（地球サミット）」だったと思います。ここでは「環境」と「開発」のバランスを取る「持続可能な開発」を実現するための取り組みが話し合われ、「気候変動に関する国際連合枠組条約」が採択されました。

そして1997年に京都で開かれた「気候変動枠組条約第3回締約国会議（COP3）」で「京都議定書」が採択され、先進国の温室効果ガス排出量の削減目標が定められました。日本ではそれに呼応する形で、燃費2倍を謳うハイブリッドカーの量産が始まり、世界中で様々な電動車の開発が加速しました。

さらに 2015 年に先の気候変動に関する国際会議（COP21）において、「パリ協定」が採択され、「世界の平均気温上昇を産業革命以前と比べて 2℃より十分低く保ち、1.5℃に抑える努力をする」ことを目標とし、「国連気候変動に関する政府間パネル（IPCC）」が示す科学的な根拠に基づいて、今世紀後半に世界全体の温室効果ガス排出量を実質的にゼロにする「脱炭素化」を目指すことが規定されました。

日本でも 2020 年に、本技報の特集テーマである「カーボンニュートラル」が首相より宣言されました。（2050 年までに温室効果ガスの排出を全体としてゼロにする）

先にも述べましたが、これまで環境を良くするための厳しい自動車の排気／燃費規制が、各国で段階的に設定されて、それに応える技術が進化してきました。そこに「ゼロ CO<sub>2</sub>」という新たな目標が加えられ、内燃機関を持つ多くの自動車を電気自動車へシフトさせようとする性急な対応がこの数年進められてきました。

しかし、電気自動車は価格が高く、また充電する電気の製造方法は、現状ではまだ化石燃料に依存し、クリーンとは言えず、充電スタンドの不足、充電時間の長さ、航続距離の短さなどの課題は簡単には解消できず、極端な電気自動車シフトは少し弱まりました。

もちろん CO<sub>2</sub> ゼロ化の最終目標は変わりませんが、電気自動車への切り替えだけに解を求めるのではなく、多様な利点のある様々な自動車をうまく組み合わせ、省エネ、CO<sub>2</sub> 低減から CO<sub>2</sub> ゼロ化へ、マルチパスウェイで対応していくことが重要だと思えます。

ここで内燃機関を持つ自動車に目を向けると、バイオ燃料、e-Fuel、水素などのカーボンニュートラル燃料を使えば、ゼロ CO<sub>2</sub> は実現できます。さらに HC、NOx などの他のエミッションをゼロ化できれば、クリーンエネルギーで作られた電気で作る電気自動車と同等に扱うことができます。それに加えて内燃機関を持つ自動車は、汚い空気を取り込んで浄化させ、大気をきれいにするマイナスエミッションの効果を実現することも可能です。

当社は、古くから内燃機関の吸気系、燃料供給系、排気系の機能製品、自動車の燃費や排気の制御・適合などの環境技術に関わる開発を行ってきました。特に燃料系では、ガソリン、LPG、CNG、アルコールなどの多様な燃料を扱うノウハウを持っています。

これらの技術を使って、内燃機関を持つ自動車の「ゼロ CO<sub>2</sub>」、「ゼロエミッション」の実現を目指し、またその技術をグローバルサウスなどの国々へも展開して、地球環境の保護や保全に貢献していきたいと思えます。

さらに、これらの環境技術を活用して、電動化、クリーンエネルギー関連（燃料電池、水素、アンモニアなど）、新たなモビリティの技術開発、製品化にも積極的に取り組み、時流に合わせて AI、ソフト・デファインド・ビークル（SDV）に対応したソフトウェアやシステムの開発にもチャレンジし、当社の強みであるモノづくり、生産技術を革新して、新たな価値を生み出すソリューション提案などを通して、カーボンニュートラルの実現や社会課題の解決に繋げていきたい。

最後に、これからも自動車産業の発展に寄与する新たな環境技術の開発、高品質な製品やサービスの提供を続けて、世の中に貢献し、笑顔の未来を作っていきたいと思えます。

# 低濃度アンモニアの 吸着シミュレーションモデル構築

日下 星野 市川 友之 宮岡 裕樹 市川 貴之

## 要旨

アンモニア分解により生成した水素中に残留する微量アンモニアを除去する除害装置の破過特性を予測する数値シミュレーションにおいて、吸着等温線の近似式から平衡吸着量が求められているが、低濃度では破過時間の予測精度が低い。本研究では、低濃度の破過試験に対応するゼオライトのアンモニア吸着等温線を測定するため、導入圧と温度を変化させた複数の等温線測定を行った。これらは Roginsky の分布関数法により定式化された。これにより、低濃度アンモニアの破過時間を ppm オーダーで予測することができた。

## 1. はじめに

水素は環境にやさしく、質量あたりの燃焼熱はあらゆる化学燃料の中で最も大きいという特徴などを持つため、近年注目を集めている。しかしながら臨界温度が33 Kと極めて低温で、臨界圧力も1.3 MPaと比較的小さいため、水素の体積あたりのエネルギーは常温ではとても小さくなってしまふ。また水素の燃焼範囲は4%-75%と広いため爆発の危険性が高く、その炎も高温で目に見えないという特性を持っている。それ故に水素をより安全に、高密度にして貯蔵する技術が求められている。

水素エネルギーの貯蔵・輸送の手段として水素化金属、アンモニアボラン、メチルシクロヘキサンなどの水素化合物を用いることが検討されている<sup>(1,2)</sup>。中でも液体アンモニアは常温でも1MPaで容易に液化すること、体積あたりの燃焼熱が大きいことで注目を集めている<sup>(3)</sup>。さらに体積あたりの水素原子の数が液体水素の1.5倍あるため、水素キャリアとしても優れた特性を有している。しかしながらアンモニアはppmレベルの低濃度であっても高い毒性と腐食性を持つため、水素にクラッキングする場合でも直接利用する場合でも、残存したアンモニアは除害しなくてはならない。程度として、燃料電池自動車にも搭載されている固体高分子形燃料電池の水素源として利用する場合、被毒による燃料電池の劣化を抑制するには残存アンモニア濃度を0.1 ppm以下にしなければならない<sup>(4)</sup>。除害手法には様々あるが、低濃度アンモニアに対応でき処理量を大きくできる手法として、吸着材による吸着除害を採用した<sup>(5-9)</sup>。愛三工業ではガソリン蒸気の吸着装置として、キャニスタを設計製造

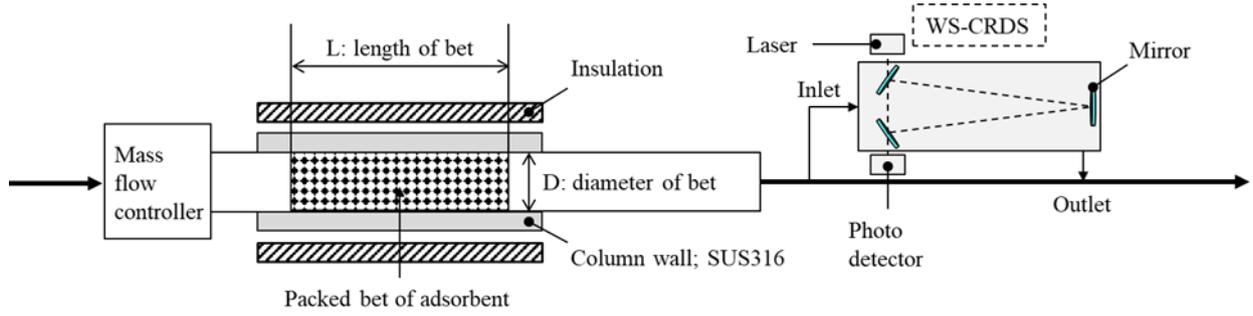
してきた実績があり、その知見を流用することも期待できる。除害装置を設計する上で重要となるのが、装置下流へ流出してしまうアンモニアの時間変化である、破過特性を予測することである。揮発性有機化合物や二酸化炭素の吸着に関しては、数値シミュレーションによって破過特性を予測する研究が多く報告されているが、ppmオーダーの特性については検討されていなかった<sup>(10-14)</sup>。本研究ではゼオライトへの低濃度アンモニア吸着挙動に着目し、一般に予測が難しいppmオーダーでの破過特性を予測できる吸着塔のシミュレーションモデルを作成した。

## 2. 実験とシミュレーション

### 2.1. 実験手法

アンモニア吸着に適する吸着材は色々あるが、今回は安価で吸着量が多く、加熱するだけで吸着したアンモニアを脱離できるNa置換X型ゼオライト(NaX:F9-HA;東ソー(株))を用いた<sup>(15)</sup>。破過試験は図1に示す装置を用いて実施した。装置の大部分は宮岡らの先行研究と同じものを用いている<sup>(16)</sup>。カラムの内径は25 mmで、充填層の長さが100 mmとなるようにゼオライトを計量し、ガラスウールと穴あき金属板、コイルスプリングを用いて固定されている。破過試験の前処理としてアルゴンを100 L/hで流しながら、アンモニア濃度計が0.1 ppmを下回るまでカラムを350 °Cで加熱、その後試験温度まで冷却している。試験に使用したアンモニア混合ガスは水素74.9%/窒素25%/アンモニア1000 ppmの比率であらかじめ調整されたガスを使っている。カラムを通して出てきたガスにおけるアンモ

図1 破過試験装置の模式図



ニア濃度を測定し、流通時間との関係を示したものが破過曲線である。

アンモニア吸着等温線はBELSORPmax(マイクロトラック・ベル)を用いて測定した。この装置ではゼオライトを入れた試料管を真空引きした後、純アンモニアを少量ずつ導入、試料管と装置配管における導入前後の平衡圧から吸着量を算出している。

## 2.2. シミュレーション手法

シミュレーションは吸着等温線、質量保存則、エネルギー保存則、吸着速度式を連立したモデルとなっており、Dassault Systems社のDymola 2017を用いて計算されている。このモデルは下記の仮定に基づいている。

- (1) 供給ガスは理想気体でありアンモニアとキャリアガスの2成分で構成されている。
- (2) 局所熱平衡を仮定し、ある場所におけるガスと吸着材の温度は等しいとする。
- (3) 質量保存則とエネルギー保存則における分子拡散の項は移流の項と比べて十分小さいとして無視する。
- (4) 吸着速度式は線形推進力近似で表現する。
- (5) ゼオライトはアンモニアのみ吸着し、キャリアガスの吸着は無視する。
- (6) 初期のカラム内温度と圧力は一様である。
- (7) 物理量のカラム径方向依存性は無視する。
- (8) カラム内の空隙率、吸着材嵩密度、カラムと吸着材の比熱は一定である。

これらの仮定から、以下の式セットが得られた。

質量保存則は次のようになり、

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = -\frac{\partial(u\rho)}{\partial x} - \frac{\hat{\rho}_z}{\varepsilon} \frac{\partial q}{\partial t} \quad (1)$$

ここで  $\rho$  ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )、 $u$  ( $\text{m}/\text{s}$ )、 $t$  ( $\text{s}$ )、 $x$  ( $\text{m}$ )、 $\varepsilon$ 、 $q$  ( $\text{kg}/\text{kg NaX}$ ) そして  $\hat{\rho}_z$  ( $\text{kg}/\text{m}^3$ ) はそれぞれ混合ガスの密度、空塔速度、時間、カラム軸に沿った座標、空隙率、ゼオライト単位質量あたりのアンモニア吸着量、そしてゼオライトのバルク密度を表している。

エネルギー保存則は次のようになり、

$$C_{p,z} \hat{\rho}_z \frac{\partial T}{\partial t} = -\varepsilon C_{p,g} \rho u \frac{\partial T}{\partial x} + Q_{in} + W \quad (2)$$

ここで  $C_{p,z}$  ( $\text{J}/\text{kg}/\text{K}$ )、 $C_{p,g}$  ( $\text{J}/\text{kg}/\text{K}$ )、 $T$  ( $\text{K}$ )、 $Q_{in}$  ( $\text{W}/\text{m}^3$ ) として  $W$  ( $\text{W}/\text{m}^3$ ) はそれぞれ、ゼオライトの比熱、混合ガスの比熱、混合ガスの温度、カラム壁からの熱流入そして吸着熱を表している。

吸着速度式は次のようになり、

$$\frac{\partial q}{\partial t} = k_f \hat{\rho}_{\text{NH}_3} \left( \frac{P_{\text{NH}_3} - P_{\text{NH}_3}^*}{P} \right) \quad (3)$$

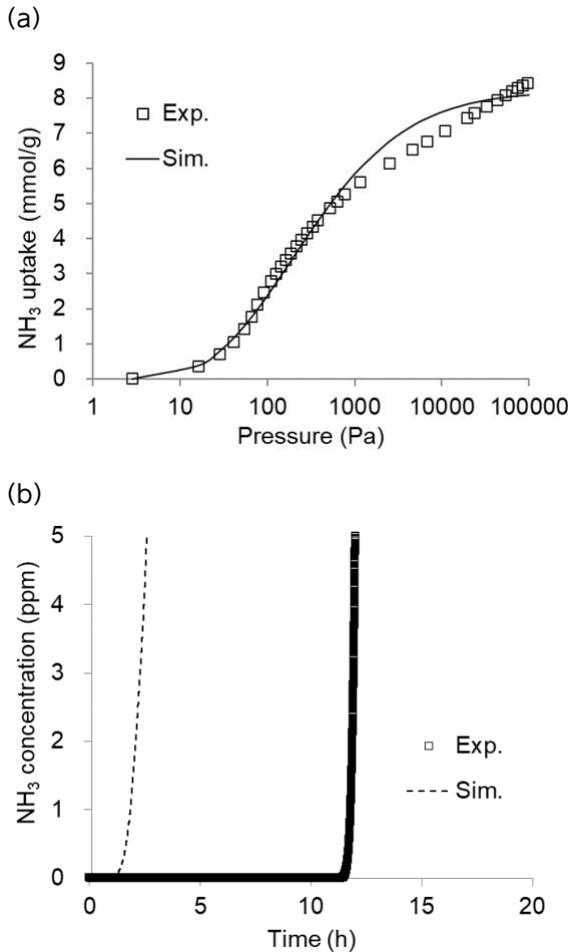
ここで  $\hat{\rho}_{\text{NH}_3}$  ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )、 $P_{\text{NH}_3}^*$  ( $\text{Pa}$ ) そして  $P_{\text{NH}_3}$  ( $\text{Pa}$ ) はそれぞれ純アンモニア気体の密度、アンモニア界面分圧そしてアンモニア分圧である。アンモニア界面分圧とは、アンモニア吸着量  $q$  と平衡となる仮想的なアンモニア分圧を意味する。 $k_f$  は吸着速度係数で、今回のモデルでは吉田の式を採用している<sup>(17)</sup>。

$$(k_f/u)(\text{Sc})^{2/3} \propto [\text{Re}/(1-\varepsilon)]^{-0.51} \quad (4)$$

ここで  $\text{Re}$  と  $\text{Sc}$  はレイノルズ数とシュミット数である。

アンモニア界面分圧を求めるのに必要な圧力と吸着量の平衡関係を表現するのが吸着等温線であり、式モデルには様々なものが存在している。キャニスタの設計に用いていたのはDubinin-Astakhovモデル<sup>(18)</sup>であり、ガソリン蒸気が液体として吸着されていることを仮定していた。一方で極低濃度のアンモニア吸着は吸着量が少ないため、ゼオライト表面に直接アンモニア分子が吸着されることとなる。水素の吸着に関する先行研究から、吸着材最表面の吸着状態は液体と見なすことができずと予想されるため<sup>(19)</sup>、今回は表面吸着モデルを採用することとした。またアンモニアは水と同じく極性分子なので、ゼオライトへの水分子の吸着に関する城野らの先行研究も参考にした<sup>(20)</sup>。城野らは、NaXゼオライトは3種類のカチオンを持っているが、その内吸着サイトとして機能するのは2種類であり、この2種類の吸着サイトはアンモニア分子と1対1で相互作用するわけではなく、2つのサイトの間等にも吸着されることがあることを分子シミュレーションによって示している。これらを考慮し、今回は

図2 T=298 Kにおける (a)アンモニアの吸着等温線 (b)アンモニアの破過曲線



Roginskyらの手法<sup>(21)</sup>を参考に表面吸着の理論に不均一性を考慮したモデルを作成した。吸着サイトの分布関数は吸着エネルギーに対してガウス分布になり、この分布は温度に依存しないと仮定すると、平衡吸着量の式は次のようになり、

$$q = q_t \left[ 1 - \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left( -\frac{\tilde{E}}{\sqrt{2}} \right) \right] \quad (5)$$

ここで $q_t$  (kg/kg-NaX)は最大吸着容量を表し、 $\operatorname{erfc}$ は相補誤差関数であり、 $\tilde{E}$ は次のようになる。

$$\tilde{E} = \frac{-RT \ln K_0 P_{\text{NH}_3}^* - E_0}{\sigma} \quad (6)$$

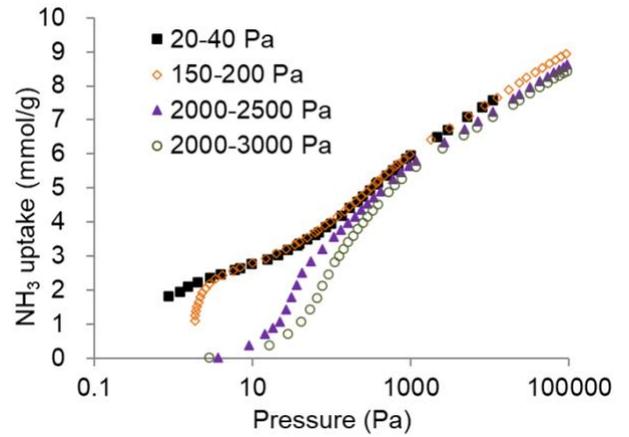
$E_0$ 、 $\sigma^2$ そして $K_0$ はそれぞれ、最頻値、標準偏差、そして平衡係数に対応するパラメータである。 $R$ は気体定数である。このモデルにおいて吸着熱は次のようになり、

$$W = -\frac{1}{\hat{V}_{\text{NH}_3}} \frac{\partial q}{\partial t} [RT \ln K_0 P_{\text{NH}_3}^*] \quad (7)$$

$\hat{V}_{\text{NH}_3}$  ( $\text{m}^3/\text{mol}$ )は純アンモニア気体のモル体積である。

吸着等温線の式(5)は3つのパラメータを持つが、この値を理論値に予想するのは困難であるため、実用上は吸着等

図3 T=298 Kで導入圧を変化させて測定したアンモニアの吸着等温線



温線を実測し結果をフィッティングすることで定式化、シミュレーションモデルに適用している。

### 3. 結果と考察

#### 3.1. 探索的検討結果について

ゼオライトを充填したカラムに混合ガスを275 L/h(stp)の流量で供給した。このとき温度は298 Kで圧力は114 kPaであり、この試験に対して同様の条件で数値シミュレーションを実施しモデルの妥当性を検証した。図2aにシミュレーションで用いた吸着等温線の実測値とフィッティング結果を示し、図2bに破過試験結果とシミュレーション結果を示す。図2bではフィッティングパラメータ $k_f$ の値に依らず、シミュレーションでは、アンモニア濃度が実測結果と比較して遥かに早く増加し始めるという結果を示している。この結果はシミュレーションにおける吸着量が実際の吸着量よりも少ないことを意味している。シミュレーションにおける吸着量は吸着等温線から決定され、図2aで吸着等温線が上手くフィッティングできていることを考えると、この結果は吸着等温線測定のような静的な吸着量と破過試験のような動的な吸着量が異なる可能性があることを示唆している。

破過試験は混合ガスで実施されるため、たとえアンモニア分圧が小さくても全圧は大気圧以上となる試験である。一方で吸着等温線測定は純アンモニアガスを用いて実施されるため、アンモニア分圧が小さいというのはそのまま全圧が小さいことを意味する。

城野らの先行研究では水がゼオライトに吸着する際、吸着サイトの周りでクラスター化している可能性が示唆されている<sup>(20)</sup>。アンモニアも水と同じように強い極性を持っている

図4 (a)各温度における吸着等温線. 実プロットが実測値, 実線が近似式  
(b)吸着等温線から算出した吸着サイトの分布

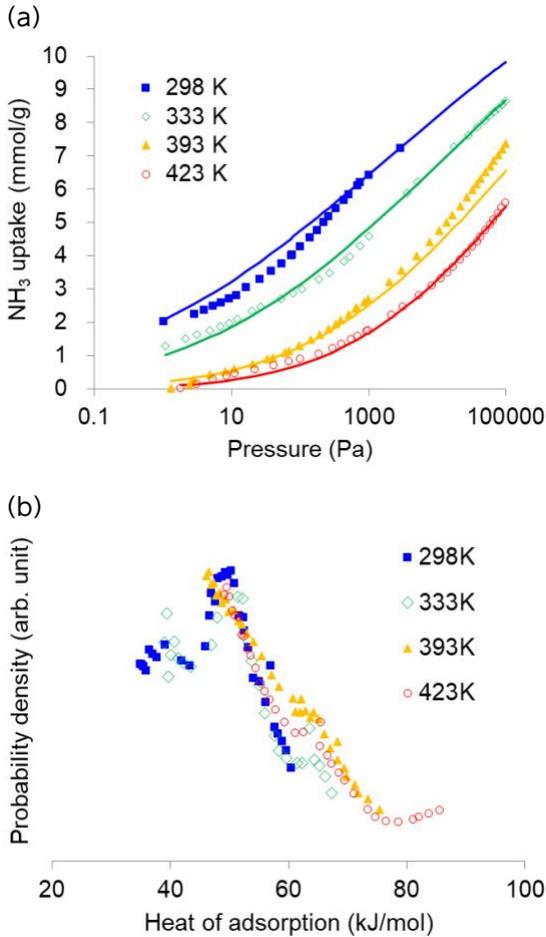
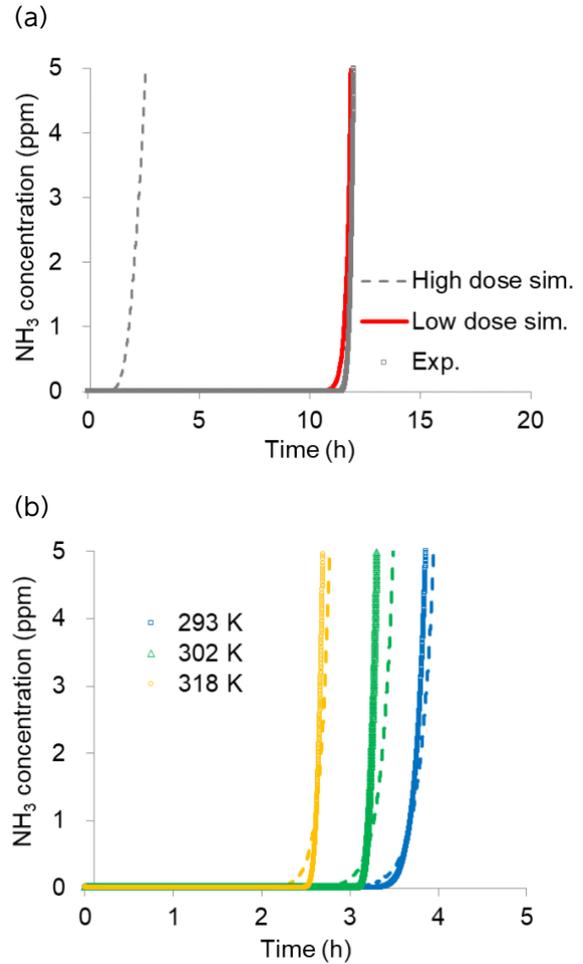


図5 (a)改善後(Low dose)のモデルによる破過曲線  
(b)各温度における破過曲線. 実プロットが実測値, 破線がシミュレーション予測



ため,同様にクラスター化していると考えると,全圧が小さい場合はこのクラスターによってゼオライトの結晶内部へアンモニア分子が拡散できず,吸着サイトがほとんど使われなまま平衡に達してしまっている可能性が示唆される。

### 3.2. 修正後試験結果について

拡散阻害に関して,パラジウムコートされたマグネシウムへの水素吸蔵において類似の現象が報告されている<sup>(22)</sup>.このアナロジーと考えると,クラスター化の原因は急速な吸着にあると考えられる.そこで吸着等温線の測定の際に,一度に導入されるアンモニア量を減らした測定を実施した。

導入圧を変化させて吸着等温線を測定した結果を図3に示す.この結果から10 Pa以下の領域における吸着量が導入圧によって大きく変化することが見て取れる.破過試験ではアンモニアは十分ゼオライトの結晶内部まで拡散していると考えられるため,同様に結晶内部まで吸着が進行していると期待される最も導入圧を小さくして測定した吸着等温線がシミュレーションに適すると考えられる.導入圧を小さくし,さらに温度を変化させて吸着等温線を測定した結果

を図4aに示す.これらの吸着等温線から吸着サイトの分布関数を算出すると図4bが得られ,これをガウス分布でフィッティングし定式化,数値シミュレーションに適用した。

次に先の試験と同様の流量275 L/h(stp),温度298 K,圧力114 kPaでシミュレーションを実行,フィッティングパラメータ $k_f$ の値を決定した.シミュレーションモデルに導入圧を小さくして測定した吸着等温線を適用すると,実測と破過特性が一致する解が存在するようになることが図5aからも確認できる.作成したシミュレーションモデルが有用か確認するため条件を変えた破過試験を実施し,シミュレーション予測との比較を行った.図5bに流量900 L/h(stp),圧力190 kPaとした破過試験結果とシミュレーション予測結果を示す.温度や流量が変化しても0.1 ppm破過の時間は誤差10%程度で一致しており,ppmレベルの低濃度でも精度よく破過特性を予測できていることが見て取れる.結果は省略するが,さらにカラム内径や充填層長さを変えた試験においても破過特性を予測することに成功している。

## 4. 結論

本研究では、定容法による吸着等温線の測定において、導入圧を変化させることで吸着量が変化するという予想外の結果が得られた。これらの吸着等温線の内、シミュレーションの結果から、破過試験に対応するのは導入圧を低くして測定した等温線であると分かった。この吸着等温線の導入圧依存性はアンモニア分子のクラスター化に起因する可能性が示唆されるが、より詳細な調査が必要である。また、作成した新たな吸着等温線のモデル式は、複数種類の吸着サイトを持つ吸着材にも適用できると考えられ、ゼオライト以外の吸着材(MOF, PCP等)にも活用可能であると期待される。

破過試験に対応した吸着等温線の測定、吸着サイトの不均一性を考慮した吸着等温線の定式化の2つを以て、ppmオーダーの低濃度においても破過特性を精度良く予測するシミュレーションモデルを作成することが可能となった。

これら結果は水素キャリアとしてのアンモニアを安全に利用するための技術として活用可能であり、将来の水素社会の実現に貢献するものであると考える。

### 参考文献

- (1) A. Züttel, Hydrogen storage methods, *Naturwissenschaften* 91 (2004) 157-172. <https://doi.org/10.1007/s00114-004-0516-x>.
- (2) U. Eberle, M. Felderhoff, F. Schüth, Chemical and physical solutions for hydrogen storage, *Angewandte Chemie - International Edition* 48 (2009) 6608-6630. <https://doi.org/10.1002/anie.200806293>.
- (3) A. Valera-Medina, H. Xiao, M. Owen-Jones, W.I.F. David, P. J. Bowen, Ammonia for power, *Prog Energy Combust Sci* 69 (2018) 63-102. <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2018.07.001>.
- (4) ISO 14687, Hydrogen fuel quality - Product specification, 2019.
- (5) C.Y. LIU, K. AIKA, Ammonia adsorption on ion exchanged Y-zeolites as ammonia storage material, *Journal of the Japan Petroleum Institute* 46 (2003) 301-307.
- (6) C.C. Rodrigues, D. de Moraes, S.W. da Nóbrega, M.G. Barboza, Ammonia adsorption in a fixed bed of activated carbon, *Bioresour Technol* 98 (2007) 886-891. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2006.03.024>.
- (7) P. Kumar, K.-H. Kim, E.E. Kwon, J.E. Szulejko, Metal-organic frameworks for the control and management of air quality: advances and future direction, *J Mater Chem A Mater* 4 (2016) 345-361.
- (8) B. Wang, L.H. Xie, X. Wang, X.M. Liu, J. Li, J.R. Li, Applications of metal-organic frameworks for green energy and environment: New advances in adsorptive gas separation, storage and removal, *Green Energy and Environment* 3 (2018) 191-228. <https://doi.org/10.1016/j.gee.2018.03.001>.
- (9) M. Tamotu, B. Keito, T. Seiki, Studies on the adsorption removal of ammonia gas, 2) adsorption of ammonia gas on several kinds of zeolites, *Sangyo Igaku* 19 (1977) 87-91. <https://doi.org/10.1539/joh1959.19.87>.
- (10) R. Ben-Mansour, M.A. Habib, O.E. Bamidele, M. Basha, N.A. A. Qasem, A. Peedikakkal, T. Laoui, M. Ali, Carbon capture

by physical adsorption: Materials, experimental investigations and numerical modeling and simulations - A review, *Appl Energy* 161 (2016) 225-255. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.10.011>.

- (11) Y. Xiao, S. Qiu, Q. Zhao, Y. Zhu, C.B. Godiya, G. He, Numerical simulation of low-concentration CO<sub>2</sub> adsorption on fixed bed using finite element analysis, *Chin J Chem Eng* 36 (2021) 47-56. <https://doi.org/10.1016/j.cjche.2020.08.012>.
- (12) J.A. Delgado, M.A. Uguina, J.L. Sotelo, B. Ruíz, Fixed-bed adsorption of carbon dioxide-helium, nitrogen-helium and carbon dioxide-nitrogen mixtures onto silicalite pellets, *Sep Purif Technol* 49 (2006) 91-100. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2005.08.011>.
- (13) D.T. Tefera, M. Jahandar Lashaki, M. Fayaz, Z. Hashisho, J.H. Philips, J.E. Anderson, M. Nichols, Two-dimensional modeling of volatile organic compounds adsorption onto beaded activated carbon, *Environ Sci Technol* 47 (2013) 11700-11710. <https://doi.org/10.1021/es402369u>.
- (14) C.L. Chuang, P.C. Chiang, E.E. Chang, Modeling VOCs adsorption onto activated carbon, *Chemosphere* 53 (2003) 17-27. [https://doi.org/10.1016/S0045-6535\(03\)00357-6](https://doi.org/10.1016/S0045-6535(03)00357-6).
- (15) S.H. Satoshi YOSHIDA, M. NAKANO, Nitrogen and Oxygen Adsorption Properties of Ion-exchanged LSX Zeolite, *KAGAKU KOGAKU RONBUNSHU* 30 (2004) 461-467. <https://doi.org/10.1252/kakoronbunshu.30.461>.
- (16) H. Miyaoka, H. Miyaoka, T. Ichikawa, T. Ichikawa, Y. Kojima, Highly purified hydrogen production from ammonia for PEM fuel cell, *Int J Hydrogen Energy* 43 (2018) 14486-14492. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2018.06.065>.
- (17) F. Yoshida, D. Ramaswami, O.A. Hougen, Temperatures and partial pressures at the surfaces of catalyst particles, *AIChE Journal* 8 (1962) 5-11.
- (18) M.M. Dubinin, V.A. Astakhov, Description of adsorption equilibria of vapors on zeolites over wide ranges of temperature and pressure, in: ACS Publications, 1971.
- (19) H. Gi, Y. Kashiwara, Y. Itoh, K. Sharma, N. Ogita, H. Miyaoka, T. Ogawa, M. Simanullang, L. Prost, T. Ichikawa, Superdense state of the monolayer hydrogen on adsorbent under liquefied temperature, *Int J Hydrogen Energy* 48 (2023) 3534-3540. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.10.081>.
- (20) K. Shirono, A. Endo, H. Daiguji, Molecular dynamics study of hydrated faujasite-type zeolites, *J Phys Chem B* 109 (2005) 3446-3453.
- (21) S.Z. Roginsky, Adsorption and Catalysis on Non-Uniform Surface, *USSR Academy* (1949).
- (22) V.P. Zhdanov, A. Krozer, B. Kasemo, Kinetics of first-order phase transitions initiated by diffusion of particles from the surface into the bulk, *Phys Rev B* 47 (1993) 11044.

### 著者



日下 星野  
研究開発部



市川 友之  
ハイドロラボ株式会社



宮岡 裕樹  
広島大学



市川 貴之  
広島大学

# アンモニア発電の低エネルギー起動に向けた 常温水素化技術の研究開発

寒川 太郎 市川 友之 宮岡 裕樹 市川 貴之

## 要旨

SOFC (固体酸化物形燃料電池) を用いたアンモニアFC発電は、アンモニアをクラッキングして水素にする際の熱に燃料電池発電時の排熱を利用できるため、高純度水素生成や高効率発電が可能であると考えられている。

しかし、起動時は燃料電池が低温のため排熱利用ができず、電気ヒータ等による改質器の加温が必要であり、エネルギーロスが大きいことが知られている。

そこで、電気ヒータを用いない低エネルギー起動に向けて、流動アンモニアガスとMHの反応による常温での水素化技術の研究開発を行った。

## 1. はじめに

現在、地球温暖化対策に向けさまざまな取り組みが世界的に進められている中で、温室効果ガスを発生させないエネルギー源の一つとして水素の利用拡大が世界各国で取り組まれている。

水素は常温で気体であることから、輸送/貯蔵性に課題があり、その対策手段として水素密度が高く、液化が容易で水素キャリアとして優れるアンモニアが注目されている。

アンモニアの研究では、エンジンやガスタービン等の燃焼用燃料として検討される以外に、燃料電池の燃料としてアンモニアから水素を取り出し、発電の燃料として活用する研究が多くされている。しかしながらアンモニアを水素と窒素に分解(クラッキング)する際には触媒の加熱等、大きな熱エネルギーが必要となる。

アンモニアを用いた燃料電池発電のシステム起動時には、アンモニアのクラッキングに必要な熱源がないため、電気ヒータ等により触媒を暖機する必要があるが、加熱に時間がかかるとともに、必要なエネルギーが大きいという課題がある。また、電気ヒータの代わりにアンモニアを燃焼して熱源にする方法も考えられるが、NOx発生という新たな課題が生じる(図1参照)。

アンモニアや電気ヒータを使用しない暖機方法として水素ポンペを利用した水素燃焼が存在する(図2. 参照)。

この方法は水素ポンペを利用することで簡単に暖機が可能だが、水素用の供給系統が別途必要なため、発電システム

図1 発電システム課題

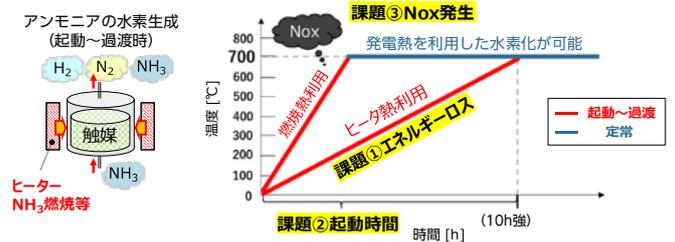


図2 水素ポンペを用いた暖機方法

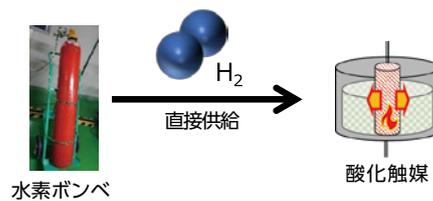
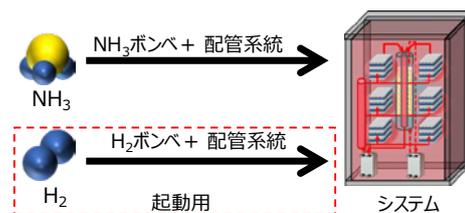


図3 水素供給系統追加によるシステムの肥大化



の複雑化による大型化、複数の燃料準備による煩雑化(図3参照)が課題となる。

システム起動時の暖機用熱源確保の課題解決として、常温でアンモニアから水素を生成できるAMMONOLYSIS反応を活用し、熱源として活用できないかを検討した。AMMONOLYSIS反応とは、常温でアンモニアガスとMHの反応により、水素を発生させる技術である。またAMMONOLYSIS反応は可逆反応のため、システム起動時に消費したMHの再生が可能である(図4参照)。

アンモニアが含まれない水素であれば、燃焼時にNOxが生じず、電力も消費することなく急速暖機が可能のため、グリーンかつ低エネルギーでの短時間起動が可能となる(図5参照)。

AMMONOLYSIS反応を活用する際の課題として、「暖機に必要な量の水素生成」がある。従来、雰囲気アンモニアガスによる静的なAMMONOLYSIS反応の研究がされてきた(山本他, 2009)が、暖機で用いるためには流動アンモニアガスとMHを反応させ、暖機に必要な量の水素生成を必要がある。

図4 AMMONOLYSIS反応

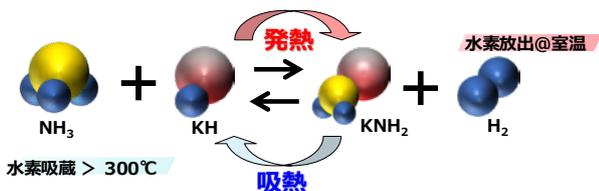
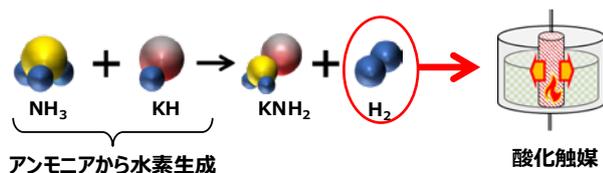


図5 AMMONOLYSIS反応を用いた暖機方法

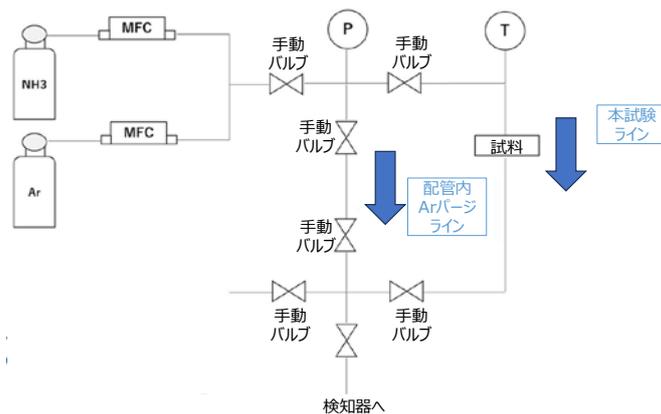


## 2. 評価方法

流動アンモニアガスとMHによるAMMONOLYSIS反応の評価を図6に示す装置にて実施した。

- まず、流動ガス評価に用いた装置の特徴を以下に挙げる。
- ・従来研究していた雰囲気アンモニアガスによるAMMONOLYSIS反応の評価では、試料の入った密閉容器にアンモニアガスを供給し、密閉する方法であったが、流動アンモニアガスを常時供給することができないため、図6のような設備を構築した。
  - ・配管内の残留ガス除去のため、パージラインを設けた。
  - ・試料を通った反応後ガスを検知器で分析し、水素生成量をモニタリングできるようにした。

図6 流動ガス評価設備の系統図



次に実験のフローについて以下に示す。

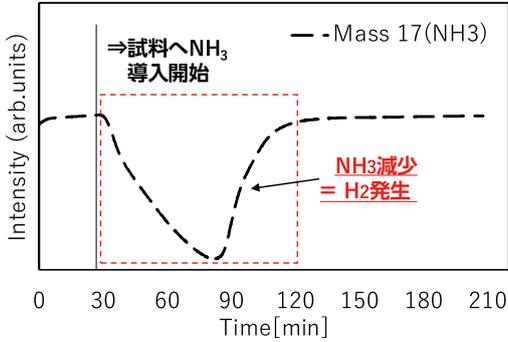
### <実験のフロー>

- ① 高純度アルゴン(Ar)を充填したグローブボックス内で計量した試料を試験容器に充填する。
- ② 試験容器を試験装置に設置する。
- ③ 配管内の残留ガスを除くため、配管内Arパージラインにバルブを切り替えパージする。
- ④ 本試験ラインへバルブを切り替え、アンモニアガスをマスフローコントローラ(MFC)で制御し、試料へ供給する。
- ⑤ 試料を通ったOutガスを検知器で分析し、水素(H<sub>2</sub>)生成量をモニタリングする。
- ⑥ 試験後、配管に残ったアンモニアガスをArパージにて除去し容器前後のバルブを閉め試験容器を設備から取り外す。
- ⑦ 試験容器を再度Ar充填したグローブボックス内に入れる。
- ⑧ 試験容器から試料を取り出し、重量を確認する。試験後試料の重量を試験前試料の重量から差し引くことで、反応に伴う重量増加=A(mg)を実測し、100%反応したと仮定した場合のアミド化による重量増加分をB(mg)として、Bに対するAの割合を百分率で表すことにより、試料の反応率(=AMMONOLYSIS反応の進行具合)とする。
- ⑨ 試験後の試料をX線結晶構造解析(XRD, 固体中に含まれる成分や結晶構造の情報が得られる)によって分析し、アミド化合物が生成していることを確認する。

### 3. 結果

構築した装置を用いて実施した流動アンモニアガス中における水素化カリウム(KH)のAMMONOLYSIS反応の評価結果を図7に示す。

図7 試料下流のアンモニア量の測定結果



上記グラフ図7は図6に示した装置内の検知器にて試料下流のアンモニア濃度を測定した結果となっている。

アンモニアを試料に導入開始した時点(30分程度経過時)と比較して、30分～120分経過時点ではアンモニアの濃度が減少していることが確認できる。この結果より、流動アンモニアガス中においてもAMMONOLYSIS反応が進行し、アンモニアが消費されて水素が生成されていることがわかる。

また、AMMONOLYSIS反応の進行度を確認するため、評価前後の試料についてXRDによる分析を行った。結果を図8、図9に示す。

図8 評価前のXRDの測定結果

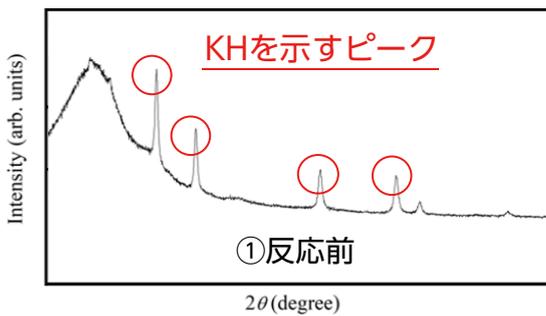
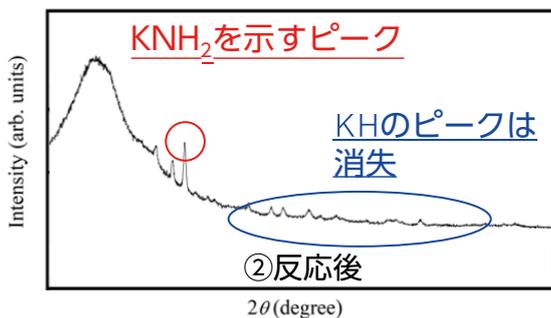
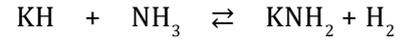


図9 評価後のXRDの測定結果



KHのAMMONOLYSIS反応は以下の反応式で表される。



したがって、AMMONOLYSIS反応が進行している場合、アンモニアが消費され、KHがカリウムアミド(KNH<sub>2</sub>)へ変化し、水素が生成される。

実際に、XRDを用いて確認を行った。図8、図9のXRDの測定結果を比較すると反応前に確認できていたKHのピークが消失していることがわかる。また、反応後は反応式が示すように、AMMONOLYSIS反応によってKNH<sub>2</sub>が生成されていることが確認できる。

以上の測定結果より、流動アンモニアガス中においてもAMMONOLYSIS反応が進行することが確認できた。

### 4. 課題と解決策

今回の結果より、流動アンモニアガス中でのAMMONOLYSIS反応によって得られた水素を燃焼させることで発電システムの暖機に利用する目途付けができた。

ただし、流動アンモニアガス中でのAMMONOLYSIS反応によって生成した水素には、一定量の残存アンモニアが含まれており、このアンモニアが残存する水素を燃焼させた場合、NO<sub>x</sub>が発生するという課題が残る。

図10に残存アンモニア量と発生するNO<sub>x</sub>量の関係を示す。

この課題についてはAMMONOLYSIS反応後にアンモニア吸着による除去を行うことでNO<sub>x</sub>を発生させない暖

図10 残存アンモニア量と発生NO<sub>x</sub>量の関係

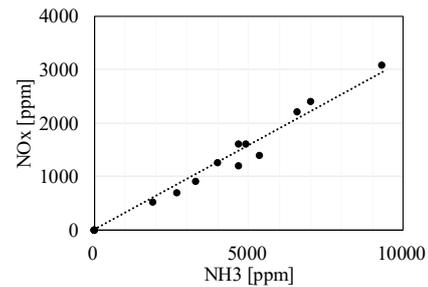


図11 NO<sub>x</sub>低減にむけて検討中の暖機システム

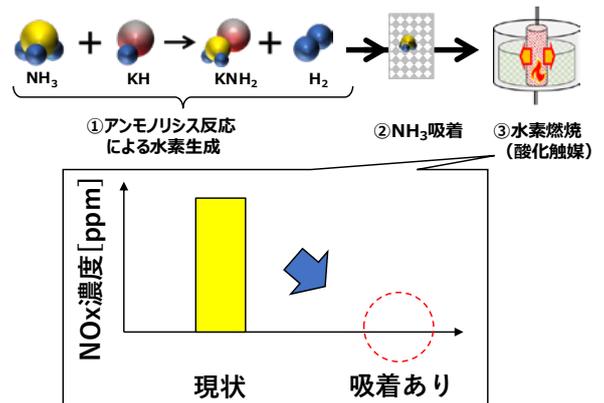
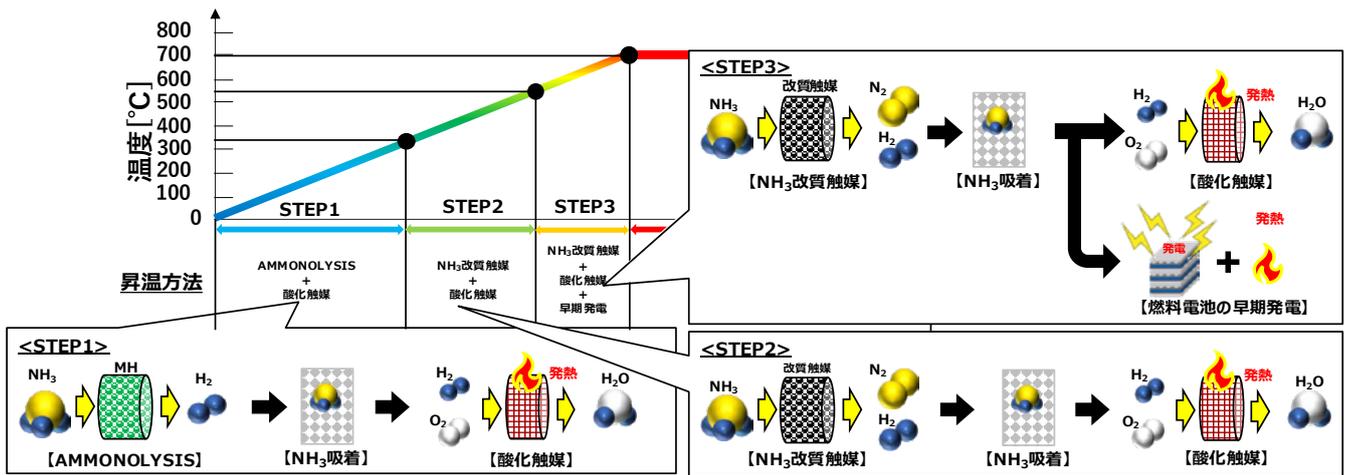


図12 検討中の暖機システムイメージ



機システム図11を構築した。

また、AMMONOLYSIS反応に使用するアルカリ金属は危険性が高いため、使用するアルカリ金属の少量化も課題となる。

この課題については、図12に示すように暖機に使用する水素の生成方法を全てAMMONOLYSIS反応で行わず、なるべく早く改質器へ切り替えることが望ましく、システムの温度毎で水素生成方法を変更することで、必要なアルカリ金属を少量化することで対応する。以下に、システム温度と水素生成方法のシステム案を記載する。

<STEP1>

- ・ 温度 常温～350℃程度
- ・ 水素生成方法 AMMONOLYSIS反応
- ・ 詳細 燃料電池発電の起動時、図11.に示すシステムにて、常温で水素生成し、燃焼を実施。システム内のアンモニア改質器が作動できる温度(350℃程度)まで昇温。

<STEP2>

- ・ 温度 350℃～550℃
- ・ 水素生成方法 アンモニア改質器
- ・ 詳細 アンモニアの供給先をAMMONOLYSIS反応からアンモニア改質器に変更。アンモニア改質器で改質できなかったアンモニアは吸着にて除去。水素燃焼による暖機を実施。

<STEP3>

- ・ 温度 550℃～700℃
- ・ 水素生成方法 アンモニア改質器
- ・ 詳細 STEP2同様アンモニア改質器で水素生成を行う。燃焼に使用していた水素の一部を燃料電池に供給し、早期発電を開始。発電による熱も利用して700℃まで昇温を実施。

5.まとめと今後

アンモニアを燃料としたシステムにおいて、アンモニアは常温で燃焼しにくいことから、水素など別の燃料を用いてシステム暖機をすることが多い。これに対し、AMMONOLYSIS反応を用いることで、アンモニアを常温で水素に変換し、アンモニアだけでシステム暖機ができる可能性を検証した。今回の評価では、動的なガス供給条件においてもAMMONOLYSIS反応によりアンモニアを水素に変換できることが確認できた。また、アンモニア起因のNOxはアンモニア吸着を追加することで対策可能であることが分かった。

今後はAMMONOLYSIS反応を利用したシステムを最適化し、アルカリ金属を少量化させ、かつ安全対策を構築する。その上で検討中の低温起動システムの実証を行い、ヒータを使用しない暖機方法の確立を目指す。また、FC発電だけでなく、燃焼器の起動用火種など技術活用を検討していく。

参考文献

(1) H. Yamamoto, H. Miyaoka, S. Hino, H. Nakanishi, T. Ichikawa, Y. Kojima, Recyclable hydrogen storage system composed of ammonia and alkali metal hydride, International Journal of Hydrogen Energy, 34, 9760-9764, 2009.

著者



寒川 太郎  
カーボンニュートラル  
システム開発

市川 貴之  
広島大学

宮岡 裕樹  
広島大学

市川 友之  
ハイドロラボ  
株式会社

# ステッピングモータを用いた 密閉タンク封鎖弁の開発

村井 真司 岩田 伸二 都築 康洋 牧野 勝彦

## 要旨

ガソリン蒸気に対する環境規制強化に伴い、PHEVなどキャニスタパーシ量の少ない車両では密閉タンクシステムが拡大している。密閉タンクシステムにおいてはタンク圧力を封鎖するための圧力制御弁が必要となる。本稿では、ステッピングモータを使用した小型軽量な密閉タンク封鎖弁について紹介する。

## 1. まえがき

大気汚染を防止するためにエバポエミッションに対する規制が一層強化されている。車両におけるエバポシステムについてはガソリンベーパーをキャニスタで一時捕集し、走行中のエンジン負圧により吸着ベーパーをパーシして燃焼処理することで成立している。しかし、市場では環境にやさしく燃費効率にすぐれたPHEV、HEV等の車両が増加しており、それらの車両はキャニスタパーシ量が少なくなるためエバポ規制を満足することが難しくなっている。

近年はパーシの少ない車両で規制を満足する技術として密閉タンクシステムの採用が拡大しており、そのシステムではタンク圧力を調整する制御弁が必要となる。本稿では、ステッピングモータを用いた小型軽量なタンク封鎖弁を開発したので紹介する。

## 2. 密閉タンクシステムの構成

### 2.1. 従来システムと密閉システムの比較

まず、従来システムの例を図1に示す。燃料タンクから発生したガソリンベーパーはキャニスタに常時捕集され、走行中のエンジンの吸気管負圧を利用してキャニスタから捕集ベーパーをパーシして燃焼処理を行うものである。

次に密閉タンクシステムの例を図2に示す。この例では封鎖弁は燃料タンクとキャニスタの間に配置されており、必要な時以外はガソリンベーパーをキャニスタに吸着させない構成となっている。また、タンク圧力を常時モニタできるように圧力センサを燃料タンクに備えている。

図1 従来のシステム

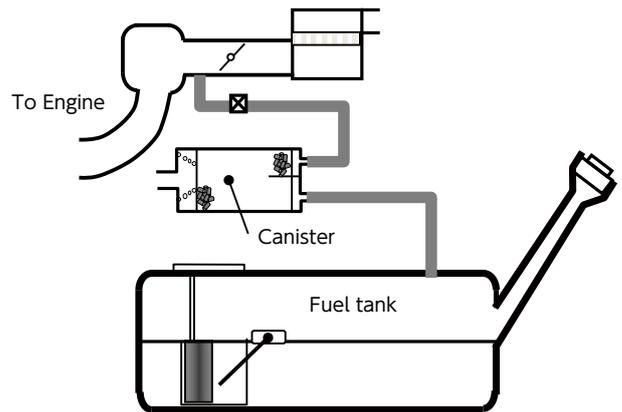
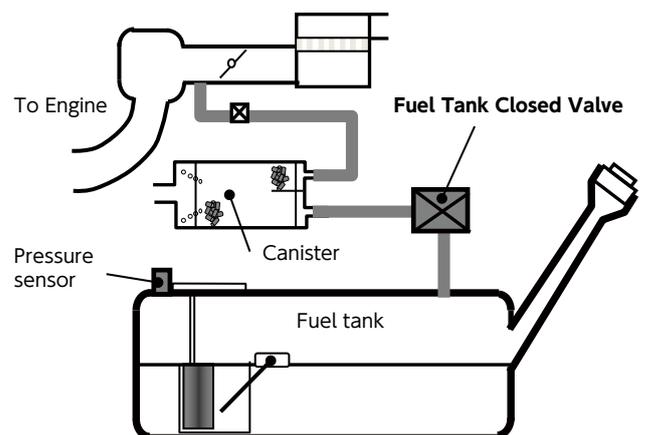


図2 密閉タンクシステム



## 2.2. 封鎖弁の機能

封鎖弁に要求される機能は大きくは下記①～③であり、市場での車両状況(駐車時, 走行時, 給油時)に応じてそれぞれ機能が必要となる。

- ① シール機能 [駐車時]
- ② リリーフ機能 [駐車時] (メカリリーフ弁によるタンク保護)
- ③ 流量制御機能 [走行時, 給油時]

表1に状況に対する必要機能を示す。

表1 状況に対する必要機能

Situation	Parking	Driving	Refueling
	① Seal function ② Relief function	③ Flow control function	③ Flow control function
Required function	Seal up to specified pressure, release pressure if exceeded	Control flow rate according to purge to the purge	Depressurize before refueling, hold fully open to secure flow path

## 3. 開発コンセプト

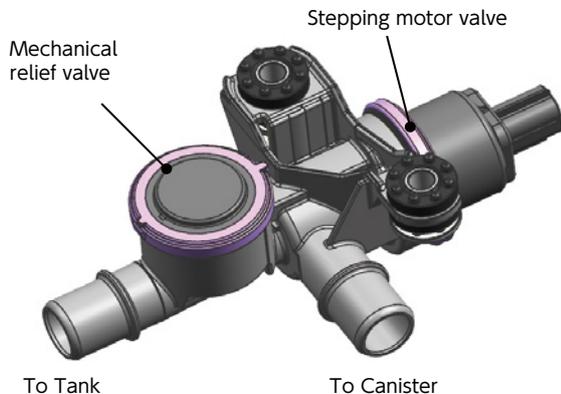
### 3.1. 開発品の概要

主要機能であるシール機能と流量制御機能を満足するために下記の方策を織り込み実施した。

- 小型ステッピングモータの採用
- 送りねじ機構を用いたストローク制御
- 2体構造バルブの採用
- メカリリーフ弁の一体化

図3に開発品の概要を示す。

図3 開発品の概要



現在, 製品化されている封鎖弁としては電磁弁タイプが主流である。各項目についてステッピングモータとの比較を表2にまとめた。

表2 電磁弁タイプとの比較表

Actuator type	Solenoid	Stepping motor
Refueling	△ Valve opening hold requires energization	○ No energization required for valve open holding
Driving	△ Flow control by on-off Must be responsive	○ Flow control by stroke
Response	○	△
Leakage	○	○
Size	△	○
weight	×	○

電磁弁タイプは応答性に優れるが給油時の通路を確保するため体格と重量が大きくなりがちである。ステッピングモータは応答性は劣るが送りねじ機構を用いてストローク制御が可能であり小型化できる。

図4 ステッピングモータの概要

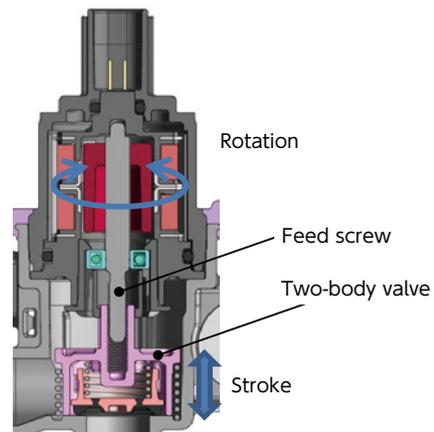
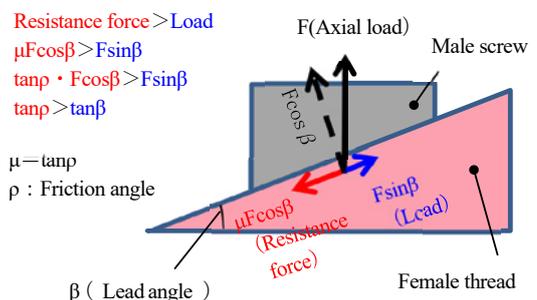
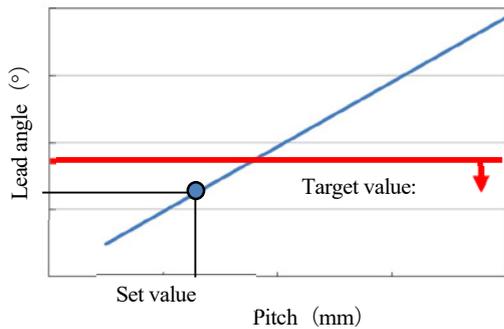


図4にモータ部の概要を示す。バルブ全開となる給油時はストローク量を確保することで低圧損を達成し, 送りねじのピッチを小さくすることで微小流量制御性を両立させた。また, 送りねじのリード角を小さくすることで軸負荷に対して無通電保持することが可能となり給油中の電力消費量を低減することができる。

図5にねじ角度の関係を示す。

図5 摩擦角とリード角の関係





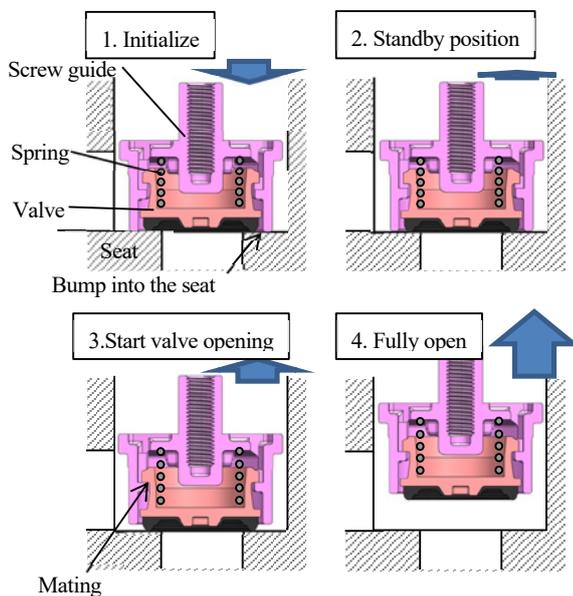
### 3.2. バルブ構造

ステッピングモータは位置検出するためのセンサを持たずに制御原点からのステップ数で位置決め制御ができるという特性がある。そして、そのためには制御原点決めのイニシャライズが必須となる。

イニシャライズはバルブを突き当てて実施するがバルブにはシール機能を満足するためにゴム部材が必要となる。その場合にはゴムを突き当てすることになるためモータ推力のばらつきによりゴムの変形量がばらつき、安定したシール機能を確保できないことが懸念される。そこでイニシャライズとシール機能を両立させるために2体構造のスプリング付きバルブを採用した。

図6にバルブ構造を示す。送りねじ部を有するスクリュガイドの端面をシート部に突き当てすることで安定してイニシャライズができる。バルブ部はスクリュガイドの内側にスプリングと共に内蔵される構造となっており、スプリング力により常時安定してシール機能を確保できる。スクリュガイドとバルブはそれぞれに嵌合する爪部を持っており、所定量をストロークさせることでシートからバルブが離脱する。

図6 バルブ構造



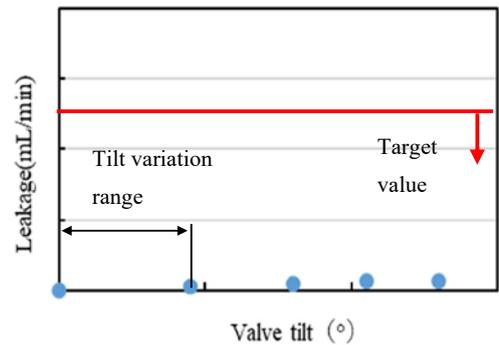
## 4. 開発品の性能

### 4.1. シール性

2体構造のバルブとしたことで安定したシール性を確保することができた。モータとシート部に傾きがあってもバルブ部分がシートに追従することが可能となっている。

図7に傾きに対するシール性を示す。

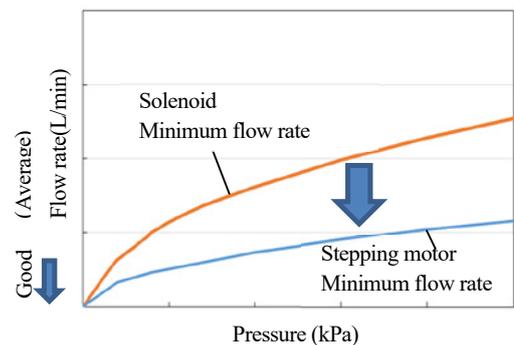
図7 傾きに対するシール性



### 4.2. 微小流量制御

本開発品はモータ+送りねじによるストローク制御を採用したことにより微小な流量制御が可能となった。結果として微小パーセント量の車両状態でも圧抜きが可能となった。図8に電磁弁タイプとの流量特性の比較を示す。電磁弁タイプで微小流量制御するにはストロークを確保した上で高応答にする必要があるため不利となる。

図8 流量特性の比較



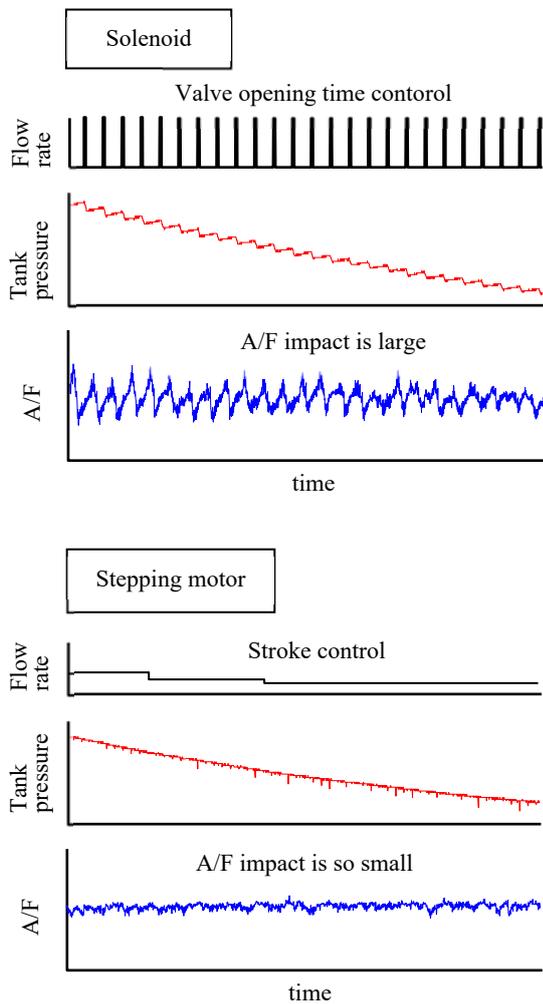
### 4.3. A/F荒れの抑制

走行中の流量制御例としてエンジンのパーズに合わせてタンク圧抜きをする場合を想定する。電磁弁タイプはバルブの開弁時間制御により圧抜きするため大流量の間欠流れとなり、燃料フィードバック制御が追い付かずA/F荒れが大きくなる傾向となる。対してステッピングモータタイプはストローク制御することで小流量の連続流れとなり、フィードバック制御が追い付いてA/F荒れを小さくすることが可能であ

る。結果としてドライバビリティの向上が期待できる。

図9に制御方式によるA/Fの違いを示す。

図9 制御方式によるA/Fの違い

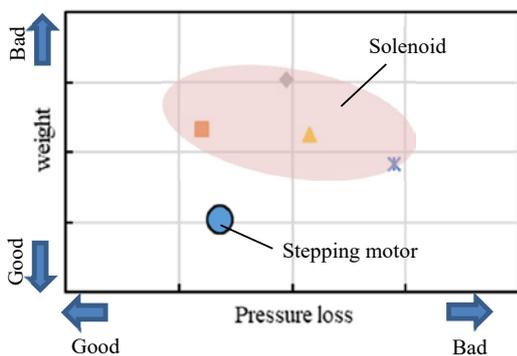


#### 4.4. 低圧損と小型化の両立

低圧損に対してはバルブストロークを確保することで達成している。小型化についてはステッピングモータを採用したことで主流となっている電磁弁タイプに対して40%以上の軽量化を実現、世界最軽量レベルを達成したと言える。

図10に圧損と重量を示す。

図10 圧損と重量



## 5. まとめ

ステッピングモータを用いることで小型軽量のタンク封鎖弁を開発することができた。

- (1) 2体構造バルブを開発し、ステッピングモータのイニシャルイズと安定したシール性を両立した。
- (2) ストローク制御とすることで微小流量制御が可能となり、低圧損かつ軽量化を実現した。

最後に本製品を開発するにあたり多大なご支援、ご協力を頂いた全ての関係者の皆様に深く感謝申し上げます。

#### 参考文献

- (1) 品川昌慶ほか:密閉タンクシステム用封鎖弁の開発, 2006年春季大会学術講演会講演予稿集 20065285
- (2) 安江昭成ほか:大流量で高密閉なDCモータ式EGRバルブの開発, 2017年春季大会学術講演会講演予稿集 20175336

#### 著者



村井 真司  
第1製品開発部



岩田 伸二  
技術統括部



都築 康洋  
第1製品開発部



牧野 勝彦  
研究開発部

# キャニスタの樹脂材料変更

坪井 俊樹 山本 典永 早川 昌光

## CO<sub>2</sub> 排出量が少ないポリプロピレンを採用、 CO<sub>2</sub> 低減に効果を発揮しています

車は、走行中、駐車中、給油中に多くの炭化水素（HC）を大気に放出しています。この排出ガスは総称してエバポ（エバポレーティブエミッション）と呼ばれ、各国・地域などで排出量を規制する法規が敷かれています（欧州：EURO6、米州：LEV-Ⅲ など）。キャニスタは、これらの法規を遵守するための環境製品で、燃料タンクと大気をつなぐ経路に設置され、タンク内で気化したガソリンベーパーを活性炭に吸着させることで、HCの車外への放出を抑制します。キャニスタを構成している材料は主に活性炭と樹脂で、この樹脂には従来「PA66（ポリアミド）」が用いられていました。

この樹脂材を、製造工程が簡素でCO<sub>2</sub>排出量が少ないPP-GF（ガラス強化ポリプロピレン）に置き換えて、さらなる環境指標の向上を図ったのが今回の取り組みです。

本材料の強度は従来品のPA66と同等以上で、変形量（負荷に対する伸び）は小さくなることから板厚低減も同時に織り込みました。

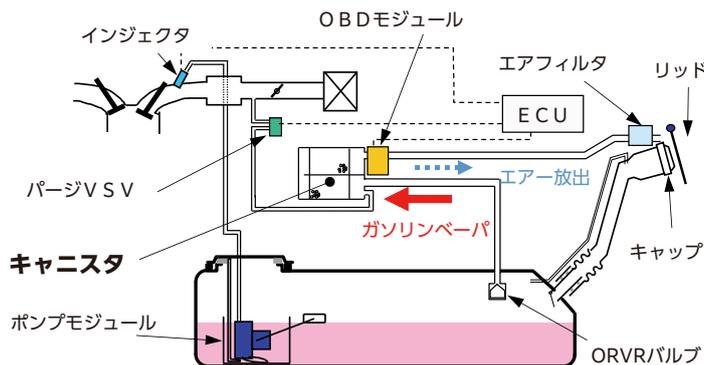
懸念点としてガソリンベーパーの透過が想定されましたが、得意先と市場を模擬した新たな評価条件を設定し規制値に対し問題のないレベルであることを検証し、材料置換を実現しました。1台あたりのCO<sub>2</sub>排出量36%減、質量9%減など、商品力を大きく向上させています。

### 実績ハイライト

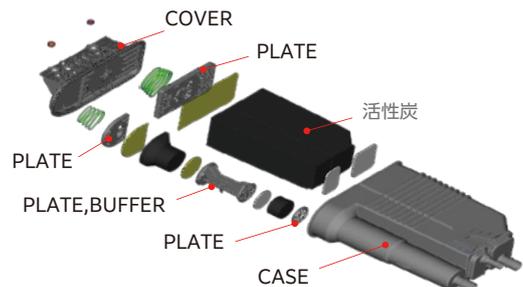
## 01 低 CO<sub>2</sub> 材に置換

燃料タンクシステム（下図）内のキャニスタの樹脂材をPA66（ポリアミド）からPP-GF（ガラス強化ポリプロピレン）へ変更し大幅なCO<sub>2</sub>排出量削減、質量低減を実現しました。

### 〈コンバタンクシステム（ORVR）〉



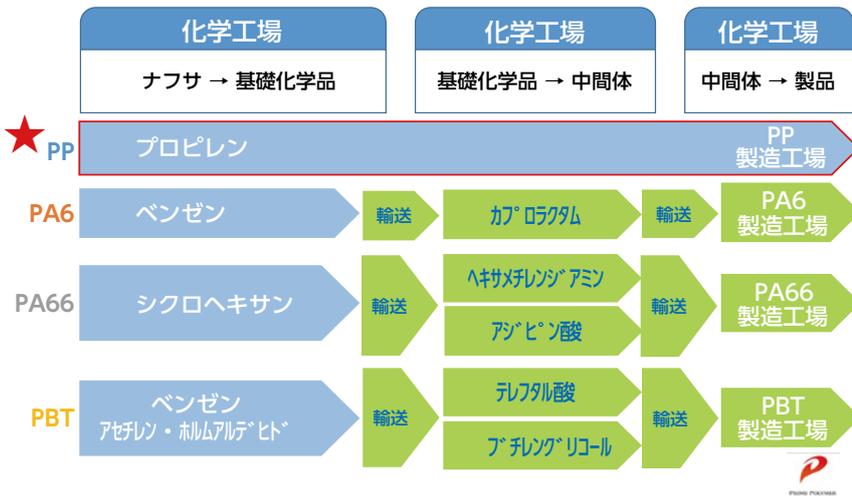
### 〈樹脂材置換の部位〉



# 02

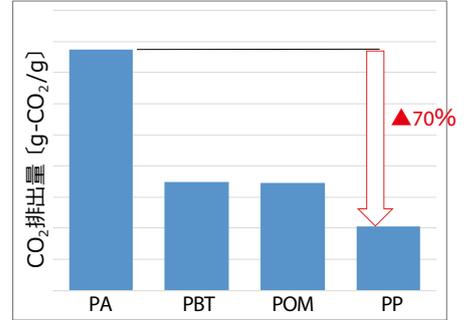
## 代替材料の特性

PP-GF（ガラス強化ポリプロピレン）は、従来品のPA66などと比べて製造工程がシンプルで、材料ごとのCO<sub>2</sub>排出量でも優れています。

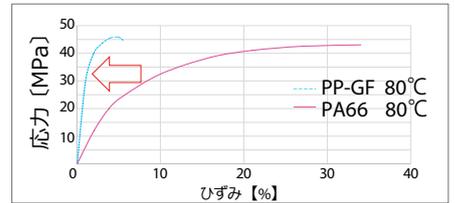


◇本資料に記載されたデータは、特定条件下で得られた測定値の代表例です  
株式会社プライムポリマー様ご提供

〈樹脂材料別のCO<sub>2</sub>排出〉

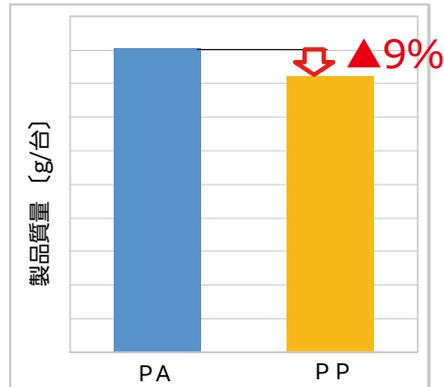
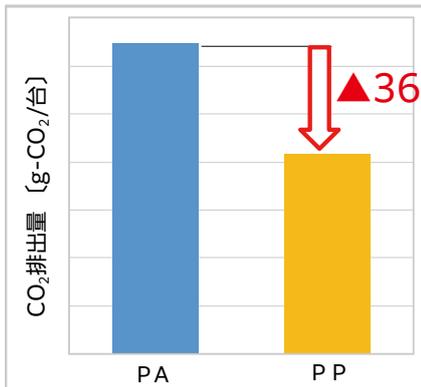


〈強度物性比較〉



### 成果（問題解決）

■ CO<sub>2</sub>排出量の大幅な削減と質量低減を実現。



### 実績紹介

- 国内フェーズイン：2025年4月、順次切替予定。
- 今後、北米と中国にも広げていく予定。



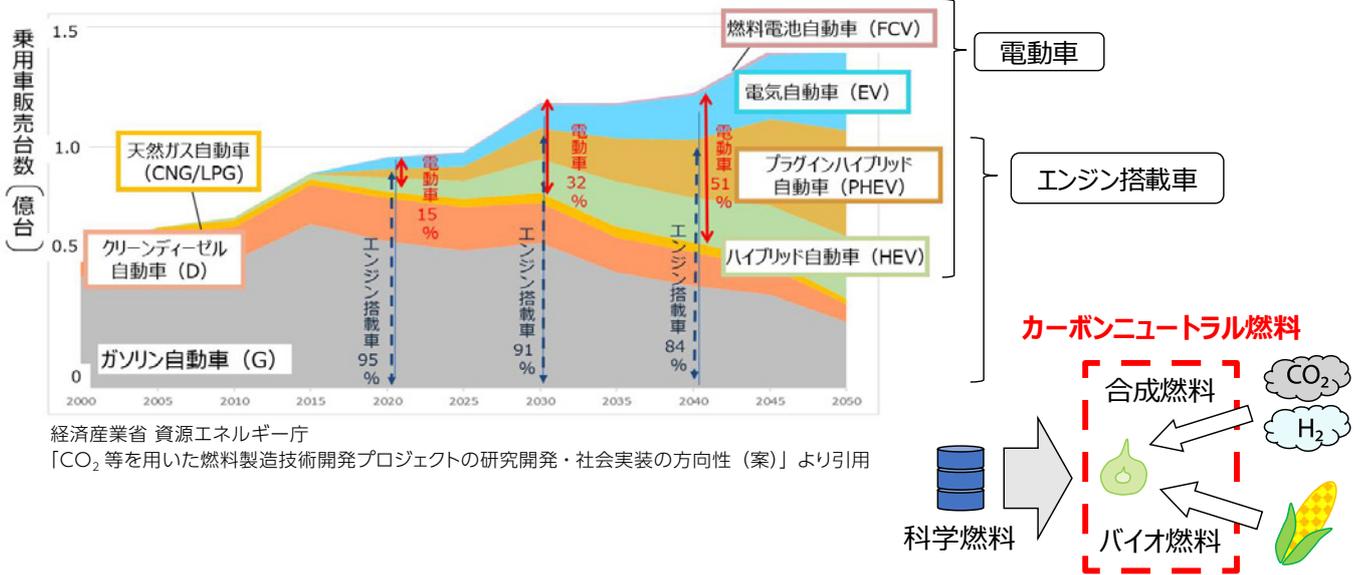
# カーボンニュートラル燃料対応電動ポンプ

## 1. 発明の概要

2050年カーボンニュートラル社会に向け、図1に示すように自動車の電動化が進むとともに、エンジン搭載車においても、化石燃料からCO<sub>2</sub>（二酸化炭素）とH<sub>2</sub>（水素）を合成して製造される合成燃料や、生物体の持つ工

ネルギーを利用したバイオ燃料のようなカーボンニュートラル燃料にシフトしながら、ハイブリッド自動車（以下、HEV）/プラグインハイブリッド自動車（以下、PHEV）を主として大きな比率を占めることが予想さ

図1 世界の自動車の動力別販売台数動向



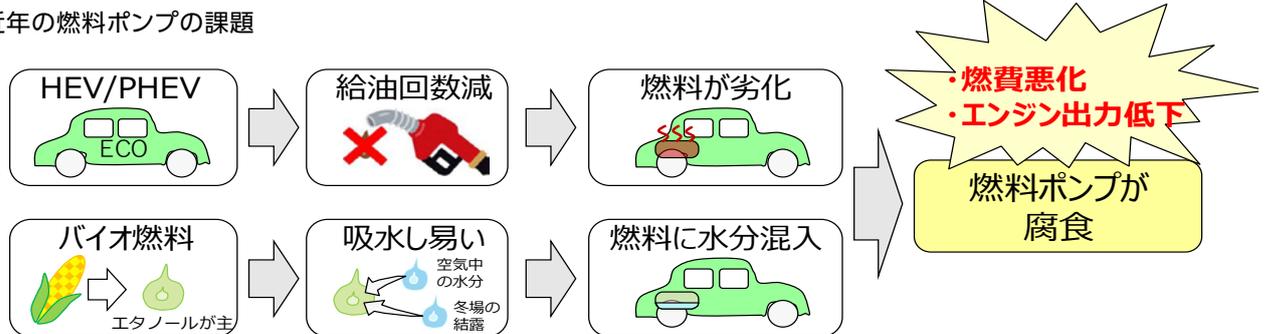
経済産業省 資源エネルギー庁  
「CO<sub>2</sub>等を用いた燃料製造技術開発プロジェクトの研究開発・社会実装の方向性（案）」より引用

HEV/PHEVを含めたエンジン搭載車では、燃料タンク内の燃料をエンジンに圧送する燃料ポンプが設置されている。燃料ポンプではHEV/PHEVやカーボンニュートラル燃料の普及に伴い、近年では図2に示すようなHEV/PHEVによる燃料劣化や、バイオ燃料による水分混入に対する対

応の必要性が生じている。

燃料ポンプの腐食が進むと、燃料ポンプモータの効率性が低下したり、エンジンに必要な燃料量が供給されなくなる。その結果、燃費の悪化やエンジン出力の低下につながる。

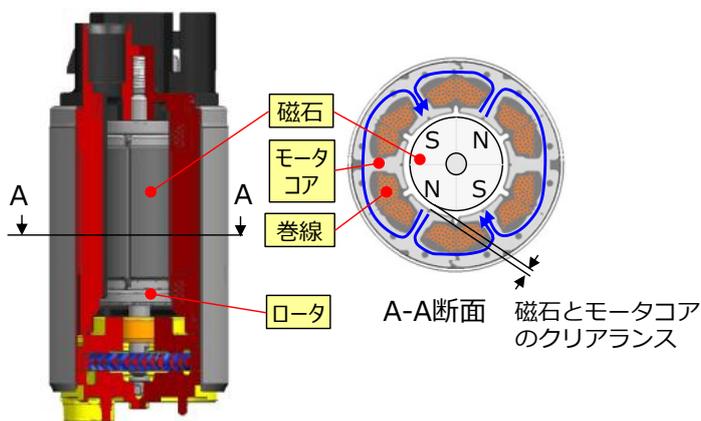
図2 近年の燃料ポンプの課題



燃料ポンプは電力消費の少ないブラシレスモータ式があり、その構成の中で最も腐食対策が難しい部位が図3に示す磁石である。

一般的にモータで使われるネオジム磁石は主成分が鉄のため腐食に弱い。腐食に強い磁石として図4に示すフェライト磁石

図3 燃料ポンプ断面図



イト磁石があるが、硬くて脆いためロータへの固定が難しいことや、磁力がネオジム磁石より弱いため、磁石とモータコアのクリアランス拡大によるモータ性能低下が大きい等の課題がある。

図4 フェライト磁石のメリット・デメリット

- 酸化鉄が主成分  
⇒劣化燃料や水に対する**腐食に強い**
- × 磁石が硬くて脆い   
⇒回転するロータへの**固定が難しい**  
(燃料中での使用のため、接着剤は溶けるため使えない)
- × 磁力がネオジム磁石より弱い  
⇒磁石とモータコアの**クリアランス拡大によるモータ性能低下**が大きい

## 2. 従来発明等の課題と開発ニーズ

特開平 6-205572 に代表される従来発明では、磁石に小径部を設け、小径部に弾性部材勘合部の爪を取付け磁石を保持する。

この構成では、多様な条件において安定した固定を行う上で、右記のような課題がある。

◆弾性部材が柔らかい材質：組付時に勘合部の爪が変形したり、モータ回転時の遠心力に対し磁石の固定力が不足⇒磁石が動く可能性があり、クリアランス拡大の必要有。

◆弾性部材が硬い材質：弾性部材の圧入代大⇒組付時に脆い磁石が割れる可能性がある。

## 3. 発明等の特徴

本発明は図5に示すロータへの磁石固定方法により、従来発明の課題解決が可能となる。

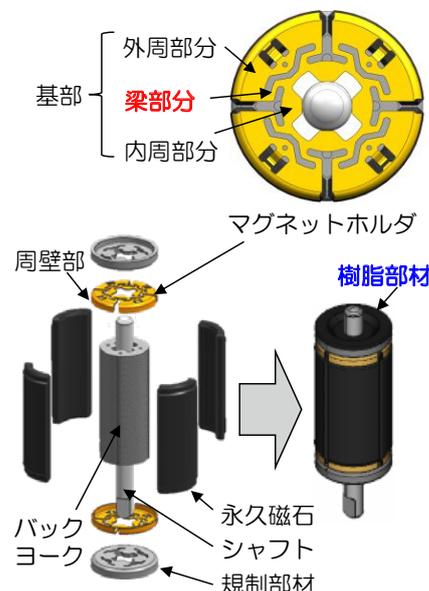
構成 (a) マグネットホルダの梁部分を変形させ、

永久磁石を径方向の付勢力で保持

構成 (b) 貫通穴を樹脂部材で封止。ロータ回転時の

遠心力でマグネットホルダが動かないよう固定

図5 磁石固定方法



脆いという特性を持つフェライト磁石に対し、マグネットホルダに変形し易い梁部分を設けて弾性を持たせることで、組付時には周壁部が磁石に力を加えず保持。組付後には梁部分がそれ以上変形しないよう、貫通穴に樹脂部材で封止した。

上記固定方法により、組付時の圧入条件のバラツキが生じても安定した組付が可能となり、磁石の腐食や動くことを想定したクリアランス拡大も不要となった。

その結果、ネオジム磁石を採用するモータに相当する高いモータ効率確保と、磁石の腐食対応が両立できるようになった。(図6、図7参照)

本発明により、①燃料中の酸成分や水分混入燃料環境下での腐食対応のために、表面処理等を実施する必要がなくなり、廃液処理等による環境負荷が低減可能である ②産地が特定国に集中するネオジム等のレアアースを使用しないため、供給不安の解消も達成する という副効果を得ることも可能となる。

本発明を採用したブラシレスモータ式燃料ポンプは、カーボンニュートラル社会の多様な燃料環境に、世界初で標準（特別な表面処理をしない）対応した燃料ポンプとして2017年より量産を開始し、カーボンニュートラル社会に向け貢献しています。

図6 モータ効率比較

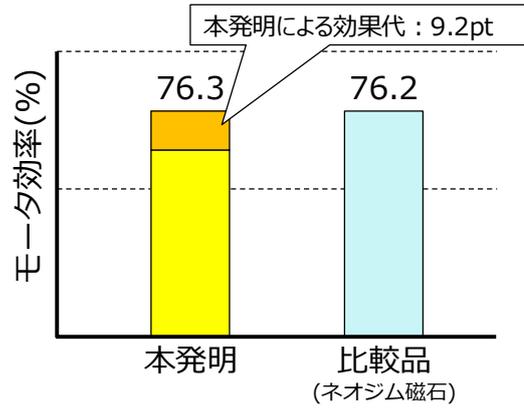


図7 腐食性比較結果



受賞実績

令和4年度 愛知発明表彰 愛知発明賞  
(一般社団法人 愛知県発明協会)

中部地方発明表彰 発明奨励賞  
(公益社団法人 発明協会)

令和6年度 中部科学技術センター顕彰 振興賞  
(公益財団法人 中部科学技術センター)



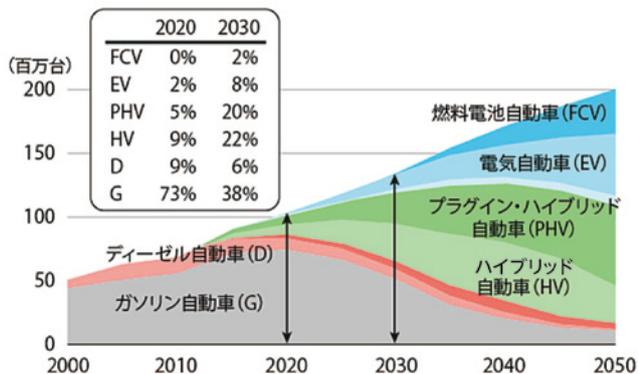


# 燃料電池システム用エア制御弁

## 1. 発明の概要

2050年カーボンニュートラル達成に向け、利用時にCO<sub>2</sub>を排出せず、また資源調達先の多様化を通じてエネルギーセキュリティに寄与する「水素」が注目されており、水素を燃料とする燃料電池システムは、図1に示すように、燃料電池自動車（FCV）として普及が予測されているほか、定置型の発電装置としての用途も期待されている。

図1 世界の車種別販売台数の将来予測(出展:SPEEDA総研)

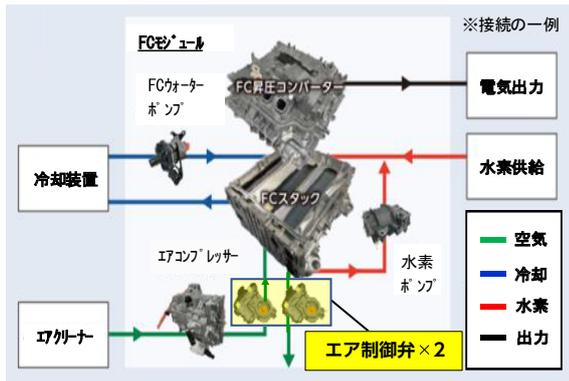


燃料電池システムには、水素の供給通路の他に、水素との化学反応で電気を発生させるエアの供給通路があり、エアの供給通路には「エア制御弁」が備えられる。

(図2参照)

エア制御弁は、必要な発電量を得るためのエア流量の制御を行うとともに、発電停止時にはエアの封止を行い、燃料電池の酸化劣化による発電効率の低下を抑制する役割を担っている。

図2 燃料電池システム図(出展:TOYOTA)



エア制御弁には以下の特性が求められるため、構成として二重偏心弁タイプを選定した。(図3参照)

- ①開口面積が大きく、大流量の要求にも対応できる。
- ②閉弁時に、弁体が弁座に当接する時の摩耗が生じにくい。

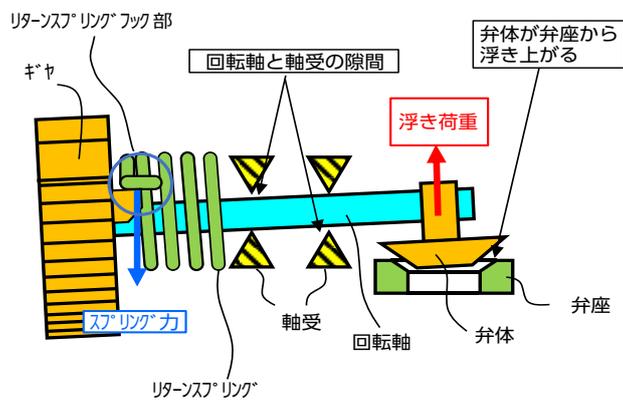
図3 弁構成の特性比較

	ポペット弁	ボール弁	二重偏心弁
構成			
特性①	×	○	○
特性②	○	×	○

## 2. 従来発明等の課題と開発ニーズ

二重偏心弁の従来発明として特開2012-72793号の形態があるが、非駆動時（モータの通電OFF時）には、リターンリングのバネ力により、回転軸と軸受の隙間の範囲内で回転軸が傾いて、弁体が弁座から浮き上がる荷重（浮き荷重）が発生し、封止機能が低下する課題があるため非駆動時でも封止機能が確保できる二重偏心弁のニーズが高まっていた。(図4参照)

図4 従来発明の課題(模式図)



※模式図のため部品形状は従来発明とは異なる。

### 3. 発明等の特徴

非駆動時の浮き荷重が、回転軸に設ける「全閉ストップ部」と「リターンズプリングフック部」の相対位置で決定されることに着目し、構成の考案を行った。回転軸と直交するxy座標系を設定し、xy座標の+-方向毎に、座標系を第1象限～第4象限に区分した場合、「全閉ストップ部」を第1象限、「リターンズプリングフック部」を第3象限に、対角線上に配置する構成とすることで、浮き荷重を、弁体を弁座側に押し当てる荷重（押し当て荷重）に転換するとともに、押し当て荷重を最大化できるため、エアの漏れ流量が低減され、封止機能を確保することができた。（図5、図6参照）

#### <本発明の特徴>

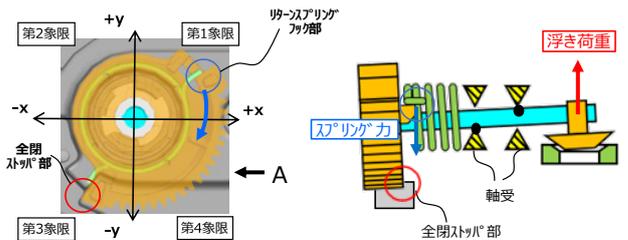
新たな機構を追加することなく以下の特有の効果が得られる。

- (1) 浮き荷重を押し当て荷重に転換できる。
- (2) 押し当て荷重を最大化できる。

本発明により、二重偏心弁タイプのアエ制御弁において、発電停止時のエア封止機能を確保することで、燃料電池の酸化劣化による発電効率の低下を抑制できた。

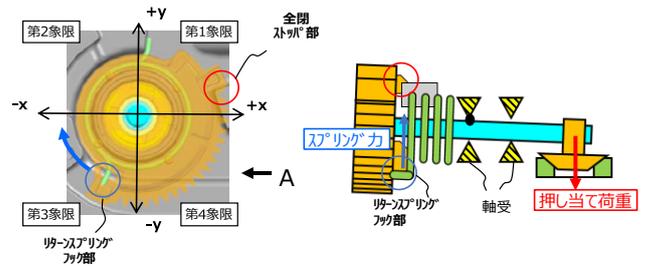
このエア制御弁を搭載する燃料電池システムの普及を通じて、CO<sub>2</sub>の排出削減によるカーボンニュートラル社会の構築に貢献しています。

図5 非駆動時の挙動



①従来の動き:

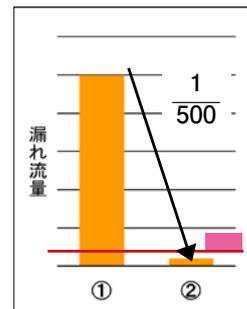
モーターの電源が入っていないときの挙動（浮き上がる力の発生）



②発明技術の動き:

モーターの電源が入っていないときの挙動（押し当てる力の発生）

図6 漏れ流量の比較



#### 受賞実績

令和6年度 愛知発明表彰 愛知発明賞  
(一般社団法人 愛知県発明協会)

中部地方発明表彰 発明奨励賞  
(公益社団法人 発明協会)



# マルチフェーズ方式 PFC コンバータにおける 相数切り替え制御の提案

坂本 竜也 内木 英喜 川上 太知

## 要旨

電気自動車の普及に伴い、バッテリー充電の普及が進んでいる。バッテリー充電にはワイドレンジかつ高効率な動作が求められ、電力変換器のマルチフェーズ化及び、駆動相数を動的に切り替えることで実現可能である。しかし、駆動相数切り替え時は電源の状態が大きく遷移し過渡的な動作となる。本技報では駆動相数切り替え前後の状態から状態遷移量を推定し、過渡的な動作を抑制する新たな制御を提案した。回路シミュレータ及び実機での検証で妥当性を確認した。

## 1. はじめに

近年、カーボンニュートラルの実現に向けた EV 化が進んでいる。EV 化に伴い、バッテリー充電に注目が集まっており、充電時の力率を改善する AC-DC コンバータである PFC (power factor correction) コンバータの需要が高まっている。

PFC コンバータには動作領域のワイドレンジ化及び高効率化が求められており、その方策の一つとして電力変換器のマルチフェーズ化が挙げられる。マルチフェーズ化によりスイッチングデバイスに流れる電流を分散することができ、導通損失の低減が可能となる。結果として、高出力帯での高効率化が可能となる<sup>(1)</sup>。しかし、低出力帯においてはスイッチング損失が導通損失より支配的となるため、構成するデバイスの数が増加すると効率が悪化する。出力帯で最適な駆動相数が増えるため、動的に駆動相数を切り替える制御が必要となる<sup>(2)</sup>。しかし、従来の駆動相数切り替え制御の場合、駆動相数切り替え時に電力変換器の状態が大きく遷移するため、状態遷移量に応じた出力電圧の変動が発生する。

本稿では、駆動相数を切り替えた場合に発生する電力変換器の状態遷移を推定し、抑制する新たな駆動相数切り替え制御について報告する。

## 2. マルチフェーズ方式 PFC コンバータ

### 2.1. PFC コンバータ

PFC コンバータは商用電源などの AC 電源から DC の電流、電圧を出力させる機器である。AC から DC に電力を変換する際、力率が低い場合、無効電力の発生と歪みによる高周波のノイズが発生する。出力の高い電源の場合、ひずみの影響が深刻化し、他の機器の動作に影響を与える可能性がある。PFC コンバータは力率改善機能を有しているため、無効電力と歪みの課題を解決することができる。また、IEC 61000-3-2 の規格にて AC アダプタ等には 75W 以上出力する機器に関して搭載が義務づけられており、PFC コンバータ回路の需要がさらに高まっている。

PFC コンバータにはさまざまな回路方式があり今回は部品点数が少なく高効率化が見込める Bridgeless Totem pole 型 PFC コンバータを採用した。図 1 に採用した PFC コンバータの回路図を示す。スイッチ  $S_{1a}$ ,  $S_{2a}$  には次世代パワー半導体で逆回復電流が小さい GaN-HEMT を使用した。スイッチ  $S_{1a}$ ,  $S_{2a}$  を PWM 制御することで入力電流及び出力電圧を制御している。PFC コンバータの動作方式は一般的に連続導通 (CCM) モード、電流臨界 (BCM) モード、電流不連続 (DCM) モードが挙げられるが、高出力駆動時の損失低減のため、インダクタに流れる電流のピーク値が小さい CCM モードを採用した。CCM モードの PFC コンバータを制御するため、図 2 のような制御系を構築した。図 2 に記載されている PFC コンバータの各伝達関数  $\Delta I_L / \Delta D$  と  $\Delta V_o / \Delta I_L$  は、以下の式で表される<sup>(3)</sup>。

$$\frac{\Delta I_L}{\Delta D} = \frac{V_{ac}}{R_o(1-D)^3} \times \frac{2 + R_o \times C_o \times s}{\frac{L \times C_o}{(1-D)^2} s^2 + \frac{L}{R_o(1-D)^2} s + 1} \dots \textcircled{1}$$

$$\frac{\Delta V_o}{\Delta I_L} = \frac{V_{ac} \times R_o}{2 \times V_o} \times \frac{1}{R_o \times C_o \times s + 1} \dots \textcircled{2}$$

ここで  $V_{ac}$  は入力電圧実効値、 $V_o$  は出力電圧実効値、 $D$  は duty 比を表している。

図 2 より PFC コンバータの制御系には大きく二つの制御ループが存在する。二つの制御ループのうち、内側に形成しているループは力率改善制御であり、外側に形成されているループは出力電圧制御である。また、これらのループとは別に常に出力電圧補償器の後に商用電源の周波数の外乱が制御系に乗算される。各ループは干渉しており、また商用電源の周波数の外乱についても出力電圧制御に干渉する。そのため、各ループと外乱の干渉を受けないように各制御の補償器を適切に設計する必要がある。

これらの制御設計手法を考慮し、高出力に対応させるべく、PFC コンバータのマルチフェーズ化に取り組んだ。

図 3 にマルチフェーズ方式の PFC コンバータの回路図を示す。マルチフェーズ方式の検証は、最も単純な 2 相 PFC コンバータで実施した。スイッチ  $S_{1b}$ 、 $S_{2b}$  で 1 相目の力率改善、スイッチ  $S_{3b}$ 、 $S_{4b}$  で 2 相目の力率改善、スイッチ  $S_{5b}$ 、 $S_{6b}$  にて全波整流を行っている。また各相に流れる電流が均一となるよう電流バランス制御を導入している。

マルチフェーズ化することにより各相に流れる電流を低減させることができ、結果として導通損失の低減が可能となる。またインターリーブ動作によりインダクタ  $L_1$ 、 $L_2$  を結合インダクタに置き換えることで、直流重畳磁束を打ち消すことが可能となり、インダクタの小型化も見込める<sup>(4)</sup>。

図 1 単相 Totem-pole 型ブリッジレス PFC コンバータの回路図

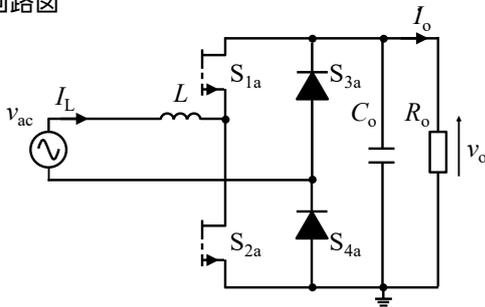


図 2 PFC コンバータのブロック線図

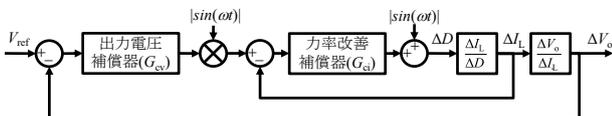
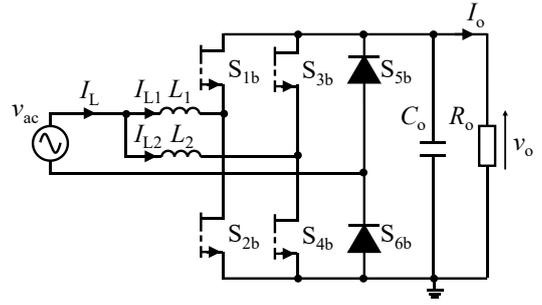


図 3 マルチフェーズ型 PFC コンバータの回路図



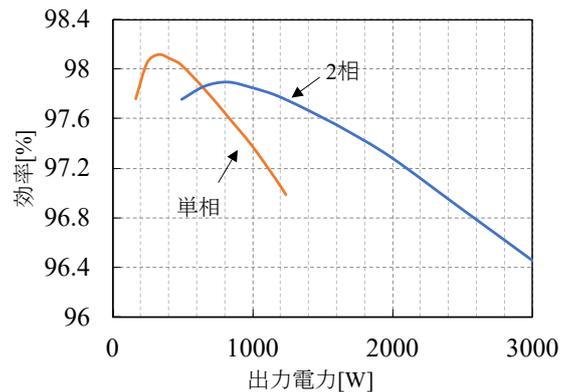
## 2.2. 駆動相数切り替え制御

マルチフェーズ化により高出力帯での高効率駆動が実現できるが、デメリットとして搭載するスイッチングデバイスが増え、スイッチング損失が増加する。導通損失よりスイッチング損失の割合が支配的な低出力帯においては効率が悪化するため、出力に応じて適切に駆動相数を切り替えて動作させる必要がある。

図 4 に検討した PFC コンバータの効率曲線を示す。出力電力が 600W 付近を超えると、導通損失の損失割合が支配的となり、2 相駆動時により高効率で動作する。そのため、600W 付近で駆動相数を切り替える必要があるが、600W をしきい値とし、駆動相数を切り替えるとチャタリングが発生する恐れがある。そのため、切り替えるしきい値にはヒステリシス性を持たせておく。

駆動相数の切り替えにより、ワイドレンジかつ高効率での動作が実現できるが、従来の制御系で駆動相数を切り替えると、電力変換器の状態が大きく遷移するため、状態遷移量に応じた出力電圧の変動が発生する。出力電圧の変動が大きいほど、変動を抑制する機能を持つキャパシタが大型化するデメリットがある。そのため、状態遷移量に応じた出力電圧の変動は可能な限り低減する必要がある。DC-DC コンバータにおいてはこの課題に対しての改善制御が提案されている<sup>(5)</sup>。PFC コンバータの出力電圧制御の応答性は商用電源の周波数より低く設計しなければならないため、DC-DC コンバータに比べ、出力電圧の変動がより顕著に表れるが、検討されていない。

図 4 各相数で測定した PFC コンバータの効率曲線



### 3. 提案する駆動相数切り替え制御

本研究にて PFC コンバータの駆動相数切り替え時の変動を抑制するため、新たな制御系と動作フローを構築した。図 5 に新たな制御系、図 6 に制御の動作フローをそれぞれ示す。駆動相数切り替えのため、まず PFC コンバータの出力電力を確認する。この時の出力電力は、回路に搭載した出力電圧センサと出力電流センサから得たそれぞれのセンサ値を乗算した値である。切り替えのしきい値を計算した出力電力値が超えた場合、 $S_1$  をトグルさせる。そして、電力変換器の状態遷移量の計算を実施する。状態遷移量は駆動相数切り替え前に各相から出力された電流値  $I_{o\ phase\ before}$  と駆動相数切り替え後に各相から出力される電流値  $I_{o\ phase\ after}$  の偏差から算出する。 $I_{o\ phase\ before}$  及び  $I_{o\ phase\ after}$  は以下の式より算出した。

$$I_{o\ phase\ before} = \frac{I_{o\ before}}{N_{before}} \dots \textcircled{3}$$

$$I_{o\ phase\ after} = \frac{I_{o\ after}}{N_{after}} \dots \textcircled{4}$$

$I_{o\ before}$ ,  $N_{before}$  はそれぞれ駆動相数切り替え前の出力電流のセンサ値と駆動相数を示し、 $I_{o\ after}$ ,  $N_{after}$  はそれぞれ駆動相数切り替え後の出力電流のセンサ値と駆動相数を示す。

状態遷移量の推定に各相から出力される電流値を用いたのは、駆動相数の切り替え前後の状態の違いを正確に把握するためである。マルチフェーズの場合、各相は並列接続されているため、入力電圧もしくは出力電圧を用いて駆動相数の切り替え前後の状態遷移量を推定することは難しい。入力電流の場合は商用電源の周波数で振動している。切り替わり前後の状態をセンシングする場合、センシングできるのは電流の瞬時値である。切り替わるタイミングでセンシングされる入力電流値が変化する。またゼロクロスで切り替わった場合、状態遷移量は非常に小さくなり、正しくセンシングできない可能性がある。よって、入力電流を状態遷移量の推定に用いることは難しい。各相に流れる出力電流を用いる場合は、③式、④式で推定することが可能で、出力電力の変化と駆動相数の変化の両方の変化を考慮した状態遷移量を推定することができる。そのため、各相から出力される電流値を状態遷移量の推定に用いた。

状態遷移量の計算が完了したタイミングで  $S_2$  をオンし、フィードフォワード (以下、FF) 制御を開始する。出力電圧変動の抑制が確認できたタイミングで、 $S_2$  をオフすると FF 値に応じた電力変換器の状態遷移が再度発生し、出力電圧の変動が生じる。そのため、FF 制御中に、出力電圧が大きく変動しないよう、FF 値を徐々に減少させる必要がある。

FF 値がゼロとなるタイミングで  $S_2$  をオフさせることで

状態遷移が生じず、制御系が安定した状態で FF 制御を停止させることが可能となる。

提案した FF 制御の妥当性を回路シミュレータ及び実機試験にて確認した。

図5 提案する相数切り替え制御システム

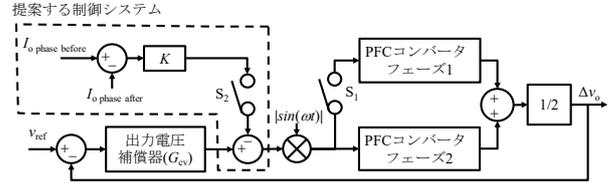
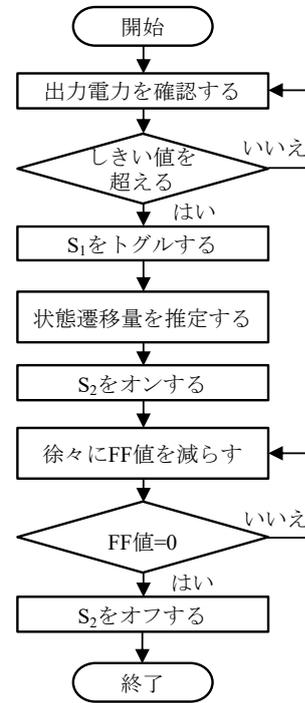


図6 制御フローチャート



### 4. 結果

回路シミュレータを用いて、出力電力 1100W での定常動作時に、駆動相数を 1 相から 2 相に切り替えた。その時の FF 制御による効果を確認した結果を図 7 に示す。提案した FF 制御を導入することで、FF 制御中は制御系が FF 項の影響を受け目標値に対して偏差がある状態で動作した。しかし、力率改善制御が機能した状態で駆動相数切り替え時に発生する出力電圧変動の振幅を 1/3 倍ほどに抑制できた。

次に実機に FF 制御を導入し、スモールモデルで同様の効果が得られるか確認した。実機での効果確認の結果を図 8 に示す。出力電力 40W での動作時に駆動相数を 1 相から 2 相へ切り替えた場合においては、図 8 に示すようにシ

図7 回路シミュレータを用いたFF制御の検証結果

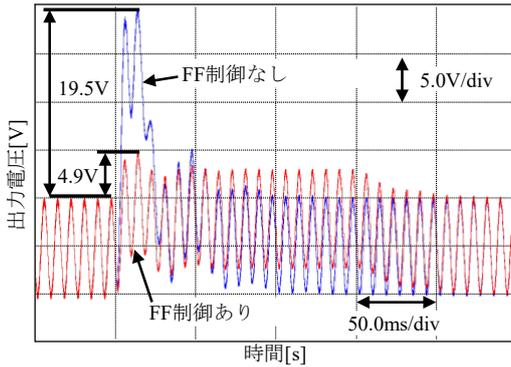


図8 低負荷変動時の実機での測定結果

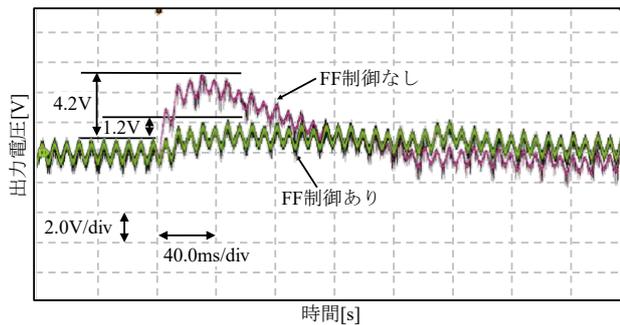
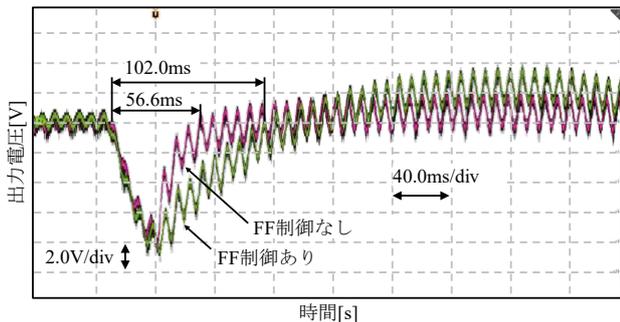


図9 高負荷変動時の実機での測定結果



ミュレーションと同様に、FF制御により出力電圧をおよそ1/3倍ほどに抑制することができた。しかし、出力電力を40Wから80Wに変動させ、駆動相数を1相から2相へ切り替えた場合においては図9に示すように目標値に追従するまでの時間が増大した。これは、負荷変動からFF制御が開始する前に発生した変動を抑制できず、変動が発生している状態から変動を抑制するFF制御が開始したため、目標値に追従するまでの時間が長くなったと考えられる。

そのため、負荷変動からFF制御が開始するまでの時間を最適化することで、低負荷変動時と同様に出力電圧の変動を抑制することが可能になると考えられる。

## 5. まとめ

本技報ではマルチフェーズ方式 PFC コンバータの駆動相数切り替え制御システムの構成と効果について示した。相数切り替え前後の状態遷移量の推定に出力電流センサ値を活用することで出力電力の変化と駆動相数の変化の両方を考慮した状態遷移量を推定することが可能となった。この状態遷移量をもとに FF フォワード制御を構築することで、低負荷変動時に駆動相数が切り替わった場合において、出力電圧変動の振幅を 1/3 倍ほどに抑制することができ、本提案手法の有用性を確認することができた。

### 参考文献

- (1) M. Marcinek, M. Holub: Multiphase, synchronous GaN buck converters - efficiency based selection of the number of phases, EPE'18 ECCE Europe, pp3-7 (2018)
- (2) P. Zumel, C. Fernández: Efficiency improvement in multiphase converter by changing dynamically the number of phases, 37th IEEE Power Electronics Specialists Conference, pp1-6 (2006)
- (3) G. E. Mejía-Ruiz, N. Muñoz-Galeano: Modeling and development of a bridgeless PFC Boost rectifier, Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia, Vol.82, pp9-21 (2017)
- (4) J. Imaoka: Characteristic Analysis and Design of Boost Chopper Circuit using Coupled Inductor for Electric Vehicle, Journal of the Japan Institute of Power Electronics, Vol.39, pp.55-64 (2013)
- (5) A. Costabeber: Digital Time-Optimal Phase Shedding in Multiphase Buck Converters, IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 25, pp.2242-2247 (2010)

### 著者



坂本 竜也  
研究開発部



内木 英喜  
研究開発部



川上 太知  
大阪公立大学  
工業高等専門学校

# デバイス内部のゲートソース間電圧の推定

長尾 崇弘 内木 英喜 七森 公碩

## 要旨

近年、パワエレ機器において次世代半導体が注目されており、GaNは高周波駆動による電力変換器の小型化が期待されている。しかし、GaNのゲート耐圧は6V程度であり、スイッチング時の電圧振動によって耐圧破壊する懸念がある。本研究では、デバイスのON時においてパッケージや配線の寄生成分を含めたモデリングを行い、デバイス内部のゲート電圧振動を推定する手法を提案する。実測ではゲート電圧はソースインダクタンスの影響が大きいため耐圧を超えて振動していたが、モデルより内部のゲート振動は小さく耐圧の範囲内であることを推定した。

## 1. はじめに

近年、気候変動の影響が顕著になる中、環境への配慮がますます重要視されている。それに伴い、カーボンニュートラルへの取り組みが世界中で加速しており、日本においても2050年カーボンニュートラルに伴うグリーン成長戦略が宣言された<sup>(1)</sup>。カーボンニュートラルの達成に向けてパワエレ技術の進展が大きく期待されており、SiCやGaNなどの次世代半導体の普及は、パワエレ機器の普及や省電力化に大きく寄与する<sup>(2)(3)</sup>。これらの次世代半導体は、従来のSi半導体に比べバンドギャップや絶縁破壊電界などの物性に優れる。特にGaN半導体はHEMT構造をとれることが知られており、AlGaIn/GaN界面に形成される2次元電子ガスを電流経路として使用することが可能となる<sup>(4)</sup>。これにより同じON抵抗デバイスにおいて入力容量を下げる事が可能となり、高周波駆動による電力変換器の小型、高効率化が期待される<sup>(5)</sup>。

電力変換器において、パワーデバイスのON/OFFによって電力制御が行われる。ON時は損失を低減するため電流経路のオン抵抗を十分小さくする必要があり、ゲートソース間に十分な電圧を印加し電流経路を確保するオーバドライブが用いられる。GaNの場合、オーバドライブを行うためには4.5V以上の電圧が必要となる一方、ゲート耐圧は6V程度と小さく、印加電圧と耐圧までのマージンが小さい<sup>(6)</sup>。その結果、ゲートソース間耐圧に余裕がなく、高速スイッチングによる電圧サージやその後の電圧振動によって容易に耐圧を超えてしまい破壊する懸念がある。この課題を解決するため、半導体メーカーでは、瞬間的なゲート耐圧を規定したり<sup>(7)</sup>、ゲート耐圧を高くしたGaNデバイスの開発に取り組んでいる<sup>(8)</sup>。

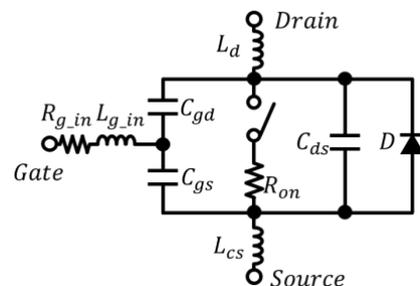
また、デバイスのチップは異物保護などのため樹脂モールドでパッケージングされており、ゲートソース間を直接測定することはできない。パッケージ外部にある電極端子の電圧は測定可能だが、その場合、チップから電極端子までの寄生成分の影響を受けてしまい、正確な電圧を把握することが困難である。

本研究では、電力変換器で一般的に使われるハーフブリッジ回路において、デバイスのターンON時の挙動を配線やデバイスのパッケージ内部の寄生成分を含めてモデル化することによって、デバイス内部のゲートソース間容量に印加されている電圧振動の推定手法を提案する。

## 2. ターンON時の回路モデリング

本研究では、ハーフブリッジ回路におけるLoサイド側のターンON時のスイッチングをモデリングする。

図1 GaNデバイスの等価モデル

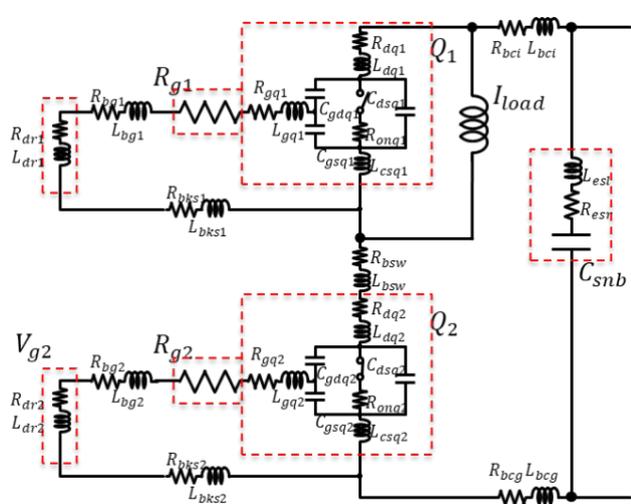


### 2.1. パワー半導体デバイスの寄生成分

GaNデバイスの等価モデルは、図1のように表される。一般にゲート電圧はゲートソース間容量Cgsの電圧を指す。しかし、前述のとおり実際の測定ではパッケージ内部

のコモンソースインダクタンス  $L_{cs}$  をはじめ、配線の抵抗やインダクタンスの影響が含まれてしまい、 $C_{gs}$  電圧を測定することは困難である。

図2 寄生成分を含めた等価回路

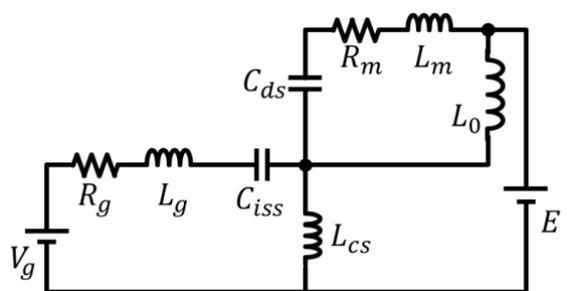


## 2.2. モデルの構築

理想的なハーフブリッジ回路に、半導体デバイスやデバイスを実装する配線基板の寄生成分を含めた等価回路を図2に示す。ターンON中に流れる直流電流を考慮するため、Hi サイドのドレインソース間にL 負荷を接続している。直流電流は、計算時にL 負荷電流に初期値を与えることによってモデルに反映する。Lo サイドのターンON時は、Hi サイドはOFF、Lo サイドがONとなっている。したがって、交流電流は、Hi サイドは各端子間容量を、Lo サイドはチャンネル抵抗を、そしてバイパスコンデンサ  $C_{snb}$  を経由した経路を流れる。直流電流は電源からL 負荷を經由して流れる。

図3にゲート電圧振動を表現するための簡易モデルを示す。

図3 Loサイド側のターンON時の簡易モデル



Lo サイド Q2 は ON 状態であるため、チャンネル抵抗は小さく無視できるものとする。その場合、ゲートソース間容量  $C_{gs}$  は帰還容量  $C_{gd}$  を含めた入力容量  $C_{iss}$  として表現され、本モデルでは  $C_{iss}$  に印加される電圧をゲート電圧と定義する。Hi サイド Q1 はドレイン、ソース、ゲート

の各端子間容量の合成容量を考えた時、ドレインソース間容量  $C_{ds}$  が支配的になることから  $C_{ds}$  を反映する。また、交流電流の経路に存在する抵抗成分、インダクタンス成分は、 $R_m$ ,  $L_m$  として表現する。さらに、Lo サイドゲート駆動回路に存在する抵抗成分、インダクタンス成分は  $R_g$ ,  $L_g$  と表現し、ゲートソース間に印加する電圧は  $V_g$  とする。

Hi サイドゲート駆動回路に存在する抵抗成分、インダクタンス成分は、ターンON時の挙動には影響しないため、本モデルでは省略する。

バイパスコンデンサ  $C_{snb}$  は  $C_{ds}$  と比較して十分大きいため、交流経路においては電源とみなすことができる。この際、直流経路の電源と兼ねることができ、本モデル上では電源 E として扱う。

## 3. 評価検証

### 3.1. パラメータと初期条件の決定

本モデルの妥当性を検証するため、簡易モデルの各パラメータにデバイスや基板パラメータの値を代入し電圧波形を算出した。表1に電圧波形の算出に用いたパラメータ一覧を示す。

動作条件として、電源電圧を100V、L 負荷に流れる初期電流を12Aとした。スイッチング時の挙動を模擬するため、時間  $t=0$  において、電源電圧 E を  $0 \rightarrow 100V$ 、Lo サイドゲート電圧  $V_g$  を  $0 \rightarrow 5.2V$  にそれぞれステップ応答させることによってモデルの電気的狀態を変化させ、電圧波形を算出した。

GaN デバイスは、EPC2010C を用いた。ターンON時の直前にHi サイド、Lo サイドそれぞれのデバイスに印加されている電圧を考慮し、 $C_{iss}$  は  $E = 0V$  時の値、 $C_{ds}$  は  $E = 100V$  時の値をそれぞれデータシートより用いた<sup>(7)</sup>。コモンソースインダクタンス  $L_{cs}$  は、300 pH を用いた<sup>(9)</sup>。基板の抵抗成分、インダクタンス成分は、後述する実機のデータと比較するため、基板の設計データを ANSYS Q3D Extractor を用いて解析を行い、該当するパラメータを抽出した。

表1 パラメータ一覧

記号	パラメータ	記号	パラメータ
$R_m$	0.5 $\Omega$	$C_{iss}$	420 pF
$L_m$	7.8 nH	$C_{ds}$	240 pF
$R_g$	11.5 $\Omega$	$L_{cs}$	300 pH
$L_g$	19.8 nH	$L_0$	174 $\mu H$
E	$0 \rightarrow 100V$	$V_g$	$0 \rightarrow 5.2V$

### 3.2. モデルの妥当性の検証

電圧振動モデルの妥当性を評価するため、ダブルパルス評価にて実機との比較評価を行った。ゲート電圧の測定には、できる限りデバイス近傍にプロービング端子を設けて光絶縁プローブ (TIVP05 Tektronix 製) を用いて測定した。実測波形とモデリング波形の比較を図 4 に示す。破線が実測波形、実線がモデリング波形である。図 4 の比較波形では、ターン ON がはじまり Lo サイドのチャンネルに電流が流れ始めた時間を 0s として示している。今回のモデルにおいて、デバイスの過渡時の変化は考慮していないため波形は重なり合っていないが、波形の形状、及び振動周波数は、高い精度で一致している。実際、モデリング波形の振動周波数は、114.9 MHz であり、実測波形の振動周波数は 117.9 MHz であるため、その誤差は 2.5 % であった。

ゲート電圧のピーク値を比較すると、モデリング波形のピーク値は 8.51 V であったのに対し、実測波形のピーク値は 7.42 V であり、その誤差は 12.8 % であった。これは、モデリング波形ではスイッチングの挙動を模擬するため E<sub>v</sub>、V<sub>g</sub> をステップ応答させているため、実測と比較して変化が急峻であり、その結果、ゲート電圧のピーク値に差異が生じたと考えられる。

### 3.3. デバイス内部のゲート電圧の推定

本モデルを用いて、実際のデバイス内部のゲート電圧 (本モデルにおける C<sub>iss</sub> 電圧) の推定を行う。図 5 にモデルから算出した同条件における C<sub>iss</sub> の電圧波形を示す。図 5 からわかるとおり、C<sub>iss</sub> 電圧の振動は実際に測定可能な L<sub>cs</sub> を含んだ電圧と比較して振動が小さく、ピーク電圧は 5.80V であり耐圧の範囲内に収まっている。これは、ターン ON 時に電流が変化することでインダクタンスに発生する逆起電力の影響が大きいことを示している。発生する逆起電力 V の大きさは、ドレイン電流変化量  $dI_d/dt$  を用いて式 (i) で表される。

$$V = L_{CS} * \frac{dI_d}{dt} \dots \dots \dots (i)$$

L<sub>cs</sub> は 300 pH と小さいが GaN は数 ns オーダーで電流が変化するため、ドレイン電流の変化量が大きいため発生する起電力が大きく、測定される電圧波形と実際のデバイス内部のゲート電圧に大きな差異が生じていると考えられる。スイッチング開始直後のゲート電圧の大きな沈み込みも L<sub>cs</sub> の影響と考えられる。モデルより推定した波形によって、デバイス内部のゲート電圧についてピーク電圧は実測値よりも小さく、また、測定に見られるような大きな電圧振動はしていないと考えられ、GaN のようなゲート耐圧が小さなデバイスにおいても、問題なく動作できているとみなすことができる。これにより、スイッチング速度をよ

図4 モデリング波形と実測波形の比較

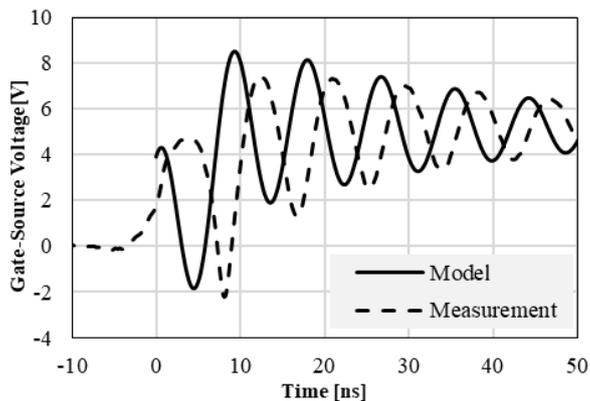


図5 モデルより算出したデバイス内部のゲート電圧波形

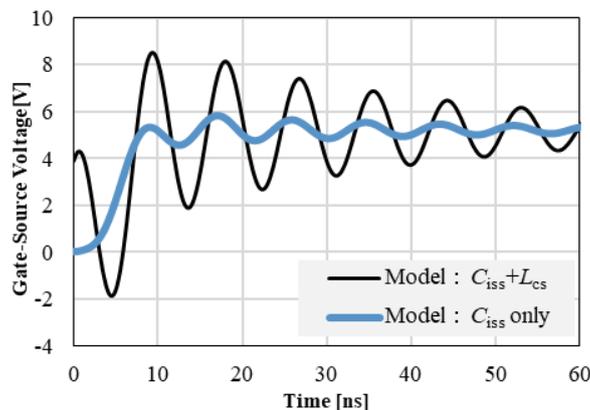
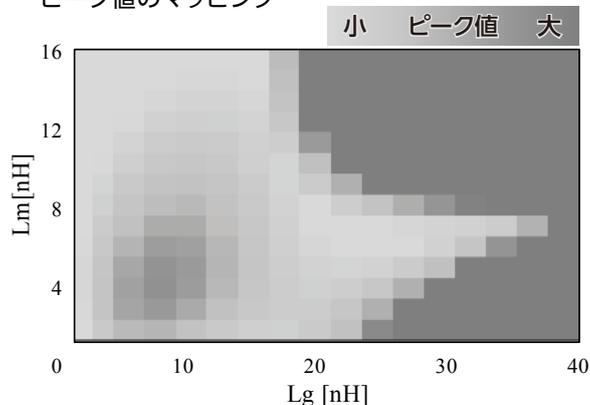


図6 L<sub>m</sub>, L<sub>g</sub>を変化させたときのゲート電圧のピーク値のマッピング



り高速にしたり印加するゲート電圧を大きくしたりすることが可能となり、スイッチング損失を低減することが可能となる。

図 6 にモデルにおける 2 つのインダクタンス L<sub>m</sub> と L<sub>g</sub> をパラメトリック変化させた時のゲート電圧のピーク値マッピングを示す。一般にスイッチング回路におけるインダクタンスは小さくすることが要求されるが、図 6 より単にインダクタンスを小さくすればピーク値が最小になるわけではなく、2 つの値をバランスよく設計することにより、ターン ON 時のゲート電圧振動のピーク値を抑えることが可能となる。

## 4. まとめ

本研究では、一般的なスイッチング回路であるハーフブリッジ回路において、デバイスパッケージや基板に含まれる寄生成分を加味したターン ON 時の回路モデルを作成した。本モデルを用いることによって、実際には測定が困難なデバイス内部の挙動を推定する手法を示した。GaN を用いてスイッチングを行う場合、ゲート耐圧が小さくターン ON 時のサージやその後の振動によって容易に耐圧破壊してしまう可能性がある。高速スイッチングによって電流変化が大きい場合、コモンソースインダクタンスの逆起電力によって実測波形とデバイス内部のゲート電圧には大きな差異が生じてしまうが、本モデルを用いてデバイス内部のゲート電圧を推定することにより、耐圧超えの判定を行うことが可能となる。これにより GaN の特徴である高速スイッチング、低損失を活かしたパワエレ機器の小型、高効率化が実現できる。

### 参考文献

- (1) 内閣官房ほか:2050 年カーボンニュートラルに伴うグリーン成長戦略, 2021年.6,(2021)
- (2) 高橋良和, 両角朗, 西村芳孝:パワーエレクトロニクスを支えるパワー半導体モジュール技術の最新動向, In マイクロエレクトロニクスシンポジウム論文集 第 26 回マイクロエレクトロニクスシンポジウム (pp,15-22), 一般社団法人 エレクトロニクス実装学会, (2016)
- (3) IMAOKA, J:カーボンニュートラルへ向けたパワーエレクトロニクス技術動向と磁気部品応用技術-高電力密度/高効率化/モデリング, 日本 AEM 学会誌, 30(1),(2022)
- (4) 菅沼克昭:SiC/GaN パワー半導体の実装と信頼性評価技術pp, 54-59, (2014)
- (5) 吉野学, 竹内悠次郎, 大井幸多, 中島昭:パワー半導体デバイスの最新動向, 電気学会論文誌 C (電子・情報・システム部門誌), 144(3), 186-192, (2024)
- (6) Efficient Power Conversion Corporation:EPC2010C Datasheet, Revised April 2021
- (7) GaN Systems:GS66516T Datasheet, Rev211025
- (8) ローム株式会社ホームページ  
[https://www.rohm.co.jp/news-detail?news-title=2022-03-23\\_news\\_gan-hemt&defaultGroupId](https://www.rohm.co.jp/news-detail?news-title=2022-03-23_news_gan-hemt&defaultGroupId)
- (9) David Reusch(Efficient Power Conversion Corporation) : White Paper:WP009,(2020)

### 著者



長尾 崇弘  
研究開発部



内木 英喜  
研究開発部



七森 公碩  
舞鶴工業高等専門学校

# 機械振動法による ADC12 合金 セミソリッドダイカスト工法開発と実用化

鬼頭 雅幸 篠田 潤一 小出 怜 市村 優汰 村上 雄一朗 三輪 謙治

## 要旨

セミソリッドダイカスト工法は、鑄造欠陥の低減や寸法精度の向上といった利点がある。一方、ダイカスト用合金として広く用いられている ADC12 合金は、セミソリッドスラリー生成に適した固相率となる温度域が狭いため、セミソリッドダイカストに用いることが困難であった。本開発では、熔融状態から固液共存温度まで冷却する過程で機械的な振動を付与し、条件を最適化することにより、ADC12 合金スラリーの生成に成功した。また、本技術を量産工程で成立させ、FCEV(燃料電池電気自動車)に使用する水素供給ユニット部品に採用されることとなった。また、この技術を改良して量産化したシステムを総称し、AiSS-Casting®(アイズキャストイング)と商標登録した。AiSS-Casting® = Aisan Semi Solid Casting(2025.2.7 商標登録済み)

## 1. はじめに

昨今の自動車産業においては、カーボンニュートラルの要求が強まる中、アルミ粗形材に対し、これまで以上に、高品質・軽量化・低コストのニーズが高まっている。

図1 コストと品質の関係図

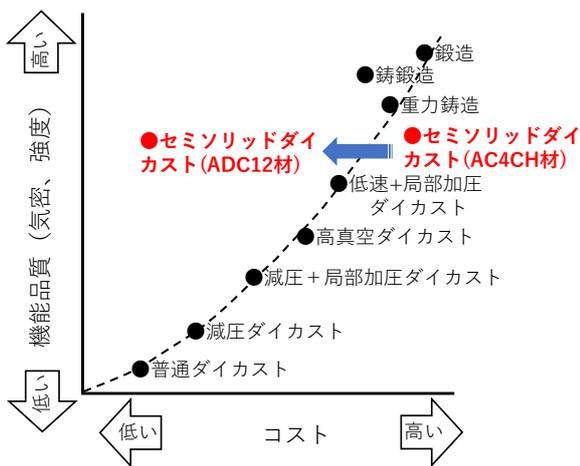


図1に示すのはアルミ粗形材を生産する工法における機能品質とコスト曲線であり、機能品質が上げればそれに伴いコストも上昇する。

その中で、従来から存在するセミソリッドダイカストは、AC4CH 材を使用するのが一般的であるが、

- ・市場の流通量が少なく、材料費が高い
- ・流動性が低いため形状によっては厚肉となる

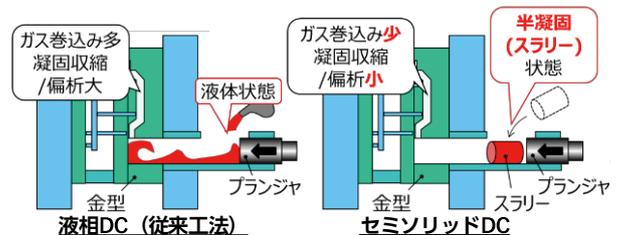
- ・機械的特性が低いため、要求品質によっては熱処理などの後処理が必要
- などの要因によりコストが高くなる。

そこで、市場の流通量が多く比較的安価なダイカストで使用する ADC12 材にセミソリッドダイカストを適応することで、高品質と低コスト化の両立が可能となり、ニーズに対応できると考えた。

## 2. セミソリッドダイカストの特徴

通常の液相ダイカストでは、図2に示す通り、液体が波立つことによる空気の巻き込み、液相から固相への相変化による収縮が発生する。

図2 液相とセミソリッドダイカストの違い



これらの現象により、巻き込み、収縮による鑄巣の発生や急冷による合金成分の偏析が発生し、内部品質を低下させる要因となっており、これらは液体金属を高速成形する以上避けられない問題である。

これに対し、セミソリッドダイカストでは液体よりも温

度が低い半凝固状態のスラリーから成形するため、凝固収縮が減少し鑄巣の低減や寸法再現性の向上が期待できる。

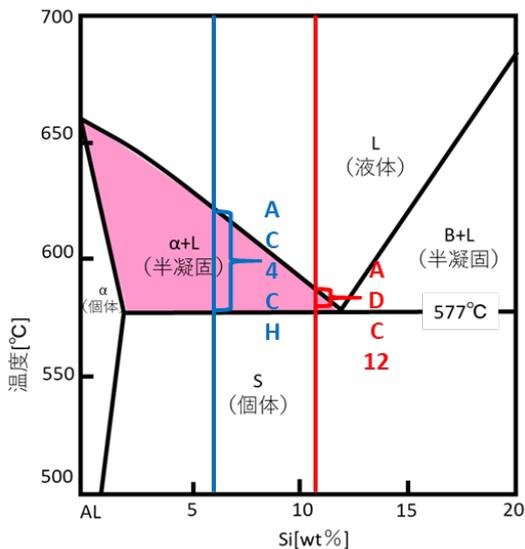
また、プランジャが動き出す射出時においても、波立ちが無い為、巻込みが減少することで鑄巣低減が期待できる。

さらには、金型に充填される材料は全体的にスラリー状態であるが故、ある程度均一な組織の状態になっており、偏析が減少し、機械的性質のバラつきが低減し、平均値の向上も期待できる。

このことから液体金属を成形するという従来のダイカストの根本的な問題を解決する工法と考えられているが、当然その背反もある。

1つ目は粘性の高い流体を流そうとするため、湯流れ性が悪化し、充填不良になりやすくなる。

図3 AL-Siの2元状態図



2つ目はADC12を適応する場合、材料の特性による課題がある。

図3に示す状態図の通り、ADC12は固液共存状態で存在できる温度域がAC4CHに対し小さいため、温度コントロールが難しく、半凝固金属スラリーを生成するのが困難であると考えられていた。

また、図4に示す通り、凝固の形態も異なり、AC4CHでは、粥状に均一に凝固が進行するが、ADC12合金は、温度が低下しやすい外周部より凝固していく性質があるため、スラリー内で固相率が不均一、偏析しやすい傾向がある。このように、安価で強度に優れるADC12合金においては、固相が均一で良質なセミソリッドスラリーを生成することが困難であると考えられていた。

### 3. ADC12合金セミソリッドスラリーの生成

スラリーを生成するにあたっては、熔融金属よりも低い温度の容器を機械的に振動させながら、熔融金属を容器に

図4 合金違いによる凝固イメージ

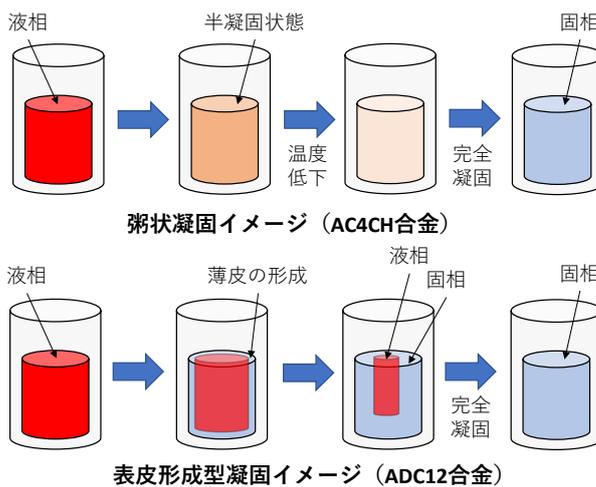


図5 スラリー生成イメージ

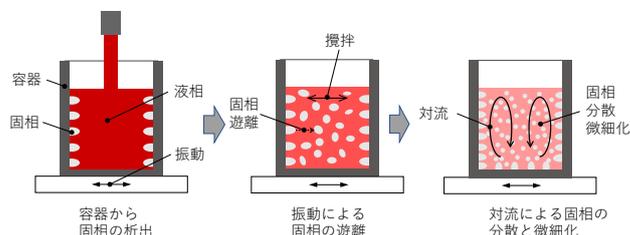
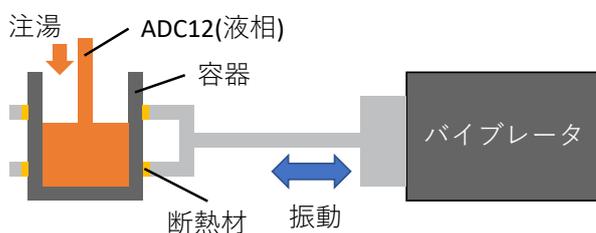


図6 機械振動装置イメージ図



注いで固液共存状態まで対流させながら冷却させる。

熔融金属が冷却されると、温度の低い容器表面から固相が析出する。

そのイメージを図5に示す。

従来のAC4CHでは電磁攪拌のような回転方向の流動を与えて、容器表面から析出する固相を分散、微細化させてスラリーを得るが、ADC12では容器との接触面に硬い初期凝固殻が生成され良好なスラリーが得られない。

そこで、今回ADC12で良好なスラリーを得る方法として、機械振動を加えることで、強い攪拌力を与えることにより固相を容器表面から遊離させた。

その装置のイメージ図を図6に示す。

これにより、対流による固相の分散と微細化を促進し固相が均一となる。最適な機械振動を付与することで、良質なスラリーを生成する方法を確立した。

この機械振動によるスラリー生成方法の効果を図7に示す。

図7 ADC12合金の金属スラリーの組織観察

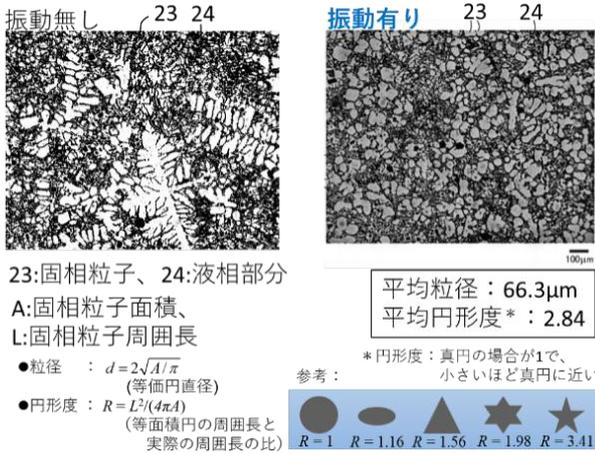


図8 ADC12合金スラリーのカット観察



振動無しの状態ではデンドライト状に成長した粗大な組織が観察されるのに対し、振動有りの状態においては、組織が微細化されており、粗形材の素性を低下させないために望ましいとされる固相粒子の平均粒径は小さく、平均円形度も小さいセミソリッドスラリーを得ることが可能となった。

またそのスラリーは金属ヘラで簡単に切れ、スラリー表面から内部まで均一な硬さで、カット断面は滑らかできれいなスラリーを生成することが可能となった。(図8)

#### 4. スラリーの流動性確保の課題について

渦巻状テストピースが得られる流動長評価用の金型を用いて、ゲート厚さや射出速度を可変させることでせん断応力が流動長へ与える影響を評価した。

図9に示す渦巻き試験片にてゲート厚さと流動長の関係の評価結果を図10に示す。

セミソリッド状態では、ゲート厚さを小さくすることにより流動長が上昇する傾向がある。

ゲート厚さが4.0 mmの場合は、流動抵抗が低下したため流動長が上昇したと考えられる。

図9 渦巻き試験片

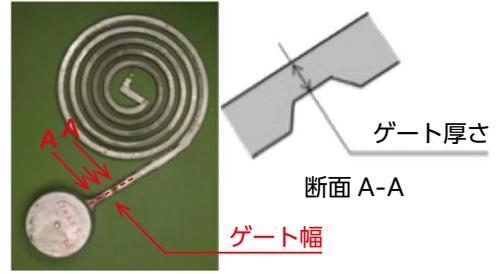
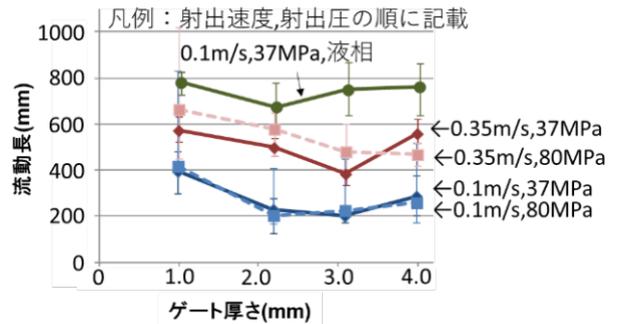


図10 ゲート厚さと流動長の関係



次に、この流動長試験で振ったパラメータを、

$$\text{せん断速度} : \gamma = 6Q/(BH^2) = 6V/H$$

( $\gamma$ :せん断速度,  $V$ :ゲート速度,  $Q$ :体積流量,

$B$ :ゲート幅,  $H$ :ゲート厚さ)

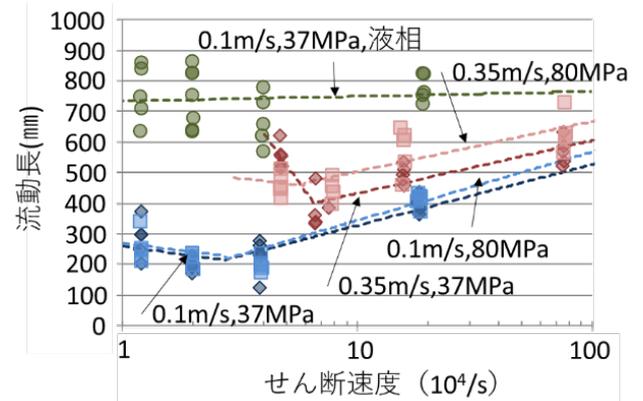
$$\text{せん断応力} \tau = \gamma \cdot \eta \quad \eta : \text{みかけ粘度}$$

で、まとめ直してみる。

せん断速度は、ゲート幅とゲート厚さは小さい方がせん断速度は大きくなり、またゲート速度が速い方がせん断速度は大きくなる。

算出したせん断速度により流動長との関係をまとめ直した結果を図11で示す。

図11 せん断速度と流動長の関係



セミソリッド状態では、一定以上のせん断速度の増加に伴い、流動長が向上する。これは、ゲート部でせん断速度が上昇することにより、スラリーが受けるせん断応力が増加し、スラリーの粘度が低下し、流動性が向上するためと

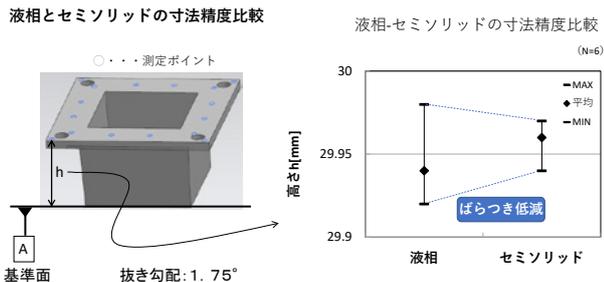
考えられる。

このように、ある程度のせん断速度を与えることで、液相に近い流動長を確保できることが分かった。

### 5. 寸法精度と機械的特性について

図 12 に示す製品を液相とセミソリッドダイカストで製造し寸法精度に与える影響を評価した。

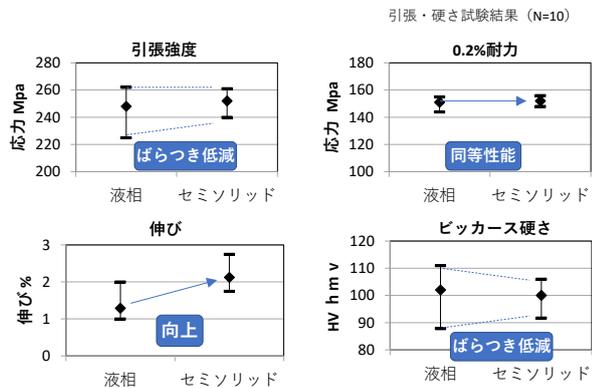
図 12 液相とセミソリッドの寸法精度比較



セミソリッドは液相に対して寸法ばらつきが低減している。これは、凝固の際の収縮率が小さいため、寸法再現性が向上したと考えられる。

次に、液相とセミソリッドでダイカストした試験片 (φ10) を用いて試験を実施し、各機械的特性について比較評価した結果を図 13 に示す。

図 13 液相とセミソリッドの機械的特性



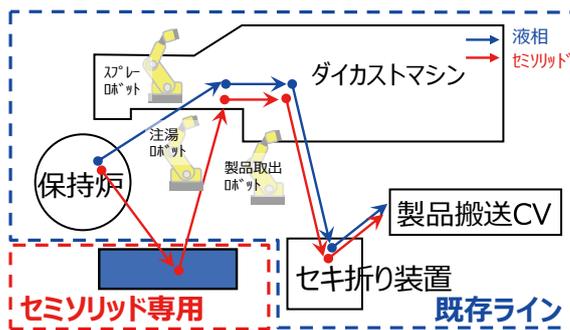
伸びについては向上し、そのほかの項目においても液相と同等以上という結果が得られた。これは、加振されたことにより組織が均一に微細化された状態となり、偏析も少ないため、ばらつきが低減し安定性が向上したと考えられる。

### 6. 液相とセミソリッドダイカスト共用ラインの構築

弊社で構築した液相とセミソリッドダイカストの共用ラインを図 14 に示す。

青枠内が既存ダイカストライン部、赤枠内がスラリーを生

図 14 ライン概要



成するためのセミソリッド専用工程となる。セミソリッドをダイカストする時は、この専用工程にて容器の冷却、容器への離型剤塗布、機械振動を付与してのスラリー生成といった流れをロボット搬送することで全自動にて実施している。

このように共用ラインとすることで、投資抑制と負荷に応じた生産設備の有効活用が可能となりコスト低減を図ることができた。

### 7. 本開発の効果

最後に、本開発の効果を図 15, 16 に示す。

図 15 内部品質の向上

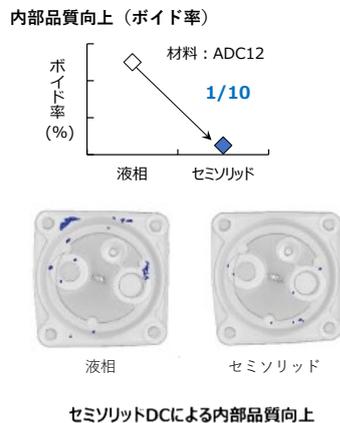
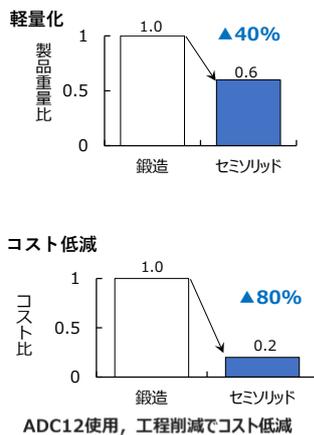


図 16 軽量化とコスト低減の効果



1つ目は、内部品質の向上である。液相に対してセミソリッドは、ポイド率を1/10に低減できており、セミソリッドダイカストの特徴である、巻込み、収縮による内部欠陥である鑄巣の低減が確認できる。

2つ目は、軽量化である。重量に関しては流動性を確保し、液相同等のニアネットシェイプでの製品化を実現することにより、従来の鍛造部品に対して、約40%の軽量化ができた。

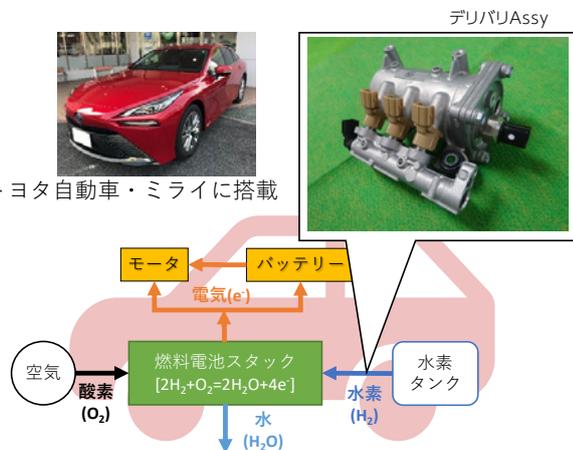
3つ目は、コスト低減である。ADC12を使用し、液相ダイカストと共用ラインを構築することで、鍛造に比べて約80%のコスト低減をすることができた。また、ADC12を使用することにより、T6処理が不要となりCO<sub>2</sub>低減にも貢献している。

## 8.まとめと今後

本開発によりこれまで困難とされていたADC12のような共晶点に近い組成でもセミソリッドスラリーを生成することに成功した。それにより、大半の合金に対しこの技術を応用することが可能となった。

今回この技術を使用し、関係者の多大な協力を得て第2世代のFCV水素系デリバリAssyの量産までたどり着くことができた。(図17)

図17 FCV水素系デリバリAssy



本研究は、愛知県の「知の拠点あいち・重点研究プロジェクト」の一環として実施したものである。同プロジェクトでご協力頂いた、元産業技術総合研究所 三輪謙治氏 ならびに、産業技術総合研究所 村上雄一郎氏に深く感謝します。

### 参考文献

- 村上雄一郎, 他5名, AC4CHアルミニウム合金半凝固スラリーの固相粒子形態に及ぼす機械振動条件の影響, 鑄造工学86(9) (2014) 728-733.  
 村上雄一郎, 他5名 機械振動付与によって作製したAC4CHアルミニウム合金セミソリッドスラリーの流動性評価, 鑄造工学 86(10) (2014) 773-780.  
 Y. Murakami, 他4名, Non-Equilibrium Phase Crystallization of Al-Si Alloy Close to Eutectic Composition by Mechanical Vibration, Materials Transactions 63(12) (2022) 1657-1661.  
 村上雄一郎, 他4名, 機械振動付与によるADC12アルミニウム合金セミソリッド

スラリー作製技術, 鑄造工学 95(1) (2023) 16-22.

村上雄一郎, 他5名, AC4CHアルミニウム合金のセミソリッド成形における成形条件が流動性に与える影響, 鑄造工学84(11) (2012) 605-611.

村上雄一郎, 他5名, AC4CH合金のセミソリッドダイカストにおける射出速度が初晶α-A1相粒子分布に与える影響, 鑄造工学85(10) (2013) 665-671.

Y. Murakami, 他5名, Effect of the shape of solid particles on the distribution of particles in jis AC4CH (A356) Aluminum alloy Semi-Solid High-Pressure die casting, Light Metals 2016, 2016, pp. 201-206.

Y. Murakami, 他5名, Effect of Casting Condition in Semi-Solid Aluminum Alloy Injection Process on Distribution of Defects and Density, Shape Casting (2014) 11-18.

Y. Murakami, 他4名, Development of Slurry Preparation Method by Applying Mechanical Vibration, Solid State Phenomena 285 (2019) 333-338.

Y. Murakami, 他6名, Effect of Solid Particles on Fluidity of Semi-Solid Aluminum Alloy Slurry, Light Metals 2012 (2012) 297-301.

Y. Murakami, 他6名, Evaluation of fluidity of semi-solid aluminum alloy slurry prepared by mechanical vibration, 71st World Foundry Congress: Advanced Sustainable Foundry, WFC 2014, 2014.

Y. Murakami, 他4名, Effect of vibration conditions and shear rate on the shape of solid particles in JIS AC4CH aluminum alloy slurry made by applying mechanical vibration, 72nd World Foundry Congress, WFC 2016, 2016.

### 著者



鬼頭 雅幸  
工機・生技開発部



篠田 潤一  
基幹製品生技部



小出 怜  
工機・生技開発部



市村 優汰  
基幹製品生技部



村上 雄一郎  
産業技術総合研究所



三輪 謙治  
元産業技術総合研究所

### 受賞実績

- 令和3年度 愛知発明表彰 愛知発明賞  
(一般社団法人 愛知県発明協会)  
中部地方発明表彰 発明奨励賞  
(公益社団法人 発明協会)
- 令和5年度 日本鑄造工学会 豊田賞  
(公益社団法人 日本鑄造工学会)  
素形材産業技術賞 奨励賞  
(一般財団法人 素形材センター)  
中部科学技術センター顕彰 大賞  
(公益財団法人 中部科学技術センター)



# 小型モビリティ用モータコントローラ

田中 智也 小島 峻 川崎 良彦 細川 康夫 氏家 慈宙

## 精密な制御で、電動モビリティの力を最大限に引き出します！

私たちは、電動モビリティをもっと快適で効率的にするための技術開発に取り組んでいます。電動モビリティの動力となるモータは、ただバッテリーから電流を流すだけでは、思い通りに動いてくれません。そこで活躍するのが「モータコントローラ」です！このコントローラが、走行状況に応じて電流や周波数を細かく調整し、スムーズな乗り心地やユーザーの意志を実現します。

愛三工業は、これまでエンジンやハイブリッド車の制御技術を長年培ってきました。その経験を活かしながら、

ハードウェアやソフトウェアを開発し、お客様のニーズにぴったり合ったシステムを提案しています。

また、シミュレーション技術を活用して、無駄のない設計と高品質な製品づくりを徹底。実際に車両に搭載した後も、最適な動作になるよう細かく調整を行っています。

この技術のおかげで、発進時や低速走行時の車の揺れを抑えたり、坂道発進で後ろに下がるのを防いだりすることができます。これからも、安全で快適なモビリティの進化を支え、新しい価値を生み出すことに挑戦していきます！

### 実績ハイライト

## 01 モータコントローラ

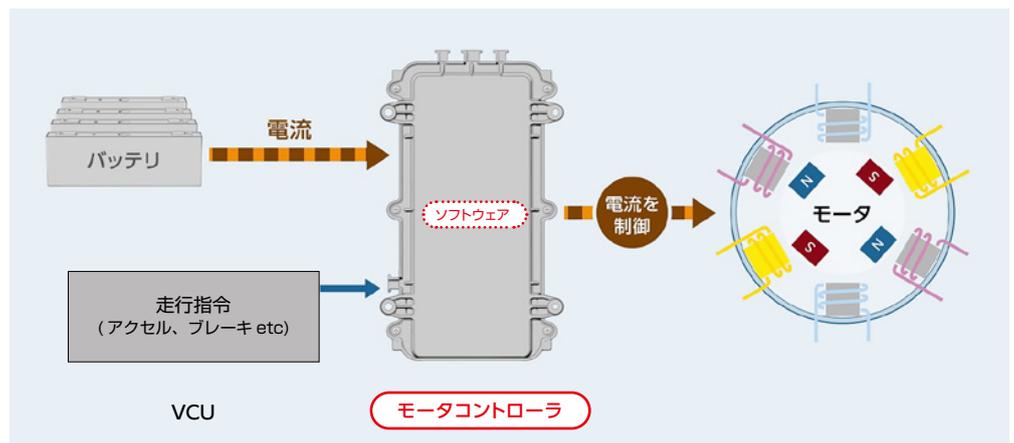
モータコントローラは、走行状況に応じてモータに流れる電流や周波数を精緻に制御することで、モビリティの加減速やバッテリーの消費を抑えた高効率な走行に寄与するなどモビリティのパワートレイン全体を支える重要な製品です。

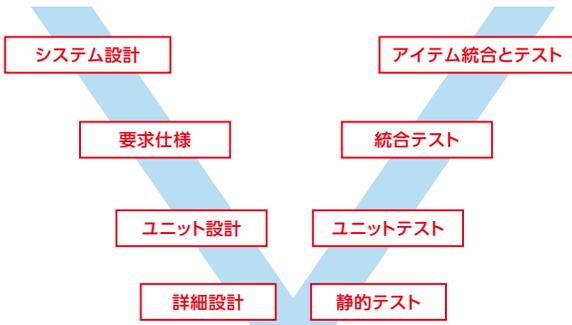


モータを制御するために必要な回路基板



ソフトウェア

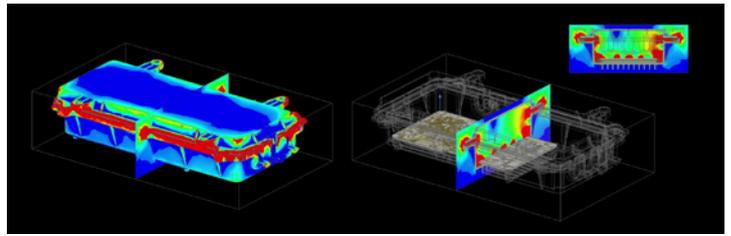




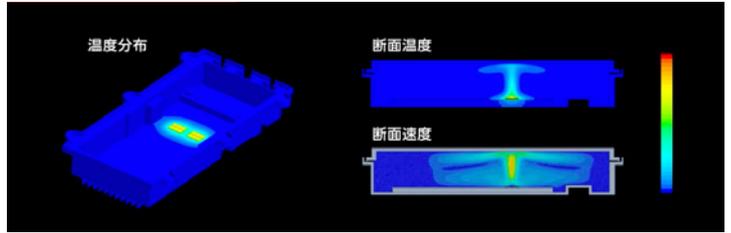
## 02

### V字モデルプロセス

長年にわたりエンジン制御やハイブリッド制御開発に携わってきた知見を生かし、プロセスに従って計画的に開発を進め高い品質を確保することが可能。



ノイズシミュレーション



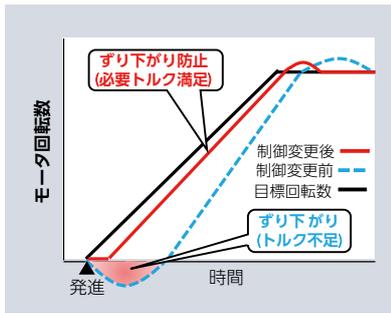
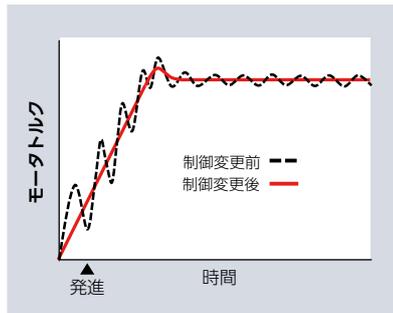
熱流体解析



スムーズな発進



登坂路での安全性



## 03

### シミュレーション

設計にシミュレーションを活用し、手戻り（やり直し）のない効率的な開発を進めることで、日程の短縮や試作費の削減を実現。

## 04

### モータ制御開発

車体の動作制御や坂道発進時のトルク制御など、培ってきた制御技術や車両知見により、モビリティの要求に合わせた性能レベルを可能にしています。

### 成果（問題解決）

- 発進時の揺れを軽減し、より快適な乗り心地を実現。
- 坂道発進時の後退を防ぎ、安全性を向上。

### 実績紹介

- 改良・コストダウン検討を進めていくことで、さらなる電動モビリティへの採用を目指していきます。

# BEV 車用 電池ケース深絞り技術開発

塚本 雅之 若杉 圭介

## 高品質かつ薄肉をかなえるプレス工法の確立により、 電池の品質とコスト低減に貢献します

昨今の環境問題への関心の高まりから自動車のEV化が進む中で、当社は電気で走行するBEV (Battery Electric Vehicle) に搭載するリチウムイオン電池ケースの工法開発に取り組んできました。電池ケースには、形状として一般的に円筒型や角型などありますが、今回は、お客様様の車載ニーズに合わせた高い強度や耐久性、軽量化を兼ね備えた角型形状(01)を、一枚のアルミ合金板材を深絞りプレスで造り上げる(02)ことに成功しました。

角型の製缶技術には、板材を単純に絞り込んでいくことに加え、角型とするためのコーナー部の曲げ加工が必要。さらに強度や耐久性を確保するため角型の各面は、おの

のに異なる板厚を求められます。それら形状の造り込みに加えて、アルミ材の高騰化に対しては、アルミ材の高い歩留まり率（プレスで切り捨てる廃材と製品との比率）を確保する必要がありました。

それらの課題を解決するため、材料の特徴を活かした「しごきプレス工法」を導入。多数の工程で徐々に板材を絞り込んでいく（一度に絞ると割れてしまい形状が作れない）従来の工法に対して、工程数削減と材料歩留まりを向上させるプレス工法(03)を開発。さらに、割れの発生も抑制させた工程設計とプレストライならびにCAE\*解析も交えて最適工程数(03+)を追求しました。

\* Computer Aided Engineering : コンピュータを利用した設計支援

### 実績ハイライト

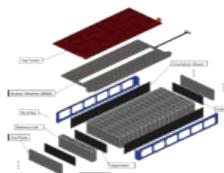
## 01 角型形状

お客様様の車載ニーズに合わせ、高い強度や耐久性、軽量化を兼ね備えた角型形状を採用。

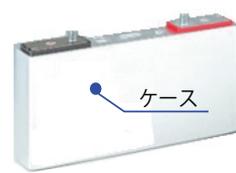
電池パック 電池制御



電池モジュール 電池セルを束ねる



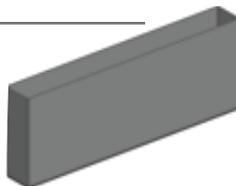
電池セル 充電部



開発モデル

BEV 用電池ケース

高強度アルミ深絞り  
W:308 D:40 H:100



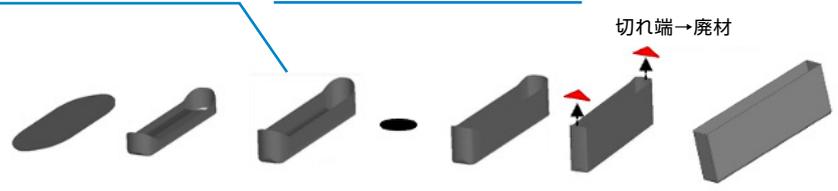
<機能とニーズ>

- 強度と耐久性：5面それぞれの板厚 ±10% 以下
- 薄肉化と材料歩留まり低減によるコスト抑制

# 02

## 深絞りプレス

一枚のアルミ合金板材から深絞りプレスで角型形状に造り上げます。



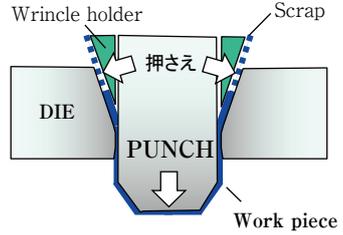
高強度アルミ板 → 多工程（型）で造り上げていく → 角型缶

### ものづくりの追及ポイント

- ◎ 廃材抑制：  
高い材料歩留まり (80%<sup><</sup>)
- ◎ 工程数削減

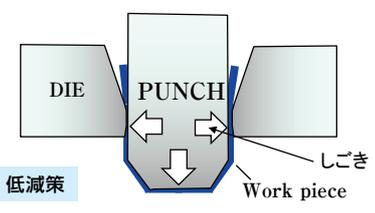
### 材料歩留まりの向上のためには

【従来：ワークを押さえながら絞る】



【開発：しごき力を加え引き伸ばす】

・ダイパツとの力を減らす＝しごき力＝板厚変化大



低減策

スクラップ小＝歩留まり向上  
＋工程数削減

# 03

## しごきプレス工法

高い板厚方向への圧縮力をかけながら引き伸ばすと材料の伸び率が大きくなることを利用した深絞りプレス工法の中でも「しごきプレス工法」を導入。多数の工程で徐々に板材を絞り込んでいく（一度に絞ると割れてしまい形状が作れない）従来の工法に比べて、工程数削減と材料歩留まり向上を実現しました。

# 03+

## 最適工程数を追求

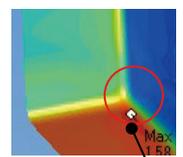
割れの発生も抑制させた工程設計とプレストライならびに CAE 解析も交えて、最適工程数を導き出した。

### 割れ発生



工程数を減らしすぎる（一回の変形量を大きくする）と割れる

### 角部の応力集中を減少



改善後



割れにつながらない応力を CAE 解析で見極め

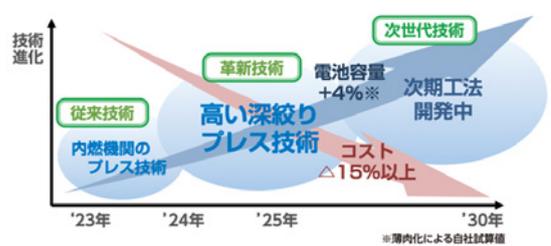
クラック抑制となる工程（金型）を導き出せた。

## 成果（問題解決）

- 電池容量の拡大とローコスト化に貢献（コスト 5% 低減見込み）。
- 工程数削減による省エネ（140t-CO<sub>2</sub>/年低減見込み）。
- 安全性や耐強度を備えた、高い品質を確保した開発を実現。
- 量産化に向けた取り組みを視野に活動を推進中。

## 今後の展開

- さらなる向上に向け、電池容量アップとともに、コスト削減 15% 以上となる次期工法開発を進行中。



# 電動化に向けたソフトウェア人財育成

電動システム開発本部

## 社内人財のリスキングで自動車産業の未来を開きます！

「カーボンニュートラル」実現のカギを握る電動システムの開発には、ソフトウェアエンジニアが必要不可欠です。しかしエンジン用メカ部品を基幹事業としてきた当社にはソフトウェアエンジニアが極端に少なく、業界全体でも人財が不足しているため、人財確保に課題がありました。

そこで、3年間で100名のソフトウェアエンジニア育成を目標とした「ソフトウェアファースト100 (SWF100)」を2022年度に立ち上げ、社内の若手～中堅社員でソフトウェアエンジニアへの転身を希望する人財のリスキングと、ソフトウェア開発職種で採用した新入社員の育成に取り組みました。

まず育成実行の特命チームを設置、会社が求める人財像の定義から始め、育成方針、目標、方法を検討。実際に育成を進めながらより良い方法へ修正を続けました。

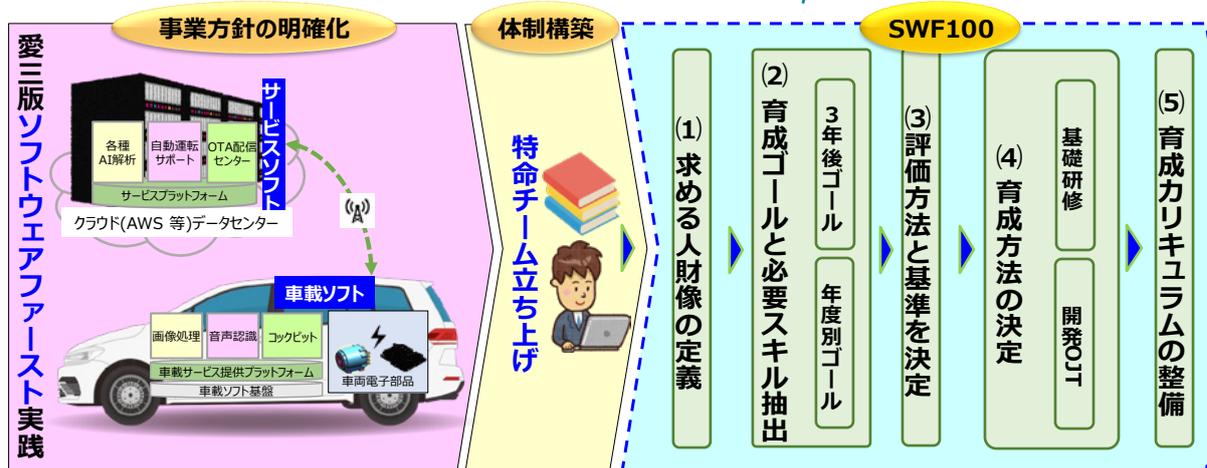
育成方針は01に示した形とし、育成期間中はスキル習得状況を見える化し、不足しているスキルエリアや個人の適正を考慮した題材選定や指導を行いました。活動最終年度には、リーダーの下で実製品開発に参画できるまでに成長し、24年度で3年間の活動は一旦終了。目標とした人数とスキルレベルをほぼ達成できました。今後は組織力強化を目指し、能力強化とリーダー層育成に力を入れていく予定です。

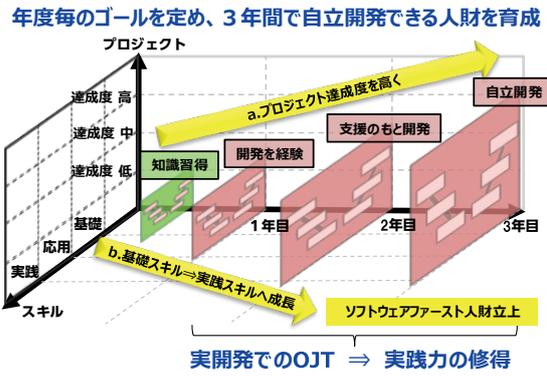
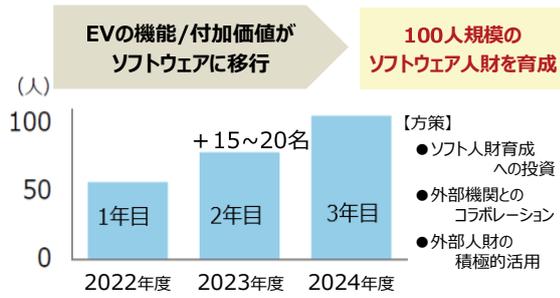
### 実績ハイライト

## 01

### 求める人財像から育成ゴール・育成方法を決定

計画段階では、最初に目標となる求める人財像、3年間の育成ゴール、評価方法、育成カリキュラムを明確化しました。人財像は、愛三工業が強みとしてきた技術をベースにソフト技術を加え、「車載システムが自立開発できるレベルのスキルを有する人財」と定義しました。





## 02

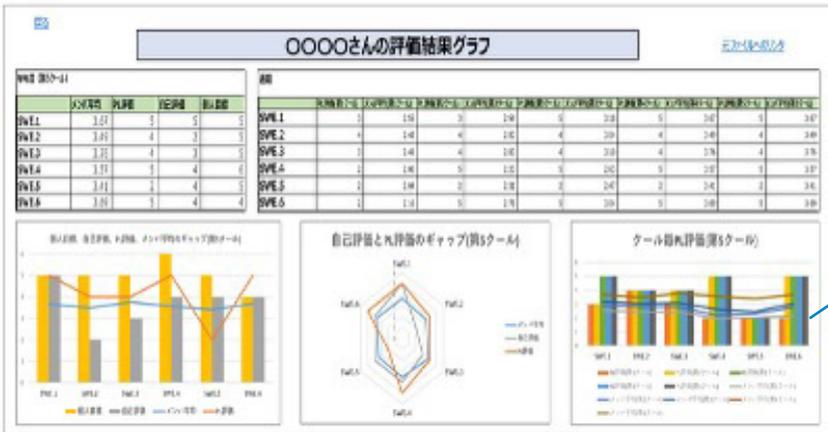
### 実践力強化を重視しOJT中心の教育

短期間で実践力を身に付けるために育成カリキュラムはOJTを中心としました。OJTに必要な基礎技術は、OJT前に3カ月間実施する基礎教育で習得。開発テーマは事業戦略ロードマップを元に設定し、チーム毎にプロジェクトリーダーの指導の下で愛三開発プロセスに則り開発を進めます。クールと呼ばれる6~9カ月毎の開発を繰返し経験を重ねることでレベルアップを図ります。

	第1クール 要素技術開発 2022/07-12	第2クール リアルテーマ開発 2023/01-06	第3クール 量産対応準備 2023/07-12	第4クール 量産対応準備 2024/01-09	第5クール 量産対応準備 2024/10-03
CN	機器制御				
E	駆動制御	モーターインターフェース			
	電力変換	DCDCコンバータ			
	電力制御	電力供給電源管理			
共通PF	通信PF				
	制御PF				
CAS	自動運転	自動走行			
					サービスOUT-CAR

仮想テーマ  
要素技術開発

実製品テーマ  
機能開発



## 03

### 育成状況の可視化とフォローアップ

メンバーの評価はあらかじめ定義した基準を基に見える化して個人適正に応じたフォローを実施。基準は業界標準ETSS(Embedded Technology Skill Standards)を拡張して適用。

### 成果

- 3年間で、リスキルメンバーのほぼ全員が目標とする中級レベルに成長。
- 2022年後半からは、複数の実製品開発テーマにも戦力として参画。
- 基礎研修とOJTによる教育カリキュラムの仕組み構築を完了。

### 今後の対応

- 量産開発増加や車載セキュリティなどの新たな要求、SDVや生成系AIなどの環境変化にも対応できるようにさらにレベルアップを図ります。
- 重点活動として、人材強化(マネージャー育成、スペシャリスト育成など)と組織強化(品質開発プロセス、管理システム活用など)に取り組み、新規事業として電動化製品開発を加速させます。

# モデルライブラリによる MBD 普及推進

中村 孝弘 野口 雄生

## MBD を活用して開発スピードアップ！開発力強化を実現しました

従来からコンピュータ上でモデル開発や検証を行うMBD (Model Based Development) に取り組んでいましたが、部署ごとの活動だったため、モデル開発の重複などの弊害がありました。そこでMBDを標準化し、モデルを技術部全体の資産として活用できる仕組みを作ろうと、2020年～21年にワーキング活動を行いました。

背景にあったのは、CASEなど自動車業界を取り巻く環境の急激な変化です。当社は、開発力を強化してCASEの1つであるE（電動化）への対応を加速させ、電動化製品の量産化を早期に実現することを目指しました。

内燃機関（エンジン関連）製品を開発しつつ電動化製品も開発していくには、効率の良い設計と開発スピードの向上が欠かせません。そこでMBDを社内に普及させ、手戻り（作業のやり直し）を減らし、開発スピードの向上をねらいました。課題であったモデル開発の重複は、クラウド上に保存場所（モデルライブラリ）を設け、仕様書（取説）のフォーマットを定めることでモデル一覧の可視化を実現。さらに、モデル名のネーミングルールなどモデル構築のルール制定で部署間のモデル流用も容易になるなど、多くの成果が上がっています。

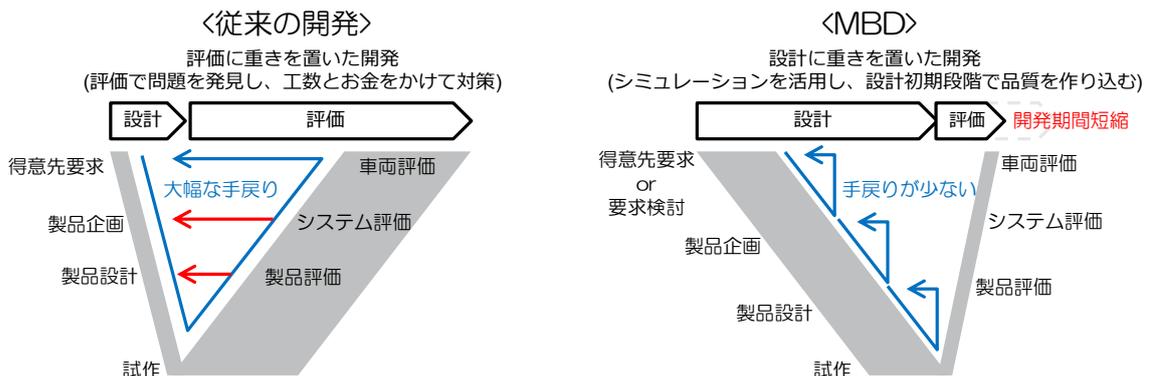
### 開発のポイント

## 01

### MBD を用いた開発手法

MBD を用いることで、設計初期段階からシミュレーションを活用し、小さく PDCA を回してバーチャルの世界で品質を作り込むことが可能に。

### MBDを用いて開発のスピードUPを目指す



※引用：経済産業省「自動車新時代戦略会議（第1回）資料」を愛三工業に合せた形に変更

### 〈モデルの保存場所（モデルライブラリ）〉

製品、粒度、使用ソフト別にリスト化  
⇒見やすさ、検索のしやすさを重視

	粒度A	粒度B	粒度C
粒度	← 低い → 高い →		
モータ			
バッテリー			
制御			

■: ソフトA  
○: ソフトB  
粒度: 実機の再現度

## 02

### 開発一覧の可視化

見やすさや検索のしやすさを重視したモデルライブラリと、必要情報を記載できるモデル仕様書を作成、開発済みモデルの可視化が容易に。類似モデルの活用により工数低減も実現。

### 〈モデルの仕様書（取説）〉

モデル情報（入出力、計算内容、粒度）など

スロットルポデーモデル

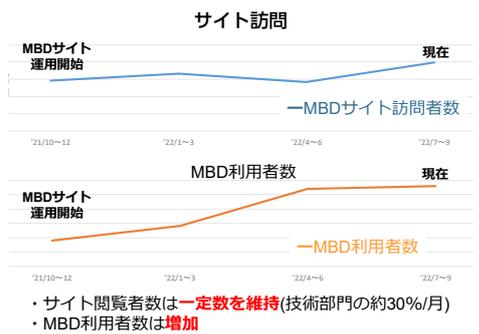
モデル詳細

## 03

### MBD サイト

MBDの有用性を社内に浸透させるため、技術教育を実施。また、MBDに関するすべての情報をクラウド上に集約したMBDサイトも構築、運用しています。

### 〈MBD普及推進の効果確認〉



### MBD サイト (クラウド)

### モデル構築ルール

モデルライブラリ

その他成果物

- ・ノウハウ集 (個人の知見を集約)
- ・保有ソフト情報
- ・操作マニュアル
- ・問い合わせフォーム
- ・ソフト予約

### 成果 (問題解決)

- モデルライブラリ作成により、開発の重複を回避。
- モデル構築ルール制定で、流用しやすい標準化したモデルの構築を実現。
- 基礎教育の実施によりMBDの利用者が拡大。

### 今後の展開

- モデルライブラリのさらなる充実を図り、開発力の強化につなげます。

# 連成解析によるソレノイドバルブ開発

中村 孝弘 小林 弘紀

## 電磁界解析ソフトと設計探査ソフトや1D-CAEソフトの連成で、 設計期間の大幅減を達成

温室効果ガスの排出を全体としてゼロにするカーボンニュートラル、脱炭素社会を目指す動きが世界で高まっています。化石燃料に代わるエネルギー源として、太陽光や風力といった再生可能エネルギーに加え、大きな注目を集めているのが水素です。

当社は、1990年代半ばから水素系製品を手掛けていて、二酸化炭素を排出しない究極のエコカーとして注目を集めている「MIRAI」などに採用されてきました。そして、FCV（燃料電池車）向け製品の拡充に向けて新たに開発に挑んだのがリニアソレノイドバルブ（LSV）です。

LSVとは、電流によって流体の流量を調整する装置です

が、磁気回路設計の工程で検討が繰り返されることが多く、開発の課題となっていました。そこで、電磁界解析ソフトJMAGを中心に連成手法を用いて課題の解決に挑戦。設計探査ソフトとの連成で形状を検討することにより製品全体の最適設計を自動化、1D-CAE\*との連成で応答性を評価できる解析手法を構築。2つの新たな設計手法の構築で、設計期間を68%低減し、製品の約20%小型化も達成しました。

今回の挑戦で培った設計手法の構築技術を仕組み化して、新たな挑戦につなげていきたいと考えています。

\*上流段階から適用できる設計支援の考え方、手法、ツール

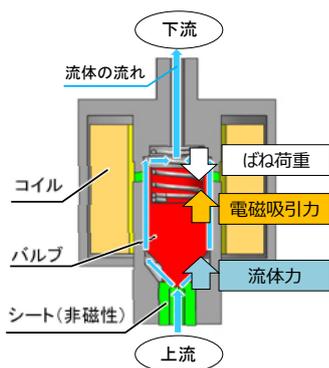
### 実績ハイライト

## 01

### 2つの課題と対策

「コイル諸元（線径など）」と「磁路形状」を別々に検討していたなど2つの大きな課題があり、手戻り（やり直し）を繰り返すことが多くありました。

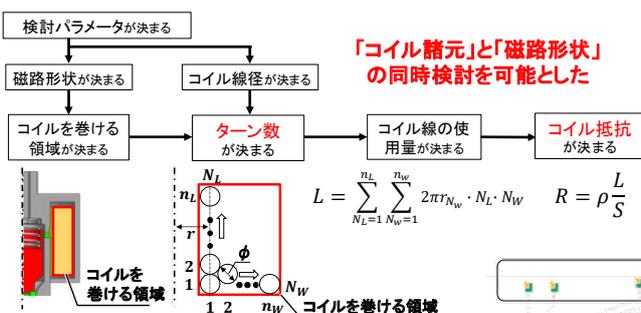
〈LSV〉



〈JMAGを用いた課題解決〉

	課題1	課題2
	「コイル諸元」と「磁路形状」を別検討し、製品全体で最適設計できていない	過渡的な荷重の定式化できておらず、実測まで性能予測ができない
実施した対策	<b>設計探査ソフトとJMAGを連成</b> ⇒「コイル諸元」と「磁路形状」の同時探査による製品全体の最適設計	<b>1D-CAEとJMAGを連成</b> ⇒過渡的な荷重を計算するモデルを構築し、評価に使用できる解析精度を担保

### 〈コイル諸元の算出〉

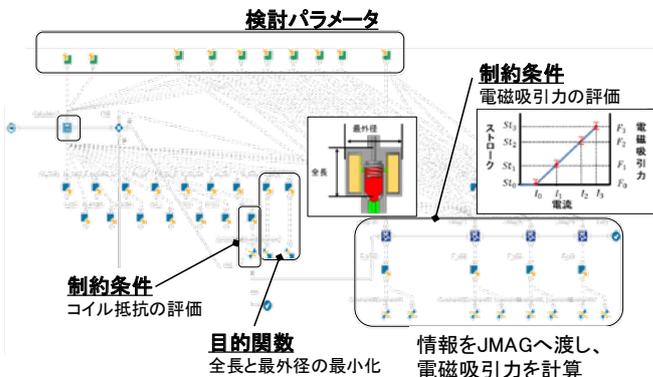


## 02

### 設計探索ソフトと連成

設計探索ソフトで決まった形状寸法を JMAG へ引き渡し、「形状エディタ」の機能で解析モデルを自動生成。設計探索を活用することで磁気回路設計の期間を 89% 短縮しました。

### 〈設計探索モデル〉

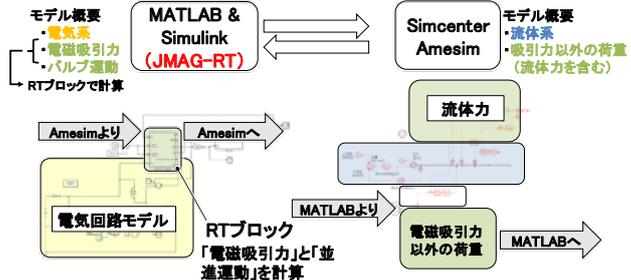
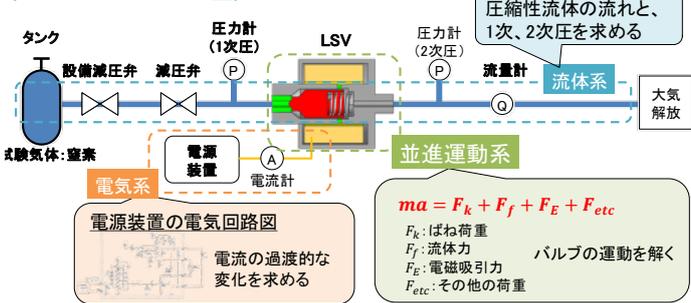


## 03

### 1D-CAE との連成

02 (設計探索ソフトと JMAG の連成) で得た形状をもとに、応答性評価を実施。電気系、流体系、並進運動系という 3 つの物理領域の解析を行うため、1D-CAE でモデル化しました。

### 〈システムブロック図〉



### 成果 (問題解決)

- JMAGの連成技術を用い、2つの設計手法を構築。
  - ・設計探索ソフトとの連成による形状検討
  - ・1D-CAEとの連成による応答性評価
- 製品全体での最適設計により、全長と最外径とも約20%小型化。
- 開発フローを改善し、設計期間を68%低減 (340日→110日)、試作回数が減ることで (3回→1回)、開発コストも67%低減。



### 今後の展開

- 今回構築した解析技術を他製品にも活用していきます。
- さらなる効率化を目指し、今後も新たな解析技術を構築します。

# 知財ビジネスマッチング事業への参画

経営企画部 知的財産室

## 新たな価値創造や他者ビジネスの支援を目指し ドローンの特許を開放

毎年、多くの特許が新たに出願されている一方で、せっかく権利を取得しても活用されず眠っている特許も多数あります。実際、国内には約160万件の特許がありますが、約半数は大企業が保有したまま使われていないといわれています。そうした大企業の眠っている特許と、中小企業やベンチャー企業とをつなぎ、魅力的な商品の開発や新事業の創出につなげようというのが「知財ビジネスマッチング」事業です。

保有する特許と外部人材のアイデアや技術が組み合わせることで新たな価値創造につながる点や、社会貢献、企

業価値向上の観点から、当社はこの事業に積極的に参画しています。経済産業省（近畿経済産業局）やあいち銀行、日刊工業新聞社のプラットフォームにドローンに関する特許・意匠を提供しています。当社開発のドローンは、自動車部品開発で培ったエンジン技術を活用したハイブリッド式で、電動式に比べ航続距離の圧倒的な長さが特徴です。このドローン開発で取得した制御に関する特許とデザインに関する意匠を開放特許<sup>\*</sup>として公開、ドローンや空飛ぶクルマの開発・製造を検討している企業などのビジネス支援につながればと考えています。

<sup>\*</sup>他者にライセンス契約などの形で開放する意思のある特許

### 開放特許のポイント

#### 〈技術の特徴〉

ホバリング飛行時において、ホバリング飛行に必要な最低出力値よりも高く、かつ上昇飛行に必要な最低出力値よりも低い所定出力値で駆動し、余剰電力をバッテリーに充電することで長時間飛行を可能にする。【出力制御】

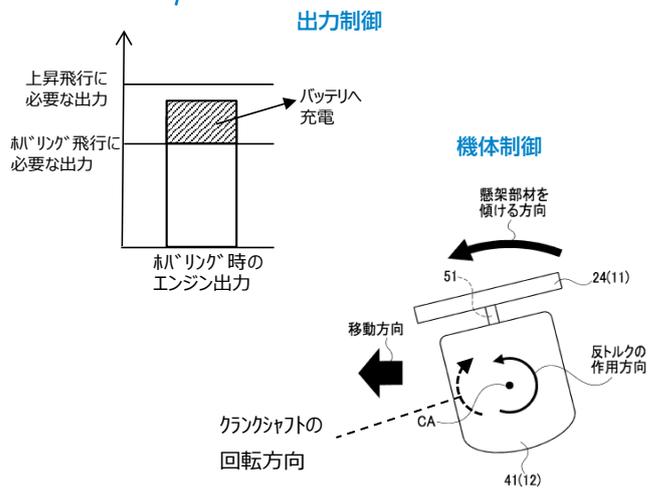
移動飛行時において、エンジンの駆動により生じる反トルクの作用方向と、機体を傾ける方向（進行方向）を一致させることで省エネ飛行を行う。【機体制御】



## 01

### ドローンの制御に関する特許

長時間飛行や省エネ飛行を実現する、出力制御と機体制御に関する特許です。



### 〈活用が見込める事例〉

エンジンとバッテリーを用いたハイブリッド式のドローン、空飛ぶクルマ。



### 使用用途例



## 02

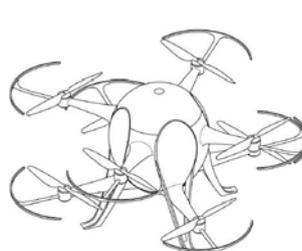
### ドローンのデザインに関する意匠

「人々に安心とやさしさを与える」をコンセプトにした、一般的なドローンとは一線を画した意匠が特徴です。



### 〈意匠の特徴〉

- ・卵を模した形状で柔らかさをイメージ
- ・卵を運ぶようにやさしく、安全に運ぶイメージ
- ・フレームを曲線で構成し、使う時に当たっても怪我をしないような形状
- ・人が荷物を取り扱い易い高さとして人にやさしい



斜視図



斜視図（開蓋状態）

### 〈デザインモデルの例〉



## 成果（問題解決）

- 経済産業省（近畿経済産業局）、あいち銀行、日刊工業新聞社のプラットフォームに特許・意匠を開放。

## 今後の展開

- 現在提供済みのプラットフォーム以外にも本案件を開放していきたい。
- 特許利用の申し入れがあった場合は、事業化に結び付くよう積極的に支援したい。
- 将来的には、ドローン以外の技術も必要に応じて開放したい。



# EGR 用二重偏心弁

## 1. 発明等の概要

本発明は、自動車用エンジンの排ガス再循環 (Exhaust Gas Recirculation) システムのバルブ (EGR バルブ) に採用されており、排ガスのクリーン化及び燃費の向上に役立っている。排ガス再循環とは、エンジンから出た排気ガスの一部を吸気側に戻して再燃焼させるシステムのことを指し、もともとディーゼル車の排ガス浄化 (NO<sub>x</sub> 低減) が主な用途であったが、エンジンの吸気抵抗を減らして燃料の消費を低減できる為、今ではガソリン車でも広く採用さ

れている。(図 1)

本発明品は、従来の EGR バルブ (図 2 の従来品 1) に対し、製品を大型化することなく、再循環流量を約 2 倍まで高めたものであり、自動車の軽量化及び環境負荷の低減に貢献している。

また現在、本発明品は国内拠点にて年間約 60 万台生産されており、国内に供給されている。

図1 排ガス再循環システムと EGR バルブ

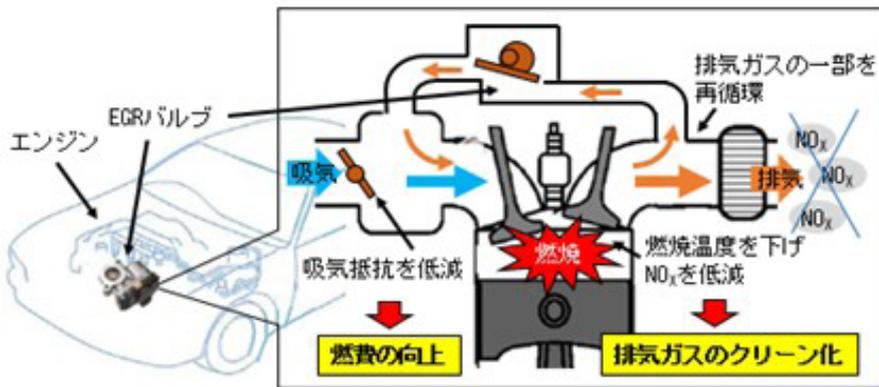
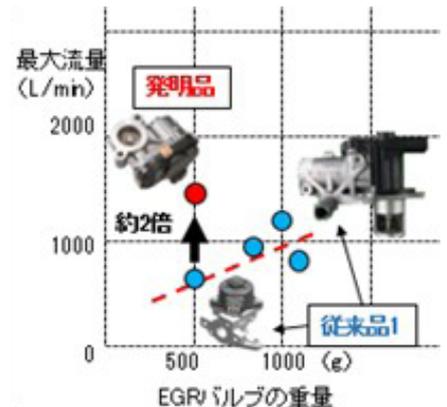


図2 製品重量と最大流量の関係



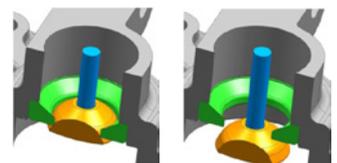
## 2. 従来発明等の課題と開発ニーズ

従来の EGR バルブはポペット弁式 (小型・小流量・高密閉) のものが主流であったが、再循環させる排ガスの量 (EGR 率) が多い程、燃費向上と排ガスのクリーン化が促進される為、近年のニーズとして再循環させる排ガスの大流量化が求められるようになった。よって、各社から大流量化を実現すべく、以下のような改良案が提唱された。(図 3)

図3 従来技術とその課題

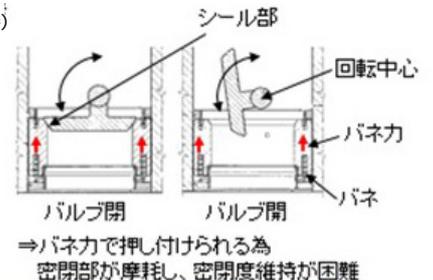
### ■従来品 1 (ポペット弁)

- ・小流量なら高密閉で小型化が可能
- ・大流量ならば高密閉であるが大流量が必要



### ■従来品 2 (バタフライ弁)

- ・小型、大流量化は可能だが、高密閉維持が困難



大流量化の開発ニーズに応えるためには、従来品 2 は製品化が困難であり、従来品 1 は製品重量増を伴う大型化が必要であった。

### 3. 発明等の特徴

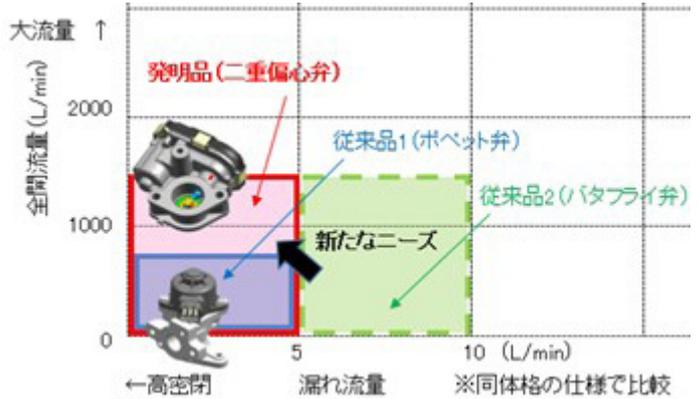
本発明は、製品を大型化することなく、大流量と高密閉を両立させるような構造を取っており、シャフトとバルブの中心軸を上下左右にずらす（二重偏心させる）ことで、大流量化が得意なバタフライ弁のように開き、閉じた姿勢

は密閉性に優れたポペット弁のようになることを特徴としたものである。（請求項1）

また、本発明はバルブに関する基礎的な発明である為、様々な用途への応用が期待できる。

#### <特徴1> 相反する要求性能の両立

図4 発明品(二重偏心弁)の構造と性能



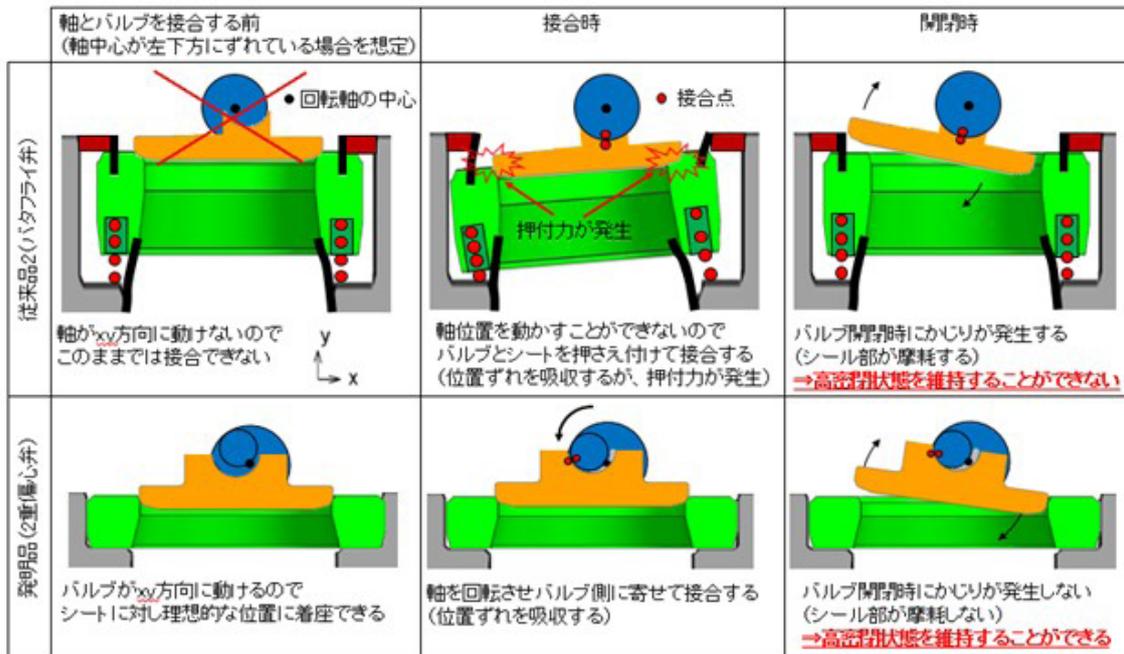
#### <特徴2> 優れた耐久性能と簡素な構造

従来品2（図3下）のバタフライ弁は、各構成部品の寸法ばらつきを、①弁座のフローティング構造、②バネによるシール部の押付によって吸収しようとしていた。しかしこの構造では、新品当初はシール性を確保できるが、バルブ開閉時に必ず弁体と弁座の接触圧力が高くなり、局部的に溶着する現象（いわゆる、かじり）が発生する為、シール部が摩耗し、高密閉状態を維持することができない。（図5上）

一方、今回発明技術の二重偏心弁は、各構成部品のばらつきを、①偏心軸構造、②シャフト～バルブ間の隙間を活用して組付け段階で吸収する構造を取っている。このため、バルブ開閉時に「かじり」は発生しない為、密閉性は新品当初のレベルを保つことができる。（図5下）

また、バルブ周りの構成部品点数を比較しても、従来品2の8点に対し発明品は4点と半減している。

図5 発明品と従来技術との構造比較



### 受賞実績

- 令和2年度 愛知発明表彰 愛知発明賞  
(一般社団法人 愛知県発明協会)
- 中部地方発明表彰 発明奨励賞  
(公益社団法人 発明協会)
- 令和4年度 中部科学技術センター顕彰 奨励賞  
(公益財団法人 中部科学技術センター)
- 令和6年度 科学技術分野の文部科学大臣表彰 科学技術賞  
(開発部門) (文部科学省)



