

研削加工による光学素子の創成と面形状の評価

佐藤修二(名大理)

12/15(2018)

レジュメ:

研削加工を用いた反射望遠鏡光学系の可能性の提案である。
可能性=“feasibility”は、下の3つ [A B C]の要素 が大切である。

A-研削加工

B-形状評価

C-天文観測

A-研削加工の限界:小物(500mm以下)であれば、超精密研削加工10nm・rmsが実現できよう。

B-形状評価の限界:研削面の反射率Rの向上が必須である。砥石盤程#3000以上で“反射”する。

C-天文観測の展開:補正系に研削(主一副鏡は研磨)を用いた『超精密加工』をする。
SALT球面望遠鏡をカセグレン形式とし、その補正系を屈折から反射に換える。

望遠鏡として 1.5m単体および4.5m{=1.5m \times 7(=1+6)面}複合 を提案

※本ファイルは、当日の発表の質疑と考察を加えて、少し加筆訂正されている。

研削加工による光学素子の創成と面形状の評価

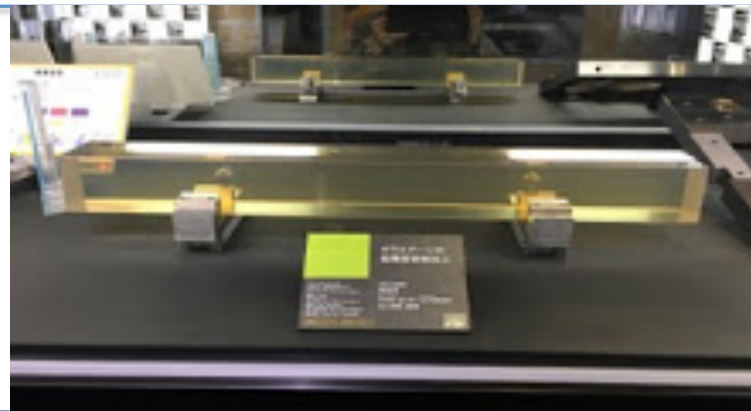
佐藤修二(名大理)

12/15(2018)

ナガセインテグレックスの展示品

ガラスゲージ
超精密研削加工

0.62 μ m/570mm

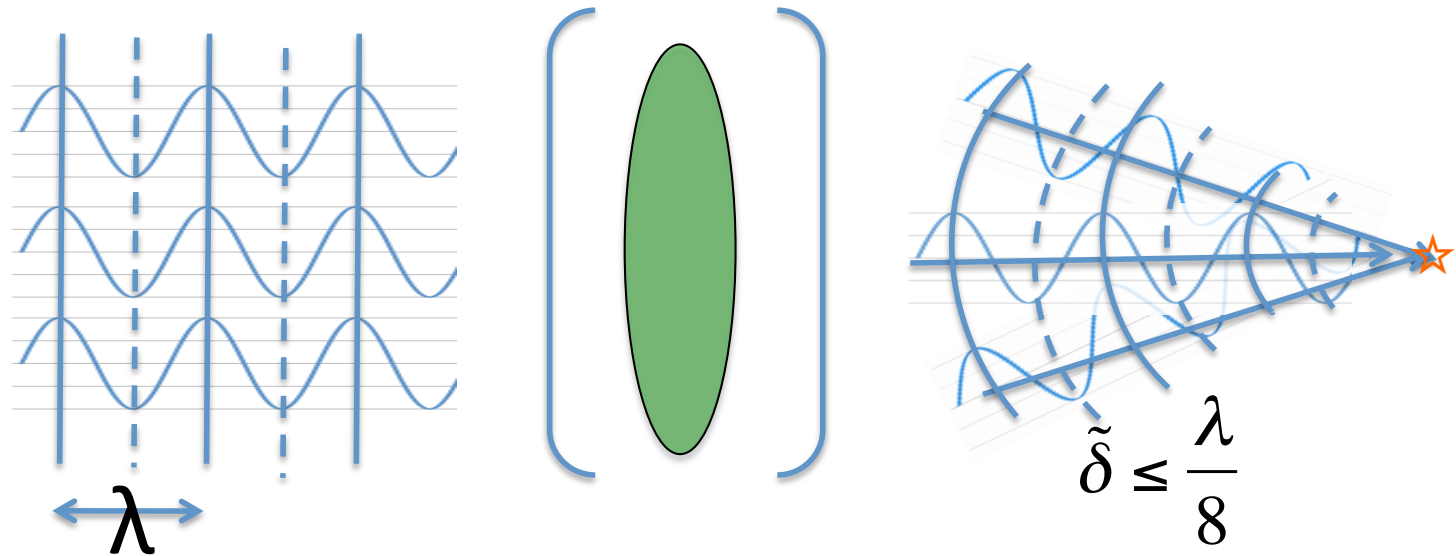


A-研削加工の限界

B-形状評価の限界

C-天文観測の展開

波面誤差



透過： $\frac{\lambda}{8} \times \frac{n}{n-1}$ $\delta \approx \frac{3}{8} \lambda$ for $n = 1.5$
 (屈折)
 反射： $\frac{\lambda}{8} \times \frac{1}{2}$ $\delta \approx \frac{1}{16} \lambda$

λ ; 赤外—可視—紫外
 小文字

測定

表8.6 研削工作物測定用測定機器

測定項目	測定機器	最小分解能(μm)
寸法精度 寸法精度	ノギス	50~100
	マイクロメータ	1~10
	ダイヤルゲージ	1~10
	工具,工場顕微鏡	0.5~10
	空気マイクロメータ	0.1~1
	電気マイクロメータ	0.01~1
	レーザ測定機	0.01~0.1
仕上げ 面粗さ	接触式表面粗さ計	0.01~0.1
	光切断式表面粗さ計	0.01~0.1
	光ファイバ測定器	0.01~0.1
	光電顕微鏡	0.01~1
形状精度	投影検査機	1~10
	形状測定機	1~10
	三次元測定機	0.1~1
	真円度測定機	0.1~1

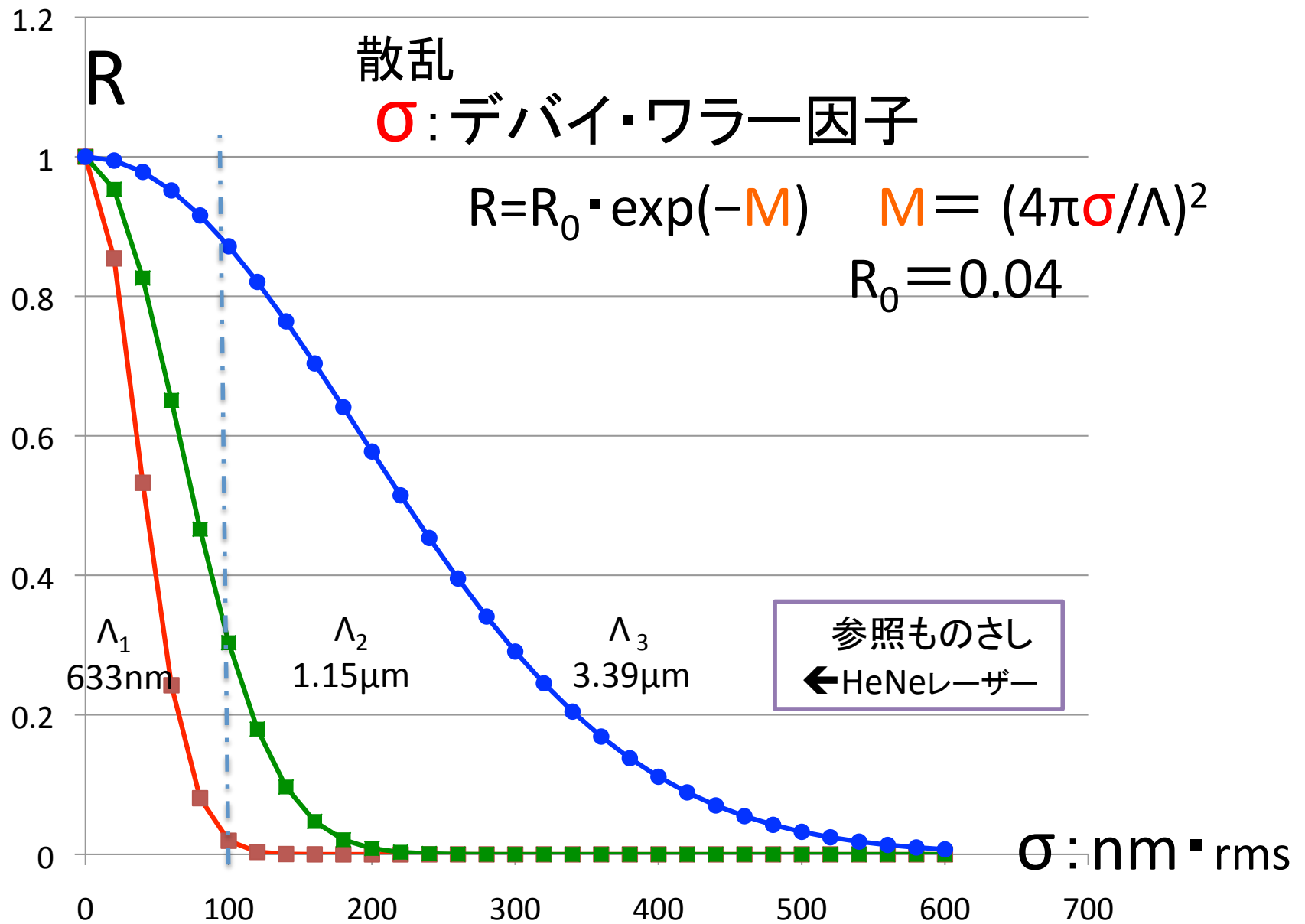
測定項目
L/D
σ
$\{Z; X/Y\}$

結像 サイズ	フーコーテスト ハルトマンテスト	
面形状	干渉計	$\lambda/50 \sim 100$ or more

光線追跡 (法線→接平面)
$\delta(x,y)$ ※実焦点!

面形状	栗田三点法	
-----	--------------	--

--



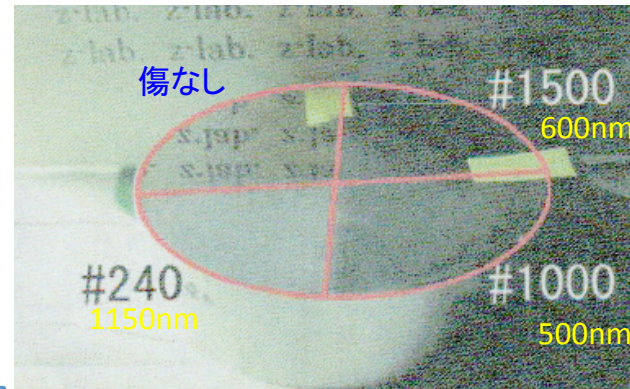
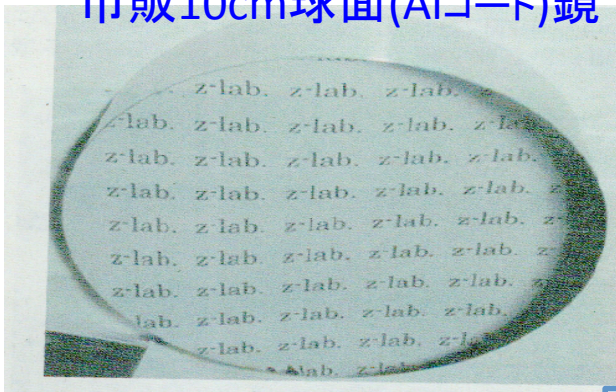
これまでやってきたこと

- ~1992
- ~2000
- ~2005 60cm研削鏡 面精度 $\delta \sim 300\text{nm}$ with レーザー(スキャン)干渉計?
- ~2005 60cm研削鏡 面精度 $\delta \sim 300\text{nm}$ with レーザー(スキャン)干渉計?
- ー2008 市販10cm球面Alコート鏡 赤外CGH干渉計HeNe $\lambda = 3.39\mu\text{m}$ 自作 [宮崎くん](#)

- ー2015 球面{主/副}鏡アプラナート光学系 [木野くん](#)
- ー2016 10cm鏡 焼結ボンド#8000研削 干渉縞 [所くん](#)
理研 ZYGO干渉計 HeNe $\lambda = 633\text{nm}$ $\delta \sim 30\text{nm}$ σ ? [海老塚/近藤/笹子くん](#)
- ー2017 面粗さ σ テスト #2000, #4000, #6000, #8000 [所くん](#)
キーエンスレーザー干渉計 $\delta \sim ?$ Σ -----

赤外波(3.39 μm)を用いた鏡面形状測定用CGH干渉計の開発

市販10cm球面(Alコート)鏡



面粗さ:rms
サーフコーダ社
ET-4000A

4分割
スクラッチ

参照ものさし
 $\Lambda=3.39\mu\text{m}$

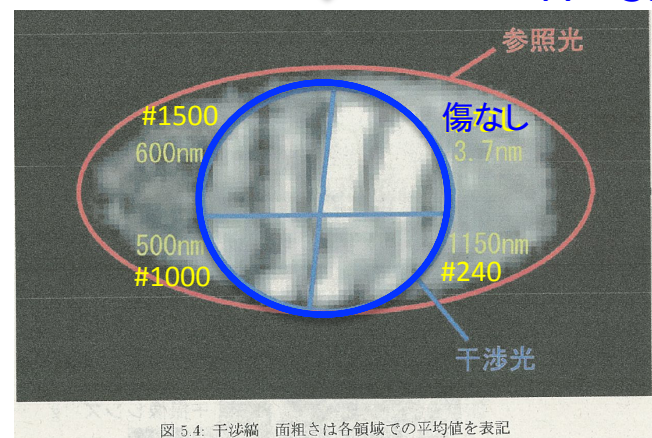
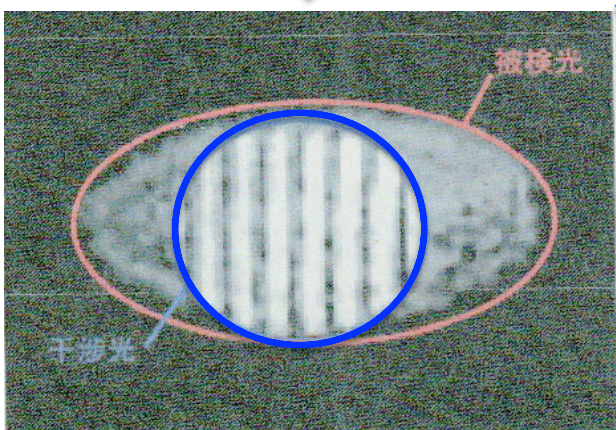


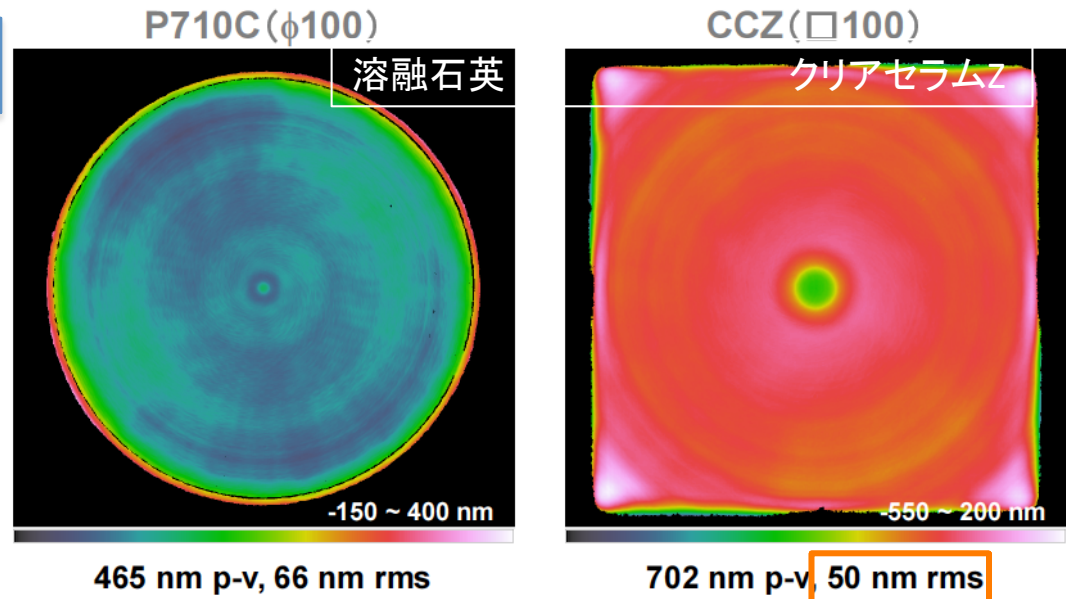
図 5.4: 干渉縞 面粗さは各領域での平均値を表記

高次非球面鏡の創成

木野光学系の勉強会 10/06(2016)

所 仁志

- 理研の干渉計で測定(海老塚さん、笹子さん、近藤さん)



まとめ

- 従来の製造方法(精密研削+修正研磨)で形状精度 109 nm p-v、11 nm rmsが可能
- ビトリファイドボンド砥石を用いた超精密研削で、CCZ に対して形状精度 71 nm p-v、12 nm rms、表面粗さ 13.5 nm p-v、1.6 nm rmsの凹球面鏡の製作に成功
- NC制御の加工機にとって球面・非球面の違いはないので、高次非球面鏡の製作も可能

概要 テスト加工の目的- 本番で使用する砥石の選定

加工機: N2C-53U

砥石: ビトリファイドボンド砥石 (f250×t10) - #2000, #4000, #6000, #8000の4種類

サンプル: f200×t5 Zerodur 3枚 (Samp A, B, C) -

前加工面は#100~200, 研削面- テスト加工の形状は平面

まとめ

すべての砥石 (#2000, #4000, #6000, #8000) で、t5の Zerodur が破損なく加工できる。

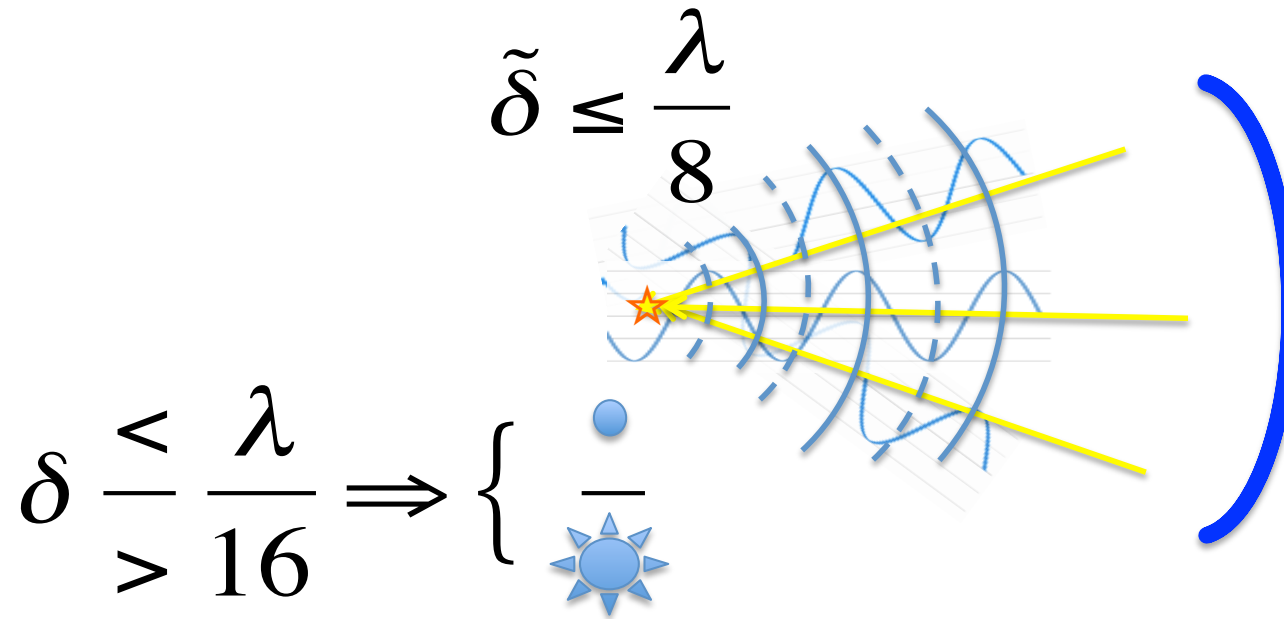
表面粗さは以下の通り

	#2000	#4000	#6000	#8000
Sz [nm]	1800	390~610	22	15
Sq [nm]	150	18~38	3	1.9
Rz [nm]	880	80~320	11	8
Rq [nm]	140	9~35	2.1	1.6

まとめ 今回のテスト加工と本番の除去量は以下の通り #4000, #6000, #8000については砥石の耐久試験が必要

	#2000	#4000	#6000	#8000
テスト加工 [mm ³] *1	12,466	1,923	829	565
本番 [mm ³]	55,912(34 mm除去)	16,445(10 mm除去)	16,445(10 mm除去)	16,445(10 mm除去)
除去量比	4.5	8.6	19.8	29.1
除去量比 (砥石径を考慮*2)		1.9	3.6	8.3 12.1

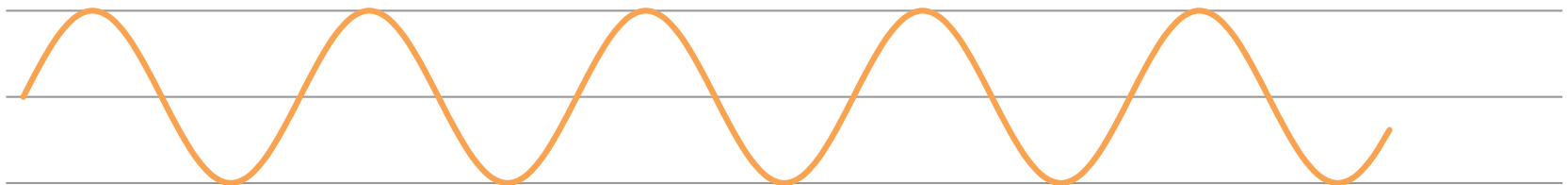
*1: 全面当たりするまでの除去体積を面積×切込み/2とした*2: 今回のテスト加工はf250、本番はf600を想定本番の加工条件 今回のテスト加工と砥石・テーブルの周速度、最大砥粒切込み深さ、砥粒切削長さを揃える



$$\sigma \quad \# 8000 \Rightarrow \# 6000$$

$$\Lambda \quad 633nm \Rightarrow 1.15 \mu m$$

$$R = R_0 \exp\{-M\} \Rightarrow \frac{S}{N}$$

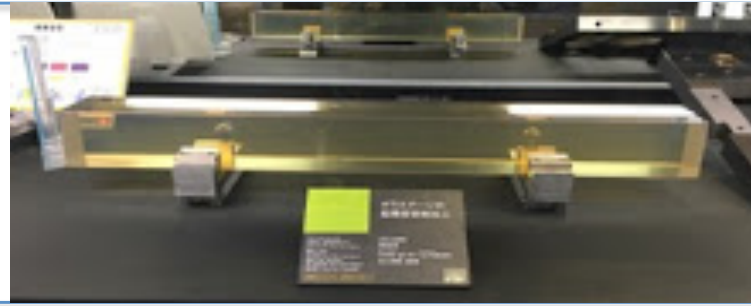


研削加工による光学素子の創成と面形状の評価

ナガセインテグレーションの展示品

ガラスゲージ
超精密研削加工

0.62 μ m/570mm



A-研削加工の限界

B-形状評価の限界

未発の可能性

30nm/100mm~or more

C-天文観測の展開

(主副とも)球面望遠鏡: アプラナー特解

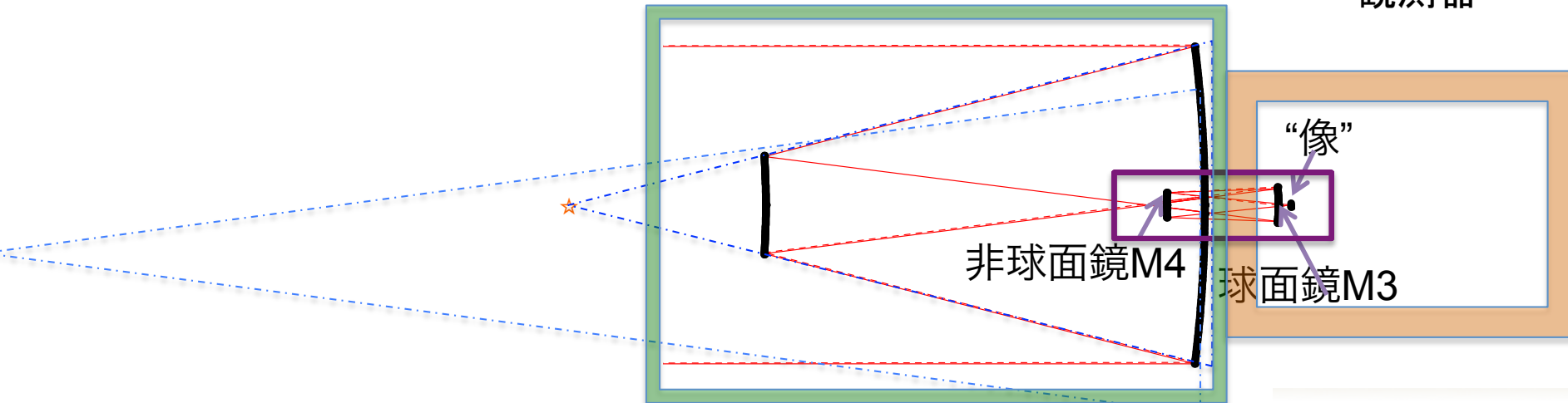
2017年春期天文学会

[ザイデル5収差のうち]

球面副鏡M2

球面主鏡M1

観測器



加工方式

測定方式

球面M2	球面M1
研磨	研磨
ファイザー/CGH いずれも可	
※副鏡: 凹/凸 ニュートン縞	

補正M3/M4
研削
CGH

※すべての素子
個々単独で測定可

球面望遠鏡(主副とも) with 観測器
on 軽量可搬架台

そこで
再現するか
要 確認

凹：球面鏡 口径10cm／球面半径2m

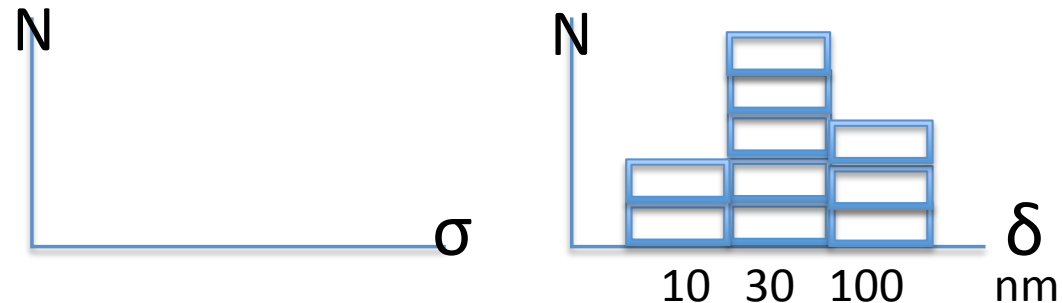
○ナガセ・超精密研削盤 N²C ---

○焼結ボンド #2000, #4000, #6000, #8000

$\sigma =$ $\delta =$

$N = 1 + 9 \rightarrow 10$ 面

$\sigma =$ $\sigma \pm \Delta\sigma$ $\delta =$ $\delta \pm \Delta\delta$



(1) 創成方式

超微粒子径 (#8000) 焼結ボンドで研削後、干渉計で直接面精度を測定

(2) 評価方式

: CGH干渉計 独自開発の干渉計である

物理的にヌルレンズを製作するかわりに、CGH (Computer Generated) (ホログラム) パターンによって、所定の波面を発生させる

レーザー平行光束を 次数で2本に分離したあと、重ね合わせ(干渉させ)る

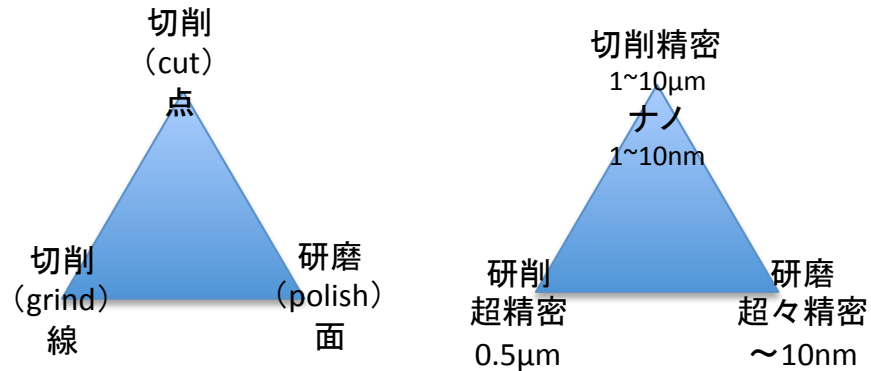
標準的なフィゾー干渉方式に比べて、CGH干渉計は、2本の光路が、ほぼ等しい光路長で、かつ近接している(common-path)のために、大気ゆらぎや擾乱に対して、はるかに頑丈である。

比較対照表	フィゾー干渉計	CGH干渉計
分離方式	振幅	波面＝次数
光路系	部分的に共有(コモン)するが、光路長の差が大	近接して分離するが、光路長の差が小
参照面	実物ヌルレンズ	ホログラム

鏡面創成の方式全般について

鏡面創成には3方式ある；『切削』『研削』『研磨』

『切削』
『研削』
『研磨』



※ 通常、『切削』は精密級(1~10 μ m)であるが、良く制御された環境下で、研ぎ澄まされた単結晶ダイヤモンドによる『切削』によって、『ナノ』加工(~nm)の軸対称鏡面加工が可能。

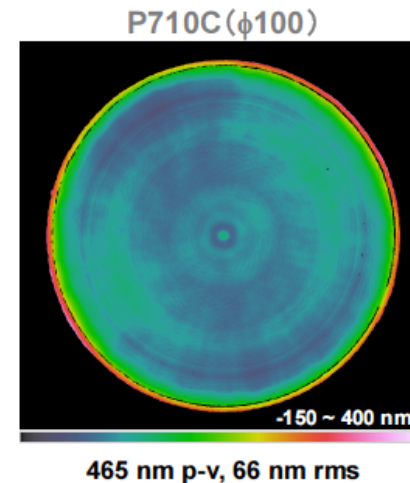
本提案では、3つの方式の中間にあたる『研削』加工によって、~10nmの超精密級の鏡面加工の可能性を追求する。

工作機械 刃物一切削液—加工圧—保持 環境

超精密加工では、技術は、加工**条件の管理**が決定的

工作機械：研削盤自体の指示や駆動の性能は、すでにナノオーダーにある。しかし、『研削』は仕上げ面が“粗い”ため光学素子には不向きと信じられている。

我々は、砥石の粒度を通常より1桁以上細かい番程#8000で試した所、“反射”面が達成できた；レーザー干渉計(HeNe@ λ 633nm)を使ってフリッジを取得して鏡面の等高線を、30nm・rmsの精度で測定すること ができた。(図参照)



研削面(クリアセラムZ:100φの面形状測定ザイゴ干渉計@理研

現状のこの値は、試行段階であり、研削面の光学的測定が可能であることを実証したことが重要。

測定精度、加工精度ともに $1/60\lambda \sim 10$ nmに到達できる、すなわち、『研削』によって、光学素子の実現可能になると判断する。

●超²精密形状創成研削盤

N²C series

1nm

10nm

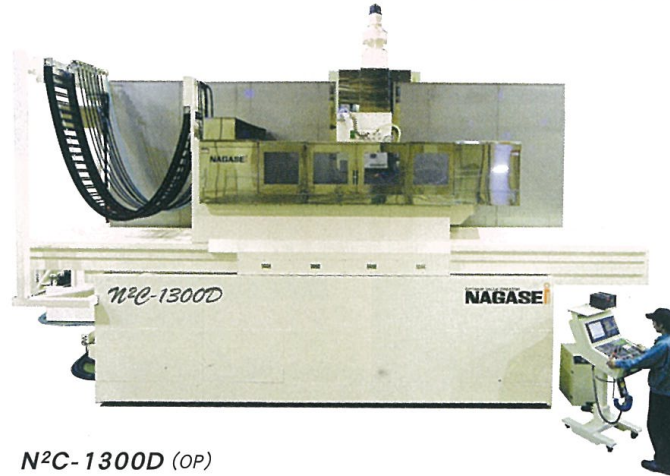
サドルタイプ・コラムタイプ

- 機械サイズ…53(サドルタイプ)
104・123・156・158・1400D(コラムタイプ)
- N C 制御…N
- 軸 仕 様…S⁴(砥石軸:油静圧軸受)
(上下・前後・左右軸:油静圧案内)
- 最小分解能…レギュラータイプ10nm (0.01 μ m)
プレジジョンタイプ1nm (0.01 μ m)

限りなくゼロに近い加工精度が追求可能なマシン。
3軸10nm分解能を達成し、加工点位置での高精度繰り返し再現性10nm以下を達成。砥石加工・固定バイト加工・フライカッター加工・磨き研削の複合加工に対応。
超精密補間制御追従性により、中面積から大物ワークに至るまで超精密非球面・超精密平面・成形加工が可能です。



[コラムタイプ]



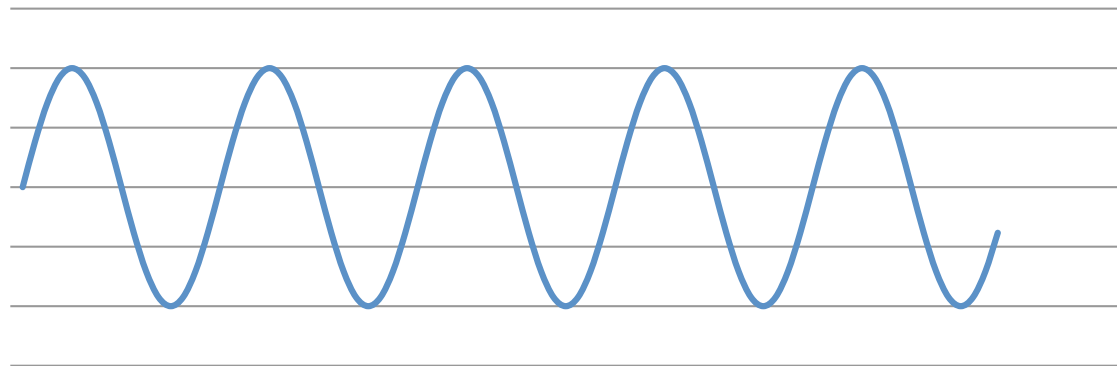
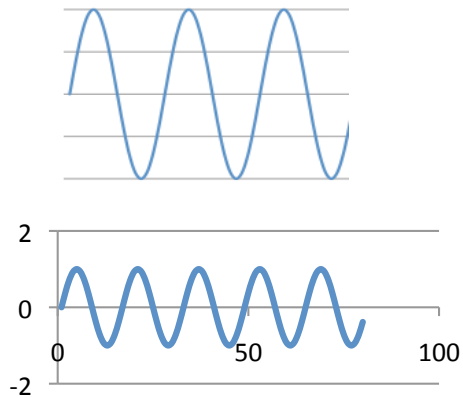
N²C-1300D (OP)



■大型台形非球面レンズの加工の様子(1300D)



■非球面レンズ(φ200サイズ)の超鏡面研削加工



機械加工による光学素子の創成と評価

- 目的 (概要)
- ① 研削法による光学素子の創成
 - ② 簡便かつ安定な干渉計の開発 ⇔ CGH 準コモンパス
 - ③ 工作機械一般の駆動精度評価

許される波面誤差 と 要求される加工精度

光学素子として機能するには、素子が発生する波面誤差が使用する波長の1/8 (i.e. $\lambda/8$) であることが標準である。

光学素子を、反射として、あるいは屈折として用いるかによって異なる。反射面では光路が往復するために $\lambda/16$ 、屈折面では $\lambda/(n-1)$ 。本研究では、反射面を考え、許容誤差を $\sim\lambda/16$ とする。したがって、赤外 $\sim 5\mu\text{m}$ 、可視 $\sim 0.5\mu\text{m}$ 、紫外 $\sim 0.2\mu\text{m}$ 、の要求精度はそれぞれ、超精密、超々精密級、の加工精度が要求される。

	10 μm	1 μm	100nm	10nm	1nm
波長: λ	赤外 5 μm	可視 0.5 μm 紫外 0.2 μm			
許容誤差 $\sim\lambda/16$		赤外 300nm	可視 30nm 紫外 12nm		
要求精度	精密加工 [10 \sim 1 μm]	超精密 [1 μm \sim 100nm]	超々精密 [100 \sim 10nm]	ナノ加工 [10 \sim 1nm]	
測定精度				30nm \Rightarrow 5nm	

仕上がり製品の検査には加工精度の数分の一の測定精度が必要となる
技術検討会12/15.2018

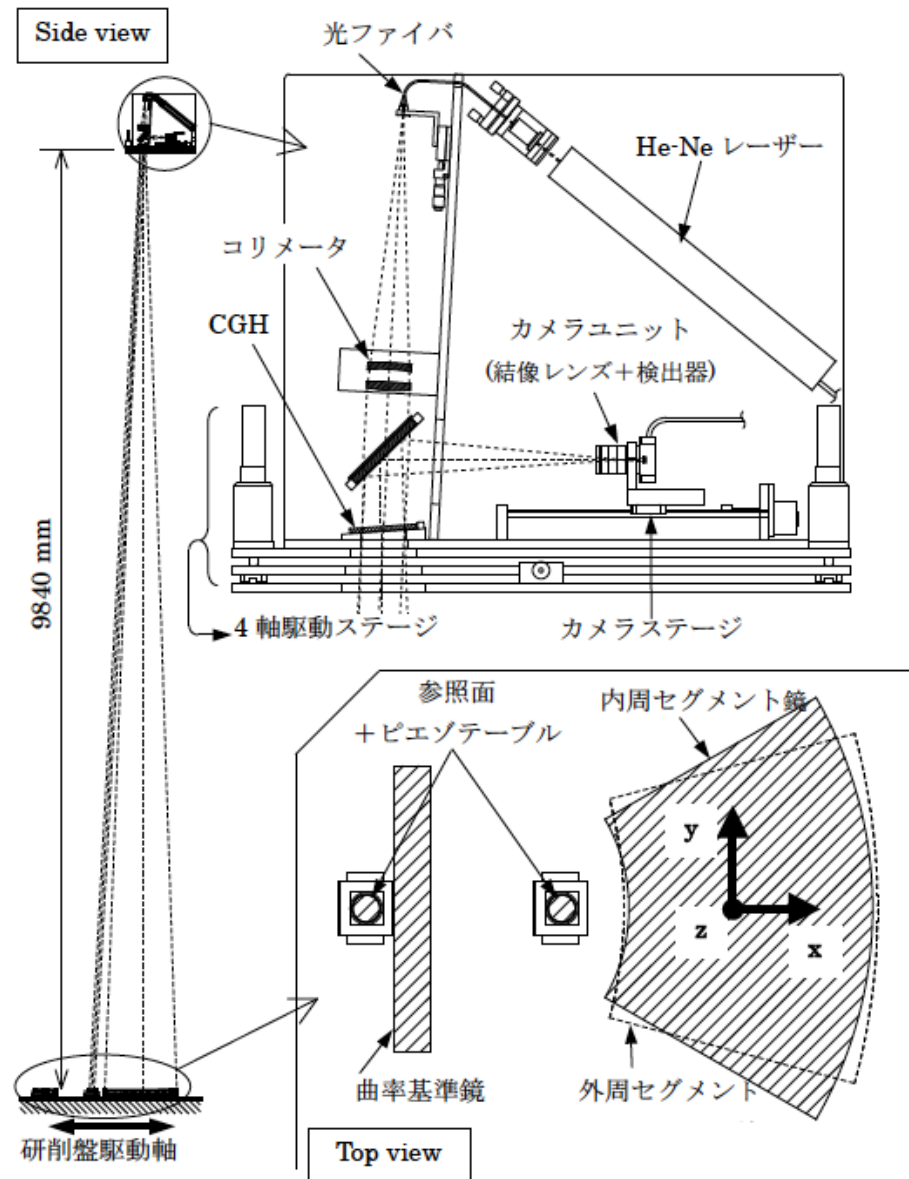


図 4.4 CGH 干渉計システム全体の構成図。干渉計は被検面の上方 10m にある位置調整テーブルに設置される。右上には干渉計本体、右下には被検面周辺の詳細図を示す。