

平成 2 1 年度戦略的基盤技術高度化支援事業

「高精度歯車測定機の研究開発及び歯車校正システムへの組み込み」

研究開発成果等報告書

平成 2 1 年 1 2 月

委託者 経済産業省 近畿経済産業局

委託先 株式会社キャンパスクリエイト

目 次

第1章 研究開発の概要	
1 - 1 研究開発の背景・研究目的及び目標	… 3
1 - 2 研究体制	… 5
1 - 2 - 1 研究組織及び管理体制	… 5
1 - 2 - 2 管理員及び研究員	… 5
1 - 2 - 3 経理担当者及び業務管理者の所属、氏名	… 6
1 - 3 成果概要	… 6
1 - 4 当該プロジェクト連絡窓口	… 6
第2章 本 論	
2 - 1 試作機的设计・製作	… 7
2 - 1 - 1 駆動系の開発	… 7
2 - 1 - 2 試作機の組立・調整	… 8
2 - 2 温度変化の検出とモデル規範補正法の採用	… 10
2 - 2 - 1 幾何校正	… 10
2 - 2 - 2 温度補正	… 13
2 - 3 試作機の総合運動性能評価	… 15
2 - 3 - 1 駆動系の運動性能評価	… 15
2 - 3 - 2 総合運動性能評価(マスターチェック)	… 16
2 - 4 校正システムへの適用評価	… 21
2 - 4 1 点検・校正	… 21
2 - 4 2 最高測定能力	… 21
第3章 全体総括	
3 - 1 プロジェクト全体の研究開発成果	… 24
3 - 2 研究開発後の課題・事業化展開	… 24

第1章 研究開発の概要

1-1 研究開発の背景・研究目的及び目標

[研究開発の背景及び当該分野における研究開発動向]

川下製造業者の抱える課題及びニーズ

自動車、建設機械、ロボット等の分野では、重要なサブシステムである動力伝達装置の低騒音化、小型・軽量化、高信頼化、あるいは生産性向上などのニーズが強い。これらのニーズに応えるため、動力伝達装置で最も広く使われている歯車の高精度化が強く求められている。歯車の高精度化、品質管理では、製作した歯車の品質を評価する必要があり、そのための測定技術の向上すなわち歯車測定機の高精度化、高効率化、機能向上が大きな課題となっている。また、高精度歯車の国際的な流通を保証するため、国家標準（国際標準）の下でのトレーサビリティ体系（歯車の校正システムの構築）の確立が急がれており、その為にも校正システムに組み込める高精度歯車測定機の実現が望まれている。

研究開発動向

歯車測定機の供給元は、世界的にみても、ヨーロッパ、米国、日本などの少数の専門メーカーに限られている。これは、歯車測定機の製作には、機械、光学、電子、ソフトウェア等を総合する極めて高い技術水準を要することや、大量生産品でないため、市場規模が限定されていることによるものと思われる。

歴史的にも、歯車測定機の開発は、上記3地域で独自の技術が進展してきた経緯がある。日本は世界に先駆けて、機械式歯形創成機構によらない電子創成式歯形測定機を研究開発し、大阪精密機械（株）によって商品化され（昭和44年度の中小企業庁補助金利用）、歯車測定機のメカトロ化に先鞭をつけた。

近年、歯車の高精度化の要求が高まるに伴い、歯車測定機の高精度化も求められ、各測定機メーカーでも高精度歯車測定機の開発が進み、実用化もなされている。一方、歯車の精度が高くなると、その測定値に対する信頼性が大きな問題となり、国家標準や国際標準によるトレーサビリティ体系の確立が必要になってきた。そこで、ドイツ、米国、日本のそれぞれの国家標準研究機関を中心に、歯車の校正システムの開発が進められている。

このような状況から、従来の高精度歯車測定機に比して1桁程度精度が高く、校正システムの中でも使用可能な測定機の開発が望まれている。例えば、ドイツのPTBでは、高精度三次元測定機とロータリーテーブル及びレーザー測長器を組み合わせた方式を採用している。しかし、この方式では、システムが極めて高価で、測定効率も低いいため、国家機関など限られたところでしか使用できない。これに対して、本研究開発で目指すシステムは、日本で独自に開発された上記電子創成式歯形測定機を基本とし、その誤差要因を除去する新しい構造に改良したものである。したがって、システムの価格も従来型に比して3倍程度に抑えられ、かつ測定効率はむしろ向上することが期待できるため、より生産現場に近い校正システムに取り入れることが可能となる。

本研究開発は、平成11年度に社団法人日本歯車工業会に結成された歯車精度委員会において議論され、同工業会が出願人となって特許申請（特開2002-107142）（平成11年度の新エネルギー・産業技術総合開発機構の受託研究）した基本的な考え方を発展させるものであり、いわば日本の歯車業界がわが国の歯車の地位を保護する武器として認知したものと考えている。

[研究開発の高度化目標及び技術的目標値]

「高度化指針」に定める高度化目標

本研究開発は、「高度化指針」に定める「動力伝達に係る技術において達成すべき高度化目標」の中の「測定技術又は品質管理技術の向上」を主とした目標としている。

動力伝達装置に対するニーズに応えるため、最近の歯車の歯面の設計形状は、標準歯形（一般にインポリュート歯形）を修正した3次元形状で、その加工精度も μm （マイクロメートル）オーダーを要求されており、歯面の3次元形状の高精度化が進んでいる。そのため、歯面の3次元形状を高精度に評価できる測定技術が必須であり、従来の歯車測定機の精度を1桁高めた超高精度歯車測定機の実現に向けて、本研究開発を計画した。また、この超高精度歯車測定機が実現されればトレーサビリティ体系の確立に貢献できる。

上記の高度化目標を達成するため、具体的な研究開発項目とその技術的目標値を下記のように設定した。

研究開発項目（サブテーマ）と技術的目標値

【1】超高精度歯車測定機の試作

すでに、平成18年度までに、予備試作機（基本要素のみで構成）により実施してきた基礎実験（電気通信大学との共同研究及びJIMTOF出展の開発機）で得られた知見に基づき、より実用機に近い機能を持たせた超高精度歯車測定機を試作する。その技術目標値を従来の測定機と対比して表1に示す。特に、測定精度は従来のタイプに比して10倍の向上を目指し、測定の効率に關係する測定速度も従来タイプと同等を目標としている。（通常、高精度に測定する為には速度を落とす必要が有る。）さらに、室温の変化等の温度変化の影響を抑えることによって、超高精度化を実現する。

表1 超高精度歯車測定機的主要仕様（目標値）

	試作機	従来機
被測定歯車の範囲(最大外径[mm])	260	350
測定の速度(平均[mm/sec])	10	10
誤差検出感度 [nm]	1	100
測定の再現性	0.3 μm 以下	2~3 μm
測定値の温度依存性	0.1 μm 以下/	1~2 μm /

【2】試作機の性能評価

性能評価は、試作機のサブユニット（サブシステム）ごとの性能、組み立て調整後の各機構の運動性能について行い、最終的に、多数の歯車あるいは校正用アーティファクトの測定結果を統計処理することによって、【1】で示した試作機の目標値に対する達成の程度を評価する。

【3】校正システムへの適用評価

試作した超高精度歯車測定機を歯車の校正システムに組み込む場合を想定したフィージビリティスタディーを実施し、トレーサビリティ体系の確立に必要なと思われるデータの蓄積を行う。

1 - 2 研究体制

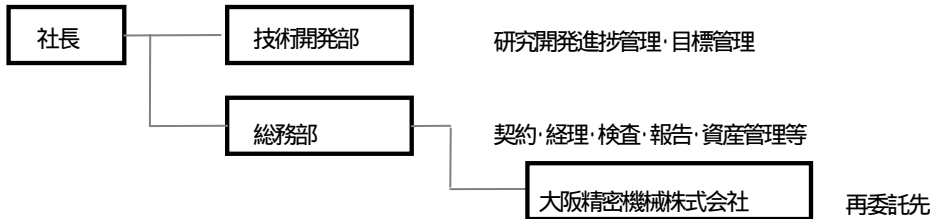
1 - 2 - 1 研究組織及び管理体制

1) 研究組織(全体)

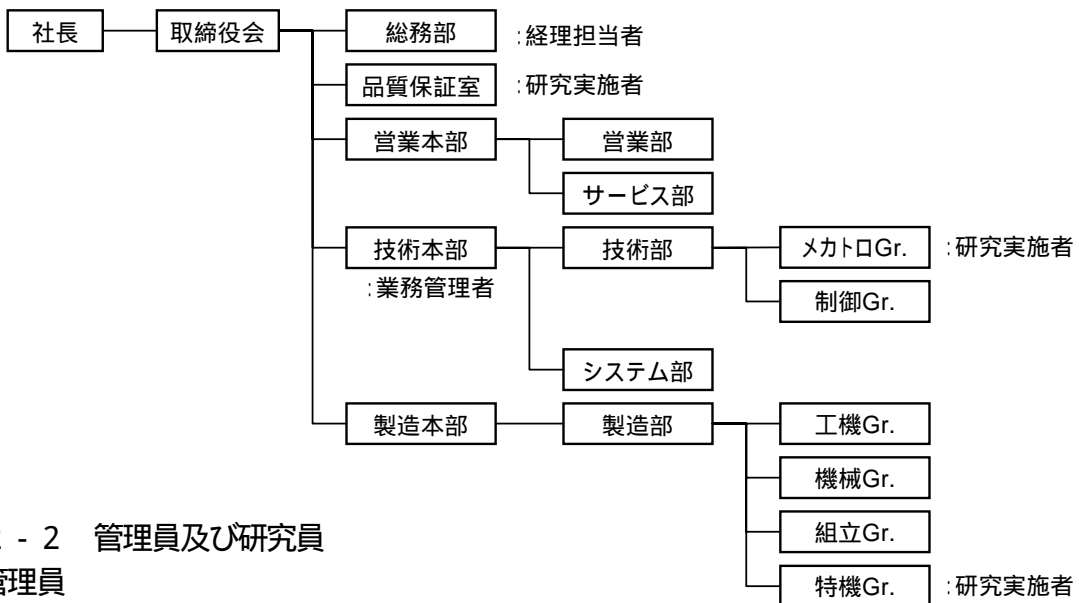


2) 管理体制

事業管理者 : 株式会社キャンパスクリエイト



再委託先 : 大阪精密機械株式会社



1 - 2 - 2 管理員及び研究員

1) 管理員

【事業管理者】 株式会社キャンパスクリエイト

氏名	所属・役割
阿部 則晴	総務部 マネジャー
川崎 和美	総務部
田川 毅	総務部
佐藤 公俊	技術開発部ゼネラルマネージャー

2) 研究員

【再委託先】 大阪精密機械株式会社

氏名	所属・役職
竹田 龍平	技術本部長 総括研究代表者(PL)
田口 哲也	技術部長 副総括研究代表者(SL)
上村 賢	技術部 研究員
中島 善章	技術部 研究員
山下 裕己	技術部 研究員

佐野 康彦	製造部	研究員
鈴木 宣夫	品質保証室長	研究員
増間 眞司	品質保証室	研究員
植田 三郎	品質保証室	研究員
萩原 竜司	品質保証室	研究員

1 - 2 - 3 経理担当者及び業務管理者の所属、氏名

(事業管理者) 株式会社キャンパスクリエイト

(経理管理者) 総務部 マネジャー 阿部 則晴

(業務管理者) 技術開発部 ゼネラルマネージャー 佐藤 公俊

(再委託先) 大阪精密機械株式会社

(経理担当者) 総務部 経理課 大嶋 乃輝

(業務管理者) 取締役技術本部長 竹田 龍平

1 - 3 成果概要

[平成19年度]

超高精度歯車測定機の試作機を概ね計画通り設計・製作し、高精度測定に寄与するレーザー測長器、ロータリーエンコーダの自己校正装置、温度センサー等の機能確認および測定機本体の作動調整まで完了できた。

[平成20年度]

「測定速度 10mm/sec で測定の再現性 0.3 μm 以下」を目標とし、定期的(2~3ヶ月毎)に試作機の校正・点検とあらかじめ選定したアーティファクトを用いて歯形および歯すじの繰り返し性と再現性を評価した。その結果に基づいて測定精度を向上させる為の試作機の調整や各種校正・補正方法の開発等の計画した項目はほぼ予定通り遂行して目標を達成した。しかし、新たな課題としてアーティファクトの固定方法や測定子の摩耗等の影響を考慮する必要があることが明らかになった。

[平成21年度]

定期的な試作機の校正・点検とマスターチェックを実施しつつ、昨年度からの課題も含めて測定精度を向上させる為の試作機の調整や各種校正・補正方法の開発を実施した。その結果、目標の「測定値の温度依存性 0.1 μm/ 以下」を見込める温度補正方法の組み込みが完了した。そして、最終的に試作機が最も安定した状態にて歯車校正システムへの適用見極めのために、JCSS 校正事業における不確かさ算出要領書に準じて試作機の最高測定能力を決定した。

結論として、開発した試作機は歯車校正のトレーサビリティ体系の中で長さ国家にトレーサブルであり、JCSS 校正事業者として十分活用できる測定機であると判断した。

1 - 4 当該研究開発の連絡窓口

大阪精密機械株式会社 技術本部 田口 哲也

電話： 06 - 6782 - 0646

FAX： 06 - 6782 - 0448

E-mail： t-taguchi@osk-corp.co.jp

第2章 本 論

2 - 1 試作機的设计・製作

2 - 1 - 1 駆動系の開発

1) 回転駆動系

回転駆動系では、高精度な回転を実現するエアスピンドルを採用し、そのエアスピンドルと直結したシャフトにビルトインモータ（DDモータ）を組込む構成とした。また、回転角を検出するロータリーエンコーダにおいては、回転中心とスケールリング中心の偏心やスケール自体の目盛り誤差を校正するためにその配置方法や分解能を検討して読取ヘッドを複数個搭載し、それらの読み取り値からロータリーエンコーダの校正値を求める自己校正法を採用した。（図1参照）

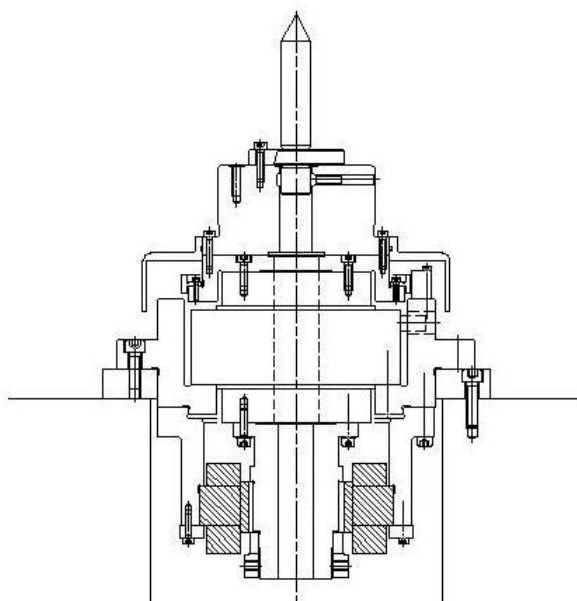


図1 回転駆動系の構想図

2) 直線駆動系

直線駆動系では、歯車測定機において特に重要なY - Zステージにエアライドとリニアモータを採用した。Y - Zステージは真直度や直角度が歯形・歯すじ測定精度に影響するためその要求精度は高いが、ソフトウェアによる校正も加えて更に精度を高くする。また、位置検出には制御安定性のために高精度なリニアスケールを採用した。（図2参照）

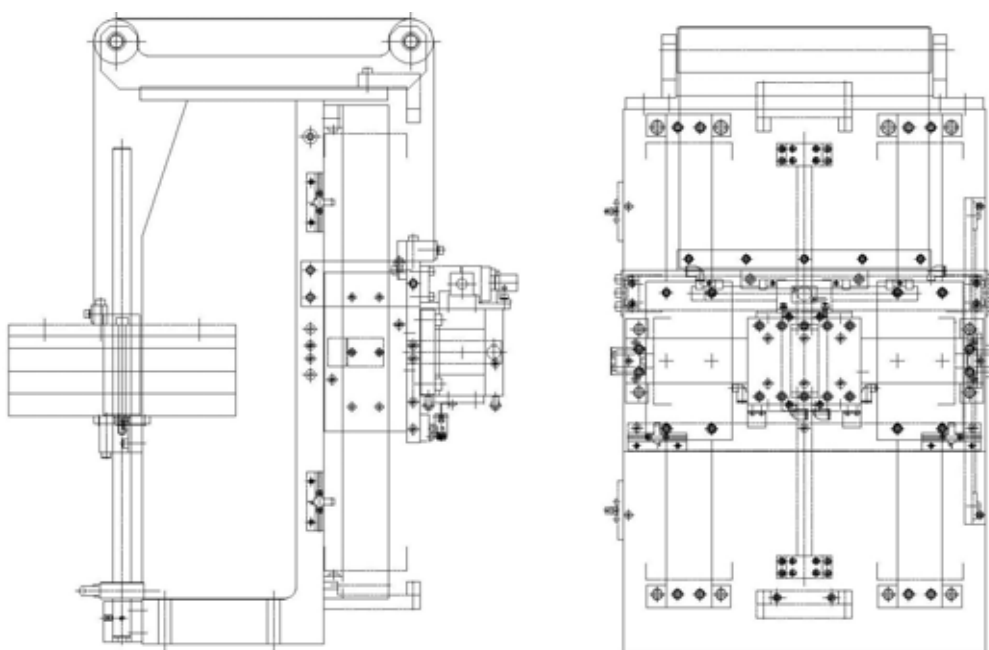


図2 直線駆動系（Y - Zステージ）の構想図

3) 直線変位計測機能

測定子の直線変位計測には、従来より高い分解能での計測を行うためにHe-Neレーザー光の波長を基準とする干渉法を利用したレーザー測長システムを導入し、1nm（ナノメートル）の高分解能で測定子の変位を検出するレーザー検出器を開発した。

（図3参照）

レーザー検出器では、Y軸の反射鏡は測定子と直結した部品に取り付けて検出器の変位を含んだ測定子の距離を計測し、Z軸の反射鏡は検出器底面に取り付けて検出器のZ方向位置を直接計測する。

また、He-Neレーザー光の波長は環境条件（気温・気圧・湿度）によって変化するため、これら環境条件測定用のエアセンサーを組み込んで補正係数を求め、レーザー測長器の出力を補正して実際の距離を算出する。

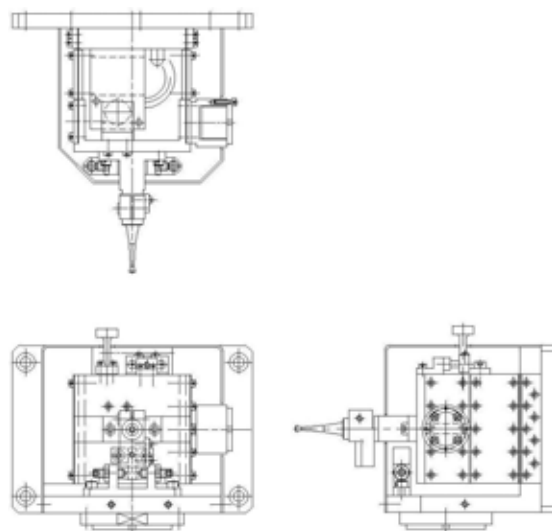


図3 レーザー検出器の構想図

2 - 1 - 2 試作機の組立・調整

1) 機械本体

試作機の機械本体部分は伝統のキサゲ技術を駆使して真直度や直角度等の静的精度において高い精度に製作し、そこに開発した駆動系を搭載する方法で組み立てた。構成においては、その基準となる本体ベッドでは高い硬度で高い平面度を維持し、経年変化を生じさせない観点から花崗岩を採用した。（図4参照）

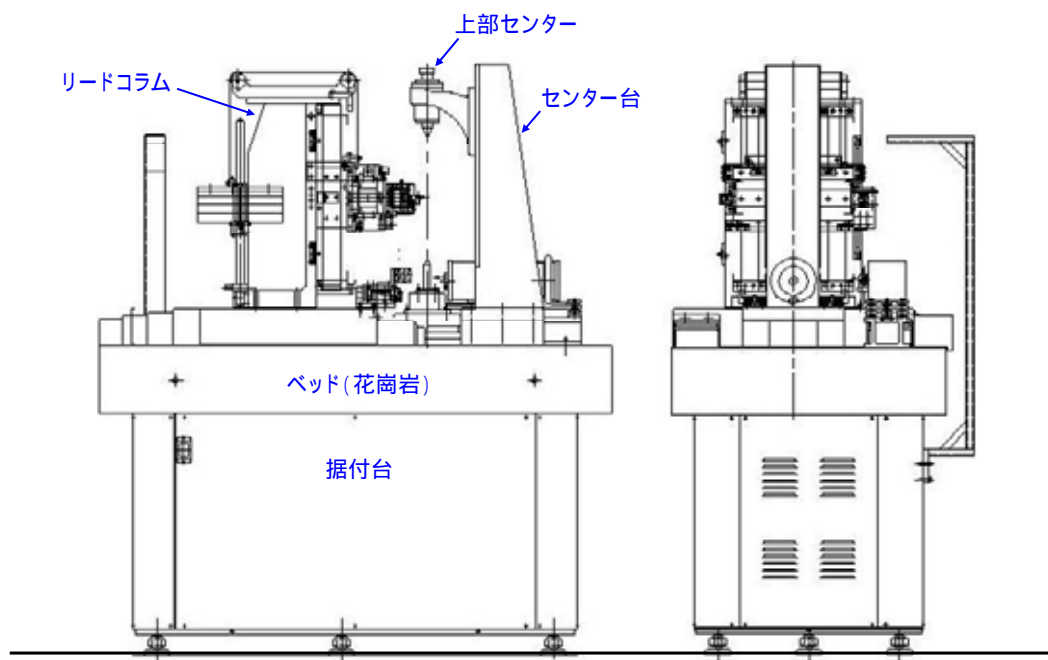


図4 超高精度歯車測定機の構想図

2) 計測・制御システム

制御装置や制御プログラムについては従来機用をベースとして、より高精度な計測のためにリアルタイム性を向上させて高速サンプリングを実現する制御・計測システムを構築し、測定データ処理も改良した。

(1) リアルタイム制御

高精度な測定を行うためにはより多くのデータを取得するために高速なサンプリングを行う必要がある。そこでリアルタイム性向上を目指したシステム（図5参照）を開発した。主な仕様は以下の通りである。

RT-OS(Linux)によるリアルタイム性向上

高速サンプリングによる測定データ点数の拡張（1万点 10万点）

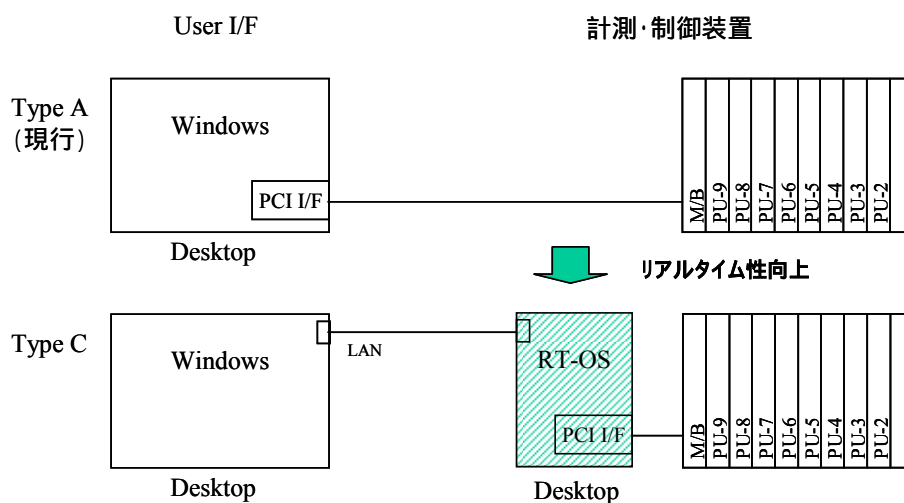


図5 計測・制御システム

(2) ガウシアンフィルタ (Gaussian filter)

測定データのフィルタ処理については従来機では移動平均を使用していたが、少しでも測定結果のバラツキを小さくするために、ISOでも提唱されているガウシアンフィルタへの見直しを図った。

ガウシアンフィルタとは、輪郭曲線を求めるためのフィルタで重み関数がカットオフ値で50%の振幅伝達率となる正規（ガウス）分布の位相補償フィルタであり、比較的鋭い遮断特性を持つ。その重み関数は、次式による。

$$s(x) = \frac{1}{\alpha \cdot \lambda_{CO}} e^{-\pi \left(\frac{x}{\alpha \cdot \lambda_{CO}} \right)^2} \quad (1)$$

x : 重み関数の中央からの位置

λ_{CO} : 輪郭曲線フィルタのカットオフ値

$$\alpha = \sqrt{\frac{\ln 2}{\pi}} = 0.4697 \quad (2)$$

2 - 2 温度変化の検出とモデル規範補正法の採用

試作機（以下、DAT-1）は高精度な計測を行うために恒温室での使用が前提になる。しかし、恒温室であっても僅かな温度変化による測定機のゆがみや歪が発生する。そこで測定機の静的精度で示される幾何誤差の部分と温度変化によって変化する部分を分離してDAT-1の各部に組み込んだ温度センサーの温度変化を処理装置にて取得して計測値を補正するシステム及びソフトウェアを開発した。

2 - 2 - 1 幾何校正

(1) 検出器の校正

測定時に検出器を移動させる直線駆動系にはエアスライド（Y - Zステージ）を採用して高いレベルの真直度等を実現しているが、僅かでも誤差があるとアツベの原理によりスライド部と測定子先端の座標値には差が生じる。高精度に測定するためには測定子先端の座標値の精度が重要であるため、次の各種校正測定を実施し、その結果を測定結果に反映させて不確かさを小さくする方法を開発した。

Tangent(Y)軸方向移動時の校正

主に歯形測定精度への影響が考えられるY軸方向へ移動する時の測定子先端座標値の校正には、ミットヨ製高精度チェックマスター（HMC-300H）を用いた（図6参照）。測定結果とチェックマスターの校正値を比較して校正データを作成し、その校正値を用いて歯形測定結果を校正することで高精度な歯形測定が実現できる。

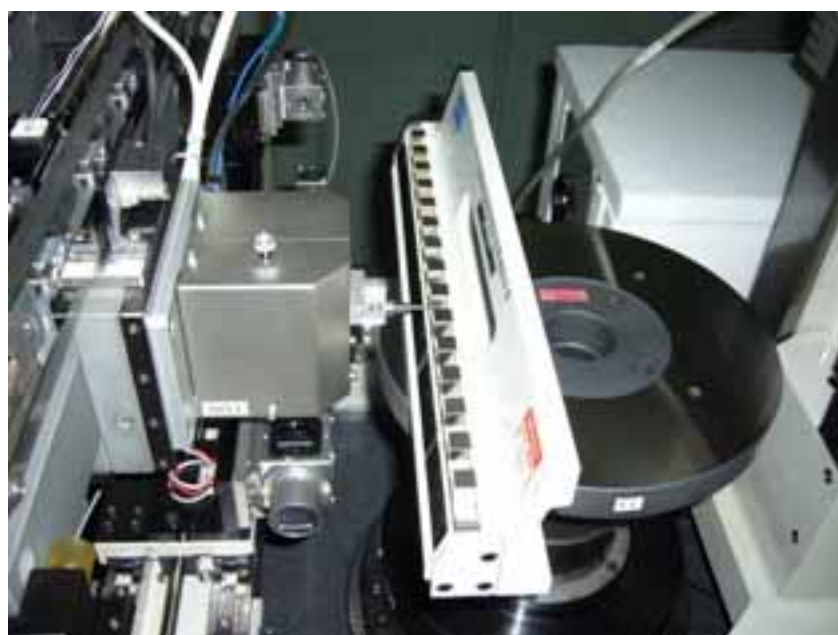


図6 Y軸方向校正測定の外観

Axial(Z)軸方向移動時の校正

主に歯すじ測定精度への影響が考えられるAxial(Z)軸方向へ移動する時の測定子先端座標値の校正には、内製のテストバー（30×L255）を用いた（図7参照）。このテストバーを歯すじ測定と同様に左右で測定して校正データを作成し、その校正曲線を用いて歯すじ測定結果を校正することで高精度な歯すじ測定が実現できる。



図7 Z軸方向校正測定の外観

検出器の直線性

検出器の変位量に応じて生じる誤差（たわみ）を検証するために、測定子をテストバーに当て、一定間隔で検出器を移動させた時の変位量を検出器内のリニアエンコーダおよびレーザー干渉計で計測した（図8参照）。

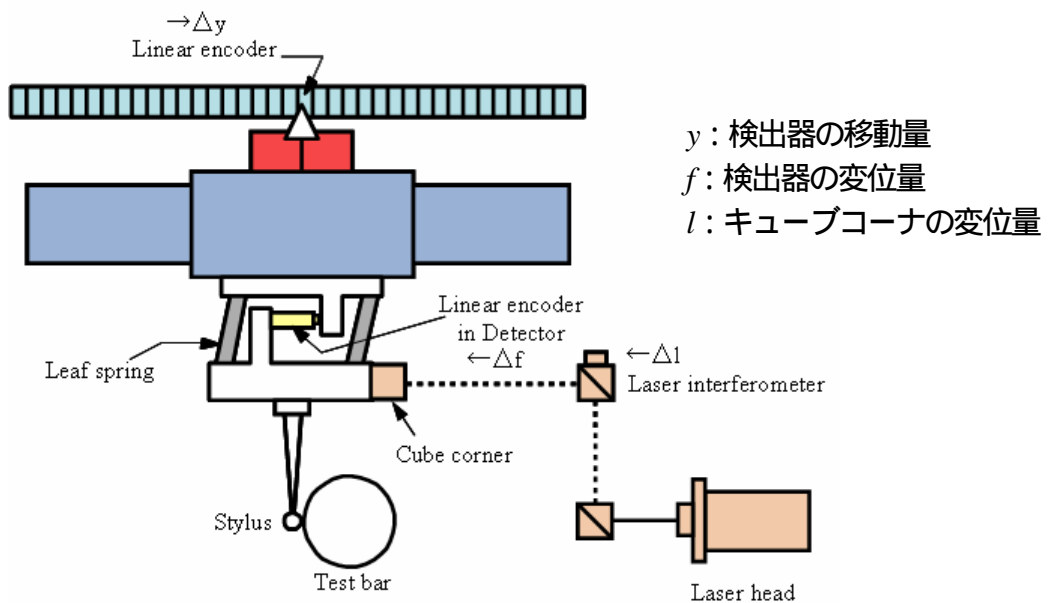


図8 検出器部

検証の結果、検出器部の変位量には式(4)の関係が成り立つことが分かった。このたわみに相当し、 y との関係式を求めて変位量を補正した。

$$\Delta y \approx \Delta f + \Delta l \quad (4)$$

(2) 測定機の校正

Axial(Z)軸の校正

検出器がAxial(Z)軸方向へ移動する時、測定子先端はZ軸のピッチング等が要因となりアップ誤差を生じる。この誤差は歯すじ測定においてねじれ角が大きくなる程、測定精度に与える影響が大きくなる。その校正にはミットヨ製高精度チェックマスター（HMC-600H）を用いた（図9参照）。測定結果とチェックマスターの校正値を比較して校正データを作成し、その校正値を用いて歯すじ測定結果を校正することで高精度な歯すじ測定が実現できる。



図9 Z軸チェックマスター測定の外観

測定データの補正計算

これまでの歯形および歯すじの誤差計算方法はその測定原理に倣って創成運動をベースとした方法であった。測定機の真直度が高く変化しなければその方法で良いが、温度変化等による変化に対していくらその現象をモデル化できても精度良く誤差計算に反映させることは難しい。

そこで図10に示す偏心補正の考え方を応用した誤差計算方法を作成した。この考え方は測定データ各点の測定子中心座標を回轉變換してある位相の歯面上に揃え、そこで理論歯面との差を求める方法であり精度変化を数値化して中心座標に加えることで補正可能となる。

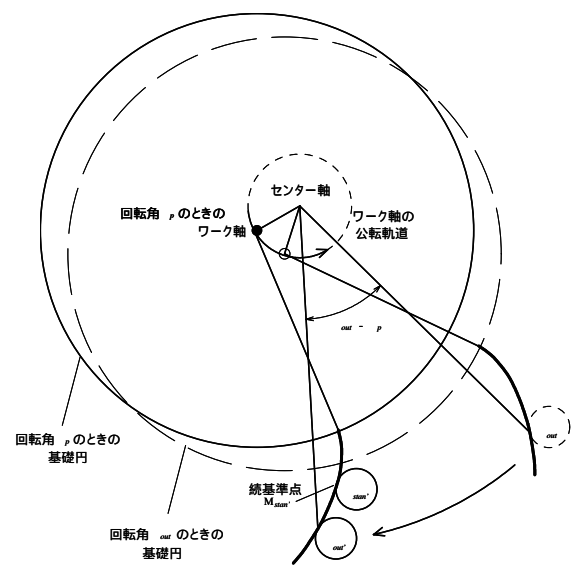


図10 偏心補正の考え方

2 - 2 - 2 温度補正

(1) 温度補正準備

補正のための温度センサーの配置は、検証を進める中で数回の変更を行い、最終的に以下の通りに配置した。

- X軸R / Lガイド後端・・・モータの熱が石定盤まで伝わり影響するかを観察
 - X軸スケール前進 / 後退端・・・スケール部の熱膨張が座標値に及ぼす影響を観察
 - Y軸スケール前進 / 後退端・・・同上
 - Z軸スケール上昇端・・・同上
 - C軸ハウジング奥・・・C軸モータ（熱源）の影響を観察
 - センター台 真下・・・同上
 - センター台 すべり面横・・・センター台の熱膨張が一致度に及ぼす影響を観察
- その他、温度変化要因の排除としてレーザー光源の配置やデータ管理用PCラックの配置を変更し、測定環境の整備として除振台とクリーンブースを活用した。

(2) 温度変化実験

DAT-1が設置されている測定センターの室温を変化させて測定機の精度変化を把握し、その変化モデルを決定して温度補正を適用した。

実験要領：

- センター台の一致度測定（上部センター側の円周8ヶ所の振れ測定）
- テストバーの中心（=原点）測定（Axial(Z)方向で上中下3ヶ所）
- 測定センターの空調機の設定温度を1 変化
- 以降、1時間毎に ~ を繰り返し実施

実験結果：

実験トライアルと予備実験の結果を受けて改善を図り、温度変化に伴う本体精度変化を測定した。設定温度については実際の使用環境に合わせた室温変化（設定温度 20 18 22 20 ）にて実施した。温度変化はセンサー位置によって異なるが、必要な部分では約1 以上の変化が確認できた（図11参照）。

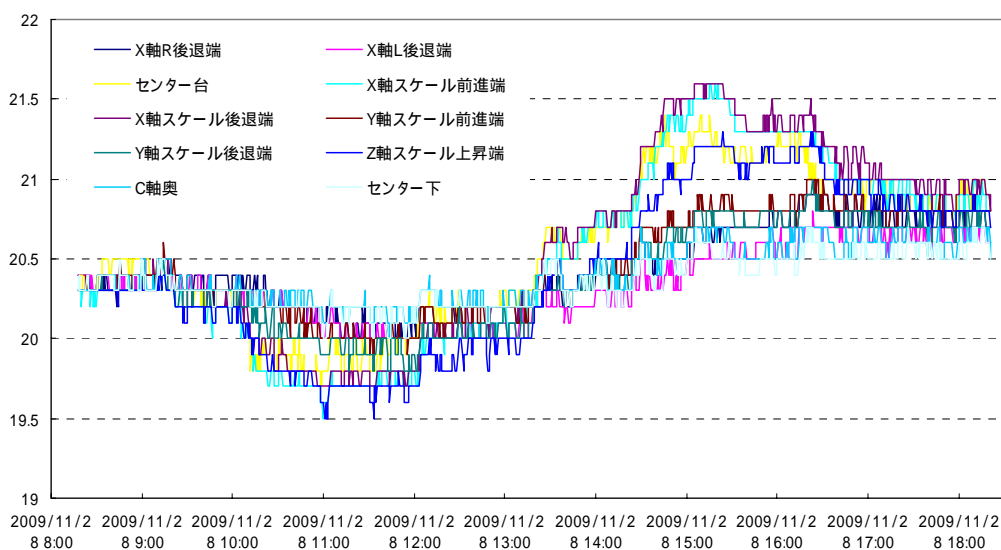


図11 測定機本体の温度変化

センター台一致度の変化を図12に示す。温度変化に伴いX方向に変化し、Y方向への変化は小さい。これはセンター台がY方向に対称形状であるためと考えられる。一致度とセンター台温度との相関分析より、温度変化1 当たりX方向に約1.6 μm の変化が有る。これは上部センター中心とスライド面との距離に相当し、理論(100mmで1 当たり1 μm)的に妥当であると考え。但し、センター台の変化についてはその変化量が精度の許容値内であり補正の必要は無いと判断した。

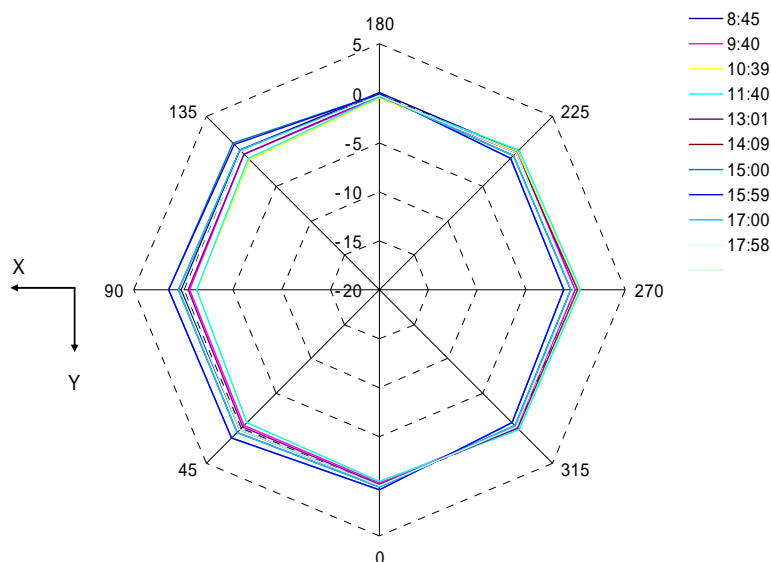


図12 一致度(センター台)変化

X軸とY軸のリニアエンコーダ(スケール)取り付け部品の温度とテストバー上中下の中心座標(X, Y)の変化を図13に示す。ここで中心座標は先のセンター台倒れ分を補正している。この結果、上中下の中心座標はほぼ同じ値を示し、各温度変化と強い相関が確認できた。そこで単純な温度変化モデルに置き換え、この相関を示す関係式を用いてX軸とY軸の位置決めを補正して高精度測定を実現できると考える。

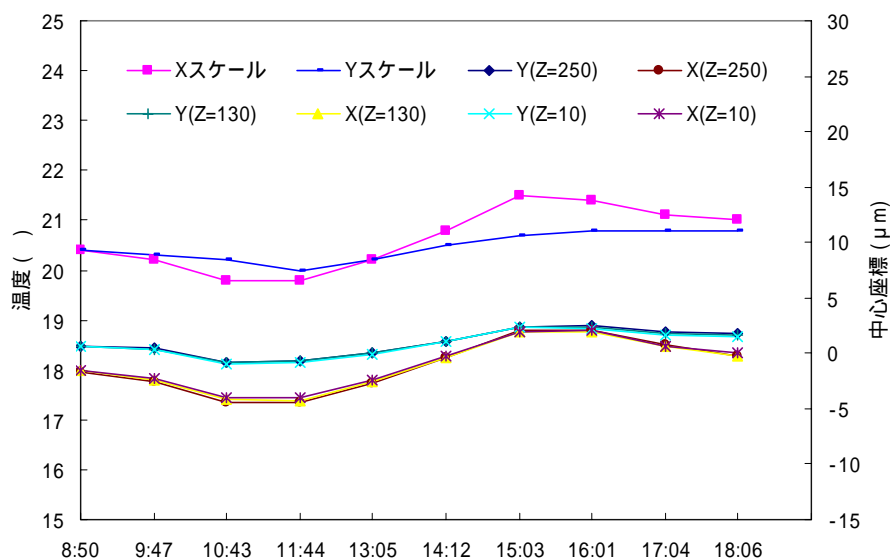


図13 一致度と温度の相関

2 - 3 試作機の総合運動性能評価
 2 - 3 - 1 駆動系の運動性能評価
 1) 回転駆動系

DAT-1の回転駆動系の運動性能評価としては指令値に対するロータリーエンコーダの位置偏差を評価し、その位置偏差が小さくなる様にサーボゲインを調整して効率的に高精度回転を実現した。その結果を図14に示す。

図の横軸は転がり長さ、縦軸は位置偏差を表しており、左側が時計回り、右側が反時計回りに回転させて繰り返し3回測定した結果を縦に並べている。結果として、回転駆動系の位置偏差は最大 $0.3\ \mu\text{m}$ (p-p)であり、従来機の位置偏差(約 $1.0\ \mu\text{m}$ (p-p))と比較して回転駆動系単体の運動性能は目標達成に向けて大きく貢献できると判断した。

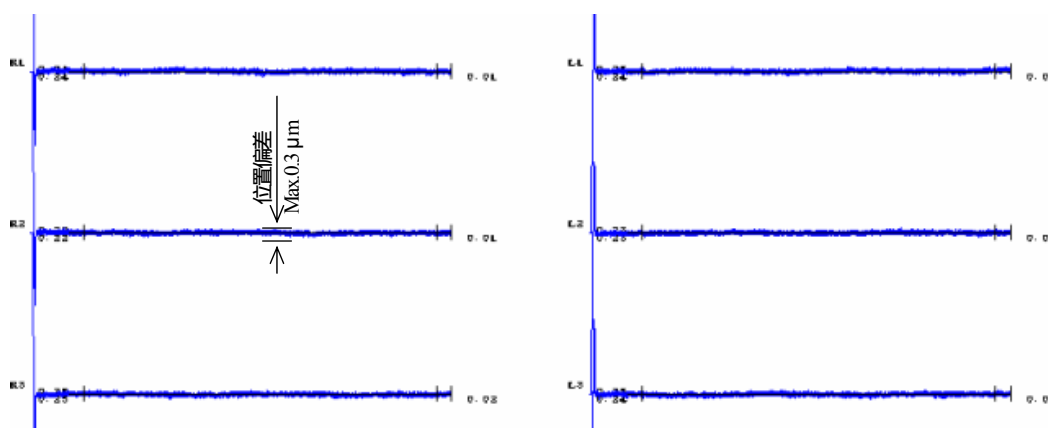


図14 回転駆動系の位置偏差

2) 直線駆動系

直線駆動系でも指令値に対するリニアエンコーダの位置偏差を評価し、その位置偏差が小さくなる様にサーボゲインを調整して高精度な直動性能を実現した。その結果の内、Tangent(Y)軸の結果を図15に示す。

図の横軸は移動距離、縦軸は位置偏差を示しており、左側が負方向、右側が正方向に動作させて繰り返し3回測定した結果を縦に並べている。結果として、Tangent(Y)軸の位置偏差は、最大 $0.27\ \mu\text{m}$ (p-p) (Axial(Z)軸は最大 $0.28\ \mu\text{m}$ (p-p))であり、従来機の位置偏差(約 $1.0\ \mu\text{m}$ (p-p))と比較して直線駆動系の各軸単体の運動性能は目標達成に向けて大きく貢献できると判断した。

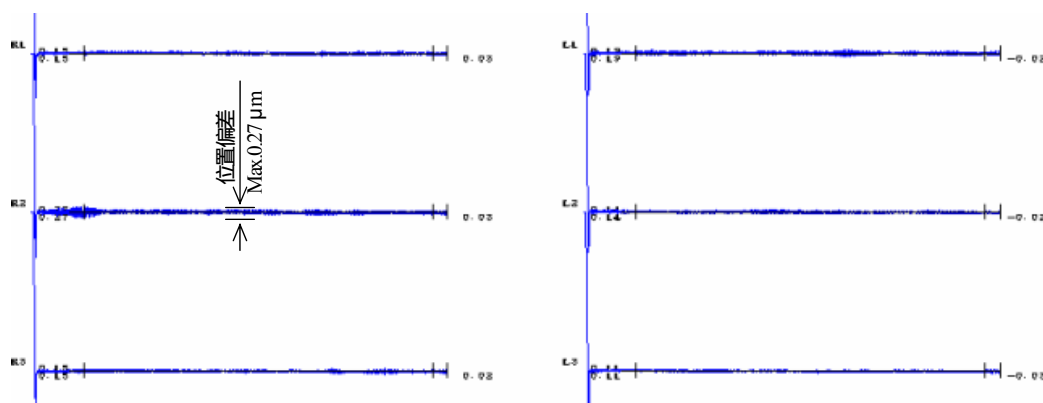


図15 Tangent(Y)軸の位置偏差

2 - 3 - 2 総合運動性能評価（マスターチェック）

DAT-1の総合運動性能評価として歯形および歯すじ測定性能を評価した。ここでは従来機の精度変化や機差を検証するために用いられるアーティファクトをその利便性や普及率を考慮して採用した。

また、測定した形状バラツキの評価指標としては以下に示す標準偏差の6倍を用いた。の算出手順は、まず次式に示す通り歯形曲線毎に平均形状からの偏差を求め、偏差の和が0になる様に処理する。

$$\varepsilon_{ij} = e_{ij} - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n e_{ij} \quad (3)$$

$$h_{ij} = \varepsilon_{ij} - \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m \varepsilon_{ij} \quad (4)$$

ここで $i(i=1,2,\dots,n)$ は測定番号、 n は総測定回数、 $j(j=1,2,\dots,m)$ は評価区間のデータ番号、 m は測定毎の総データ数を示す。そして次式で相加平均及び分散²を算出する。標準偏差はこの分散²の正の平方根である。

$$\bar{h} = \frac{1}{n \cdot m} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m h_{ij} \quad (5)$$

$$\sigma^2 = \frac{1}{n \cdot m - 1} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m (h_{ij} - \bar{h})^2 \quad (6)$$

全ての検証において「Left flank」は正規の姿勢、「Right flank」は上下を逆さにした姿勢で取り付けて測定した結果である。

(1) 歯形測定

DAT-1の歯形測定性能を評価するために使用した歯形アーティファクト（カーブマスター）の諸元を表2、外観および測定状況を図16に示す。

表2 カーブマスター（No.1008）諸元

Base circle diameter	(mm)	100
Face width	(mm)	20
Helix angle	(deg)	0,R15,L15

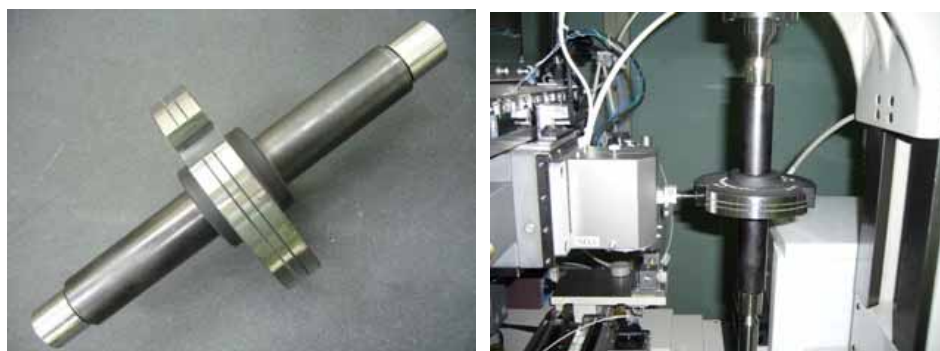


図16 カーブマスター（左：外観、右：測定状況）

繰返し性

目標精度：0.3 μm以内

測定方法：取り付けたアーティファクトを脱着無しで10回連続測定する。測定速度は3種類（1mm/sec，5mm/sec，10mm/sec）とする。

測定結果：測定速度毎に10回連続測定した結果（ねじれ角0°の例）を図17に示す。それぞれ速度毎に10回分の測定データを重ねており、評価範囲（evaluation range）のデータを用いて6σを算出した。その結果を表3に示す。相対的に逆姿勢の右ねじれ15°は6σが大きくなっているが、最大は10mm/secでその歯面を測定した時の0.12 μmであり、目標精度を達成した。

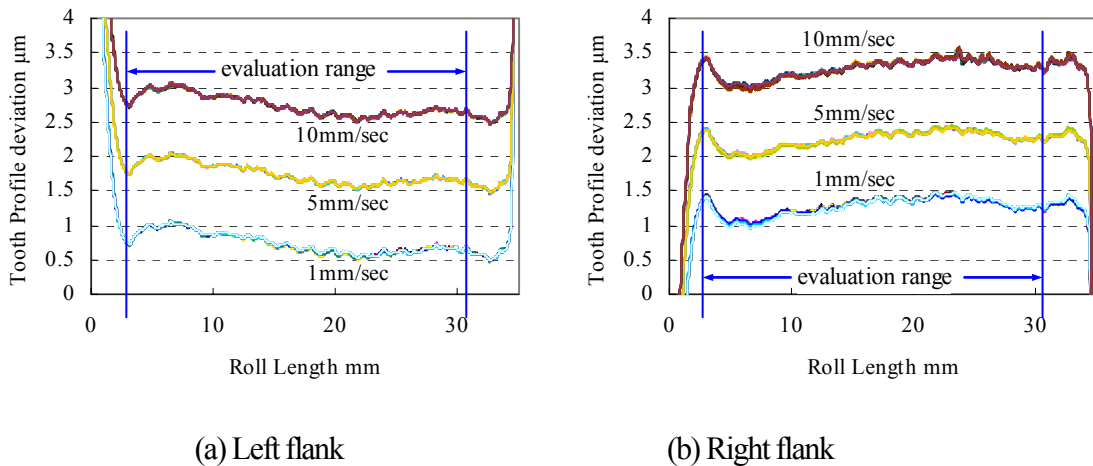


図17 歯形形状の繰返し性（ねじれ角0°）

表3 繰返し性の結果

	Units: μm					
	6σ ₁		6σ ₅		6σ ₁₀	
	Left flank	Right flank	Left flank	Right flank	Left flank	Right flank
0°	0.04	0.08	0.03	0.06	0.04	0.09
15° RH	0.09	0.10	0.09	0.10	0.08	0.12
15° LH	0.07	0.05	0.08	0.04	0.07	0.05

再現性

目標精度：0.3 μm以内

測定方法：アーティファクトの取り付け位相を90°ずつずらして4カ所（各1回）測定する。測定速度は10mm/sec。

測定結果：繰返し性の評価と同様にして4位相分の測定データから6σを算出した。その結果を表4に示す。6σは全て0.1 μm以下となっており、目標精度を達成した。

表4 再現性の結果

	Units: μm	
	$6\sigma_{10}$	
	Left flank	Right flank
0°	0.09	0.07
15° RH	0.08	0.06
15° LH	0.09	0.07

速度差

目標精度：0.3 μm 以内

評価方法：3種類（1mm/sec，5mm/sec，10mm/sec）の測定速度で測定した繰り返し性の結果を用いて、その平均値の差を特性値毎に求める（姿勢別）。

評価結果：速度差の結果を表5に示す。全ての速度で0.1 μm 以内となり、目標精度を達成した。

表5 速度差の結果

	Units: μm					
	Difference of average					
	$f_{H\alpha}$		F_α		f_{fa}	
	Left flank	Right flank	Left flank	Right flank	Left flank	Right flank
0°	0.02	0.06	0.02	0.10	0.01	0.06
15° RH	0.03	0.01	0.04	0.01	0.02	0.02
15° LH	0.00	0.01	0.01	0.04	0.00	0.03

(2) 歯すじ測定

DAT-1の歯すじ測定性能を評価するために使用した歯すじアーティファクト（リードマスター）の諸元を表6、外観および測定状況を図18に示す。

表6 リードマスター（No.3）諸元

Base circle diameter	(mm)	100
Face width	(mm)	75
Helix angle	(deg)	0,L15,L30,R15,R30

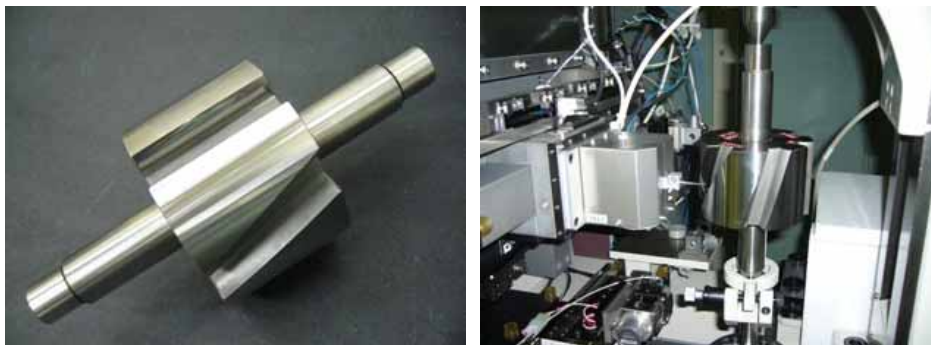


図18 リードマスター（左：外観、右：測定状況）

繰返し性

目標精度：0.3 μm以内

測定方法：取り付けたアーティファクトを脱着無しで10回連続測定する。測定速度は3種類（1mm/sec，5mm/sec，10mm/sec）とする。

測定結果：測定速度毎に10回連続測定した結果（ねじれ角0°の例）を図19に示す。それぞれ速度毎に10回分の測定データを重ねており、評価範囲（evaluation range）のデータを用いて6σを算出した。その結果を表7に示す。相対的に右ねじれ30°の6σが大きくなっているが、最大は0.28 μmであり、目標精度を達成した。

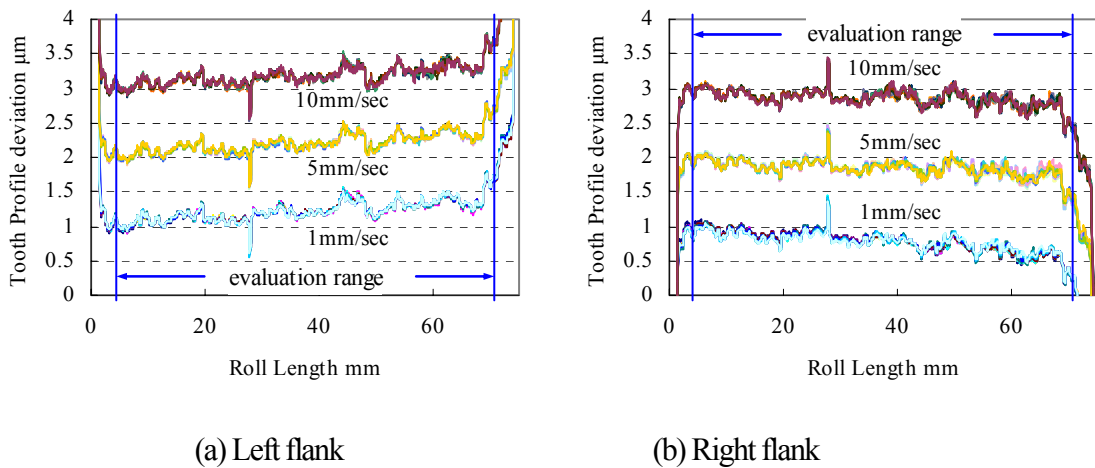


図19 歯すじ形状の繰返し性（ねじれ角0°）

表7 繰返し性の結果

	Units: μm					
	6σ ₁		6σ ₅		6σ ₁₀	
	Left flank	Right flank	Left flank	Right flank	Left flank	Right flank
0°	0.06	0.12	0.08	0.16	0.11	0.15
15° RH	0.14	0.17	0.16	0.18	0.19	0.19
30° RH	0.21	0.22	0.28	0.23	0.27	0.26
15° LH	0.13	0.15	0.14	0.15	0.11	0.28
30° LH	0.15	0.17	0.14	0.14	0.14	0.15

再現性

目標精度：0.3 μm以内

測定方法：アーティファクトの取り付け位相を90°ずつずらして4カ所（各1回）測定する。測定速度は10mm/sec。

測定結果：繰返し性の評価と同様にして4位相分の測定データから6σを算出した。その結果を表8に示す。相対的に30°RHでは6σが大きいが最大は0.22 μmであり、目標精度を達成した。

表8 再現性の結果

	Units: μm	
	$6\sigma_{10}$	
	Left flank	Right flank
0°	0.09	0.10
15° RH	0.13	0.13
30° RH	0.20	0.22
15° LH	0.15	0.16
30° LH	0.16	0.13

速度差

目標精度：0.3 μm 以内

評価方法：3種類（1mm/sec，5mm/sec，10mm/sec）の測定速度で測定した繰り返し性の結果（特性値）を用いて、その平均値の差を特性値毎に求める（姿勢別）。

評価結果：速度差の結果を表9に示す。相対的に右ねじれの速度差が大きいですが最大で0.26 μm であり、目標精度を達成した。

表9 速度差の結果

	Units: μm					
	Difference of average					
	$f_{H\beta}$		F_β		$f_{f\beta}$	
	Left flank	Right flank	Left flank	Right flank	Left flank	Right flank
0°	0.04	0.22	0.03	0.17	0.05	0.05
15° RH	0.07	0.26	0.07	0.26	0.11	0.13
30° RH	0.16	0.20	0.17	0.23	0.08	0.20
15° LH	0.10	0.05	0.13	0.05	0.04	0.14
30° LH	0.08	0.09	0.09	0.04	0.04	0.04

歯形および歯すじ測定については、ねじれ角によって若干の差が有るが、高い測定性能を持つことが確認でき、全ての項目について目標値を達成できた。

2 - 4 校正システムへの適用評価

2 - 4 1 点検・校正

定期的にDAT-1の校正・点検を実施しながら校正方法及び手順を検討した。作業に当たっては汎用の治具と測微器に無線式電気マイクロメータ（分解能0.1 μm 、測定力25gf）を使用して基本的に半目盛（0.05 μm ）で読み取った。以下に点検・校正項目を示す。

- 項目1．C軸（主軸）の回転精度
- 項目2．C軸（主軸）の基準面の振れ
- 項目3．X軸（Radial軸）のC軸（主軸）との直角度
- 項目4．Y軸（Tangent軸）のC軸（主軸）との直角度
- 項目5．W軸（センタ台移動軸）のC軸（主軸）との平行度
- 項目6．Z軸（Axial軸）のC軸（主軸）との平行度（X：25mm Y：0mm 位置）
- 項目7．Y軸の位置替え（ $\pm 50\text{mm}$ ）によるZ軸（Axial軸）のC軸（主軸）との平行度
- 項目8．X軸の位置替えによるZ軸（Axial軸）のC軸（主軸）との平行度
- 項目9．D1軸（下部センター）の振れ
- 項目10．D2軸（上部回転センター）の振れ
- 項目11．D2軸（上部回転センター）のD1軸（C軸）との一致度
- 項目12．D2軸（上部回転センター）の定位置間隔(200L)の平行度
- 項目13．Z軸（Axial軸）のD1 - D2軸を結ぶ軸心との平行度

校正・点検の結果、歯車アーティファクトの測定結果に大きな影響を与えるような変化は見られなかった。また、僅かな変化が見られる項目も、ほとんどが無線式電気マイクロメータの設置方法等の測定方法に起因するバラツキと考えられる。

2 - 4 2 最高測定能力

DAT-1の歯車校正システムへの組み込みに対する有効性を検証するため、各種不確かさ要因の大きさを把握する作業(1)～(6)を実施してDAT-1の最高測定能力を決定した。なお、詳細はJCSS校正事業における不確かさ算出要領書（文書番号：GMCK-03-01）に準ずる。

(1) 検出器

- 器差と直線性 : $\pm 0.05\text{mm}$ 範囲でブロックゲージを測定
- 繰り返し安定性 : 上記実験の5回の繰り返し性
- 剛性 : 上記実験を0° 15° 30° 45° に傾けて測定

(2) 回転軸

- 上部センターの偏心率
- 下部センターの偏心率
- 下部センターに対する上部センターの一致度
: 上部センター位置100,200,300mmで測定した一致度の管理幅
- ロータリーエンコーダの精度 : ポリゴン鏡とオートコロメータを使用

(3) X軸

- 基礎円位置への位置決め精度 : ブロックマスターを測定
- 繰り返し安定性 : Y両端とZ上部におけるX位置決めの繰り返し標準偏差

X軸とY軸の直角誤差 : 直角定規を反転測定
X Y平面度によるZ軸の倒れ
: 両センターテストバーのZ運動平行度をX 2位置、Y 3位置で行う
測定子長さ起因する要因
: テストバーを使用した原点設定 (Ra) の繰り返し標準偏差

(4) Z軸

Z軸運動の傾き誤差
: 100,200,300mm両センターテストバーをZ運動で測定した平行度の管理幅
Z軸の運動精度 : ブロックマスターを測定 (検出器はMGL-26A用)
Z軸運動のX軸方向真直度 : 両センターテストバーを測定
Z軸運動のY軸方向真直度 : 両センターテストバーを測定

(5) Y軸

測定子のY軸原点からのズレ
: テストバーを使用した原点設定 (Ta) の繰り返し標準偏差
Y軸運動の直角度誤差 : 主軸上に直定規を設置し、主軸ごと反転測定
Y軸の運動精度 : ブロックマスターを測定
Y軸運動のZ軸方向真直度 : 直定規を主軸上で測定
Y軸運動のX軸方向真直度 : 直定規を主軸上で測定

(6) 校正作業

歯形・歯すじ繰り返し測定
測定ギヤ : $m=4, PA=20^\circ, HA=27.336^\circ LH, Z=24, B=40$
測定日 : 2009/12/7 ~ 12/11
測定回数 : 24回 / 4名
測定方法 : GMC校正要領書による4位相測定
ピッチ繰り返し測定
測定ギヤ : $m=4, PA=14.5^\circ, HA=0^\circ, Z=28, B=30$
測定日 : 2009/12/7 ~ 12/11
測定回数 : 24回 / 4名
測定方法 : GMC校正要領書による4位相測定

(7) 最高測定能力の決定

初めに(1)~(6)の結果から歯車測定の不確かさ(拡張不確かさ $k=2$)を計算した。但し、現時点ではDAT-1型の長期安定性は特定されておらず、今後の監視によるところが大きいため、長期安定性については個別に不確かさの要因には対挙げていないが、測定機の管理としての必要な部分は考慮した。また、最高測定能力はJCSS登録事業者として表明している基準円直径の大きさで区分分けした。そして、各基準円直径区分の中で、常識的な範囲において不確かさに与える影響の小さい歯車諸元を想定し、バジェットシートにより計算して求めた。その歯車諸元を表10に示す。

結果として、DAT-1の最高測定能力(計算された歯車測定の拡張不確かさ)は表11のようになり、現在JCSS校正事業者として表明している最高測定能力(表12)を上回る結果となった。

表10 最高測定能力算出時 歯車諸元

区分 校正品目諸元	基準円直径			
	20mm 以上 60mm 以下	60mm を超え 110mm 以下	110mm を超え 165mm 以下	165mm を超え 250mm 以下
基準円直径	60.000 mm	110.000 mm	164.500 mm	249.000 mm
基礎円直径	56.382 mm	103.366 mm	154.579 mm	233.984 mm
歯幅	10 mm	20 mm	30 mm	30 mm
モジュール	1.5	2.5	3.5	4.15
圧力角	20 °	20 °	20 °	20 °
ねじれ角	0 °	0 °	0 °	0 °
歯数	40	44	47	60
軸長	200 mm	200 mm	255 mm	255 mm
測定位置	軸長中央部	軸長中央部	軸長中央部	軸長中央部

表11 最高測定能力(DAT-1)

区分 校正項目	基準円直径			
	20mm 以上 60mm 以下	60mm を超え 110mm 以下	110mm を超え 165mm 以下	165mm を超え 250mm 以下
歯形 全歯形誤差	0.6 μm	0.6 μm	0.7 μm	0.7 μm
	0.6 μm	0.6 μm	0.7 μm	0.7 μm
	0.6 μm	0.6 μm	0.7 μm	0.7 μm
歯すじ 全歯すじ誤差	0.6 μm	0.6 μm	0.6 μm	0.6 μm
	0.6 μm	0.6 μm	0.6 μm	0.6 μm
	0.6 μm	0.6 μm	0.6 μm	0.6 μm
ピッチ 累積ピッチ誤差	0.6 μm	0.7 μm	0.7 μm	0.9 μm
	0.3 μm	0.4 μm	0.5 μm	0.7 μm

表12 JCSS最高測定能力(MGL-26A)

区分 校正項目	基準円直径			
	20mm 以上 60mm 以下	60mm を超え 110mm 以下	110mm を超え 165mm 以下	165mm を超え 250mm 以下
歯形 全歯形誤差	0.7 μm	0.8 μm	0.9 μm	1.0 μm
	0.7 μm	0.8 μm	0.9 μm	1.0 μm
	0.7 μm	0.8 μm	0.9 μm	1.0 μm
歯すじ 全歯すじ誤差	0.6 μm	0.7 μm	0.7 μm	0.7 μm
	0.6 μm	0.7 μm	0.7 μm	0.7 μm
	0.6 μm	0.7 μm	0.7 μm	0.7 μm
ピッチ 累積ピッチ誤差	1.1 μm	1.2 μm	1.2 μm	1.4 μm
	0.5 μm	0.6 μm	0.7 μm	0.9 μm

DAT-1型の最高測定能力の見極めとしては、表11と表12の比較からも判るとおり、現行のJCSS校正事業者としての最高測定能力を向上させるものであると判断する。よって、現状においてDAT-1型は最高(社内比)の能力を持つ歯車測定機であると思われる。

第3章 全体総括

3 - 1 複数年の研究開発成果

初年度（平成19年度）は、超高精度歯車測定機の試作機（DAT-1）を設計・製作し、高精度に寄与するレーザー測長器、ロータリーエンコーダの自己校正装置、温度センサー等の機能確認および測定機本体の作動調整まで完了し、次年度以降に評価を行うための準備を終えた。研究開発期間が短く、設計段階で仕様の見直しや決定に多少の苦心はあったが、最終的には目標を達成できた。

次年度（平成20年度）は、サブユニット（サブシステム）ごとの運動性能評価および総合運動性能評価によって DAT-1 の調整や各種校正・補正方法の開発等を実施しつつ、アーティファクトを用いた歯形及び歯すじ測定の繰り返し性と再現性の評価にて目標の「測定速度 10mm/sec で測定の再現性 $0.3\mu\text{m}$ 以下を達成する」を達成した。しかし、並行して開始した歯車校正システムへの適用評価のための点検・校正結果も含めて総合的に判断した時に、より安定した高精度測定を実現するための課題（本体精度の経時変化、測定機の点検・校正方法、アーティファクト固定方法、測定子摩耗、等）も見つかった。また、事業化も視野に入れて、制御安定性をより高めるための制御・計測システム実現に向けて、組込みシステム開発技術展等にも参加して情報収集を行った。

最終年度（平成21年度）は、まず前年度に明らかになった測定機の課題解決に取り組むと同時に制御・計測システムの改良にも取り組み、より安定した高精度測定システムの構築を図った。その為に機械要素技術展、計測展、組込み総合技術展等に参加して、高精度測定に必要な機械要素やリアルタイム性向上に必要な制御機器を調査した。事業化に向けては更なる改良が必要である。また、温度と測定機の精度の相関を解明して「測定値の温度依存性 $0.1\mu\text{m}/$ 以下」を見込める温度補正方法の組み込みが完了した。そして、歯車校正システムへの適用見極めとして DAT-1 の最高測定能力を決定した。

結論として、DAT-1 の能力は現行測定機からかなりの改善が図られており、不確かさの評価という点では限界に近いレベルまで到達していると思われ、歯車校正のトレーサビリティ体系の中で長さ国家にトレーサブルであり JCSS 校正事業者として十分活用できる測定機であると判断する。また、DAT-1 の適用によって、歯車アーティファクトの標準供給において歯車校正の不確かさを現状より大幅に低減できると考える。

3 - 2 今後の事業化に向けた取り組み

本研究開発成果により超高精度歯車測定機が実用化レベルになり、以下に示す事業のグローバル化拡大と基盤技術の一層の高度化に取り組む。

1. 国際的に通用するトレーサビリティ体系確立のための標準器として、JCSS「校正機関」において歯車校正システムへの組み込みを行う。
2. 更なる測定能力向上に向けて、以下の要因（特に標準器）の管理・校正方法について検討して行く。
 - ・ 検証に使用する標準器・測定器の校正の不確かさ
 - ・ 検証に使用する標準器・測定器の校正値の管理幅
 - ・ 校正事業として常時（長期）使用する場合の精度管理幅
 - ・ 人的要因（歯車保持の方法）
 - ・ 環境条件
3. 全産業分野を対象として本研究開発機と同等性能の製品版を歯車生産現場の標準器として市場に投入し、歯車測定機市場でのグローバルなブランド確立を目指す。