

超高分散分光器用Immersion grating および超軽量大型ミラーの開発

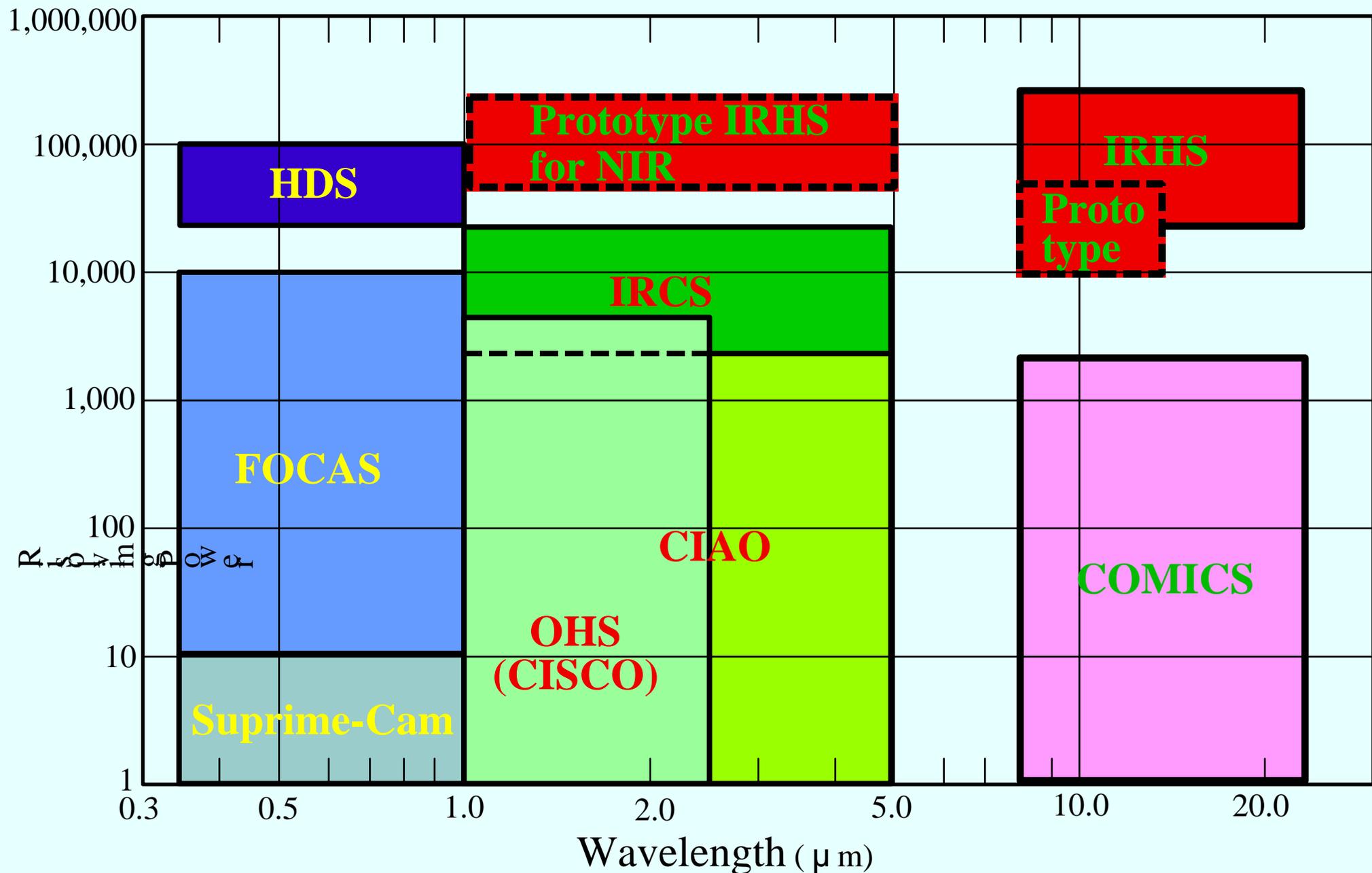
海老塚 昇・戎崎 俊一・大森 整（理化学研究所）・
平原 靖大（名古屋大学理学部）・高見 英樹（国立天文台）・
高橋 義幸（アラバマ大学）

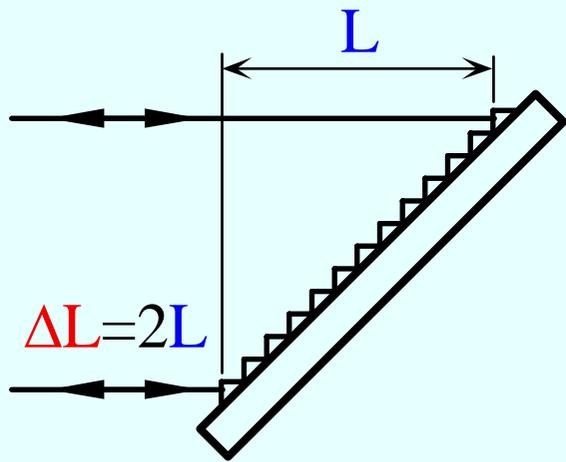


Immersion gratingの開発

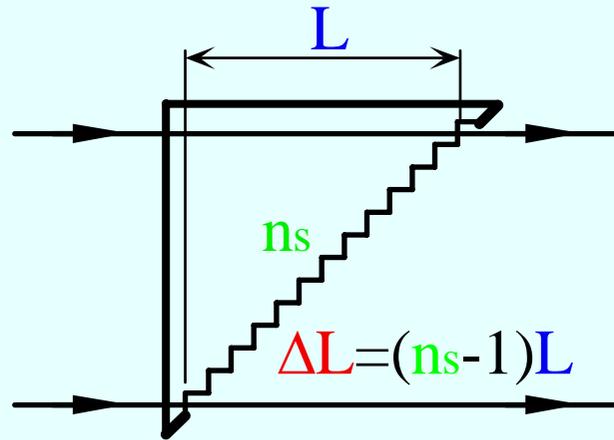
背景

- 波長8 ~ 13 μm の中間赤外線領域は有機物の多様な骨格振動に伴う遷移が現れる、各種有機物の構造決定における分光学的な”指紋領域”として重要なバンド。
- 各種珪酸塩におけるSi-O骨格振動モードもこの領域に現れ、鉱物もしくは非晶質の固体珪酸塩の構造に関する最も豊富な情報をもたらす。
- 星間空間における炭素や珪素の化学的な挙動を原子・分子レベルで解き明かすことにより、星間空間の諸相における物質の形態とその成因についての知見が得られ、宇宙における物質の進化・輪廻についての新しい描像が得られる。
- 星間分子の振動回転スペクトルを回転構造を分離して観測するのに必要な分解能 $R = \lambda / \Delta\lambda$ は、多種多様な有機分子が観測される星形成領域では $R \sim 200,000$ 。
- 炭素質および珪酸塩微粒子の形成場である晩期型星周辺大気では $R \sim 50,000$ 。

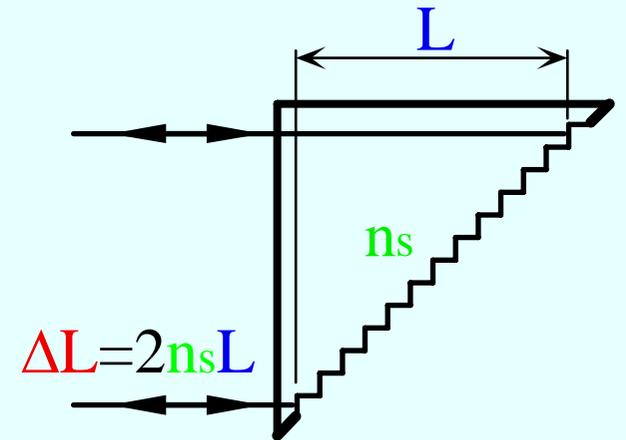




(a) Reflection grating



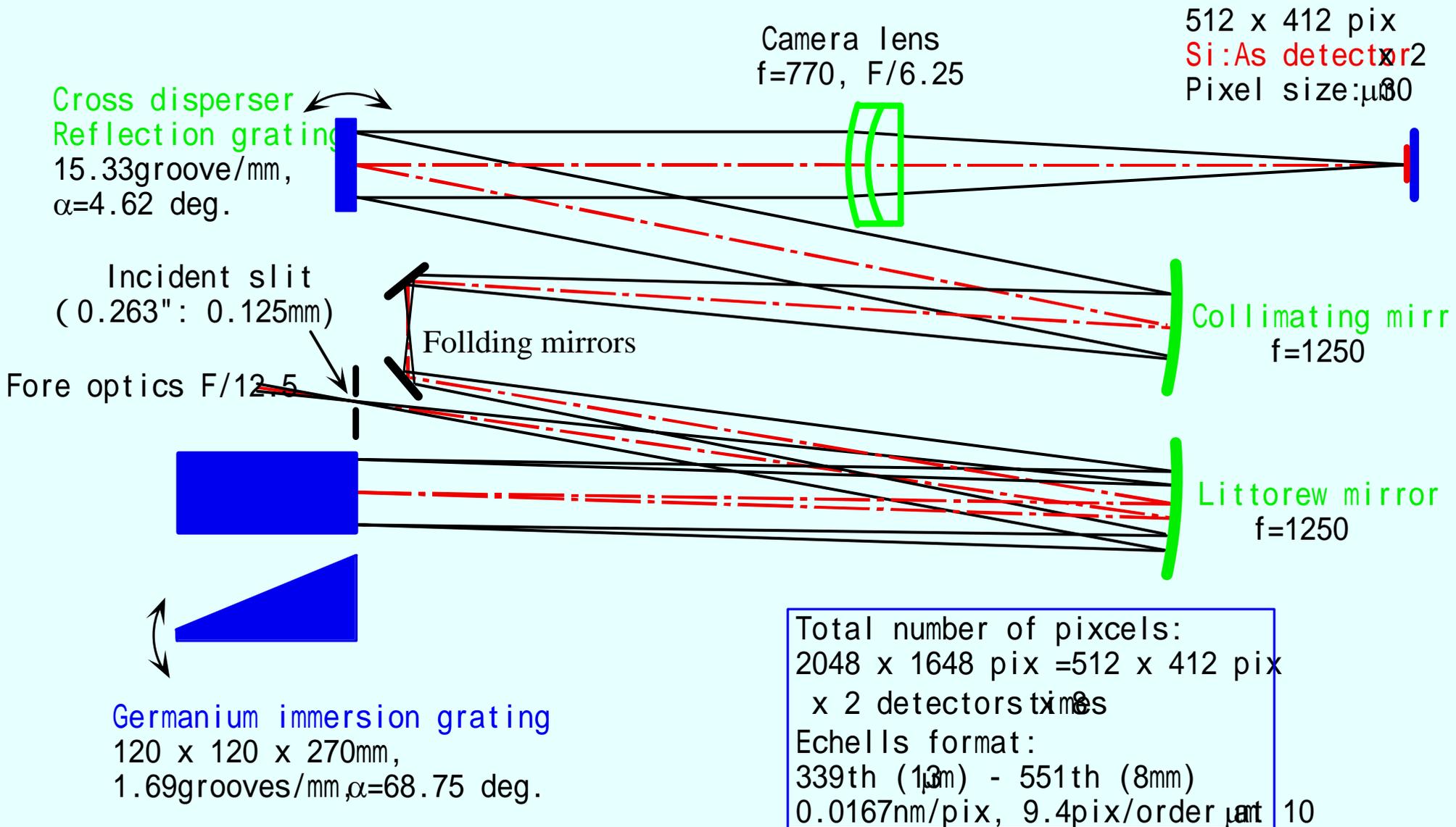
(b) Grism



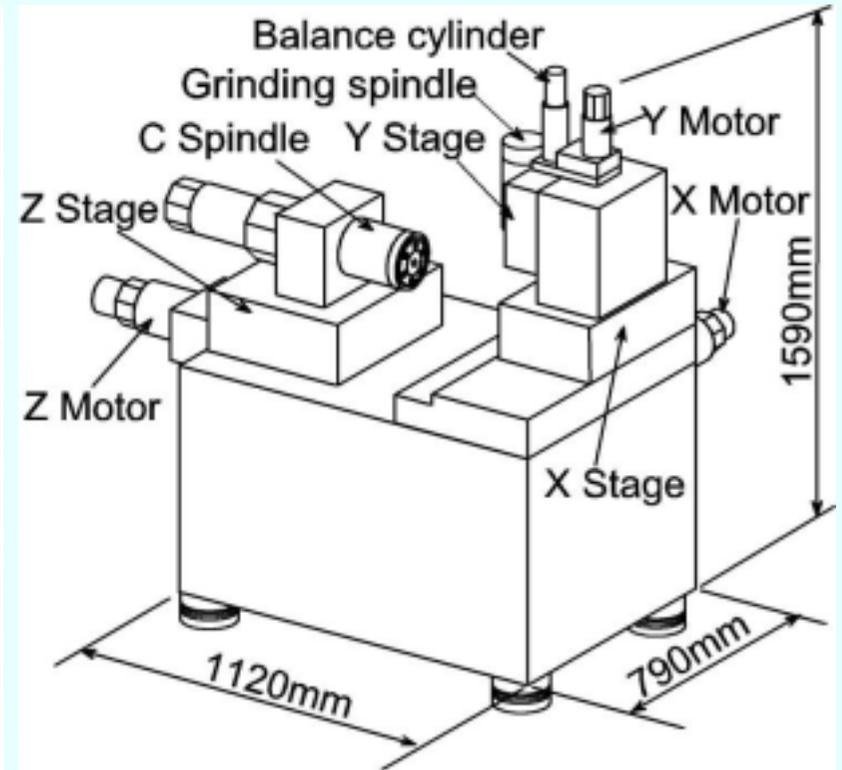
(c) Immersion grating

通常の反射型回折格子等を用いた分散型分光器の場合は波長 $10\ \mu\text{m}$ において $R \sim 200,000$ を達成するためには 400mm 程度のコリメートビーム径が必要なので、装置全体を 50K 以下に冷却するための真空容器を含めると 100m^3 程度の容積になってしまう。

Immersion gratingは光路中を透明媒質で満たされた反射型回折格子のことであり、ゲルマニウムの屈折率は $1.6 \sim 20\ \mu\text{m}$ において $n \sim 4$ なのでゲルマニウムImmersion gratingを用いることにより、通常の反射型回折格子に対して $1/4$ のサイズすなわち $1/64$ の体積で同一の分解能を得ることができる。



超精密3Dプロファイル加工装置



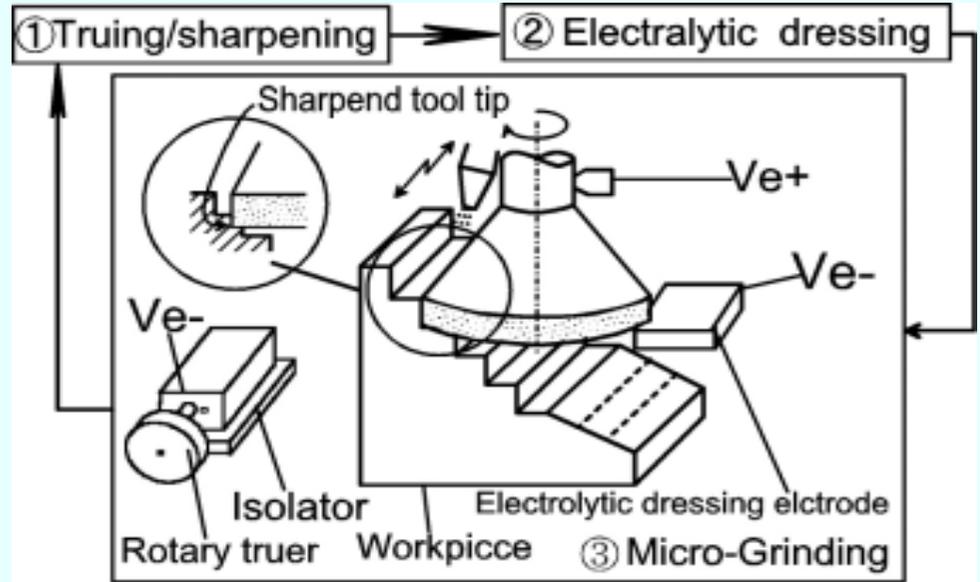
X, Y, Z軸 : クロスローラーガイド

ストローク : X=300mm, Y=75mm, Z=150mm

制御分解能 : 1.0nm

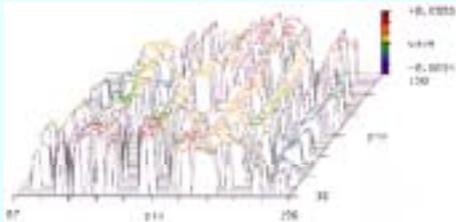
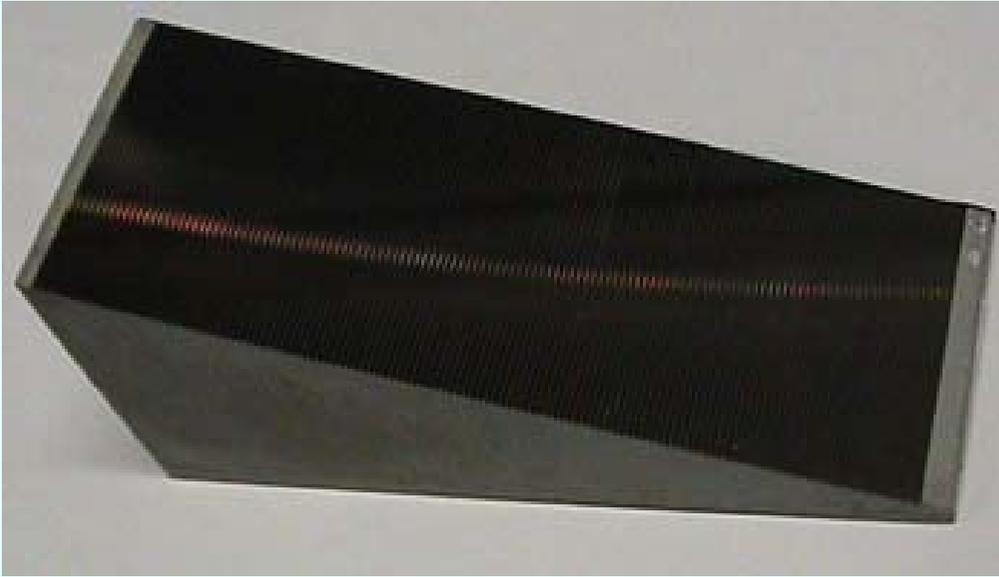
C軸 : エアスピンドル

割出し分解能 : 1/10,000 °

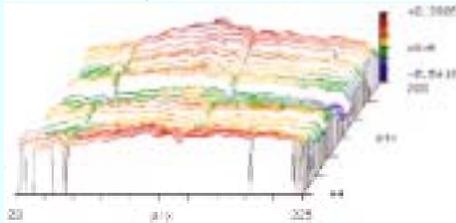
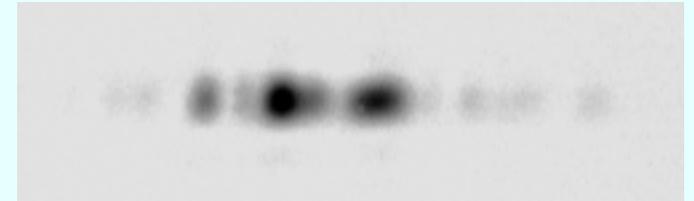


最新の超精密3次元加工装置を用いて理化学研究所が開発した**Electrolytic In-Process Dressing (ELID) 研削法**により、プロトタイプ用Immersion gratingの試作を通算5回行ない、4回目に試作したゲルマニウムImmersion gratingは**10 μm帯において実用的な性能を達成**できると見積もられている。

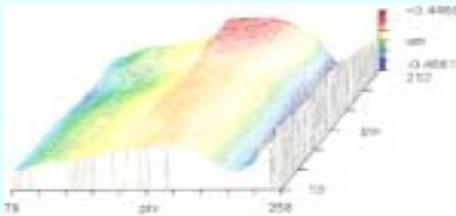
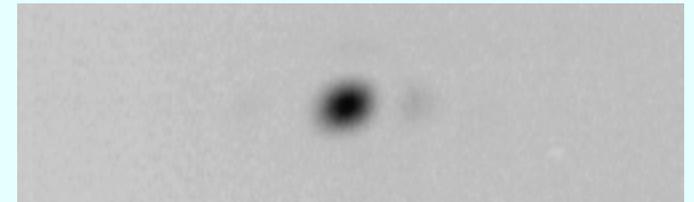
5回目は昨年度に新しく導入された**油圧式ガイド面**を持つ超精密3次元加工装置により、2.0 μmにおいてR ~ 250,000を達成することを目指したゲルマニウムImmersion gratingの製作が行われ、**従来より滑らかな表面荒さ**を得ることができたが、装置が納められている恒温室の**温度調節の問題**により、**満足できる波面精度を得られなかった**。



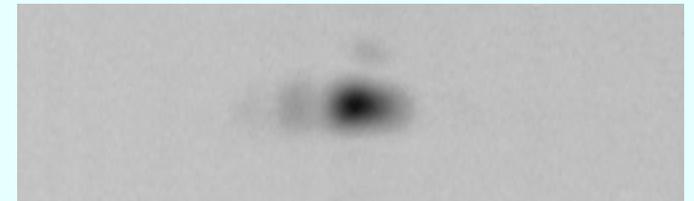
No.3, PV: 961nm, rms: 154nm

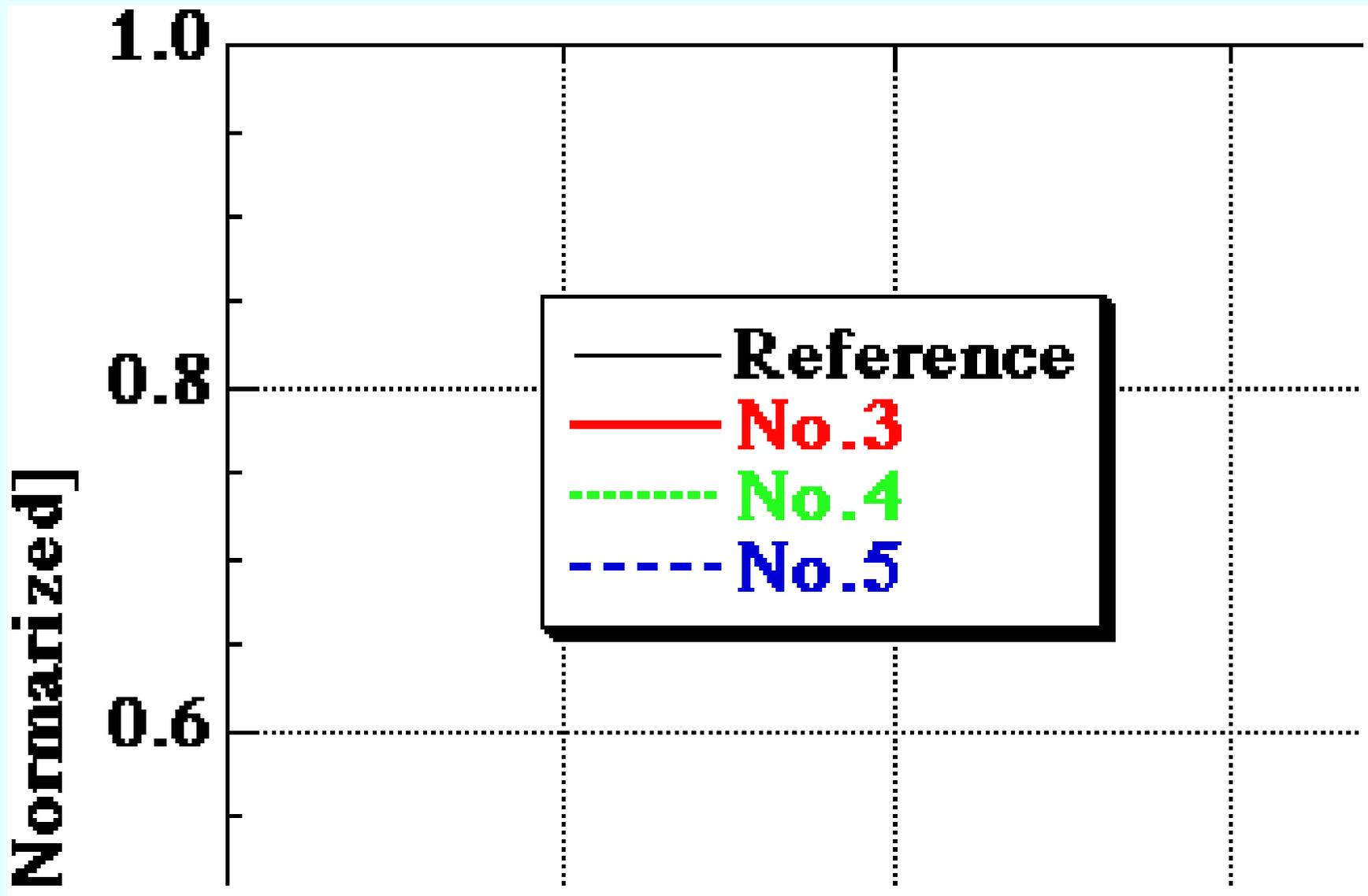


No.4, PV: 583nm, rms: 87nm



No5, PV: 577nm, rms: 107nm





可視光による表面の透過波面および $10.6\ \mu\text{m}$ の炭酸ガスレーザーを使用した測定の結果、4回目に試作したゲルマニウム Immersion gratingは $10\ \mu\text{m}$ 帯において $R \sim 4,400$ を達成できると見積もられている。

今後の課題（Immersion Grating）

- ・実機用Immersion Gratingの開発

10nmの精度で最大1400×700×200のサイズを加工することが可能な大型装置を用いて120×120×270の実機用**ゲルマニウムImmersion grating**の加工を行う。

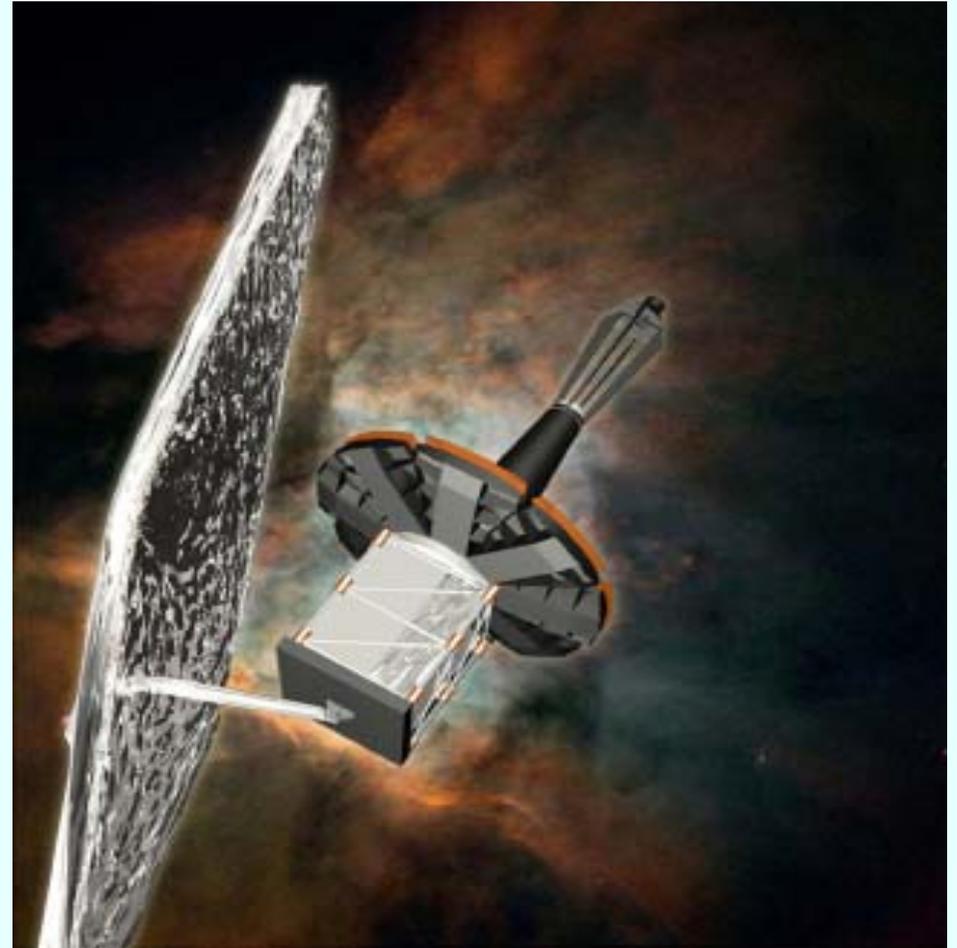
- ・**プロトタイプIRHS**の製作（名古屋大学 理学部 地球惑星科学科 平原研）

光学系の構成部品（ミラー、レンズ、検出器マウント）の製作と冷却試験評価、IRHSプロトタイプ・実機兼用の検出器ドライバーエレクトロニクス設計・製作が完了。
本年度中に完成予定。

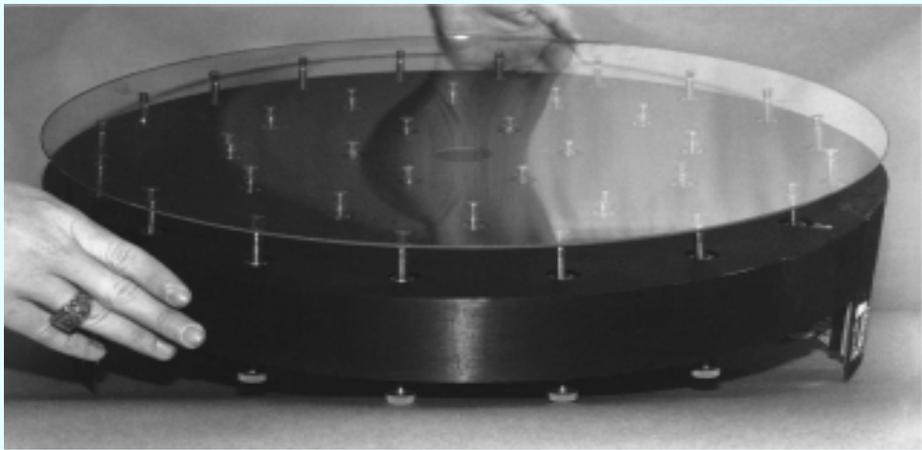


超軽量大型ミラーの開発

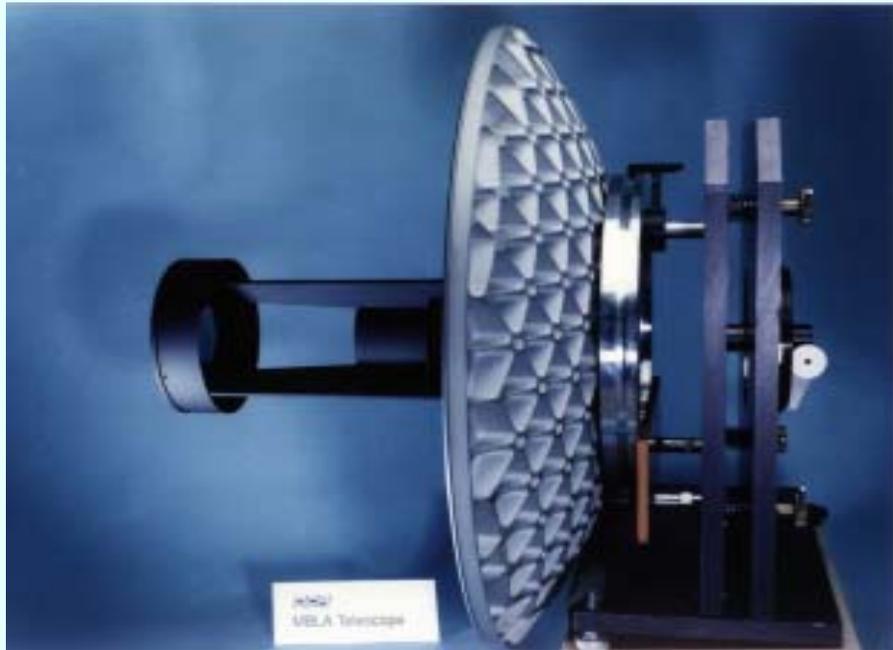
- 薄肉ガラス+能動支持
 - システムが複雑
- CFRP等の複合材料
 - 形状精度を保てない。
- ベリリウム (Be) 裏面くり抜き+補償光学
 - 強い発ガン性がある。
- シリコンカーバイト (SiC) 裏面くり抜き+補償光学
 - 機械的熱的に最も優れている。
 - 加工が困難。



8 ~ 6.5m次世代宇宙望遠鏡 (NGST) 想像図



ULE薄肉+能動支持



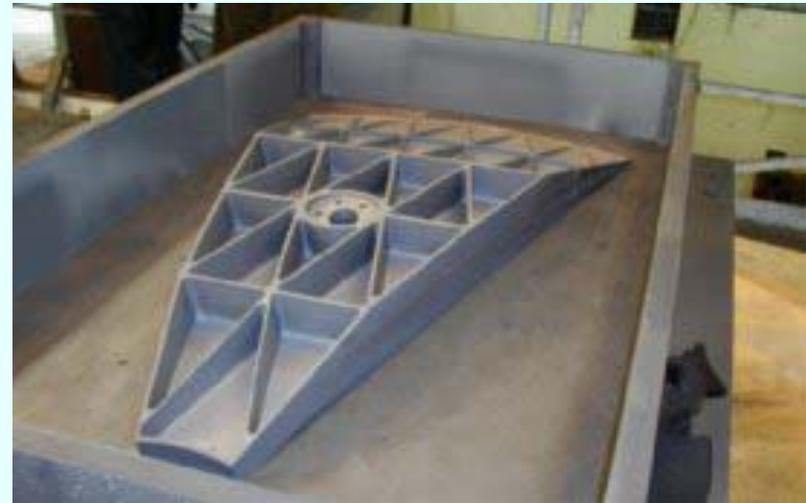
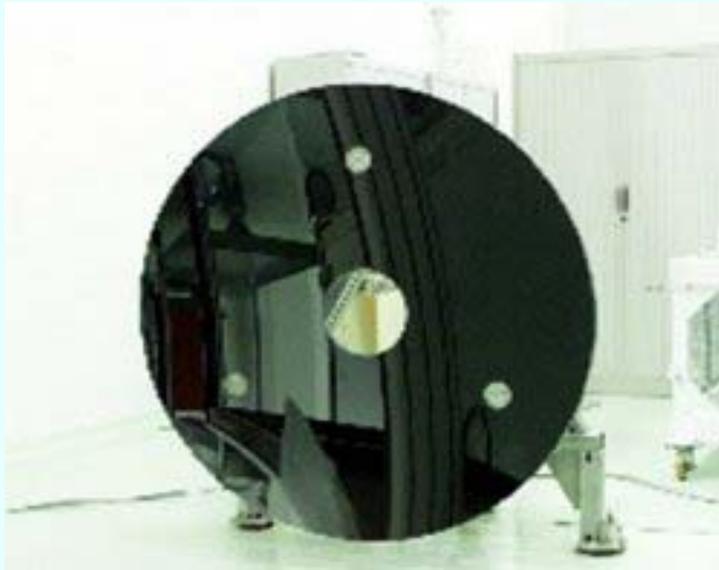
ベリリウムくり抜き



CFRP

シリコンカーバイト (SiC)

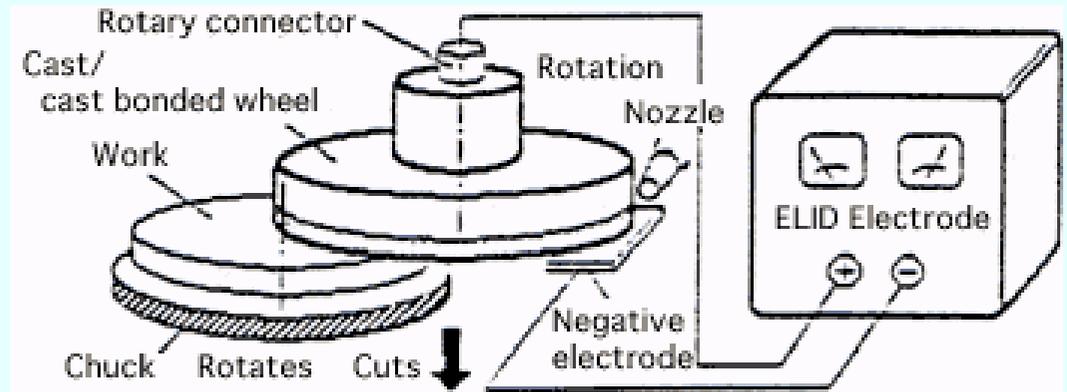
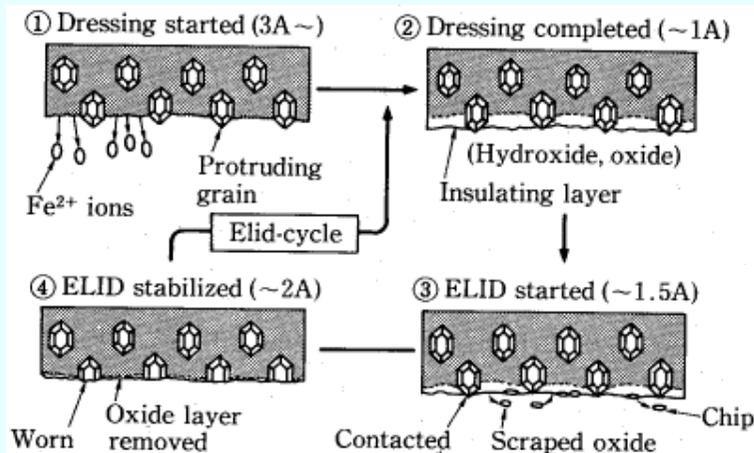
- 剛性・破壊強度・熱伝導・線膨張率等の点で最も優れている。
- 710mm Astro-F (宇宙研) や 3.5m Herschel 望遠鏡 (ESA) 等に採用。
- 地上30-100mクラス望遠鏡の主鏡素材としても有望。
- SiCはダイヤモンドに次いで硬い難加工物質。
通常の研究法等では鏡材のくり抜きや鏡面加工等に膨大な時間を要する。



Herschel 望遠鏡用 1.35m SiC超軽量鏡デモンストレータ

ELID鏡面研削法

- 単結晶シリコン、ガラス、セラミックス、硬質金属などの広範な素材を高効率かつ超平滑に鏡面加工できる画期的なダイヤモンド研削法。
- 鑄鉄粉にダイヤモンドの微粒子を混練して焼結した“とんでもなく堅い砥石”を使用（一般的なメタルボンド砥石は、銅錫系合金やNi主体の金属結合材を使用）。
- 鑄鉄ボンド砥石は強固な結合力のため目立てが困難である上、ダイヤモンド砥粒が摩耗してもバインダーが摩耗しにくいので、すぐに目詰まりを起こしてしまう。
- 鑄鉄を電解して常に砥石の表面に適切にダイヤモンド砥粒を突出させる方法を考案。
- 電解によって形成された酸化鉄や水酸化鉄が絶縁体として電流値を受動的に制御するばかりでなく、ダイヤモンド砥粒の保護や研磨にも関与するなどの重要な働きをすることが分かっている。



ELID鏡面研削法による加工例

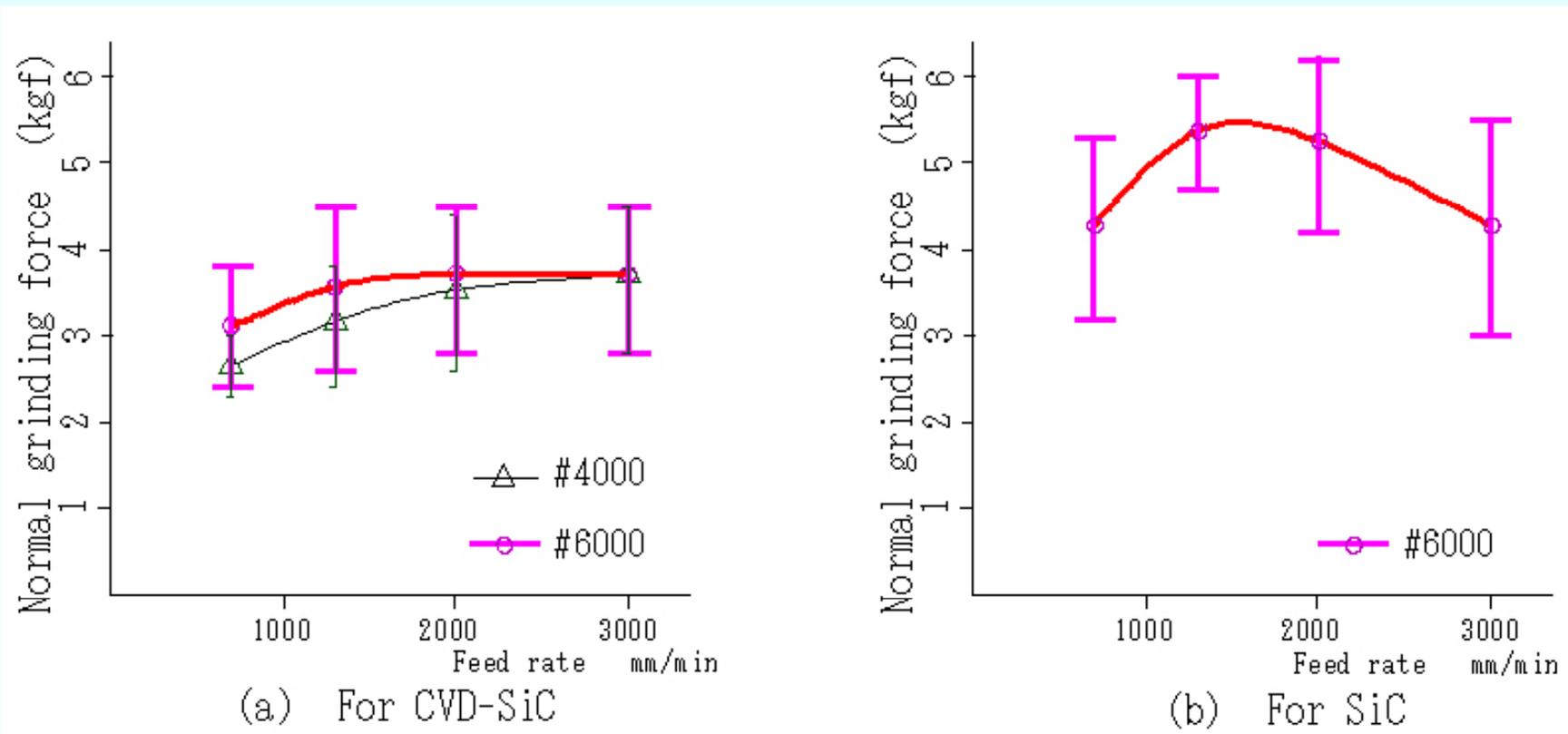


CVD-SiC平面ミラー



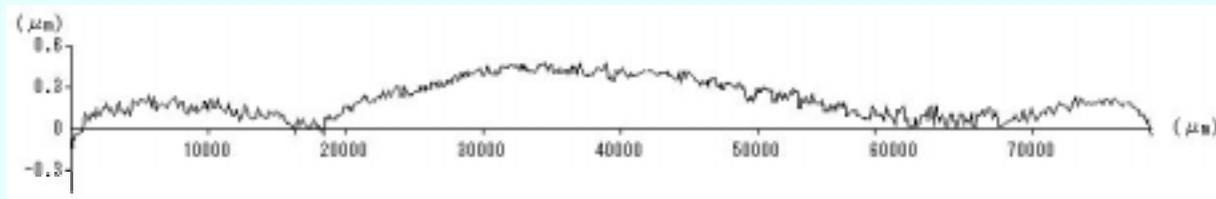
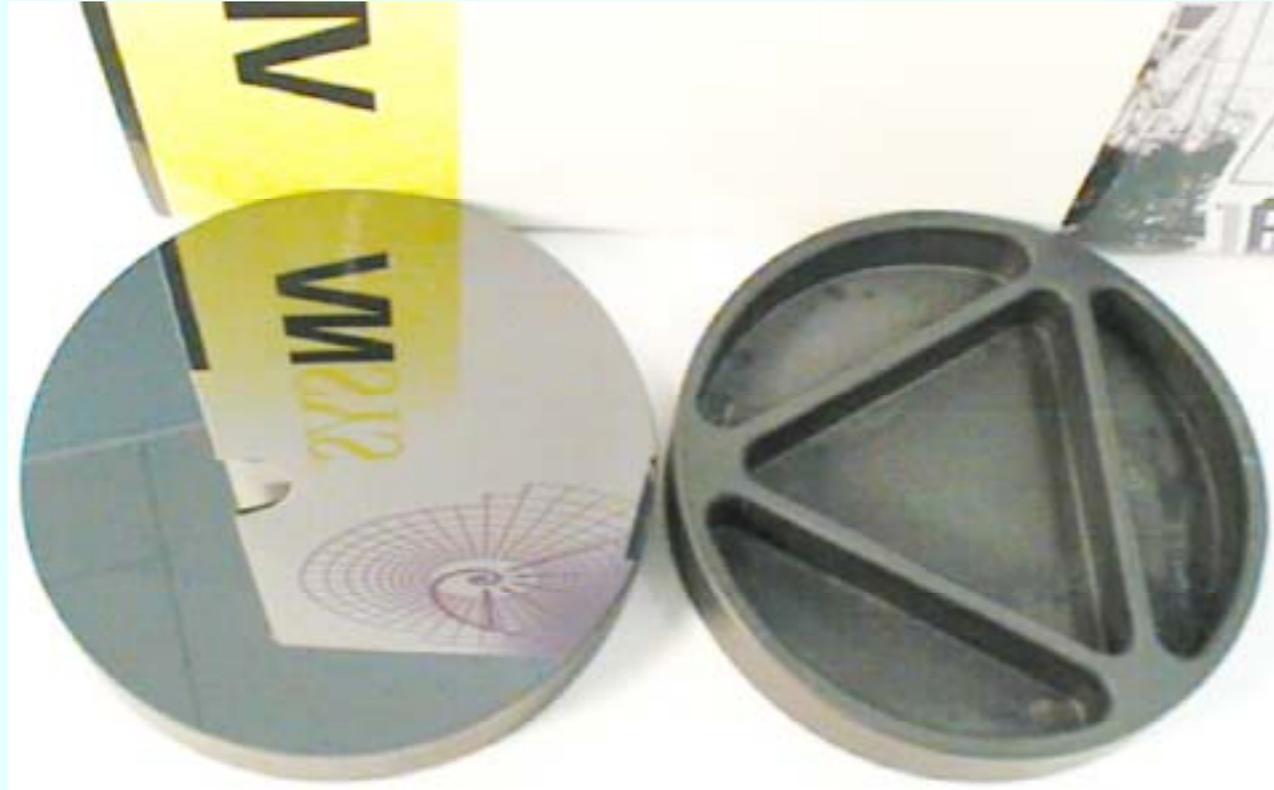
焼結SiC放物面ミラー

SiC研削抵抗および表面粗さデータの取得



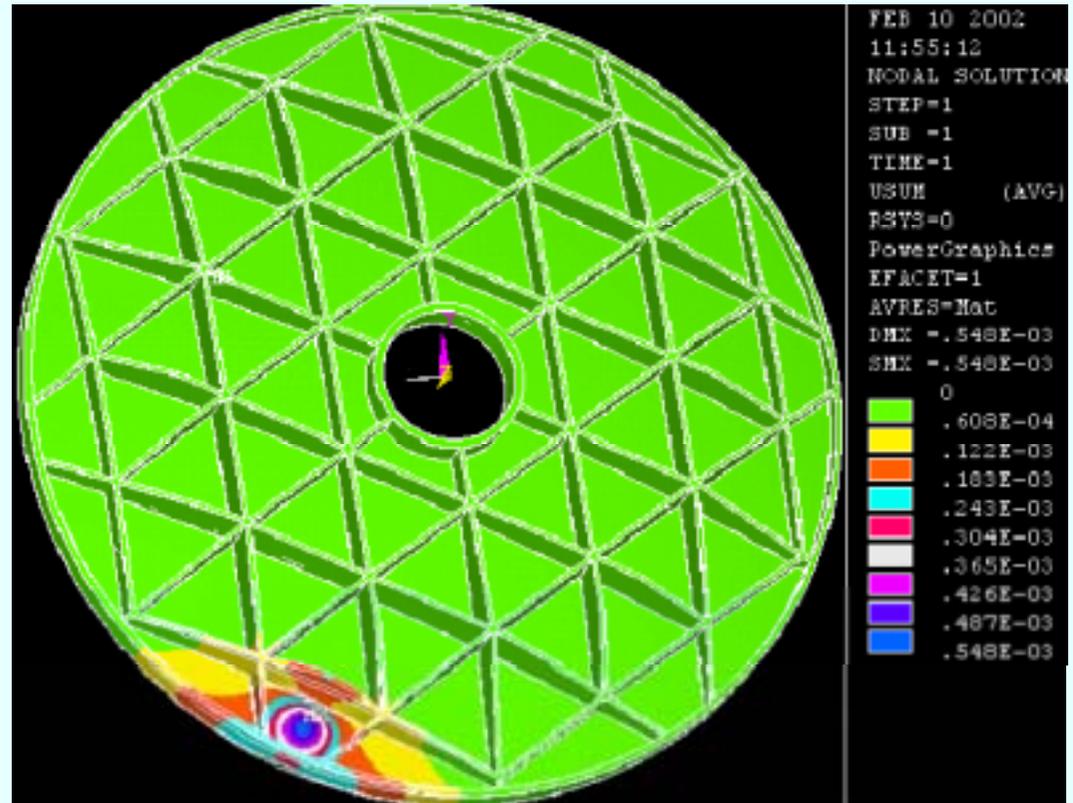
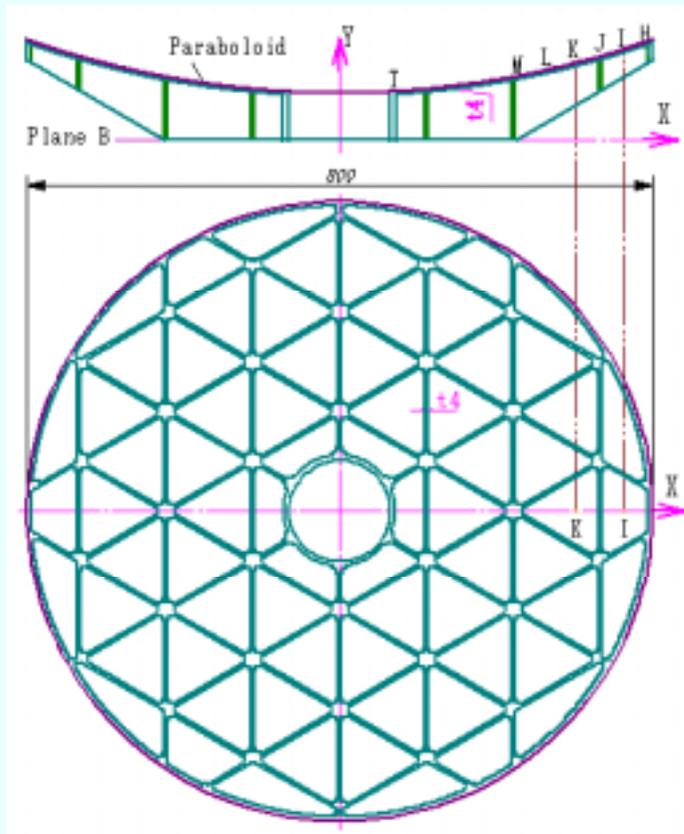
焼結体とCVD-SiCのテストピースをSD#325、SD#1200、SD#4000とSD#6000の砥石について切り込み量、送り速度等を変化させた加工を行い、研削抵抗と表面粗さについてのデータを取得。

SiC加工変型データの取得

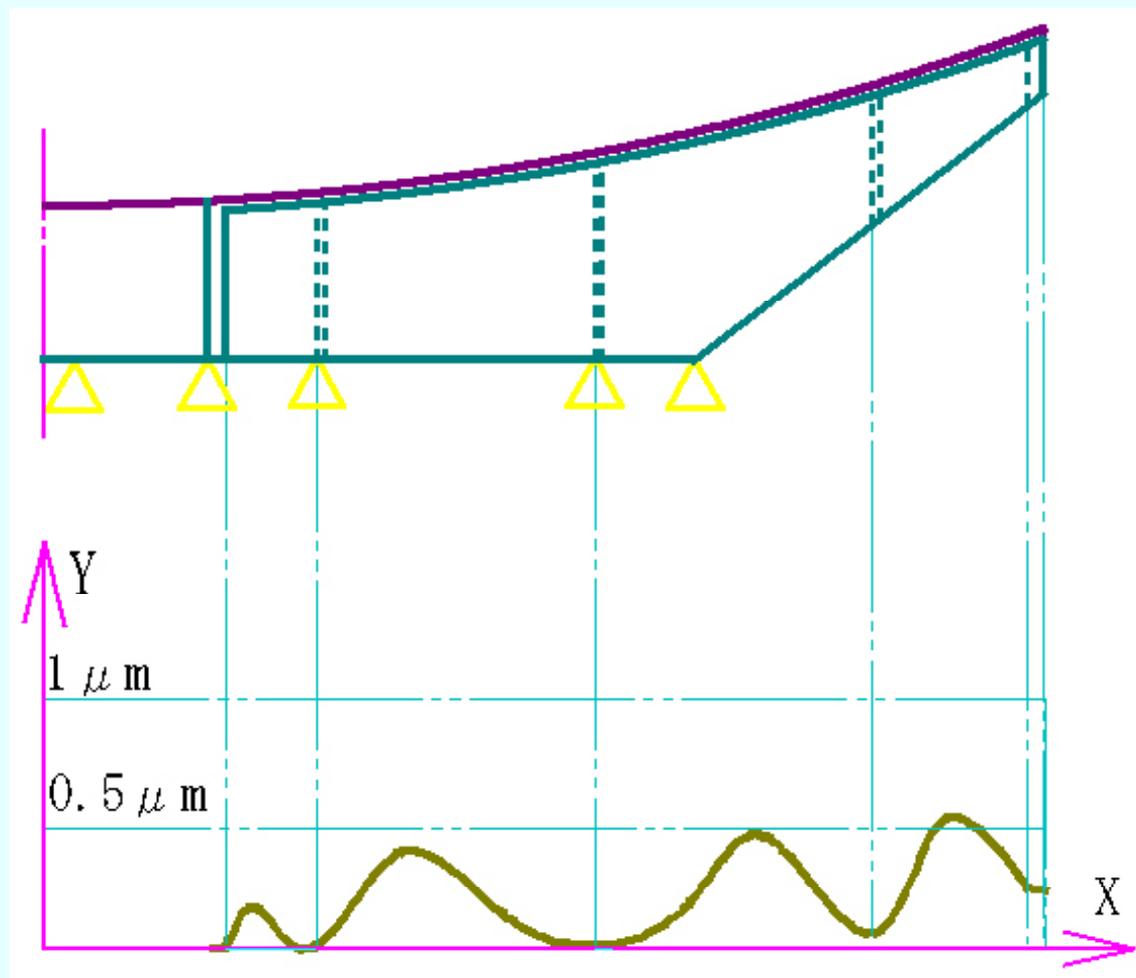


三角形のリブ構造（幅、鏡面厚さともに4mm）を持つ焼結SiC基板について加工変形データを取得。

有限要素法による加工シミュレーション



得られたデータをもとにAstro-Fの主鏡形状を模擬したモデルについて加工変型、重力変型等のシミュレーションを行っている。



重力変形のシミュレーション

今年度の計画 (SiCミラー)

- 400 SiCミラーの試作
 - 1) 焼結SiCの粗成形品を入手。
 - 2) 表面および裏面リブ構造のELID研削加工による仕上げ成形。
 - 3) CVD-SiC成膜。
 - 4) 鏡面のELID研削加工。
- リブ構造等の破壊強度試験
焼結SiC単体、焼結SiC+CVD-SiC膜、多孔質SiC+ CVD-SiC膜などについて、通常の研削加工、ELID研削加工を施したテストピースの破壊強度やクラックの進行等を調べる。

800mm超精密ロータリー研削盤



- Y,Z軸 : 油静圧ガイド
- Y,Z軸分解能 : 10nm
- ターンテーブル : 油静圧軸受け
最大240rpm定速回転（割出し機能無し）

超高分散分光器用Immersion gratingおよび超軽量大型ミラーの開発

海老塚 昇・戎崎 俊一・大森 整（理化学研究所）・平原 靖大（名古屋大学理学部）・高見 英樹（国立天文台）・高橋 義幸（アラバマ大学）

1. はじめに

高屈折プリズムに直接格子を加工したグリズムやImmersion gratingは大フォーマットの検出器を搭載した最新の観測装置用の分散素子として有効である¹⁻⁷。グリズムとはFig.1bのようにプリズムと透過型回折格子を組み合わせることで任意の波長や次数の回折光を直進させることができる直視回折格子のことである。撮像光学系の瞳近傍などにフィルタのように光路に差し込むだけで撮像から素早く分光観測装置に切り替えることができる。また、Immersion gratingはFig.1cに示すように光路中を透明媒質で満たされた反射型回折格子のことである。ゲルマニウムの屈折率は $1.6 \sim 20 \mu\text{m}$ において $n \sim 4$ なので、ゲルマニウムImmersion gratingを用いることにより通常の反射型回折格子（Fig.1a）に対して1/4のサイズ、すなわち1/64の体積で同一の分解能を得ることから、分光装置の容積を劇的に小さくすることが可能である。一方、ガリウムヒ素は $0.9 \mu\text{m}$ より長波長で透明かつ $n \sim 3.5$ なので近赤外線高分散分光器用Immersion gratingの素材として有望である。

宇宙望遠鏡の主鏡は軽くて頑丈であることが要求されるために、様々な新しい素材や構造が採用されている。例えば、シリコンカーバイド（SiC）やベリリウム等のハニカムミラー、超薄肉ガラスや複合材料ミラー+能動支持機構等が実用化あるいは開発中である。2003年に打ち上げが予定されているAstro-Fの主鏡は多孔質SiCを骨格として緻密なCVD-SiC膜でサンドしたものである⁸。地上望遠鏡の将来計画として提案されている30-100mクラス望遠鏡も主鏡の素材としてSiCが有望視されている。

SiCは単結晶シリコンや窒化硼素と同様にダイヤモンドに次いで硬い物質であるために、通常の研削法等では鏡材のくり抜きや鏡面加工等に膨大な時間を要する。また、ゲルマニウムやガリウムヒ素は脆いため、金属や樹脂のように切削加工で回折格子を製作することは困難である。これらの硬脆材料である難加工材の新しい加工技術として、大森等が発明したELID（Electrolytic In-process Dressing）鏡面研削法⁹⁻¹¹の有効性が実証されてきた。また、大森等のグループでは、XYZ軸のストロークが $300 \times 75 \times 150\text{mm}$ 、各軸1nmの直進位置制御分解能を有し、 $1/10000^\circ$ の割り出し制御が可能な回転軸（C軸）を持つ超精密3次元加工装置や、長尺光学素子加工のために $1400 \times 700 \times 500\text{mm}$ 、各軸10nmの位置制御分解能を有した大型超精密3次元加工装置、さらに800のターンテーブルとYZ軸が10nmの位置制御分解能を有した超精密ロータリー加工装置等が開発されている。これらの超精密加工装置とELID鏡面研削法と組み合わせたSiC大型ミラーやゲルマニウム回折格子の開発の状況について報告する。

2. ELID鏡面研削加工法

ELID鏡面研削法は単結晶シリコン、ガラス、セラミックス、硬質金属などの広範な素材を高効率かつ超平滑に鏡面加工できる画期的なダイヤモンド研削法である。鑄鉄粉にダイヤモンドの微粒子を混練して焼結した“とんでもなく堅い砥石”を使用する（一般的なメタルボンド砥石は、銅錫系合金やNi主体の金属結合材を使用）。純鉄は高温下で炭素との化学的拡散反応が強く、砥粒としてのダイヤモンドが消失し易いためバインダーとして使用し難い。一方、鑄鉄は炭素が飽和した状態なので消失するほどの拡散は生じず、しかもダイヤモンド表面上での微小な拡散により砥粒保持力が高まるためバインダーとして有効である。しかし、強固な結合力のため鑄鉄ボンド砥石は目立てが困難である上、ダイヤモンド砥粒が摩耗してもバインダーが摩耗しにくいので、すぐに目詰まりを起こしてしまうために実用的ではなかった。そこで、鑄鉄を電解して常に砥石の表面に適切にダイヤモンド砥粒を突出させる方法を考案した（Fig.2）。研究の結果、電解によって形成された酸化鉄が絶縁体として電流値を受動的に制御するばかりでなく、ダイヤモンド砥粒の保護や研磨にも関与するなどの重要な働きをすることが分かっている。

最近ではELID研削法により従来のダイヤモンド研削では不可能な#3,000,000（平均粒径：5nm）の砥粒を使用し、単結晶シリコンの基板研磨においてRMS表面粗さ0.3nmを達成している。（遊離砥粒ポリッシュ加工した光学的に良好な鏡面のガラスや結晶の場合、RMS表面粗さが1.0nm程度である。）

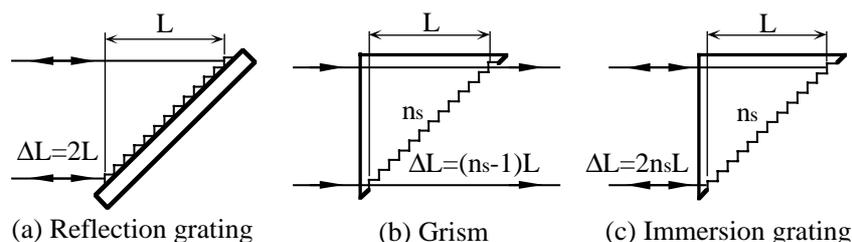


Fig. 1 Schematic representation of gratings.

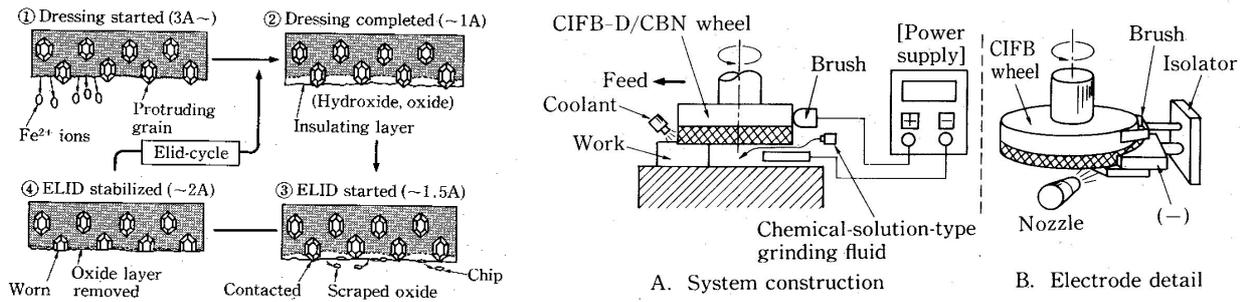


Fig. 2 Schematic representation of ELID grinding method.

3. プロトタイプimmersion gratingの試作

波長8～13 μm の中間赤外線領域は有機物の多様な骨格振動に伴う遷移が現れる、各種有機物の構造決定における分光学的な“指紋領域”として重要なバンドである。各種珪酸塩におけるSi-O骨格振動モードもこの領域に現れ、鉱物もしくは非晶質の固体珪酸塩の構造に関する最も豊富な情報をもたらす。星間空間における炭素や珪素の化学的な挙動を原子・分子レベルで解き明かすことにより、星間空間の諸相における物質の形態とその成因についての知見が得られ、宇宙における物質の進化・輪廻についての新しい描像が得られる。星間分子の振動回転スペクトルを回転構造を分離して観測するのに必要な分解能 $R = \lambda / \Delta\lambda$ は多種多様な有機分子が観測される星形成領域では $R \sim 200,000$ 、炭素質および珪酸塩微粒子の形成場である晩期型星周辺大気では $R \sim 50,000$ である。

第二期観測装置候補の中間赤外線高分散分光器（IRHS、仮称）は波長10 μm 帯にて $R \sim 200,000$ （Fig.3）を達成することを目指している。通常の反射型回折格子（Fig.1a）等を用いた分散型分光器の場合は10 μm において分解能200,000を達成するためには400mm程度のコリメートビームが必要なので、装置全体を50K以下に冷却するための真空容器を含めると100 m^3 程度の容積になってしまう。すばる望遠鏡といえども、このような大きな装置は取り付けることができない。

IRHSは分散素子としてゲルマニウムあるいはガリウムヒ素製のImmersion gratingを採用する。我々は超精密加工装置にELID鏡面研削法を適用して、5回のプロトタイプImmersion gratingの試作（Fig.4）を行った¹²⁻¹⁴。プロトタイプImmersion gratingは基板サイズが30（W） \times 30（H） \times 72（L）mm、頂角が68.75 $^\circ$ である。格子間隔は第1回目の試作が100 μm 、2回と3回目が250 μm 、4回と5回目が600 μm 、材質は3回目のガリウムヒ素（GaAs grating）以外はゲルマニウム（Ge grating）である。

回折効率やファーフールドイメージ等の測定結果の評価により、1～3回目の試作品は格子形状あるいはピッチ誤差を改善する必要性が認められた。4回目に試作したGe gratingは格子形状や表面粗さ等が中間赤外線用には実用的であると判断された（Fig.5）。またピッチ誤差に起因する回折像の広がりが分解能（ $R = \lambda / \Delta\lambda$ ）を支配する。波長10.6 μm の炭酸ガスレーザによる回折像の測定結果（Fig.6）より、分解能は理想値に対して85%であると見積もられる。一方、波長1～5 μm の近赤外線として使用するためにはピッチ誤差や表面粗さをさらに改善する必要があることが分かった。ピッチ誤差は加工機のクロスローラーの特性が原因であることが示唆されている。また表面粗さについては仕上げ研削およびツルア（目立て）に用いる砥石粒度の微細化や加工条件の最適化による改善が検討された。5回目の試作はそれまでがクロスローラー軸受けのガイドを用いた装置から全ての軸が油静圧軸受けのガイドを採用した装置を使用し

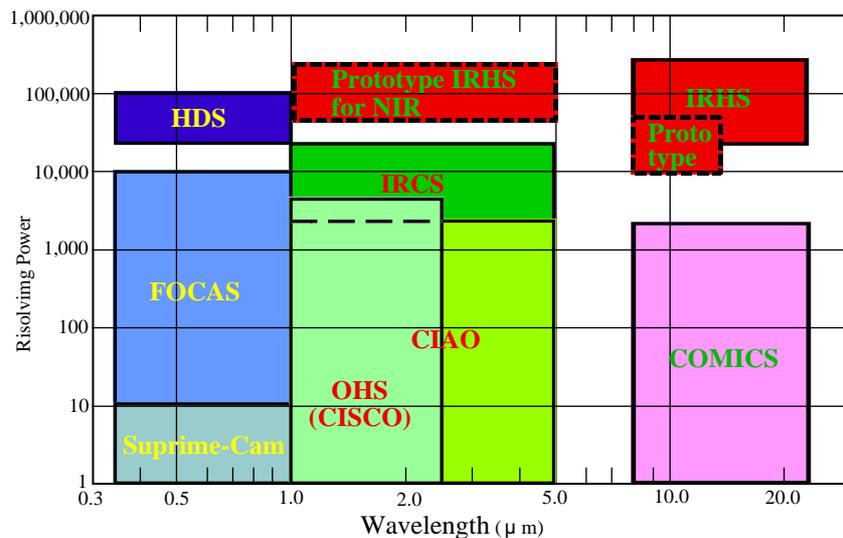


Fig. 3 Wavelength coverage and resolving power of instruments of Subaru Telescope.

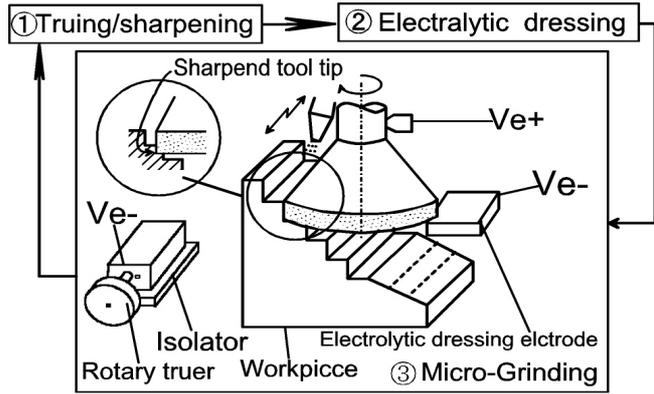
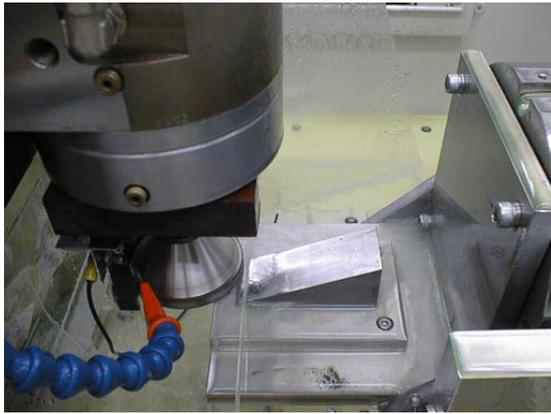


Fig. 4 Fabrication of prototype germanium immersion grating using nano precision 3D profile grinding/turning machine.

た。出来上がったImmersion grating には周期的なうねりが見られず、表面の粗さをより小さく押さえることができたが、装置が設置されている恒温室の温度が安定する前に仕上げ加工を開始したために、加工範囲の1/3程度に装置の熱膨張と思われる加工誤差を生じてしまった (Fig.7)。その結果、分解能は波長10 μm の理想値に対して73%であると見積もられる。熱膨張と思われる加工誤差を除くと近赤外線においても使用可能なピッチ誤差や表面粗さが得られている。

今年度には大型の超精密加工装置により、サイズが120 \times 120 \times 270mmの実機用Immersion grating の製作を行う予定である。入手したプリズム基板を10 μm 帯のカメラを使用して内部検査を行ったところ、屈折異常や吸収等は見られなかった (Fig.8)。現在、270 \times 120 \times 5mmのゲルマニウム基板をプリズム形状の金属ブロックに貼付けて加工を行い、砥石の磨耗による溝形状の変形が最小になるような加工方法を検討中である (Fig.9, 10)。また、加工装置に取り付けたままの状態でも回折光の波面誤差を測定するために150程度の口径を持つ小型の干渉計を開発する予定である。

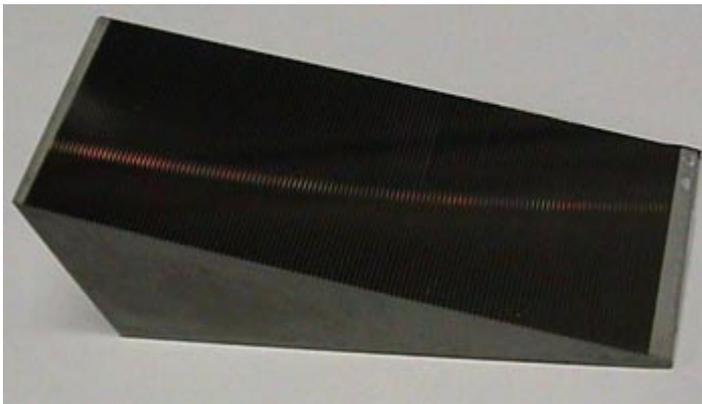


Fig. 5 Prototype germanium immersion grating (30 x 30 x 72 [mm], $a = 68.75$ [deg.], 1.67 [grooves/mm]).

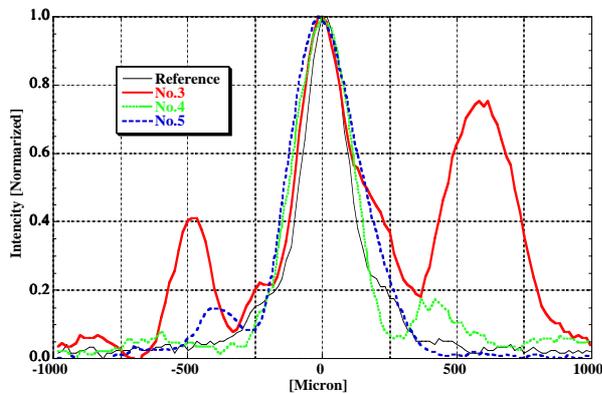


Fig. 6 Cross section of far field images of immersion gratings.

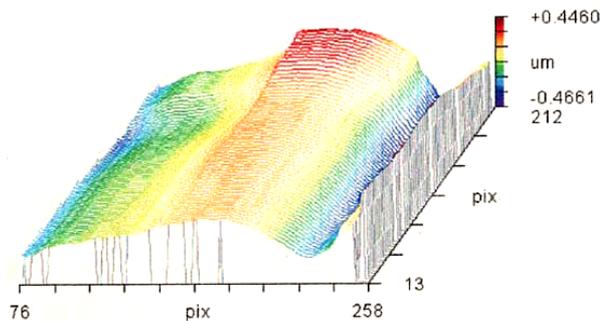


Fig. 7 Wave front images of gratings at 633nm



Fig. 8 Visible (left) and infrared (right) photographs of germanium prism. (120 x 120 x 270 [mm]) Heated solder could see through a germanium of 120 mm in thickness by means of infrared camera.

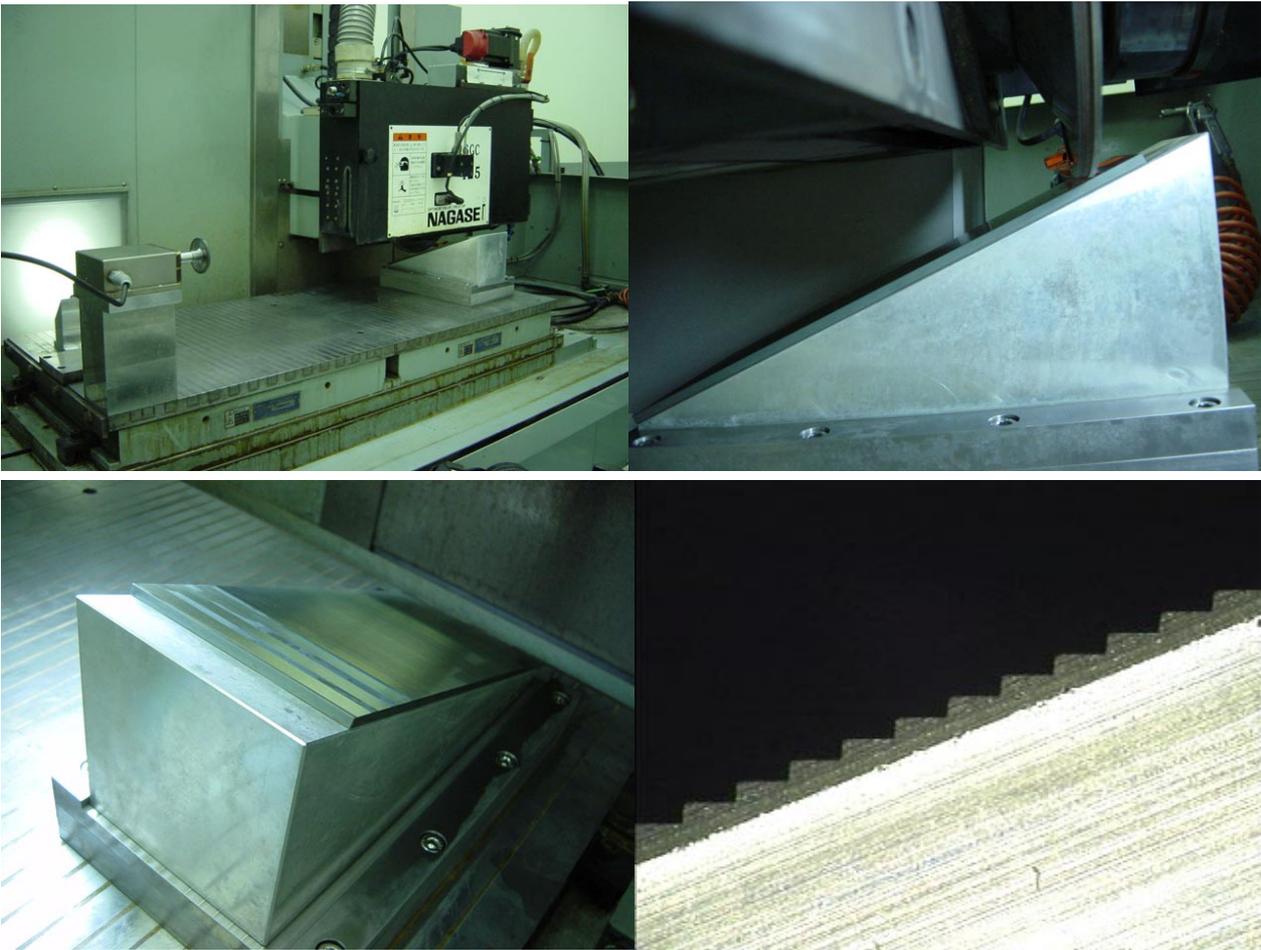


Fig. 9 Test fabrication for regular immersion grating.

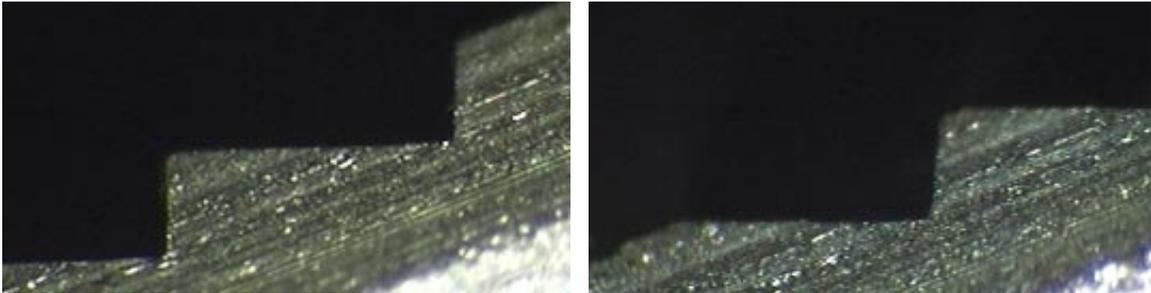


Fig. 10 Sterling (left) and 380th (right) groove of test fabrication onto germanium substrate.

4. ELID鏡面研削加工法によるSiCミラーの試作

大森等のグループではELID鏡面研削法を応用して、さまざまな硬脆材料の高効率な超精密加工の研究に取り組んでおり、シリコンや石英の軸外し非球面ミラー、CVD-SiCの平面や球面ミラー等 (Fig.11) の加工実績がある。我々は戎崎等が提案している国際宇宙ステーション日本モジュール「きぼう」の暴露部における組み立てを前提とした大型宇宙望遠鏡の研究¹⁵の一環として、今年度よりSiC等の超軽量ミラーの研究に着手した。まずは手本としてAstro-Fの主鏡は基板の裏面が三角形のリブ構造をしており、鏡面とともに厚さ3mmの多孔質SiCをコア材としてCVD-SiCを0.5mm積層させて鏡面を研磨したものである⁸。

本格的な大口径非球面ミラーのELID研削加工試験に先立つ基礎実験として、SiC焼結体とCVD-SiC基板に対して、 鑄鉄ボンドダイヤモンド砥石を門型マシニングセンタに取り付け、ELID研削加工の研削抵抗や薄肉SiCの加工変形等の基礎データを取得した¹⁶。また、Astro-Fの主鏡の構造を模擬するために100mm、厚さを5mmの鏡面に円周および内接する三角形のリブ構造を持つ焼結SiC基板のテストピース (Fig.12) を製作して変形量の測定を行った。これらのデータをもとにAstro-Fの主鏡を例として有限要素法による加工シミュレーションを行い、最適加工条件の導出を目指して行く予定である (Fig.13,14, 15)。

今年度は直径400mm程度のSiC焼結を入手して、裏面のリブの薄肉および 800の超精密ロータリー加工装置 (Fig.16) により鏡面の加工を行い、ELID研削法の有効性を実証することを目指している。



(a) CVD-SiC plane mirror. (300 x 80 x 25mm)

(b) SiC paraboloidal mirror (f30mm)

Fig 11 Trial Fabrication of CVD-SiC and SiC Mirrors by means of ELID-grinding method.

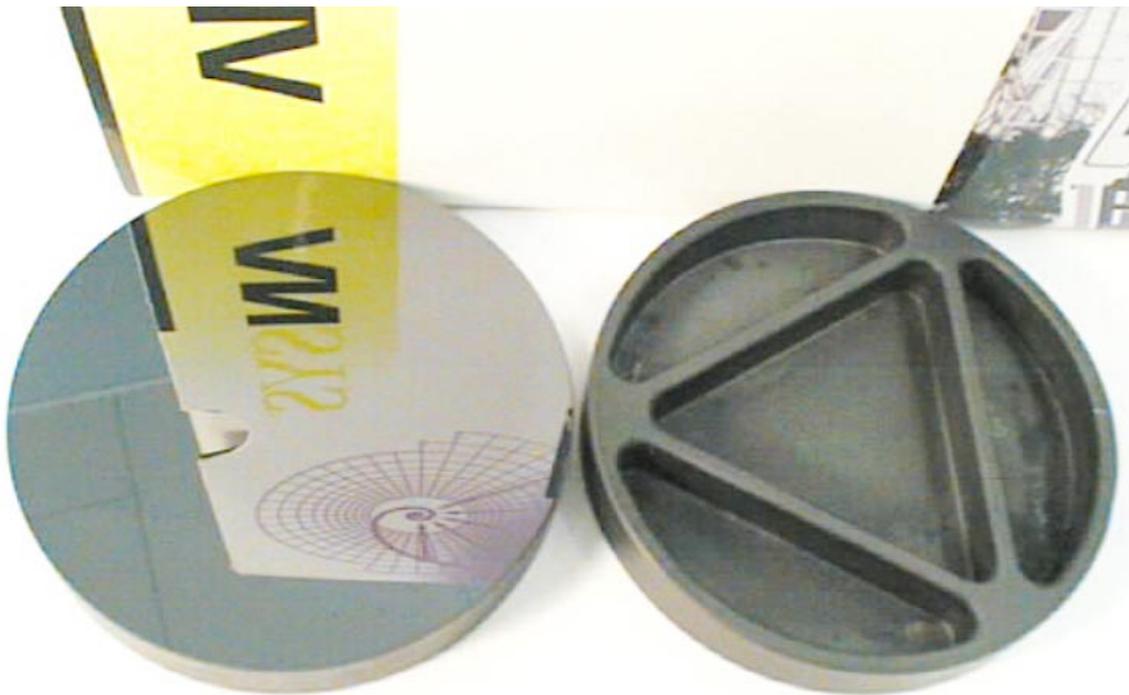


Fig. 12 Finished SiC mirror (specular front face and rough rear face).

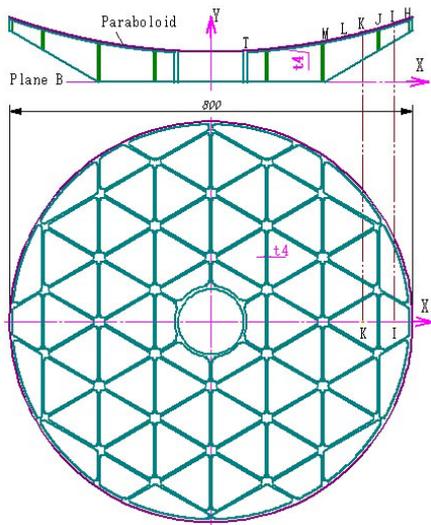


Fig. 13 Example of SiC lightweight mirror.

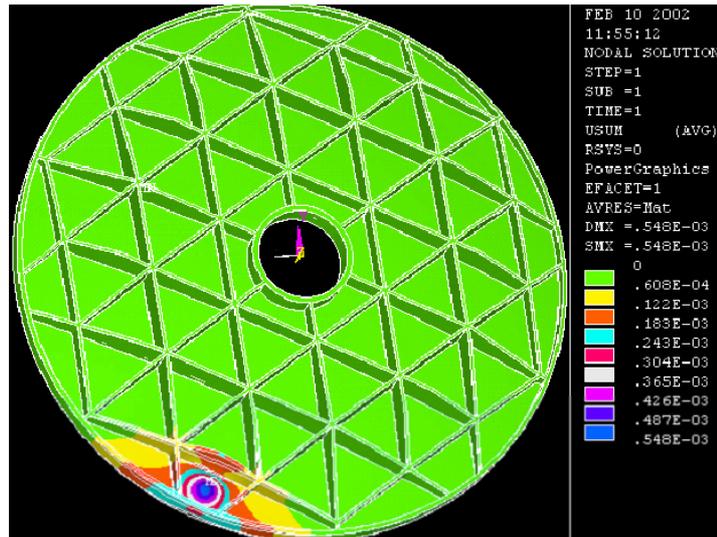


Fig. 14 Example of deformation distribution.

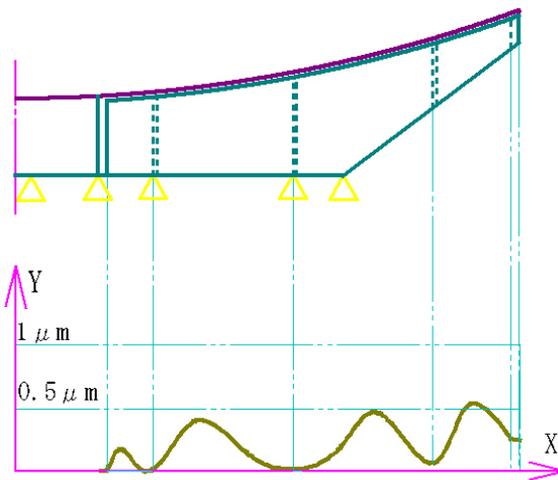


Fig. 15 Results of profile deformation by Simulation.



Fig. 16 Rotary grinding/turning machine with turntable of 800mm in diameter and 10 nm accuracy in control resolution.

5. おわりに

名古屋大学理学部の佐藤 修二 教授を始め、宇宙科学研究所、通信総合研究所、国立天文台、理化学研究所等の多くの方から本研究に関するアドバイスや励ましの言葉をいただいた。本研究は国立天文台する望遠鏡R&D経費および理化学研究所ものづくり情報技術統合化研究プログラムの予算によりサポートされている。

参考文献

1. H.U. Kaufl and B. Delabre, "Improved Design and Prototyping for a 10/20 mm Camera/Spectrometer for ESO's VLT", *Instrumentation in Astronomy VIII*, ed. David L. Crawford, Proc. SPIE, **2198**, 1036-1046, 1994
2. M. Shure, D.W. Toomey, J.T. Rayner, P.M. Onaka and A.T. Denault, "NSFCAM: a new infrared array camera for the NASA Infrared Telescope Facility", *Instrumentation in Astronomy VIII*, ed. David L. Crawford, Proc. SPIE, **2198**, 614-622, 1994
3. L. Weitzel, A. Krabbe, H. Kroker, N. Thatte, L.E. Tacconi-Garman, M. Cameron and R. Genzel, "3D: The next generation near-infrared imaging spectrometer", *Astron. Astrophys. Suppl. Ser.* **119**, 531-546, 1996
4. G. Wiedemann and D.E. Jennings, "Immersion grating for infrared astronomy", *Appl. Opt.*, **32**, 1176-1178, 1993
5. N. Ebizuka, M. Iye and T. Sasaki, "Optically Anisotropic Crystalline Grisms for Astronomical Spectrographs", *Appl. Opt.* **37**, 1236-1242, 1998.

6. N. Ebizuka, M. Iye, T. Sasaki and M. Wakaki, "Development of high dispersion gratings and immersion gratings for spectrographs of Subaru Telescope", *Optical Astronomical Instrumentation*, ed. S. D'Odorico, Proc. SPIE, **3355**, 409-416, 1998
7. 海老塚 昇・家 正則・佐々木 敏由紀・若木 守明, "すばる望遠鏡観測装置用分散素子の開発～深い溝のグリズムおよびImmersion Gratingの製法～", *光アライアンス No.9*, Vol.2, 5-11, 1998
8. T. Onaka, Y. Sugiyama and S. Miura, "Telescope system of the infrared imaging surveyor (IRIS)" *Infrared Astronomical Instrumentation*, ed. M.F. Albert, Proc. SPIE, **3354**, 900-904, 1998
9. H. Ohmori, "Electrolytic In-Process Dressing (ELID) Grinding", *Int. J. Jpn. Soc. Prec. Eng.*, **26**, 273-278, 1992
- 10 大森 整, "ELID研削加工技術のすべて" *機械と工具*, 1997年3月号～1998年9月号連載
11. <http://www.elid.ne.jp/contents/index.html>
12. N. Ebizuka, S. Morita, H. Ohmori, Y. Yamagata, H. Kobayashi, Y. Hirahara, M. Wakaki and K. Kawaguchi "Development of immersion gratings for Subaru Telescope by means of ELID grinding method", *Advances in Abrasive Technology III*, eds. N. Yasunaga, J. Tamaki, K. Suzuki and T. Uematsu, The Soc. of Grinding Engineers Jpn, 149-154, 2000
13. N. Ebizuka, H. Kobayashi, Y. Hirahara, M. Wakaki, K. Kawaguchi "Development of gratings and immersion gratings for the spectrographs of the Subaru Telescope", *Imaging the Universe in Three Dimensions* eds. W. van Breugel and J. Bland-Hawthorn, Astro. Soc. of the Pacific Conf. Ser. **195**, 564-567, 2000
14. 佐々木 敏由紀・家 正則・西村 徹郎・野口 猛・川口 健太郎・若木 守明・海老塚 昇, "究極の透過型回折格子(グリズム)の試作", 平成11年度科研費基盤B 成果報告書, 研究課題番号: 09559018, 2000
15. 戎崎 俊一, "JEM暴露部における宇宙飛行士による大型天体観測装置の組み立ての予備研究", 平成12年度日本宇宙フォーラム地上公募研究成果報告書, 2001
16. 戴 玉堂・林 偉民・大森 整・海老塚 昇・戎崎 俊一・安斎 正博・田代 英雄・牧野内 昭武, "天文望遠鏡用大型軽量ミラーのELID研削に関する基礎研究(マシニングセンターによるCVD-SiC平面ミラーの製作)", 日本機械学会2001年秋期講演会予稿集, 2001/11/22