平成 21 年度補正予算事業

戦略的基盤技術高度化支援事業業

「衛星搭載用大型SiC製非球面ミラーの高精度研削加工技術の開発」

成果報告書概要版

平成 22 年 6 月

委託者 東北経済産業局

委託先 (㈱インテリジェント・コスモス研究機構

第1章 研究開発の概要 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	1
1.1 研究開発の背景・研究目的及び目標 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	1
1.1.1 研究目的 ••••••••••••••••••••••••••••••••••••	1
1.1.2 研究概要及び目標 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	2
1.2 成果概要 ·······	3
1.2.1 大型ワークの高能率・高精度加工技術の開発 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	3
1.2.1 (1) 最適砥石の選定とツルーイング・ドレッシング技術の開発 ・・・・・	3
1.2.1 (2) 加工条件の最適化 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	3
1.2.1(3)自動加工プログラムの開発 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	3
1.2.1 (4) 補正研削加工用ソフトウエアの開発・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	3
1.2.2 大型のワークを簡易で高精度に測定できる	
機上形状計測システムの開発 ・・・・・・	4
1.2.2(1)機上形状計測システムの構築 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	4
1.2.2(2) 機上形状計測システムの検証と改良 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・	4
1.3 研究体制 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	4
1.4 研究実施場所 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	5
1.5 当該プロジェクト連絡窓口 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	5
第2章 本 論	6
2.1 大型ワークの高能率・高精度加工技術の開発 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	6
2.1.1 最適砥石の選定とツルーイング・ドレッシング技術の開発 ・・・・・・・	6
2.1.1 (1) 粗・中仕上げ加工 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	6
2.1.1 (2) 仕上げ加工 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	16
2.1.2 加工条件の最適化 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	18
2.1.2 (1) 粗・中仕上げ加工 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	18
2.1.2 (2) 仕上げ加工 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	20
2.1.3 自動加工プログラムの開発 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	21
2.1.4 補正研削加工用ソフトウエアの開発 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	23
2.2 大型のワークを簡易で高精度に測定できる	
機上形状計測システムの開発 ・・・・・・	33
2.2.1 機上形状計測システムの構築 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	33
2.2.2 機上形状計測システムの検証と改良 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	53
••••••	61

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
- 1.1.1 研究目的

衛星搭載用の大型非球面ミラー(以下、ミラーという)は、ガラス製がほとん どであったが、素材の強度が弱く肉厚構造になり、結果的にミラーの重量が重く なる問題があった。そのため強度が10倍以上で、光学的特性がガラスと同等で ある反応焼結SiCセラミック(以下、高機能SiC)への代替要望が大きくなって いる。一方、ミラーは最終仕上げとして専門の業者が研磨加工を行うが、その研 磨工程に非常に時間がかかるため、研削加工の段階で高いレベルの形状精度と表 面粗さ、そして短納期が要求されている。しかし、大型のセラミックスを、市販 されている砥石で高精度・高能率に非球面形状に加工する技術は、現時点で確立 されているとはいえない。そのため、本研究では汎用の加工機で高い形状精度を 出せる加工技術を開発する。

1.1.2 研究概要及び目標

現在、要求されているミラーは 800mm の大型のものであり、凹面鏡の裏面は リブで軽量化と強度を兼ね備えた構造を持つ。ミラーは最終仕上げとして専門の 業者が研磨加工を行うが、その研磨工程に非常に時間を要している。前加工であ る研削加工の段階で高いレベルの形状精度と表面粗さ、そして短納期が要求され ている。

しかし、これまで高機能SiCを高精度に非球面加工する技術は、研究レベルで は見られるものの、実用化に至った例は世界的に見られない。

これまで、日本ファインセラミックス株式会社と川崎ダイス工業株式会社で大型の汎用研削加工機を使って大型ミラーの試作を行ってきたが、川下企業からの 要求と数値目標に達していない。研削加工における高能率・高精度加工技術 に関する課題は以下のとおりである。

- ✓加工量が大きいことにより砥石が著しく摩耗するほか、内周と外周で加 工量及び加工速度が異なるため、外周の研削点と内周の研削点で摩耗量 が異なり、形状誤差が発生する(特に仕上げ砥石では著しい)。
- ✓砥石の偏摩耗を修正するため、砥石の修正(ツルーイング・ドレッシン グ)を頻繁に行い、何度も加工を繰り返すことから加工時間が膨大とな る。

また、形状精度の向上と高能率加工を同時に実現するためには、機上での高精 度計測を基にした補正研削加工を施す必要があるが、その技術課題は以下のとお りである。

- ✓ 汎用の大型加工機での測定では、機械の動作誤差、自重によるたわみ、 機械から発生する振動などが測定誤差の原因となる。これらの誤差要因 を排除してµmオーダーの精度の形状測定を実現する必要がある。また、 この誤差を補正研削加工用のソフトウエアに反映させる必要がある。
- ✓ 補正研削には機上計測が不可欠である。そのため汎用の加工機に機上計 測装置を設置するにあたり、取り付け・取り外し及び測定機の位置決め といった段取りが短時間で行える機上形状計測システムの開発の必要が ある。
- ✓ 自動測定など高速で簡便に測定できる測定手法の開発が必要。さらにデ
 ータを解析し、結果を評価できるソフトを開発する必要がある。

上記の技術課題に対し、下記目標を達成するために、本研究では汎用の加工機 で高い形状精度を出せる加工技術を開発する。これらの技術開発には、参画企業 の持つ加工技術やセラミックスに関するノウハウのほか、宮城県産業技術総合セ ンターの持つ超精密研削加工技術や、東北大学 高教授の持つ精密計測技術シー ズを活用する。

<目標>

形状精度:10µm以下(中仕上げ加工 50µm以下) 表面粗さ Rz0.4µm以下 研削加工時間1ヶ月以内(粗・中仕上げ加工2週間、仕上げ加工2週間) 1.2 成果概要

- 1.2.1 大型ワークの高能率・高精度加工技術の開発
- 1.2.1 (1) 最適砥石の選定とツルーイング・ドレッシング技術の開発

各工程において適した砥石仕様を加工テストにより選定した。粗加工について は、粒度 230 のビトリファイドとメタルボンドの複合ボンドの砥石、中仕上げ 加工では粒度 200、結合度 P のレジンボンドの砥石を選定した。

また、中仕上げ加工用砥石の先端R形状については、現状よりもRの大きい形状を選定し、ツルーイング・ドレッシング間の研削量(砥石の持ち)が向上された。

仕上げ加工においても加工テストを実施し、加工面の表面粗さRz0.4を満たし、 砥石の持ちが良い(表面粗さの変化が少ない)砥石を選定した。また、ツルーイ ング後の形状を測定し、比較的砥石の成形精度高い形状を選定した。

1.2.1 (2) 加工条件の最適化

粗加工において、これまでミラー側の特殊形状を加工する際に、砥石とワーク の接触していない時間が長い加工方法を変更し、効率良く特殊形状を研削する加 工方法を開発した。また、中仕上げ加工においても研削時間削減の為、砥石の送 リ速度を1.5倍まで速められることを実証し、加工期間の短縮に成功した。仕上 げ加工では、形状、表面粗さ向上のため、最終仕上げ段階にて、切込量を減らし 加工した後にスパークアウトを行うこととした。

1.2.1 (3) 自動加工プログラムの開発

宮城県産業技術総合センターが作成した非球面加工用プログラム作成ソフトに より作成したプログラムとドレッシングを行うサブプログラムを組み合わせる ことで、自動加工プログラムを開発した。このプログラムにより、粗・中仕上げ 加工期間 16 日が可能となった。

テストを行いながら研究開発となったため、全体を通してのプログラム確認は、 今後の課題となる。

1.2.1 (4) 補正研削加工用ソフトウエアの開発

形状誤差を入力し、補正研削が行なえるプログラム作成ソフトを宮城県産業技 術総合センターが作成し、このソフトと東北大学の機上形状計測システムを用い て加工を行った。加工中、砥石が持たずツルーイング・ドレッシング、加工プロ グラムの修正が必要であったが、形状精度 4µm、表面粗さ Rz0.3、加工期間 16 日を達成した。 1.2.2 大型のワークを簡易で高精度に測定できる機上形状計測システムの開発

- 1.2.2 (1) 機上形状計測システムの構築 加工機のスライドと測長器を組み合わせた計測システムを構築し、測長器の取 り付け位置のアライメント、測長器の姿勢誤差、測長器の先端半径の補正、X ス ライド運動誤差の補正等を検討し、高精度オンマシン形状計測法を開発した。ま た、コンピュータによる測長器コントローラの制御で自動計測を可能にした。
- 1.2.2 (2) 機上形状計測システムの検証と改良

提案した計測方法の妥当性・有効性を確認するため、再現性を確認する実験を 行い、提案した測長器の位置誤差・姿勢誤差の補正法の有効性を確認した。また、 Xスライド運動誤差の影響を直定規にて校正を行い精密にキャンセルし、このシ ステムで得たデータをもとに補正研削加工を行い、形状誤差4µmを達成した。

1.3 研究体制



- 1.4 研究実施場所
 - 川崎ダイス工業株式会社 北上工場 (最寄り駅:東北新幹線北上駅) 〒024-0051 岩手県北上市相去町前塘 18-37

日本ファインセラミックス株式会社本社(最寄り駅:東北新幹線仙台駅) 〒981-3206 宮城県仙台市泉区明通三丁目10番

国 立 大 学 法 人 東 北 大 学 大 学 院 工 学 研 究 科 高 研 究 室 (最寄り駅:東北新幹線仙台駅)

〒980-8579 宮城県仙台市青葉区荒巻字青葉 6-6-01

1.5 当該プロジェクトの連絡窓口

株式会社インテリジェント・コスモス研究機構 産学官連携・インキュベーション事業部 統括マネージャー 猪股 則夫

〒989-3204 宮城県仙台市青葉区南吉成六丁目6番地の3

TEL 022-279-8811 FAX 022-279-8880

第2章 本論

2.1 大型ワークの高能率・高精度加工技術の開発

2.1.1 最適砥石の選定とツルーイング・ドレッシング技術の開発

2.1.1 (1) 粗・中仕上げ加工

粗加工は、横型マシニングセンタでのミラー面側特殊形状の加工となる。ここでは、高い精度は要求されないため、切削性、砥石の持ちを重視した砥石の選定 を行なった。加工機は、実際の加工で使用する横型マシニングセンター(第 2.1.1-1図)にて加工テストを行った。

砥石の決める主な要素としては、第2.1.1-1表に示す通り、砥石に含まれるダ イヤモンド砥粒の大きさを表す粒度、砥粒を保持する結合剤、砥石の形状等があ る。これらの要素により切削性、砥石の持ち等が決まるため、高機能SiCに合わ せた仕様を選定する必要がある。

また、粗加工のテスト加工には、これまでの加工実績をもとに、比較的粗い砥石に合わせた第2.1.1-2表の加工条件を選定した。

テスト加工の結果を第2.1.1-3 表に示す。評価は、切削音、切削面粗さ、砥石 の摩耗、加工後の砥石の面の状態を確認し行った。結果としては、電着系外の砥 石では、それほど優劣の差は現われなかった。粗研削で使用する砥石は、加工材 料への研削性と砥石自体の磨耗性のバランスを考慮することが一般的である。粒 度(番手)を下げると研削性は良くなるが砥石自体が磨耗し形が崩れやすくなる。 逆に粒度を上げると型崩れしにくくなるが、研削性は悪くなる。

そこで、どのようなボンド材を使用するかによって、比較的研削性が良く砥石 の磨耗が起きにくいものになるかが砥石の選定ポイントとなる。そのイメージを 示すと第 2.1.1-2 図のようになり、レジン系の結合剤と比較し、ビトリファイド とメタルの複合結合剤の方が高機能 SiC の粗加工に向いていることが分かった。

中仕上げ加工は、ロータリー研削盤でのミラー面の厚さを薄くする加工となる。 そのため、砥石の加工テストも同様にロータリー研削盤(第2.1.1-3図)にて行 なった。肉厚の薄いミラー面の加工となるため、砥石が切れなくなり、ワークに 負荷を与えることがないように、主に切削性を重視して砥石を選定した。情報収 集、砥石メーカーとの打合せにより、第2.1.1-4表に示す砥石をテストする事と した。比較的粗い砥石に合わせた加工条件(第2.1.1-5表)にて加工を実施した。

加工テストの結果を第 2.1.1-6 表に示す。持続性、加工音、外観等を評価し、 総合的に B 社の砥石を選定した。

中仕上げ加工ではロータリー研削盤を用いて、パラレル研削を行なう。パラレ

ル研削は第2.1.1-4 図に示すように、砥石とワークの接点が移動し加工を行うため、砥石を広く使用でき、高精度の加工を行なうことが可能である。この加工は、 砥石の先端に R 形状を成形するため、その形状の適正化を行なった。

非球面形状は、第 2.1.1-5 図 式(1)で示されるが、この式を微分しワーク の最大の傾きを求め、その傾きを満たす砥石の先端 R 及び幅を計算より求める。 この先端 Rを設定するにあたり、非球面形状によっては、ワークの外径側が必ず しも最大の傾きとならないこと、また砥石の先端 R だけではなく、砥石の直径の 大きさも考慮する必要がある。

これまで、先端 R40mm 幅 25mm の砥石を使用し続けていたが、先端 R60mm 幅 35mm の砥石を使用できることが求められ、この形状を採用することとした。これによ り、砥石の使用範囲が先端 R40 と比較し 1.5 倍となり、ツルーイング・ドレッシ ング間の研削量(砥石の持ち)が向上される。

パラレル研削法の加工プログラムに、砥石の先端Rの実測値を反映させる事で、 精度良く加工することが可能になる。その砥石の先端R形状は、ツルーイング・ ドレッシング後に機上で直接砥石を測定するのは困難なため、カーボン板を研削 し、その形状を測定する事で得る。手順としては、SUS ロールドレッサーによる 砥石のツルーイング・ドレッシング(第2.1.1-6図)後、第2.1.1-7 図のように ロータリードレッサーの上にカーボン板を挟むためのバイスを取り付ける。ロー タリー研削盤は、図中赤矢印の方向に砥石が動かないため、このバイスは赤矢印 の方向に移動が可能なクロスバイスとなっている。第2.1.1-8 図に形状転写後の カーボン板の写真を示す。

第 2.1.1-9 図及び第 2.1.1-10 図に先端 R60mm 狙い及び先端 R40mm 狙いでツル ーイングを行った砥石転写データの測定結果を示す。先端 R60mm 狙いでは実測し た R62.94mm に対して形状誤差 75 µ m、先端 R40mm 狙いでは R40.41mm に対して形 状誤差 28 µ m となった。

この誤差要因には、下記の原因が考えられる。

第2.1.1-11 図に示す加工砥石とドレス砥石のセンターがずれ

形状転写時の誤差(バイス設置精度、バイスのスライド精度)

加工機の精度

また、実際にワークを加工するときには、第2.1.1-12 図に示すように砥石の R の中心とワークの中心(ロータリーテーブルの中心)のずれによっても、形状誤 差が発生してしまう。

しかし、本測定方法では、測定誤差も大きいと考えられるため、対策を打って もその評価が困難であり、また、ある程度の形状誤差は補正研削で補うが可能と 考え、この条件で加工を進める事とした。しかし、測定誤差が大きくとも形状誤 差が75µmとなった先端R60の砥石では、仕上げ加工において補正研削でその誤 差を埋める事は困難と判断し、仕上げ加工用には先端R40mmを選択した。



第2.1.1-1 図 横型マシニングセンタ

\$ ∠. . - 衣 呱口で伏のる	-1 表 砥石を決める要素
---------------------	---------------

粒度(番手)	100 ~	1000 など
	レジン	
	メタル	結合度
結合剤 (ボンド剤)	ビト	・・J, L, N, P, Q・・ 集中度
	電着	(砥粒含有量)
	複合系	
π<\+	平砥石	
<i>π</i> >1Λ	R 砥石	

第2.1.1-2表 加工条件

回転数(周速度)	砥石の回転数 1300 rpm (約 1400m/min)				
切り込み量	0.01mm、0.02mm、0.03mm				
送り速度	2000mm/min				

グループ	粒度	結合度	切削音	切削 面粗	ドレッシン グ頻度	砥石 摩耗	砥石面	総合
レジン系	200	Р			2h			
レジン系	200	Ν			2h			
レジン系	200	L			2h			
ビト+メタル 系	230	Р			2h			
ビト+メタル 系	230	Ν			2h			
ビト+メタル 系	230	L			2h			
電着系	80	N			-			×

第2.1.1-3表 加工テスト結果



第2.1.1-2 図 砥石選定のイメージ・研削性と摩耗性



第2.1.1-3 図 ロータリー研削盤

第2.1.1-4表 テスト砥石仕様

メーカー	番毛	結合剤	結合度	集中度
Δ λ+	170	レジン	K	75
	200	ビトナメタル	N	75
	200		D	75
	200			10
して	170	レンン	N	100

第2.1.1-5 表 加工条件

砥石周速[m/min]	1400
切込量[mm]	0.01
砥石送り速度[mm/min]	560(中心)~320(外周)
ワーク回転数[rpm]	140(中心)~80(外周)
研削量[mm]	1
ワーク 直径[mm]	200

メーカー	粗	5	持続性	平面度	加工音	外観	ドレス・ ツルー
	Ra	Rz					イング
A 社	0.281	1.627		0.008		ツールマーク	
					×		
A 社	0.247	1.659	×	0.007	(叩き音)	(叩き模様)	
B 社	0.332	1.987		0.006			
C 社	0.388	2.221		0.006	(叩き音)	(叩き模様)	

第2.1.1-6表 加工テスト結果



第2.1.1-4 図 パラレル研削法



非球面形状 Z=(X²C)/(1+ ((1-(K+1)X²/R²))+ a_iXⁱ ・・・式(1) 第 2.1.1-5 図 非球面形状



第2.1.1-6 図 ツルーイング



第2.1.1-7図 形状転写用クロスバイス



第2.1.1-8 図 カーボン板(砥石形状転写後)







第2.1.1-11 図 加工砥石とドレス砥石のセンターのずれ



2.1.1 (2) 仕上げ加工

仕上げ加工は、粗さと形状を目標に達成させるために、ワークの表面粗さと砥石の持ちを重視し、砥石の選定を行なった。第2.1.1-7表及び第2.1.1-8表に、選定した砥石及び加工条件を示す。仕上げ加工用の砥石は、砥粒が小さく切削能力が低いため、砥石周速度と切込量を小さくして加工を行った。

第 2.1.1-9 表に加工テストの結果を示す。加工前後で、砥石表面を観察したと ころ、加工後(0.1mm 研削後)においては、砥粒が脱粒、摩耗し砥石の切削能力 が落ちているのが確認された。通常、砥石の切削能力が落ちると、ワークが研削 されず、表面のみを砥石が擦るように加工されるため、表面粗さは良くなるが、 この砥石では Rz0.45 と目標の粗さに達成する事が出来なかった。

持続性や加工音等の評価では、C 社と D 社はほぼ同じ評価となったが、第 2.1.1-13 図に示すように、ツルーイング・ドレッシング直後と 0.1mm 研削後の 表面粗さを比較したところ、D 社の砥石は C 社の砥石と比較し、粗さの変化量が 小さく、砥石の目潰れ、目こぼれ等の消耗が少ないと考えられるため、D 社の砥 石を採用した。

メーカー 番手 結合剤 結合度 集中度 A 社 1000 レジン Q 75 C 社 1000 レジン R 100 D社 1000 レジン Ν 75 B 社 1000 レジン Ν 75

第2.1.1-7表 テスト砥石仕様

第2.1.1-8表 加工条件

砥石周速[m/min]	850
切込量[mm]	0.001
砥石送り速度[mm/min]	400(中心)~200(外周)
ワーク回転数[rpm]	100(中心)~50(外周)
研削量[mm]	0.1
ワーク直径[mm]	200

	粗	さ					ドレス・
メーカー	Ra	Rz	持続性	平面度	加工音	外観	ツルーイ ング
A 社	0.061	0.551		0.003		面が粗い	
C 社	0.031	0.272		0.006			
D 社	0.029	0.261		0.010			
B 社	0.028	0.250		0.016			

第2.1.1-9表 加工テスト結果



第2.1.1-13図 表面粗さ変化

2.1.2 (1) 粗・中仕上げ加工

焼成後のワークは、焼成時の変形を最小限にするため、ミラー面に特殊構造を 施している。今回の粗加工における工法開発は、この特殊構造の部分だけを効率 よく研削することにあった。

従来、粗加工は中仕上げ、仕上げ加工で用いられる装置と同じロータリー研削 盤で行っていた。特殊構造であるためエアーカットの体積が70%程度あり、この ロータリー研削盤では、この部分が非効率となり、結果として加工時間の長大と なっていた。

これを解決させるために、今開発では、横型マシニング装置を利用してこの特 殊構造の形状に沿って加工する手段をとった。

また、テーブルを回転させながら研削できるロータリーミーリング装置を横型 マシニングに追加し、最終的なミラー形状に近づくような粗加工の仕上げとした。 一般的なロータリー研削盤は回転方向に対して平行なパラレル研削を行うが、こ の横型マシニング装置を使うことで、ロータリー研削盤では不可能な、回転方向 に対して垂直方向に砥石を回転させる、第 2.1.2-1 図に示すようなクロス研削の テストも行った。



第2.1.2-1 図 クロス研削

また、中仕上げ・仕上げでは精度重視のため砥石の面がR形状の砥石(R砥石) を使用するが、砥石のR形状を保持(ツルーイング)しながらドレッシングを行 うといった複雑な工程が必要となる。一方、粗加工では如何にしてよく研削する かを重視するためドレッシングが簡単に行える平面砥石(平砥石)を使用すること とした。

第2.1.2-2 図は左側が平砥石で右側がR砥石である。



第2.1.2-2図 平砥石とR砥石

中仕上げ加工において、砥石の周速等の加工条件は、砥石テストにて選定したた め、加工時間の短縮を目指しテストを行った。パラレル研削法では、砥石とワーク との接触点が小さいため、砥石の送り速度の限界は、ロータリーテーブルの回転数 に制限される。しかし、本研究の加工対象である大型、薄肉構造のワークを高速で 回転させることは、ワーク破損の原因となるため、テーブル回転数は25rpmとした。 そこで、砥石の移動速度を従来の外周側5mm/min 中心側15mm/min から外周側 8mm/min 中心側22mm/minとし、これまでの1.5倍に上げ加工テストを実施した。 中仕上げ加工及び仕上げ加工に使用した岡本工作機械製作所製ロータリー研削盤 (PRG12DXNC)を第2.1.2-3図に示す。結果第2.1.2-4図に示す通り、ワーク表面に 凹凸は確認されず、また計算上でも1.5µm程度の段差となるため、中仕上げ加工 には問題が無い事が確認された。ここで、砥石の外径側の研削点は、内径側の研削 点と比較し研削量が多いため砥石の送り速度が遅くなっている。



第2.1.2-3 図 ロータリー研削盤



第2.1.2-4 図 砥石移動速度変更後ワーク表面

2.1.2 (2) 仕上げ加工

仕上げ加工においても、中仕上げ加工と同様に、砥石選定時に選定した加工条件を適用した。但し、加工後に 1.5µm の段差が発生すると、最終形状に影響を与えるため、これまでと同じ砥石送り速度を用いた。また、最終形状、表面粗さを向上させるために、加工の最終段階で、切込量を通常の 1µm から 0.5µm に減らした 2回行い、最後にスパークアウト (切込 0µm) にて加工を実施することと

した。

2.1.3 自動加工プログラムの開発

粗加工において、無人での昼夜連続運転を可能にするため、自動加工プログラ ムの開発を行った。第2.1.3-1 図に、宮城県産業技術総合センターが作成した横 型マシニングセンタ用NCプログラム作成ソフトを示す。このソフトは砥石の径 や研削方法、非球面定数などを入力して、非球面データを出力する。そして、粗 加工プログラム、ドレッシングプログラムをサブプログラムとして呼び出す方法 で、自動加工プログラムを作成した。

また、中仕上げ加工においても、粗加工と同様に自動加工プログラムの開発を 行った。始めに、開発したツルーイング・ドレッシング条件にて、ツルーイング・ ドレッシング前後の砥石の直径を測定し、その減少量を把握した(第2.1.3-1表)。 そして、その減少量を、加工からツルーイング・ドレッシング、ツルーイング・ ドレッシングから加工に移行するときのZ座標に反映させて、自動加工プログラ ムを作成した。

a Form1	
 ●軸対称非球面加工用NCプログラム作 本ソフトは被削将中心をX=0、Y=0、Z=0とした場合 1.指定された量の切込(0Pスキッブ可) 4. 2.X=0、Y=指定した退避高さ、Z=0に移動。 5. 3.クロスの場合:2の開始位置へ移動。 パラレルの場合:2の開始位置へ移動。 パラレルの場合:2の開始位置へ移動。 ボラレルの場合:20開始位置へ移動。 第 ● <li< th=""><th>成ノフト 東芝桃林轉製マシニングセンタ BTD-2000H用 HC、砥石が以下の動作を行うためのNCデータを作成する。 算出された点群座標のとおりに加工終了位置まで加工。 2=指定した退盤高さに移動。 X=0、Z=0へ移動。 JH較対称球面形状の設計値入力 $Y(r) = \frac{C \cdot r^2}{1 + \sqrt{1 - (k + 1) \cdot C^2 \cdot r^2}} + \sum_{i=1}^{x} a_i \cdot r^i$ 半径 R=1/C DICOO CI:COO 16523 円錘係数 K -099225 JH球面係数 a1 0 月球面係数 a2 0 JH球面係数 a3 0 月球面係数 a4 0 JH球面係数 a5 0 月球面係数 a4 0 JH球面係数 a7 0 月球面係数 a8 0 JH球面係数 a7 0 月球面係数 a8 0 JH球面係数 a9 0 月球面係数 a10 0</th></li<>	成ノフト 東芝桃林轉製マシニングセンタ BTD-2000H用 HC、砥石が以下の動作を行うためのNCデータを作成する。 算出された点群座標のとおりに加工終了位置まで加工。 2=指定した退盤高さに移動。 X=0、Z=0へ移動。 JH較対称球面形状の設計値入力 $Y(r) = \frac{C \cdot r^2}{1 + \sqrt{1 - (k + 1) \cdot C^2 \cdot r^2}} + \sum_{i=1}^{x} a_i \cdot r^i$ 半径 R=1/C DICOO CI:COO 16523 円錘係数 K -099225 JH球面係数 a1 0 月球面係数 a2 0 JH球面係数 a3 0 月球面係数 a4 0 JH球面係数 a5 0 月球面係数 a4 0 JH球面係数 a7 0 月球面係数 a8 0 JH球面係数 a7 0 月球面係数 a8 0 JH球面係数 a9 0 月球面係数 a10 0
Z分割徴(偶数入力) ZD 0 加工方向の選択 ・ ・ ブラス方向から C 切込量、砥石送り速度、退避量の設定 切込量 Ye×01[µm] 100 砥石送り速度 ・ ・ 等速度の場合 C ー 次速の場合 2000 変速の場合 2000 で 半径により速度変化 ・ 半径により速度変化 外周位置での速度 0 中心位置での速度 0 中心位置での速度 0	第二人間指数 813 回 第二人間指数 814 回 補正加工条件の設定 () 補正係数 52 () 補正係数 51 $Yref(r) = -\sum_{j=1}^{n} b_j : r^j$ () 補正係数 51 () 補正係数 52 () 補正係数 53 () 補正係数 52 () 補正係数 53 () 補正係数 52 () 補正係数 53 () () 補正係数 52 補正係数 53 () () 補正係数 54 () () () () 補正係数 55 () () () 補正係数 57 () () () 補正係数 50 () () () 補正係数 51 () () () 補正係数 513 () () () NC点群計算 END ()
迟避量 Yt[mm] 50	宮城県産業技術総合センター作成

第2.1.3-1図 マシニングセンタ用軸対称 非球面加工用NCプログラム作成ソフト

第2.1.3-1 表 ツルーイング・ドレッシング条件と砥石直径減少量

加工砥石先端 R[mm]	60
加工砥石幅[mm]	35
加工砥石周速[m/min]	630
ドレス砥石幅[mm]	40(先端 R68.57mm)
ドレス砥石周速[m/min]	300
砥石送り速度[mm/min]	100
切込量[mm]	0.003
研削量[mm]	0.15
砥石直径減少量[mm]	0.1

2.1.4 補正研削加工用ソフトウエアの開発

ロータリー研削盤用に合わせ、軸対称非球面加工用 NC プログラム作成ソフト を宮城県産業技術総合センターが作成した。第2.1.4-1 図に条件設定画面を示す。 このプログラム作成ソフトは、形状誤差を多項式で近似し、その係数を入力する 事で補正研削が可能になっている。

始めに、粗加工用砥石を用いて、加工条件と補正研削プログラムの確認を行った。測定は、東北大学による機上形状計測システムを用いた。

選定した砥石(先端 R60mm)にて、ワークの全面を一当てまで加工したときの 形状誤差を第 2.1.4-2 図に示す。この図は横軸に半径[mm]、縦軸に形状誤差[µ m]となっている。この段階での形状誤差は約 90 µ m となった。

この形状誤差を 10 次の多項式で近似し、その式の係数を NC プログラム作成 ソフトに入力し、補正加工用プログラムを作成した。そのプログラムを使用し、 ワーク全面を一当てまで加工すると第 2.1.4-3 図に示すように形状誤差が 20µm 以下となり、中仕上げ加工の形状誤差の目標に達した。さらに、この形状誤算を もとに補正研削を行なうと第 2.1.4-4 図に示す通り形状誤差が 10µm 以下となり、 中仕上げ加工用の砥石ではあるが、加工条件、補正研削プログラムに問題が無い 事が確認された。

補正研削の工程を第2.1.4-5 図に示す。補正研削は砥石交換後、ツルーイング・ ドレッシングを行い、ワーク全面を一当てした後に形状測定を行い、補正研削を 実施する。ワーク全面を一当てし、摩耗により変化した砥石形状を考慮した補正 加工プログラムとなるため、測定の後にはツルーイング・ドレッシングを行なわ ない。

しかし、仕上げ加工用砥石に交換後、加工を実施したところ、ワーク全面一当 てまで砥石が持たず、ツルーイング・ドレッシングが必要となった。加工中、研 削量が 15µm 程度から第 2.1.4-6 図に示すように、ワーク表面に光沢が発生し、 砥石の研削能力が無くなっているのが確認された。

その後、ツルーイング・ドレッシングを繰り返し、ワーク全面研削した時の形 状誤差を第2.1.4-7図に示す。形状誤差は45µmとなり、補正研削では、修整で きない誤差が残った。そこで、ツルーイングの成形精度(繰り返し精度)による 砥石形状のバラツキの影響は残ってしまうが、この形状誤差を使用して補正研削 プログラムを作成し、加工とツルーイング・ドレッシングを繰り返し、加工を進 めた。

その後、ツルーイング・ドレッシングを6回、計53µm研削した時の形状誤差 を第2.1.4-8図に示す。内径側の勾配が急な領域は、まだ研削されていない範囲 であり、研削された範囲でも形状誤差が16µmと補正研削では補えない形状誤差 となっていた。そのため、研削された範囲の形状誤差だけを使用し、補正加工プ ログラムを作成し、加工を進めた。また、研削量はツルーイング・ドレッシング 後に砥石とワークの一部が当り始めた位置からカウントしているが、もとの形状 誤差 45 µ m以上研削しても、ワークに全面に砥石が当っていないことから、ツル ーイング・ドレッシング間の研削量が 10 µm 程度でも、砥石が持たずに狙い値ま で研削されていないことがわかる。

ッルーイング・ドレッシングを8回繰り返し、82µm研削した時の形状誤差を 第2.1.4-9図に示す。この段階で、形状誤差7µm、表面粗さRz0.30と仕上げ加 工での目標を達成した。しかし、さらに形状を上げるために、補正研削を試みた。

その後、ツルーイング・ドレッシング後に、研削量 3µm で、ワーク全面に砥 石が当った。このことから、ツルーイング・ドレッシング条件が一定であれば、 砥石の先端形状は毎回ほぼ同じ形状に仕上がることが判明した。そして、この段 階で測定した第 2.1.4-10 図に示す形状誤差をもとに補正研削プログラムを作成 し、ツルーイング・ドレッシングは行なわず補正研削を実施した。

補正研削後の形状誤差を第 2.1.4-11 図に示す。結果、補正研削を行なうこと により形状誤差が 2 µ m まで小さくなった。

本研究開発では、仕上げ加工用砥石に変更後、プログラムを修正しないと形状 が出せなかったため、第 2.1.4-12 図に示すように、プログラムの修正を行ない ながら形状を少しずつ上げたため、通常の補正研削より工程、総研削量、加工時 間が多くなってしまった。

第 2.1.4-13 図に、測定位置を 45°ピッチで変更し、形状を測定した時の結果 を示す。図からわかるようにワーク全体でも形状誤差は 4 µm を達成した。

第2.1.4-14 図及び第2.1.4-15 図に、表面粗さ測定の写真及び各位置での表面 粗さ測定結果を示す。ワークのどの位置においても表面粗さ目標 Rz0.4 を達成した。

第2.1.4-16 図に本研究開発で加工を行った 800 mm ミラーの写真を示す。

本研究開発により、砥石変更後に、プログラムの修正を行なわないと高い形状 精度が得られない事が判明した。この問題を解決するためには、下記課題につい て検討を進める必要がある。

・正確な砥石形状データの測定、形状誤差要因の解析

・砥石交換時の砥石座標原点の精度向上

(ワーク座標、ドレッサー座標について)

これらの課題の解決により、中仕上げ加工での補正研削を行なう必要が無くなり、また仕上げ加工においても加工途中のプログラムの修正が無くなり、加工期 間の短縮が可能となる。

軸対称非球面加工用NCプログラム作成: (パラレル研削法)	ノフト Ver.6期回本機械製作所製 ロータリー研削 盤 _{**} PRG12DXNCZ			
本ソフトは被削材中心をX=0、Z=0とした場合に、砥石が以下の動作を行うためのNCデータを作成				
+ 7 1 ¥− 0 7−北空1.た混避室さに銘飾 その2巻 ¥の閉始位要へ移動				
2. 算出されたX 7の点群座檀のとおりにXの加工終了位層まで加工。				
2. 第四といれてものによりによりによりにほどの加工によりにほどで加工。 3. X= 0. Z=指定した決選高さに移動。				
4.指定された量の切込(OPスキッブ可)				
研工刊社				
砥石先端半径 R2[mm] 40	STATE CONTRACTOR			
	砥石送り速度 F [
軸対称非球面形状の設計値入力	****(○ 等速度の場合 20			
$Z(x) = \frac{C \cdot x^2}{1 + \sum_{i=1}^{N} a_{ii} \cdot x^i}$	 変速の場合 〇 一次関数的に速度変化 			
$1 + \sqrt{1 - (k+1) \cdot C^2 \cdot x^2} + \sum_{i=1}^{2} G_i \cdot x^i$	 〇 半径値で速度変化 			
半沒 [[==] (曲束(-1/2) [中央部(最高速度) ¥1 50			
	外周部(最低速度)₩2 20			
非球面係数a1 0 非球面係数a2 0				
非球面係数a3 0 非球面係数a4 0	補正加工条件の設定			
非球面係数a5 0 非球面係数a6 0	C 補正なし Zref(x) = $-\sum_{i=1}^{n} h_{i} x^{i}$			
非球面係数a7 0 非球面係数a8 0	(補正あり 210)な			
非球面係数a90 非球面係数a100				
非球面係数al10 非球面係数al2 0				
非球面係数al30 非球面係数al4 0	111 (広教)03 (0) 111 (広教)04 (0) 補正(伝教)5 (0) 補正(伝教)5 (0)			
	補正係数63 0 補正係数68 0			
─加工範囲の設定	補正係数b9 0 補正係数b100			
Xの開始位置(最大直径値) R00	補正係数b11 0 補正係数b12 0			
Xの終了位置(最小直径値) XE[mm] 100 補正係数b130 補正係数b140				
Xの分割数 XM (偶数入力) 7000				
Zの退避高さ Zt [mm] 50				
,	NC点群計算 END			
	宮城県産業技術総合センター作成			

第2.1.4-1 図 軸対称非球面加工用 NC プログラム作成ソフト







第2.1.4-4 図 中仕上げ用砥石 補正研削(2回目)形状誤差



第2.1.4-5 図 補正研削工程



第2.1.4-6 図 加工中ワーク表面















第2.1.4-13図 形状誤差(45°ピッチ測定結果)



第2.1.4-14 図 表面粗さ測定



第2.1.4-15 図 各位置における表面粗さ Rz



第2.1.4-16図 800 mm SiC 製ミラー

2.2 大型のワークを簡易で高精度に測定できる機上形状計測システムの開発

衛星搭載用大型ミラーの高精度オンマシン形状計測において、本システムの 開発内容は以下の通りである。

(1)加工機への脱着が容易に行え、かつ高精度な計測システムの構築を行う。

(2)高い再現性を得るために、測長器の取り付け誤差を高精度に補正する技術を開発する。

(3) 作業者への負担やヒューマンエラー、および偶然誤差を減らすために、測長器 によって測定された値を PC へ自動で高速に取り込めるようにする。

(4)加工現場では時間の経過とともに温度が変動しているため、長い計測時間は大きなセンサドリフトを発生させ、計測精度を悪化させる。ドリフトによる影響を抑えるべく、本システムでは自動制御とタイミングの調整による計測の高速化を図る。

(5)X スライドの運動誤差や重力による撓みをキャンセルする機能を搭載する。

- 2.2.1 機上形状計測システムの構築
 - (1)計測方法

オンマシン計測の方法として、第2.2.1-1 図のような手法が考えられる。この 方法は加工機のZスライドを利用し、スライド先端に装着されたタッチセンサを 上下させ、接触を始める瞬間の機械座標値から計測対象のZ方向高さを計るもの である。X軸に加工機を動かしながら、あらゆるX座標値に対して計測を行うこ とで、対象の断面形状を計測できる。しかし、第2.2.1-1 図に示すように、この 方法では計測のために加工機のZ軸を動かしているので、Z軸片持ち構造に起因 する測定誤差が大きい。また、加工機X軸誤差の影響が不明である。

本システムではこのような課題を解決するため、加工機のスライドと測長器を 組み合わせた計測システムを構築し、高精度オンマシン形状計測法の開発を図る。 また、直定規を用いて加工機のX軸誤差の影響を明確にし、補正を行う。測長器 とは、先端にボールがついたプランジャと呼ばれる鉄心を伸縮させ、先端が試料 に押し当たるまでのプランジャの伸び量から試料表面の高度を測定する計測機器 を指す。プランジャの伸び量はリニアエンコーダによってモニタリングされてお り、sub-µmの測定分解能と数+mmの測定レンジを持っていることが特徴である。 すなわち、タッチセンサとZスライドを測長器ひとつで代用することができる。 加工機のZスライドを用いない計測方法により、Zスライド運動誤差の影響を排 除し、かつ高分解能の計測ができる。



第2.2.1-1 図 オンマシン計測システム

(2)オンマシン計測

補正加工を目的とした形状計測が本システムの用途であるため、計測と加工を 交互に繰り返し行うことを想定している。ただし、このとき測長器を装着したま ま補正加工を行うと、加工物との物理的な衝突や、切削油による浸食などで測長 器が故障してしまう。そのため、計測の前後に測長器の脱着を余儀なくされる。 しかし、測長器を脱着すると必然的に取り付け誤差が生じるため、一貫した計測 を行うためには取り付け誤差を高精度で補正することが不可欠である。その上、 補正加工を繰り返し行うプロセスを考慮すると、計測、特にその準備に割く時間 は極力短いことが望ましい。そこで、以下の補正方法を開発し、短時間での作業 による高い再現性の実現を図る。

「測長器の取り付け位置のアライメント

計測結果を補正加工に用いるためには、計測座標を加工座標と厳密に対応付け る必要がある。今回ターゲットとしている工作機械においては、製品はスピンド ルに固定されており、スピンドルの回転軸に関して軸対象形状に仕上がっている。 オンマシン計測の前後では製品の付け外しを行わないため、仕上がり形状の対称 軸は計測の最中もスピンドルの回転中心に位置することになる。そこで今回は、 X-Y 軸に関してスピンドルの回転中心を計測原点と定めた。つまり、計測を行う 準備として、測長器の測定点がスピンドルの回転中心と一致するようにアライメ ントを施した後、そこを原点とした相対的な座標を用いて断面形状の計測を行う。 本報ではこのアライメント作業を原点出しと呼ぶ。一方で製品の厚みに対する要 求精度は高くないため、Z 方向の取り付け位置誤差はオフセットと考えて原点出 しは行わない。

目標となる原点出し精度を設定するため、原点出しの誤差が及ぼす計測結果への影響についてシミュレーションを行った。第2.2.1-2 図にシミュレーション結果を示す。シミュレーションにはR 2000の球面を用いた。シミュレーション結果から、計測精度1 µm を達成するためには5 µm の原点出し精度を目標に設定する必要があることが分かる。





第2.2.1-2図 原点出しの誤差が及ぼす計測結果への影響

開発した原点出し手法の基本原理を以下に述べる。

スピンドルの中央に任意の斜面を置き、スライドに装着された測長器を斜面の 上空へ移動し、プランジャを斜面に接触させ、そのポイントでの高度を測定する。 その後、スピンドルを180度反転させ、同様に高度を測定する。仮に測長器がス ピンドルの回転中心に位置していれば反転の前後で測定値は変化しないが、原点 出し誤差が残っている場合、その残差に比例した高低差が確認される(第2.2.1-3 図)。この高低差が無くなるようにアライメントを行うことで測長器の取り付け位 置誤差が低減され、X、Y軸のそれぞれに関してアライメントを行うことで原点出 しが達成される。

ただし、フラットな斜面を用いる場合、先端球ではなく、その留め金と斜面が 干渉しやすく、留め金の対称軸がスピンドルの回転中心にアライメントされる恐 れがある。この問題を回避するために、留め金と干渉しにくい小球を勾配に代用 する(第2.2.1-4図)。



第2.2.1-3図 原点出しの基本原理



第2.2.1-4 図 留め金と平面勾配の干渉

測長器の姿勢誤差の補正

i 測長器の姿勢誤差

測長器を加工機に取り付ける際の誤差として、前節で述べた位置誤差の他に、 姿勢誤差がある。ここで言う姿勢誤差とは、測長器の軸と加工機のZ軸とのずれ のことを言う。測長器の軸と加工機のZ軸が一致している場合、ミラーの計測点 は全て同じ XZ 平面上に存在する。しかし、姿勢誤差がある場合。計測点は同じ XZ平面上に存在せず、実際の計測点は理想的な計測点とは異なる(第2.2.1-5図)。 そのため、計測結果には姿勢誤差による誤差が含まれる。この誤差をなくすには、 測長器の軸と加工機のΖ軸は一致させる必要があるが、実際には非常に困難であ る。測長器の姿勢調節の方法としては、測長器とそれを固定するジグの間にシム テープを挟むといった方法や、姿勢調節用のステージを測長器と加工機の間に設 置するといった方法が考えられる。しかし、前者の方法では調節のたびにテープ の厚みを変える必要があり、姿勢調節には手間と時間がかかる。また、後者の方 法では、姿勢調節ステージの設置により、測長器の安定性が悪化することが予想 され、測長器の性能を十分に発揮できない恐れがある。したがって、本研究では、 測長器の姿勢を調節するのではなく、姿勢誤差を接触式変位センサを用いて計測 し、その結果を基に、実際の計測点Pの座標を推定することで、ミラー計測結果 を補正することを試みる。



第2.2.1-5 図 測長器に姿勢誤差がある場合の計測点列の変化

ii 姿勢誤差の計測

姿勢誤差の補正を行うためには、加工機のZ軸と測長器の軸のなす角を測る必要がある。そこで、補助センサとして接触式変位計を利用し、測長器の姿勢誤差を高精度に測定する方法を考案した(第2.2.1-6図)。測長器のプランジャを伸ばした状態で、その側面に接触式変位計を当てる。この状態でZスライドを上下させると接触式変位計の出力はプランジャの傾きに応じて変化する。その変位量 dxと、Zスライドの操作量 dz に関して逆正接をとると、姿勢誤差を計算することができる。



第2.2.1-6 図 傾き誤差測定の基本原理

しかし、測長器のプランジャは形状を持っており、その一次成分も測長器の軸 と平行であるとは限らない(第2.2.1-7図)。そこで測長器のプランジャの形状に よらない高精度な姿勢誤差測定を行う方法を開発した。



第2.2.1-7 図 プランジャ側面の形状

(3) 測長器の先端半径の補正

本研究で使用した測長器は、その先端形状が球となっている。そのため、ミラ ー形状計測時の先端球の軌跡はミラー形状から先端球半径だけシフトしたものと なる(第2.2.1-8図)。測長器で計測される形状はこの軌跡であるから、計測結果 に先端球半径を考慮した補正をかける必要がある。今回は、先端球とミラーの接 触点の座標を幾何学的に求め補正を行った。



第2.2.1-8 図 先端球の軌跡とミラーの関係

(4)X スライド運動誤差の補正

本計測システムでは、測長器を用いることでZスライドの運動誤差が無視でき るが、Xスライド運動誤差の影響をうけてしまう。そこで、Xスライドの運動誤差 を予め計測し、計測結果に補正をかけることでXスライド運動誤差の影響をキャ ンセルする。

X スライド運動誤差を調べるために、開発されたオンマシン計測システムを用 いて直定規の機上形状計測を行った(第2.2.1-9図)。直定規の機上形状計測結果 を第2.2.1-10図に示す。目標精度と同等の真直度誤差が確認されたため、これを 用いて計測結果に補正をかけ、X スライドの運動誤差をキャンセルする。



第2.2.1-9図 X スライド運動誤差測定システム



第2.2.1-10図 Xスライド運動誤差

(5)計測システム

実験装置の概要

第2.2.1-11 図に実験装置の概略図を示す。スピンドルの上に加工された衛星搭 載用ミラーを置き、その形状をスライドに装着された測長器を利用して計測する。 X スライドをサンプリング間隔分移動させてから測長器を Z 方向に伸ばすことよ り、衛星搭載用ミラーの断面形状の測定を行う。X スライドは加工機の制御で駆 動し、測長器の信号はカウンターボードを通して DIO ボードによりサンプリング され、コンピュータに取り込まれる。



第2.2.1-11 図 実験装置の概略図

測長器

第2.2.1-12 図に今回利用した測長器を示す。プランジャを用いた長測定範囲を 持ちながら、試料に一定圧力で接触する。また、リニアな出力特性を特徴とする ため、高精度計測に適している。第2.2.1-1表に仕様を示す。



第2.2.1-1表 測長器の仕様

Plunger actuation	By motor	
System accuracy	± 0.5 μm	
Measurement range	60 mm	
Radial force	≤ 0.5 N	
Weight 700 g		
Measuring velocity ≤ 18 m/min		
Operating temperature	10 to 40° C	
Size	160 × 38 × 34 mm	

計測システムの自動化

センサのドリフトによる誤差および手操作によるエラーなどを防ぐため、制御 プログラムの作成やタイミングの調整による計測の自動化・高速化を図る。第 2.2.1-13 図に加工機と測長器のタイミングチャートを示す。図に示されているように加工機と測長器を並列で動作させ、自動化を図った。加工機は NC 装置制御で、 測長器はコンピュータでコントロールを行った。



第2.2.1-13図 加工機と測長器のタイミングチャート

加工機

第2.2.1-14 図に CNC ロータリー平面研削盤(PRG-12DXNC)の外形図を示す。また、第2.2.1-2 表と第2.2.1-3 表、第2.2.1-4 表にはロータリーテーブルの仕様と機械本体仕様、NC 装置仕様を示す。



第2.2.1-14 図 外形図·加工範囲図

第2.2.1-2表 ロータリーテーブルの仕様

回転数	8~56 min ⁻¹	
減速比	1 : 42	
モーター出力	7.5 kW 4 P	
潤滑方式	油静圧	
傾斜角	角 ±0.4°	
許容積載質量	1300 kg (チャック重量含まず)	
伝達ベルト	5 V 1800 4 本マッチ (バンドー化学)	

第2.2.1-3 表 機械本体仕様

仕樣項目			值
容量	電磁チャックの外形		ϕ 1200 mm
	電磁チャックの有効系		ϕ 1130 mm
	カバー内の最大振り		ϕ 1600 mm
	チャック上面から∲305 といし下 面までの距離		597.5 mm
	チャックの傾斜角		±0.4 °
	工作物許容積載量		1200 kg
テーブル	テーブル回転数(周速一定制御)		8~65 min ⁻¹
コラム前後送り	駆動装置		AC サーボモータ(CNC)
	前後移動量		860 mm
	自動運転中の 送り速度	設定範囲	0~2000 mm/min
		オーバーライ ド	0~150% (最大 2000 mm/min)
		早送り	5000 mm/min
	手動送り	ハンドル1回転 の送り量(100 目盛)	0.01 mm(×1)
			0.1 mm(×10)
			1 mm(×100)
		ハンドル1目盛 の送り量	0.0001 mm(×1)
			0.001 mm(×10)
			0.01 mm(×100)
		ジョグ送り	0~2000 mm/min
		早送り	5000 mm/min

仕様項目	内容		
形式	FANUC 31iA		
制御軸数	上下(Z) 前後(X)		
同時制御軸数	2軸		
最小設定単位	0.0001 mm		
補完機能	位置決め、直線補完、円弧補完		
最大指令値	±9999.9999(8桁)		
位置検出	パルスコーダ		
表示	7.2 インチモノクロ LCD		
データ入力方式	キー入力方式		
指令方法	アブソリュート / インクリメンタル併用指令		
準備機能	G2 桁		
補助機能	M3 桁		
送り速度指令	F4 桁 mm/min		
テーブル回転指令	S3 桁		
テープ記憶帳	5120 m (2MB)		
登録プログラム個数	63 個		
各種機能	 ・毎分送り ・マニュアルアブソリュートオン/オフ ・ドウェル ・サブプログラム 10 重呼び出し ・少数点以下/電卓型小数点入力 ・工具径オフセット ・ラベルスキップ ・ヘルプ機能 ・コントロールイン・アルト ・記憶型ピッチ誤差検出 ・オプショナルブロックスキップ ・バックグラウンド編集 ・自己診断機能 ・ストアードストロークリミット ・オーバトラベル ・入出力インタフェース RS232C ・バックラッシュ ・グラフィック表紙 		

衛星搭載用ミラーの高精度オンマシン形状計測システム

第2.2.1-15 図に計測システムの様子を示す。ロータリーテーブルの上にある平 面研削盤により加工された衛星搭載用ミラーをオンマシンで高精度に計測するた め、測長器を加工機に取り付ける。コンピュータによる測長器コントローラの制 御で自動計測を行う。



第2.2.1-15 図 衛星搭載用ミラーの高精度オンマシン形状計測システム

衛星搭載用ミラー

第2.2.1-16 図に衛星搭載用ミラーの概略図を示す。衛星搭載用ミラーは、直径 800 mm で曲率約2000mm を持つ。125 mm までは中空であり、材質はセラミックス (炭化ケイ素)である。



第2.2.1-16 図 衛星搭載用ミラーの概略図

ジグの構成

第2.2.1-17 図にオンマシン計測を行うため、測長器を機上に取り付けるジグを 示す。機上での安定性を確保するため、アルミ板を介して締結を行う。また、加 工機と測長器の間を絶縁するため、アクリル板を挿んだ構造をとらせる。



第2.2.1-17 図 測長器のジグの構成

計測システムの安定性

第2.2.1-18 図にシステムの安定性を示す。気温の変化と測長器の出力変化を同時に示している。スライドを止めたまま、計測対象上の或る定点の高度を測定し続けることにより安定性を調べた。測定時間は12分である。なお、ミラーの形状計測に必要な時間は約400秒である。測長器の安定性は約0.1 の気温の変化があったとき、0.7 µm 程度であることが確認できる。安定性測定結果から、400秒で形状計測を行う場合には、精度1µm を達成するために十分な安定性を持っているといえる。





(6) 衛星搭載用ミラーのオンマシン形状計測

高精度衛星搭載用ミラーの開発を実現させるため、計測結果に基づく補正加工 を行い、ミラーの形状を再評価する。第2.2.1-19図にオンマシン形状測定補正加 工の手順を示す。



第2.2.1-19図 オンマシン形状測定補正加工の手順

第2.2.1-20 図に、本計測システムによって評価された、補正加工を行う前の衛 星搭載用ミラーの形状誤差と、その計測の繰り返し性を示す。形状誤差は測定値 から設計値を差し引いたものである。計測結果は測長器の位置誤差および姿勢誤 差、また測長器の先端球径による誤差を提案した方法で補正されたものである。 このとき、測長器の原点出しの精度は X 方向に約 0.6 µm、Y 方向の約-0.8 µm で ある。また、原点出しの繰り返し性は X 方向に約 0.1 µm、Y 方向の約-0.9 µm で あったため、目標の 5 µm より一桁高い sub-µm の原点出し精度となり、今回の計 測には十分な精度である。計測結果から、約 90 µm の形状誤差が確認され、繰り 返し性は 1 µm 程度であった。



第2.2.1-20図 衛星搭載用ミラーの形状誤差計測結果

2.2.2 機上形状計測システムの検証と改良

(1)計測の再現性検証

提案した計測方法の妥当性・有効性を確認するため、再現性を確認する実験を 行った。計測を終えた後、測長器を取り外し再度取り付けることより測長器の原 点位置、姿勢を意図的に変化させた。それぞれ異なる測長器の取り付け条件にお いて同一の対象を計測し、結果の比較を行った。第2.2.2-1 図に再現性確認実験 の様子を示す。



第 2.2.2-2 図に姿勢誤差を補正しない場合の再現性確認実験結果を示す。付け
 直し前・後の姿勢誤差はそれぞれ、 x = 0.00363 rad、 y = 0.0195 rad と
 x = -0.00204 rad、 y = 0.0168 rad であった。実験結果から、補正を行わな
 い場合は十分な再現性が得られていないことが確認される。



(b)付け直し後 第2.2.2-2図 再現性確認実験結果(測長器取り付け誤差補正前)

第2.2.2-3 図に測長器の位置誤差・姿勢誤差の補正後の再現性確認実験結果を示す。高周波成分を除くと再現性は1.5 µm 程度であるため、提案した測長器の位置誤差・姿勢誤差の補正法の有効性を確認した。



(b)付け直し後 第 2.2.2-3 図 再現性確認実験結果(測長器取り付け誤差補正後)

(2) 直定規形状の校正

今研究では直定規を使用しXスライド運動誤差の分離を行っているが、より高 精度な計測を行うためには直定規の形状誤差による影響を考慮しなければならな い。第2.2.2-4 図に直定規の異なる面によるXスライド運動誤差の計測結果を示 している。異なる面により評価されたスライド運動誤差には1 µm 程度の差が確認 され、これは基準直定規の精度と同レベルである。そこで、直定規の形状校正を 行い、Xスライド運動誤差の計測結果を補正し、より正確なものにする。第2.2.2-5 図に反転法によって計測された直定規の形状誤差を示す。この形状誤差は実際に Xスライド運動誤差計測に用いる面の結果である。さらに、直定規の形状誤差計 測結果を利用して補正をかけたXスライドの運動誤差を第2.2.2-6 図に示す。目 標精度と同等の真直度誤差が確認されたため、この結果を用いてミラーの形状計 測結果に補正をかけ、Xスライドの運動誤差の影響をより精密にキャンセルする。



第2.2.2-4 図 異なる面によるスライド運動誤差測定結果



第2.2.2-5 図 直定規の形状誤差



第2.2.2-6図 形状誤差が分離されたXスライドの運動誤差

(3)衛星搭載用大型ミラーのオンマシン形状計測と補正加工実験

粗加工用の砥石を用いた計測及び補正研削

第 2.2.1-24 図の計測結果を基に補正研削を行ったミラーの形状誤差計測結果 を第 2.2.2-7 図に示す。形状誤差が 15 µm に減少したことを確認できる。残差は、 補正加工を行うときの、砥石の摩耗による影響であると考えられる。



(b) 繰り返し性 第 2.2.2-7 図 補正加工 1 回目の形状誤差計測結果(粗加工用の砥石)

第2.2.2-8 図に補正加工後(2回目)の衛星搭載用ミラーの形状誤差計測結果 を示す。形状誤差が5µmに減少したことを確認できる。計測の繰り返し性は1µm



第2.2.2-8 図 補正加工2回目の形状誤差計測結果(粗加工用の砥石)

程度である。この結果より機上計測に基づく補正加工の有効性が確認できる。

仕上げ用の砥石を用いた計測及び補正研削

第2.2.2-9 図に仕上げ用の砥石を用いて再研削されたミラーの形状計測結果、 およびその計測結果を用いて補正研削が行われた後の形状計測結果について、それらの進展の様子を示す。3回の計測および補正研削によって,加工誤差が45 µm から10 µmまで低減された。(目標達成)。さらに、最終計測および補正研削によ



第2.2.2-9図 仕上げ用の砥石を用いた計測及び補正研削

って形状誤差が2 µm まで低減されたことを確認できる。

第2.2.2-10 図に衛星搭載用ミラーの三次元形状計測結果を示す。(b)は最終補 正研削後のミラーを45°ずつ回転させながら8本の断面形状を取得し、3次元で 表示したものである。また、参考として、第2.2.1-24図を回転させることで生成 した三次元マップを、補正加工前の三次元形状計測結果として(a)に示す。補正研 削を行う前の形状誤差は90 µm であったが、開発されたシステムの提供する形状 計測結果に基づく補正研削加工によって、ミラー全体における形状誤差が4 µm まで低減され、目標形状精度である10 µm を十分に達成したことを確認した。



(a)補正加工前



(b)補正加工最終結果 第2.2.2-10図 仕上げ用の砥石を用いた補正研削結果