

光学ガラスの高能率加工と多層蒸着技術の開発

大柴 勝彦・上條 幹人・小松 利安・佐藤 邦之*・大原 太一*

Development of High Efficiency Machining for Optical Glass and Multi-Layer Deposition

Katuhiko OSHIBA, Mikito KAMIJO, Toshiyasu KOMATSU, Kuniyuki SATO and Taichi OHARA

要 約

光学ミラー等に使用する光学ガラスの鏡面加工についてELID研削加工技術を応用することによって、従来のラッピング工程を省略できる可能性が得られた。また、光学プリズム等の研磨面上に可視域において、必要な反射率を得るための多層蒸着技術 (Al_2O_3 , ZrO_2 , MgF_2) を確立することができた。

1. 緒 言

光学ガラスの鏡面加工は、一般的にラッピング加工後ポリッシングを行っているが、ジグ取り付けがやっかいなことと加工時間が掛かるため、能率的な加工方法が求められている。そこで、大森¹⁾らが開発したELID研削技術を応用して、平面研削盤でワンチャックにて、粗研削から仕上げ研削まで同一盤上で行うことを検討した。

また、鏡面加工したフィルター、プリズム等の表面に可視域の波長帯において、必要な反射率(分光特性)を得るための多層膜を成膜する蒸着技術の確立が急務となっている。本報は、多層蒸着理論²⁾に基づき、解析ソフトウェアでシミュレーションを行い、この結果を利用しながら最適な多層膜を作成する手法の確立を目的とした。

2. 光学ガラスの高能率加工

2-1 実験方法

加工実験は、精密平面研削盤(カールユング社製: JF520)を使用し、砥石は荒加工用には#325、中仕上げは#1000、仕上げは#4000の鑄鉄ボンド系である。特に、仕上げ用の砥石は、砥粒がダイヤモンド、cBNおよびダイヤモンドとcBNが1:1に混合した複合砥石の3種類である。

実験に使用した光学ガラスは、表1に示すような特性を持っている。BK-7は標準的な光学ガラスでSF-2は高屈折率のプリズム等に使用される素材で、欠けやすく、比較的加工しにくい。試料は30×30×25mmで、それぞれを研削用ジグにワックス(日化精工製: エレクトロンワックス)で固定した。加工後の研削面の表面粗さは非接触式表面形

状測定機(ワイコ社製: TOPO-3D)で、端面のだけは、接触式表面粗さ計でそれぞれ測定した。表2および表3にそれぞれ研削加工条件とELID電解条件を示す。

表1 光学ガラスの特性

材 料 項 目	BK-7	SF-2
密 度 (g/cm ³)	2.51	3.86
硬 度 (GPa)	5.41	3.73
弾 性 率 (GPa)	81	55
熱 伝 導 率 (W/mK)	1.114	0.735
屈 折 率 (nd)	1.52	1.65

表2 加工条件

	荒加工	中仕上げ	仕上げ加工
砥石周速度 (m/min)	1200	1200	1200
送 り (mm/PASS)	2.0	1.0	0.5
工作物速度 (m/min)	20	20	20
切 込 み (μ)	5.0	3.0	1.0
スパークアウト	3	3	3
研 削 液	ノリタケクールCEM(50倍)		

表3 ELID電解条件

設 定 電 圧 (V)	90
設 定 電 流 (A)	12
パルス幅 τ (μ s)	2/2 (ON/OFF)
電極ギャップ (mm)	0.2

2-2 結果及び考察

図1に表面粗さ、図2に端面形状(だれ)の測定結果を示す。表面粗さはいずれの砥石の場合もSF-2の方が1.5

* (株)ミタテ光学工業株式会社

倍程度悪い。これはSF-2の方が硬度、弾性率ともに低い
ため、砥粒がより食い込みやすかったため²⁾と考えられ
る。だれについては逆にSF-2の方がBK-7と比較して
良くなっている。これは、砥石と被研削材の硬度差に起因
する塑性変形量の差によるものと考えられる。

砥石の影響は、BK-7の場合、ダイヤモンド砥石では
表面粗さが小さくなるものの、端面のだれは大きくなる傾
向を示し、逆にcBN砥石では、だれは小さいが表面粗さは
悪くなっている。また、SF-2の場合には、表面粗さはど
の砥石を用いてもほとんど変わらないが、だれはcBN砥石
の方がダイヤモンドより大きかった。総合的に表面粗さ、
端面のだれが良好なのは複合砥石という結果が得られた。

また、ELID研削でラッピング加工工程の省力化が可能
かどうか確認するため、BK-7をダイヤモンド砥石を使用
して約15 μ mELID研削した後、#1600の酸化セリウム
で20分間ポリシング加工を行った。図3はレーザ干渉計
(Zygo社製：PTI, $\lambda=632.8$ nm)で測定したBK-7の平
面度の結果である。ELID研削後の加工面は3/2~2波
長分のうねりが見られるが、ポリシング後は1/2波長内
の平面度が得られた。この結果から、ELID研削を適用す
ることによって、ラッピング工程が省力化できる可能性が
見いだせた。

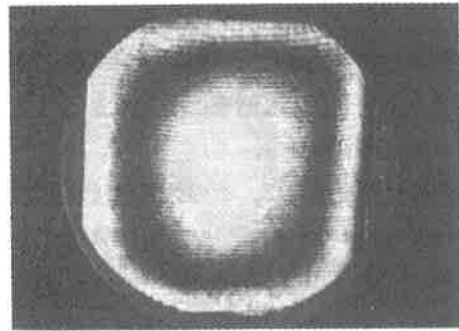


図3 ポリシング後の平面度

3. 多層蒸着技術

3-1 実験方法

3-1-1 シミュレーション

研磨処理した光学ガラス(BK-7)上に、表4に示す
ような反射率特性を持った3層の光学薄膜を作成する。実
験を進めるに当たって多層薄膜設計理論³⁾に基づく解析ソ
フトウェアの「OPTCALC (Optical Thin Film Software)」
をWindows 95上でシミュレーションし、最適な蒸着条件
を求めた。

表4 反射率特性

波長 λ (nm)	380	390	400	440	480
反射率 R (%)	5.00	3.80	2.20	0.65	0.50
波長 λ (nm)	520	560	600	640	680
反射率 R (%)	0.50	0.50	0.50	0.70	1.00

3-1-2 積層構造

図4は目標とした3層膜の積層構造を示したものでベー
スの光学ガラスの上にアルミナ (Al_2O_3)、ジルコニア
(ZrO_2) 及び沸化マグネシウム (MgF_2) の順に積層する。
多層蒸着の場合、熱ストレスによる剥離を避けるため引張
応力、圧縮応力が交互に掛かるような蒸着材を選択し、積
層していく。

MgF_2	$\lambda/4$
ZrO_2	$\lambda/2$
Al_2O_3	$\lambda/4$
光学ガラス	

図4 積層構造

3-1-3 分光特性の測定

積層構造で試作した試料の分光反射率の測定は、自記分

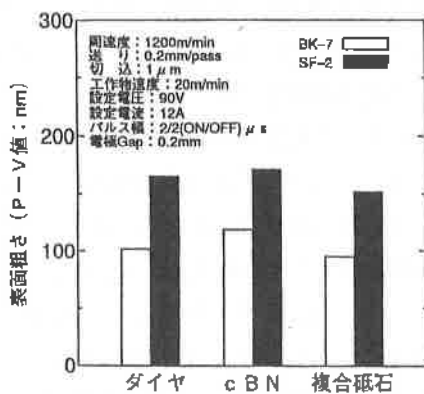


図1 光学ガラスの表面粗さの変化

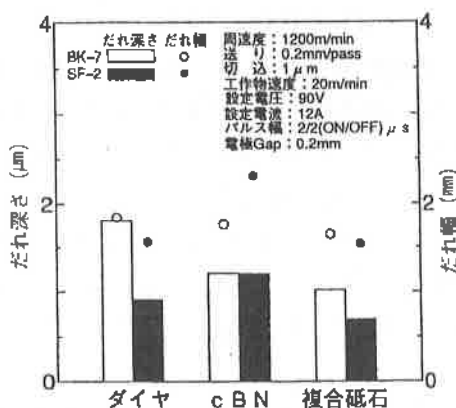


図2 光学ガラスの端面形状の変化

光光度計（島津製UV-3100PC）を使用した。この測定機は大型試料室と5°及び12°の絶対反射率測定装置が付加されていて、ミラー等の反射率が測定できる。

3-1-4 蒸着条件

蒸着装置は日本真空製で、その装置の仕様を表5に示す。電子銃は180°偏向タイプで、ルツボは24点式でハース回転機構を備えている。

蒸着条件は、中心波長が500nmにおける反射率が0.5%のフィルターを作製することを目的とし、1層目（Al₂O₃）、2層目（ZrO₂）及び3層目（MgF₂）の光学的膜厚は、それぞれ $\lambda/4$ 、 $\lambda/2$ 、 $\lambda/4$ に設定し、O₂ガスの導入を図った。

表5 装置の仕様

名称	形式	備考
蒸着装置	800型	チャンパー径
電子銃電源	3 KW	昇圧トランス容量
電子銃	102型	180° 偏向
蒸着	手動	
ルツボ	24点	ハース回転機構
光学式モニター	反射測定	モニター手動
ガス導入システム	RVG-4型	APCコントローラ自動
膜厚計	光学式膜厚計	手動
排気系	オイル拡散式	自動

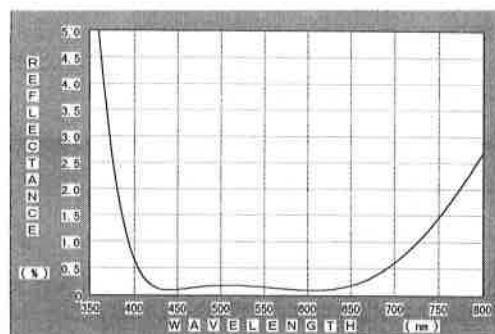
表6 蒸着条件

	1層目	2層目	3層目
蒸着開始真空度	6×10 ⁻⁴ Tor	1×10 ⁻⁴ Tor	2×10 ⁻⁴ Tor
蒸着電流	230mA	170mA	20mA
蒸着電力	6 KW	6 KW	6 KW
ガス導入	O ₂	O ₂	O ₂
光学的膜厚	$\lambda/4$	$\lambda/2$	$\lambda/4$
屈折率	1.62	2.00	1.38
不均質性	なし	あり	なし
初期光量設定	50%	20%	50%
加熱温度	300℃	300℃	300℃
光学ガラス	白板ガラスまたは光学ガラスBK-7		

3-2 結果及び考察

3-2-1 シミュレーション結果

積層構造について、波長領域が350nm~800nmの範囲で「OPTCALC」によりシミュレーションした結果を図5に示す。



タイトル：三層分光特性

層	分散	蒸着物質	N大気	消衰係数	物理膜厚	光学膜厚	中心波長
1	—	Al ₂ O ₃	1.6310	0.0000	78.17	1.000	510.0
2	—	ZrO ₂	1.9946	0.0000	127.85	2.000	510.0
3	—	MgF ₂	1.3800	0.0000	92.39	1.000	510.0

図5 シミュレーション結果

3-2-2 成膜結果

表6の1層目のAl₂O₃膜の蒸着は、通常の高真空度にて蒸着を開始すると、Al₂O₃膜自体が光の吸収膜（干渉色が茶色）となり、絶対透過量が減少し、逆に反射光量が増加した。この現象は、アルミナの膜が生成された結果と考えられる。そこで蒸着中の開始真空度をやや下げる（10⁻⁴Torrオーダー）ことと、蒸着速度をやや遅くすることによって、干渉色が透明感を持った膜を作製することができた。

次に、2層目のZrO₂膜の蒸着は、光学式モニターの光量値に不均質な光量変化が観察された。この光量変化は、 $\lambda/4$ 以上の光学的膜厚に対し顕著であった。これはZrO₂のようにモニター基板より屈折率の高い蒸着材でこの傾向が強く、図6(a)に示すように膜厚が均質の場合は、膜厚 $\lambda/2$ でその光量は初期光量設定値に戻る。しかし、不均質の場合は図6(b)のような変化を示す。そこで、蒸着開始時に、チャンパー内にO₂ガスを導入し、蒸着真空度を下げ、かつ蒸着レートを上げ（蒸着速度を上げる）ながら、初期光量値に対し光学膜厚 $\lambda/2$ で、初期光量設定値に近似的な光量に補正することにより、ZrO₂の屈折率の低下を防止し、均質な膜を作製することができた。

3層目のMgF₂膜については、膜厚計の光量の変化量に伴うピーク値の検出位置が、干渉フィルター、蒸着真空度及び蒸着速度により微妙に変わるので、膜性能に及ぼす影響が考えられるが、最上層の膜としては外部からの密着性、耐久性等について成膜自体の強度性能は実用的に問題がないことが確認できた。この強度検査は、最上層の成膜の硬度測定、密着性および耐湿試験を行うことによって評価した。

具体的には、硬度測定は1mの高さからアランダム砥粒（#1200）1kgを膜面に落下させたとき、傷の発生の有無

によって判定する。密着性試験は、専用のテープを使用した剥離試験である。また耐湿性試験は、試料を恒温恒湿槽(温度20℃、相対湿度65%の条件で)内に入れて、24時間連続試験後の外観検査で判定する。

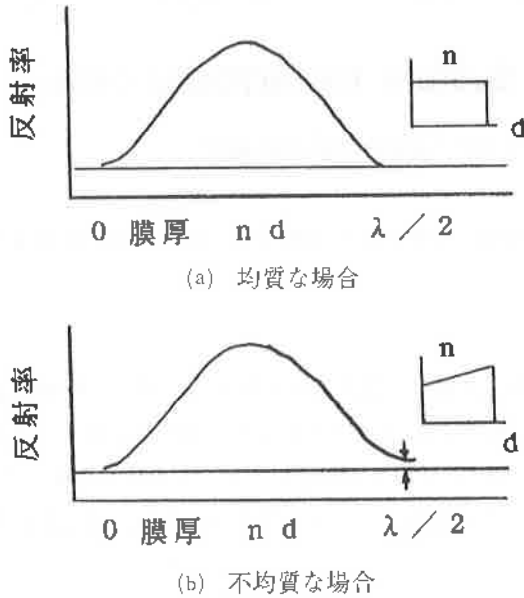
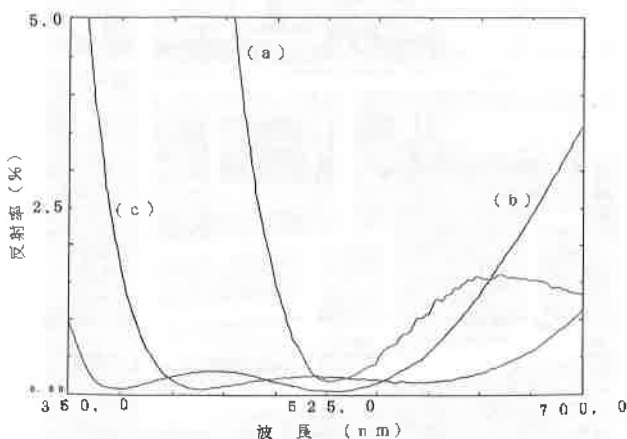


図6 ZrO₂の光量変化

図7は、試作した3層膜の反射率特性を表したもので、(a)は2層目のZrO₂の膜厚がシミュレーションの結果より厚く成膜されたもので青色系が強調されている。(b)は逆に、赤色系が強調された結果で、ZrO₂およびAl₂O₃の膜厚は比較的薄いものと思われる。(a)、(b)はいずれも不完全な成膜であるが、(c)は表4の反射率特性に近い成膜である。

以上の結果より、1層目のAl₂O₃、2層目のZrO₂の膜厚管理が重要なことと、真空度のバラツキが成膜の特性に大きな影響を及ぼすが、3層目のMgF₂の影響はあまり受けなかった。

図7 反射率分光特性



4. 結言

光学ガラスの仕上げ加工において、在来の加工工程の短縮化を図るため研削加工による粗加工からラッピング工程迄をELID研削法を適用した結果、ラッピング工程が省略できる可能性が得られた。また、砥石としてはダイヤモンド砥粒とcBN砥粒の複合砥石が有効であることが分かった。

多層蒸着については、3層反射防止膜の成膜を試みたが所定の波長域における反射率分光特性を得るためには、蒸着条件設定パラメータである蒸着真空度、光学式モニターの光量の変化量及び蒸着速度等の微妙な差が蒸着プロセス上の真空室内の雰囲気を直接支配し、反射率分光特性に大きな影響を与えることが分かった。したがって、この蒸着条件を一定に保持することが、再現性のある成膜を作製するノウハウといえる。この対策として、将来的に自動蒸着制御システムの開発が必要と考える。

なお、本研究は山梨県の創造的中小企業育成支援事業によって実施したもので、研究を進めるにあたり理化学研究所の工学博士大森 整氏並びに(株)テックウェーブ代表取締役の小松山光信氏には多大の御助言と御指導をいただきましたことを感謝申し上げます。

参考文献

- 1) 大森 整他：超精密鏡面加工に対応した電解インプロセスドレッシング(ELID)研削法, 精密工学会誌, 59, 9 (1993) 145
- 2) 海野邦昭：CBN・ダイヤモンドホイールの使い方, 工業調査会 (1969)
- 3) 小松山光信：光学薄膜作製技術資料, コスモ・オプト・エンジニアリング (1989)
- 4) 田畑三郎, 黄 燕清：真空技術による高機能コーティング, 11 刊工業新聞社 (1986) 132
- 5) J. D. Rancourt：OPTICAL THIN FILMS Users Handbook, 小倉繁太郎訳, 日刊工業新聞社 (1991)
- 6) 日本学術振興会薄膜第131委員会：薄膜ハンドブック, オーム社 (1992) 798
- 7) 権田俊一：薄膜作成応用ハンドブック, エヌ・ティー・エス (1995) 121
- 8) H.A.Macleod：光学薄膜, 小倉・中島・矢部・吉田訳, 日刊工業新聞社 (1989) 475