道程

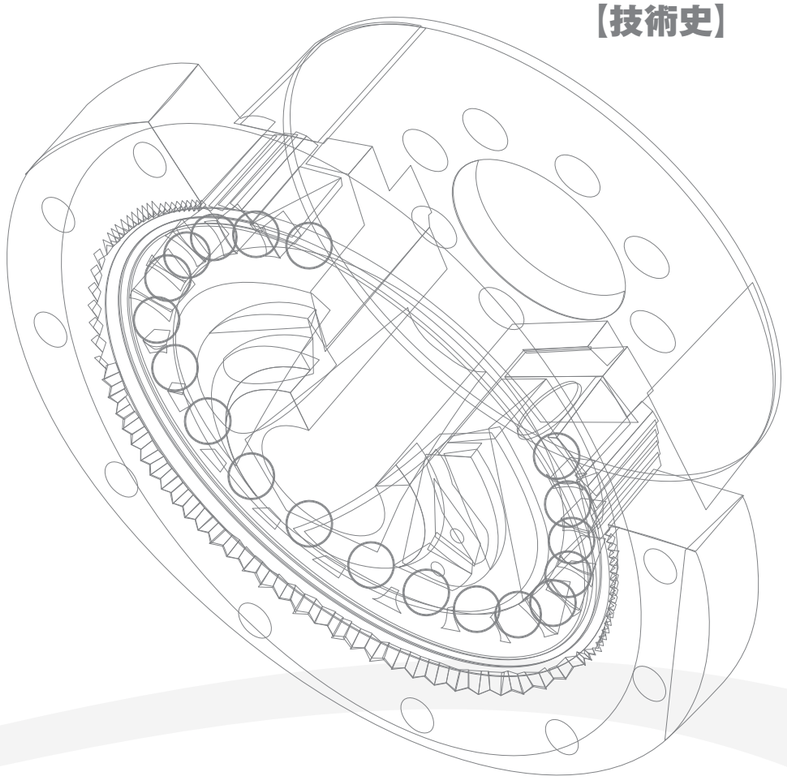
株式会社 ハーモニック・ドライブ・システムズ 50年のあゆみ

【技術史】

道程

株式会社 ハーモニック・ドライブ・システムズ 50年のあゆみ

【技術史】



目次

技術史　総括 …… 4

第1章　ハーモニックドライブ®導入の黎明期

1-1　マッサーの発明 …… 7
1-2　長谷川歯車の技術導入 …… 9
1-3　国産1号機の生産 …… 10
1-4　量産の開始 …… 11

第2章　50年の技術概要

1. ハーモニックドライブ®製品群

2-1-1　カップ型CSシリーズの開発(型番20 ～ 100) …… 13
2-1-2　大型型番の開発(型番130 ～ 200) …… 15
2-1-3　小型化製品の開発(型番17、14、11、8、5、3) …… 15
2-1-4　特別用途向けの開発 …… 17
2-1-5　ロボット用Rシリーズの開発(型番20 ～ 100) …… 19
2-1-6　高強度Sシリーズの開発 …… 20
2-1-7　薄型CSFシリーズの開発 …… 21
2-1-8　超薄型CSDシリーズの開発 …… 22
2-1-9　シルクハット型SHシリーズの開発 …… 23
2-1-10　パンケーキ型の開発(フラット型)
(FB、FR、FD、FH、デファレンシャル、J) …… 23
2-1-11　ユニット型の開発 …… 26
2-1-12　ベントサブ(石油掘削用)の開発 …… 28
2-1-13　車載型の開発 …… 30
2-1-14　宇宙用ハーモニックドライブ® …… 30
2-1-15　ハーモニックドライブ®の変遷 …… 32

2. メカトロニクス製品群

2-2-1　サーボアクチュエータの開発 …… 34
2-2-2　レスポンシンの開発 …… 37
2-2-3　FH2000シリーズの開発 …… 38
2-2-4　位置決め装置群の開発 …… 40
2-2-5　制御装置群の開発 …… 42
2-2-6　ダイレクトドライブモータKDUシリーズの開発 …… 43
2-2-7　レーザースキャナ用LSAの開発 …… 44
2-2-8　エンコーダ(センサ)の開発 …… 45
2-2-9　精密遊星減速機アキュドライブ®のアクチュエータ展開 …… 46
2-2-10　メカトロニクス製品の変遷 …… 47

3. アキュドライブ®(遊星歯車)製品群

2-3-1　初期の遊星減速機BP、MHシリーズの開発 …… 48
2-3-2　HPシリーズの開発 …… 49
2-3-3　HP-Aシリーズの開発 …… 50
2-3-4　HP-Cシリーズの開発 …… 51
2-3-5　HP-F小型シリーズの開発 …… 51
2-3-6　HPGシリーズの開発 …… 52
2-3-7　HPNシリーズの開発と海外展開 …… 54
2-3-8　アキュドライブ®の変遷 …… 55

技術年表 …… 56

用途 …… 60

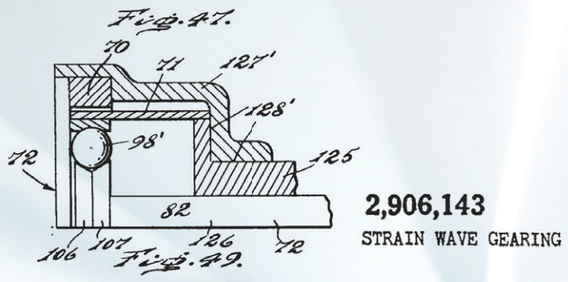
技術に関する表彰・受賞一覧 …… 62

編集後記 …… 63

凡例

1. 本史は技術史、技術年表、用途、技術関する表彰・受賞一覧に分けて構成した。
2. 掲載内容は原則として2020(令和2)年11月までとし、一部については発行までの内容を掲載した。
3. 年号は西暦と和歴の併記を基本とした。
4. 数字は原則として算用数字を用い、億・万の補助単位を用いた。
5. 自社名については原則として「当社」と表記した。
6. 企業名については(株)、(有)を用い、原則掲載当時の名称とした上で、一部については適宜慣用句を用いた。
7. 用字用語は常用漢字、現代仮名づかいを用いた。ただし専門用語、固有名詞、慣用句などにはこれによらないものもある。

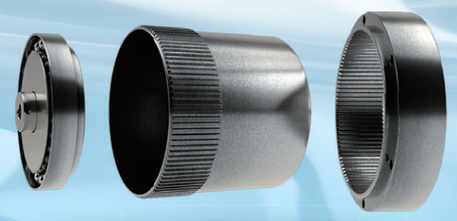
技術史



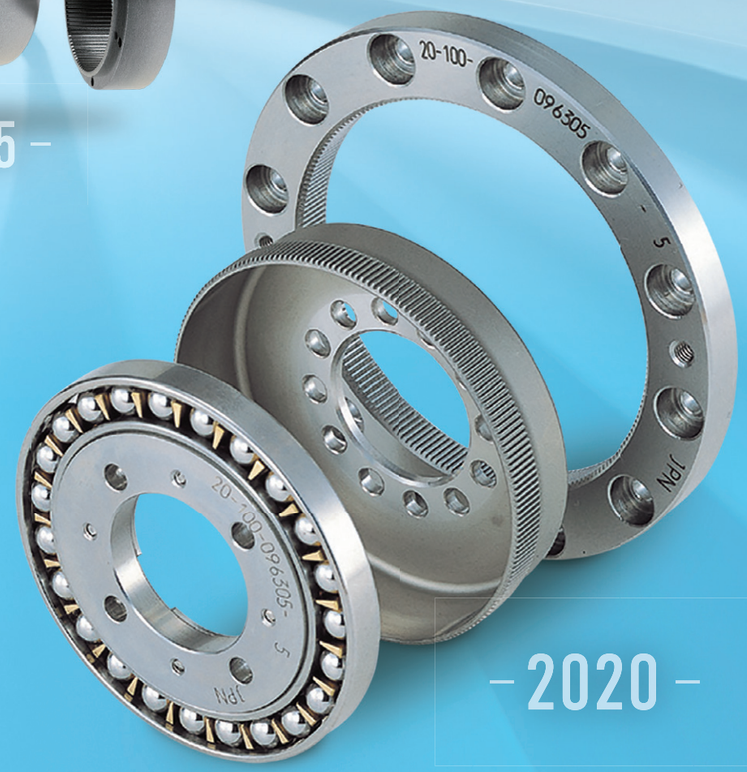
2,906,143
STRAIN WAVE GEARING

－1955－

INVENTOR.
C. Walton Musser
［1909-1998］



－1965－



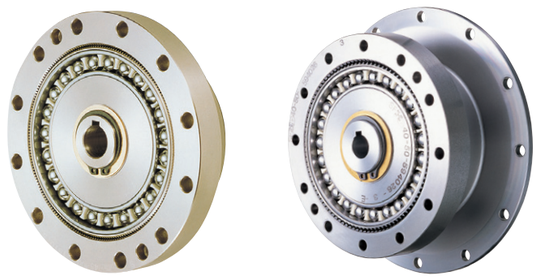
－2020－

技術と技能で拓く未来へ

FINE MECHANICS & TOTAL Motion CONTROL

卓越した技術の結晶が、今、ここに。

ハーモニックドライブ®
それは、ユニークな波動歯車装置。
ロボットや半導体製造装置、FA 機器・・・。
さらに人類の夢を育む宇宙までも
ハーモニックドライブ® は活躍している。
そして、精密なモーションを生む
メカトロニクス製品の数々。
光学測定機器、医療機器、印刷機械など
産業や科学技術の重要な一翼を担っている。
ハーモニック・ドライブ・システムズは、
さらに今後の世界的な技術進歩に貢献し
21 世紀を支える技術の開発を図り、たゆまぬ前進を続けていく。



HarmonicDrive®
The Hallmark of Hi-Precision

HarmonicDrive®

原理説明の動画が
ご覧いただけます

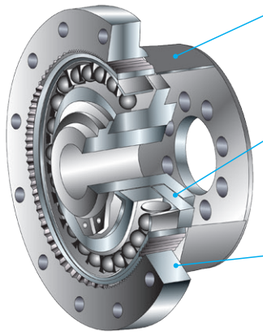
特長

●高回転精度・高位置決め精度　●小型・軽量　●高減速比　●高トルク容量　●ノンバックラッシ
●高効率　●静かな運転

構造

金属の弾性力学を応用した独創的な動作原理と、わずか3つの基本部品（ウェーブ・ジェネレータ、フレクスプライン、サーキュラ・スプライン）で 構成されている波動歯車装置であるハーモニックドライブ（登録商標）は、他の歯車装置にはない優れた特長がある。

ハーモニックドライブ® 単体（コンポネントタイプ）の構造



フレクスプライン

薄肉のカップ型形状をした金属弾性体の部品。カップの開口部外周に歯が刻まれている。フレクスプラインの底をダイヤフラムと呼び、通常出力軸に取り付ける。

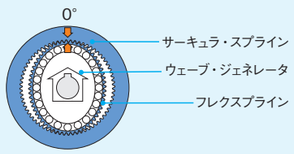
ウェーブ・ジェネレータ

楕円カムの外周に、薄肉のボール・ベアリングがはめられ、全体が楕円形状をした部品。ベアリングの内輪はカムに固定されているが、外輪はボールを介して弾性変形する。一般には入力軸に取り付ける。

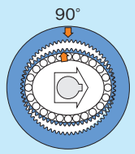
サーキュラ・スプライン

剛体リング状の部品。内周にフレクスプラインと同じ大きさの歯が刻まれており､フレクスプラインより歯数が2枚多くなっている。一般にはケーシングに固定される。

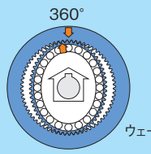
動作原理



基本部品3点を組み合わせる。フレクスプラインは、ウェーブ・ジェネレータによって楕円状にたわめられ､楕円の長軸の部分でサーキュラ･スプラインと歯がかみ合い、短軸の部分で歯が完全に離れた状態になる。



サーキュラ･スプラインを固定し、ウェーブ･ジェネレータ（入力）を時計方向へ回すと、フレクスプラインは弾性変形し、サーキュラ・スプラインとの歯のかみ合い位置が順次移動していく。

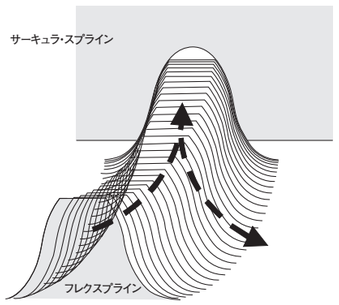


ウェーブ・ジェネレータ1回転

ウェーブ・ジェネレータが1回転すると、フレクスプラインはサーキュラ・スプラインより歯数が2枚少ないため、ウェーブ・ジェネレータの回転方向とは逆方向へ、すなわち反時計方向へ、歯数差2枚分だけ移動する。
一般には、この動きを出力として取り出す。

歯の動きとかみ合い

ハーモニックドライブ®は、一般的な歯車の動きとは異なり、その独特な歯の動き（動作原理）により、ノンバックラッシで、微小角送り（1パルス送りに追従）、位置決め精度に優れている。また、180度対称の2箇所で、全歯数の30%以上の歯が同時にかみ合うため、高トルク伝達が可能となる。



第1章 ハーモニックドライブ®導入の黎明期

1-1 マッサーの発明

技術的な発明はある日突然に現れることはまれで、先行発明から見いだされるのが一般的であろう。ハーモニックドライブ®も例外ではない。先駆的な発明の一例として、米国技師オットー・ルドルフ・ギショー氏による1925(大正14)年の英国特許が挙げられる。歯数差をもつ2個の円板状歯車を向かい合わせたもので、薄肉で可撓性のある一方を接触片で厚板の他方に押し付け、その接触片を回転して歯のかみ合い位置をずらしていくことによって、歯数差による両円板をゆっくりとした相対回転を得る機構である(**図1**)。

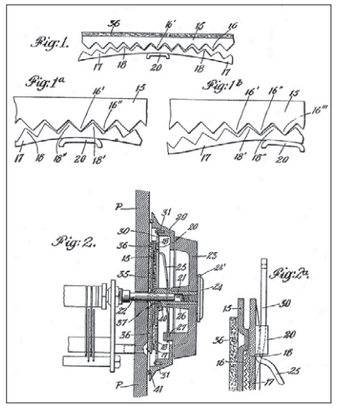


図1

また、英国のアーネスト・ホイル氏による1930(昭和5) 年の英国特許も先行発明といえる。固定された薄肉円筒の内周が、これにはまり合う内側つまみの円筒部の外周よりもわずかに大きく、この両者を外側つまみに取り付けた3カ所のローラで接触させる構造を考案している。この発明は可撓性の薄肉円筒を使うという点で、ハーモニックドライブ®の原型ともみられるが、歯のかみ合いではなく摩擦伝動を利用したものである(**図2**)。

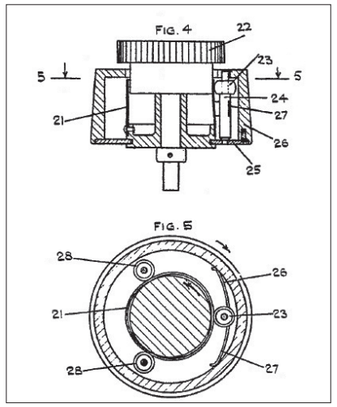


図2

このようにハーモニックドライブ®には先行的な発明が存在していたが、その事実は決して発明者であるC.ウォルトン・マッサーの創造力と、その卓越した着想を疑わせるものではない。先行発明は芽生えのような状態にあったものである。それらに新しい光を当てることで驚くほど豊かな発展性を見出し、それを現実のものとしたのはマッサーの功績といえる。

自宅実験室で作業中のマッサー

ハーモニックドライブ®は1950年代半ばに米国のUSM（ユナイテッド・シュー・マシナリー）社で開発された。発明者のマッサーは15年間国防省の研究顧問を務め、無反動砲、航空機パーソナルカタパルト、機雷試験装置などを含む 250もの発

明発見を行うという天才肌の人物だった。ハーモニックドライブ®を発明した当時はUSM社の研究顧問を務めていた。

ハーモニックドライブ®の発明は「Strain Wave Gearing（たわみ波動歯車装置）」として1955（昭和30）年に米国で特許出願され、1959（昭和34）年米国特許となった。

図3、4、5は同特許の明細書に示されている説明図であり、現在のハーモニックドライブ®の出発点となったものである。

1960（昭和35）年4月には米国の技術誌『Machine Design』にマッサーが寄稿した記事が掲載された。機構や作動原理、特性、多くの応用、設計例が詳しく解説された記事であった。

また、機械試験所（当時）の高田・矢田両氏が翻訳した記事が1961（昭和36）年1月から4月にかけて日本の『マシナリー』誌に掲載されたため、日本でも知られるようになった。

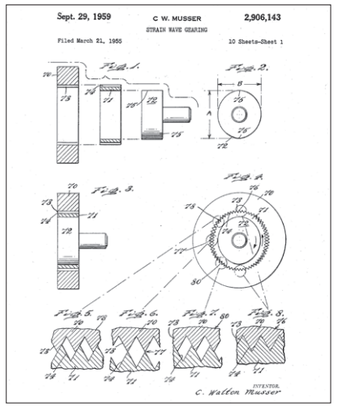


図3

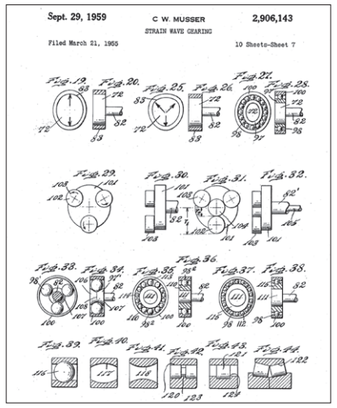


図4

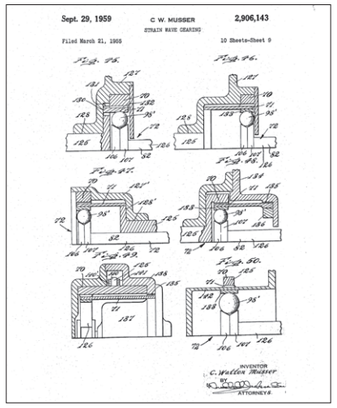
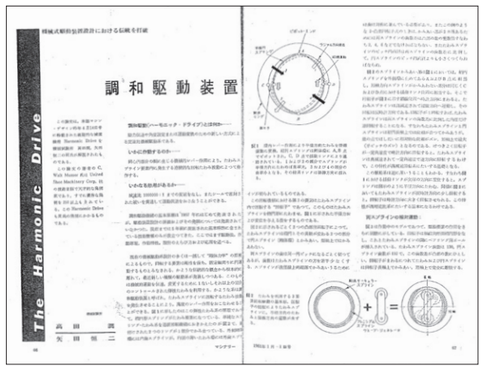


図5

『Machine Design』誌



『マシナリー』誌

さらに当時のソ連でも1962（昭和37）年に『ベストニク・マシノストロエニア』に要約が掲載された。

独創的なマッサーの発明は、マッサーをはじめとするUSM社の技術陣の非常な努力によって、実用的な製品へと開発がすすめられた。

そのハーモニックドライブ®は、以下の3部品を組み合わせたものが基本構造である。

①楕円状で転がり軸受を備えた波動発生器のウェーブ・ジェネレータ

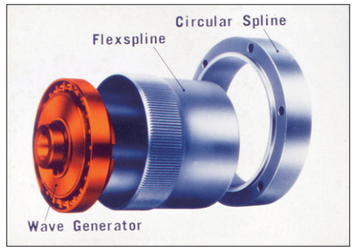


図6

②薄肉で可撓性があり、外側に歯を刻んだ弾性歯車のフレクスプライン

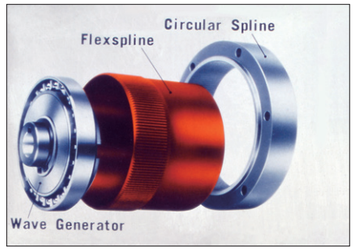


図7

③剛性のある内歯車のサーキュラ・スプライン

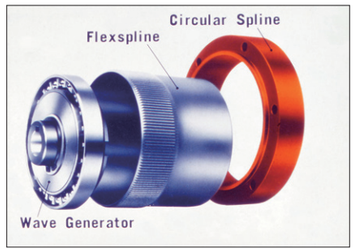


図8

具体的にはフレクスプラインの内周にはめ込んだウェーブ・ジェネレータが時計方向に 1回転すると、フレクスプラインは弾性変形し、サーキュラ・スプラインとの歯数差2枚分だけ反時計回りに移動する。

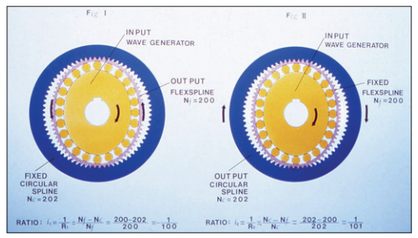


図9

この構造によって以下の特長を実現していた。

- 1段で大きな減速比が得られる。
- トルク容量が大きい。
- バックラッシを非常に小さくすることができる。
- 速比が大きいにもかかわらず効率が高い。
- 歯の滑りがきわめて小さい。
- 完全な機密機構が可能という独特の構造が容易に実現できる。

1-2 長谷川歯車の技術導入

（株）長谷川歯車とUSM社が技術導入契約を結んだのは1964（昭和39）年6月である。契約内容はハーモニックドライブ®機構に関する基礎理論、原理、設計法、応力計算法、材料および品質管理法、一般市場向け製品の見本・仕様・能力・特性・作動技術・設計仕様書・製作法・検査と試験法・エンジニアリングおよび楕円研削装置を含む製造上の諸技術であった。

同年 11月に日本政府から「ハーモニックドライブ®実施権契約」が正式に認可され、1965（昭和40）年1月にはUSM社で技術研修が行われた。「ハーモニックドライブ®技術研修団」として団長の長谷川喜一郎副社長、亀田博開発部長、石川昌一技術課長、在田光夫生産技術課長の4名が参加し、ハーモニックドライブ®の原理、特許、強度計算、設計法、製作方法、検査・測定方法などの技術全般を分担して習得した。

石川昌一は技術研修中の最も印象深かったこととして、フレクスプラインの撓みに関するエピソードを語っている。

「マッサーは講義のとき、話のはじめに金属のコップを取り出し、コップの開口部に内径よりわずかに長いスティックを挟んだものを示し、コップを指で変形させ、スティックをコップの底に落とすように私たちに言いました。私たちはスティックに対して直角にコップの縁を押して、少しコップを楕円にすれば、スティックがコップの底に落ちるものと思って、懸命に押しましたが落ちま

せん。すると貸してごらんと言って、マッサーがコップを受け取って、少しコップの縁を押したら難なくスティックはコップの底に落ちました。そして種明かしをしてくれました。それはコップの底板の厚さのせいでした。コップの底板がある程度厚ければ、コップを直径方向に押すとそれとは45度方向にちょうど四角になるように変形するのでした。底板が薄ければ楕円になるのです。ハーモニックドライブ®のコップの底板であるダイヤフラムは、薄いことが本質的に必要だったのです。しかし出力トルクには十分に耐えなければなりません。ダイヤフラムの構造にも深い検討がいるのでした」。

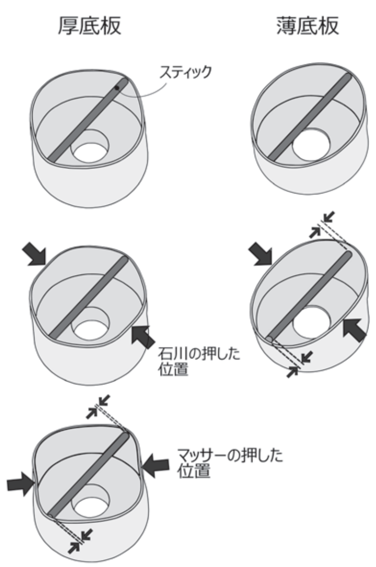


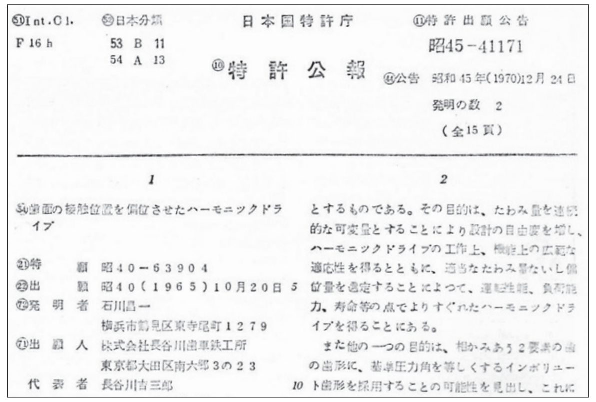
図10

また、石川昌一は、当初はこの発明に矛盾があることを見出していたため、講義の合間、マッサーに直接疑問をぶつけたことがあった。石川昌一が矛盾を感じていたのは、明細書に図示されていたサーキュラ・スプラインに対するフレクスプラインの歯の移動軌跡である。どう考えてもその図のようなサイン曲線でフレクスプラインの歯が動くとは思えなかった。また、フレクスプラインの圧力角計算式の根拠にも疑問をもっていた。

石川昌一の問いにマッサーはすぐに「これは間違い」と言った。そしてジョークで「特許庁の役人は頭がrigid（硬直している）だから、rigid な頭でも分かるように書いたのだ」と言われたという。

石川昌一は技術研修の9カ月後の1965（昭和40）年10月20日に「歯面の接触位置を偏位させたハーモニックドライブ®」を発明し、1970(昭和45)年2月24日に特許となり、通称「偏位ハーモニックドライブ®」として、後の当社の新製品に多く適用された。また1967(昭和42)年の日本機械学会国際シンポジウムでも発表された。

1991（平成3）年10月24日、当社穂高工場で開催された日本機械学会RC97分科会の技術講演会「極限をめざすハーモニックドライブ®」の中でも、この分野で特筆すべきものと評されている。


51 Int.Cl. 52 日本分類 日本国特許庁 11 特許出願公告
F 16 h 53 B 11 54 A 13 昭45−41171
10 特許公報 44 公告 昭和45年(1970)12月24日
発明の数 2
（全15頁）

1

54 歯面の接触位置を偏位させたハーモニックドライブ

21 特願 昭40−63904
22 出願 昭40（1965）10月20日
72 発明者 石川昌一
横浜市鶴見区東寺尾町1279
71 出願人 株式会社長谷川歯車鉄工所
東京都大田区南六郷3の23
代表者 長谷川吉三郎

2

とするものである。その目的は、たわみ量を連続的な可変量とすることにより設計の自由度を増し、ハーモニックドライブの工作上、機能上の広範な適応性を得るとともに、適当なたわみ量ないし偏位量を選定することによつて、運転性能、負荷能力、寿命等の点でよりすぐれたハーモニックドライブを得ることにある。
また他の一つの目的は、相かみあう2要素の歯の歯形に、基準圧力角を等しくするインボリュート歯形を採用することの可能性を見出し、これに

図11

1-3 国産1号機の生産

研修を受けた技術団が帰国した後、国産標準型ハーモニックドライブ®を商品化する第一歩を踏み出したが、実は研修団を派遣する前の1964（昭和39）年12 月11日、長谷川歯車は試作に成功していた。USM社から具体的な設計図や設計法、ノウハウなどを習得する前だったが、技術研修団による技術習得前の予備知識獲得と、ハセックウオーム減速機製造設備の改造を目的として試作に取り組んだところ、わずか1カ月半で完成させることができたのである。

そのような技術的なベースもあったため、技術取得後に着手した標準製品の第1号機製作は順調に進んだ。国産1号機は（株）日立製作所からベンディングローラー用減速機として受注したもので、型番100番、減速比1/96で、1965(昭和40)年8月下旬に納品した。その頃には実際に使ってみようと考えたユーザーから、型番や減速比を指定した見積依頼が非常に増えてきていた。またすでに、8月8日時点で84台の受注が決定していた。

1-4 量産の開始

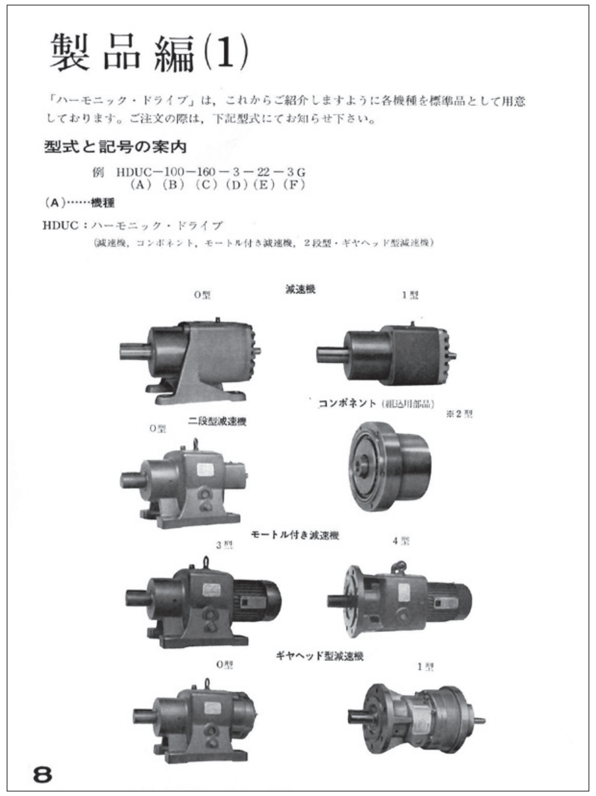
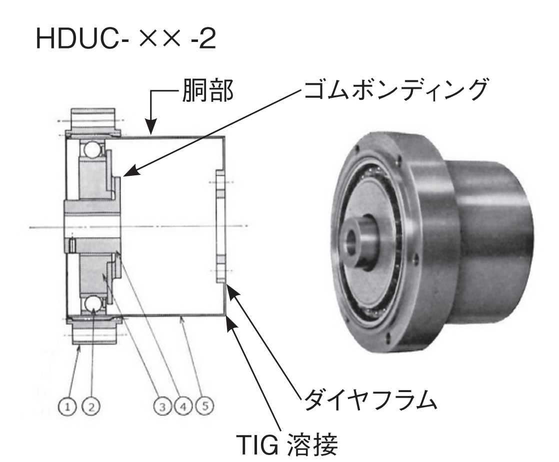


図12

技術導入当時、USM社にはPRのためのILLUSTRATED APPLICATIONSがあり、様々な種類のウェーブ・ジェネレータ、フレクスプライン、サーキュラ・スプラインの図と、それらを組み合わせたコンポネントを使った多くのアプリケーションと説明があった。その中でも技術導入当時完成度が高かったのがカップ型であり、長谷川歯車の製品化能力を考え、それを標準シリーズとして量産を開始した。サイズはUSM社標準と同じ、型番（フレクスプライン歯車のピッチ円径［インチ］の10倍）20番から100番の8サイズである。機種は、コンポネント標準型の2型、入・出力軸付き減速機2機種、二段型減速機、誘導電動機付きハーモニックモートル®2機種、ギアヘッド型減速機2機種を1965（昭和40）年から順次標準化し1967(昭和42)年に図12の製品群がそろった。他にハーモニックカップリングを標準品とした。減速機、ハーモニックモートル®には2型、または準標準とした2A型のコンポネントが組み込まれている。標準型コンポネント2型のフレクスプラインは、ステンレス製薄肉パイプの胴部にステンレス製の薄肉円板をTIG溶接した構造であった。量産開始の当時はこの構造が製作しやすかった。

この構造のコンポネントはその後の多様な用途の中で様々な技術課題が発生していくことになる。



1	サーキュラ・スプライン
2	ウェーブ・ジェネレータ　ベアリング
3	ウェーブ・ジェネレータ　プラグ
4	ウェーブ・ジェネレータ　ハブ
5	フレクスプライン

2 型コンポネント

図13

量産開始時の機種表示は、USM社の標準表示と同じHDUC-100のように、4文字のアルファベットにしていた。

【例】

HDUC：ハーモニックドライブ®
HDUI：ハーモニックカップリング　（位相調整継手）
HDUP：プラスチック・ハーモニックドライブ®
HDUH：シールド型減速機

最初の3文字HDU（ハーモニックドライブ®）を共通にし、4文字目を機種によって変えていた。ただし、USM社では例外的にレスポンシン（電磁式）はHDMと3文字にしていた。

当社も量産開始後、1972（昭和47）年まではこの表示にしていたが、独自の新機種の製品化が進むにつれて、機種が増えたこともあり、HDUの共通表示を廃止し、最初の1文字、または2文字で機種を表すことに変更した。同じタイプのハーモニックドライブ®コンポネントで機種の多いものは2文字とした。

【例】

CS：カップ型（C）1段（Single）減速機
CD：カップ型2段（Double）減速機
CG：ギアヘッド型（Gear head）
FB：フラット型（F）ボールベアリングウェーブ・ジェネレータ（B）
FH：フラット型手動入力（H）低速回転入力
J　：ハーモニックカップリング（位相調整継手 Phase Adjustment　商品名：ジャスト）
HDM：レスポンシン（USM社表示）

等である。

第2章以降では変更後の表示とするが、ハーモニックドライブ®コンポネントの形状が同じでも、新歯形発明など技術の進化で、強度や精度が格段に向上していったことから、3文字での表示になった。

第2章　50年の技術概要

1. ハーモニックドライブ®製品群

2-1-1　カップ型CSシリーズの開発（型番20～100）

開発の始まり

ハーモニックドライブ®の国産化はカップ型の標準品シリーズから始まったが、国内ではカタログ標準通りの要求は少なく、多くは小型・軽量、高減速比の特徴を生かしたコンポネントを組み込んだ客先要求の特殊な駆動装置（2-1-4項）向けであった。

ILLUSTRATED APPLICATIONSには同様の装置の図も多くあるが、USM社での販売実績はなかった。日本市場の要求は、多種･多様であり、標準仕様では想定しなかった使用条件や環境条件もあり、稼働中に異常な現象や故障が発生した。その解決のためのカップ型の改良や対策が開発の始まりとなった。

技術概要

技術導入品のフレクスプラインには2型と2A型の2種類があり、生産性の面からステンレス製溶接構造の2型を標準に位置付けていた。2A型はフレクスプラインの材質がニッケルクロムモリブデン鋼で、胴部とダイヤフラムを一体加工したもので強力型と位置付けた。

特殊用途の駆動装置には、2型のコンポネントを主に組み込んだが、溶接部分が特定の負荷条件や装置構造では強度が十分に確保できないこと、溶接工程での変形による精度の悪さとバラツキが大きいなど問題が多かった。強度や精度確保のための、技術面、生産技術面の研究・開発を続けたが解決に至らなく、徐々に2A型を使用していくことになり、2型は後に廃止製品となった。

この2型、すなわちステンレス製フレクスプラインの改良対策の過程で、成型加工技術の先端技術を蓄えることができた。

当時の用途で生じた問題から特筆すべき技術は、USM社で標準としていたウェーブ・ジェネレータの構造を大きく変えたことである。技術導入時の構造はモータ等の入力軸側とウェーブ・ジェネレータ・プラグの締結部の傾きや偏心誤差を吸収するために、弾力性のあるゴムによる調芯機構を取り入れていた。ゴムボンディング方式と称し、入力軸（モータ軸）に取り付ける鉄製部材（ハブ）とウェーブ・ジェネレータ側の鉄製部材（プラグ）の間に加硫ゴムを配し、ゴム面と鉄製部材面を接着剤で固定するものである（図１）。

この構造において、特殊用途のシャッターアクチュエータでゴムボンディング部の破損による故障が多発した。調査の結果、四季を通した屋外使用条件に選定した高温から低温環境に適するグリースの成分によって接着剤が劣化、ゴム面と鉄製部材面が剥離し、動力が伝達できなくなることが判明した。開発段階の屋外の高温環境も含めた耐久試験では目標時間を満足していた。しかし、長期間稼働している間に前記の現象が進行したのであった。応急対策として金属製ピンを追加して動力伝達だけは可能とし、製品供給した。恒久対策として、USM社がその頃開発したオルダム型ウェーブ・ジェネレータを実験した。しかし、爪部の摩耗が激しく、独自のオルダム型ウェーブ・ジェネレータを開発し、これによって1974（昭和49）年にゴムボンディング方式に代わり、潤滑剤の成分や温度変化の影響を受けない機構に変更することができた。この構造は現在も型番8～100の標

準品に使用している(図2)。

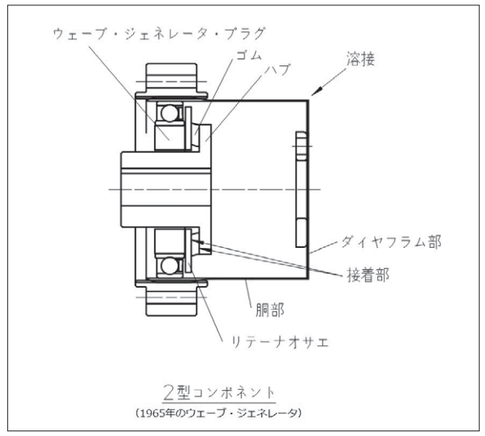


図1

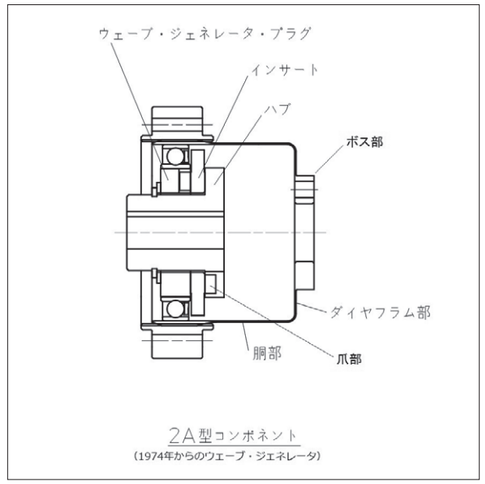


図2

採用市場

第1章に記述したように、1965(昭和40)年8月に国産1号機を(株)日立製作所に出荷した。広告宣伝によって当初84台の受注が決まり、2-1-4項で記述する特別用途向けなど、さまざまな市場で採用されていった。

製品展開

1965(昭和40)年の国産化の翌年1966(昭和41)年には、型番100番以上の130、160、200番を市場に導入した。この大型型番については次項(2-1-2項)に記す。

1970(昭和45)年頃から、型番20番より小さいサイズの要求に応える製品開発を始めた。小型型番の展開については2-1-3項に記す。

また、型番20～100番の中間サイズの要求に応じて、型番45番、58番、90番を特殊製品として開発・供給し、順次標準品に組み入れている。

一方、歯車減速機で重要な特性にバックラッシ量があるが、ハーモニックドライブ®はバックラッシが小さくできることも大きな特長である。

国産化当初はバックラッシ1.7分～6分の仕様にしていたが、精密な位置決めが必要な装置や産業用ロボット分野から、バックラッシの小さい仕様の要求が多くなり、バックラッシ3分以内を保証したBL3シリーズを準標準品として製品化した。歯車のかみ合いバックラッシはゼロにしたが、バックラッシを測定するときに、きわめて小さい値のトルクを出力側に加える。その際ハーモニックドライブ®特有の歯車かみ合い部の弾性変形による微小なねじれ量が発生する。そのためバックラッシゼロという表現は避けた。

その後、さらに微小ねじれ量を含めたバックラッシの小さい仕様の要求に応え、バックラッシ1分以内を保証するBL1仕様の開発を進めた。加工精度の向上と、組み合わせ加工などによって特殊仕様品として供給した。

一方で、バックラッシと微小トルク領域のねじれ量を含め、定格トルク領域までのトルクねじれ線図データをワインドアップカーブ特性として提供した。ハーモニックドライブ®のフレクスプラインが薄肉のカップ形状であることから、剛性が低い印象をもたれていたことへの対応であった。実際は、フレクスプラインの胴部は円筒状で、ダイヤフラム部は円板状であることから、剛性は他の減速機構と変わらないことを示したものである。後に、トルク領域毎のばね定数として定量化してカタログに示すようにした。

また、BL1は後にロボット用ハーモニックドライブ®Rシリーズのベースになった。

ちなみにBLという表示は、その後「ロストモーション(LM)」というハーモニックドライブ®独自の性能表示に改めた。これは歯車部分のかみ合いのバックラッシが実質ゼロでありながら、小さい値の測定トルクを加えることによるねじれの量を表す表現方法が歯車減速機の分野になかったためである。ロストモーション値は、入力軸を固定し、定格出力トルクの3～5%を出力軸に加えたときに生じる出力軸側のねじれ量と定義した。

このロストモーションという言葉はNC装置関連の定義用語として使用されていたため、歯車分野では厳密には正しい表現ではなく、専門家などから異議が生じたことがある。しかし、精密制御用減速機としてハーモニックドライブ®が認知されるにともない定着し、他社精密減速機でも性能表示の指標として用いられるようになった。

2-1-2 大型型番の開発(型番130～200)

開発の始まり

長谷川歯車は大型の歯車を製造していたため、製鉄や鋼板メーカーのコンベヤ用など、技術導入した型番100番のサイズでは対応できない大きな出力トルクを必要とする市場の用途があった。そのため導入した技術をベースに大容量の型番130番、160番、200番の3型番を開発した。

技術概要

USM社からの導入技術をベースにして、ほぼ比例設計によって開発を始め、1966(昭和41)年に市場導入、大出力減速機としてカタログ製品に加えた(図3)。

当初は新たな用途への納入実績を築くことができた。しかし、型番100番以下とは異なって次のような故障が相次いだ。

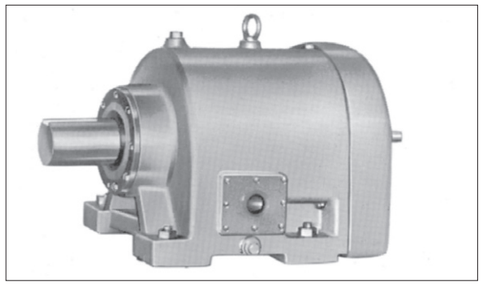


図3

①フレクスプライン歯底の疲労破壊
②ウェーブ・ジェネレータ・ベアリングの内輪、外輪の破壊
③大きな騒音
④大きな温度上昇

これらの対策として、熱処理、材料試験、ダブルエキセントリック型ウェーブ・ジェネレータ等の改良をしながら製品を供給していったが解決に至らなく、1971(昭和46)年に3型番すべての販売を中止、廃番とした。

採用市場

製鉄・鋼板メーカーのコイルコンベヤやスケールコンベヤ、厚板シャーライン、ターニングローラ用として採用された。その他コンテナ駆動や放射線治療装置など。

製品展開

特定顧客の要求に応えて歯車減速機を入力軸に取り付けたギヤヘッド型や、天井取り付け型、ブレーキ付きなどの特殊仕様品を投入した。

その他の特筆点

廃番後の一時期、代替品として平歯車列の組み合わせによるハーモニックドライブ®と同じ減速比の減速機を製造して市場への供給保証を行った。これは長谷川歯車の歯車技術を生かした対応策であったが、代替が完全にはできなく、企業責任としてその後数年間、大型型番ハーモニックドライブ®の部品供給を続け、そのために大型型番用の設備を保有し続けなければならなかった。

2-1-3 小型化製品の開発(型番17、14、11、8、5、3)

開発の始まり

1970(昭和45)年頃から型番20番より小さいサイズの特殊用途が日本、ヨーロッパで複数現れ、16番、14番を検討、型番14番を開発した。多種の要求仕様に合わせて、ステンレス製やプラスチック製、またウェーブ・ジェネレータは標準型に加え、ツーローラ型、遊星ローラ型等も並行して検討した。そして1972(昭和47)年にステンレス製の標準2型コンポネント(CS-14-2)が完成した。特殊用途向け装置やアクチュエータに使用したが、継続した用途開拓は進まなかった。

技術概要

CS-14-2の市場導入後、航空機関係の用途から同サイズの要求がきた。これには信頼性を考慮して合金鋼製の胴部・ダイヤフラム一体型フレクスプラインの2A型を開発、特殊用途として納入した。これが長期間採用されたため、1978(昭和53)年にCS-14-2Aを標準型番とした。

製品展開

型番14番の市場導入後も、小型分野での新規用途開拓を目指した。当時USM社では10番が製品化されていたが、サイズと出力トルクのシリーズバランスから、11番と8番を1982(昭和57)年、5番を1985(昭和60)年に市場導入した。すべて2A型である。

1986(昭和61)年には配管内部検査装置用として外径14mm以下の減速機が要求されたため、4番を開発、1987(昭和62)年に特殊用途として納入した。2年間で200台納入したが、需要と安定生産までの投資を比較した結果、メリットが見いだせなく標準化しなかった。

その後、20番と14番の中間サイズの要求があり、1989(平成元)年に17番を市場導入した。この間に、市場での小型装置や設備の小型化・高精度化、また、計測機市場への用途が拓けていた。

1978(昭和53)年頃から型番14～25番の小さいサイズが、メカトロニクス製品のアクチュエータへの展開も始まり、型番5番を除き、一定の売り上げに結び付くようになった。

1985(昭和60)年に開発した5番は当時最小型番であったが、減速機としては用途があまり開拓できない状況であった。しかしメカトロニクス製品のリニアアクチュエータの展開ができ新市場が拓けた。この展開についてはメカトロニクス製品群に記載する。

その他の特筆点
極小ハーモニックドライブ®型番3番の開発

2020(令和2)年現在の最も小さいサイズは型番3番だが、その市場導入の経緯は2000(平成12)年にさかのぼる。

当時、当社と交流のあった大阪大学の金子真教授(当時)から、「東京大学の石川研究室で小型の減速機を探している」との話を頂き、最小型番のハーモニックドライブ®5番をもって訪問した。

当時、石川研究室ではハンド付きロボットアームを利用して、ビジョンセンサのフィードバックからモータを制御する高速で精密なモーションコントロール技術の研究を進めていた。ロボットアームの先端にはリンク機構のハンドが付いていたが、その指関節にはガタがあり、ビジョンセンサの性能が発揮できなかった。そのため小型の減速機を探していたのであった。

ハーモニックドライブ®はバックラッシがない点は評価されたが、大人の人指し指位の大きさが要求された。指を測ると13mmくらい、持参した5番は外形20mm、太すぎた。そのため3番の開発を決めた。

設計するとフレクスプラインのカップ部厚さ0.07㎜、歯車高さ0.065㎜となった。未経験の寸法領域であり、正確な測定手段もなかったが、技能者の官能に頼りながら試作と実験を繰り返し、試作品を完成させた(図4)。

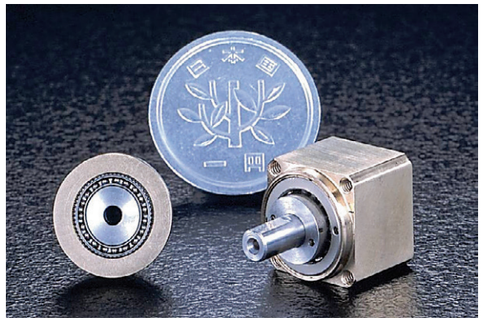


図4

並行して石川研究室でモータを調べたところ、小型・高速でパワーのあるモータがないことが課題となった。そこで3番に適するモータを検討し、世界最小のハーモニックドライブ®を搭載したACサーボアクチュエータの開発目標を設定した。

モータは高速・高トルク仕様の巻き線設計から始め、技術者の手巻きによって試作した。エンコーダは、協力企業の協力を得て搭載、指用アクチュエータを完成させた。

さらに次の段階として、そのアクチュエータを組み込んだ指機構の検討を進めることになった。指機構に関連する世界の特許を調べながら構造設計をした。大きな課題となったのが、アクチュエータ出力軸の回転運動を直角方向に変える関節部の機構である。その部分にバックラッシがあってはハーモニックドライブ®を使った効果が発揮できない。当時はワイヤ方式の関節機構が一般的であったが、ワイヤの伸びによる剛性と、大きさに問題があった。そこで歯車技術者の発想から、傘歯車方式を提案した。しかし傘歯車には一般的にバックラッシが必要で、また歯面の摩耗が進行し指機構にガタが生じる恐れがあり、大学では反対意見もあった。ワイヤ方式と比較検討した結果、目標の外形寸法と高速性を満たすためには、傘歯車が適すると考え採用を決めた。

傘歯車のバックラッシ除去機構の考案や、摩耗を極力減らす材料と熱処理、特殊加工工程を取り入れるなどして一本の指モジュールが完成した。実験の結果、想像していた以上の高応答性の動きであった。その成果が2002(平成14)年10月8日、東京大学での記者会見で「超高速ロボットハンドの開発」として発表された。そして当社ではUT/HDSハンドと称し、長く大学での研究に使われる基本構造となった。

さらに大学の要求に応じ、3本指の手首モジュールから、他型番のハーモニックドライブ®アクチュエータを使い、肘関節までのハンドへと展開(図5)、人間の動作を超える精密モーションコントロールの研究に使われた。これをきっかけにハンド関連で当社と、他大学の研究者との研究交流が広がっていった。

図5

その後、このアクチュエータは2006(平成18)年にRSF-3としてメカトロニクス製品の標準製品に組み入れた。RSF-3は「今年のロボット大賞2007」の「中小企業基盤整備機構理事長賞」を受賞した。一連の取り組みは事業的に売上に大きく貢献したわけではないが、日本の展示会で、このハンドの展示を見たドイツの機器メーカーがハンドシステムを開発、特殊アクチュエータの受注に結び付くなどアプリケーション拡大にも寄与している。

2007(平成19)年からは当社のハンドと東京大学のビジョンシステムを組み合わせたボールのキャッチング装置が、ハーモニックドライブ®コンポネントとその原理説明とともに日本科学未来館に、5年間常設展示された。

ちなみに3番は小型ゆえにコンポネントとして顧客が組み込むことが困難なため、フレクスプラインは出力軸一体型、ケーシング付きのユニットタイプを標準として、2006(平成18)年に標準製品にした(図6)。

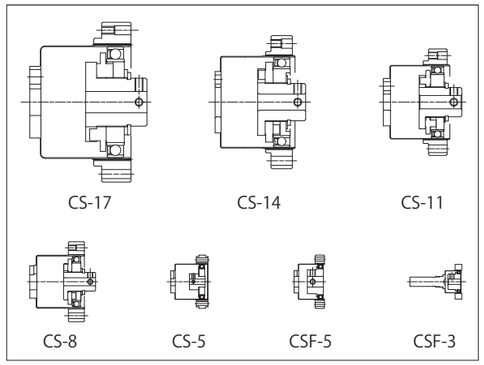


図6　小型コンポネントの標準シリーズ

2-1-4　特別用途向けの開発

開発の始まり

国産化後の用途は殆どが顧客要求の装置に合わせた特殊設計であったことは、先に記したが、ここにその事例とハーモニックドライブ®の特長、挑戦した技術などを一覧表に示す。この状況は1970年代中頃まで続いた。

記号

HD: ハーモニックドライブ®

W/G：ウェーブ・ジェネレータ

C/S：サーキュラ・スプライン

F/S：フレクスプライン

開発製品・部品 用途	主に生かしたハーモニックドライブ®の特長
ダブルエキセントリック型W/G 工作機械	W/Gの慣性モーメント低減、高速対応
トリプルエキセントリック型W/G 工作機械	ダブルエキセントリック型W/Gの高負荷トルク化
ツーローラ型W/G 低価格汎用用途	W/Gの低コスト化
すべり軸受け式W/G 低速回転（手動入力）限定コンポネント	HDの不可逆性、高負荷容量、低速回転数入力
重量シャッターアクチュエータ 大型ビル、倉庫シャッター開閉	小型・軽量、高トルク重量比、高トルク体積比
軽量シャッターアクチュエータ（図7） 家庭ガレージ、商店シャッター開閉	小型・軽量、高トルク重量比、高トルク体積比
手動式バルブアクチュエータ・W/Gすべり軸受け式 バタフライバルブ開閉	入・出力同軸、低速入力回転（手動入力）、高トルク不可逆性
短胴F/S使用コンポネント ボルト締結用電動工具	小型・軽量、高トルク、入出力同軸で装置への組み込み容易
アンテナ駆動アクチュエータ・遊星ローラ型W/G UHFテレビのアンテナ方向調整	高減速比、小型、軽量 W/G部で約1/10減速比
顕微鏡用ノブユニット 光学顕微鏡の手動焦点合わせ	粗・微動機構の構造が容易にコンパクトに組み込み可能、入出力同軸
トルクコントローラ（図8） 過負荷防止装置、ボルト締結機、ホッパーゲート	基本部品3点のHD構造を生かしたトルク検出機構が容易な構造
クラリファイヤ用ハーモニックモートル、トルクリミッター装置 下水処理場の処理槽の撹拌	高減速で超低速24時間連続回転
ローカルフルート液面計用コンポネント タンカーのオイル液面高さ計測	可逆回転性、高効率、用途に合わせたバックラッシ量の設定容易
シールド型HD 高真空用回転導入機	完全密封構造、入力側と出力側の隔壁動力伝達可能構造
HD内蔵ウインチ 大型重量物巻き上げ機	小型、ドラム内への組み込み容易
小型巻き上げ機 ポータブルタイプの巻き上げ機	小型軽量、巻き上げ機内部への組み込み容易　C/S出力回転で構造シンプル化
ブランド用アクチュエータ 家庭用ブラインドの電動開閉	小型・軽量、高減速比、細型アクチュエータ構造可能
医療用牽引モータ付きユニット むち打ち症治療器、脊椎・腰椎引き伸ばし用	増速性、高効率、低騒音
ファインジャスター® 動力循環式試験装置、印刷機、カップリング	フラット型機構、調整軸間に容易に取り付け可能、容易な位相調整
油圧モータユニット 小型高トルクアクチュエータ	F/S内部空間に油圧モータ組み込み小型油圧ユニット可能
コップ・ハーモニック ハーモニックモートルの可変速減速機市場	高減速比減速機と無段変速機の組み合わせ

図7　軽量シャッターアクチュエータ

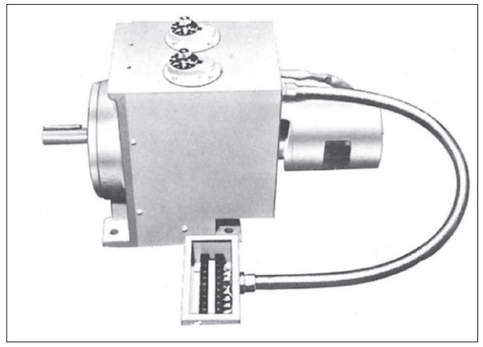


図8　トルクコントローラ

その他の特筆点

これらの対応品から、基本的な改良ができ、現在でも基本部品として継続している技術にオルダム型ウェーブ・ジェネレータがある。

2-1-5　ロボット用Rシリーズの開発（型番20～100）

開発の始まり

産業用電動ロボットへの採用は、1971（昭和46）年ドイツのKleinwächter社が年間10台程度の使用量、1972（昭和47）年のKUKA社の試作採用、本格的な量産ロボットには1973（昭和48）年のスウェーデンのASEA社とフランスのRenault（ルノー）社から始まった。そしてこれを契機に1980年代から産業用ロボットがハーモニックドライブ®の主要市場となった。

ヨーロッパで産業用ロボットの関節にハーモニックドライブ®が採用された背景には、1970年代からHarmonic Drive System GmbH社が、大学や企業に製品の宣伝とともに積極的に献品していたことが寄与している。

当初、ロボット用にはBLシリーズを供給した。しかし当時のハーモニックドライブ®のカタログには産業用ロボットの用途を想定した仕様の表示はなく、三相誘導電動機に準じたモータの回転数ごとの定格トルクと入力馬力、想定される衝撃度合によるサービスファクターを示し、一般産業用の動力伝達市場を前提にしていたものであった。

ロボットメーカーではこのカタログ表示を基に、ハーモニックドライブ®の型番を選定していた。このことが後にハーモニックドライブ®で多くの破損が生じる一因ともなった。ロボットの関節は常に往復動作を繰り返し、起動・停止時には衝撃負荷がかかる。ロボットの使い方が初期段階ということもあり、ハーモニックドライブ®には仕様を超えた負荷が加わり、フレクスプラインの破損、歯のかみ合いのはずれ現象（ラチェッティングと称す）などが発生した。

また、ロボットメーカーからは、ねじれ剛性向上、ロボットアーム先端での振動の低減が強く要求された。

こうした課題解決に向け、ロボット用ハーモニックドライブ®の開発に取り組んだ。

技術概要

クレーム分析、ロボットメーカーとの打ち合わせなどを通して、加工精度を上げ、バックラッシを小さくした初期のロボット用途向けRシリーズを1977（昭和52）年に市場導入した。このときの定格表は従来通りであったが、順次サーボモータを動力源として、ロボット用途に適応するように、起動停止時の許容ピークトルク表示などに変更した（1982［昭和57］年ロボット用途仕様確定）。性能面ではロボットアームを模した振動試験を標準化するとともに社内規格を制定した。これらの規格制定にあたっては、実際のロボットの性能との相関を取るなどロボットメーカーの協力を得た。

Rシリーズは性能を高め、ロボットでの振動は改善されたものの十分ではなく、耐衝撃性が小さい、ねじれ剛性が低い、ダイヤフラム部の破損などの課題も残っていた。

ダイヤフラム部の破損には2つあり、そのひとつはダイヤフラムに設けた油穴に起因する破損であった。技術導入からの標準品はオイル潤滑で、潤滑油を循環させるため、ダイヤフラム部分に6カ所の油穴を設けていた。その油穴が起点となる破損があった。この解析には1980（昭和55）年にASEA社の技術者であるBack氏から、スウェーデン王立科学研究所の応力集中理論を適用した数値化の示唆を受け、当社で解析、当該部分の穴を廃止することを1981（昭和56）年に決定した。オイル循環機能は、他部品も含めた油道の設計で維持した。

もうひとつは、ダイヤフラム部とボス部の応力集中による破損である。ロボットの衝突による過大負荷、コンポネントが組み込まれるロボット側ケーシングの軽量化に伴う剛性・精度不足、出力軸受けのスキマなどにより、出力軸の傾きが発生、応力が過大になるものであった。

FEM解析などを通して、ダイヤフラム部に流線プロファイル（Stream Line Fillet）の応力集中

緩和形状を適用、1986（昭和61）年からRシリーズをはじめとする標準カップ型のフレクスプラインで全面的に採用し、問題を解決した。

しかしこの間に、ハーモニックドライブ®が抱えている問題点や、ロボットに発生している現象が、競合減速機の開発目標となった。そして1986（昭和61）年に競合減速機のRV減速機が出現した。

これによって大きい型番の多くを市場で失った。

これらの他にも日本国内、ヨーロッパ各国のロボットメーカーから多くのことを学びながら、ロボット用Rシリーズの完成度を高めていった。

製品展開

ハーモニックドライブ®のウェーブ・ジェネレータのイナーシャが大きいことが、ロボットメーカーでのハーモニックドライブ®選定の課題のひとつでもあった。そのため、イナーシャを30%下げたGRシリーズを1985（昭和60）年に標準化した。

2-1-6 高強度Sシリーズの開発

開発の始まり

1985（昭和60）年頃に、21世紀における科学技術の進歩を予測したデルファイ調査（1982年第3回調査版、科学技術発展の将来展望を専門家に問うアンケート）の結果に触れる機会があった。それによると21世紀には、アクチュエータはほぼ10倍の性能向上が可能と予測されていた。そこでハーモニックドライブ®についても、10年後にどのレベルまで性能の向上が可能かを短時間ながら数人の技術者で討論した。材料では？設計面では？応力集中は？熱処理では？などと思いつくままに項目と数値を挙げて概略を予測した。その結果、動力伝達能力10倍達成の可能性が見えてきた。

これを「スーパーハーモニックドライブ®（SHD）」と名付け、プロジェクト方式で追究していく研究に着手した。

技術概要

プロジェクトでは多くの実験と数値計算を重ねた。また、耐久試験後の破断面観察、摩耗面の表面状態や摩耗形状の測定と石川昌一による数式化、理論式への展開などを行った。

その過程の中で、石川昌一は歯の摩耗形状の解析と歯の移動軌跡から、多くの歯を同時にかみ合わせる方式を考案した。その結果、長軸から短軸に至る歯車のかみ合い領域が3倍になる歯形が生まれ、ハーモニックドライブ®の負荷容量と剛性を大きく向上させることができた（図9）。

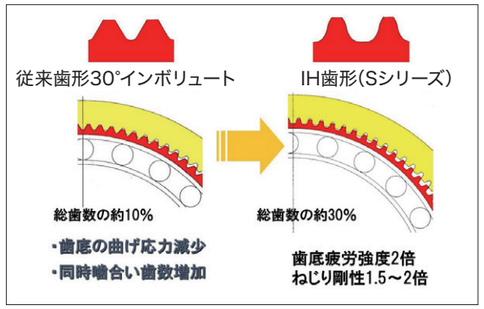


図9

この歯形はS字形の形状であったため、当初はS歯形と呼んだ。その後、IH歯形（Ishikawa Harmonic）とし、1986（昭和61）年に特許出願、1995（平成7）年に登録された。

IH歯形の考案にはハーモニックドライブ®専用グリースの完成が大きく寄与している。それは耐久試験での歯面の異常な摩耗の進行が抑えられ、正常摩耗の経過が計測（可視化）できるようになり、解析と数式化に結び付けることができたためである。グリースに関しては、その他特筆点で後述する。

こうして1988（昭和63）年にIH歯形を採用したハーモニックドライブ®として、Rシリーズ比でトルク容量と剛性がほぼ2倍のCSSシリーズを市場導入した（図10）。シリーズ名は「CS（カップ型）のS歯形シリーズ」という意味である。

しかし、トルク容量と剛性が高まったにもかかわらず、外観、寸法が変わらずインパクトが少なかったためか、ロボットでの従来シリーズからの切り替えは期待通りには進まなかった。

なお、RシリーズまではUSM社が確立した設計計算式を活用してきた。しかし、IH歯形を使ったことでその式が適用できなくなり、IH歯形に適した式化を進めた。このときに構築した式は現在でも使用している。

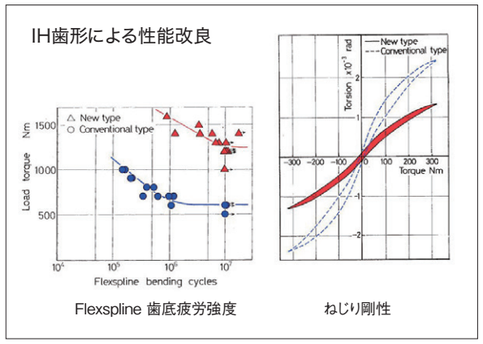


図10

採用市場

産業用ロボット、半導体製造装置など多岐にわたる。

その他の特筆点

1989（平成元）年4月24～27日、米国シカゴでASME（アメリカ機械学会）主催の「第5回世界トランスミッション・歯車学会」が開催され、「IH歯形ハーモニックドライブ®」を発表した。開発本部の清澤芳秀マネージャー（当時）は、新しい歯形の開発背景とその理論について説明した後、従来のハーモニックドライブ®と比較しながら、実験データを提示、IH歯形の優れた性能を説明した。発表後の質疑ではユーザーや歯車研究者から、歯車理論や性能についての数々の質問が出され、出席者の関心の高さがうかがえた。

なお、IH歯形実現には前述したようにハーモニックドライブ®専用グリースの存在が大きく寄与した。

ここでグリースの開発史にも触れておく。

1965（昭和40）年からのハーモニックドライブ®はオイル潤滑が標準であった。グリース潤滑もあったが、短時間定格（10分、負荷時間率（% ED：10%）であった。グリース、オイルとも市販品から選定していた。

1970年代初めから、オイル潤滑よりもメンテナンス性が優れたグリース潤滑の要求が多くなってきた。とくにロボット用途はグリース潤滑がほとんどであった。

グリース潤滑には、寿命時間の長期化、使用温度範囲の拡大、漏れにくさが要求されたため、数十種類の市販グリースを実機評価した。しかし寿命と温度特性、かつ漏れにくさを同時に満足する適切なものを選定することができなかった。そこで1974（昭和49）年に専用グリースを開発することにした。

それまでに多くの市販グリースを評価してきた経験とデータを蓄積していたため、グリース専門メーカーとの共同研究であれば、長い期間を要さずに完成できると考えていた。しかし、先に挙げた諸特性は相反する特性であった。また、一般的なグリース評価基準に基づく試験データと、ハーモニックドライブ®実機での耐久試験結果に、相関関係が見いだせなく、すべて実機での長時間の評価が必要ということもあり、8年間もの期間を要した。

その結果1982（昭和57）年に完成したのがSK-1、SK-2（SKは開発者である2名の頭文字から）である。このグリースによってロボットのメンテナンス間隔の延長要求に応えられるようになり、またIH歯形の実現にも寄与した。その後も使用温度領域の拡大などを目標としてグリースの研究を継続、1988（昭和63）年に低温特性を改良したHC-1を開発した。

さらに1997（平成9）年に後述する薄型カップタイプ用の4BNo.2が完成した。4BNo.2はHC-1 の特性以上であったため、HC-1は同時に廃止とした。

その後も潤滑の研究を続け、2018（平成30）年に市場要求に対応した食品用グリースHFL-1を完成、ハーモニックドライブ®の用途開拓に貢献している。

2-1-7 薄型CSFシリーズの開発

開発の始まり

IH歯形の採用によって強度と剛性面で改良が進んだCSSシリーズではあったが、前述のように期待通りには普及しなかった。一方で競合のRV

減速機やサイクロ減速機に比べて軸方向の長さが長かったため、フレクスプラインの短胴化に挑戦した。

技術概要

1965(昭和40)年に国産化したハーモニックドライブ®の技術と製品は、USM社が多額の資本を投入し、多くの技術者の努力によって築かれた技術を基にしている。

USM社のハーモニックドライブ®の基準には、設計仕様と基本寸法変更可能範囲が明確にマニュアルに定められており、それにしたがって技術の検討を行うのが通常であった。

その制約のひとつは、フレクスプラインの長さの短縮（短胴化）である。USM社が標準化した、ハーモニックドライブ®の外形と長さは美しいバランスとなっている。通常はこのバランスの寸法を適用するのが基準であった。しかし、この基準を外した特殊用途限定の事例が1975(昭和50)年のボルトランナー用のコンポネントにあった。これは、制約された計算式を応用しながらの20%の短胴化で、その特殊用途水準の強度が実験で確認できた例で、1990（平成2）年当時まで、25年間の短胴化の唯一の実績であった。

しかし、CSSが期待通りに普及していかない1990（平成2）年頃、標準シリーズとして短胴化の研究開発に取り組むことにした。

既にFEM解析やコンピュータシミュレーションの技術蓄積もあり、1992（平成4）年に短胴フレクスプラインの技術が確立、CSFシリーズとして初めて標準品を市場導入できた。ちなみにFはFlat(平らな)の頭文字である。

採用市場

産業用ロボットや、普及し始めたヒューマノイドロボットなどで採用され、Sシリーズよりも普及速度は速かった。

製品展開

さらにCSFの強度向上研究に取り組み、2000(平成12）年に材料の強度、歯形などを変え、トルク容量を30%高めたCSGシリーズを開発した。この製品化には4BNo.2グリースが貢献している。

この短胴化技術を小型シリーズに展開し、CSFスーパーミニシリーズ（型番5～14）や、CSFミニユニットシリーズ(型番8～14)を市場導入した。

1992（平成4）年に確立した、フレクスプラインの長さを短縮する技術は、IH歯形と並び、精密減速機としてのハーモニックドライブ®の発展に大きく寄与している。

2-1-8 超薄型CSDシリーズの開発

開発の始まり

小型ロボットでの認知度が高まる中、カップ型の特長をもちながら、パンケーキ型（2-1-10項）並みの超薄型カップ型ハーモニックドライブ®に挑戦した。背景にはロボット以外の新用途を開拓するという狙いがあった。

技術概要

最初の試作品は回転もしない現象から始まったが、試作と実験結果の設計へのフィードバックと技術解析を通して完成にこぎ着けた。CSSに対して1/3、CSFに対して1/2の長さが実現できた。長さが短くなったことで動力伝達力がやや低下したが、CSFの70%を確保することができ、CSDとして2001(平成13)年にシリーズ化した(図11)。

シリーズ名のDはDishの頭文字で、皿のように薄いという意味である。カップ型の特長をもちながら、パンケーキ型のFBタイプと同じ薄さを実現したためにこの名とした。

ちなみにCSDは、意匠登録しデザインを保護している。

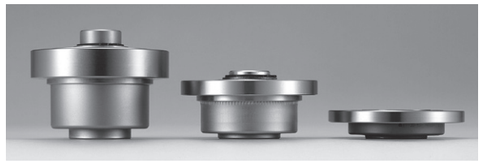


図11　CSS　→　CSF　→　CSD

採用市場

新たな用途の開拓を目指して開発したが、結局はロボットに使われた。米国では医療関連の手術ロボットなどで使われた。

2-1-9 シルクハット型 SHシリーズの開発

開発の始まり

ハーモニックドライブ®は入出力軸が同一軸上にあることから、その構造を生かして入力軸側から出力軸側までを中空で通せる特長があり、カップ型で実現していた。しかし、ダイヤフラムがフレクスプライン胴部の内径側にあり、中空径の大きさに制限があった。また、カップの内側にモータやブレーキなど他の機構を入れて有効に活用することも試されていたが、組み込みにくさがあった。

こうした中で顧客の技術者との話から、カップのダイヤフラムが外側に広がったハーモニックドライブ®があれば、フレクスプラインの内部空間が利用しやすくなり、用途が広がるのではないかとの感触を得た。

USM社の資料にも、類似のものが示されていたが、応力集中が大きくなりUSM社は製品化を推奨しなかった。

しかし、需要開拓につながると考え、開発を進めた。

技術概要

最初に作りやすさから、カップ型で溶接構造のCS-2型のフレクスプラインのように胴部の外側に薄板リングのダイヤフラムを溶接して試作した。実験すると短時間で破損し溶接構造はあきらめた。

その後、NC旋盤などの導入が進んだこともあり、合金鋼で胴部・ダイヤフラム部一体形状が製作できるようになった。カップ型で蓄積した解析技術の活用や実験を繰り返し、1986(昭和61)年にSHシリーズとして市場導入した。シリーズ名は形がSilk hatに似ているため、その頭文字を付けシルクハットSH型とした(図12)。

採用市場

主にロボットで使われた。入力側から出力側への中空径が大きく取れること、フレクスプライン内部の空間を利用しやすい構造であることから、カップ型と並ぶ主力製品に成長した。

製品展開

当初は技術導入時のカップ型と同じインボリュート歯形を採用していたが、直後にIH歯形が完成し、同歯形を採用したSHSを1988(昭和63)年に、続いて胴部を短くしたSHFを1995(平成7)年に市場導入した。また、超扁平のSHDも2003（平成15）年に開発した。これらは、カップ型で培ってきた技術をSH型に展開、応用することで達成できたものである。

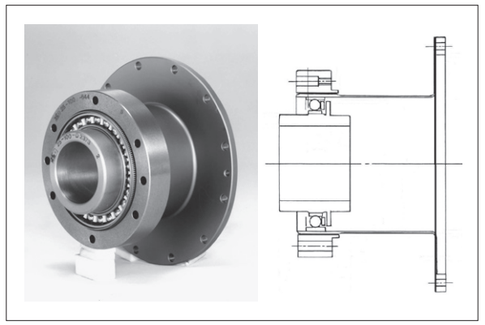


図12　SH型

2-1-10 パンケーキ型の開発（フラット型）(FB、FR、FD、FH、デファレンシャル、J)

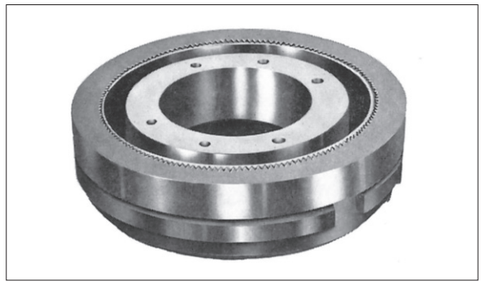


図13　パンケーキ型減速機

図13に示したパンケーキ型減速機は、USM社のカタログ製品を長谷川歯車がカタログに掲載したものであるが、販売実績はなかった。

パンケーキ型は、ダイナミックスプラインを併用した特殊なハーモニックドライブ®である。ダイナミックスプラインは一般のスプラインと同様に、軸を結合して同一の回転数とトルクを伝達する継手である。普通のスプラインと違う点は、同歯数のフレクスプラインとサーキュラ・スプライ

ンとから成り立っていて、それらの歯が同時にすべてかみ合っているのではなく、楕円形状に変形したフレクスプラインの長軸部分の歯だけがサーキュラ・スプラインとかみ合ってトルクを伝達し、しかもそのかみ合い位置が、楕円形状の移動につれて円周方向に次第に移っていくというダイナミックな機能を有する点である。このダイナミックスプラインを使えば、カップ型の胴の部分が不要になり、軸方向長さが短縮でき、コンパクトで高トルク、高剛性のハーモニックドライブ®機構ができる。

USM社ではカップ型に比べて平らに（flat as a pancake）できることからこのように呼んだものと思われる。

後に、当社では円筒状で、長さが短いフレクスプライン（サーキュラ・スプライン2個分程度の長さ）の薄型ハーモニックドライブ®をフラット型と呼び製品展開をしてきた。

開発の始まり

継続する用途がない1970（昭和45）年初めに、用途開発と受注確保のため、低コストのハーモニックドライブ®の実現を目指した。そのためパンケーキ型に挑戦した。

USM社のパンケーキ型では、ウェーブ・ジェネレータ・ベアリングを、両サーキュラ・スプライン用に2個使用していた。

開発するパンケーキ型は低価格にするために、ウェーブ・ジェネレータ・ベアリングを1個にしようとする構想であり、当時Single-wave Pancake Harmonic Driveと呼んで開発に取り組んだ。

これは、2つのサーキュラ・スプラインの中間位置に、ウェーブ・ジェネレータ・ベアリングのボールの中心があり、ベアリングへの荷重の加わり方、歯車かみ合い部の荷重の偏りなどから通常は無理な設計と考えられた。そのため、実用になるかを実験で実証することから始めた。

技術概要

目標はカップ型コンポネント比で30％のコストダウン、定格トルクでの短時間・間欠運転の使用制限、ただし許容トルク、入力回転数はカップ型と同じとした。

懸念のひとつであったダイナミックスプラインの歯車かみ合い域の応力は、偏位ハーモニックドライブ®（石川昌一の特許）の効果により分散され、耐摩耗や疲労限も実用水準を確保することができた。

1972（昭和47）年、FBシリーズとして、FB-20、25、32を市場導入、順次シリーズを拡大していった（図14）。

なお、シリーズ名FBのFはFlat、Bはball bearingに由来するが、当社ではこれをパンケーキ型ハーモニックドライブ®として発売した。

採用市場

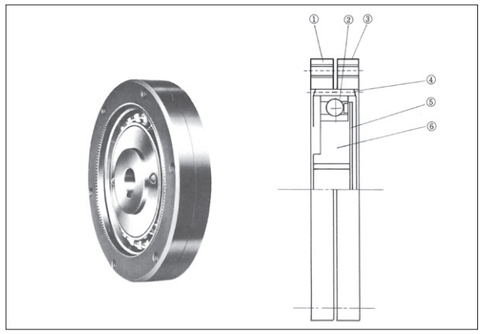


図14　FB型

カップ型と比較してロストモーションが大きいなどの難点があったため、とくに目立った用途はなかった。しかし、量は少ないものの、幅広い用途ができたために、改良を重ねながらも商品寿命を維持している。

製品展開

■FD型

FB型と並行して位相調整デファレンシャルユニットのFD型を開発した。

ヨーロッパの印刷機械会社などは、印刷機の位相調整用として、カップ型と平歯車を組み合わせた位相調整装置や、カップ型ハーモニックドライブ®を2個使い、フレクスプラインを背中合わせにつなぎ、デファレンシャル装置にした用途が多くあった（図15）。これはハーモニックドライブ®を減速装置としてではなく、位相調整、タイミング調整装置として使用するものである。ハーモニックドライブ®を2個採用した理由としては、減速機を一直線に配置することにより、他の歯車列の装置に較べ場所をとらなく、騒音の少ない装置となるなどであった。

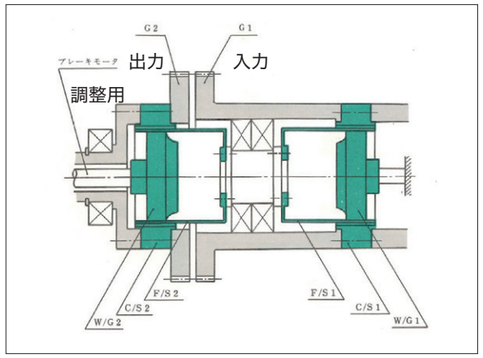


図15

そのような時期に、ドイツの中堅印刷機械製造会社から印刷機のドラム位相調整用としてのデファレンシャルギアの製造提案が寄せられた。

その構造は、USM社パンケーキ型のコンポネントに、ウェーブ・ジェネレータとサーキュラ・スプライン間の支持軸受け2個、サーキュラ・スプラインと一体にしたケーシングとユーザー側調整軸間との支持軸受け2個、計４個の軸受けを内蔵し、機械装置への組み込みが簡単になるユニットであった（図16）。

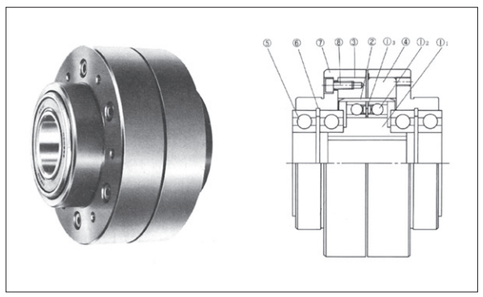


図16　FD型

Harmonic Drive System GmbHはこの提案を購入し、標準化を構想。

日本で1972（昭和47）年に製品化したのが位相調整デファレンシャルユニットFD型である。製品化には、FB型同様偏位ハーモニックドライブ®の技術が生かされた。

このFD型は、70年代中頃には、ビニールの敷物、買い物袋などの6色印刷工程などカップ型に置き換わり、用途が広がっていった（図17）。

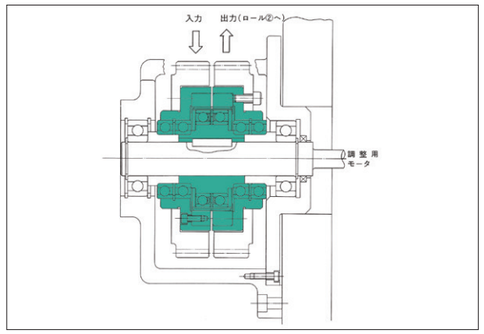


図17

その他遠心分離機、ブレーキテスタ、トルクリミッタ、絨毯の取り扱い用ローラ調整、研磨機の砥石研磨装置などさまざまな用途につながった。

■FR型

このデファレンシャル型に組み込まれていたハーモニックドライブ®を、カップ型と同じトルク容量をもつ薄型減速機とし、フラット型コンポネントFRシリーズとして標準化、1979（昭和54）年に市場導入した（図18）。

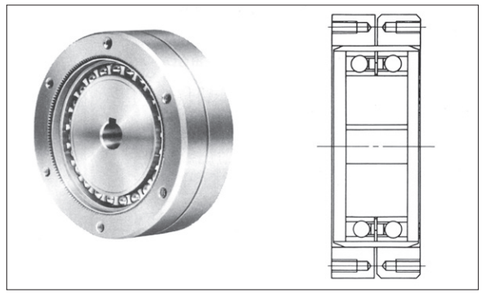


図18　FR型

■FH型

また、特別用途で製品化した、バルブアクチュエータのコンポネント部分を、1972（昭和47）年にFH2型（手動による低速入力回転）を市場導入した（図19）。これはウェーブ・ジェネレータが、転がり軸受ではなく、滑り軸受を使用し、型番20、25、32をシリーズ化したものである。許容入力最大回転数は40 r/minとした。

自動車の手動シートアジャスタなどへの引き合

いがあったが、採用にはならなかった。

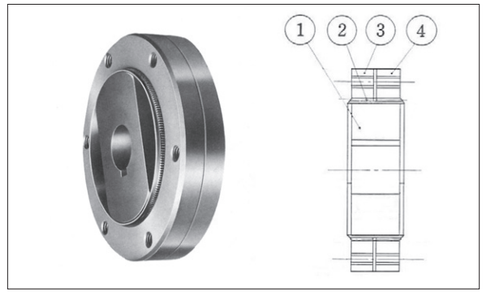


図19　FH型

■デュアル型

デュアル型はFR型の減速側サーキュラ・スプラインと回転取り出し側サーキュラ・スプラインにそれぞれ異なる速比（図20　R1、R2）をもたせることで超高減速比・超低減速比が1段で可能になる機構であり、USM社のILLUSTRATED APPLICATIONSにもあった。

パンケーキ型のダイナミックスプラインの働きではないが、薄型構造であることから、当社ではこの分類に入れている。超高減速比タイプを太陽追尾装置用などで試作したことはあったが、出力の回転がスムーズでなく、また効率が低かったことから実用には結びつかなかった。

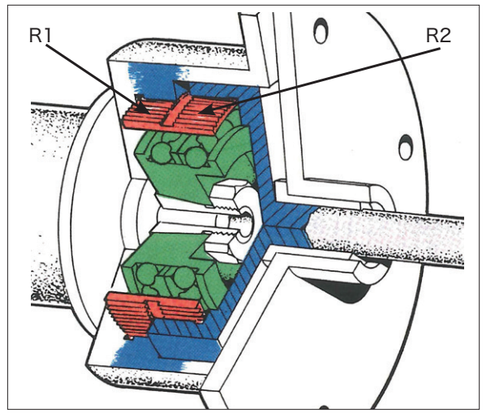


図 20　ILLUSTRATED APPLICATIONS より

その他の特筆点

デュアル型が初めて実用化されたのは日産自動車(株)のVCT(Variable Compression Turbo Engine)で2016(平成28)年に採用された。リンクを動かすことで圧縮比が変えられる装置であるが、その作動機構に使われた。

この機構部にはエンジンの爆発力がそのままかかるため、バックラッシがある普通の歯車では短時間で破損する。音が低く抑えられ、汚れたエンジンオイルと高温環境下でも作動できるさまざまな減速機が試される中、CSD型が試験され機能を達成した。

その後当社との共同開発がすすめられ、高減速比と高すぎない効率が評価されデュアル型が採用された。

2-1-11　ユニット型の開発

開発の始まり

ロボット向けのユニット型の開発としては、1984（昭和59）年に試作品を4機種展示会に出展したのが最初であった。出力軸受けのクロスローラベアリング（CRB）は市販の汎用品を採用した。これは、マーケティングと開発部門の企画で始めたものであったが、「価格がコンポネントの倍ほどになり、振動対策も盛り込めずに売れるものではない」との会社方針で開発を途中で停止した経緯があった。

その後、1980年代末頃までには、産業用ロボット減速機としてハーモニックドライブ®コンポネントは振動などの問題を抱えながらも、多くの実績を残していた。そしてその頃から、ロボットメーカーではハード面は専門メーカーに任せ、ソフト面の強化に力を入れる傾向がみられた。実際、複数のロボットメーカーの要求で、特殊形状のユニットの納入実績もでていた。また、競合のRV減速機、サイクロ減速機もユニット形状であった。

そのような背景から、特殊要求に対応していたユニットを、さらに軽量化し、組み込みの容易さ、低価格化、部品の共通化を追究し、標準ユニット開発プロジェクトを1989（平成元）年に立ち上げた。ハーモニックドライブ®はCSS型の型番20～50、FRS型の型番14～50、性能はSシリーズコンポネントの性能が発揮できることを基本とした。

CSS型とFRS型の2種同時に企画したのは、垂直多関節型、水平多関節型2種のロボットの手首、胴部などの部位によってロボットメーカーの選択肢を広げ、小型ロボットの全軸当社ユニット採用を狙ったものである。

そして1991（平成3）年にCSSコンポネントを使用したユニットタイプを開発し、「より組み込み易さ」、「よりトータルコストの低減」を追究したUXシリーズとして市場導入した（図21）。

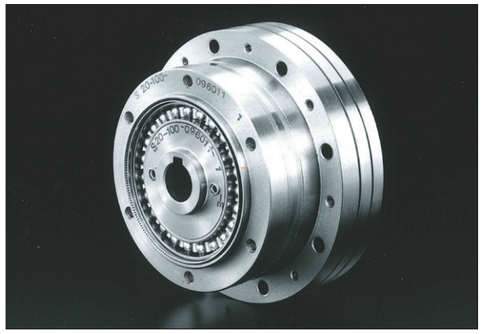


図 21　UX シリーズ

製品展開

1992（平成4）年にCSF型コンポネントを組み込んだよりコンパクトなCSF-2UHを市場導入した（図22）。

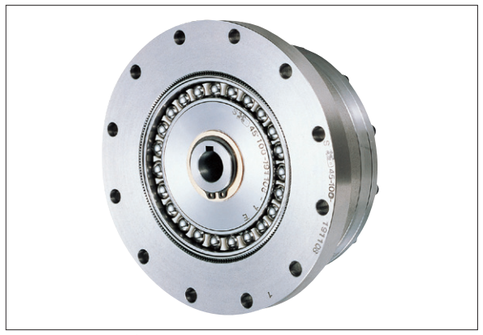


図22　2UHシリーズ

1995（平成7）年にはSHF-2UHを市場導入した。CSG、SHDのユニットも継続して市場導入した。

それぞれ重量は15%程度の軽量化にすぎないが、軽量化要求から徐々に浸透してきた。

コンポネントの進化とユニットの展開については、2-1-15項に要約する。

ハーモニックドライブ®は精密制御の減速機として、軽量・コンパクトをセールスポイントのひとつとしてユニット展開してきた。しかし、コンパクトなユニットにはなったが、構造的にコンパクトにすると、競合減速機と重量があまり変わらないようになった。そこで、性能を極力落とさず、形状は同じであるが、さらなる軽量化を目指して、軽量材料の採用、剛性を保ちながらの肉抜き設計構造のLWシリーズを2012（平成24）年に市場導入した。シリーズ名はLight Weightに由来する。

2020（令和2）年にはさらに軽量化を狙った30～50%重量減のユニット型のULW（Ultra-light Weight）を市場導入した（図23）。

これは、ユニットの主力である、CSF-2UHの構造と設計を一新し、これまでにない軽量化と扁平化を実現したものである。

図23　ULWシリーズ

■CRBの開発

1970年代からロボットの関節に使われていたハーモニックドライブ®コンポネントの出力軸側軸受けは、当初は2列の単列深溝形軸受けや、アンギュラコンタクト軸受けが主であり、徐々に、関節部の小型化のためにCRBが使われるようになっていた。UXシリーズも出力側の主軸受けはCRBの特殊仕様として、専業メーカーから供給を受けてスタートした。しかし、特殊仕様のCRBではあったが、転動部のスキマ調整量やモーメント剛性などの影響で、コンポネントと同じ性能を発揮するまでには至らなく、CRBの自社開発が必要になった。

技術概要

CRBの開発目標は、減速機の出力軸専用であるため、低速回転に限定、転動部スキマもゼロ以下の与圧とした。それまでに、他目的で蓄積して

いた研削技術を応用し、1992（平成4）年に開発を始めた。

当時はCRBに関する設計技術も製造技術もない中、市販のCRBの分解、寸法測定から、図面化、最初は全く同一寸法の部品を試作して組み上げた。その試作品を手回ししながら、スキマ量やスティックスリップなどを、技術者と技能者が一緒に、手の感触で検査、設計修正と試作を繰り返し、内･外輪の寸法変更、角度の調整、ローラの選択･組み合わせなどに反映させていった。

同時にCRBのモーメント剛性、特性評価装置なども製作し、独自の低速回転用CRBの製造技術が獲得できた。その後、性能評価と耐久試験を経て、1995（平成7）年にユニット製品への採用に移行、全ユニットシリーズに採用していった。

この新CRBを採用したユニット型は、コンポネントに比べ容易に関節部に取り付けられることや、ロボットの付加価値がシステム化の方向に移ったこともあり、徐々にコンポネントからユニット型が主力製品に移り現在に至っている。

■XCBの開発

一方、CSFスーパーミニシリーズの開発でも、短胴化したコンポネントを生かすための小型で薄型の出力支持ベアリングが必要となった。従来の2列の深溝玉軸受では軸方向に長く、CSFのフレクスプラインの短胴化が生かされなかった。そこでCRBの採用を考えたが、コロ径が小さく組み立ての難しさもあり、4 点接触玉軸受けを採用することにした。軸受けメーカーには対応してもらえず、自社開発に挑戦、2002（平成14）年に独自の4 点接触玉軸受け「XCB」を完成させた。

従来、汎用的に使われてきた深溝玉軸受やアンギュラベアリングは、ラジアル、スラスト、モーメント荷重を受けるには2個のベアリングを組み合わせて使う必要があった。それに対してXCBは、ボールが内・外輪の軌道溝に対して4点で接触しているため、1 個で全方向の負荷荷重を支持できた。CSFスーパーミニシリーズのユニット構造のコンパクト化には最適である。4カ所の接触点を結ぶとXの形になることからX Contactと呼ばれ、当社ではX Contact Ball Bearingを略し「XCB」と称した。

XCBは前述したCRBと並んで製品の特長を生み出すことに大きく貢献している。

採用市場

産業用ロボット。

その他の特筆点

CRBの量産は当初、自社生産と協力企業への委託生産、さらにCRB専門メーカーからの平行調達を経て、専門の自社工場を設けた。効率的な生産方式の確立を追究しつつ、1999（平成11）年7月にはCRBの製造会社、（株）ハーモニック プレシジョンを設立した。

2-1-12 ベントサブ（石油掘削用）の開発

開発の始まり

石油掘削現場の主役が陸上油田から海底油田に移る中、掘削方式は海上のプラットホームから降ろした掘削機で海底の地中を四方八方に掘り進む方式が主流になった。これはプラットホームの設置には莫大な資金が必要となり、地上のように何カ所も掘削リグを設置できないためである。

当時、掘削井を曲げるためにはホイップストックというくさびを打ち込む方式を採用していた。地層に沿って掘削機が自然に曲がる原理を応用したもので、くさびを打ち込んでは掘削する作業を水平になるまで繰り返す必要があり、職人技と莫大な時間を要していた。

こうした背景から当時の石油公団（2004［平成16］年に廃止）は、新技術の石油掘削装置を研究開発するプロジェクトを企画する。その進行を託された住友金属工業(株)と、1990（平成2）年に当社工場で打ち合わせをもち、要求されたのが掘削機の先端の方向を自在に変える機構の開発であった。

技術概要

機構的にはハーモニックドライブ®の大中空の特長と偏心板を組み合わせることで可能との提案をした。開発費の問題などがあったが、機構の優位性が評価され開発に着手した。

この機構にはベントサブ（Bending Sub）と名付けた。ベントサブの外径は掘る穴の太さで決まるが、装置の内側にはビットを回すためのパイプが通っていた。そのパイプと外径の間のドーナツ形をした狭小空間に、掘削機の正確な駆動に必要なさまざまな機器を納める必要があった。従来の技術では難しいことであったが、ハーモニックドライブ®は大きな中空を確保できるという特長があったため、最適な構造の減速機であった。

掘削機の先端の方向を変える機構は、ハーモニックドライブ®の出力回転に偏心板を組み合わせることとした。これは偏心板によって中心の位置が変えられるため、偏心板を2つ使えば自在に掘削機の方向が変えられるという原理に基づく考えである。

プロジェクトは1992（平成4）年にスタートし、まずはビットシャフトから大中空ハーモニックドライブ®の駆動源を得て、電磁クラッチブレーキでコントロールするアイデアを具体化した。これがベントサブの基本特許となった。後に二重偏心板を採用するなどして、最終的な機構が完成した。

2期8年にわたる石油公団でのプロジェクトで掘削井が曲げられることが実証された。後にこの技術は採用を決めたSSDS社（スペリー・サン・ドリリング・サービス社、現ハリバートン社）で実用化されることとなり、大きな市場になった。

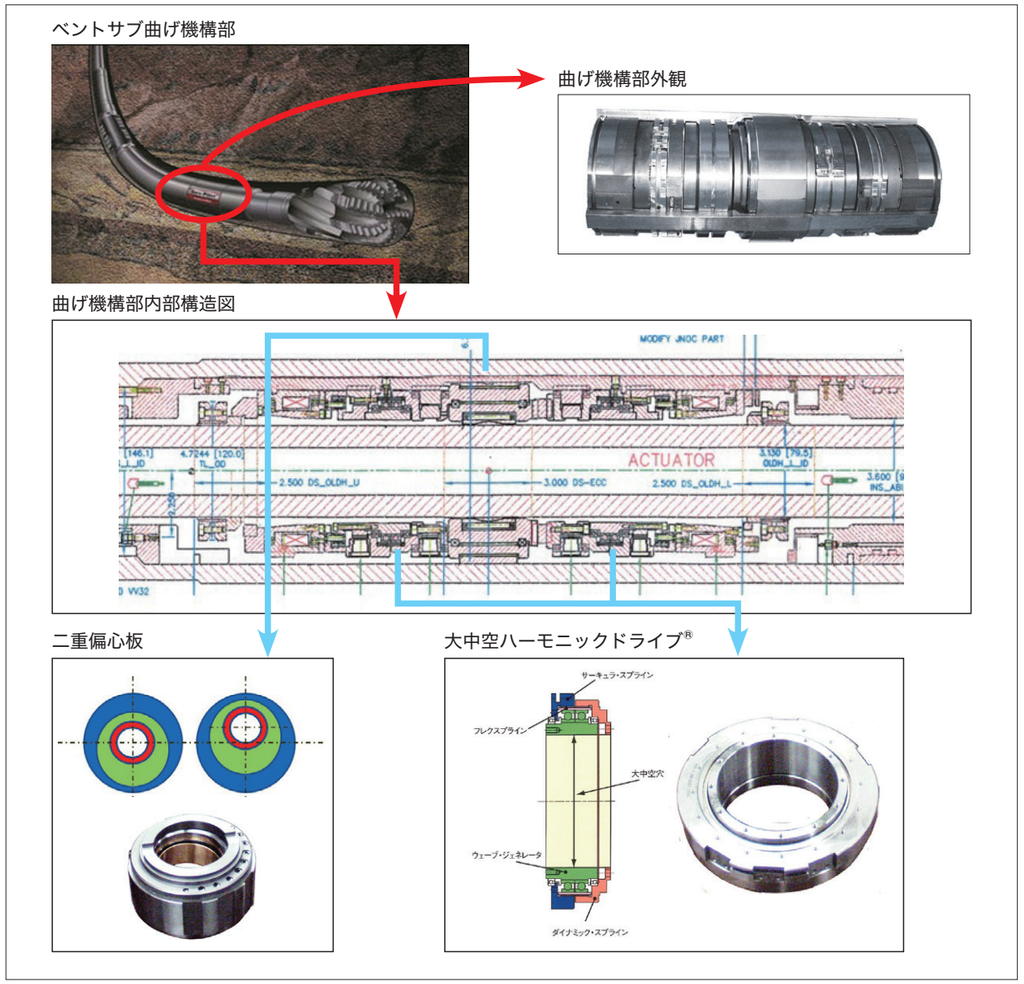


図24

これまで精密減速機といったイメージであったハーモニックドライブ®が、温度165℃、1,200気圧、常時25Gの衝撃・振動といった過酷な土木作業にも使えることをアピールすることができた。

2-1-13 車載型の開発

開発の始まり

小型・軽量の特長のあるハーモニックドライブ®を車載用途に使いたいとの要求は1970年代前半からあった。エアコンのルーバー、パワーステアリング、パワーウインドウ、シートアジャスタ、ワイパー用など多種の用途があったが、いずれも低価格が求められ実現しなかった。

しかし、21世紀になってまもなく、可変ステアリングアクチュエータでの採用が決まった。

技術概要

従来この用途には油圧や遊星歯車を使っていたものがあったが、これらの電動化を目指したのが「VGRS（Variable Gear Ratio Steering）」であった。

自動車の走行安全性を高める上で、速度が低いときは少しの角度のハンドル操作で大きく曲がることができ、速度が速いときは大きな角度のハンドル操作でも大きく曲がらないシステムを狙ったものである。そのシステムにメーカーではハーモニックドライブ®のカップ型を組み込み、研究を進めていた。しかしカップ型はフレクスプラインのカップの底（ダイヤフラム）が破損すると、ハンドルがフリーになり操舵できなくなる。そのため破損しても動力が伝達できるようにする必要があった。また、要求トルクが大きかったこともあり、専用のパンケーキFB型を開発することとした。軽量、コンパクト、静粛、高信頼性、組立の簡便さなどの要求仕様をクリアし、2002（平成14）年に採用された。

サイズは型番17相当で、シリーズ名はVF型（ビークル用フラットタイプ）とした。このVGRS用のVFは、その後数車種に採用され、初めて車載用途の量産につながり、専用ラインを設けて量産するようになった。

製品展開

VFで車載市場を初めて開拓した後、電動スタビライザー制御用のVC（ビークル用カップタイプ）も開発した。当時、スタビライザーの剛性制御を油圧で行う方式が実用化されていたが、メーカーではよりきめ細やかな制御を行うために電動化を目指していた。小さなモータで大きな力を出す目的で、高減速比のハーモニックドライブ®に問い合わせがきたものである。

要求は、小径、大トルク、高減速比、耐衝撃性、組立の簡便さなどであった。要求の数値目標に合わせ、専用設計で対応した。特殊な加工方法も取り入れ、要求を満足でき電動スタビライザーに2005（平成17）年にVC型として採用され、数車種に展開された。

車載用途としては、パンケーキ型の項に記したように、2016（平成28）年のVCT用途もある。

いずれも、国産ハーモニックドライブ®開始から、35年以上の技術蓄積と新技術で対応できたことである。

2-1-14 宇宙用ハーモニックドライブ®

開発の始まり

技術導入時のUSM社カタログには、流星探知人工衛星ペガサスの翼調整駆動にハーモニックドライブ®を使用していたことが写真、イラストレーション入りで紹介されていた。これを長谷川歯車が国内向け日本語版ハーモニックドライブ®カタログに添付していた。日本語版には、USM社は、米国防省、米国航空宇宙局（NASA）で人工衛星、軍事関係の重要部品として秘密扱いにしていたが、最近米国内でハーモニックドライブ®の一般市販が開始されたと紹介している。

USM社では、当初ハーモニックドライブ®は商品としての実績が限られており、軽量さ、コンパクトさが絶対的なメリットをもつ航空・宇宙衛星機器向けを優先させており、1960年代から実績があった。

しかし技術導入当時当社は、日本国内では有望市場とは考えておらず、国産開始20年後も実績はなかった。

そのような中、1983（昭和58）年に国内電機メーカーから宇宙用ハーモニックドライブ®の開発依頼があり、覚書を交換し開発に着手した。それは同社が、宇宙開発事業団（当時。後に宇宙航空研究開発機構（JAXA）に統合）の業務委託で、太陽電池パドル（以下パドル）駆動機構の開発を約5年間かけて実施する計画であった。同電機メーカーはこの開発を進めるにあたり、1982（昭和57）年までに約4年間を費やし海外の事例および将来の動向を調査し、目標仕様を設定していた。ハーモニックドライブ®CS-20-2A型が、このパドルを駆動する機構として同社と当社の協力関係で試作、評価試験が開始された。

そして、1992（平成4）年に国産ハーモニックドライブ®を搭載した地球資源衛星1号が打ち上げられた。その後も同社のさまざまな宇宙用機器にハーモニックドライブ®が搭載されていった。

さらに、1987（昭和62）年には、米国でUSM社製ハーモニックドライブ®を搭載した宇宙機器を開発し、数多くの実績をもっていた宇宙機器メーカーから、宇宙用ハーモニックドライブ®の引き合いがあり開発に着手した。そして、1990（平成2）年に、宇宙用ロボットFTS（Flight Telerobotic Servicer）のアーム（14カ所）、姿勢保持用脚（5カ所）の関節部への採用が決定、1991（平成3）年に49台を納入した。

既に1980（昭和55）年中頃には、USM社製ハーモニックドライブ®は、米国の宇宙飛行のモーションコントロール用ユニットやアクチュエータが、デファクトスタンダードになっていた中での国産品の採用であった。

この頃、当社でも、宇宙用ハーモニックドライブ®の確立を目指し、技術開発と品質管理の構築に取り組み、1991（平成3）年に当社主催の国際シンポジウムで国内外に発表した。その成果が、当時製品化直後であった高強度CSS型コンポネントをカスタマイズし先のFTSに生かされた。

技術概要

主には、材料の選択、軽量化、温度変化に対する特性の把握、真空環境での潤滑・寿命等の技術確立である。

材料：

宇宙用機器は、地上での製造完了から、宇宙空間に届くまでの期間が長くなり、保存時の耐食性からステンレス鋼とした。

軽量化：

宇宙用機器では、打ち上げの燃料消費の面から1ｇでも軽いことが求められる。ハーモニックドライブ®は産業用としては小型で軽量の特徴があるが、さらに軽くするために徹底して各部品を肉抜き構造とし、CSS型標準品に対し、50～60％の軽量化が図れた。肉抜き構造の部品は、たわみやすくハーモニックドライブ®の特性にも影響を与えるが、難削材のステンレス鋼を精度よく加工する技術も確立した。

温度変化に対するハーモニックドライブ®特性の把握：

－20℃～＋80℃の範囲での剛性、効率、ランニングトルク、起動トルク、増速起動トルク等の特性を把握し、最適な各部のクリアランス、締め代などを設定した。また、それらの特性が潤滑剤の粘性抵抗に比例するなどの結果から潤滑剤の選定にも反映させることができた。

真空環境における潤滑：

真空用潤滑剤の仕様と軸受け保持器への潤滑剤真空含侵処理を施すなどして耐久性を確認した。

品質管理：

宇宙用は、厳しい品質管理とトレーサビリティが要求されるため、公差管理と、製造履歴の厳密な記録が必要で、宇宙用品質保証体系を整え順守している。

このような技術蓄積をしながら、実用途では、カスタマイズされたコンポネントに対し顧客での潤滑処理や耐久性評価、その他多大なご協力をいただきながら実用化が図られてきた。

製品展開

精密制御用減速機として進化した、扁平カップ型CSFシリーズ、極限まで扁平化したCSDシリーズや、当社で初めて製品化したシルクハット型SHFシリーズ（図26参照）などが使用条件に基づいてカスタマイズされ、日米欧のさまざまな宇宙機器で数多く実績を残し、現在もその取り組みが継続している。

2008（平成20）年には、JAXAの開発仕様に基づいて開発したSHF-20、CSD-20 がJAXA機構部品のコンポネント部品に登録された（図25）。

図25　JAXA機構部品登録のSHF-20

特記事項

社史本誌で紹介している、当社主催の国際シンポジウムにおいては、日、米、欧の各国宇宙機器関連メーカーや、公的機関などによる講演発表でその時代の宇宙関係開拓の過去、現在、そして未来展望などをご紹介いただいた。社内はもとより、お客さまへの情報公開をしていただけたことは誠に有意義であり、この国際シンポジウムは今後も継続していきたい。

2-1-15　ハーモニックドライブ®の変遷

1965（昭和40）年の国産化から2020（令和2）年現在まで、継続してハーモニックドライブ®の強度と回転精度を追究してきたことを中心に前項までに述べた。

減速装置の強度に関連する重要な指標のひとつがトルク容量/容積比である。図26にハーモニックドライブ®の大きな特長である小型軽量の追求結果を形状の側面から示した。

この間、同一型番のハーモニックドライブ®において、トルク容量/容積比は３～４倍に向上してきた。技術面からの解析を通しての細部形状の探求、材料関連の改革などで達成できたものである。それに加え、加工精度の飛躍的な高精度化も達成し、回転精度を約10倍に向上させた。

高強度化すなわちコンパクト化と、高精度化の実現は当初の動力伝達用途向けのハーモニックドライブ®を精密制御用途向けに進化させ、市場創出に大きく寄与したものである。

さらにマッサーが構想しながら、実用化していなかったILLUSTRATED APPLICATIONSに示されていた多様な構想のハーモニックドライブ®も、本稿に記述したように実用化して市場要求に貢献してきた。

これは当社の技術と技能のスパイラルアップによって達成できた記録であり、これからも継続しハーモニックドライブ®を進化させていくことが当社の役割である。

コンポネントの進展とユニット型への展開

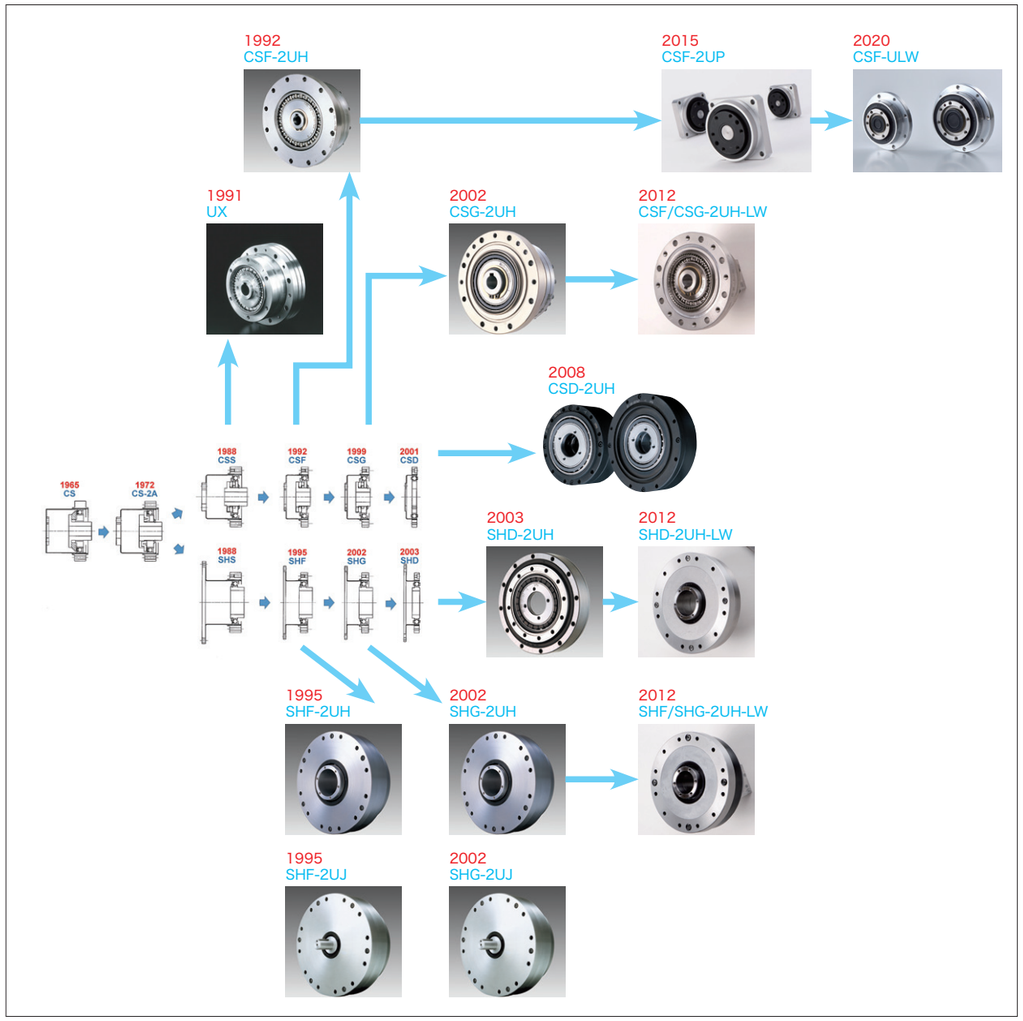


図26

2.メカトロニクス製品群

2-2-1 サーボアクチュエータの開発

DCサーボアクチュエータ

開発の背景

1977(昭和52)年の経営方針の中で、当社の生産、販売、開発の活動を、ハーモニックドライブ®単体以外の製品分野に拡大することを今後の方針とすることが発表された。

長期的な観点からハーモニックドライブ®を第一の柱とし、それに次ぐ第二の柱を求めようというものである。

ハーモニックドライブ®も国内発売されてからすでに12年が過ぎ、市場における評価はユニークな減速機としてある程度認められるようになっていた。しかし、不況の中で伸び悩み、価格面での競合が激しくなってきたことも現実であった。

このような点を認識し、ハーモニックドライブ®をサーボ系動力伝達装置に位置づけて、サーボアクチュエータの開発に踏み切ることを決定した。

上記の方針から、1977(昭和52)年12月の開発完了を目標に、DCサーボモータとハーモニックドライブ®を一体化した「ハーモニックサーボモータ」の開発テーマを設定し、製品化に着手した。

同時に油圧モータとハーモニックドライブ®を一体化した「油圧-電気サーボアクチュエータ」の製品化も設定した。

この2つのテーマは、サーボ系への当社の第一歩として取り上げたもので、用途を主として、NC工作機械、専用機、ロボット等の精密制御分野を対象とした。

2テーマのうち、「油圧-電気サーボアクチュエータ」は、当社と油圧機器メーカー、サーボモータメーカーとの3社で共同開発を進めた。しかし、試作完了時点で、振動、騒音、伝達トルク等で多くの問題が摘出され、短期間での解決は困難と判断し、開発を断念した。

■HTシリーズ

前述したDCサーボモータとハーモニックドライブ®を一体化した「ハーモニックサーボモータ」は、「Hi.T Drive(ハイティドライブ)」として、翌1978(昭和53)年に商品化した。

同時に、これを主力製品とするアクチュエータプロダクトグループ(APグループ)を新たに組織した。1978(昭和53)年度の経営計画に同グループの役割は「アクチュエータ商品を新しい商品の柱として育てるために、商品計画と開発、市場とユーザーの開拓から、最適販売法の研究と確保までの総合的開発プロジェクト」におかれ、後のメカトロニクス事業の第一歩となる活動であった。

技術概要

モータは、当時主流のDCサーボモータとし、エンコーダと共に外部調達とした。それにハーモニックドライブ®を組み合わせてアクチュエータを開発、「Hi.T Drive(ハイティドライブ)」とした。HT-14、HT-20、HT-25を1978(昭和53)年にシリーズ化し、その後、HT-8を1982(昭和57)年に市場導入した。Hi.Tの名はハイトルクに由来する(図1)。

低速性能(最高80 r/minから超低速領域までの優れた回転精度、位置決め精度)、高出力トルク、軽量コンパクト、トータルコストの有利さ(低電流入力のため制御装置が安価)をセールスポイントとした。

制御システムとしては他社製のドライバを当社ブランドで販売し、システムとしての商品群展開を開始した。

採用市場

半導体製造装置のウェハ搬送装置、各種工作機械、専用機、ガス溶接・溶断機、レーダー、試験器、巻取機など。

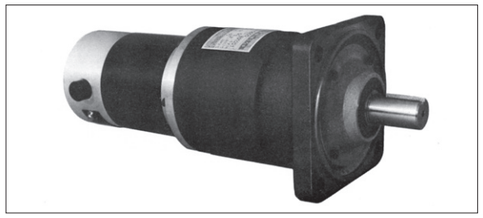


図1　HTシリーズ

製品展開

■RAシリーズ

市場要求に合わせて1984(昭和59)年に軸方向の長さを「Hi.T Drive」比で約50%短くしたRAシリーズ(ロボドライブ)を商品化した(図2)。

同時にハーモニックドライブ®はRシリーズを採用した。以後の各種アクチュエータも随時ハーモニックドライブ®の新しいシリーズが適用されていく。

HTシリーズは、サーキュラ・スプラインをケーシングに固定し、フレクスプラインを出力にした一般的な減速機部の構造である。

RAシリーズでは、軸方向長さを大幅に短くするために、フレクスプラインを固定、サーキュラ・スプラインを出力にする設計とした。そして、出力は軸形状ではなくフランジ形状とした。

また、減速機部分の全体の長さを短くするために、出力となるサーキュラ・スプラインの支持軸受けもフレクスプラインの外周側に配置、長さに影響を及ぼさない構造とした。

さらに、アクチュエータのケース取付フランジの位置をモータ本体の近くにしたり、壁取付構造にするなど、ロボット用アクチュエータとしての使いやすさのバリエーション拡大を狙った。

減速機部分の短縮構造とともに、それまで社外調達であった、モータとエンコーダを初めて自社開発した。

以後、モータ技術、エンコーダ技術を蓄積し、自社開発品と社外調達品を適宜選択していくことになった。

このようにして、市場導入したRAシリーズであったが、サーキュラ・スプライン出力の構造には、①外観の割には、重量が重い、②HTシリーズと同じ歯数比のハーモニックドライブ®の場合、減速比が割り切れなく、制御的に扱いにくいなどの課題があり発展しなかった。

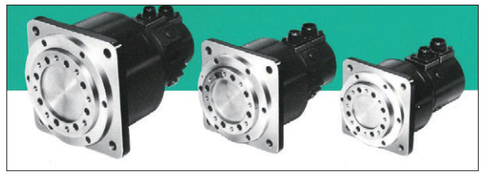


図2　RAシリーズ

■RHシリーズ

「Hi.T Drive」に、RAシリーズで自社開発したモータ、エンコーダを採用した製品で、RAと同じ1984(昭和59)年にRH-20、25、32の3型番を市場導入した(図3)。

減速機部はHTシリーズ同様、フレクスプライン出力の軸形状出力である。薄型構造ではないが、円筒形状のアクチュエータとして以後発展していくことになる。

続けて1987(昭和62)年にマイクロ&スーパーミニシリーズとしてRH-5、8、11、14を市場導入した。

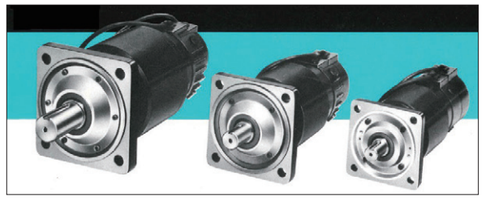


図3　RHシリーズ

■RK-Jシリーズ

この間に産業用ロボットが普及し、ロボットメーカーがロボットを販売する中、ロボットのユーザーも自社で使うロボットを独自に開発するようになった。このようなロボットユーザーから関節部分のアクチュエータニーズが生まれつつあった。

こうした背景から、ロボット関節に用いられるアクチュエータを関節モジュールRK-Jシリーズ(ROBOT MODULE)として1984(昭和59)年に商品化した(図4)。

しかし、ロボットメーカーがロボットをコストダウンして販売しはじめ、ユーザーが独自にロボ

ットを開発することが少なくなり、まもなく販売機会を失い廃止製品とした。

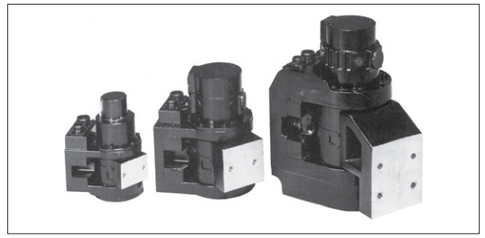


図4　RK-Jシリーズ

■RFシリーズ

RFシリーズはRHシリーズの軸出力形状をフランジ出力形状に変更し、ロボットなどへの出力接続の選択肢を広げたシリーズで、1989(平成元)年に販売した(図5)。

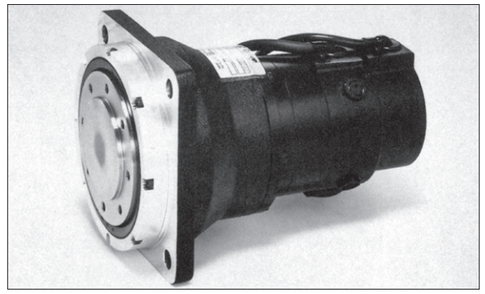


図5　RFシリーズ

■RHS、RFSシリーズ

RHシリーズの進化版である。1989(平成元)年に製品化されたハーモニックドライブ®のSシリーズと自社開発のDCサーボモータを組み合わせて、同年に軸出力形状のRHSを開発した。その後、フランジ出力形状のRFSを1990(平成2)年に市場導入した。

その後も、ハーモニックドライブ®の小型化、超小型製品の開発とともに、マイクロシリーズ、スーパーミニシリーズのDCサーボアクチュエータの製品拡大を継続していった。

ステップアクチュエータ

■ステッピングモータ付アクチュエータの展開

Hi.T Drive商品化直後に、DCサーボモータをステッピングモータに置き換えた製品の要求があり、ステッピングモータ専門メーカーのモータを取り付け、1979(昭和54)年にHT-14P、HT-20Pをカタログ製品として販売するようになった。その後DCサーボモータを取り除いた、ハーモニックドライブ®減速機部をステッピングモータメーカーに納入するようになり現在に至っている。

当社では、先に述べたように、DCサーボモータとACサーボモータは社内開発・生産をするようになったが、ステッピングモータは現在まで外部調達を続けている。

なお、ステッピングモータの制御装置は次項の2-2-2レスポンシン用に開発したドライバユニットが共通であったことから一時当社製も納入していた。

ステッピングモータは、Hi.T Driveの回転型アクチュエータだけではなく、後述する直動アクチュエータなどでも要求があるが、それらも外部調達品を採用している。

ACサーボアクチュエータ

■RSシリーズ

1980(昭和55)年頃より、DCサーボモータがACサーボモータに切り替わり始めたため、当社も1987(昭和62)年に、外部調達のACサーボモータを使用し、RSシリーズとして角フランジ形状のRS-14、20、25、32を製品化した。丸フランジ形状のミニシリーズRS-8、11、14は、ハーモニックドライブ®のサイズに適合するモータが市場になく自社開発し、1989(平成元)年に市場導入した。その後、Sシリーズハーモニックドライブ®を組み合わせてDCサーボモータ系と同様、軸出力形状のRSS-17、20、25、32とフランジ出力形状のRKS-20、25、32を展開した。

Sシリーズハーモニックドライブ®の薄型CSFシリーズを組み合わせて、RSF-17、20、25、32とミニシリーズのRSF-8、11、14を2003(平成15)年、RSF-5を2005(平成17)年、RSF-3を2006(平成18)年に市場導入、シリーズの拡大を図った。

RSF-3アクチュエータは、2007(平成19)年の「今年のロボット大賞2007」の「中小企業基盤整備機構理事長賞」を受賞した。RSF-3誕生の詳細経緯はハーモニックドライブ®製品群の2-1-3項に記載した(図6)。

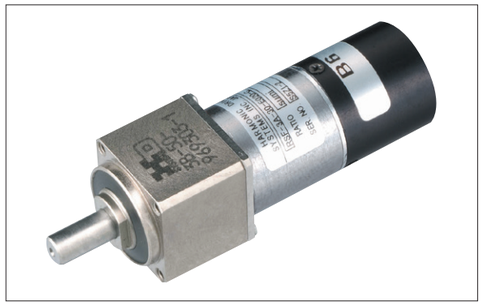


図6　RSF-3

ブラシレスDCアクチュエータ

■FLAシリーズ

1990年代、研究機関による人間支援型ロボットの研究が始まり、2000(平成12)年頃から、小型軽量で高減速比のハーモニックドライブ®が研究用途で使われるようになった。リハビリテーションや重量物の搬送、介護・福祉用途などの目的であった。以後研究機関や複数の企業から、ハーモニックドライブ®コンポネント、ユニット、アクチュエータの要求が続き、特殊設計の製品を供給してきた。

図7　FLAシリーズ

当社も将来の新市場開拓の取り組みとして人間支援型アクチュエータの標準品の開発を2017(平成29)年に企画した。マーケティング活動から使用方法の特長を捉え、ハーモニックドライブ®タイプ、ハーモニックプラネタリ®遊星減速機タイプの2種にブラシレスDCモータを組み合わせた、扁平・軽量・低価格のアクチュエータシリーズを開発、2018(平成30)年にFLA-11、14、17、20を市場導入した(図7)。用途限定設計で、出力軸側の主軸受けは深溝玉軸受けの単列、エンコーダレスなど、一般産業用途や、産業用ロボットなどの当社従来アクチュエータとは異なるコンセプトとしたシリーズである。

2-2-2　レスポンシンの開発

開発の始まり

「レスポンシン」はUSM社が開発・製造していた製品であり、ステッピングモータタイプと交流モータタイプの2種があった。USM社のマニュアルを基に、日本国内でのマーケティング調査を行った。1978(昭和53)年にAPグループを発足した際、「レスポンシン」を重点商品に位置付けた(図8)。

技術概要

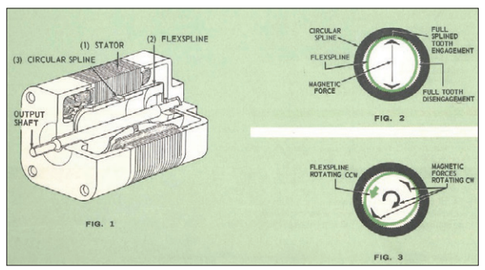


図8

パルスモータ機構とハーモニックドライブ®を組み合わせた電磁式ハーモニックドライブ®であり、レスポンス(応答)が速く、電源周波数とシンクロナス(同期)な回転が得られることから、USM社によってこの名が付けられていた。

フレクスプラインは一般的なハーモニックドラ

イブ®よりも胴部が長く、剛性を下げて、たわみやすくしている。フレクスプラインの内周には珪素鋼板を巻き込んでいる。胴部外周と僅かのギャップを介して、励磁巻き線を有するステータが配置され、サーキュラ・スプラインがステータ内周端部に固定されている。励磁巻き線の磁界の回転によって、フレクスプライン内周の珪素鋼板が吸引され楕円にたわみ、波動が発生する。

特長のひとつが一般のステッピングモータと比較して、ロータの等価慣性モーメントがきわめて小さく、かつロータとスプラインステータがハーモニックドライブ®と同じように、長軸上でスプラインかみ合いを行うため、過渡応答にきわめて優れたステップ駆動を実現している。また、プルイントルクが大きく、比較的大きな慣性負荷を負えることや、低速領域での共振現象がないことも特長であった。

国内販売にあたり、駆動回路DU-200シリーズを開発し販売した。

採用市場

新聞社向けなどの業務用ファクシミリの送り機構、輪転機、自動製図器のXY駆動、写真植字機のミラー駆動・紙送り、放電加工機の電極昇降・XYテーブル、連続鋳造装置ロール間隙制御、放電加工機電極駆動、ウォッチケース研磨機など。

製品展開

■モータ

HDM-15/155/170/175/185シリーズ

■ドライバユニット

DU-200/200A/200B/200E/200Hシリーズ

■ドライバモジュール

DM-100/200シリーズ

■パルスジェネレータモジュール

PGM-100シリーズ

その他の特筆点

販売は1990(平成2)年頃まで続いた。

しかし、磁気音と歯車部のかみ合い音の問題があった。これは製品の構造に起因しているもので解消できなかった。販売の伸びもみられなく、1991(平成3)年頃に廃止製品とした。

2-2-3 FH2000シリーズの開発

開発の始まり

1984(昭和59)年頃、低速・高トルクのダイレクトドライブモータ(DDモータ)が、「減速機のもつバックラッシや摩耗がなく、高い位置決め精度が可能なサーボモータ」として脚光を浴び始め、とくに水平多関節型のロボットに使われ始めた。また、中空・薄型であることも大きな特徴であった。

将来の駆動装置と位置づけ注目、調査しながら、中空構造が容易にできる特長のあるハーモニックドライブ®を生かせる中空サーボモータを開発することとした。それを一体化し、フラット型中空ACサーボアクチュエータFH2000シリーズの製品化を目指したものである。DDモータの特長をもち、かつ高トルクのACサーボアクチュエータである。

シリーズ名のFはFlat(扁平)、HはHollow(中空)、2000は21世紀の主流製品という意味である。

技術概要

1987(昭和62)年にFHA-25Aの開発からスタートした。ACサーボモータは当社が巻線方法などを提示する形で、外部メーカーと共同開発、試作を繰り返し、中空モータを開発することができた。扁平中空のハーモニックドライブ®と組み合わせ、1990(平成2)年3月末にFHA-25Aを発売した(図9、図10)。

図9　FHA-25A

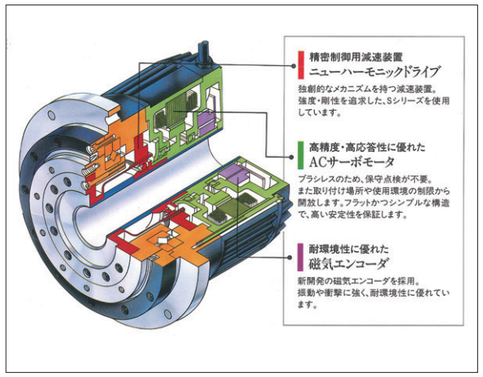


図10

その後、販売促進プロジェクトを立ち上げ、開発技術者が13カ月間、全国にPR、市場調査をした。半導体製造装置、工作機械メーカーなどを訪問し、良好な市場の感触を得、1年間で250台の販売実績を築いた。

FHA-25Aは中空でありながら、DDモータに較べ高トルク、軽量コンパクトであることから、顧客装置の小型化にも寄与した。

後に、中空モータはモデルチェンジを機にコスト低減、性能向上を図るとともに、シリーズ拡大の開発期間を短縮するために、社内単独開発とし、技術蓄積を続けている。

採用市場

ロボット、半導体製造装置、光産業用機械、医療用機器など。

製品展開

FHA-25Aの市場導入後、小型化、高トルク化、さらなる大中空、ブレーキ付きなどの要望があり、シリーズ拡大の開発を進めた。

1992(平成4)年にFHA-40Aを市場導入後、自社開発したモータを組み合わせたFHA-14A、17A、25B、32B、40B、50Aと順次シリーズの拡大とオプション仕様の拡充を図り、市場の要求に応えていった。高速軸側の内部にラビリンスシールを採用し、内部損失を低減したことも本シリーズの大きな特長である。

以降、FHAシリーズは、現在まで30年間、メカトロニクス事業の主力製品となっている。

■FHA-Cシリーズ

中空扁平を追究し、超薄型のハーモニックドライブ®CSDシリーズを使用したFHA-17C、25C、40Cを2000(平成12)年に発売後、FHA-32Cを追加した。

全長をさらに短縮、中空穴をさらに大きくし、性能特性をよりアップしたシリーズである。

■FHA-C ミニシリーズ

光産業用機械および医療用機器などへの市場の拡大を狙い、FHAシリーズのミニ版の開発に着手した。サーキュラ・スプラインとハウスの一体化、クロスローラベアリングとフレクスプラインおよびハウスの締結を締結ボルトではなくネジ式とすることで軸方向の縮小(扁平)を図った(図11)。

2003(平成15)年にキュービック状のシリーズが完成した。現在もこの製品はバリエーションを拡充している。

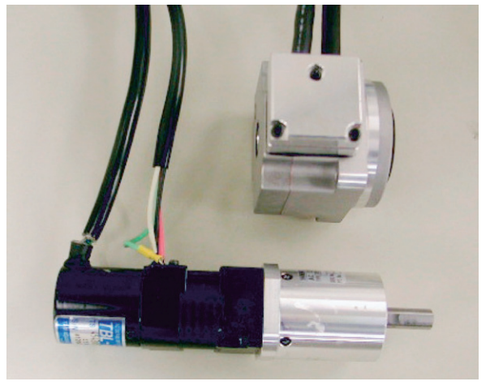


図11　FHA-8C(上)とRSF-8A(下)の比較図

■SHAシリーズ

FHA-Cシリーズでは採用されなかった産業用ロボット用途を目指し開発した。そのため、高トルクハーモニックドライブ®のSHGシリーズを使用、よりコンパクト化、耐環境性を強化したシリーズである。

構成要素のモジュール設計によって、組み合わせの自由度、バリエーションの拡大が図りやすいコンセプトとした。

また、エンコーダは自社開発の磁気式アブソリュートエンコーダを搭載している。

2009（平成21）年にSHA-25 ～ 65を市場導入、その後、SHA-20を市場導入し、現在までシリーズ拡大、オプション拡大などを展開している（図12）。

図12　SHAシリーズ

■中空モータの単体販売

また、中空モータが評価され、顧客要求に応じてFHAシリーズのモータ単体をMAAシリーズとして1993（平成5）年から販売している。

SHAシリーズのモータも、モータ単体での取り扱い易さの改良を加え、2018（平成30）年からHMAシリーズとして販売している（図13）。

図13　HMAシリーズ

2-2-4　位置決め装置群の開発

開発の始まり

■回転位置決め装置

測定装置、光学機器、半導体・液晶製造装置では、高い分解能と、高精度な繰り返し位置決め精度が必要で、高減速比で優れた角度伝達精度のハーモニックドライブ®コンポネントが使われ始めていた。

そのような中、顧客からユニット化の要求も出てくるようになり、精密位置決め装置やアクチュエータの製品化に取り組むこととした。

顧客装置では、より薄型の高精度化した特殊パンケーキ型（FB型）ハーモニックドライブ®を採用していた。

しかし、高い位置決め精度と、テーブル上面の振れ精度、平行度が求められるユニット製品であったため、より精度のよいカップ型（CS型）を組み込んだ回転テーブルの製品化を目指した。回転テーブル部は、当社が培ってきた精密研削加工技術と生産技術面の工夫から、スラストニードルベアリングの転動面の高精度な加工面を実現することで、テーブル上面の目標振れ精度を達成することができた。そして、1985（昭和60）年に精密小型割り出しテーブル「ファイン・インデックスθテーブルFIU-20」を市場に導入した。（図14）

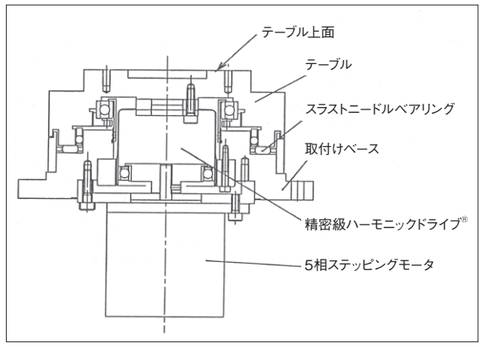


図14　FIU

以降はシリーズ拡大を図るとともに、顧客要求に対応した特殊割り出しテーブルも製品化しながら、1989（平成元）年にFIU-14 ～ FIU32のシリーズ化が完成した。

■直動位置決め装置

1984（昭和59）年に製品化した当時最小型番のハーモニックドライブ®CS-5の用途開拓が進まない中、交流のあった東北大学電気通信研究所の伊藤弘昌教授（当時）にCS-5 のコンポネントと減速機をもって用途の相談をした。そして「出力軸にネジを取り付けて直動駆動にしてみると、このような用途があるかもしれない」とのアドバイスをいただいた。

早速開発に取りかかったが、高精度なねじを取り付けてもそのままでは目標の位置決め精度を満たせなかった。その後、ねじの計測や芯出し、ねじハウジングの改良、測定方法、加工方法などについて工夫を重ねながら関連技術を蓄積、1989（平成元）年にリニアアクチュエータLA-30が完成した。これが伊藤弘昌教授のアドバイス通り、電子顕微鏡への採用に繋がった。その後ハーモニックドライブ®のサイズに合わせてストローク、推力を拡大し、直動シリーズ製品に展開されていった。

技術概要

LA-30は、CS-5の高い減速比と精密リードネジの組み合わせで分解能0.0174μm（17.4ナノメータ）、ストローク10mmが実現できた。当時、リニアアクチュエータは外国製品が輸入されていたが、公称精度が保証されたものはほとんどなかった。

その後、精度向上のために、精密リードねじをボールねじに切り替えたLA-30Bを1994（平成6）年に開発した（図15）。以降もボールねじのタイプを主体にシリーズの拡大が継続されている。

図15　LA-30B

採用市場

電子顕微鏡の試料微動装置用。すばる望遠鏡では鏡の平面度調整にLA-30Bをベースとした特殊品の採用。その他、バリエーションの拡大により、射出成形機、サーボプレス機、印刷機など。

製品展開

長ストロークのLA-32、高推力型のLAH-46、LAH-80など市場要求に基づき展開。

■LBC

推力の大きい用途として、ドイツHarmonic Drive System GmbH社で開発したリニアアクチュエータを1992（平成4）年から輸入販売していた。しかし、価格低減と国内市場の要求を満たすために、国産化を進め1995（平成7）年に、ハーモニックドライブ® CSF-25を採用した最大推力12,000NのLBC-25Aを市場導入した。用途は油圧から電動に変わりつつあった射出成形機、サーボプレス機、印刷機などであった。

その他の特筆点

1985（昭和60）年の精密小型割り出しテーブル（FIU-20）、1989（平成元）年のリニアアクチュエータ（LA-30）の市場導入を通して、高精度位置決め装置市場が開拓できた。

さらに電子機器、光学機器産業では、高精度化、高精密化の要求が高まっていた。

そのような背景のもと、精密位置決めを意味するファイン・ポジショニング・システム（FPS）を事業展開する目的で、1990（平成2）年に、FPSチームを組織した。同チームはリニアアクチュエータLA-30を応用した精密位置決め装置として、各種のステージを開発した。1990（平成2）年にXY2軸の「ナノメータステージ」（図16）、1991（平成3）年に高精度・高分解能の性能を利用した有限回転の「ナノラジアンステージ」、1992（平成4）年にXYZ3軸の「ナノオートステージ」、1993（平成5）年に高い垂直度をもつ小型・軽量な1軸ユニットの「ナノポジショナ」などである。いずれも薄型で高剛性・高精度の特長をもっていた。

これらを含めた精密位置決め装置は、大きな市場を形成すると思われたが、市況の悪化による事業構成の組織変更にともない、開発製品と組織をメカトロニクス本部に組み込み専任チームを解散した。

その後、先に記述したFIUインデックステーブ

ルと、各種ステージ類は　他社が展開したDDモータの精度向上にともない、価格競争力も失い1995(平成7)年に廃止製品とした。

回転を直動にするというリニアアクチュエータの技術は2005(平成17)年に、車のスポット溶接ガンに応用されるという新しい用途に生かされている。

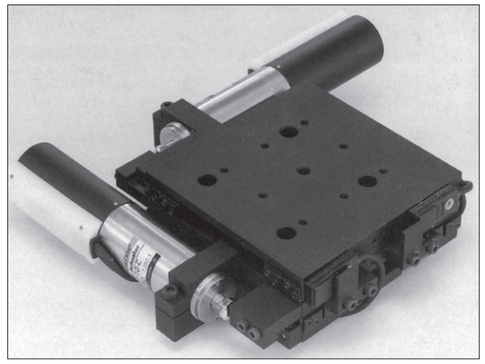


図16　ナノメータステージ

2-2-5　制御装置群の開発

開発の始まり

サーボアクチュエータの駆動には、アクチュエータを制御するドライバユニットが必要であり、当初はサーボモータメーカーからのOEM供給で対応した。

しかし、精密な位置精度、回転精度を特長とする、Hi.T Driveにはアクチュエータを最適に制御する専用のドライバをセットで供給することが、アクチュエータ拡販に必須であり、自社開発の展開も始めた。

最初は、USM社から輸入販売していた「レスポンシン」用としてDUシリーズを1978（昭和53）年に開発販売し、技術蓄積をした。

同年に市場導入のHTシリーズも、当初、OEM製品であったが、前記方針のもと開発を始め、1982（昭和57）年に自社製ドライバ「DCサーボモータ用HSシリーズ」を販売した。HSはハーモニックドライブ®のサーボモータ用ドライバユニットという意味である。

技術概要

PWM制御方式採用の高精度位置決め制御、高安定速度コントロールとして、アナログ入力対応、デジタル入力対応、データ通信入力対応などを順次展開していった。

製品展開

■DCサーボアクチュエータ用HSシリーズ

■HS-90、HS-100シリーズ

アクチュエータHTシリーズ用にOEM供給を受け1978（昭和53）年に発売した。

HS-90シリーズは駆動回路にサイリタスイッチング方式を、HS-100シリーズはトランジスタリニア方式を採用したドライバユニットである。

■HS-200シリーズ（DCサーボモータ用）

1982（昭和57）年にHS-200シリーズの自社開発に着手。トランジスタリニア方式を採用し、同年からHS-220、HS-240およびHS-250を順次市場導入した。

1984（昭和59）年にシリアルパルス指令のHS-300シリーズ、1987（昭和62）年にはPCコマンドによりモータ制御するHS-400シリーズを市場導入し、当時急成長した半導体製造の分野での需要に応えた。

■HAシリーズ（ACサーボモータ用）

1987（昭和62）年から販売したACサーボアクチュエータ用ドライバユニットHAシリーズのHA-200/300はモータメーカーからのOEM品であった。1993（平成5）年にはワンチップマイコンやIPMが市販されたことから、小型で位置・速度・トルク制御が一台で可能なHA-600を制御機器メーカーと共同開発し市場導入した。

2000（平成12）年にはRISCマイコンを採用しさらに性能を向上させ、新規開発した省配線エンコーダ搭載のFHA-Cシリーズとの組み合わせのHA-650を市場導入。

2003（平成15）年にFHA-C ミニシリーズに合わせ、14本線エンコーダにも対応できるようASICを搭載したHA-655を市場導入。2008（平成20）年にはSHAシリーズとの組み合わせで、Aフォーマットエンコーダにも対応できるFPGAを搭載した進化型ドライバHA-800を市場導入した。

■サーボモータメーカードライバとのコラボレーション対応の展開

一般的に、産業機器メーカーはシステムやコストに適したACサーボモータを選定し、それを上位コントローラで制御する。上位コントローラとモータを制御するサーボドライバは省配線、信頼性、使いやすさを実現するために、各サーボモータメーカー独自の通信プロトコルやオープンフィールドネットワークに接続される。このような背景の中で当社のアクチュエータを産業機器メーカーに広く使用していただくためには、サーボドライバが各通信プロトコルに対応する必要がある。

このニーズに対し、2006（平成18）年から2009（平成21）年にかけて、当社サーボドライバHA-800/680シリーズでは、数社の通信プロトコルに対応したモデルを市場導入した。

2012（平成24）年には、当社開発の中空ACサーボモータを他社サーボモータメーカーのドライバで駆動する要求があった。これに対し、中空サーボモータのエンコーダ通信プロトコルを他社仕様に変更し接続可能とした。これが、他社サーボモータメーカーのドライバとのコラボレーションの始まりとなった。その後、数社のサーボモータメーカーとのコラボレーションに展開され、現在も新たなコラボレーション活動を継続している。

この展開によって、産業機器メーカーやエンドユーザーの当社アクチュエータの選択肢が広がり、アクチュエータを主とするメカトロニクス事業の拡大に貢献している。

2-2-6　ダイレクトドライブモータ KDUシリーズの開発

開発の始まり

1984（昭和59）年頃に、ダイレクトドライブモータ（DDモータ）が脚光を浴び始める中、扁平中空アクチュエータFH2000シリーズを開発し現在まで展開していることは、2-2-3項に記述した。

同時に、さらに高精度化が進展する半導体製造装置、フラットパネルディスプレイ製造装置などの市場を見通し、減速機をもたない、直動および回転型のDDモータを探索していた。

そのような中、当社に在籍していたスロベニア出身の技術者から、同国の研究所がDDモータを研究、特許を取得している情報を得た。特許内容を検討した結果、DDモータとして優れた特長をもっていることが分かった。そこで特許の専用実施権取得と発明者の協力を得る契約を締結、1996（平成8）年に開発を開始、2006（平成18）年のKDU-13の製品化に結び付いた。

技術概要

KDUは独特な構造と巻き線方式から当時市販されていたDDモータよりもパワーが大きかった。

しかし、独特の設計の巻線は、一般のモータの巻き線機では効率良く巻くことができなかった。そのようなとき、トランスの巻線技術に関する大学教授の論文を知り、モータに限っての実施権を取得、教授の支援を受けながら専用の巻線機を開発、KDUの生産が可能となった。

KDUは、超高分解能のエンコーダ（838万分割）を使用し、絶対位置精度10秒、繰り返し位置決め精度±0.5秒、モータ出力面の振れ精度を2μm以下の高精度を達成した。当社の精密加工技術も生かされ達成できたもので、中空穴径が大きい特長のあるDDモータとなった。KDUの名称は、Kが開発者の頭文字、Dが発明者で開発に参加したスロベニア人技術者の頭文字、UがUnitに由来する。

製品展開

2010（平成22）年にセンサの品質およびサーボアンプの保守性の改良のため、モデルチェンジを実施し、より高分解能（1,184万分割）のKDU-13SB/WBを市場導入した（図17、図18）。

2011（平成23）年には特定顧客から繰り返し位置決め精度±0.35秒の要求があり、エンコーダシステムをデュアルヘッド化することにより達成し、KDU-13SCとして販売した。

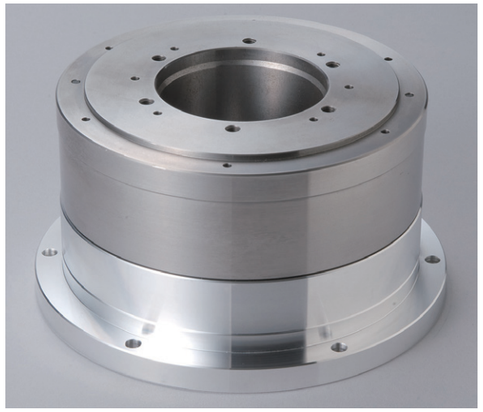


図17　KDU

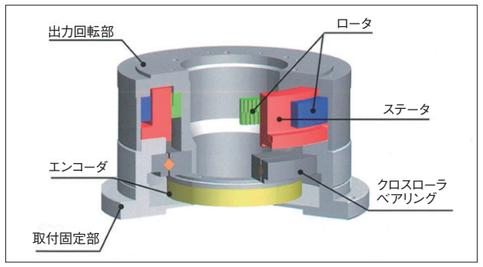


図18

採用分野

半導体メーカー組立装置のインデックステーブル部、半導体光学部品の精密測定装置、エンコーダ基準原点の検査装置など。

2-2-7　レーザースキャナ用LSAの開発

開発の始まり

ハーモニックドライブ®は減速機としての機能に加え、優れた増速機としての特性をもっている。この増速特性を生かした高応答タイプのマイクロステップアクチュエータ（MSA）の開発が工作機械メーカーから依頼された。

ハーモニックドライブ®の低速軸から、可動域がきわめて狭いピエゾアクチュエータの微小変位を回転増幅させ、高精度な角度操作とともに、最大10度の大きな回転角が得られるものである。この動きでレーザースキャナのミラーを高速駆動し、レーザー光を振るものであった。

MSAは国内では製品化されていなかったレーザースキャナ用として開発し、1990（平成２）年に展示会などに出展して市場の反応を見た。

しかし、製品の組立時に調整が難しい、回転角度が目標値に到達しない、位置決め精度が安定しない、応答性が悪い、等目標性能が達成できなく開発を断念した。

技術概要

MSAの技術上の問題が解決できない中で、従来から培ってきたモータやエンコーダ技術を基盤としたレーザースキャニングアクチュエータ（LSA）の開発に着手した。

有限角回転サーボモータ用の特殊エンコーダの考案によって、MSAの問題が解決できる見通しが立ち、新型アクチュエータの開発に切り替えたものである。

このエンコーダを組み込んだ有限角モータは特許を取得した。

開発途上では、温度ドリフトによる原点が狂うなど課題も出てきたが、さらに新しい技術を考案するなどして1994（平成６）年にガルバノ式光学スキャナとしてLSA-50A（図19、図20）を市場導入した。併せてドライバ2機種を市場導入した。

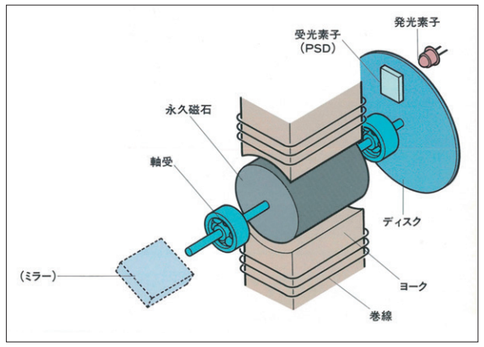


図19

図20　LSA

採用市場

レーザーマーカー（ペットボトルの印字などに使う）のレーザー光の振り角を変える部分で採用された。

製品展開

1999（平成11）年にLSA-20A、2004（平成16）年にLSA-10Aを製品化した。

2002（平成14）年には、特定顧客向けLSA-20Bが高応答の要求目標を達成し採用に至った。LSAシリーズはビームサーボ®の商標を登録している。

その他の特筆点

■レンズ駆動用リニアモータ

当社のLSAを2軸使っていたレーザーマーカーメーカーから、2004（平成16）年に新たな要求があった。それはX-Yの平面走査に加え、レンズを移動させ、アクティブなフォーカスを行うことにより立体的な印字をさせるためのZ軸用リニア駆動モータの要求であった。

高速、高応答、高精度の要求仕様で、当時市場にないモータであり独自開発することとした。

モータは、高推力ボイスコイルモータ、エンコーダはLSAセンサの原理を用いた直動センサを開発した（図21）。

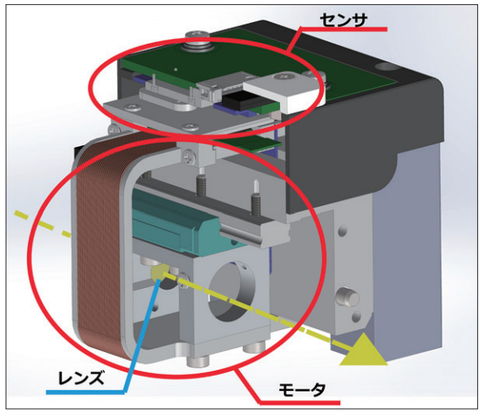


図21

ミクロン単位の位置決めを数百Hzの速度で実現するために、軸受け寿命の課題と共振抑制制御に取り組み要求仕様を達成、2006（平成18）年から納入を開始した。

この機構は、リニアアクチュエータとして特許を取得し、回転型LSAとともにメカトロニクス製品販売に大きく貢献している。

2-2-8　エンコーダ（センサ）の開発

開発の始まり

1978（昭和53）年に市場導入したアクチュエータHTシリーズのエンコーダは外部調達のOEM製品を採用して発売した。しかし、エンコーダはアクチュエータの重要な技術のひとつであることから、1984（昭和59）年のRHシリーズのアクチュエータ開発を契機に、自社開発する方針も併せて持った。

自社アクチュエータに適切な技術方式の適用、技術蓄積、新技術の取得をしながら、自社開発と専業メーカーからのOEM製品の採用を選択するようになった。

技術概要

RHシリーズ用として、当初はフォトトランジスタを使ったが、精度が出なく、フォトダイオードを用いた差動方式のエンコーダを開発することとした。しかし、フォトダイオードの生産はイニシャルコストがかかるため、エンコーダ専業メーカーと共同開発することとした。

製品展開

■マイクロエンコーダMEシリーズ

サーボアクチュエータRHシリーズに使うエンコーダとして、1984（昭和59）年にMEシリーズを開発した。モータに組み込むマイクロエンコーダの共同開発を進めたもので、専業メーカーで製造しOEM製品を搭載した。

単体販売する製品としては、OEM供給を受け、MES-6、MES-9 を販売した。

鉄道の軌道幅を測定する専用装置の要求に特殊品を開発するなど、特殊用途で使われた。

また、MES-6は当時世界最小のエンコーダであり、先に記載したアクチュエータRSF-3 の実現にも大きく寄与した。

最初に述べたが、センサはモーションコントロールの重要な要素であり、また当社メカトロニク

ス製品の特性にも大きく影響を及ぼすために、継続して技術開発に取り組んでいる。MES-6はハーモニックシン®の商標登録し単体販売もしている。

■磁気式エンコーダ

当社のアクチュエータは、グリース等の潤滑剤を必要とする減速機とモータの組み合わせである。このため、光学式エンコーダへの潤滑剤の油の付着という問題があった。これを解決するために、耐環境性のある磁気式エンコーダを自社開発した。

2005(平成17)年に特定顧客向けの産業用ロボット用アクチュエータにこの磁気式エンコーダを搭載した。このアクチュエータは、センサ検出部をハーモニックドライブ®内部に配置することでコンパクト化を図ることができた。しかし、グリース浸漬による部品の劣化や、センサリード線からの油分漏れなどの課題も発生したが、改善し対応した。

この課題を解決すると同時に、フェールセーフ、温度・速度の異常検知、バッテリによる常時多回転カウント等の機能向上を図っていった。

磁気式エンコーダは2009(平成21)年のアクチュエータSHAシリーズ用に改良され、センサマグネットの多極化によって位置検出分解能は、13bitから17bitに向上した。しかし、前記課題解決のためにSHAはセンサ検出部をモータ後方に配置した。至近に配置される電磁ブレーキからの磁気ノイズの影響を受ける課題がでたが、複数のセンサを用いて補償する方法で解決した。このエンコーダはその後、他社サーボアンプに接続するため、各社のシリアル通信フォーマットに対応する機能拡充を行い、アクチュエータの発展に寄与している。

■トルクセンサユニット

動力伝達系のトルク管理や制御に使われるトルクセンサは、細長い軸状のねじれ易い部品に、ねじれ応力を測定するストレインゲージなどを取り付けてトルク測定するのが一般的である。専用のユニットもあり、高精度ではあるが、動力伝達系に付加して取り付けなければならなく、伝達系が大きくなる難点がある。

一方、ハーモニックドライブ®のフレクスプラインは薄肉であるため、負荷トルクから発生するねじれ応力を検出しやすく、その部分に歪ゲージを取り付ければトルクが測定できる。小形・軽量でねじれ部材を付加する必要もなく、全体の剛性が下がらなく、また減速機と一体で装置に組み込みやすい等の特長を出すことができる。

ハーモニックドライブ®のフレクスプラインを利用したこの方式は、鹿児島大学の橋本稔教授が研究を始められ、当社との共同研究につながった。橋本稔教授は後に信州大学に移られた。共同研究と応用開発を近年まで長く継続している。当社では、2000(平成12)年にトルクセンサ内蔵ハーモニックドライブ®ユニットとして製品化した(図22)。

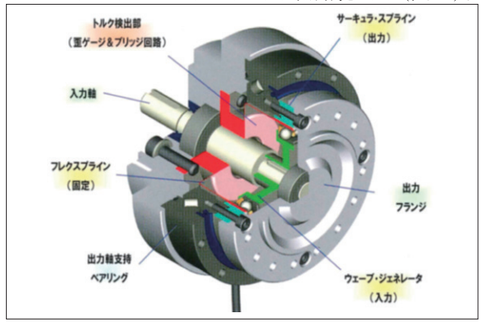


図22　トルクセンサユニット

2-2-9　精密遊星減速機アキュドライブ®のアクチュエータ展開

開発の始まり

ハーモニックドライブ®とサーボモータを組み合わせたサーボアクチュエータは、ハーモニックドライブ®の高減速比の特長から、低速出力回転で優れた性能をもっている。その中で、高速化対応のアクチュエータとして、低減速比のアキュドライブ®を組み込み、アクチュエータシリーズとして、幅広い市場要求に対応できることを狙ったものである。

製品展開

■CPMシリーズ

高速回転速度（80 r/mim以上）の市場向けとして、1992(平成4)年にハーモニックドライブ®を用いたDC、ACサーボアクチュエータに使用しているモータを転用し、アキュドライブ®HPシリーズと組み合わせたアクチュエータを開発した。

DCサーボモータ仕様のCPDタイプ、ACサーボモータ仕様のCPAタイプである。

一方、同時に進めていた遊星減速機HPシリーズの高トルクタイプHP-Aは、モータメーカーへのOEM採用が決まり減速機単体の供給が始まった。

そのことによりアキュドライブ®HP減速機はギアヘッド販売に特化することとし、CPD、CPAの販売は個別対応製品とした。

しかし、シリーズの拡大は必要と判断し、1993(平成5)年に、このモータメーカーが販売するアクチュエータを逆にOEMで一括購入し、販売することになった。

シリーズ名はCPMシリーズとし、型番は14、16、20、25、32、40番を揃えた(図23)。

CPMシリーズは市場要求価格に対応できず、また制御面でのサービスも当社では十分に行えないなどの問題点もあり販売は思うように伸びなかった。

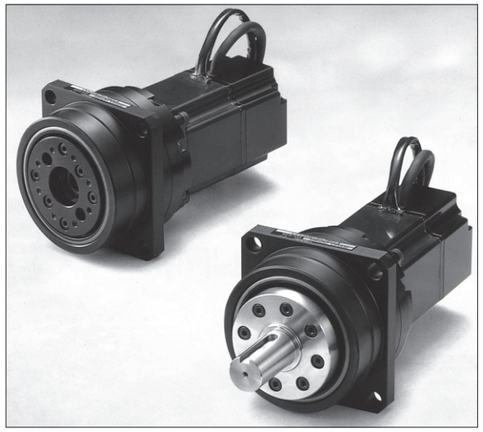


図23　CPMシリーズ

■RJ-16

CPMの市場導入後、低価格要求の対応として、低価格ACサーボモータを使用したアクチュエータ型番16番に限定したRJ-16を1997(平成9)年に市場導入した。

ステッピングモータ付きを超える製品として、大きな加速トルク、脱調のないフィードバック制御でありながら低価格での提供を狙いとした。しかし、狙い通りには普及せず2000(平成12)年に製造中止とした。

■SHA-25、32-HP

SHAの高速化シリーズとして、扁平中空遊星減速機HPFシリーズと中空サーボモータを組み合わせた製品でSHA-25とSHA-32を2011（平成23）年に市場導入した。エンコーダは磁気式である。

■FLAシリーズ

2-2-1項に記したFLAシリーズにも遊星減速機シリーズがある。

2-2-10　メカトロニクス製品の変遷

1977(昭和52)年の経営方針から始まったサーボアクチュエータの開発を皮切りに、それまでの減速機や機械要素のメカニカルな技術・技能領域に加え、モータ、制御装置、センサなどのモーションコントロールに必要な技術領域の獲得、蓄積、拡大を図りながら製品展開をしてきた。

当初は、ハーモニックドライブ®の小型・軽量を生かしたサーボモータ直結型のサーボアクチュエータであったが、さらに中空構造が容易なハーモニックドライブ®の特長を生かすことができる中空サーボモータ、中空センサなども開発し、新機軸のアクチュエータの市場展開が図れた。そして回転型アクチュエータから直動型アクチュエータに展開、制御運動領域の拡大から新市場参入も図ることができた。

蓄積したモータ技術やセンサ技術と市場要求製品を結び付ける発想から、独特の光学スキャナなども実現でき、事業領域の拡大に寄与してきたのが、メカトロニクス製品群である。

これは、当社のもつメカニカルなノウハウと、新たに蓄積してきたソフトを含んだエレクトロニクス技術の融合で実現できたことである。

今後ますます、技術の向上を図り、トータル・モーション・コントロールの要であるメカトロニクス技術を向上、拡大し、精密制御市場に製品を提供していく。

3.アキュドライブ®（遊星歯車）製品群

2-3-1 初期の遊星減速機BP、MHシリーズの開発

開発の始まり

ハーモニックドライブ®は、小型軽量で高減速比という特長をセールスポイントとして販売活動を行っていた。市場では高減速比を評価する一方で、アプリケーションの高速化にともなって低減速比が要求されるようになってきた。また、他減速機を使っている分野からも、低減速比のハーモニックドライブ®に対する要求が多くなっていた。

当初のハーモニックドライブ®は減速比80が一番小さかったが、それらの要求に応えるべくハーモニックドライブ®の低減速比について研究を重ね、1982（昭和57）年に減速比60、50シリーズを製品化することができた。

しかし、減速機市場はさらに低減速比の市場規模が圧倒的に大きかった。

ハーモニックドライブ®では、機構上容易ではなく、1980（昭和55）年頃から全世界を対象として、低減速比が可能な減速機の調査を開始した。十数点のユニークで興味深いものがあったが、モーションコントロールには適していないものばかりであった。

そのような時期、ハーモニックドライブ®の導入と発展に関わった後、1978（昭和53）年から筑波大学で構造工学系の教官を務めていた亀田博に状況を話すと、「ハーモニックドライブ®の実情や（株）長谷川歯車の技術蓄積を考えると、オーソドックスではあるが遊星減速機が向いている」とのアドバイスを受けた。

そして、1986（昭和61）年から遊星歯車減速機に絞って検討を始め、マシンエンジニアリング社の特許に基づく方式（後にBP減速機と称した）と信州大学両角宗晴教授の「転位内歯車」の特許に基づく方式（後にMH減速機と称した）の技術を取得して開発を始めた。1987（昭和62）年からは、再入社した亀田博が開発に参画した。

技術概要

■BPシリーズ

本方式の特長は、外部から軸間距離を調整することでバックラッシを解消するという技術である。

1988（昭和63）年にバックラッシ1分以下の、減速比7.2と9.0の2機種をBPシリーズとして発売、ステッピングモータ付きと両軸型減速機を標準化した（図1）。

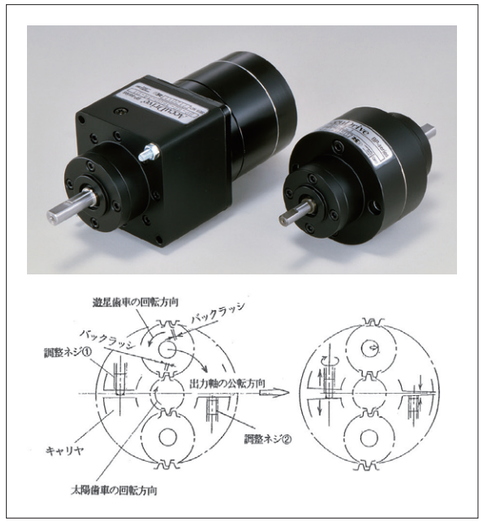


図1　BPシリーズ

ハーモニックドライブ®以外の遊星歯車減速機製品として、アキュドライブ®（AccuDrive®）の商標権を1987（昭和62）年に取得し歯車減速機事業を開始した。

その他の特筆点

BPシリーズは高負荷容量に不向きであり、位置決め精度や速度変動の改善が困難な製品でもあった。そのため製品の発展はなく、後に他の遊星減速機シリーズを製品化したこともあり、1999（平成11）年に廃止製品とした。

■MHシリーズ

本方式は、内歯車と遊星歯車の歯数差が0枚から6枚程度の、いわゆる小歯数差遊星歯車減速機機構である。

2段型では、前・後段歯車歯数の選定によって、減速比を20～1,000以上とすることができる技術である。

開発目標は減速比25～60、低慣性、高剛性、低振動、高効率、小型軽量とした。

試作品は減速比40、後段の歯数差は0、すなわち後段は前段遊星歯車の偏心運動を定位置回転軸に取り出す一種の継手とした。しかし、後段の強度不足や低効率、バックラッシが大きいなどの問題が発生。そのため、後段の歯数差0方式を、すでに他への応用が決まっていた“ピン孔”方式のW機構に変更した。

W機構とは、平行軸の間で回転を1：1で取り出す機構の総称であり、ユニバーサルジョイント式、オルダムカップリング式、ピン孔方式などがあり、当社では、ピン孔方式がMH遊星減速機の原型となった（図2）。

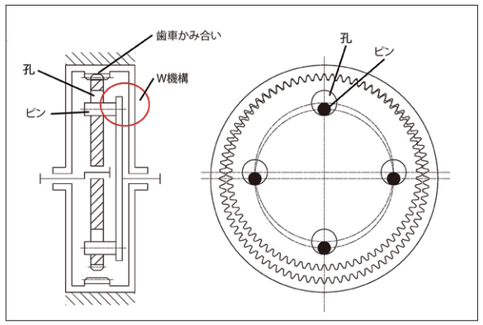


図2　ピン孔方式W機構

W機構の採用も含めて、両角宗晴教授の設計法、強度計算法を用いながら改良を続けた。しかし、課題解決に至らなかったため、1988（昭和63）年9月に制御用減速機としてのシリーズ化を中止した。

採用市場

制御用減速機としては目標を達成できなかったが、無人搬送用車輪アクチュエータの用途が残った。

この用途には、既にハーモニックドライブ®を応用した車輪アクチュエータを納入していた。このユーザーから、価格低減と効率改善が要求されており、車輪に入れやすいMH減速機を提案し、開発を進めた。

W機構のピン孔方式によってコンパクトになり、回転内歯車を出力として車輪に固定する構造ができた。

構造メリットが評価され1986（昭和61）年頃から十数社からの引き合いがあり、改良を重ねながら1987（昭和62）年試作品を納入した。数社の継続採用につながったが価格低減ができなく、また市場拡大の見通しも立たず、拡販活動を停止、継続顧客に限定して2015（平成27）年頃まで納入した（図3）。

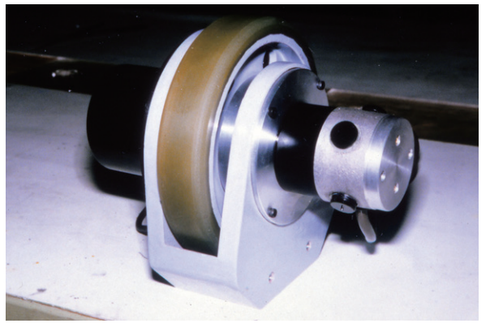


図3　車輪アクチュエータ

2-3-2 HP シリーズの開発

開発の始まり

BPシリーズはトルク容量があまり高くなかった。そのため、市場にある既存製品の特性、構造を調査しながら、バックラッシ調整機構をもつ独自の遊星減速機を開発した。そのデザイン・構造の特長は、

①出力の軸受けを後段減速部の両側に配置して、薄型構造とするとともに、出力のモーメント剛性を高めた。

②BPシリーズと同様、組立後に外からバックラッシ調整ができるようにした。なお、遊星歯車の個数は4個で、バックラッシ調整によって正

転・逆転それぞれ対向する2個ずつの遊星歯車がトルク分担する。

③減速機の出力はフランジ形状を標準とし、軸出力が要求される場合はフランジに軸を取り付ける方式とした。

④遊星減速機構の1段目をモータ取付側から遠い減速機の出力側に配置し、2段目をモータ取付側に配置することで、モータ出力軸と1段目太陽歯車の締結に必要な長さを減速機内部に収めた。これによって全体的に扁平になる構造を採用した。

1990（平成2）年にHPシリーズとして型番16、20、25、32番を製品化した（図4、図5）。

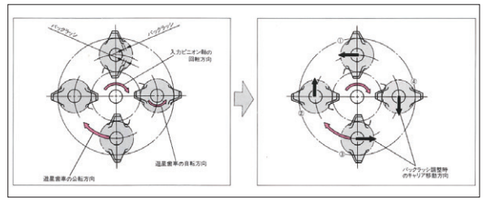


図4　HPバックラッシ調整機構図

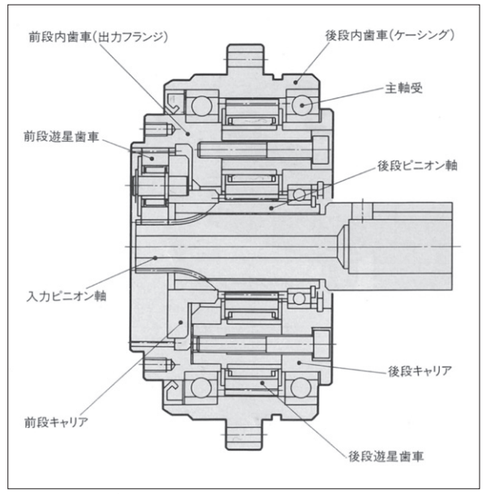


図5　HPシリーズ

採用市場

半導体ウェハのハンドリング用途などで型番16が多く使用された。

大型光学赤外線望遠鏡「すばる」に採用された。

製品展開

1991（平成3）年に大型の型番40、50、65番を製品化した。

2-3-3　HP-A シリーズの開発

開発の始まり

HPシリーズを製品化する中、モータメーカーが、画期的な小型サーボモータを製品化した。そのサーボモータとHPシリーズを組み合わせる場合、モータとの形状バランスと高容量化を図る必要があり、HPの改良に取り組んだ。

技術概要

HPシリーズでは、モータに対して減速機の外径が大きく、トルク容量が足りないという問題があった。そこで遊星減速機の形状を丸形から角形へ変更し、1段目をモータ取付側に配置することでトルク容量を向上した。

サーボモータメーカーに採用されたが、騒音が大きい課題が残り、歯車加工や軸受け構造の変更などを続けた。その結果、従来の小型サーボモータ用遊星減速機に比べて軽量・コンパクトで、高負荷容量、高精度、高剛性、そして独自のバックラッシ調整機能を有するHP-Aシリーズが開発できた。ちなみに、減速機単体をHP-A、モータフランジを取り付けた形状をCPと呼称した（図6）。

図6　HP-Aシリーズ

採用市場

自動機械の精密駆動部、走行駆動用途、スカラロボットの手首駆動等に採用された。

製品展開

型番14、16、20、25、32、40、50番を製品化した。

2-3-4　HP-C シリーズの開発

開発の始まり

国内のサーボモータメーカーは数社が市場を分け合っていた。そのような中、高精度位置決め用ギヤヘッドとしてHP-Aを採用していたサーボモータメーカーから、よりコストダウンを図った汎用減速機の開発が要求された。バックラッシはHP-Aシリーズ程の精度は必要なかった。

技術概要

開発は1995（平成7）年頃にスタートした。目標を低コストに置き、バックラッシ15分以下の汎用タイプとした。構造は遊星歯車機構とし、バックラッシ調整機構なし、出力軸とキャリアの一体設計、ハウスのダイカスト化、内歯車の取り付けボルト廃止、内歯車、遊星歯車、ピニオン歯車のそれぞれの歯数を、前段と後段とも同一歯数による部品の共通化などでコスト低減を図り、1996（平成8）年に市場導入した（図7、図8）。

既存のユーザー以外にも採用されたこともあり、一時は広がりを期待した。しかし、目標としていた製造コストを維持できるほどの受注量が確保できなかったため、1998（平成10）年に販売を中止した。

図7　HP-Cシリーズ

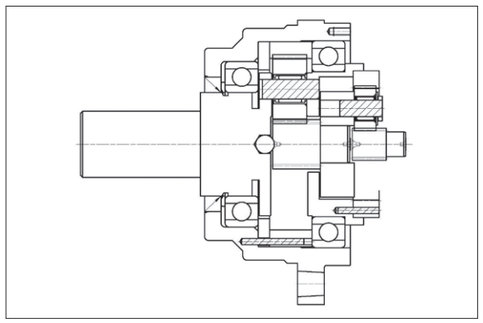


図8

2-3-5　HP-F 小型シリーズの開発

開発の始まり

サーボモータメーカーの小型モータ（5w/10w）の製品化に対応できる小型のギヤヘッドを開発した。

技術概要

モータと組み合わせてバランスの良い形状であるHP-11Fを1997（平成9）年に、HP-8Fを2003（平成15）年に製品化した（図9）。

構造は同じ遊星減速機構を直列に配置し、出力軸には玉軸受を2個直列で使うオーソドックスな構造であった。バックラッシ調整機構をもたず、かつ小型ということもあり、バックラッシは30分で市場導入した。

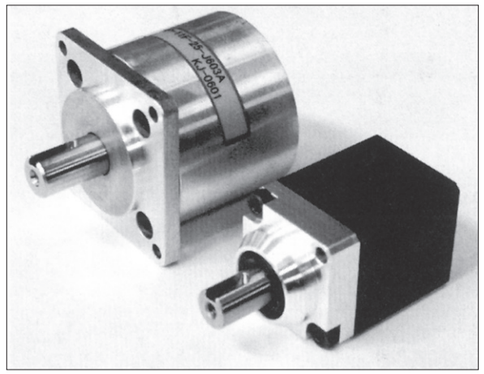


図9　HP-Fシリーズ

採用市場

HP-Fを製品化したものの、販売は大きく増加することはなかった。理由は減速比5と25の2種類しかなく、また当時の小型サーボモータの市場がそれほど大きくなかったこともあった。

その他の特筆点

その後2003（平成15）年頃、HP-Fの機構を流用したことで、遊星減速機事業に大きく貢献した製品がある。航空機用のLCD（液晶パネル）開閉機構である。

開発のきっかけは航空機アメニティ関係の計装

を行う電機メーカーが、自社のLCD開閉機構に対して開閉のスムーズさや、開閉音などの問題をもっていたことであった。減速機の展示会で当社のブースに立ち寄った際、開発が打診された。

位置決め精度など必要ない用途ではあったが、ファクトリーオートメーション以外の航空機分野で採用される可能性があったことから開発を決めた。

当初は減速機のみが求められたが、やがて従来の開閉機構の課題を顧客と共有するようになった。このような交流から減速機単体だけではなく、モータとクラッチ、ブレーキを含めたシステム開発に着手することとなった。

トータルコストと減速比を考えてHP-Fをベースにシステム全体を設計したものの、従来品よりもコスト高となった。しかし、動きのなめらかさと信頼性が向上したことから2005(平成17)年からLCD駆動ユニットHP-11Fとして納入開始、好評を博し現在まで継続して多数採用され、遊星減速機事業の業績拡大に貢献している(図10)。

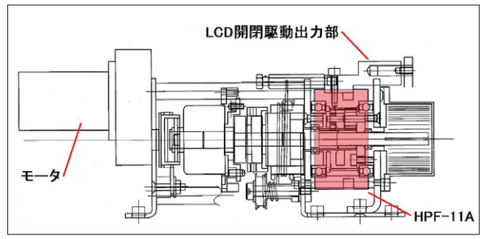


図10　LCD駆動ユニットHP-11F

2-3-6　HPG シリーズの開発

開発の始まり

遊星減速機は販売先がほぼ固定しており、コスト低減要求が厳しかった。

一方、サーボモータの高トルク化も進み、減速機にはより高トルクで、小バックラッシの要求が強まってきた。

高トルク化したモータに対応すべくトルク容量を向上させ、かつ小バックラッシの減速機の開発に着手した。

技術概要

開発にあたっては、力を伝える遊星歯車を2個から3個にすることによりトルク容量向上を、ハーモニックドライブ®で培ってきた弾性歯車（フレクスプライン）技術を応用することにより小バックラッシを実現した。

構造はHP-A、HP-Cで採用していた複合遊星減速機構ではなく、直列に遊星減速機構を並べたタンデム型とした。前段の内歯車と後段の内歯車が同歯数で一体となっている構造である。この内歯車を、薄肉弾性内歯車とすることで、バックラッシ調整機構なしで小バックラッシ(3分以下、特殊対応品1分以下)を狙った製品である。弾性内歯車の加工技術の確立とともに、他部分の加工精度も上げ、小バックラッシで高トルクのHPGシリーズを1999(平成11)年に市場導入した(図11)。

HPGは出力軸にキャリア一体型クロスローラベアリング(CRB)を取り入れ小型化したことも特長である。CRBはハーモニックドライブ®のユニット型で培ってきた技術が生かされている。

HPGは多くのメーカーで採用されるようになり現在に到っている。

この製品群に対して2000(平成12)年に「Harmonic Planetary®」／「ハーモニックプラネタリ®」の商標権を取得した。

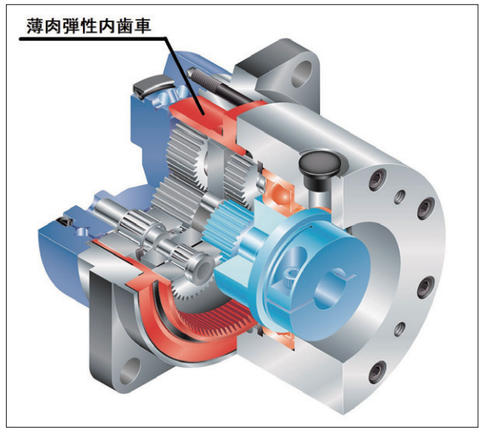


図11　HPGシリーズ

製品展開

HPGシリーズのバリエーションを拡充するため、両軸タイプや、大型型番のHPG-50A、65Aなどを開発したほか、以下のようなさまざまなタイプを製品化した。

■HPG-RA直交

機械のレイアウト上、モータの回転軸を直角に曲げる要求があり、モータと減速機の間に傘歯車を利用し、直交ユニットを開発した(図12)。

市場の広がりはあまりなかったが、特定用途で納入している。

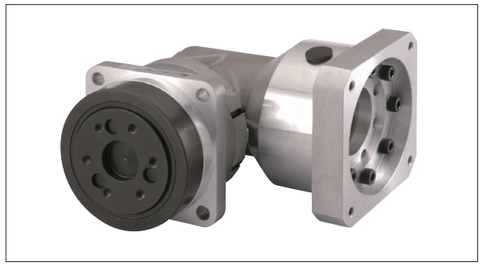


図12　HPG-RA直交

■HPF中空遊星減速機

構造上、遊星減速機は中心に太陽歯車があるため、中空構造にしにくい。しかし、減速機の中に配線や配管を通す要求が出てきた。

精度と強度を維持しながらの中空構造は困難なこともあったが、減速比と歯数の工夫から太陽歯車を大きくし、その中央に穴を通す設計とした。

2011（平成23）年にHPGをベースに扁平・中空のHPFを市場に導入した(図13)。

HPFは、中空モータと組み合わせて当社のメカトロ製品として中空アクチュエータに展開されている。スピードが速く、トルク容量が小さいDDモータと、トルク容量は大きいが、スピードが遅いハーモニックドライブ®と中空モータとを組み合わせた、中空アクチュエータ（FHAアクチュエータ）の中間領域を補完できる製品である。

HPFの開発によって、さまざまな中空減速機が提供できる基礎技術を構築することができた。

■HPGP

HPGシリーズのさらなる高トルク化を目標に、HPGPを開発し2012（平成24）年に市場導入した。HPGPは、遊星歯車の数を3個から4個に増やすことで、従来製品比1.3倍のトルクアップを実現している。

■HPG-Rヘリカル

静音化と高トルク化を目指し、ヘリカル歯車を採用した減速機の開発に着手した。技術的に難易度が高かった薄肉ヘリカル内歯車の加工技術を確立した結果、1段型のヘリカル減速機のHPG-Rを製品化することができ、2015(平成27)年に市場導入した。

従来のHPGシリーズ1段型減速機では減速比が2種類しかなかったが、市場要求に応えて、1段型ヘリカル減速機では8種類の減速比(減速比3～10までを1速比毎)をラインアップした。

高減速比用の2段型ヘリカル減速機は、2020(令和2)年に開発完了、2021(令和3)年3月に市場導入した(図14)。ヘリカル歯車は歯すじがねじれてい

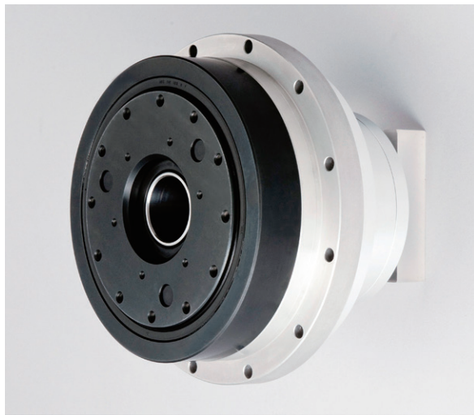


図13　HPF

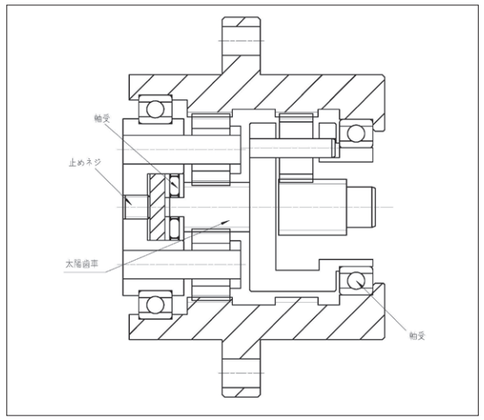


図14

ることから、太陽歯車はネジと同様のふるまいをし、回転しながら前進後退といった軸方向変位を生じる。この太陽歯車の軸方向変位の抑制がバックラッシ3分実現の課題であったが、2段型ヘリカル減速機では、太陽歯車とそれに連結するキャリアを、両端から2個の軸受で支持することでバックラッシ3分を実現した。この構造は、太陽歯車の軸方向変位抑制を1個の軸受で行っている他社減速機と比べ、軸方向振動の抑制に優れている。なお、2段型では減速比15～50までを5速比毎にラインアップし、減速比の充実を図った。

その他の特筆点

HPGは2001（平成13）年に「精密工学会技術賞」を獲得した（図15）。従来品に比べ高い伝達トルク容量と、角度伝達精度がよいことで、各種産業機械の小型・軽量化、低振動・低騒音化、長寿命化に貢献することなどが評価されて受賞に至った。

図15

図16

図17　HPGシリーズ

また、2004（平成16）年にはグッドデザイン賞を受賞した（図16、図17）。

2-3-7　HPNシリーズの開発と海外展開

開発の始まり

日本の遊星歯車減速機市場にHPGを導入した結果、国内の主要サーボモータメーカーで使われるようになった。

しかし、海外市場には浸透していかなかった。海外の遊星歯車減速機市場では、HPGよりも精度が低く、バックラッシが大きい用途が多かった。

こうした背景から2011（平成23）年に日本を除くアジア市場向けの汎用遊星歯車減速機の検討を始めた。

その結果、当社製品の代理店だった三益HDS（株）との合弁で、2013（平成25）年2月に生産会社の三益ADM（株）（SAMICK ADM CO.,LTD.）を設立した。

技術概要

早期に市場を獲得するため、競合製品と取り付け寸法の互換性がある仕様とするとともに、価格競争力のあることを開発目標とした。

歯車は他社と同様のヘリカル歯車とした。ミドルクラスの製品であり、薄肉内歯車を使う必要がなかったため容易に実現することができ、2013（平成25）年からHPNシリーズを市場導入した（図18）。

性能は減速機の寿命時間まで使い続けてもバックラッシが増えないなど、信頼性の高さを重視した。

こうして完成したHPNは市場導入後に信頼性が評価され、次第に採用実績が増えた。

HPN-RA直交をバリエーション展開している（図19）。

図18　HPN

図19　HPN-RA直交

特記事項

アキュドライブ®遊星減速機が、当社のメカトロニクスアクチュエータにも展開されていることは2-2-9項に記した。

2-3-8　アキュドライブ®の変遷

高減速比のハーモニックドライブ®を展開する中、より低減速比領域の市場に進出すべく、小バックラッシ低減速比のアキュドライブ®を開発してきた結果、HPシリーズとなった。

現在の主力である、HPGは3世代目のシリーズであるが、それぞれの減速機は、市場の高トルク化の要求に対応しながら進化してきた。この間、小バックラッシを実現するため、独特な機構を開発したり、それまでは難しかった中空構造の遊星減速機構を完成させるなど、顧客の新たなニーズに対応してきた。これは、独自の設計と当社が長年培ってきた精密加工技術によって精密制御用減速機に成長してきたものである。

今後も、2020（令和2）年に開発を終えたHPG-Rシリーズを発展させながら、新機軸のアキュドライブ®にむけた研究・開発を継続していく。

技術年表

●ハーモニックドライブ®製品群
●メカトロニクス製品群
●アキュドライブ®(遊星歯車)製品群

西暦	和暦	技術概要・製品概要・市場導入製品
1955	昭和30	Strain Wave Gearing(以下ハーモニックドライブ®)　発明特許出願
1959	昭和34	ハーモニックドライブ®　特許登録
1960	昭和35	米国技術誌『Machine Design』にハーモニックドライブ®の記事が掲載
1964	昭和39	長谷川歯車がハーモニックドライブ®　技術導入契約実施権認可を受ける
		●ハーモニックドライブ®　試作成功
1965	昭和40	●ハーモニックドライブ®　型番20～100　8型番、8機種の標準化開始
		●ハーモニックドライブ®　国産1号機納入
		●偏位ハーモニックドライブ®　発明特許出願
1966	昭和41	●ハーモニックドライブ®　標準型番20～100　8型番のコンポネント　2型、2A型(準標準)　市場導入
		●誘導電動機付きハーモニックモートル®　3型、4型　市場導入
		●ハーモニックドライブ®　入・出力軸付き減速機　0、0A、1、1A型　市場導入
		●大型型番130、160、200番　市場導入
		●ハーモニック・カップリング(後のファインジャスター®)4型番　製造開始
		●レスポンシン　市場導入
1967	昭和42	●2段型ハーモニックドライブ®　CD型、前段ギア付きCG型　市場導入
1968	昭和43	●ダブルエキセントリック型ウェーブ・ジェネレータ、特殊用途に使用
		●顕微鏡用ノブユニット　市場導入
1969	昭和44	●シャッターアクチュエータ(三和シヤッター)販売基本契約締結
1970	昭和45	●ハーモニックドライブ®　型番20番より小さい型番の開発開始
		●偏位ハーモニックドライブ®　特許登録
		●重量シャッターアクチュエータ　市場導入
		●バルブアクチュエータ　VBシリーズ　市場導入
1972	昭和47	●ステンレス製の標準2型コンポネントCS-14-2　市場導入
		●ファインジャスター®　J-16　市場導入
		●低速用フラット型　FH-32　市場導入
		●位相調整デファレンシャルユニット FD-20、25、32、40、50　市場導入
		●パンケーキFBシリーズ　FB-20、25、32　市場導入
		●コップ無段変速機付きハーモニックドライブ®　市場導入
		●UHFテレビ用アンテナ駆動アクチュエータ　市場導入
1973	昭和48	●トルクコントローラ付きハーモニックドライブ®　市場導入
1974	昭和49	●オルダム型ウェーブ・ジェネレータ　開発
		●軽量シャッターアクチュエータ　SG15　市場導入
		●低速油圧モータ付きハーモニックドライブ®　市場導入
		●ハーモニックドライブ®　専用グリース　開発開始
		●クラリファイヤ用ハーモニックドライブ®　市場導入
1975	昭和50	●低速用手動入力コンポネント　FH-25、32、40シリーズ化　市場導入
1977	昭和52	●ハーモニックドライブ®　初期Rシリーズ　CS-20～100　市場導入
		●ハイドロリック・ウェーブ・ジェネレータ　開発
1978	昭和53	●ハーモニックドライブ®　CS-14-2A　市場導入
		●電磁式ハーモニックドライブ®　レスポンシンHDM-15、155、175、170　重点製品として輸入販売
		●電磁式ハーモニックドライブ®　レスポンシン用ドライバユニットDU-200　自社開発
		●DCサーボアクチュエータ　Hi.T Drive(ハイティドライブ)　HT-14、20、25　市場導入
1979	昭和54	●フラット型ハーモニックドライブ®　FRシリーズ　市場導入
		●Hi.T Driveのモータをステッピングモータに置き換えたHT-14P、20P　市場導入
1980	昭和55	●低減速比減速機構調査開始
1982	昭和57	●ハーモニックドライブ®　CS-8、11-2A　市場導入
		●ハーモニックドライブ®　Rシリーズ　CS-20～100(ロボット用途仕様確定)　市場導入
		●ハーモニックグリース®　SK-1、SK-2　開発完了
		●低減速比ハーモニックドライブ®　1/50、1/60シリーズ　市場導入
		●DCサーボドライバ　HS-200シリーズ　市場導入
1983	昭和58	●宇宙用ハーモニックドライブ®　開発受注
		●DCサーボドライバユニット拡充　以降順次HS-300シリーズ、HS-400シリーズ等　市場導入
		●レスポンシンHDM-185　市場導入
		●DCサーボアクチュエータ用光学エンコーダMEシリーズ　開発
1984	昭和59	●ハーモニックドライブ®　ユニット型試作品　展示会出品
		●HTシリーズの軸方向長さ短縮したDCサーボアクチュエータ　RAシリーズ　市場導入
		●自社開発DCサーボモータ及び光学エンコーダ採用DCサーボアクチュエータ　RH-20、25、32　市場導入
		●ロボット関節アクチュエータ　RK-Jシリーズ　市場導入
		●シリアルパルス指令DCサーボドライバユニット　HS300シリーズ　市場導入
1985	昭和60	●最小サイズハーモニックドライブ®　CS-5-2A　市場導入
		●低慣性ウェーブ・ジェネレータ採用ハーモニックドライブ®　GRシリーズ　市場導入
		●ファイン・インデックスθテーブル　FIU-20　市場導入
1986	昭和61	●シルクハット型ハーモニックドライブ®　SHシリーズ　市場導入
		●ストームライン(ダイヤフラム形状)　開発
		●IH歯形　特許出願
		●ハーモニックドライブ®　CS-4　開発
		●遊星歯車減速機　検討開始
		●アキュドライブ®　BPシリーズ　開発開始　マシンエンジニアリング社と開発及び販売提携
		●車輪アクチュエータMH遊星減速機　市場導入
1987	昭和62	●マイクロ＆スーパーミニアクチュエータ　RH-5、8、11、14　市場導入

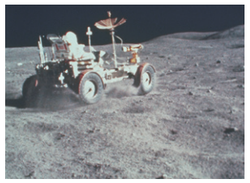
西暦	和暦	技術概要・製品概要・市場導入製品
1987	昭和62	●PCコマンド指令DCサーボユニットHS-400シリーズ　市場導入
		●ACサーボアクチュエータ　RSシリーズ　RS-14、20、25、32　市場導入
		●ステッピングモータ付きアクチュエータ　RP-14、20　市場導入
		●扁平中空アクチュエータ　FHA-25A　開発開始
		●アキュドライブ®(AccuDrive®)　商標権取得
1988	昭和63	●IH歯形採用高強度　CSSシリーズ　型番20、25、32、40、50　市場導入
		●IH歯形採用高強度シルクハット型　SHSシリーズ　市場導入
		●IH歯形採用　FRS/FDSシリーズ　型番20、25、32、40、50　市場導入
		●ハーモニックグリース®　HC-1　開発完了
		●バックラッシ調整機構付き遊星減速機　アキュドライブ®　BPシリーズ　市場導入
1989	平成元	●IH歯形採用高強度　CSS/FRSシリーズ　型番65、80、100　市場導入
		●ハーモニックドライブ®　CS-17-2A　市場導入
		●パルスモータ付きリニアアクチュエータ　LA-P　市場導入
		●フランジ型形状出力DCサーボアクチュエータ　RFシリーズ　市場導入
		●ACサーボアクチュエータ　RS-8、11、14　市場導入
		●DCサーボアクチュエータ　RHS-20、25、32　市場導入
		●ファイン・インデックスθテーブル　FIU-14～32(ドライバUDX含む)　市場導入
		●リニアアクチュエータ　LA-30　市場導入
		●ステッピングモータ付きアクチュエータ　RP-8、11(ドライバUDX含む)　市場導入
1990	平成2	●高強度CSS-50、65、80、100-2A　減速比1/50シリーズ　市場導入
		●フラット型ハーモニックドライブ®　FB、FR-17　市場導入
		●ハーモニックドライブ®　ユニットタイプ　CSS、FRS-20、25、32、40、50-2UH　市場導入
		●ハーモニックドライブ®　CS-8～20　減速比1/72　市場導入
		●宇宙用ハーモニックドライブ®　米国FTS採用
		●扁平中空アクチュエータ　FHA-25A　市場導入
		●ACサーボドライバ　HA-220　市場導入
		●車輪アクチュータ　WAC-MH　市場導入
		●DCサーボアクチュエータ　RFS-20、25、32　市場導入
		●ACサーボアクチュエータ　RSS-20、25、32　市場導入
		●ACサーボアクチュエータ　RKS-20、25、32　市場導入
		●DCサーボドライバ　HSシリーズ　9A仕様　市場導入
		●XY2軸ナノメータステージ　LXY-100-10　市場導入
		●リニアアクチュエータ　LA-32(ストローク30㎜、50㎜)　市場導入
		●アキュドライブ®　HP-16～32-F　市場導入
1991	平成3	●ハーモニックドライブ®　CSS-14　減速比1/50、1/80　　CSS-17減速比1/50　市場導入
		●ハーモニックドライブ®　中間型番　CSS、FRS-45、58、90-2A、2UH　市場導入
		●ハーモニックドライブ®　小型ユニットタイプ　CS-14、17-2UH　市場導入
		●超高真空回転導入機　ロータリーフィードスルー　HDRF-8　市場導入
		●ハーモニックドライブ®　SH-17　市場導入
		●XY2軸ナノメータステージ用コントローラ　NSC-2A　市場導入
		●有限角ナノラジアンステージ　LFI-80-6　市場導入
		●DCサーボアクチュエータ　RHS-14、17　市場導入
		●DCサーボアクチュエータ　RFS-14、17　市場導入
		●ACサーボアクチュエータ　RSS-14、17　市場導入
		●ACサーボアクチュエータ　RKS-14、17　市場導入
		●アキュドライブ®　HP-40、50、65　市場導入
1992	平成4	●薄型ハーモニックドライブ®　CSF-20～100-2A　市場導入
		●薄型ハーモニックドライブ®　CSF-20～100-2UH/2UJ　市場導入
		●ハーモニックグリース®　SK-3　開発完了
		●ハーモニックグリース®　SK-1A　開発完了
		●ハーモニックグリース®　HC-1A　開発完了
		●クロスローラベアリング　開発開始
		●ベントサブプロジェクト　スタート
		●国産のハーモニックドライブ®　搭載衛星の打上げ
		●高推力リニアアクチュエータ　LAH-46　市場導入
		●扁平中空アクチュエータ　FHA-40A　市場導入
		●2軸位置決めコントローラ　MC-20A　市場導入
		●扁平中空アクチュエータ　FHA-17A、25B　市場導入
1993	平成5	●薄型ハーモニックドライブ®　CSF-14、17-2A　市場導入
		●薄型ハーモニックドライブ®　CSF-14、17-2UH、2UJ　市場導入
		●扁平中空アクチュエータ　アブソリュートエンコーダ付き　FHA-25B、40A-S248　市場導入
		●扁平中空モータ　MAA(FHA用モータ単体)　市場導入
		●ナノメータポジショナ　LNP-5065-10　市場導入
		●汎用高推力リニアアクチュエータ　HDPL　市場導入
		●ACサーボドライバ　HA-600　市場導入
		●アキュドライブ®　HP、CP-14、16、20、25、32、40A　市場導入
1994	平成6	●扁平中空アクチュエータ　FHA-32B、40B　市場導入
		●ガルバノ式光学スキャナ　LSA-50A　ドライバ　PSC-20A、PSM-100　市場導入
		●リニアアクチュエータ　LA-30B-10-F　市場導入
		●アキュドライブ®　HP-16B　市場導入
1995	平成7	●シルクハット型ハーモニックドライブ®　SHF-14～58-2A　市場導入
		●シルクハット型ハーモニックドライブ®　SHF-14～58-2UH、2UJ　市場導入

西暦	和暦	技術概要・製品概要・市場導入製品
1995	平成7	●クロスローラベアリング　製造技術確立、製品化
		●IH歯形　特許登録
		●ACサーボドライバ　HA-700　市場導入
		●リニアアクチュエータ　LBC-25A　市場導入
		●RHスーパーミニシリーズ　Bタイプ　市場導入
		●リニアアクチュエータ　LBN-25A　市場導入
		●リニアアクチュエータ(パルスモータ付き)　LA-30B-10-F-P　市場導入
		●アキュドライブ®　HP、CP-50A　市場導入
1996	平成8	●RHスーパーミニシリーズ　Cタイプ　市場導入
		●ACサーボドライバ　HA-750　市場導入
		●ダイレクトドライブモータ　開発開始
		●アキュドライブ®　HP、CP-14、16、20、25、32、40、50C　市場導入
1997	平成9	●ハーモニックドライブ®　CS-5　減速比1/50、1/100　市場導入
		●ハーモニックグリース®　4B-No.2　開発完了
		●扁平中空アクチュエータ　FHA-50A　市場導入
		●ガルバノ式光学スキャナ用ドライバ　PSM-100-SP　市場導入
		●扁平中空アクチュエータ　FHA-17A、25B、32B、40B-HC　市場導入
		●扁平中空アクチュエータ　FHA-14A　市場導入
		●アキュドライブ®使用ACサーボアクチュエータ　RJ-16　市場導入
		●アキュドライブ®　HP-11F　市場導入
1998	平成10	●リニアアクチュエータ　LAH-80　市場導入
1999	平成11	●ハーモニックドライブ®　CSS-8　減速比1/30　市場導入
		●ハーモニックドライブ®　CSF-8～17　減速比1/30　市場導入
		●ハーモニックドライブ®　CSG-20～40　市場導入
		●カム式リニアアクチュエータ　LACH-25、35、45　市場導入
		●ガルバノ式光学スキャナ　LSA-20A　市場導入
		●ハーモニックプラネタリ®　HPG-14A、20A、32A　減速比1/5、1/11、1/21、1/33　市場導入
2000	平成12	●トルクセンサ内蔵ハーモニックドライブ®　ユニット製品化
		●ハーモニックドライブ®　CSF-8、11　減速比1/50、1/80、1/100　2A型　市場導入
		●ハーモニックドライブ®　CSF-20～32-2A、2UH　減速比1/30　市場導入
		●DCサーボドライバ　HS-360　市場導入
		●扁平中空アクチュエータ　FHA-17C、25C、40C　市場導入
		●ACサーボドライバ　HA-650/670　市場導入
		●ハーモニックプラネタリ®(HarmonicPlanetary®)　商標権取得
2001	平成13	●超扁平ハーモニックドライブ®　CSD-20～50-2A　市場導入
		●扁平中空アクチュエータ　FHA-32C　市場導入
		●RHスーパーミニシリーズ　Dタイプ　市場導入
		●アブソリュート角度センサシステム　MITシリーズ　市場導入
		●自動センタリングシステム　ACSシリーズ　市場導入
		●ハーモニックプラネタリ®　HPG型　精密工学会技術賞獲得
2002	平成14	●ハーモニックドライブ®　CSF-5～14-1U、2XH、2XJ　市場導入
		●ベントサブ用8インチハーモニックドライブ®　市場導入
		●ベントサブ用12インチハーモニックドライブ®　市場導入
		●車載用　VF-17-50-S1　市場導入
		●ハーモニックドライブ®　CSG-14～40-2A、2UH改良追加　市場導入
		●ハーモニックドライブ®　SHG-14～40-2A、2UH、2UJ　市場導入
		●シルクハット型ハーモニックドライブ®　SHF-14～32　減速比1/30　市場導入
		●扁平中空アクチュエータ　FHA-17C～40C-S248　市場導入
		●ACサーボドライバ　HA-655-2、4　市場導入
		●ACサーボドライバ　HA-675-2、4　市場導入
		●ガルバノ式光学スキャナ　LSA-20B(-D-K1、K2)　ドライバ　PSM-120　市場導入
		●マイクロエンコーダ　MESシリーズ　市場導入
		●ハーモニックプラネタリ®　HPG-50A　市場導入
		●ハーモニックプラネタリ®　HPG-20A、32A　仕様バックラッシ1分以下　市場導入
2003	平成15	●ハーモニックドライブ®　CSF-14、20、32、45、65-GH　市場導入
		●ハーモニックドライブ®　CSG-45～65　市場導入
		●ハーモニックドライブ®　SHG-45～65　市場導入
		●超扁平ハーモニックドライブ®　CSD-14、17-2A　市場導入
		●超扁平ハーモニックドライブ®　SHD-14～40-2UH　(2A含む)　市場導入
		●ACサーボアクチュエータ　RSF-8A、11A、14A　市場導入
		●ACサーボアクチュエータ　RSF-17A、20A、25A、32A　市場導入
		●ACサーボドライバ　HA-520　市場導入
		●ACサーボアクチュエータ　RKF-20A、25A、32A　市場導入
		●ステッピングモータ付きアクチュエータ　RP-11B、14B、20B　市場導入
		●扁平中空アクチュエータ　FHA-8C、11C、14C　市場導入
		●ACサーボドライバ　HA-655-1　市場導入
		●ACサーボドライバ　HA-675-1　市場導入
		●扁平中空アクチュエータ　FHA-17C～40C-D250、US250(14本線)　市場導入
		●ハーモニックプラネタリ®　HPG-14A　仕様バックラッシ1分以下　市場導入
		●アキュドライブ®　HP-8F　市場導入

西暦	和暦	技術概要・製品概要・市場導入製品
2004	平成16	●扁平中空アクチュエータ　FHA-8C、11C、14C-E、-E-SP(24V)　市場導入
		●扁平中空アクチュエータ　FHA-8C、11C、14C-D200、US200(14本線)　市場導入
		●ACサーボドライバ　HA-680　市場導入
		●ガルバノ式光学スキャナ　LSA-10A　ドライバ　PSM-130　市場導入
		●ハーモニックプラネタリ®　HPG-U1　市場導入
		●ハーモニックプラネタリ®　HPG型　グッドデザイン賞受賞
2005	平成17	●車載用　VC-32-200-S1　市場導入
		●ACサーボアクチュエータ　RSF-5A、5B　市場導入
		●ハーモニックプラネタリ®　HPG-11A、B　市場導入
		●ハーモニックプラネタリ®　HPG-65A　(-RA 直交軸除く)　市場導入
		●LCD駆動ユニット HP-11F-2100-5UM　市場導入
2006	平成18	●ハーモニックドライブ®　CSF-3、3B　市場導入
		●車載用　VF-17-50-S2　市場導入
		●ハーモニックドライブ®　CSF-5～14-1U、2XH、2XJ　モデルチェンジ　市場導入
		●車載用　VF-14-85-S1　市場導入
		●車載用　VC-25-200-S1　市場導入
		●ACサーボアクチュエータ　RSF-3A、3B、3C　市場導入
		●ダイレクトドライブモータ　KDU-13　市場導入
		●レンズ駆動リニアモータ　PSM-125　市場導入
		●通信プロトコル対応ドライバ　HA-800/680　市場導入
		●ハーモニックプラネタリ®　HPG-14A～50A-3　市場導入
2007	平成19	●ACサーボドライバ　HA-680 ML(メカトロリンク)　市場導入
		●ACサーボドライバ　HA-680 CL(CCリンク)　市場導入
		●ACサーボアクチュエータ　RSF-8B、11B、14B　市場導入
		●ハーモニックプラネタリ®　HPG-32、50、52、65A-RA 直交軸　市場導入
2008	平成20	●超扁平ハーモニックドライブ®　CSD-2UH、2UF　市場導入
		●宇宙用ハーモニックドライブ®　(SHF、CSD)JAXA機構部品登録
		●ACサーボドライバ　HA-800-1、3、6(中容量)　市場導入
2009	平成21	●扁平中空アクチュエータ　SHA-25、32、40、58、65　市場導入
2010	平成22	●ACサーボドライバ　HA-800-24(大容量)　市場導入
		●扁平中空アクチュエータ　SHA-25P、32P、40P、58P、65P　Panasonic フォーマット対応　市場導入
2011	平成23	●シルクハット型ハーモニックドライブ®　SHF-11　市場導入
		●扁平中空アクチュエータ　SHA-25、32中空遊星減速機付き　市場導入
		●ハーモニックプラネタリ®　扁平中空遊星　HPF　市場導入
2012	平成24	●ハーモニックドライブ®　CSF-17-GH　市場導入
		●ハーモニックドライブ®　CSG-GH　市場導入
		●軽量ハーモニックドライブ®　CSF、CSG-2UH-LW　市場導入
		●軽量ハーモニックドライブ®　SHF、SHG-2UH-LW　市場導入
		●軽量ハーモニックドライブ®　SHD-2UH-LW　市場導入
		●ACサーボドライバ　HA-690　市場導入
		●エンコーダ通信プロトコル他社仕様変更　市場導入
		●ハーモニックプラネタリ®　高トルク化　HPGPシリーズ　市場導入
2013	平成25	●扁平中空アクチュエータ　SHA-25M、32M、40M、58M、65M　三菱電機コラボ　市場導入
		●扁平中空アクチュエータ　SHA-20　市場導入
		●ハーモニックプラネタリ®　HPN-14A、20A、32A　市場導入
2014	平成26	●ハーモニックドライブ®　CSG-2UK　市場導入
		●扁平中空アクチュエータ　SHA-25、32、40、58、65-CG(KHA)　市場導入
		●ハーモニックプラネタリ®　HPN-11A、40A　市場導入
2015	平成27	●ハーモニックドライブ®　CSF-2UP　市場導入
		●扁平中空アクチュエータ　SHAシリーズ 安川電機コラボ　市場導入
		●扁平中空アクチュエータ　高精度FHA-C-PR　市場導入
		●ハーモニックプラネタリ®　HPG-R　ヘリカル1段型(低減速比)　市場導入
2016	平成28	●車載用　VCT用FRS-25　市場導入
		●扁平中空アクチュエータ　FHA-8C、11C、14C　三菱電機コラボ　市場導入
		●ACサーボアクチュエータ　RSF-3C、5B　三菱電機コラボ　市場導入
2017	平成29	●超扁平ハーモニックドライブ®　CSD、SHDシリーズ速比追加　市場導入
		扁平中空アクチュエータ　SHA-20P　Panasonicコラボ　市場導入
		●ハーモニックプラネタリ®　HPNシリーズ　2段型による速比拡充　市場導入
2018	平成30	●食品用ハーモニックグリース®　HFL-1　開発完了
		●超扁平ブラシレスDCアクチュエータ　FLA-14、17、20　市場導入
		●扁平中空アクチュエータ　FHA-C 減速比80、120　市場導入
		●扁平中空モータ　HMA(SHA用モータ単体)　市場導入
		●扁平中空モータ　HMA三菱電機コラボ　市場導入
		●ハーモニックプラネタリ®　HPN-L(フェースマウント式取付、北米向け)　市場導入
2019	令和元	●ロボット用大中空、扁平FBSユニット　市場導入
		●扁平中空モータ　HMA安川電機コラボ　市場導入
		●扁平中空モータ　HMAパナソニックコラボ　市場導入
		●扁平中空アクチュエータ　SHA-45　市場導入
		●ハーモニックプラネタリ®　HPNシリーズ　直交軸タイプ　市場導入
2020	令和2	●超軽量・扁平ハーモニックドライブ®　ユニット　CSF、CSD-ULWシリーズ　市場導入
		●ハーモニックプラネタリ®　HPGヘリカル2段型　市場導入

用途

1 宇宙産業
【月面車】



2 宇宙産業
【火星探査車】

Rover image created by Dan Maas,copyright
and provided courtesy NASA/JPL-Caltech

3 宇宙産業
【はやぶさ・はやぶさ2】

JAXA提供

4 ハワイ島マウナケア山の
大型光学赤外線望遠鏡
【すばる】

国立天文台提供

5 半導体ウェハ搬送用
ロボット

(株)ダイヘン提供

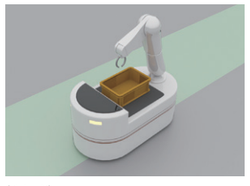
6 産業用ロボット

(イメージ)

7 モビリティ

トヨタ自動車(株)提供

8 無人搬送車(AGV)



(イメージ)

9 空飛ぶクルマ

(イメージ)

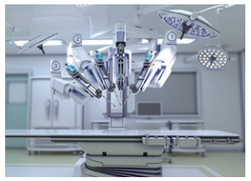
10 油田・ガス田向け
掘削操舵装置

Courtesy of Halliburton/ Sperry Drilling Services

11 協働ロボット(co-bot)

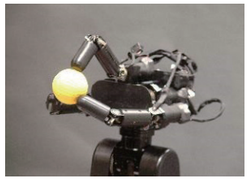
Techman Robot Inc.社提供

12 手術用ロボット



(イメージ)

13 小型指ロボットモジュール



東京大学大学院石川研究室提供

14 ヒューマノイドロボット

本田技研工業(株)提供

15 パワーアシストスーツ

信州大学 橋本研究室提供

技術に関する表彰・受賞一覧

年月日	表彰、受賞名	授与団体	内容
2001年	•精密工学会技術賞	公益社団法人 精密工学会	高性能小バックラッシ遊星歯車装置の開発
2003年	•The Massillon Plaque Company 2003 R&D100 Awards Winners	トヨタ自動車 株式会社	VGRS Variable Gear Ratio Steering System (Mechanical Devices) Primary Developer: Toyota Motor Co. Codevelopers: Harmonic Drive Systems Inc., Toyoda Machine Works, Ltd.
2004年	•2004年度グッドデザイン賞	公益財団法人 日本デザイン 振興会	遊星歯車減速機　サーボモータ用高性能ギヤヘッド 「ハーモニックプラネタリ® HPGシリーズ」 （株式会社ハーモニック・エイディ） 商品デザイン部門／（作業工具、産業機械、搬送機器・車両、試験機器）
2004年 9月16日	•精密工学会髙城賞	公益社団法人 精密工学会	ロータリーエンコーダの角度標準とトレーサビリティに関する研究
2006年 2月24日	•技術開発賞	トヨタ自動車 株式会社	中央発條株式会社、アイシン精機株式会社との共同開発 「電動アクティブスタビライザー」
2006年 9月20日	•優秀製品賞	一般社団法人 日本機械学会	ニューハーモニックドライブ®SHFシリーズ、SHGシリーズ 優れた技術力が社会及び産業界で高い評価を受け、機械工学・機械技術発展に寄与
2007年 5月26日	•論文賞	公益社団法人 日本設計工学会	受賞者：山﨑宏　岸佐年　吉田嘉太郎　堀内富雄 清澤芳秀　賀勢晋司 「非インボリュート内歯車用ピニオンカッタの設計製作法の研究」
2007年 12月20日	•経済産業省「今年のロボット」大賞 中小企業基盤整備機構理事長賞	経済産業省	超小型高精度高出力トルク ACサーボアクチュエータ
2007年 12月20日	•経済産業省「今年のロボット」大賞 優秀賞／部品・ソフトウェア部門	経済産業省	超小型高精度高出力トルク ACサーボアクチュエータ
2008年 6月6日	•技術業績賞／ロボティクス・ メカトロニクス部門	一般社団法人 日本機械学会	ロボティクス・メカトロニクス分野発展への技術的貢献
2016年 5月28日	•功績賞	公益社団法人 日本設計工学会	受賞者：石川昌一 ハーモニックドライブ®減速機の実用化と高性能化により、ヒューマノイドロボット等の実現に貢献
2017年 3月9日	•貢献賞	一般社団法人 日本機械学会 北陸信越支部	受賞者：清澤芳秀 永年にわたり北陸信越支部の発展に寄与
2018年 2月15日	•感謝状	日産自動車 株式会社	新型QX50のハーモニックドライブ®の開発目標達成
2018年 7月	•Nissan Global Supplier Award- グローバルイノベーション賞	日産自動車 株式会社	
2018年 9月6日	•精密工学会技術賞	公益社団法人 精密工学会	波動歯車装置を内在する位置決め機構に対する高速高精度制御系設計の研究と製品開発
2018年 11月9日	•一般社団法人　日本歯車工業会 創立80周年記念　学識経験者功労賞	一般社団法人 日本歯車工業会	受賞者：石川昌一 長年の歯車に関する研究への貢献
2020年 3月18日	•感謝状	公益社団法人 精密工学会	賛助会員としての長年にわたる学会への協力

編集後記

創立50周年記念事業の一環として編纂を進めてまいりました50年史と併せて技術史が刊行の運びとなりました。

この技術史は、これからの当社を担う社員たちのガイドブックとなればとの思いで制作いたしました。また、産業史の資料として活用されることを念頭に、ハーモニックドライブ®減速機の進化や広がりが解るようにし、その時々の開発秘話も盛り込むことができました。

C.ウォルトン・マッサー氏の発明したこの機構が、当社において開発、製品化、市場導入を繰り返し、産業界の精密位置決め機構に幅広く使用されてきた歴史をご理解いただければ幸いです。

最後になりましたが、編纂にあたり特にご協力をいただきました笹原顧問をはじめ、役員、従業員、OBの皆様、そして技術史完成まで全力を尽くしてくれた編纂室員諸氏に、この場を借りて、心より感謝申し上げます。

2021（令和3）年7月

社史編纂室　室長　小沢　寛

社史編纂室
大橋政勝
小野牧子
一志友二郎
多賀朱里
鈴木まどか

編纂協力
笹原政勝（顧　問）
関本雅一（広報室）

道程　株式会社ハーモニック・ドライブ・システムズ 50年のあゆみ
［技術史］

2021年7月発行

発　行
株式会社ハーモニック・ドライブ・システムズ
〒140-0013 東京都品川区南大井六丁目25番3号
TEL 03-5471-7800 ㈹

発行人
伊藤光昌、長井　啓

編集・制作
株式会社出版文化社
東京・日本橋茅場町　大阪・本町　名古屋・金山

印刷
日経印刷株式会社

製本
株式会社渋谷文泉閣

©2021 Harmonic Drive Systems Inc. Printed in Japan

株式会社 ハーモニックドライブシステムズ