ISSN 2761-1159

オリジン テクニカル ジャーナル

November 2026
No.89



株式会社 オリジン

目　次

ORIGIN Technology Topics and the Future　*ii*

▶論　文

レーザーダイオード駆動用短パルス大電流電源の開発
下田　悠太・飯島　瑞樹
松月　　豊・増田　　正　*1*

樹脂製トルクヒンジ機構の開発　根岸　幸雄・茂　　達也　*9*

姿勢補正機能及びギャップ制御を搭載したレンズ接合装置の開発
福本　勇樹・小梶　英之　*15*

ギ酸銅を用いたMOCVD法による銅膜形成プロセスの開発
竹内奈々美・小澤　直人　*22*

耐薬品性に優れる環境配慮型高輝度金属調塗料「エコネットFX-2」の開発
村山　亮太・谷島　　徹　*29*

ORIGIN TECHNICAL JOURNAL
No.89 November 2026

Contents

ORIGIN Technology Topics and the Future ii

Articles

DEVELOPMENT OF SHORT-PULSE HIGH-CURRENT POWER SUPPLY FOR DRIVING LASER DIODES
Yuta SHIMODA, Mizuki IIJIMA, Yutaka MATSUZUKI and Tadashi MASUDA 1

DEVELOPMENT OF THE RESIN-BASED TORQUE HINGE
Yukio NEGISHI and Tatsuya SHIGE 9

DEVELOPMENT OF A LENS BONDING SYSTEM EQUIPPED WITH ATTITUDE CORRECTION FUNCTION AND GAP CONTROL
Yuki FUKUMOTO and Hideyuki KOKAJI 15

DEVELOPMENT OF A COPPER FILM DEPOSITION PROCESS VIA MOCVD USING COPPER FORMATE
Nanami TAKEUCHI and Naoto OZAWA 22

DEVELOPMENT OF "ECONET FX-2," AN ENVIRONMENTALLY FRIENDLY, HIGH-BRIGHTNESS METALLIC PAINT WITH EXCELLENT CHEMICAL RESISTANCE.
Ryota MURAYAMA and Toru YAJIMA 29

ORIGIN Technology Topics and the Future

オリジンは，技術を主体とした製品の開発とお客様への価値提供をテーマに，新たな技術の探索と新規事業の創出を進めています。この目標を実現するための各事業領域の最新技術と，さらなる躍進を見据えた今後の展望を【Technology Topics and the Future】と題した特集記事で紹介します

エレクトロニクス事業

エレクトロニクス事業部は，急成長を続ける半導体業界の微細化・高度化ニーズに応えるため，独自の強みを持つ「電源部門」と「システム部門」の技術力を集結し，次世代のイノベーションを牽引しています。

電源部門では，生成 AI の普及に伴い需要が急増している最先端半導体の製造・検査プロセスに貢献していきます。市場要求である「生産性向上」「微細加工」「負荷軽減と長寿命化」に対し，独自の高電圧技術にて応えていきます。

具体的には，露光装置向けの高繰り返し電源，SEM（走査電子顕微鏡）をはじめとする検査装置向けの超高精度・高電圧電源，成膜装置用のスパッタリング電源の開発に注力します。回路のさらなる微細化に対応する安定した電源技術を確立し，装置の進化を足元から支えていきます。

システム部門では，AI チップやデータセンターの超高速化・省電力化の鍵を握る先端パッケージ技術（「CoWoS」等）に向け，ウェハプロセス専用のギ酸還元真空リフロー炉「MPW シリーズ」の開発を推進しています。

パワー半導体向けで定評のある「MPX シリーズ」の特長であるギ酸を用いた還元処理と，ボイド低減に有効な真空プロセスを組み合わせたリフロー炉です。さらに，積層構造ウェハ特有の課題である「反り」に対して，独自の特許技術である「IR ヒーター＋水冷方式の一体構造」や「ウェハ用リフトピン」を導入。ウェハを移動させない同一チャンバー内での一貫処理による，高度な非接触・均熱加熱を実現しました。

現在はさらなる進化に向け，より高速な応答性と均熱性を両立する温度制御技術の確立を狙い，次世代半導体の製造プロセスに向けた試作開発を推進しております。

当事業部はこれら両部門の最先端技術を結集・融合させ，高度化する半導体市場の期待に応える製品を提供し続けてまいります。



半導体成膜（スパッタリング）用電源 GEXUS 外観写真



ギ酸還元真空リフロー炉「MPX3」外観写真

コンポーネント事業

コンポーネント事業部では，複写機・プリンタ・ATM などの事務機器や金融機器における印刷紙フィード機構や重送防止機構として，ワンウェイクラッチやトルクリミッタを開発・製品化し，幅広いニーズに展開を図っておりますが，昨今のペーパーレス化やキャッシュレス化の潮流により，これら市場のニーズは縮小していくことが予想されております。

一方で自動車をはじめとするモビリティ市場や住宅設備市場では，キャビンスペースや居住スペースにおけるユーティリティの電動化が顕著に進み，快適性追求のため，各所ドアやモニタなどの動作安定化・定位置保持・安全性確保に寄与する精密機構部品の需要が高まっております。

このような時勢において，これまで培ったトライボロジ技術をベースとして，モビリティ市場や住宅設備市場などの成長分野に向けた摩擦ブレーキ機構や切り替えクラッチ機構の開発を推進しております。

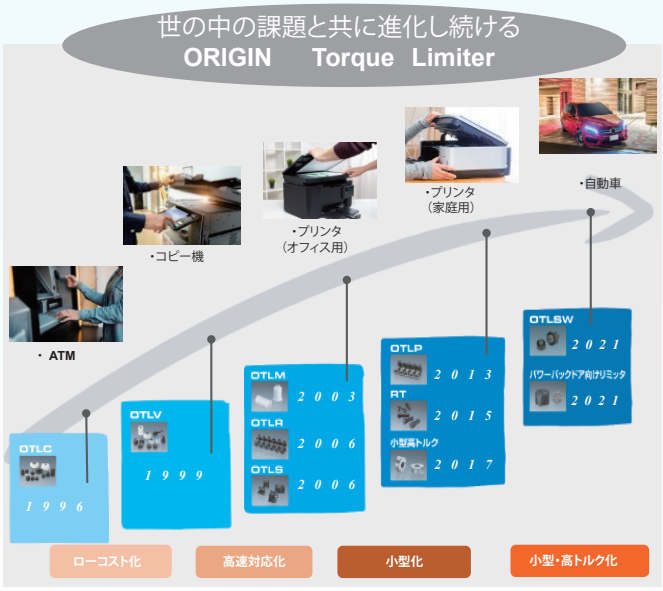
これら用途で使用される機構部品には，居住空間の快適性や安全性を確保するため，静音性や耐寒・耐熱性，更に，高負荷長寿命など高い性能・品質が要求されています。こうした市場ニーズに対応するため，軽量高強度摺動材料の探究やグリースレス摩擦技術の検討などトライボロジに関するコア技術の深化に努めると共に，品質安定化に向けた生産の自動化に注力しています。

また，中長期の事業継承に向けた業容拡大にあたり，新たなコア技術の獲得や従来の精密機構部品技術にセンシング技術や動作制御技術を組み合わせた複合モジュール化製品の検討を進めております。

新たなコア技術獲得については，食品検査機器市場向けに微生物の有無を高精度・短時間で判定することが可能なセンサの研究を進めるとともに，住宅設備市場・医療機器市場向けに調光フィルム駆動用電源や高圧電源用フィルムコンデンサの開発・商品化を展開しております。

複合モジュール化製品の展開については，精密機構部品技術にモータ制御技術や装置設計技術を取り入れ，静音化やメンテナンス性向上を図った食品検体粉砕装置（ホモジナイザ）の開発も進めております。

当事業部は，精密機構部品事業における性能向上や新機能追求，また，新たなコア技術獲得による複合モジュール化事業を推進し，社会が求める新たなニーズに対応できる存在となるべく邁進して参ります。





食品検体粉砕装置（ホモジナイザー）

ケミトロニクス事業

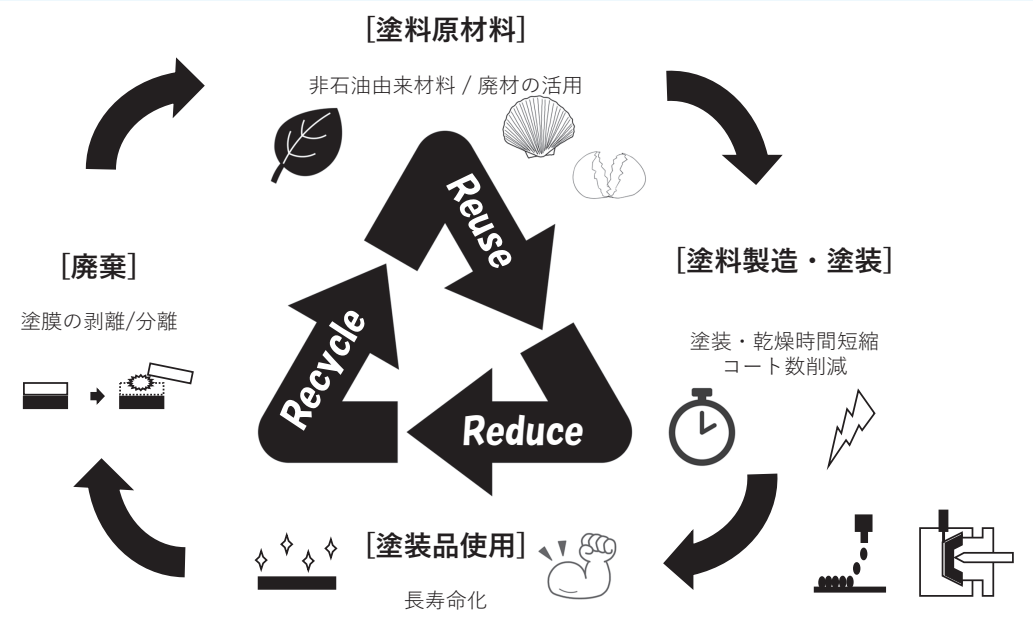
ケミトロニクス事業部では，長年にわたり各種プラスチック基材や難付着基材である金属・めっき素材に対して優れた密着性を有し，表面保護，美観を与え，新たな機能を付与した「塗料」と「コーティング剤」を開発してきました。顧客が要求する性能や意匠，また基材や塗装工法に適した塗料性状にカスタマイズすることで，当社製品は自動車内外装部品や家電製品，建材 / 住宅設備などに広く使用されております。

近年，環境配慮や地政学的リスクの顕在化により，製造業を取り巻く環境は変化しており，これまで以上に脱炭素社会の実現に向けた環境負荷低減やサステナビリティへの貢献が求められています。

こうした課題に対し，当社は，製品のライフサイクル全体を見据え，3R を意識した環境配慮製品の開発を進めております。すでに，非石油由来材料や廃材を用いた Reuse 型塗料，塗装時間や塗装後の強制乾燥時間を短縮できる Reduce 型塗料を製品化しています。昨年には，金属への付着と意匠外観を 1 コートで両立したことで工程短縮に寄与できる Mg 基材向け塗料「エコネット MG」を上市し，ラインナップを拡充しています。その他にも，防汚機能付与や塗膜の強靭化により塗装品を長寿命化できる塗料，基材から塗膜を剥離することで基材リサイクルに寄与できる Recycle 型塗料・剥離剤，画期的な加飾方法として実用化が進んでいる型内塗装やインクジェット塗装に対応した塗料の開発にも取り組んでおります。

加えて，これまで塗料やコーティング剤開発で培ってきた技術や知識を応用し，次世代の成長産業に向けた新素材の開発として，ペロブスカイト型太陽光発電用材料や機能性ナノ粒子材料等，塗料以外の製品開発にも挑戦しています。

当社製品をご採用されるお客様にサステナビリティへの貢献や環境価値向上を実感していただくことを目指し，製品開発を進めて参ります。



レーザーダイオード駆動用 短パルス大電流電源の開発

DEVELOPMENT OF SHORT-PULSE HIGH-CURRENT POWER SUPPLY FOR DRIVING LASER DIODES

下田　悠太・飯島　瑞樹・松月　　豊・増田　　正

Yuta SHIMODA, Mizuki IIJIMA, Yutaka MATSUZUKI and Tadashi MASUDA

高出力パルスレーザーダイオードの直接駆動を目的とし，LTD（Linear Transformer Driver）回路技術を用いた短パルス大電流電源を開発した 。加工や環境モニタリング分野で求められる，急峻な立ち上がりと高速繰返し動作を実現するため，次世代高性能 MOSFET と低インピーダンス回路モジュールを組み合わせた半導体パルス電源を設計した 。配線レイアウトの最適化により寄生インダクタンスを極限まで抑制し，一次試作機において，パルス幅 400ns，繰返し周波数 10kHz の条件で出力電流 1,003Apeak を達成し，目標である 1,000A をクリアした。

To directly drive high-power pulsed laser diodes, a short-pulse, high-current power supply was developed using Linear Transformer Driver (LTD) circuit technology. To achieve the steep rise time and high repetition rate required in laser machining and environmental monitoring applications, a solid-state pulse power supply was designed by combining next-generation high-performance MOSFETs with low-impedance circuit modules. By optimizing the wiring layout to minimize parasitic inductance, the initial prototype achieved a peak output current of 1,003 A at a pulse width of 400 ns and a repetition frequency of 10 kHz, successfully meeting the 1,000 A target.

1．まえがき

近年のレーザーダイオード（LD）技術における高出力化と高効率化の進展は目覚ましく，従来，固体レーザーやガスレーザーが担ってきた高ピーク出力パルスレーザーの領域を，LD の直接駆動方式によって代替することが可能となりつつある。この直接駆動型パルス LD システムを実現するためには，LD チップのポテンシャルを最大限に引き出す，急峻な立ち上がり特性を持つ大電流パルス電源の実現が不可欠となっている。

特に加工用途のレーザーを出力するパルス電源においては，あらゆる材料への加工性と熱影響の低減を両立するために，大電流かつ短いパルス幅の出力特性が強く求められている。具体的には数 kA クラスの大電流かつ，数百 ns 程度の短いパルス幅に加え，加工効率を考慮した場合，10kHz 以上の高速繰返し動作の実現が必要とされている[(1)]。このような機能によって実現した直接駆動型パルス LD は，一般的な固体レーザーやガスレーザーと比べ，エネルギー効率に極めて優れ，装置の小型化，軽量化にも貢献する。また，レーザーの出力やパルスパラメーターの制御性に優れ，産業分野における加工精度や処理速度の向上にも寄与することから，社会的意義も大きい。

これらの用途に要求される，大電流かつ急峻な立ち上がりの短パルス電流を駆動するために，複数の低インピーダンス回路をモジュールとして組み合わせることで，高速スイッチングを実現しながら大電流パルスを発生する LTD（Linear Transformer Driver）回路技術[(2) (3) (4)]と，高速スイッチングが可能な次世代高性能 MOSFET を活用した半導体パルス電源の設計・開発に取り組んだ。開発にあたり，株式会社パルスパワー技術研究所からは技術提携により LTD 回

路技術の提供を受け，回路と負荷との間の接続回路や配線レイアウトの見直し，LD 素子のマウント方法等について独自に開発を行った。

本稿では，試作機の開発にあたり，検討した技術課題の解説と，試作結果を報告する。また，第 6 節では，今後取り組むべき，さらなる出力向上を目指した二次試作の構想と，加工用途以外の環境モニタリング分野等の用途を展望する。

2．回路構成と機能

2.1　主回路構成

今回開発した短パルス電源は，複数の MOSFET とコンデンサを組み合わせた LTD 基板を主回路としており，信号発生器からの周波数・パルス幅設定に連動して 1,000A 以上の大電流パルスを生成する。LD 実装基板，LTD 基板，高調波対策のためのノイズカットトランス，保護用ダイオード，直流電源との組み合わせで構成される。回路全体の配線長を極力短縮し，またインダクタンス成分の均等化を実現することでパルス波形安定性と，MOSFET に流れる電流バランスを確保している。**図 1** に電源総合ブロック図を示す。

2.2　LTD 回路

LTD 回路は，主に高エネルギー物理学や加速器技術の分野で発展してきた技術であり，短い時間幅の大電流パルスを発生させることを目指して設計された回路構造である。一般的な等価回路を**図 2** に示す[(5) (6)]。その基本的な動作原理は，複数の素子を並列に接続した低インピーダンスのパルスモジュールをさらに複数段直列に接続し，各モジュールが同期して動作することで，全体として高精度かつ高出力のパルスを生成する点にある（**図 3**）。この構造により，従来の回路では困難であった超高速・大電流のパルス動作を効率的かつ安定して実現することが可能となる。

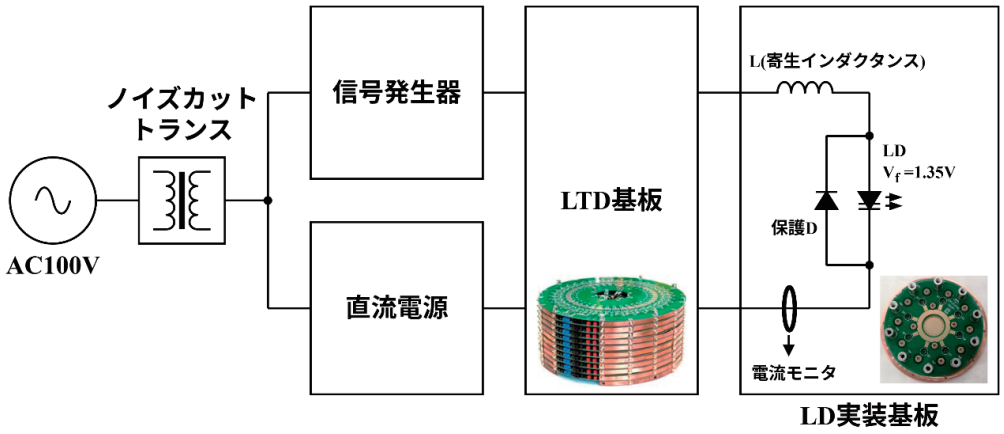


図 1　電源総合ブロック図
Overall Power Supply Block Diagram

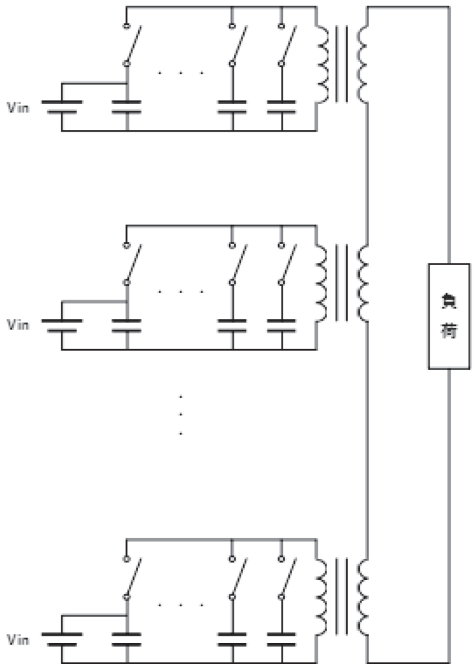


図２　LTD（Linear Transformer Driver）等価回路
Equivalent Circuit of LTD (Linear Transformer Driver)

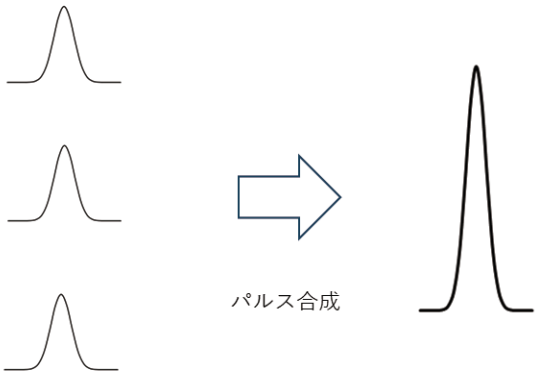


図３　パルスを合成し，高出力のパルスを生成
High-Power Pulse Generation by Pulse Combining

また，この回路は，各モジュールが独立した構成を持つため，動作の制御や出力の調整が柔軟であり，応用先に応じて設計を容易にカスタマイズできる特徴を備えている。さらに，コンパクトな設計が可能でありながら，大容量出力を実現できる点も大きな利点となる。そのため，近年では高出力レーザーダイオード駆動への応用が注目を集めており，加工用レーザーや環境モニタリング，センサー技術など，多様な分野への展開が期待される。

３．要 素 技 術

主な要素技術としては，下記が挙げられる。

(a)　信号発生器入力による繰返し周波数・パルス幅の設定
(b)　回路レイアウト最適化による寄生インダクタンス抑制
(c)　回路毎に寄生インダクタンスを揃えて電流バランス確保
(d)　実測ベースの寄生インダクタンス評価
(e)　大電流化に伴う基板・FET 等の抵抗成分影響の顕在化と，抵抗成分低減基板の検討
(f)　温度上昇の評価と冷却の設計課題
(g)　ns オーダー，kA オーダーの電流計測技術

(h)　ワイヤボンディング設計課題：
　　パルス電流による電磁力と，電流ピーク増加時の要検証事項

パルスパワー技術研究所との共同開発により，LTD 基板を用いた大電流・高速パルス生成の実現を試みた。**図 4** の左図の灰色部分がパルスパワー技術研究所の LTD 回路で，右図が LD 実装基板となる。今回製作した一次試作電源の外観を**図 5** に示す。中央の円形開口部よりレーザーが出力される構造ではあるが，写真では素子部保護のため，板金により閉塞されている。

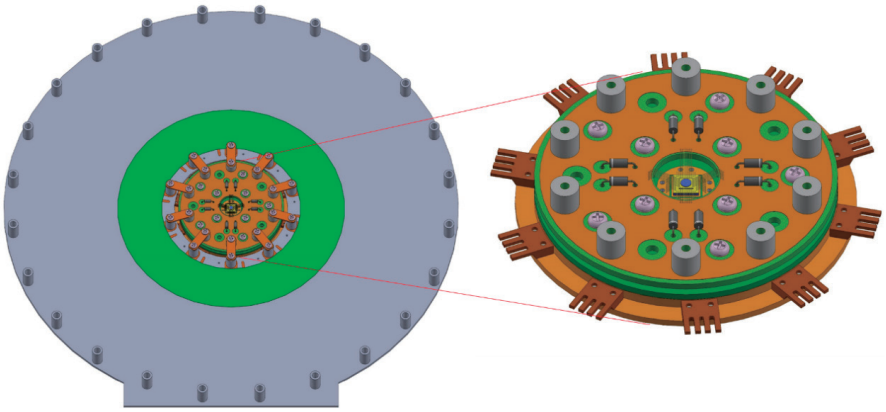


図 4　試作基板
Prototype Board

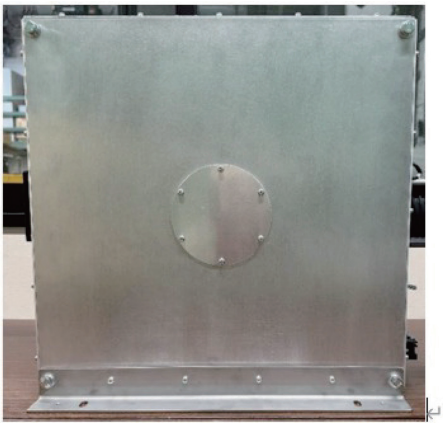


図 5　一次試作電源の外観
Exterior View of First Prototype

この内，本項においては，(b)回路レイアウト最適化による寄生インダクタンス抑制および，(h)ワイヤボンディング設計課題について，詳細を述べる。

3.1　回路レイアウト最適化による寄生インダクタンス抑制

目標とするピーク電流 1,000A，パルス幅 500ns 以下のパルス波形を実現するためには，初期の電流の立ち上がり勾配を 1×10^{10}A/s 程度にする必要がある。この時の電流勾配 (di/dt) と回路に必要とされる電圧 (V) には，回路の寄生インダクタンスを (L_P) とした時に，式 (1) に示す関係がある。電圧 (V) は回路に用いられるデバイスに制限され，現実的な値を取るとすれば，上記目標仕様の達成のために，回路の寄生インダクタンス (L_P) は極めて小さい値である必要がある。

$$V = L_P \cdot \frac{di}{dt} \qquad \cdots (1)$$

本稿の試作機の放電コンデンサに充電する最大電圧は，パルス OFF 時に回路に加算される電流遮断電圧も考慮して，350V 以下とする設計であり，式(1) より，スイッチング素子から負荷までの回路全体の寄生インダクタンスは 35nH 以下であることが求められる。

試作機の LTD 回路基板の出力端子までの寄生インダクタンスを差し引くと，基板の出力端子からダイオード素子までの配線はさらに小さな配線インダクタンスしか許容しない。このため，モジュールとして構成した LD デバイスへ電線や配線パターンを引き回して結線すること自体が現実的ではなくなる。そこで，試作機では LTD 基板内側の円周状に配置された出力端子に直接接続される LD 実装基板を構成し，この LD 実装基板に直接 LD 素子を実装し，多数のワイヤーボンディングにより結線する方法を採用した(図 4)。LD 実装基板は，LD 素子がダイボンディングされる面を銅板として，導電と放熱を兼ねている。またもう一方の面は銅張のガラスエポキシ基板とした。両導電面間には，LD 素子保護用のダイオードを電流が基板上で均一になるように 8 素子を円周状に配置した。

LD 実装基板を単純化したものとして，**図 6** に示すような，外周 D_{OUT}，内周 D_{IN} の中空導電円板を距離 d で平行に配置し，一方は外側から内側，もう一方は内側から外側に通電する回路を想定する。具体的には図 6 は図 4 の LD 実装基板のパターン層となり，D_{OUT}=85mm，D_{IN}=18mm となる。回路に構成されるインダクタンス L は，式(2)で表すことができる。ただし，μ_0 は真空の透磁率である。

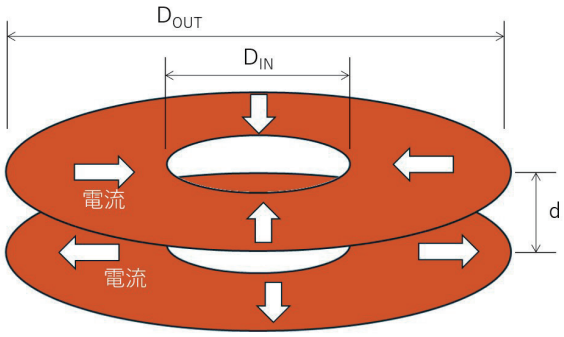


図 6　LD 実装基板構成回路の単純化モデル
Simplified Circuit Model of LD Mounted Board

$$L = \frac{\mu_0 d}{2\pi} \ln\left(\frac{D_{OUT}}{D_{IN}}\right) \quad \cdots (2)$$

本試作の図 6 単純化モデルにおける，LD 実装基板のワイヤーボンディング部と LD 素子を除く寄生インダクタンスは，式(2)により，約 2nH と見積もられている。

3.2　ワイヤボンディング設計課題

3.1 項で述べた通り，LD 実装基板上に配置した LD 素子の結線は，基板と LD 素子を直接ワイヤーボンディングにより接続している。LD 実装基板の上面のガラエポ基板は，絶縁のための厚さと，LD 素子ダイボンディングのための空間確保のために，LD 素子からは距離があり，基板と LD 素子の間のワイヤーボンディングのワイヤー長を大きく取らざるを得ない。このため，1,000A の電流を流した時，電流の作る磁界とワイヤ自身の電流によるローレンツ力により，ワイヤーループが振動し，最悪の場合，周辺の部材と接触し短絡に至る懸念があった。

そこで，ワイヤーボンディングのループに，絶縁性の高い RTV 樹脂を充填しワイヤーの変形を抑制することで，電流，振動，疲労断線によるワイヤーの短絡を防止する構造とした(**図 7**)。この結果，1,000A の実仕様において短絡や断線等の事象の発生を防止できた。

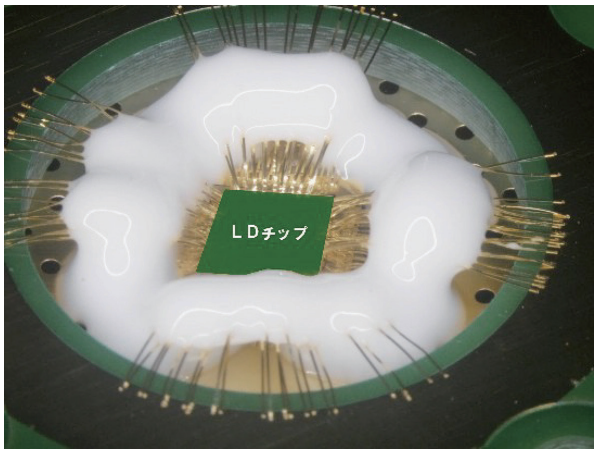


図７　ワイヤーボンディングの RTV 樹脂による固定
Fixing Wire Bonds with RTV Resin

４．実験方法及び結果

一次試作では，波形形状は DC パルスとし，周波数は 1～10kHz，パルス幅は約 400ns，電流目標は 900～1,000Apeak 級として検討･試験を行った。評価は，LD 素子，および同等のインピーダンス特性を持つダミー抵抗の両方で行い，両者が同等の結果となることを確認した。電流値はダミー抵抗の電圧および，直近に設置した電流プローブの比較により，いずれの測定方法でも同等の値であることを確認した。

電流波形の確認の結果，パルス幅 400ns，繰り返し 10kHz の条件で出力電流 1,003Apeak（一次試作目標：1,000A/500ns）を確認し目標を達成した（**表 1**，**図 8**）。この時，電流の立ち上がり波形及び式（1）より，回路のインダクタンス成分は，約 33nH であることが確認できる。

また連続動作試験においては，サーモグラフィーカメラによる LD 素子および，回路基板上の素子の温度上昇評価を行ったところ，10kHz 動作時に最大で素子の温度が約 80℃まで上昇し飽和したため，LD 素子およびパルス発生回路の連続動作における温度上昇が規定範囲内であることを確認した。

表 1　一次試作機の仕様目標と実験結果
Target Specifications and Experimental Results of First Prototype

	一次試作目標値	実験結果
波形形状	DC パルス	図 8 参照
出力電流	1,000Apeak	1,003Apeak
パルス幅	500ns 以下	400ns
繰返し周波数	1～10kHz	10kHz にて，規定温度内で動作

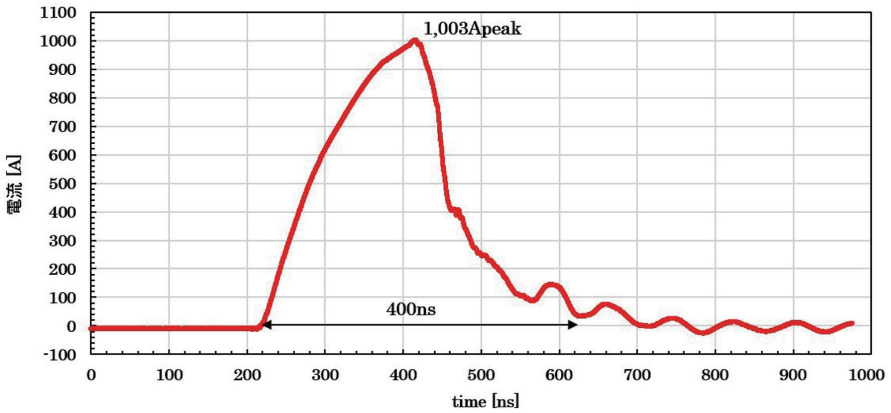


図８　出力電流測定波形
Measured Waveform

5．大電流化への対応

今後は，更なる大電流化として一次試作で達成した 1,000Apeak，1～10kHz の仕様からの大出力化を進め，電流 10,000Apeak，周波数 100kHz 級を目標に検討する。10,000A 級を考慮して構造を平面から立体的へ発展させ，回路モジュールの増加と低インダクタンスを両立させる。さらに電流増加で顕在化した基板・MOSFET の抵抗成分の低減を目的とした，基板レイアウトと素子選定を検討する。また，LD 基板の冷却など冷却技術の適用も進める。一次試作の結果と比較した二次試作の目標仕様を**表 2** に，構想中の二次試作の立体構造図を**図 9** に，それぞれ示す。

表 2　二次試作機の仕様目標
Target Specifications of Second Prototype

	一次試作 実績値	二次試作 目標値
波形形状	DC パルス	DC パルス
出力電流	1,003Apeak	10,000Apeak
パルス幅	400ns	TBD
繰返し周波数	10kHz	100kHz

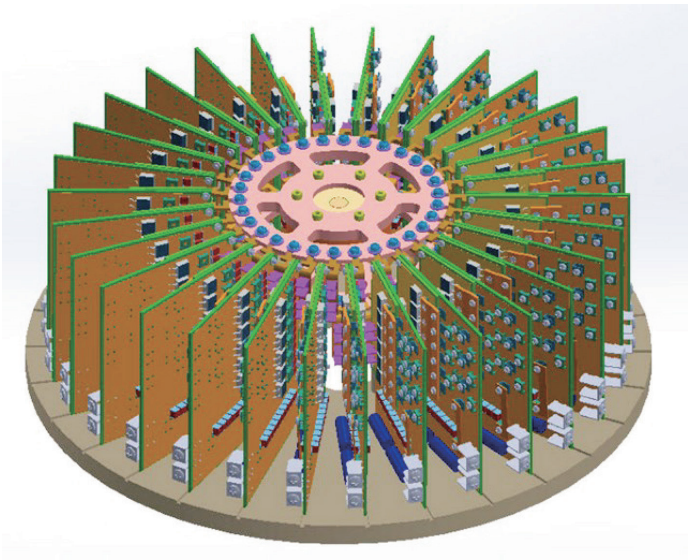


図 9　二次試作機の立体構造図
3D Structure of Second Prototype

6．む　す　び

本研究では，高出力パルスレーザーダイオードの駆動に資する大電流・高速パルス電源の構築手法を確立した。一次試作の結果，周波数 10kHz，パルス幅 400ns の条件下においてピーク電流 1,003A を確認し，当初の目標（1,000A / 500ns）を達成することができた。また，連続動作時の LD 温度が約 80℃で飽和することを明らかにし，熱設計における重要な知見を得るに至った。

開発した LD の直接駆動によるパルスレーザー技術は加工用途だけに留まらず，その特徴を活かして環境モニタリング分野への応用可能性も有している。高出力レーザーパルスを用いることで，特定の分子に対する吸収特性を高精度に測定できるほか，大気中の微量成分の分析などにも寄与するものと期待される。

研究の成果は，LD のより高効率かつ高精度な駆動を可能にするだけでなく，産業から環境モニタリング分野まで幅広い応用が期待される。本研究を通じて得られた知見を基に，さらに LTD 回路の設計や信頼性向上を目指し，今後も研究を推進していく。

今回の開発にあたっては，株式会社パルスパワー技術研究所との共同開発により，既存のLTD基板に関する知見や設計を有効に活用したことで，短期間での試作・評価を実現した。今後は，本研究で得られた設計指針の妥当性を基盤とし，さらなる回路の最適化や実装技術の高度化を推進する。次期開発においては，10,000A級の大電流化や100kHzの高繰り返し化といった，より高負荷な仕様に対する本技術の有効性を実証し，次世代デバイスへの適用を目指す。

末筆ながら，本研究の遂行にあたり多大なるご支援とご協力をいただいた株式会社パルスパワー技術研究所の皆様，ならびにご指導をいただいた関係各位に，厚く御礼申し上げる。

参考文献

(1) M. Traub,et al.: Novel high peak current pulsed diode laser sources for direct material processing, Proc. of SPIE Vol. 6456, p. 64560J, 2007
(2) W. Jiang.: Solid-State LTD Module Using Power MOSFETs, IEEE Trans. Plasma Sci., vol. 38, no. 10, pp. 2730–2733, Jul. 2010.
(3) W. Jiang,et al.: Pulsed power generation by solid-state LTD, IEEE Trans. Plasma Sci., vol. 42, no. 11,pp. 3603–3608, Nov. 2014.
(4) M. R. Kazemi,et al.: Waveform control of pulsed-power generator based on solid-state LTD," IEEE Trans. Plasma Sci., vol. 45, no. 2, pp. 247–251, Feb. 2017.
(5) パルスパワー技術研究所：半導体LTD高電圧パルス電源（スマートパルスパワー電源）. https://www.myppj.com/products/半導体ltd高電圧パルス電源ｽﾏｰﾄﾊﾟﾙｽﾊﾟ.html,（参照 2026-07-01）
(6) 江偉華ほか：Linear Transformer Driver を用いた波形重畳型パルスパワー発生方法とその応用，プラズマ・核融合学会誌，Vol.94，No.4，192-196（2018）

◇◇

下田　悠太

エレクトロニクス事業部
2014年入社，主に高電圧電源の開発に従事。

飯島　瑞樹

エレクトロニクス事業部
2023年入社，主に高電圧電源の開発に従事。

松月　　豊

経営企画本部
2001年入社，主に開発戦略，製品企画に従事。

増田　　正

エレクトロニクス事業部
1995年入社，主に高電圧電源の開発に従事。

樹脂製トルクヒンジ機構の開発

DEVELOPMENT OF THE RESIN-BASED TORQUE HINGE

根岸　幸雄・茂　　達也

Yukio NEGISHI and Tatsuya SHIGE

事務機器（プリンタ）液晶パネルの開閉機構として樹脂製トルクヒンジの開発に取り組んだ。開発品は，当社現有のトルクリミッタや ヒンジと比較し部品点数が少ない簡素機構を採用し，更にグリースレス化や再生樹脂材料の積極利用を図った環境配慮型製品となっている。開発品の性能評価では，ゼロバックラッシ特性や高温高湿度環境・ヒートサイクル条件への耐性，また，繰り返し動作に対する耐久性を確認し，市場ニーズを満足する結果が得られている。当面は事務機器（プリンタ）用の開閉ヒンジとして適用されるが，当社としてはモビリティ内装機器を含む幅広い用途への展開に向けて，対応温度範囲の拡大や多機能化に向けた研究を継続している。

We developed a resin-based torque hinge to serve as the opening and closing mechanism for LCD panels in office equipment (printers). The developed product features a simplified mechanism with fewer parts compared to our company's existing torque limiters and hinges; furthermore, it is an environmentally friendly product designed to be grease-free and to make active use of recycled plastic materials. Performance evaluations of the developed product confirmed its zero-backlash characteristics, resistance to high-temperature and high-humidity environments and thermal cycling conditions, as well as durability under repeated operation, yielding results that meet market needs. While it will initially be applied as an opening/closing hinge for office equipment (printers), we are continuing research to expand the operating temperature range and incorporate additional functions, with the aim of expanding its application to a wide range of uses, including automotive interior components.

1．まえがき

事務機器（プリンタ）市場では，液晶パネル開閉機構として一般に，樹脂製リングとシャフトの嵌合によるヒンジ機構が用いられているが，各社にてヒンジ負荷のバラツキや繰り返し使用における変動への対処に苦慮している。

当社では，事務機器市場におけるこれらの課題を解決するため，樹脂製の簡素機構かつグリースレスでありながら，負荷トルクのバラツキや変動の小さい樹脂ヒンジ機構の開発・商品化に取り組んだ。開発したヒンジ機構は，当社独自の樹脂バネ構造により組付け後のトルク調整が不要で，繰り返し動作や高温・高湿度放置における負荷変動の低減（安定化）を実現している。さらに，再生樹脂材料を積極的に利用した環境配慮型製品となっている。

前報[(1)]では，シミュレーション手法を用いて樹脂製トルクリミッタの最適設計を行った。本稿では，このトルクリミッタの技術を展開して開発したトルクヒンジの構造及び各種試験に基づく性能評価結果について報告する。

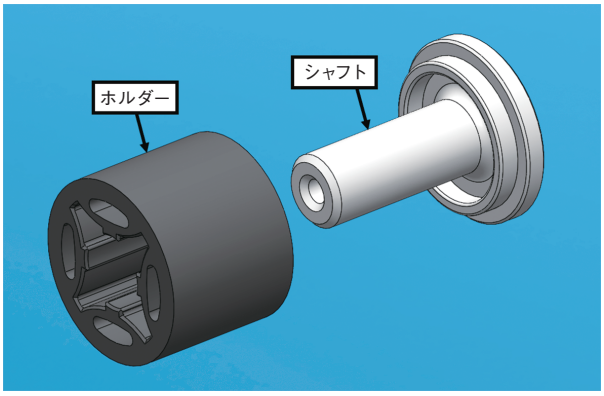


図１　開発品の構成
Prototype Components

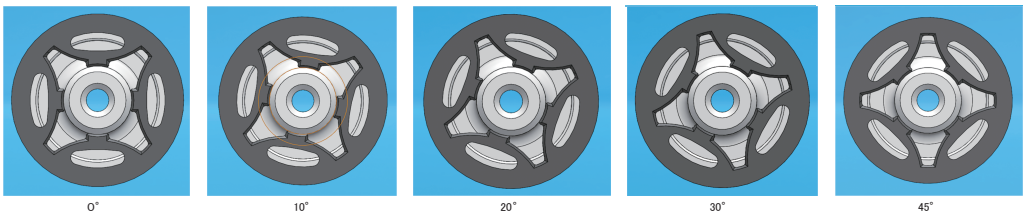


図２　開発品の角度保持および回転動作イメージ
Operation Image: Angle Retention and Rotation of the Prototype

２．開発品の概要

2.1　構成・機能

開発品の構成を**図１**に示す。開発品は，内径部にバネ構造が成形された樹脂製のホルダ部材に樹脂製のシャフト部材を圧入嵌合した構成となっている。

なお，互いに摩擦摺動する上述２部品は，繰り返し動作における負荷トルクの安定化に優れた樹脂材料を選定しているため，摩耗を抑制するグリース等の潤滑剤を必要としない。

組付けられた機構は，**図２**に示したとおり，時計方向・反時計方向共に一定負荷トルクにて任意角度での保持が可能なヒンジ機構となる。

2.2　原　理

開発品の負荷トルク発生原理を**図３**に示す。開発品は，圧入嵌合されたシャフト部材の外径部がホルダ部材内径部に形成されたバネ構造部からの反力を受け，この圧入反力が垂直抗力となり両部品間の回転摩擦トルクを得る機構となっている。

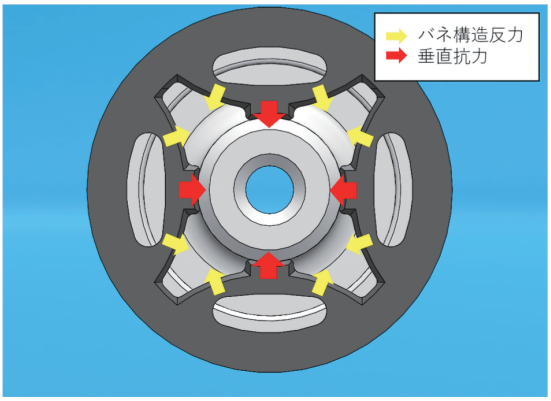


図３　負荷トルク発生原理
Torque Generation Principle

図 4 に，シャフト部材のシャフト径（圧入嵌合シメシロ）と負荷トルク値の関係に関する実験結果を示す。本実験では，ホルダ部材の内径を一定とし，シャフト径を変更することでシメシロを制御した。シャフト径がある一定の領域まではシャフト径と負荷トルク値がほぼ比例関係にあり，シャフト径が過大になりシメシロが過剰となるとホルダ部材の塑性降伏により負荷トルク値は飽和（横ばい）傾向を示す。

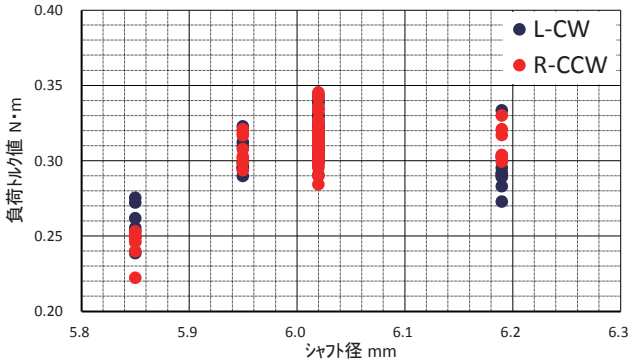
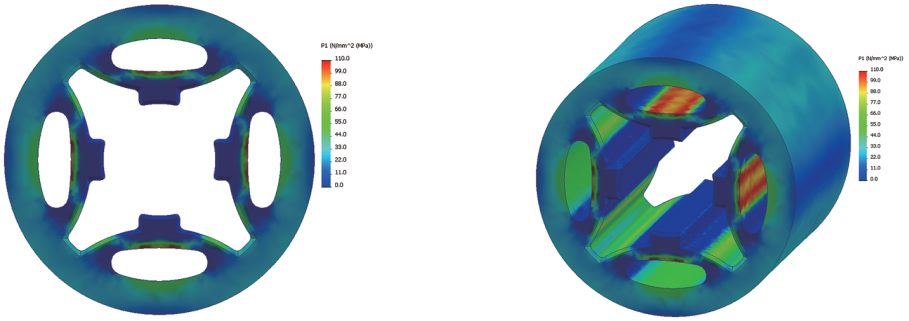


図４　シャフト径と負荷トルクの関係
Load Torque vs. Shaft Diameter

開発品は，シメシロと負荷トルク値の関係が比例関係の領域を設計値とし，更に，クリープ破壊等のリスク回避のため，シミュレーション（**図 5**）により圧入嵌合時のホルダ部材における応力最大箇所をあらかじめ把握し，その位置と成形時のウェルド位置が重ならないよう金型構造（ゲート設定）を最適化している。



（a）正面図　　（b）斜視図

図５　圧入嵌合時の応力分布
Stress Distribution During Press-Fit Assembly

2.3　製品仕様

開発品の負荷トルク設定値は 0.24N･m であり，この場合，機能部のサイズは，外径 φ15.2mm･幅 12mm となる。また，作動耐久性として 90deg. 往復動作で 3,000 回の使用が可能で，高温放置として 70℃ × 360 時間，高温高湿度として 50℃ /95% RH × 360 時間を設定している。

３．開発品の性能

本章では，開発品の初期性能および各種環境・作動耐久試験における性能評価結果について述べる。なお，いずれの環境耐久試験および作動耐久試験においても，市場要求に基づく性能判定基準として，試験前後における負荷トルク変動率が ±40% 以内であり，かつクラック等の外観異常が発生しないことを合格条件とした。

3.1　負荷トルク値のバラツキ

図 6 に開発品組付け直後の負荷トルク値バラツキ検証データを示す。金型成形した部品から無作為に抽出した 30 セットを組付け，無調整の状態でトルク測定器にて計測した結果である。**表 1** にその統計データを示す。市場要求の負荷トルク範囲 0.24N･m ± 30% に対する工程能力指数は，CW（時計回り）方向で Cpk=1.70，CCW（反時計回り）方向で Cpk = 1.90 であり，ともに要求基準（Cpk ≧ 1.33）を上回る数値を得た。これにより，優れた品質安定性をもって量産対応が可能であることを確認した。

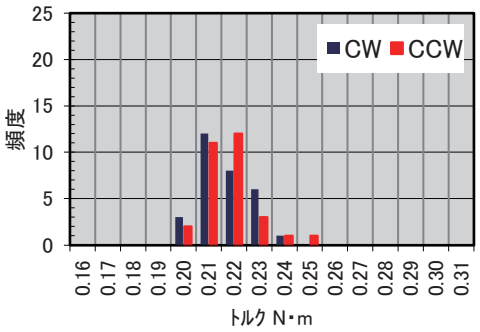


図 6　負荷トルク値のバラツキ
Variation in Load Torque

表 1　トルク値の統計データ
Statistical Summary of Load Torque Values

		CW	CCW
母集団数		30 個	30 個
最大値		0.245 N・m	0.252 N・m
最小値		0.205 N・m	0.209 N・m
平均値		0.222 N・m	0.222 N・m
標準偏差		0.011	0.010
ノミナル値		0.24　N・m	0.24　N・m
Cpk	± 20%	0.942	1.062
	± 25%	1.321	1.482
	± 30%	1.700	1.902
不良率	± 20%	0.47%	0.14%
	± 25%	0.01%	0.00%
	± 30%	0.00%	0.00%

3.2　高温放置に対する耐性

図 7 に高温放置（70℃ × 360 時間）前後での負荷トルク総変動を示す。負荷トルクが低下したものの，変動率が 12.8～15.9% と基準の ± 40% 以内に十分収まっており，クラック等の外観異常も生じていないため，開発品は市場（事務機器）要求の高温放置条件に対し耐性があるものと結論付けた。

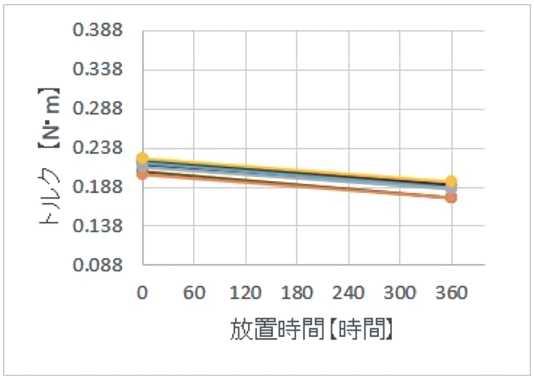


図 7　高温放置前後における負荷トルク変動
Load Torque Fluctuation Before and After High-Temperature Exposure

3.3　高温・高湿度放置に対する耐性

図 8 に高温・高湿度放置（50℃ /95% RH × 360 時間）前後での負荷トルク変動を示す。負荷トルク変動率が 9.2% 程度と基準の ± 40% 以内に十分収まっており，クラック等の外観異常も生じていないため，開発品は市場（事務機器）要求の高温・高湿度放置条件に対し耐性があるものと結論付けた。

3.4　ヒートサイクルに対する耐性

図 9 にヒートサイクル放置（－25℃⇔ 70℃の繰り返し 10 回）前後での負荷トルク変動を示す。負荷トルク変動率が－0.5～4.1% と基準の ± 40% 以内に十分収まっており，クラック等の外観異常も生じていないため，開発品は市場（事務機器）要求のヒートサイクル放置条件に対し耐性があるものと結論付けた。

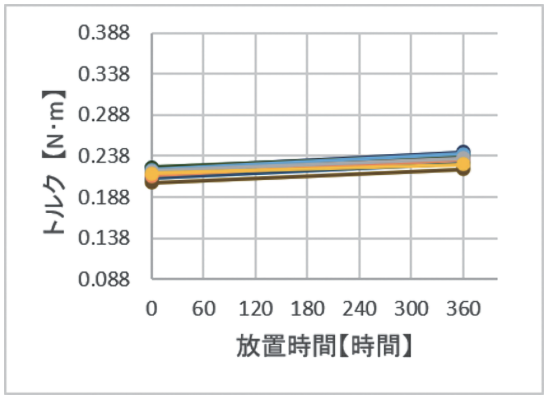


図8　高温・高湿度放置前後における負荷トルク変動
Load Torque Fluctuation Before and After High-Temperature/High-Humidity Exposure

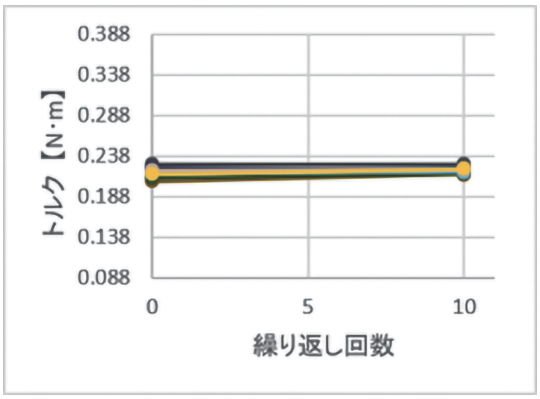


図9　ヒートサイクル放置前後における負荷トルク変動
Load Torque Fluctuation Before and After Thermal Cycling

3.5　作動耐久性

図 10 に作動耐久評価中の初期値に対する負荷トルク変動を示す。サイクル数の増加に伴い負荷トルクが上昇傾向を示すものの，変動率が 19.7% と基準の ± 40% 以内に十分収まっており，評価中に異常音や回転調子不良・クラック等の外観異常も発生していないため，開発品は市場（事務機器）要求の作動耐久性を満足できるものと結論付けた。

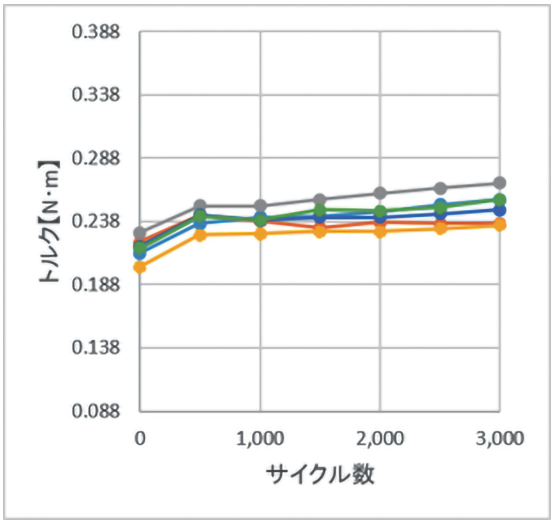


図10　サイクル数に対する負荷トルク変動
Load Torque Fluctuation vs. Number of Cycles

3.6　回転トルク特性

図 11 に回転トルク特性を示す。開発品は２部品構成のためバックラッシに起因するトルク発生までのタイムラグが無く，シームレスに応答する。したがって，市場（事務機器）要求である「任意の位置で操作パネルを保持すること」を満足できるものと結論付けた。

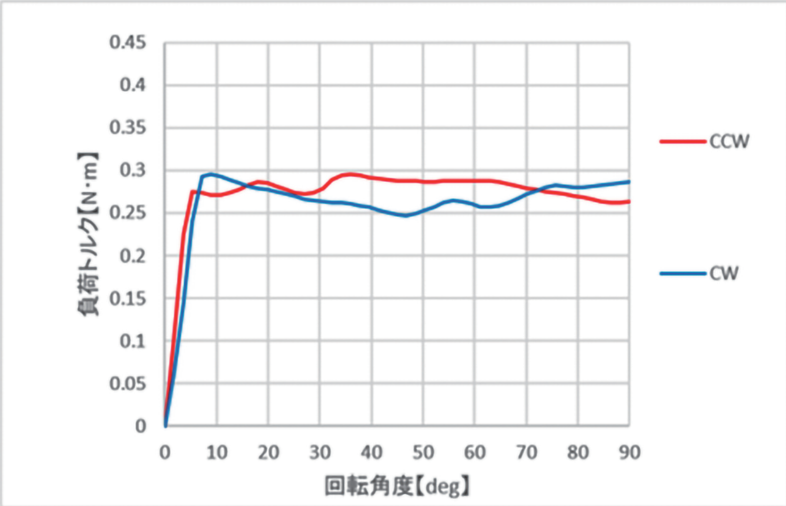


図11　回転トルク特性
Rotational Torque Characteristics

４．む　す　び

負荷トルク値のバラツキや変動の低減が可能な樹脂製トルクヒンジの開発・商品化に取り組んだ。開発品は，当面，事務機器プリンタの液晶パネル開閉機構に適用されるが，今後，開発品の使用温度範囲拡大や角度により負荷が変化するなどの多機能化に関する研究・開発を継続し，新たな市場や用途への提案を可能にしていきたい。

当社ではトライボロジをコア技術としてトルクリミッタやヒンジ機構の商品化を展開しているが，開発品は，樹脂－樹脂摩擦やグリースレス化等の新たな技術要素を取り入れた製品となっている。摩擦素材として樹脂－樹脂を選定し，更にグリースレスとする場合，今回の開発品より高負荷領域では摩耗や摩擦溶着等の障害があり，現在では対応が困難である。高負荷領域に対応可能な樹脂摩擦素材の発掘やグリースレス手段などの研究を推進し，環境負荷低減への貢献や当社コア技術の深化に努めたい。

参考文献

⑴　西村拓也ほか：シミュレーションを活用した低コストトルクリミッタの開発，オリジンテクニカルジャーナル，No.86（2023），p.Ⅱ7-11

◇◇

根岸　幸雄

コンポーネント事業部　技術開発部
1993 年入社，主にトルクリミッタやワンウェイクラッチの開発に従事。

茂　　達也

コンポーネント事業部　技術開発部
2014 年入社，主に精密機構部品の試作評価から量産化までを手掛ける。

姿勢補正機能及びギャップ制御を搭載したレンズ接合装置の開発

DEVELOPMENT OF A LENS BONDING SYSTEM EQUIPPED WITH ATTITUDE CORRECTION FUNCTION AND GAP CONTROL

福本　勇樹・小梶　英之

Yuki FUKUMOTO and Hideyuki KOKAJI

市場規模拡大が予見されるXRデバイスに使用されるレンズの接合を行うためのプロセスを備えた自動装置を開発した。曲面形状を持つレンズの搬送時に生じるチルト（姿勢）の不安定性を解消するため，レンズ最外周の平面部をレーザー変位計で測定し，姿勢を推定するアルゴリズムを構築した。検証の結果，測定円直径をφ30mm以上に設定することで，目標精度0.005°以下での姿勢補正が可能であることを確認できた。また，レンズ接合では接合後の厚みを一定にする必要がある一方で，レンズ成型時に厚みばらつきが発生する。これに対して接合後のレンズ中央厚みが一定になるようなギャップ制御を導入した。これらの機能を追加することでレンズ接合に対応した自動接合装置の実用化に成功した。

We have developed an automated system equipped with a process for bonding lenses used in XR devices, a market expected to grow. To resolve the instability in tilt (attitude) that occurs during the transport of curved lenses, we developed an algorithm that estimates the attitude by measuring the flat seating surface of the lens using a laser displacement sensor. We confirmed through verification that setting the measurement circle diameter to 30 mm or larger enables attitude correction with a target accuracy of 0.005° or less. Furthermore, while lens bonding requires a consistent thickness after bonding, thickness variations occur during lens molding. To address this, we introduced gap control to ensure that the central thickness of the bonded lens remains constant. By adding these features, we successfully commercialized an automated bonding system capable of handling lens bonding.

1．まえがき

XR（エクステンデッド・リアリティ）デバイスは，元々市場の主力であったゲーム業界から医療・製造・教育・航空宇宙などの各分野への応用により，市場規模のさらなる拡大が予見される[(1)]。なかでも利便性と実用性の高いMR（複合現実）デバイスは市場の牽引役になると見られている。

MRデバイスの前身であるVRデバイスに組み込まれるレンズの主流は一枚のみで構成される「フレネルレンズ」であったが，近年のMRデバイスではより高い解像度を得るために薄いレンズを多層化した構造が採用されるようになった。多層化によりレンズ内で光を往復させ，長い光路を稼ぐことで像の平坦性を高めることができ，周辺部までクッキリとした高い解像度を実現している。

レンズの多層化において，レンズ間には接着強度及び光学性能の観点からレンズと屈折率の近い液体タイプの接着剤を充填する。当社はタッチパネル対応ディスプレイの貼合装置を製造販売しておりフラットなワークの接合技術が蓄積されているが，レンズの接合になったことで二つの新たな課題が発生した。

一つ目はレンズの保持姿勢のばらつきである。本論における「姿勢」はディスプレイやレンズの傾きを示す。接合工程中のレンズの搬送にはレンズを傷つけないことと機構を複雑化させな

いという観点から吸着保持を採用しており，吸着領域の確保のために曲面を受ける形となっている。曲面を受けるため，理想の姿勢から傾いた状態でもレンズをセットできてしまい，**図 1** のように初期ステージで位置ずれしていると，以降のプロセスステージへの搬送後にも位置ずれが残ってしまい姿勢ばらつきの原因となる。そこで VR 用レンズが有するレンズ最外周の平面部を利用してレンズの姿勢を推定する。以降は前述した平面部を「座面」と表記する（**図 2**）。

二つ目は接合時のギャップ制御である。レンズは軽さと形状自由度の高さからプラスチック成型体が採用されるが，ロット違いによって多少の厚みばらつきが発生する。接合レンズは接合後の厚みばらつきが焦点位置や球面収差へ大きな影響を与えるため，光学的な品質を一定に保つためには接合後の厚みを一定にする必要がある。

本論では上記の二課題の対策機能について述べる。

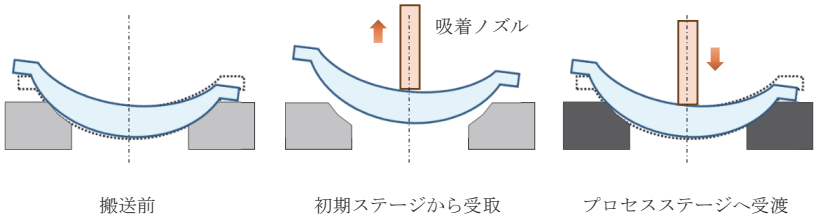


図 1　レンズ搬送時のずれ
Misalignment in Lens Transport

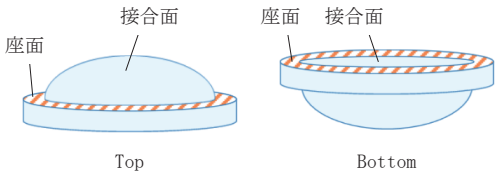


図 2　レンズ座面
Lens Seating Surface

2．装置構成とプロセスフロー

図 3 にレンズ接合のプロセスフローを示す。(a) の中央厚み測定はレーザー変位計をレンズ中央部の上下に挟み込むように配置して行う。(b) の位置補正はカメラにより Top/Bottom レンズの位置を検出し，両レンズの位置のずれを Bottom ステージに備わっている自動 XYθ 軸により補正動作を行う。(c) の姿勢補正はレーザー変位計により Top/Bottom レンズの姿勢を

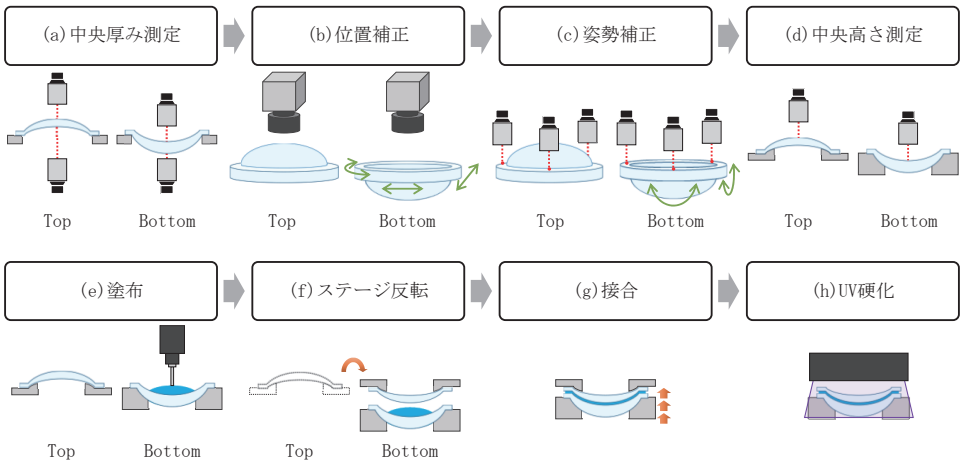


図 3　プロセスフロー
Process Flow

それぞれ推定し，両レンズの姿勢のずれを Bottom ステージが備える自動ゴニオステージにて補正動作を行う。(d) の中央高さ測定は Top/Bottom それぞれのステージ基準高さからレンズ中央の高さを測定する。ステージ基準高さとはステージの平面部における高さである。(e) の塗布は接着剤の塗布を行う。(f) のステージ反転は Top ステージが接合姿勢へ移動する。(g) の接合では Top ステージが反転した後に Bottom ステージが上昇しレンズ接合を行う。(h) の UV 硬化は紫外線を照射し，接着剤を硬化させることで接合したレンズ同士を固定する。

従来のフラットなワークのプロセスに対して，レンズの接合プロセスには接合後のレンズ中央厚みの制御のための (a) と姿勢制御のための (c) が追加されている。

3．姿勢補正機能

3.1　レンズの姿勢推定

姿勢の推定は，レーザー変位計 (以下，変位計) で測定した高さ座標 Z，及び変位計を備える XY 軸ロボットの XY 座標より行う。**図 4** に姿勢補正の計算フローを示す。



図4　姿勢補正の計算フロー
Calculation Flow for Attitude Correction

図 5 に示すように，レンズ座面上の任意の 3 点座標 $\{P_i\,(x_i, y_i, z_i)\mid i=1,2,3\}$ を測定する。x_i, yi は XY 軸ロボットの座標，z_i は変位計指示値を表している。

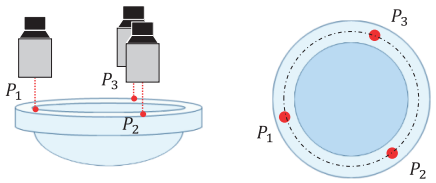


図5　測定位置
Measurement Position

レンズ座面上の 3 点 $P_i\,(x_i,y_i,z_i)$ の法線ベクトル $\vec{n} = (n_x, n_y, n_z)$ は下記となる (**図 6**)。

$$n_x = (y_2 - y_1)(z_3 - z_1) - (y_3 - y_1)(z_2 - z_1)$$
$$n_y = (z_2 - z_1)(x_3 - x_1) - (z_3 - z_1)(x_2 - x_1)$$
$$n_z = (x_2 - x_1)(y_3 - y_1) - (x_3 - x_1)(y_2 - y_1)$$

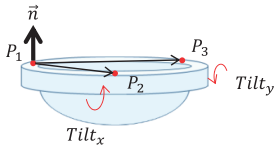


図6　法線ベクトル
Normal Vector

算出された法線ベクトルに基づき，以下の式よりレンズの姿勢 $Tilt_x$, $Tilt_y$ を導出する。

$$Tilt_x = \tan^{-1}\left(\frac{n_x}{n_z}\right),\quad Tilt_y = \tan^{-1}\left(\frac{n_y}{n_z}\right)$$

導出された姿勢 $Tilt_x$, $Tilt_y$ に基づいて，自動ゴニオステージにより姿勢を補正する。

3.2　姿勢補正動作の検証

姿勢推定の妥当性を検証するため，平板を用いて測定点の配置円直径を変化させた条件で実

際の姿勢補正動作を実施し，その有効性を確認した。姿勢補正動作のプロセスフローを**図 7** に示す。目標値との姿勢の誤差 *ΔTilt* が閾値以下になるまで姿勢の推定とゴニオステージによる補正動作を行う。高性能な光学レンズ貼合においては，1°／60 を基準とする角度単位「分」で示すと 0.5' 以下，すなわち約 0.008° の高い接合精度が求められる。本検証ではこの仕様を満たすため，閾値を 0.005° 以下（0.3' 以下）に設定した。測定個所はレンズ中央を中心とした測定円上を 120° ピッチの位置とした。イメージを**図 8** に示す。今回は補正動作回数が 2 回以下を成功，3 回以上を失敗として成功率を確認した。回数制限を設けたのは姿勢推定の度にレンズ座面上の 3 点を測定するプロセスの都合上，補正動作の回数がサイクルタイムに多大な影響を及ぼすためである。測定円は φ10mm と φ30mm の条件で実施し，それぞれ 10 回行ったときの成功率を確認した。

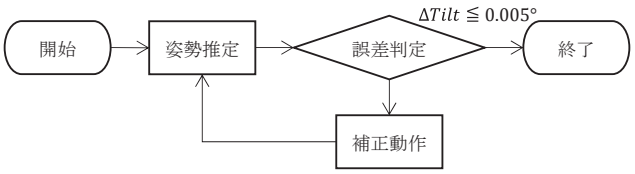


図 7　補正動作プロセス
Attitude Correction Process

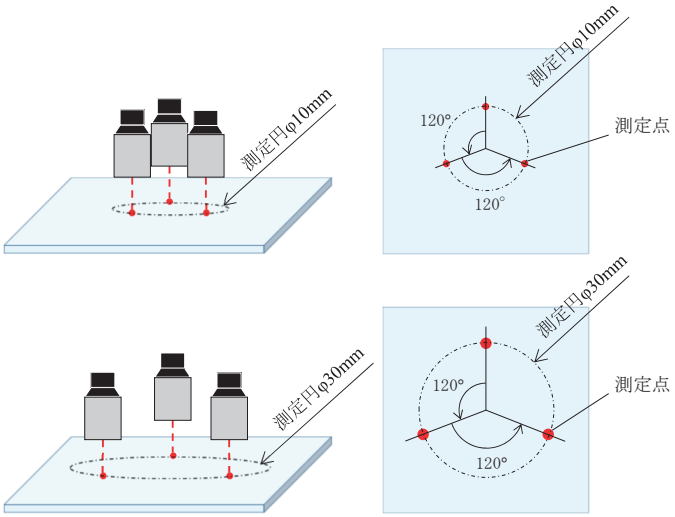


図 8　測定位置
Measurement Position

初期姿勢に対して，X 方向と Y 方向にそれぞれ 0.1° 傾いた姿勢を目標姿勢としたときの補正動作プロセスの検証結果を**表 1** に示す。また，補正動作のリトライ回数と誤差のグラフを**図 9** に示す。図 9 では φ30mm は 1 回目時点で閾値内に入っている。一方，φ10mm はリトライ 6 回目で閾値内に入った。

表 1　姿勢補正成功率
Attitude Correction Success Rate

測定円直径	補正回数	成功率
φ10mm	3 ～ 6 回	0%（0/10）
φ30mm	1 回	100%（10/10）

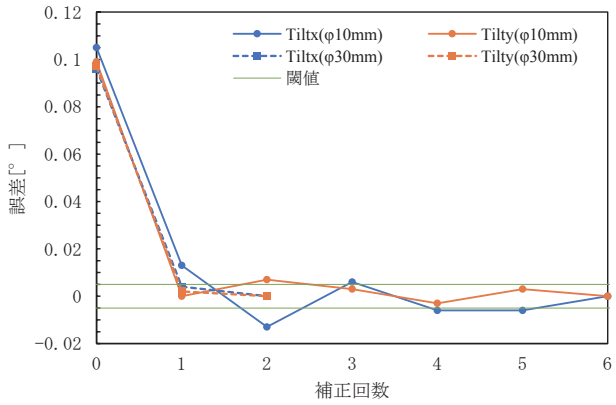


図９　補正回数と誤差
Attitude Error vs. Correction Count

上記の結果より，測定円直径がφ30mm において補正動作が 1 回で補正が完了していることから，対象ワークの姿勢が正しく推定できていることが確認できた。一方で，測定円直径がφ10mm の場合は 10 回ともリトライ回数 2 回では誤差の閾値以下にならず，失敗の判定となっている。図 9 より，1 回の補正で誤差は小さくなっているが最終的な $Tilt_x$, $Tilt_y$ 双方の微調整にリトライを要している。これは**図 10** に示す通り，同じ傾きの場合，測定円直径がφ30mm に比べてφ10mm の変位 d が小さいことが要因であると考える。測定円直径がφ10mm の場合，目標公差 0.005° に対する変位は 0.8μm である。これが装置の微振動，ワークの表面粗さと同程度であるために姿勢推定の分解能を確保できず補正に回数を要したと推察される。以上のことから本姿勢補正は，測定円をφ30mm 以上にすることで 0.005° 以下の精度で姿勢補正が可能であることが分かった。

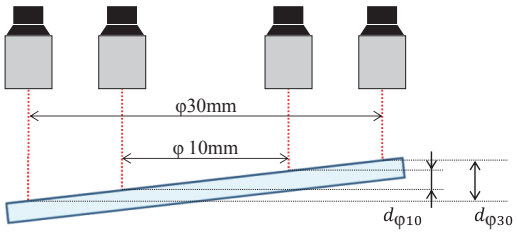


図10　2点間の変位
Relative Displacement between Two Points

4．ギャップ制御アルゴリズム

従来の接合技術はタッチパネル対応ディスプレイが主であったため，タッチセンサの検出感度を安定させる目的で，ワーク間ギャップを一定に固定する制御[(2)]を行っていた。実際の制御方法としては，**図 11** に示すように対向する Top/Bottom ステージが水平に密着する高さを接合基準とする。そして**図 12** に示すように，Top ワーク高さ H_1 と Bottom ワーク高さ H_2，および固定値であるワーク間ギャップ Gap をもとに，ステージ間距離 D を以下の式で設定する。

$$D = H_1 + H_2 + Gap$$

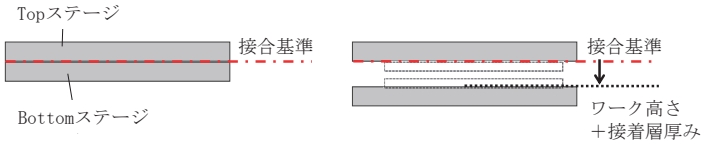


図11　従来方式の接合基準とワーク高さ
Bonding Reference and Workpiece Height in Conventional Method

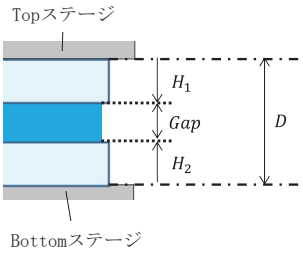


図12　従来方式の計算
Calculation in Conventional Method

H_1 と H_2 はワークの製造バラつきを考慮し，接合ごとに毎回測定する。

一方，レンズの接合において同様にレンズ間ギャップを一定に固定すると，レンズ個々の厚みの製造バラつきがそのまま接合後の総厚みに影響し，光学性能が安定しない。そのため，レンズ接合では光学性能を確保すべく「接合後のレンズ中央厚み Tc を一定値にする」ための ギャップ制御が必要となる。

レンズは曲率を持ち，ステージの頂点を接触させて基準とすることが困難なため，**図 13** に示すように対向する Top/Bottom 各ステージの外周部に設けたフラット面が水平に密着する高さを接合基準とする。**図 14** に示すように，所望の接合後レンズ中央厚み Tc は，Top レンズ中央厚み Tc_1, Bottom レンズ中央厚み Tc_2, およびレンズ間ギャップ Gap の和（$Tc=Tc_1+Tc_2+Gap$）となる。これら Tc_1，Tc_2 と，Top ステージのフラット面から Top レンズ中央部の下面までの高さ H_1，Bottom ステージのフラット面から Bottom レンズ中央部の上面までの高さ H_2 は，あらかじめ第 2 章に記載のプロセス（a）にて取得しておく。

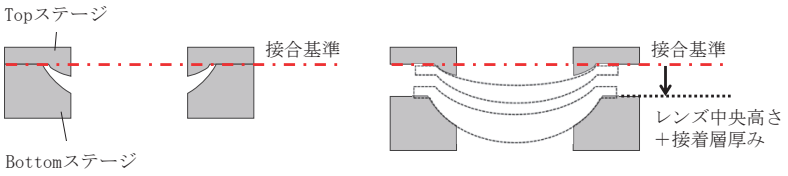


図13　総厚み制御方式の基準
Bonding Reference in Total Thickness Control Method

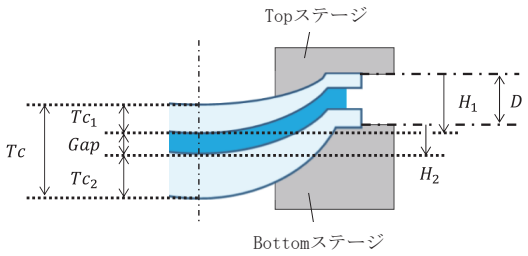


図14　総厚み制御方式の計算
Calculation in Total Thickness Control Method

接合後のレンズ中央厚みを狙い値 Tc とするために必要なステージ間距離 D は以下の式で算出され，この D へとステージを制御する。

$$D = H_1 + H_2 + Gap$$
$$= H_1 + H_2 + Tc - Tc_1 - Tc_2$$

高精度な接合を実現するため，H_1, H_2, T_{c1}, T_{c2} は接合ごとに毎回測定を行う。

5．む す び

本論では，レンズ接合における姿勢補正機能及びギャップ制御について述べた。姿勢補正機能は測定円 φ30mm 以上にすることで 0.005° 以下の精度で姿勢補正が可能であることを確認した。また提案したギャップ制御アルゴリズムにより，成型ロット間の厚みばらつきにかかわらず，接合後のレンズ中央厚みを一定に保持することが可能となった。これらのプロセスを確立したことにより，MR デバイス用レンズに対応した自動接合装置の実用化に至った。今後は，光学性能を考慮したレンズの接合プロセス開発を目指したい。

最後に，今回の開発にあたりご協力いただいた関係各位に深く感謝する。

参考文献

⑴ Shivani Zoting: Augmented Reality And Virtual Reality Market Size, Share, and Trends 2026 to 2035. Precedence Research. 2025-12-16 https://www.precedenceresearch.com/augmented-reality-and-virtual-reality-market,（参照 2026-3-31）

⑵ 小梶英之ほか：小型光学デバイス貼り合わせ量産自動機，オリジンテクニカルジャーナル，No.74（2011），p.Ⅱ3-8

◇◇◇

福本　勇樹

メカトロニクス事業部開発部
2019 年入社，主に貼合装置のプロセス開発に従事。

小梶　英之

メカトロニクス事業部開発部
2001 年入社，主に貼合装置のプロセス開発に従事。

ギ酸銅を用いたMOCVD法による銅膜形成プロセスの開発

DEVELOPMENT OF A COPPER FILM DEPOSITION PROCESS VIA MOCVD USING COPPER FORMATE

竹内奈々美・小澤　直人

Nanami TAKEUCHI and Naoto OZAWA

従来の真空蒸着やスパッタ法による銅成膜は，大がかりな真空設備が必要であったり，複雑な凹凸部への均一な成膜，フッ素樹脂（PTFE：ポリテトラフルオロエチレン）などの難付着材料への密着性確保に課題があった。これらの課題を解決するため，安価で安定なギ酸銅を用いた有機金属化学気相成長法（MOCVD 法）による銅薄膜形成プロセスを開発した。本プロセスは高真空を必要とせず，200～300℃の低温加熱によりギ酸銅の熱分解反応を利用して成膜を行う。成膜特性を評価した結果，アスペクト比1：40の微細溝構造における優れた段差被覆性，表面処理との併用によるPTFE基板への高い密着性，市販高周波用基板と同等の伝送特性を示した。次世代高周波通信（5G/6G）用デバイスでは，微細構造への配線形成やPTFEなどの低誘電損失基板への高い密着性が求められており，本技術は次世代基板製造の発展に貢献することが期待される。

Conventional copper film deposition methods, such as vacuum evaporation and sputtering, require large-scale vacuum systems and face challenges in achieving uniform deposition on complex, three-dimensional structures as well as ensuring adhesion to materials with poor adhesion, such as fluororesin (PTFE: polytetrafluoroethylene). To address these issues, we developed a copper thin-film deposition process using metal-organic chemical vapor deposition (MOCVD) with inexpensive and stable copper formate. This process operates without high vacuum, relying on the thermal decomposition of copper formate at low temperatures of 200–300°C. Characterization of the deposited films demonstrated excellent step coverage in microtrench structures with an aspect ratio of 1:40, high adhesion to PTFE substrates when combined with surface treatment, and transmission characteristics equivalent to those of commercial high-frequency substrates. Next-generation high-frequency communication devices (5G/6G) require fine-pattern wiring and strong adhesion to low-dielectric-loss substrates such as PTFE; thus, this technology is expected to contribute significantly to the advancement of next-generation substrate manufacturing.

1．まえがき

銅は優れた導電性や熱伝導性から，電気配線や放熱部材など幅広い製品に用いられている。近年，5G/6Gといった高周波通信技術の発展に伴い，信号の伝送損失を低減するため，フッ素樹脂（PTFE）などの低誘電損失基板への銅配線形成が求められている。しかし，従来の真空蒸着法，スパッタ法では，大型の高真空設備が必要なことや，微細な凹凸への成膜が困難であること，難付着材料であるフッ素樹脂（PTFE，PFAなど）への密着性確保が課題となっていた。

これらの課題を解決するため，有機金属化学気相成長法（Metal Organic Chemical Vapor Deposition, MOCVD法）による銅薄膜形成プロセスを開発した。MOCVD法は，有機金属原料を気体状で供給し，基板表面での反応によって薄膜を形成する手法である。既存の銅MOCVD原料は不安定な物質が多いが，本研究では安定かつ安価なギ酸銅を採用し，その熱分解反応を利用することで高真空が不要な成膜を実現した。

本論文では，当該プロセスの原料，原理および装置構成について述べるとともに，高アスペクト比構造に対する段差被覆性，および表面処理を併用した PTFE への密着性，加えて実用化に向けた伝送損失特性の評価結果ついても報告する。
※本論文に関連する技術は，特許出願中（特願 2024-539118）。

2．ギ酸銅を用いた MOCVD 成膜技術

2.1　前駆体と成膜原理

従来の銅 MOCVD の前駆体（原料）は不安定なものが多く，取り扱いが難しい上に高価である。本プロセスで前駆体に採用したギ酸銅（II）四水和物 $(HCOO)_2Cu・4H_2O$ は室温かつ大気中で安定して存在するため，取り扱いが容易であることに加え，安価であるという大きな利点を持つ。また，一般的な銅前駆体では膜の還元のために水素ガスの導入を必要とする場合が多いが，ギ酸銅はその配位子自体に還元性があるため，外部から還元ガスを供給することなく純粋な金属銅膜を形成できる。本成膜プロセスにおける熱分解反応は，以下の 2 段階を経て進行する。

まず，減圧条件下で式(1)に示す脱水反応が起こり，水和水が脱離して無水ギ酸銅が生成される。

$$(HCOO)_2Cu・4H_2O\ (s) \rightarrow (HCOO)_2Cu(s) + 4H_2O(g) \qquad 式(1)$$

続いて，無水ギ酸銅を加熱気化させて基板表面へ供給し，200～300℃ の温度域で式(2)に示す熱分解反応を促進させることで，金属銅の堆積が行われる。

$$(HCOO)_2Cu\ (g) \rightarrow Cu(s) + 2CO_2(g) + H_2(g) \qquad 式(2)$$

このように，本プロセスは反応副生成物が二酸化炭素，水素，水蒸気といった揮発性の高いガス分子のみで構成されるため，膜中への不純物混入を最小限に抑えた高品質な銅薄膜の形成が可能である。

2.2　装置構成とプロセス条件

開発した成膜装置は，真空チャンバー内に加熱用の下部プレートと上部プレートを対向配置した構成である（**図 1**）。下部プレートには原料であるギ酸銅（II）四水和物を配置し，上部プレートの下面に成膜対象となる基板を設置する。次に成膜プロセス（**図 2**）を以下に示す。

(1)　チャンバー内を数 Pa まで減圧し，ギ酸銅の水和水の脱離を行う。
(2)　上部プレートを 200～300℃ に加熱する。
(3)　下部プレートを 200～300℃ まで昇温してギ酸銅を気化させる。このとき基板表面でギ酸銅の熱分解による膜形成が進行する。この気化・膜形成工程における到達圧力は 10^4Pa 程度である。
(4)　上下のプレートを冷却し基板を取り出す。

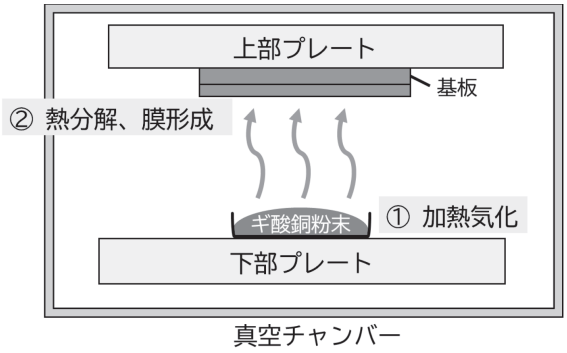


図 1　MOCVD 装置構成
MOCVD System Configuration

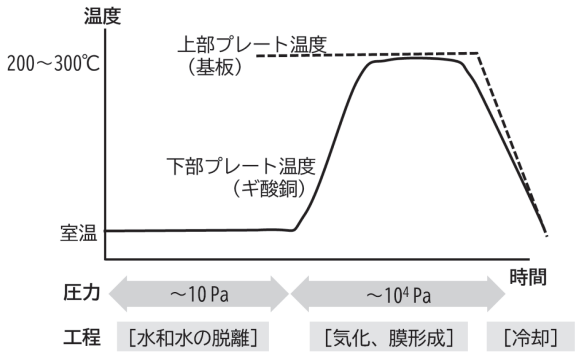


図２　成膜プロセス
Deposition Process

水和水の脱離と冷却時間を除いた実質的なプロセスタイムは約 10 分程度である。

なお，チャンバー内に残留するギ酸銅ガスは，当社がギ酸還元真空リフロー炉の開発等で培ったギ酸分解技術を用いて無害化され，安全に排気される[(1)-(3)]。

形成される銅膜の厚さは 1μm 前後で金属光沢を呈する（**図 3**）。

適用可能な基板としては 200～300℃の耐熱があればよく，Si ウエハやガラスのほか，PTFE や PFA に代表されるフッ素樹脂やポリイミドなどの樹脂材料，各種金属板など多様な基板に対して成膜が可能である。

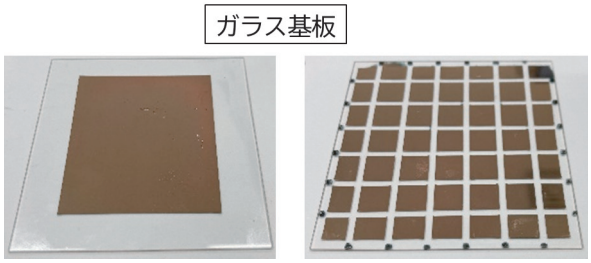


図３　ガラス基板への成膜サンプル
Copper Film Deposited on Glass Substrate

３．成膜特性の評価

本章では，成膜した銅膜の評価結果について説明する。

3.1　微細構造への段差被覆性

前述の通り，従来の真空蒸着法やスパッタ法などの物理気相成長（PVD）プロセスでは，**図４a** のような凹凸形状への均一な成膜が困難であるという課題があった。特に真空蒸着法においては，指向性が高く高真空中を原料粒子が直進的に移動するため，溝構造への成膜時に開口部付近へ優先的に堆積が進行する（図４**b**）。その結果，溝上部が塞がれる一方で，側面や底面への原料供給が不足し，内部にボイドが形成されやすいという致命的な欠点を持っていた（図４**c**）。

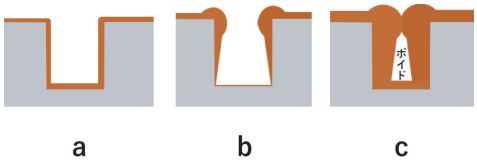


図４　薄膜形成時の段差被覆特性
Step Coverage of Thin Film

これに対して，MOCVD 法は原料を気体状態で供給し，基板表面での化学反応によって膜を形成するため，PVD 法のような指向性の制約を受けない。特に本プロセスでは，成膜条件を表面反応律速領域に制御することで，ガス状の前駆体分子を微細構造の深部まで十分に拡散・充満させることが可能である。これにより，トレンチ内部のあらゆる表面において均一な速度で熱分解反応が進行し，極めて高い段差被覆性が実現される。

本開発プロセスにおける段差被覆性（ステップカバレッジ）を評価するため，溝パターンが形成された Si ウエハを用いて成膜実験を行った。まず，溝幅 2μm，溝深さ 2μm，アスペクト比 1:1 の溝に対して成膜を行った結果，SEM（走査型電子顕微鏡）による断面観察および SEM-EDX（エネルギー分散型 X 線分析）による Cu マッピングから，表面のみならずトレンチの側面および底面に対しても均一に約 0.5μm の銅膜が形成されていることが確認された（**図５a**）。さらに過酷な条件として，溝幅 5μm，溝深さ 55μm，アスペクト比 1:11 のトレンチにおいても，同様に表面・側面・底面へ均一な成膜（膜厚約 0.2μm）が確認された（図５**b**）。限界性能の検証においては，最大で溝幅 0.5μm，アスペクト比 1:40 という極めて高アスペクト比の微細トレンチの内部深くまで成膜できることを確認しており（**図６**），本プロセスは三次元的な微細構造への配線形成に有効である。

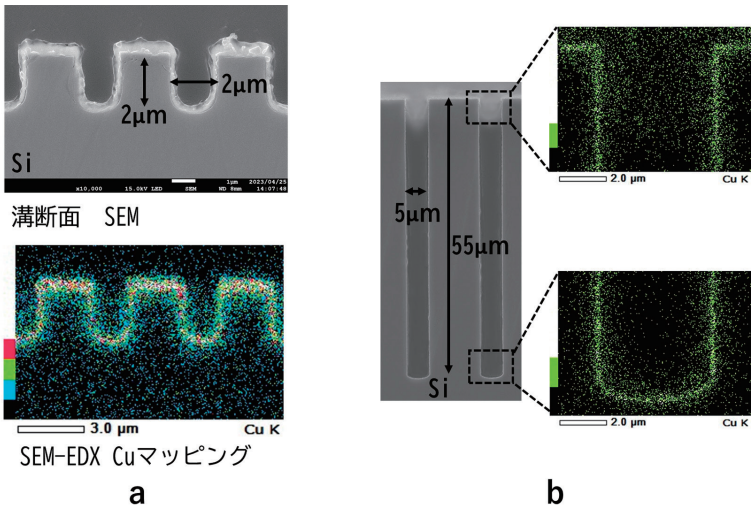


図５　段差被覆性評価（1）
Evaluation of Step Coverage (1)

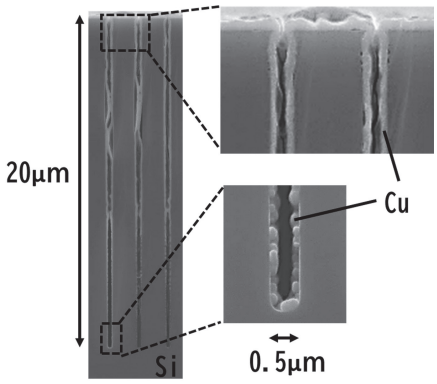


図６　段差被覆性評価（2）
Evaluation of Step Coverage (2)

3.2　難付着材料 PTFE への密着性

5G/6G やテラヘルツ波帯といった次世代高周波通信用基板においては，信号の伝送損失を抑制するため，低誘電損失特性を持つフッ素樹脂（PTFE）の利用が期待されている。しかし，PTFE はその分子構造上極めて難付着性であり，銅配線との密着性を確保することが大きな課題である。

一般的に，市販の高周波用 PTFE 基板では表面に凹凸を形成し，そのアンカー効果（物理的な引っ掛かり）を利用して銅膜との密着性を確保している。しかし，高周波帯域においては電流が導体表面の極めて浅い部分に集中する「表皮効果」が顕著となるため，密着性確保のために界面の凹凸を大きくするほど，伝送損失が増大してしまうというジレンマが存在する。したがって，過度な粗化に頼らずに高い密着性を実現する成膜プロセスが求められている。本研究では，厚み 100μm の PTFE シートに対してプラズマ処理を施した上で，銅の成膜（膜厚約 0.7μm）を行った。成膜後，セロハン粘着テープ（粘着力 3.93N/10mm）を用いたテープ剥離試験を実施した結果，銅膜の剥離は一切認められず，良好な密着性が得られることを確認した（**図 7 b**）。なお，プラズマ処理を行わない条件では密着性不良（図 7 **a**，同テープにて全面剥離）となることから，適切な前処理と本プロセスの組み合わせが，フッ素樹脂への高密着な金属膜形成において重要であると言える。

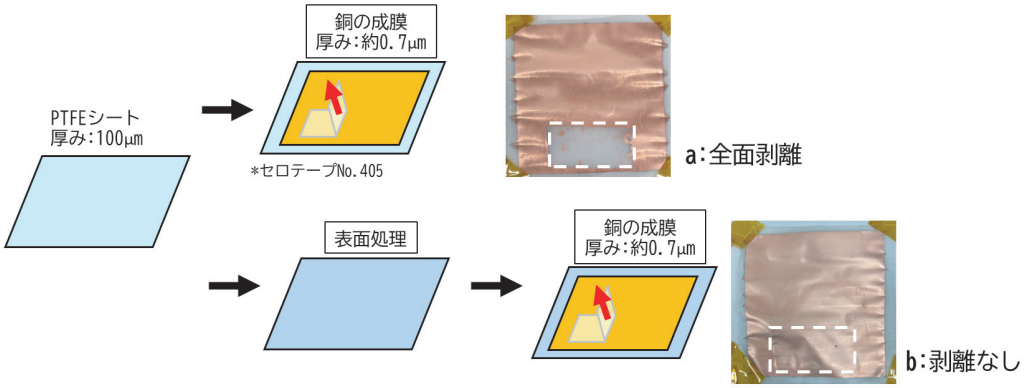


図 7　PTFE への密着性評価
Evaluation of Adhesion to PTFE

3.3　導電率と伝送損失

5G/6G 向け高周波基板においては，導体層の導電率と線路の伝送損失がデバイス性能を左右する非常に重要な指標となる。本プロセスにより作製した銅膜の高周波における伝送特性を検証するため，宇都宮大学の協力を得て，誘電体円柱共振器法を用いた界面側比導電率の評価，およびコプレーナ導波路（CPW）を用いた伝送損失の評価を実施した[(4) (5)]。

3.3.1　導電率

本プロセスで作製した銅膜（PFA 基板，銅膜厚 1.5μm）と，真空蒸着法で作製した銅膜（PFA 基板，銅膜厚 0.6μm）の界面側比導電率を測定し，比較を行った。測定には，基準となる誘電体円柱を 2 枚の測定対象（銅膜試料）で挟み込んで共振器を構成する「誘電体円柱共振器法」を用い，万国標準軟銅の導電率に対する比導電率を求めた。

20GHz，30GHz での評価結果を**表 1** に示す。本 MOCVD 法による銅膜は 20,30GHz 帯において約 60～80% の高い比導電率を示しており，これは真空蒸着法による銅膜と比較しても同等の値であり，良好な導電性を示すことが確認された。

表 1　界面側導電率の評価結果
Evaluation of Interfacial Conductivity

サンプル	20GHz での界面側比導電率%	30GHz での界面側比導電率%
MOCVD	78.6 ± 2.0	60.6 ± 2.1
真空蒸着	73.1 ± 2.6	62.7 ± 2.0

3.3.2　伝送特性の評価

本プロセスによる銅膜の伝送損失を評価するため，特性インピーダンスが 50 Ω となるコプレーナ（CPW）線路を設計・試作し（**図 8**），ネットワークアナライザを用いて 0.05〜50GHz 帯における S21 を測定した。S21 は，入力した高周波信号が線路を通過して出力側へどれだけ伝達されたかを示す指標（透過特性）であり，値が 0dB に近いほど伝送損失が少なく，信号が劣化せずに伝わることを意味する。基板には厚さ 250μm の PFA を用い，密着性確保のための前処理の後に本プロセスによる銅成膜を施した。また，比較用に市販の高周波用銅膜付 PTFE 基板 2 種を用いて同寸法を有する CPW 線路を作製した。

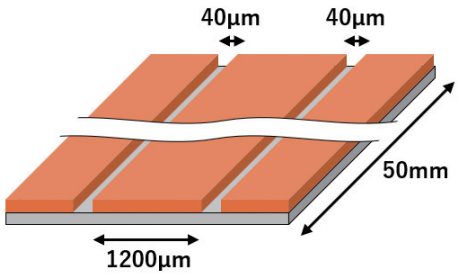


図 8　CPW 線路
Coplanar Waveguide (CPW) Line

測定の結果を**図 9** に示す。全般におけるリップル（ガタツキ）はコネクタ接続部の不整合等によるものであり MOCVD 基板だけでなく市販基板でも同様に発生している。この測定系の影響を差し引いて評価すると，MOCVD 銅膜は市販品と遜色ない伝送特性を実現できており，製法の有効性が確認された。

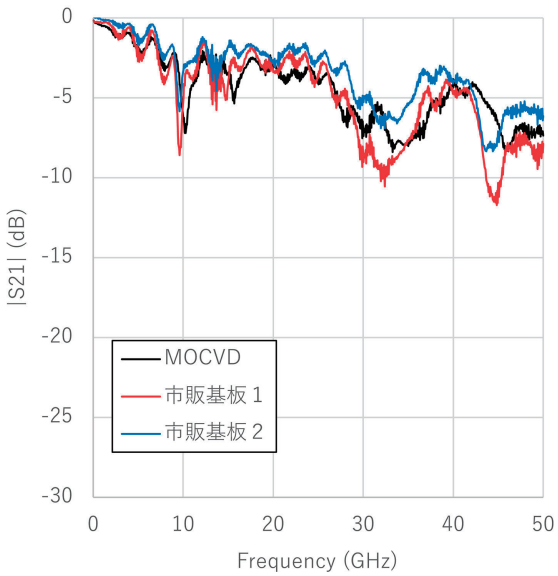


図 9　伝送損失評価結果
Evaluation of Transmission Loss

４．む す び

本稿では，安価で安定なギ酸銅を用いたMOCVD法による，銅薄膜形成プロセスの開発について報告した。本プロセスは，従来の真空蒸着法などで課題となっていた大型の高真空設備を必要とせず，200 ～ 300℃の低温加熱により成膜が可能である。成膜特性の評価を通じて，アスペクト比 1：40 に達する微細トレンチへの良好な段差被覆性と，表面処理の併用によるPTFEなどの難付着材料への高い密着性を確保できることが確認された。さらに，高周波帯域においても真空蒸着膜に遜色ない高い比導電率を維持し，市販の低損失基板と同等の優れた伝送特性を示すことが実証された。本手法は，5G/6G等の次世代通信デバイスにおいて求められる微細配線形成や，低損失基板の製造に向けた有用な要素技術として，今後の通信・実装技術の発展に広く貢献することが期待される 。

本研究における高周波特性の評価（界面側比導電率および伝送損失の測定）にあたり，多大なるご指導とご協力をいただいた宇都宮大学の清水隆志准教授に深く感謝する。あわせて，本プロセスの開発にご指導をいただいた山梨大学名誉教授の柴田正実先生にここに謝意を表する。

参考文献

(1) 松本豊ほか：真空ソルダリングシステム「MP2」，オリジンテクニカルジャーナル，No.78（2015），pp. Ⅲ 8-12
(2) 小澤直人ほか：真空ソルダリングシステム「MP2」における要素技術開発，オリジンテクニカルジャーナル，No.80（2017），pp. Ⅲ 8-12
(3) 丸山めぐほか：真空ソルダリングシステム「MP2」における要素技術開発 第二報，オリジンテクニカルジャーナル，No.84（2021），pp. Ⅲ 9-16
(4) 清水隆志ほか：銅張誘電体基板に挟まれた誘電体円柱共振器の共振特性解析 , 信学技報 , vol. 115, no. 141, MW2015-86, pp.233-238(2015)
(5) 平野勇作ほか：銅張誘電体基板に挟まれた誘電体円柱共振器を用いた界面比導電率の周波数依存性測定に関する検討 , 信学技報 , vol.117, no.462, MW2017-191, pp.83-86(2018)

◇◇◇

竹内奈々美

研究開発本部　研究開発室
2010 年入社，主に薄膜形成技術の開発，新素材の開発に従事。

小澤　直人

研究開発本部　研究開発室
2001 年入社，真空はんだ付け装置の開発をはじめ，幅広く技術開発に従事。
工学博士

耐薬品性に優れる環境配慮型高輝度金属調塗料「エコネットFX-2」の開発

DEVELOPMENT OF "ECONET FX-2," AN ENVIRONMENTALLY FRIENDLY, HIGH-BRIGHTNESS METALLIC PAINT WITH EXCELLENT CHEMICAL RESISTANCE.

村山　亮太・谷島　　徹
Ryota MURAYAMA and Toru YAJIMA

自動車内装部品等で求められる金属調加飾では，設備導入によるコストや施工できる形状物への制約の観点から，めっきや蒸着からスプレー塗装への代替要求が高まっている。当社は特定VOCを含まない環境配慮型高輝度塗料「エコネットFX」を製品化したが，近年はさらなる高輝度外観と塗膜性能の両立が求められている。

今回開発した「エコネットFX-2」は，従来よりも大きな塗膜乾燥時の体積収縮を用いたアルミ顔料の配向制御により，さらなる高輝度の発現を可能にした。この配向制御技術は，塗料の低固形分化に伴う薄膜化を招きやすく，耐薬品性の低下という課題があった。そこで，耐薬品性に優れる新規アクリルポリオールを設計し，この課題を克服した。さらに，新規アルミ顔料や副樹脂の選定，溶解度パラメーター（HSP）に基づくシンナー組成の適性化により，1コートでありながら2コートと同等の光沢感を持つ高輝度外観を実現している。加えて，トップコートを用いる2コート仕様にも対応でき，輝度や光沢，塗膜性能の向上および着色幅の拡大を可能とした。

In the field of metallic decorative finishes required for automotive interior parts and other applications, there is a growing demand to replace electroplating and vapor deposition with spray coating, due to the costs associated with installing specialized equipment and the limitations on the shapes that can be coated. We have commercialized "ECONET FX," an environmentally friendly, high-brightness coating that contains no specified VOCs; however, in recent years, there has been a growing demand to achieve both an even higher-brightness appearance and superior coating film performance.

The newly developed "ECONET FX-2" enables an even higher brightness by controlling the orientation of aluminum pigments through greater volume shrinkage during coating film drying compared to conventional products. This orientation control technology tended to result in thinner films due to the low solids content of the coating, which posed a challenge in terms of reduced chemical resistance. To address this, we designed a new acrylic polyol with excellent chemical resistance, thereby overcoming this challenge. Furthermore, through the selection of new aluminum pigments and auxiliary resins, as well as the optimization of thinner composition based on solubility parameters (HSP), the product achieves a high-brightness finish with a gloss level equivalent to a two-coat system, even with a single coat. In addition, it is compatible with a two-coat system using a topcoat, enabling improvements in brightness, gloss, and coating performance, as well as a broader range of color options.

1．まえがき

自動車や家電などの工業製品に使用されるプラスチック部品において，製品の付加価値を高める要素として意匠性は重要となっている。なかでも高級感を演出できる高輝度意匠が強く求められている。

高輝度意匠を付与する代表的な手法には，鏡面のような外観となるめっきや蒸着があげられるが，設備導入によるコストが高いことや複雑形状への対応難易度が高いといった課題を抱え

ている。一方で，スプレー塗装による高輝度加飾は，鏡面には劣るが加工コストと複雑形状へも容易に適用できる点で優位性を持つ。そのため，めっきや蒸着からスプレー塗装による加飾への代替要求が増えている。

当社では，これらの市場要求に対応するため，トルエン・キシレンを含まない環境配慮型高輝度塗料「エコネット FX」を製品化し，自動車内装や光学機器分野で実績を重ねてきた。しかし近年の更なるデザイン要求の高度化に伴い，めっきや蒸着により近い輝度や光沢感を有する外観と，厳しい使用環境に耐えうる塗膜性能の両立が求められるようになってきている。そのため，エコネット FX では顧客要望に十分に応えることができないケースが増えてきた。

そこで，アクリルポリオールと体積収縮の大きい繊維素系樹脂を併用して輝度を高めたエコネット FX の技術をベースに，さらに輝度，光沢を高めた塗料「エコネット FX-2」を開発したので報告する。本製品は優れた塗膜性能を有しつつ，1 コートでも従来の高輝度塗料の 2 コート仕様と同等の光沢感を実現している。加えて，トップコートで保護する 2 コート仕様にも対応でき，輝度や光沢，塗膜性能の向上および着色幅の拡大が可能である。

2．開 発 方 針

本開発では，従来の金属調塗料では得られなかった高輝度外観と自動車部品等に求められる塗膜性能の両立を目的とした。さらに，1 コートでありながら，2 コートと同等の光沢感を実現することも目指した。これら目標を達成するため，体積収縮によるアルミ顔料の配向制御と薄膜でも塗膜性能に優れた樹脂の設計に着目し開発を行った。

2.1　体積収縮による配向制御と樹脂設計

塗装により高輝度意匠を実現するためには，アルミ顔料を塗膜内で均一かつ被塗物に対して平行に配向させ，光の散乱を抑える必要がある。しかし，従来の塗料では乾燥過程での体積収縮が小さいため，アルミ顔料の配向乱れによる輝度低下という課題があった。この課題を解決し，アルミ顔料の輝度を最大限に発揮させるため，**図 1** に示すとおり，本開発ではより大きく塗膜の体積収縮を利用する設計とした。

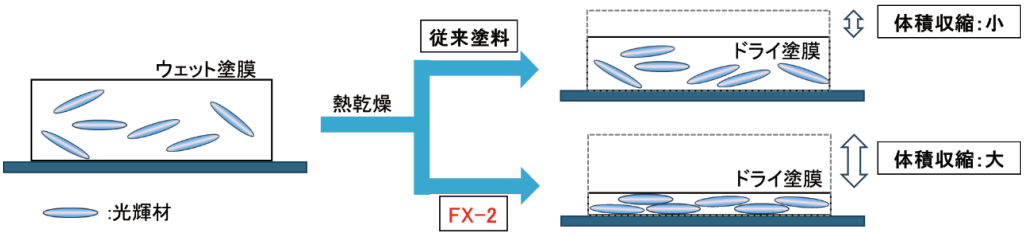


図 1　乾燥時の塗膜収縮
Coating Shrinkage During Drying

体積収縮を利用した配向制御では，ウェット塗膜とドライ塗膜の膜厚差が大きくなるため，従来の塗料と同じウェット膜厚で塗装するとドライ塗膜は薄膜化する。その結果，塗膜強度が低下したり，薬品の浸透を防ぐことが難しくなり，塗膜物性が低下する。実際に，**図 2** に示すとおり，従来の高輝度塗料では，薄膜時には耐薬品性が不足するため，塗装作業性の観点から体積収縮を抑制し，膜厚を確保できる設計とする必要があった。そこで本開発では薄膜化に伴う物性低下を克服すべく，薬液の浸透を抑える目的でガラス転移温度（Tg），分子量に着目して新規アクリルポリオールを設計した。

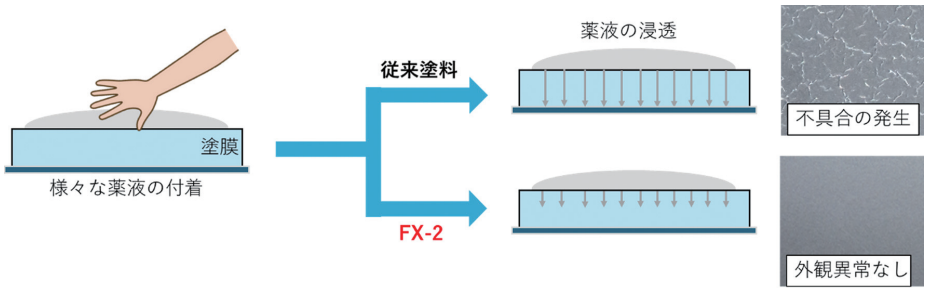


図2　耐薬品性試験後の塗膜イメージ
Schematic Diagram of Coating After Chemical Resistance Testing

2.2　アルミ顔料の性能発現

高輝度意匠において，アルミ顔料の選択は重要な要素となる。現在，従来品と比較してより平滑で極めて薄いアルミ顔料の開発が進められている。この新規極薄アルミは理想的に配向することで粒子感が目立たず，光の散乱も抑えられるため，より高い輝度が得られる。一方で，その薄さのため配向制御が難しいといった課題がある。開発品のコンセプトである従来よりも大きな体積収縮を利用し，この極薄アルミ顔料の配向制御による高輝度外観を目指した。

2.3　輝度と光沢の評価方法

本開発品では重要な指標の一つが輝度である。輝度の評価方法として，人間の目視評価との相関が高いとの報告がある 60° 光沢値と L^* 値を用いた $G(60°)/L^*(45°)$ を指標とした。また，光沢の指標として微細な塗膜表面凹凸の影響を捉えることができる 20° 光沢値を用いた[(1)(2)]。

3．塗 料 設 計

3.1　樹脂設計

3.1.1　樹脂系の設定

本検討では，従来の高輝度塗料と同様に基本性能を担うアクリルポリオールに対し，繊維素系樹脂を併用する設計とした。繊維素系樹脂は高分子量で非常に粘度が高いという特徴を持つ。そのため，多量の溶剤で希釈し，塗装に適した粘度に調整する必要があるため，塗料中の固形分が低くなる。これにより，ウェット塗膜からドライ塗膜に至る乾燥過程で揮発する溶剤量が増えるため，体積収縮が大きくなる。**表 1** に示すとおり，この体積収縮が大きい程アルミ顔料の配向性が高まり，輝度が向上することを確認した。一方で，同じウェット膜厚では低固形分化によって膜付き性の低下により薄膜化した。

表 1　体積収縮と塗膜外観の関係
Relationship Between Volume Shrinkage and Coating Appearance

固形分	高	低
体積収縮	小	大
膜付き性	良	悪
輝度	低	高

前述したように，体積収縮を利用した配向制御方法は，アルミ顔料の配向に有利にはたらく一方で，膜付き性の悪化により塗膜が薄膜となりやすく，塗膜性能の確保が難しい。そこで，薄膜においても十分な塗膜性能を確保するため，主樹脂となる新規アクリルポリオールの開発を行った。

アクリルポリオールの開発においては，耐薬品性の向上のために Tg と分子量に着目し樹脂検討を行った。**表 2** に示すとおり，高 Tg，高分子量とすることで，耐薬品性の良化を確認した。一方で，Tg および分子量が高すぎると樹脂の溶剤溶解性が悪くなりレベリングおよび塗装作

業性が低下した。そこで本開発では，Tg と分子量を適性化することで樹脂の溶剤溶解性と耐薬品性のバランスをとる設計とした。この新規アクリルポリオールにより，薄膜であっても耐薬品性試験において優れた性能を有することを確認した。これにより従来の高輝度塗料と比較して，より大きな体積収縮の利用と塗膜性能の両立が可能となった。

表2　アクリルポリオールの分子量および Tg の変化による影響
Effects of Changes in Molecular Weight and Tg of Acrylic Polyols

分子量	低 → 高			
Tg	低 → 高			
樹脂の溶剤溶解性	高 → 低			
輝度	低 → 高			
耐薬品性	×	×	○	○
レベリング	○	○	△	×
塗装作業性	○	○	△	×

3.1.2　副樹脂の選定

新規アクリルポリオールと繊維素系樹脂の併用により，輝度や塗膜性能は良好となった一方で，レベリングや塗装作業性が不十分であった。これを改善するために副樹脂の併用を検討した。一般的に副樹脂は塗膜性能や塗装作業性の向上などを目的に，主樹脂と比較し低分子量で高固形分の樹脂を配合する。その種類にはアクリル系樹脂，ポリエステル系樹脂，ポリカーボネート系樹脂など様々な樹脂があげられる。**表 3** に示すとおり，副樹脂の配合量が多いと一般的に，レベリングや作業性に有利にはたらくが，輝度や耐薬品性が低下する。そのため，副樹脂の種類や構造，分子量や配合量を適性化することで，レベリングおよび塗装作業性と塗膜性能を両立した。

表3　副樹脂による影響
Effects of Auxiliary Resins

副樹脂配合量	なし → 多		
輝度	高 → 低		
耐薬品性	○	○	×
レベリング	△	○	○
塗装作業性	△	○	○

ここまでに述べたとおり，樹脂の配合比率を適性化することにより耐薬品性を確保しつつ，高輝度外観を得ることができた。しかし目標としている 1 コートで従来の高輝度塗料の 2 コート仕様と同等の光沢感を得るためには樹脂の設計だけでは不十分であった。

3.2　アルミ顔料の選定

1 コートで従来の高輝度塗料の 2 コート仕様と同等の光沢感を得るために，極薄のアルミ顔料の検討を行った。アルミ顔料自体にも厚みがあるため，従来のアルミ顔料では**図 3** に示すとおり，理想的に配向しても塗膜表面に凹凸が生じてしまう。一方で極めて薄いアルミ顔料は，厚みが薄いため，理想的に配向すれば，塗膜表面の凹凸を低減できる。加えて，従来のアルミ顔料と比較して比表面積が大きく隠蔽性が高いため配合量の低減が可能であり，光沢低下の要因となる塗膜表層の凹凸を最小限に抑えられる。一方で，この薄さは塗膜内でのアルミ顔料の挙動を不安定化し，配向制御を困難にする要因ともなる。

図 4 に示すとおり，従来の高輝度塗料では，体積収縮が不十分なため，極薄のアルミ顔料が理想的に配向できず，期待した程の高い輝度，光沢が得られなかった。一方で，今回開発した

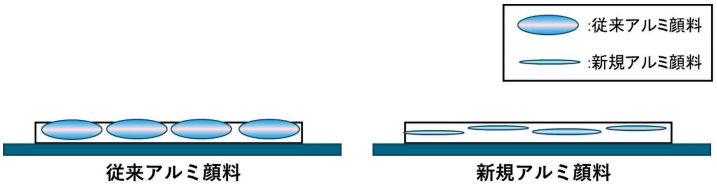


図３　アルミ顔料の表面凹凸への影響
Effect of Aluminum Pigments on Surface Roughness

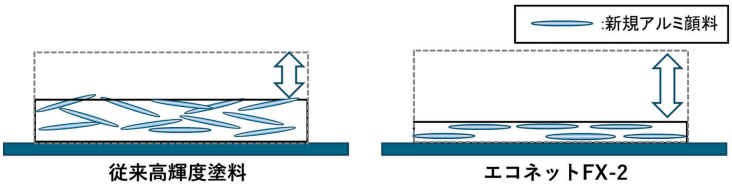


図４　極薄アルミ顔料の配向制御
Orientation Control of Ultrathin Aluminum Pigments

表４　アルミ顔料種ごとの輝度，光沢の評価
Evaluation of Brightness and Gloss for Various Aluminum Pigments

	エコネット FX-2		従来高輝度塗料	
	従来アルミ顔料	極薄アルミ顔料	従来アルミ顔料	極薄アルミ顔料
輝度 ($G_{(60°)}/L^*_{(45°)}$)	3.9	5.7	2.2	3.0
光沢 ($G_{(20°)}$)	46	96	26	34

エコネット FX-2 は体積収縮がより大きいため，均一かつ平行に配列させることが可能である。実際に，**表 4** に示すとおり，エコネット FX-2 に極薄アルミ顔料を配合することで従来高輝度塗料と比較し輝度の値が約 2 倍，光沢は約 3 倍に大きく上昇することを確認した。このように，配向性を高める設計としたことにより，極薄アルミ顔料の性能を発揮することが可能となった。また，従来アルミ顔料配合時でも配向性が向上し，従来高輝度塗料と比較して輝度，光沢の向上を確認した。

3.3　溶解度パラメータに基づくシンナーの選定

塗装時の霧化性と素材塗着後の塗料の流動性は，シンナーによる樹脂の溶解力に依存し，アルミ顔料の配向性やレベリングに大きく影響する。そのため，シンナーも高輝度外観の発現に重要な要素となっている。高輝度外観を発現するシンナーを設計するために，物質同士の溶けやすさを「分散力」「極性」「水素結合力」の 3 つの指標で数値化した Hansen 溶解度パラメータ（Hansen Solubility Parameters：HSP）を用いて検討を行った。

3.3.1　樹脂の溶解性評価とハンセン球の作成

設計したエコネット FX-2 の樹脂に対し，各種溶剤溶解性を評価し，それらの溶解，不溶の判定データを基に，Pirika.com 合同会社製 HSPiP（実践ハンセン溶解度パラメータ）ソフトウェアを用いてエコネット FX-2 のハンセン溶解球を算出した[(3) (4)]。算出したハンセン溶解球を**図 5** に示す。

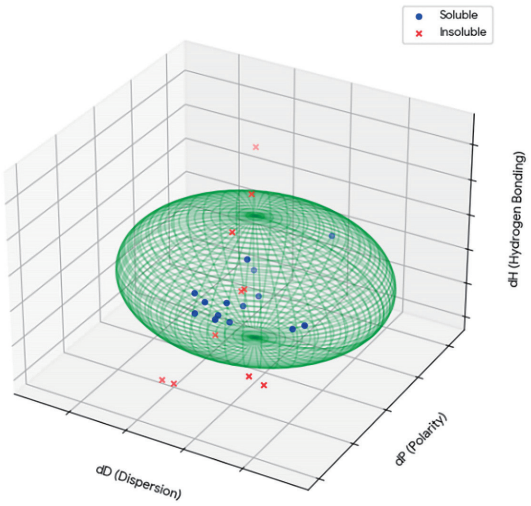


図5　エコネットFX-2のHansen溶解球
Hansen Sphere of ECONET FX-2

算出した溶解球に基づき，各溶剤の溶解性を相対的エネルギー差（RED: Relative Energy Difference）を用いて評価した。RED値はRED=Ra/Ro（Ra: 溶剤と樹脂のHSP距離，Ro:Hansen球の半径）で表され，RED<1であれば溶解，RED>1であれば不溶と判定される。

3.3.2　RED値に基づくシンナーの設計

スプレー塗装時には霧化性が良く，素材塗着後は流動性を抑えることができるシンナーは，アルミ顔料の配向に有利に働き，高輝度外観の発現に寄与する。この過程を実現するため，低沸点溶剤のRED値を1より小さくして塗装時の霧化性を確保しつつ，高沸点溶剤のRED値を1より大きくすることで流動性の制御を行った。しかし，高沸点溶剤のRED値が1を大きく超える場合，急激に樹脂が不溶化し，レベリング不良や輝度の低下が生じた。そのため，高沸点溶剤のRED値を適性領域に調整し，塗着後の流動性を制御することで，より高い高輝度外観を達成することが可能となった。

3.4　2コート仕様

本開発品は，1コート仕様で自動車内装部品等に求められる塗膜性能（耐薬品性，耐摩耗性等）を有するが，さらに厳しい耐候性や耐久性が要求される自動車外装部品や屋外製品への適用を目指し，トップコートを有する2コート仕様の検討を行った。

一般に，高輝度塗料の上にクリア塗装を行うと，トップコートに含まれる溶剤がベースコートをアタックし，アルミ顔料の配向性を乱すことで輝度が低下する課題がある。しかし，本開発品は前述の通り，新規設計樹脂により耐薬品性の高い塗膜を形成しているため，トップコート塗装時の耐溶剤性が高く，加えてエコネットFX-2に適したトップコートのシンナー設計をすることで上塗りによる輝度低下を最小限に抑えることが可能となった。さらに，2コート仕様の場合は，トップ層で耐薬品性や摩耗性等の塗膜性能を確保できるため，高輝度ベース層の配合設計自由度が広がることで輝度をより高くすることができた。

トップコートには，当社が既に市場実績を持つ汎用アクリルウレタン塗料（エコネットシリーズ，プラネットシリーズ）を適用可能である。これにより，用途に応じた機能（耐擦傷性，高耐候性等）を付与することができ，内装部品や家電製品にとどまらず，外装部品など幅広い分野へ適用できる。

4．性能評価

4.1　輝度外観

エコネットFX-2と従来高輝度塗料との輝度，光沢の比較を**図6**に示す。横軸に輝度評価値，縦軸に光沢評価値をとっており，グラフの右上ほど高輝度，高光沢となる。図6に示すとおり，

エコネット FX-2 の輝度は，従来の 1 コートのみならず，2 コート仕様の数値を上回っている。また，光沢においても 2 コート仕様と同等であることを確認した。さらに輝度，光沢を重視した高輝度ベース層にトップコートを塗装することで十分な塗膜性能を確保しつつ，輝度，光沢がより向上することを確認した。

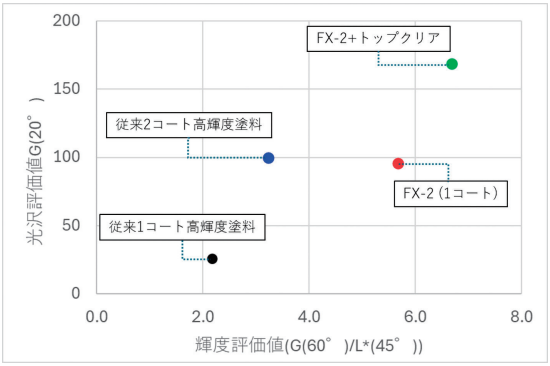


図6　従来の高輝度塗料とエコネットFX-2の輝度，光沢比較
Comparison of Brightness and Gloss Between Conventional High-Brightness Coatings and ECONET FX-2

4.2　意 匠 性

エコネット FX-2 のカラーバリエーションを**図 7** に示す。耐薬品性を有する新規アクリルポリオールの設計により，輝度を維持したまま濃色の発色が可能となった。また**図 8** に示すとおり，トップコートに着色を行うことで意匠性をより広げることも可能である。



図7　エコネット FX-2のカラーバリエーション
ECONET FX-2 Color Variations



図8　トップコートによる着色
Coloring with Topcoat

4.3　塗膜性能評価

エコネット FX-2 の塗膜性能評価を**表 5**，**表 6** に示す。

表5　エコネット FX-2（1 コート仕様）の塗膜性能［基材：ABS］
Coating Properties of ECONET FX-2 (1-Coat System) [Substrate: ABS]

試験項目	試験条件	結果
鉛筆硬度	三菱鉛筆ユニ（HB 以上）	○
付着性	1mm 碁盤目テープ剥離	○ 剥離なし
耐湿性	50℃× 98%RH × 240h	○ 剥離なし
耐アルカリ変色性	0.1N NaOH スポット法 55℃× 4h	○
耐酸変色性	0.1N H_2SO_4 スポット法 23℃× 50%RH × 24h	○
不粘着性	ガーゼ 70℃× 3h 500gf Φ40mm	○
耐日焼け止めクリーム性	市販の日焼け止めクリーム 0.5g/100cm^2 60℃× 4h	○
耐アルコール摩耗	80% エタノール 荷重 9.8N/cm^2　10 回 ガーゼの色移りなし	○
耐光性	FOM 400h	○

表6　エコネット FX-2+ トップクリア（2 コート仕様）の塗膜性能［基材：ABS］
Coating Properties of ECONET FX-2+ Topcoat (2-Coat System) [Substrate: ABS]

試験項目	試験条件	結果
鉛筆硬度	三菱鉛筆ユニ（HB 以上）	○
付着性	2mm 碁盤目テープ剥離	○ 剥離なし
耐湿性	50℃× 98%RH × 240h	○ 剥離なし
耐アルカリ変色性	0.1N NaOH スポット法 55℃× 4h	○
耐酸変色性	0.1N H_2SO_4 スポット法 23℃× 50%RH × 24h	○
耐候性	SWOM 2000h	○

4.4　標準塗装仕様

エコネット FX-2 の標準塗装仕様を**表 7** に示す。

表 7　エコネット FX-2 標準塗装仕様
Standard Coating Specifications of ECONET FX-2

主剤	エコネット FX-2
硬化剤	ポリハード ZP-16
シンナー	標準：エコネットシンナー 2K#55 PC：エコネットシンナー FXPC#55
混合比（主剤 / 硬化剤 / シンナー）	100/8/100 ～ 180
推奨膜厚	8 ± 2 μm
セッティング	常温× 5 min
乾燥条件	80℃× 30 min
基材	ABS，ABS/PC，PC/PBT，PC

5．む　す　び

本報告では，自動車内装部品等の高意匠化に貢献する高輝度塗料「エコネット FX-2」の開発について述べた。

本開発では，従来よりも大きな体積収縮を利用したアルミ顔料の配向制御と，耐薬品性に優れる新規アクリルポリオールの設計により，高輝度外観と薄膜での塗膜物性確保を可能とした。さらに新規極薄アルミ顔料の採用と HSP に基づくシンナー設計により，さらなる輝度，光沢の向上を達成した。加えて，2 コート仕様とすることで，トップコートにより輝度や光沢，塗

膜性能の向上及び着色幅の拡大を可能とした。

本製品は，高輝度外観と塗膜性能を両立させた塗料として，めっきや蒸着の代替意匠として貢献が期待できる塗料である。今後も常に高まる高輝度化への要求に合わせて改良を重ね，より高い意匠性と塗膜物性および塗装作業性の両立を目指していく。

参考文献

⑴ 藤枝宗：自動車塗装における究極の意匠を目指して，2025 年度 第 1 回講演会予稿集．日本塗装技術協会，2025, pp.10-11.

⑵ 谷島徹：塗装工程における省工程・省人化を実現する当社の塗料製品，塗装技術．2026，2026 年 4 月号．

⑶ HSPiP の概要
https://www.pirika.com/wp/chemistry-at-pirika-com/hsp/hspip/hspip-abs

⑷ 小林敏勝：SP 値、表面張力の求め方、使い方とコーティング材料への応用例，(株)R&D 支援センター，2022 年 6 月 8 日

◇◇

村山　亮太

ケミトロニクス事業部　技術部
2020 年入社，主に自動車用塗料の改良・開発に従事。

谷島　　徹

ケミトロニクス事業部　技術部
2013 年入社，主に自動車用塗料の改良・開発に従事。

オリジン技術史

（最近５ヶ年）

2022年

１月	• 釣り具用 超ミニチュアワンウェイクラッチの生産を開始。
２月	• 自動車内装向け等に速乾性と自己復元による高い耐傷つき性を両立する環境配慮型２液塗料「エコネットNS-2 EC」を開発。 • ウエアラブルデバイス用レンズ貼合装置の処理速度を従来比３倍に向上させ製品化。
３月	• 自動車内装向け等に高輝度意匠の発色性と耐薬品性に優れる環境配慮型１液塗料「エコネットVZ-3」を開発。
６月	• 住宅設備市場向けに負荷トルク調整機能を内蔵した遠心ブレーキを開発。
８月	• 自動車向け電動バックドアアクチュエータ用トルクリミッタの生産自動化計画におけるフェーズ１生産を開始。
10月	• 自動車外装向け等に高光沢で塗装作業性に優れるハイソリッド２液塗料「プラネットHI-C」を製品化。
12月	• 建材向け等に難付着金属への付着性に優れる２液塗料「オリジビルドシリーズ」を製品化。

2023年

３月	• 新型低容積チャンバー搭載の研究開発向けギ酸還元真空リフロー炉「SQ1 Ver.2」を製品化。 • 新型低容積チャンバー搭載の大量生産向けギ酸還元真空リフロー炉「MPXシリーズ」を製品化。 • 従来比約３倍となる1,000×500mmサイズに対応した，大型基板用常圧オプティカルボンディング装置（ディスプレイ貼合装置）を製品化。
４月	• 塗膜の剥離性に優れる水系ストリッパブル塗料「プラミーズSP」を製品化。
６月	• 表面摩擦抵抗が高く，滑り防止性に優れる環境配慮型２液塗料「エコネットNSL」を製品化。
７月	• パルス電源（高電圧発生回路）向けに，高逆耐電圧かつ逆回復時に急峻な電流遮断特性をもつステップリカバリーダイオードを製品化。
12月	• 自動車内装向け等に速乾性を付加した環境配慮型２液塗料「エコネットEY EC」を製品化。

2024年

３月	• 再生可能資源である非石油由来材料を使用した環境配慮型１液塗料「エコネットBO#100」を開発。
４月	• 電気自動車（EV）の「電欠」をサポートカー（EV・PHV）から救済する，可搬型EV充放電器「POCHA V2V」量産開始。
９月	• 光学用レンズ向け等にオレフィン系素材への付着性と遮光性に優れる環境配慮型１液塗料「エコネットCP-1」を開発。
10月	• EV充放電器や各種蓄電システムに搭載可能な絶縁型双方向DC/DCコンバータ「IBC10000」を製品化。
12月	• 建築・建材向け等に難付着金属への付着性と作業性に優れる焼付型１液塗料「オリジビルド コウオンシリーズ」を製品化。

2025年

２月	• 電気自動車(EV)の「電欠」をサポートカー(ガソリン車やディーゼル車)から,可搬型EV充放電器「POCHA V2V」を介して救済する，可搬型EVバッテリー「POCHA LiB」の量産開始。 • はんだ接合プロセス中のボイド挙動を動的観察できる真空リフロー炉一体型のX線試験装置「VS1-Xv」を開発。
７月	• 電動アクチュエータの過負荷保護機構として「OSML」を製品化。 • 電動駆動部の保護機構向けに「OSML」を製品化。
８月	• パルスレーザーダイオード駆動用の短パルス大電流電源（200ns，1,000Apeak，10kHz）を開発。
９月	• 塗装作業性に優れ，強靭な塗膜が得られる環境配慮型２液ウレア塗料「オリジビルドUA」を開発。

2026年

２月	• 反りウェハに対応可能な可変GAP熱制御を搭載したウェハプロセス専用のギ酸還元真空リフロー炉「MPWシリーズ」を製品化。
３月	• 素材表面の目消し性に優れる環境配慮型２液エポキシ塗料「オリジンプライマープラサフ」を製品化。

エレクトロニクス技術

● **低圧電源機器** ●
情報・通信機用

● **充電電源機器** ●
EV 急速充電器用，停電時バックアップ用

● **高圧電源機器** ●
集塵機用，UV ランプ用，医療・工業Ｘ線用，電子ビーム用，スパッタ用，半導体製造・検査用

コンポーネント技術

● **精密機構部品** ●
精密ミニチュアベアリング，スラストベアリング，ワンウェイクラッチ，トルクリミッタ，双方向クラッチ，ワンウェイヒンジ，スプリングクラッチ，各種複合製品

● **パワー半導体** ●
高電圧整流ダイオード，各種複合製品（モジュール），高速ソフトリカバリーダイオード（モジュール）

メカトロニクス技術

● **システム機器** ●
- ディスプレイ貼合装置，レンズ貼合装置，各種貼合装置
- ギ酸還元真空リフロー炉
- コンデンサ式抵抗溶接機，各種自動溶接装置

ケミトロニクス技術

● **合成樹脂塗料** ●
プラスチック用塗料，プラスチック用環境対応塗料（水系，TX フリー，速硬化，ハイソリッド，非石油由来材），めっき非鉄金属用塗料，触感塗料，光学機器用塗料，赤外線反射塗料，紫外線硬化型塗料，マグネシウム合金用塗料，蒸着用塗料，撥水・撥油塗料，潤滑塗料，遮熱・放熱塗料，電波透過金属調塗料，抗菌塗料，無反射塗料

＜編集委員会＞

委　員　長　　栗原貴志
副委員長　　古谷野道也
委　　員　　角谷康雄　　可兒　聡　　小泉智成　　渡邉俊一
事　務　局　　経営企画本部

※本誌は第89号よりオンライン（電子版）での発行に移行いたしました。

ORIGIN TECHNICAL JOURNAL 第89号

発　行　日　　2026年11月２日発行
発　行　所　　株式会社 オリジン
〒338-0823　埼玉県さいたま市桜区栄和３丁目３番27号
TEL　大代表　（048）755－9011
ホームページ　https://www.origin.co.jp/
発　行　人　　稲葉英樹
編　集　人　　栗原貴志
印　刷　所　　株式会社　洋文社

©2026年　Origin Co., Ltd.　Printed in Japan（禁無断転載・複製）



株式会社 オリジン