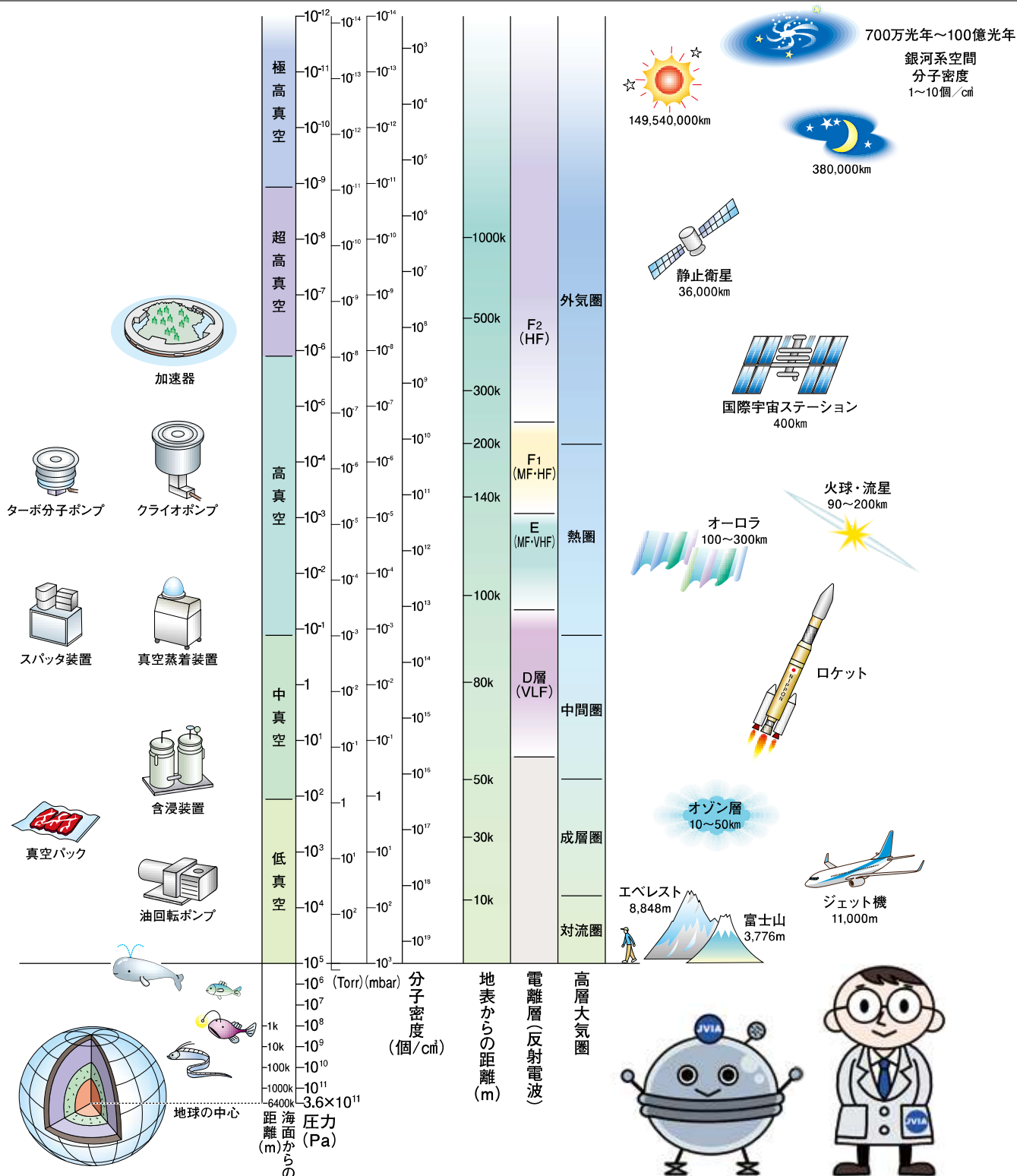


特集

修正クヌーセンの式の開発と 密封製品の信頼性評価への応用



真空ジャーナル

JOURNAL OF JAPAN VACUUM INDUSTRY ASSOCIATION

2023.4

C O N T E N T S

巻頭に寄せて	—— コロナ禍を乗り越えて先にみたいもの 田中 雅彦 ((一社)日本真空工業会 理事)	5
TECH・テク・TAKE	—— 半導体、電子機器製造などの真空装置で大活躍 装置の性能を左右する唯一無二のモータ ダイレクトドライブモータ「 τ (タウ) シリーズ」 CKD日機電装 (株) 内藤 浩司 (国内営業部 部長) 大石 英二 (国内営業部 販売促進課 課長) 伊藤 文夫 (技術部 LD2課 課長) 武田 和仁 (技術部 LD2課 主任) 寺嶋 弘二 (技術部 主査)	6
【特集】修正クヌーセンの式の開発と 密封製品の信頼性評価への応用	—— 吉田 肇 (国立研究開発法人産業技術総合研究所 計量標準総合センター 工学計測標準研究部門 圧力真空標準研究グループ 主任研究員)	12
第27回環境教育講座報告	—— 環境委員会 山原 亮 ((株)島津製作所)	17
わが社のいちおしNo.105	—— 東京電子 (株)	18
研究室紹介	—— 兵庫県立大学 大学院工学研究科機械工学専攻 田中研究室 田中 一平 助教	22
真空常識・非常識 シール面加工用ヘルパイトのご紹介	—— 平井 哲郎 ((株)日新ダイヤモンド 営業部 課長)	24
2021年度一般社団法人日本真空工業会表彰		26
第24回作業安全教育講座 (in 関西) & 移動例会	—— 安全委員会 米田 悟 (日本電子 (株))	36
JVIA 便り		37
日本真空工業会 会員会社一覧と取扱品目		40



半導体、電子機器製造などの真空装置で大活躍 装置の性能を左右する唯一無二のモータ ダイレクトドライブモータ「 τ (タウ)シリーズ」

CKD日機電装株式会社

このコーナーは真空技術が不可欠な分野、真空技術が使われる可能性のあるフィールドに足を運び、研究開発のポイント、そこで活躍する技術、将来の発展性などを分かりやすくお伝えしています。さて100回目はCKD日機電装株式会社を訪ねました。



真空対応 τ DISC (タウディスク)モータ



τ DISC (タウディスク)モータシリーズ



本社新社屋



佐倉事業所

CKD日機電装株式会社

本社所在地：〒216-0003
神奈川県川崎市宮前区有馬2-8-24

代表者：川村 茂

設立：1967年(昭和42年)

資本金：1億円

売上高：54.5億円(2021年度)

従業員数：230名

事業概要：産業機械用ダイレクトドライブモータ、リニアサーボモータ、ACサーボモータ、リニアステージ及びサーボドライバ等のFA駆動機器の開発設計、製造、販売、サービス

創業以来、制御技術にこだわるサーボ専門メーカーCKD日機電装。2000年頃からその制御技術を武器に、ダイレクト駆動に特化したモータの開発に専心。近年は、ドライバ、モータ構成部品の内製化率を上げ、高分解能の大口径エンコーダも自社開発した。要素技術をすべて揃え、真空装置に必要なダイレクトドライブモータの細かいニーズにカスタマイズで応えることで、機械装置そのものの価値を高めようとする同社は、立ち止まることなく次なる制御の姿を描く。



国内営業部 部長
内藤 浩司



国内営業部 販売促進課 課長
大石 英二



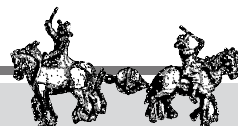
技術部 LD2課 課長
伊藤 文夫



技術部 LD2課 主任
武田 和仁



技術部 主査
寺嶋 弘二



◆電気技術者の地位向上を目指して制御技術で起業◆

Q 1967年の創立時「電気屋が活躍できるフィールドをつくる」という目標を掲げているのは面白いですね。

内藤 創業者の川村長治は、東京電機大学の一期生として、電気工学を学び、電気技術者として工作機械メーカーに勤めましたが、1967年当時は電気技術者が本来請け負うべき、工作機械を制御するという技術がまだあまり発達しておらず、その地位は認められていませんでした。そこで工作機械メーカーをスピンアウトして、電気技術者の地位向上を目指し、「電気屋が活躍できるフィールドをつくる」ということを目標に掲げこの会社を設立したのです。

大石 だから企業理念も「人間の意のままに働く動力の開発」として、電気屋らしく、人間の働きを楽にする産業機械の駆動制御、製品を開発していくことを軸にしています。

Q なるほど、それでサーボ制御技術から始まったわけですね。

内藤 はい。ただ当時のサーボ制御技術はそれほど高度なことはできませんでした。1969年に可変速モータドライバを発売したのですが、これはモータの回転速度を変えることしかできませんでした。それが半導体の技術革新とともにできることが増えてきて、1980年代に入ると、モータを止めて逆回転させるなど、回転方向の制御ができるようになり、その後、モータを指定の位置で止める、つまり位置決めなどもできるようになりました。さらに、速度やトルクも自由に制御できるようになっていきました。

Q サーボ制御技術を柱に歩んできたわけですね。

内藤 1980年代はサーボ制御の草創期にあたり、電気メーカー各社が参入してきた時期になります。弊社は、設立当初からサーボ制御技術に取り組んできましたので、技術的なアドバンテージがあり、この時期、飛躍的に発展しました。社員数名から始めた会社が一気に数百名に増えたのです。制御で起業して、制御で発展したというのが1980年代です。



ダイナパック

Q どんな製品を出してきたのですか？

内藤 1969年の可変速モータドライバ「ニッキ・パワーパック」というモータを動かすドライバから始まり、1976年に制御装置を内蔵した直流可変速モータ「ダイナパック」を出しました。これは、ドライバとモータを一体型にしたもので、止めた状態でトルクを出すサーボロックができるなど、それ以前に比べて高度なことができるようになりました。

大石 1986年に工場を川崎から千葉の佐倉に移転したのですが、ここが弊社としては初めての量産工場でした。この頃は、サーボモータそのものは別のメーカーさんからOEMで供給してもらい、弊社ではモータを制御する基板の部分をメインに量産をして、モータと一体化するという事業をしていました。

◆ダイレクトドライブモータの開発に専心◆

Q そして2000年頃からダイレクトドライブモータにこだわり始めたわけですね。

内藤 2000年の少し手前頃から大学の先生と相談しながら、リニアサーボモータの開発を手掛け始めました。リニアサーボモータとは、マグネットを直線状に敷きつめた構造です。それをグルッと円盤形に巻いたものがいわゆるダイレクトドライブモータの構造になります。それまでの一般的なサーボモータと異なり、モータの力だけで大きなトルクを発生させることができるため、ギアなどの減速機構(中間機構)を使わずに直接(ダイレクト)、駆動(ドライブ)することができます。そして2003年に「 ϵ (タウ)シリーズ」として、ダイレクトドライブモータ/リニアサーボモータの発売を開始しました。

大石 タウシリーズのタウとは、ギリシャ文字で ϵ をあらわしていて、モータに必要なトルクの t からとっています。

Q そもそもダイレクトドライブモータを始めようと思ったきっかけは？

内藤 先ほどお話したように、1980年代、我々はモータをOEM



ニッキパワーパック

供給してもらい、それを制御するドライバを作り、組み合わせるビジネスで伸びてきました。しかし、その後、大手の電機メーカーが、同じ分野に参入してきました。そうすると、弊社としては何とか差別化をはからなくてはならない。折しもバブルが崩壊した頃で、もっと競争力をつけなくてはいけないということもありました。

大石 当時、テーマとしてあったのがダイレクトドライブモータです。従来のサーボモータというのは、モータにギアなどの中間機構がつき、その先で仕事をするため、極端な話をすれば、モータはなんでもいいというところがあります。しかし、ダイレクトドライブモータは、この中間機構がないため、モータの動きそのものがお客様の装置の性能を左右します(図1)。それまでのサーボモータが、機械技術者がギアなどの中間機構でモータの動きをコントロールしていたのに対して、ダイレクトドライブモータは、電気技術者が舞台上に立つものだったのです。ある意味、創業者である川村の思いを体現したものと言ってもいいかもしれませんね。

内藤 この時点で、ダイレクトドライブモータをモータ周辺機構も含めた駆動装置としてお客様に提供する、そんな姿がだんだん見えてきました。そしてニッチではあるかもしれないが、そこには確実にニーズがあることも感じました。

Q それが2000年頃ですね？

内藤 はい、そしてこの頃から、カスタマイズして、そのお客様にぴったりに合わせた最適なダイレクトドライブモータを提供するということに取り組みました。ダイレクトドライブモータというのは、お客様の装置の心臓部になり、その装置の性能を左右するものですから、「こうして欲しい」という個別のかなり細かいニーズがでてきます。それに対応し、その上でモータ側から見て、もう少しこういう風にしたらお客様の装置に付加価値が生まれるのではないかとという提案をさせてもらうビジネススタイルを作り上げていきました。そしてそれは今でも活かされていて、我々のビジネスには、一般的にはあまり使われなくても、特定のお客様には絶対必要というよ

うな特殊な製品が何種類もあり、それが柱になっています。

Q ダイレクトドライブモータはどういう分野で使われ始めたのですか？

内藤 ギアなどの中間機構がないため機械摩擦によるエネルギーロスが少ない、バックラッシュがなく剛性が高く制御性が良い、大量の潤滑油を使用しない特徴を活かして半導体や電子部品の製造分野に多く採用されました。ダイレクトドライブモータは非常に緻密で高性能なエンコーダという光学式のセンサを搭載しており異物の付着を嫌うため、比較的クリーンな環境でないと使えないということもありました。クリーン環境と相性が良かったことで、2000年頃からそういった業界での採用がどんどん増えていきました。

Q サーボモータとの価格差はどのようなのですか？

内藤 少し前までダイレクトドライブモータはコストが高く、採用されるハードルが高かったのですが、今はそれほど価格差がなくなってきています。最近では、ダイレクトドライブモータ自体が一般化してきてコストもだいぶ下がっていて、その境目はなくなりつつあると思います。そのため、例えば、細かい位置決めをしたい、低速でなめらかに回したい、緻密にトルク制御をしたいなど、高性能な使い方をしたい場合は、ダイレクトドライブモータの採用が増えてきています。

Q ダイレクトドライブモータのサーボモータ全体での市場シェアは？

大石 数%くらいでしょうか。簡単に使えるということは利点ですけど、先ほどお話ししたように、使用環境的な制約があります。一般産業で言うと、粉塵や場合によっては水がまわっているような現場もありますが、ダイレクトドライブモータの場合、コイルやマグネットが非常に露出しやすくなっているの、そういう現場ではちょっと厳しいですね。その辺である程度のすみ分けができていないのではないのでしょうか。

◆ダイレクトドライブモータの真空対応は難しい◆

Q ダイレクトドライブモータで真空対応を始めたきっかけは？

内藤 ダイレクトドライブモータの開発を進めていた2000年頃に、半導体製造用の真空装置を作っているメーカーさんから、真空の雰囲気でするロボットを作りたいので、ディスク型モータをベースに、ロボットアームを動かすためのアクチュエータを開発して欲しいという要望がありました。つまり、我々はダイレクトドライブモータの開発当初から、真空装置向けのアプリケーションにかかわることができました。ありがたいことでした。

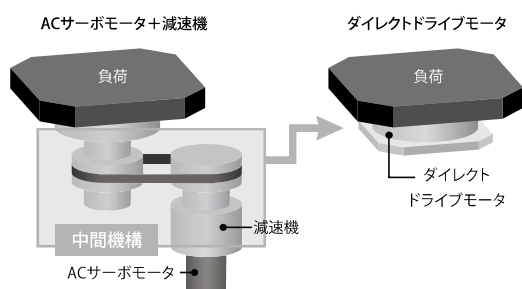


図1 ダイレクトドライブモータのメリット

Q 真空対応のダイレクトドライブモータを作るためのポイントは？

内藤 一般的なダイレクトドライブモータの内部構造は、大まかに言ってしまうと、光学式や磁気式などのセンサをもったエンコーダ部の上に、コイル部分のステータ、軸受（ベアリング）、そして、回転するロータで構成されます（図2左）。これを真空中で使う場合、真空中に入れられるものと入れられないものを区切ることが必要になります。ロータは、マグネットの表面処理をすることで真空中に入れることができますが、ステータはコイルの絶縁材に有機成分が含まれるため真空下ではガスを発生させてしまうことがありますので区切ることが必要です。これが真空対応の主なポイントになります。

Q 具体的にはどうするのですか？

内藤 有機物が真空中に露出しないよう特殊な密封構造をつくります。具体的には、ロータとステータの間にステンレスの隔壁を入れて、有機系ガスの発生源を閉じ込めてしまうという構造です（図2右）。隔壁の代わりに真空シールという大気環境と真空環境を隔離するためのシール材を入れることもあります。そしてコイル全体を気密にしています。

伊藤 具体的に真空シールを使う場合をお話ししますと、ダイレクトドライブモータ内部を真空シールで区切り、回転テーブル部分をお客様の装置の真空チャンバー内に入れ、下半分のモータそのものを大気圧である真空チャンバーの外側に置くような形で使います（図3）。

武田 もう一つの隔壁を使う例としては、モータとエンコーダの回転する部分を全部真空中に入れて隔壁で区切り、コイルとエンコーダのセンサ基板は大気中に隔離するという形もあります（図4）。

Q この形（図4）だと、真空状態を保つのが大変そうですね。

寺嶋 モータの構造がかなり複雑になりますので、設計のレベルが上がります。エンコーダを隔離する構造が複雑で、ある程度限

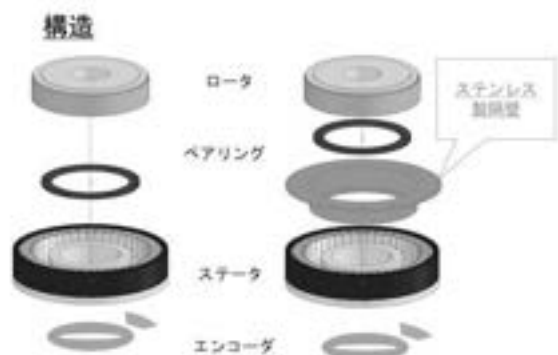


図2 τ DISC モータの構造（右側が真空対応）

られたスペースの中に納めなければならないので、あらゆる構成部品の間（せめぎ）あいになってきます。また、モータはトルクを発生しますので、そのトルクに耐える剛性も必要になります。モータの剛性やコンパクトにまとめるというノウハウは、これまでのモータづくりで培ってきましたので、弊社の強みの一つになっています。同じ体積のモータであれば、他社より大きなトルクが出せるという自信があり、非常にコンパクトでありながら、大きな力を出せるモータをつくる技術力もっています。

Q エンコーダを隔離する構造とはどういうものですか？

伊藤 この場合（図4）は、回転する部分（メインスケール）が全部真空中に入っています。この時、一番問題になるのが、スケールを透過した光を読み取るセンサ部です。光学式センサの場合、読み取り部の基材はガラスエポキシ製ですので大気中になければなりません。そうすると、エンコーダも真空中と大気中を分けなければならなくなり、これをどうするかが問題でした。しかし、弊社ではこのエンコーダを内製化していたこともあり、解決策を出すことができました。コストメリットも出せて、いろいろなトータルソリューションの提供につながっています。

武田 エンコーダも最初は光学式のみでしたが、厚みのあるガラス製隔壁を間に入れることで距離が遠くなってしまい、検出が上

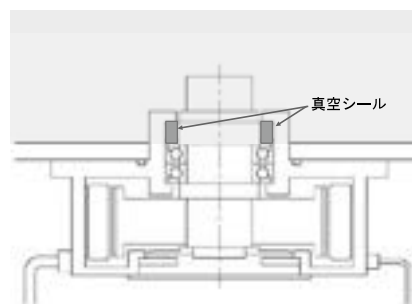


図3 真空対応ダイレクトドライブモータの断面（真空シール方式）

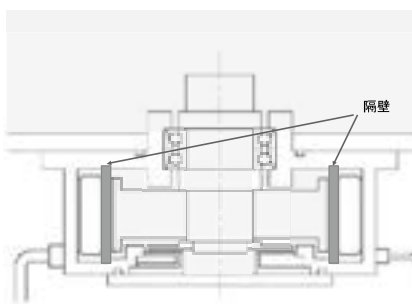


図4 真空対応ダイレクトドライブモータの断面（隔壁方式）

手くいかなくなり思うような性能が出なくなるということが起こってきます。隙間の間隔や出力について試行錯誤した結果、たどり着いたのが磁気式のエンコーダです。このエンコーダを自社開発し、今では真空用に使っています。

◆個別のニーズに細かく応えて真空対応を実現◆

Q 真空中と大気中を区切るシールと隔壁の使用法の違いはなんですか？

内藤 当初は高真空環境下の発ガス対策で実績と信頼性のある隔壁構造の真空モータがなく、真空シール方式が一般的でした。また、市販のエンコーダは真空対応しているものはなく、真空シールを用いてモータとエンコーダを大気側に置くしかありませんでした。このため今でも実績と安心感から真空シールを好むお客様もいます。真空シールを使えば、モータ自体は大気用モータの構造と同様にできるのでモータ設計も容易になる一方で、真空シール自体の摩擦抵抗が意外に大きいというマイナス面があります。そうすると、この摩擦抵抗のために本来必要なトルクの何十倍ものトルクが必要になることがあります。それに比べると隔壁の方は、抵抗になるのが軸受の摩擦くらいしかありませんので、トルクは小さくてよく、モータそのものも小さくできます。

寺嶋 最初の頃はシールを使い、モータはエンコーダを含め全て大気側に区切っていましたが、その後エンコーダも自社で作るようになり、モータとエンコーダの回転部を真空に入れることができるようになりました。お客様のご要望にお応えしていくうちに、ノウハウがたまってきたということでしょうか。

Q 真空対応のダイレクトドライブモータはほとんどがカスタマイズですか？

内藤 そうですね。真空中でお客様が何をしたいのか、また、その真空中で発生しても大丈夫なガスはあるのか、真空中に持ち込んで良い素材、悪い素材など、ケースバイケースでいろいろありますので、その辺はよくお客様と話をして作っていくことになります。例えば、軸受をステンレス鋼にするか、セラミックスにするか、接着剤を使っても大丈夫か、など個別に細かく相談していきます。

武田 言ってみれば、お客様毎に作りがまったく違います。金属隔壁で真空の質を重視するお客様もいれば、コスト重視でコイルをエポキシ樹脂で包み、多少有機ガスが出たとしてもプロセスに影響が出ないように大型のポンプで排気してしまうという場合もあり

ます。それぞれアプローチが違うので、いかに個別に対応していくかが苦労と言えれば苦労ですね。

◆限られたスペースに真空対応の工夫を詰め込む◆

Q お話を聞いていると真空対応のモータをつくるのは結構大変そうですね。

武田 まずは限られたスペースに納めるのが大変です。弊社のダイレクトドライブモータは、もともとコンパクトに作っていますので、そこに真空対応のために隔壁などのパーツを入れ込むということがなかなか難しいです。さらに、コイルとマグネットの距離が通常であれば1mm前後ですが、その間に隔壁を入れると距離が長くなってしまい、トルクを出すのが難しくなります。力が出せないモータになるので、その辺のトレードオフも考慮し、いかに必要な力を出せるモータにするかということを考えなければなりません。また、どうやって空気が漏れない構造にするか、簡単に作れるようにするか、発生した熱をどうするかなど、課題がたくさんありました。

Q 発熱も問題になるのですね。

武田 真空対応のモータの場合、他のモータに比べて発熱しないようにしています。温度が上がると金属表面などからガスが出てしまう可能性があります。損失を少なくするという作りにして発熱を抑えています。

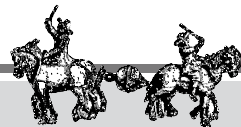
Q 損失を少なくするとは具体的にどういうことですか？

武田 鉄心の中に渦電流が流れることによって生じる鉄損と、コイルに電気を流したときに発生する銅損などを少なくするために、電流値を下げたり、コイルの抵抗を下げたりとか、うまくトルクを発生させながら熱を発生させにくくするようなコイルの最適化設計をしています。最近は設計をコンピューターのシミュレーションだけで行うことが多いのですが、弊社の場合は、実際に実機を作って検証をしています。確実なフィードバックを行えることが他社にない強みになっています。

伊藤 熱の問題は我々モータを扱うメーカーにとっては永遠の課題です。電流を流しても100%の効率にはならない。必ず熱などのロスが出ます。真空中では何らかの方法でこれを冷却してやらないと、熱がどんどん上がっていつてしまう。だから冷却方法もいろいろと考えていますが、できる限りロスのないモータを作りたいと思っています。

Q 真空と大気を隔てる隔壁の厚さはどのくらいですか？

武田 隔壁は金属やガラスを使い分けますが、コイル部の非磁性



金属隔壁についていえば、概ね1mm前後です。加工方法は試行錯誤の連続でした。薄板溶接で製作する場合より難易度は上がりますが、切削加工による製作を行なう例が多いです。

Q 真空対応で苦労するところはどんなことですか？

伊藤 コストと機能のトレードオフが非常に多く、その辺を考えるのが大変ですね。モーターメーカーなのでトルクを出したい、そのために鉄心とマグネットを近づけたい。しかし、真空対応の場合は、近づけようとしても隔壁が入るためにそれができない。それなら隔壁を小さく薄くしたいのですが、そうすると、真空中ではつぶれてしまう可能性が出てくるので、薄くもできない。また、加工の問題もあり、この辺の匙加減が苦労する点であり、腕の見せどころになります。

寺嶋 真空製品というのは、基本的にボルトなどの細かい部品も標準の部品とは違うものを使います。機械加工後に表面処理や化学研磨などの処理をして、専用の密封した梱包で入ってきた部品をさらに洗浄する工程があるなど、真空対応製品は通常の製品とはまったく別の生産ラインで作ることになります。生産設備や作業者の動きなど、特別な真空対応のノウハウを、製品化した時から蓄積し、育ててきています。つまり、真空対応の製品を作るために、ダイレクトドライブモーターそのものの技術だけではなく、生産、検査、梱包も含めてそのノウハウを蓄積してきました。もちろん、最初はかなり苦労しましたが、今では簡単に他社がまねできるものではないと自負しています。

◆次に描く姿は非接触回転モータ◆

Q 真空用ダイレクトドライブモータは、現在、具体的にどんなところで使われているのですか？

内藤 最初の頃は搬送系、ロボットアームの駆動を手掛けることが多かったのですが、近年では成膜室（プロセスチャンバー）内の四角いガラス板のターンテーブルを回すなど重要工程の駆動系にも使われるようになりました。回転速度の制御や位置決め、特にモータに内蔵した高分解能のエンコーダにより、旋回動作と同時に微小角アライメントレベルの位置決めができるので、こういうところでよく使われています。あとは、モータを2軸組合わせて、縦方向と横方向への回転ができるようなアクチュエータなどもあります。これは、真空中でシリコンウェハーを縦方向と横方向に動かすようウェハー旋回・俯仰駆動テーブルで、今、いろいろところで使われ始めています。

Q 真空関係に使われているダイレクトドライブモータはどのくらいの比率ですか？

内藤 弊社のダイレクトドライブモータの中で真空装置のアプリケーションに使っていただいているものは国内販売台数の4割くらいです。国内では半導体関係のお客様が多く、真空チャンバー内部とその周辺で使われているケースが非常に多いですね。金額ベースでも4割強になります。半導体装置業界は今調整局面ですが、長期的には大きな成長が見込まれる有望な市場です。

Q 現在の課題等がありますか？

武田 200℃から300℃の高温環境で使いたいお客様も多いので、エンコーダで使っている部品も高温に対応できる部品に変えていく必要があります。今はある程度までの温度までなら使えるのですが、200℃になると少し厳しいものがあります。構造を工夫する、素材を考え直すなど、我々は構成要素をすべて内製化していますので、広い視野でこの高温対応に挑戦して行きたいです。

内藤 さらに、今の構造は、軸受部がダイレクトドライブモータの唯一の接触部になりますが、接触部があれば、そこからゴミが出る可能性があります。そこでこの部分を非接触にして、回転駆動できるような構造、磁力で回転部と固定部のギャップ自体を制御しながらその位置を保持するような磁気軸受の開発を進めています。磁気浮上と言って空中に浮く形になります。これだとまったく接触部のない駆動機構を実現することができます。ゴミの発生がなくなりますので、微細で緻密な精度が要求される半導体製造装置などで喜ばれるのではないかと思います。

Q 真空機器メーカーに言いたいことがあればお願いします。

内藤 これまで当社にご相談をいただいた真空装置メーカー各社様には多大なるご指導をいただきました。時には苦しみながら、新たな価値を生み出すために互いの得意分野で協力し合う良きパートナー関係を構築できたことには感謝の言葉しかありません。我々は制御から始まったメーカーなので、制御には非常に強く、それがドライブの技術になり、エンコーダも内製化することで、製品の精度を高めてきました。そして現在、ダイレクトドライブモータを構成するすべての技術を獲得した今だからこそ、システムとして、トータルにご相談いただけるようになりました。お客様の「こういうことがやりたい」というどんなご要望にもお応えするために、最適な提案をたくさんご用意しております。まずはご相談をいただければと思います。

～長時間にわたり、興味深いお話をいただきましてありがとうございます～