

成形金型切削プロセス最適化によるフレネルスクリーンの 光学特性向上*

王 英 夫^{*1}, 梶 田 正 美^{*2}
西 口 隆^{*1}, 秋 山 秀 俊^{*3}

Optimizing the Cutting Processes of Mold Dies to Improve Optical Characteristics on Fresnel Screens

Ying-Fu WANG, Masami MASUDA,
Takasi NISHIGUCHI and Hidetoshi AKIYAMA

An experimental study of precision cutting of molding dies using single crystal diamond cutting tools for large Fresnel screens (size: T3×921×714 mm, Fresnel angle: 0.004-55.0), for improving the optical characteristics of the screens is described. The conclusions are as follows: (1) A burr is generated at the shoulder of the grooves during cutting, which causes compressed chip material to accumulate and laterally compress both sidewalls of the grooves; (2) The burr generation is suppressed by increase of the rake angle of the diamond cutters, decrease of the down feed rate, and reduction of stock removal; (3) Generation of a color corn on the Fresnel screen is caused by light escaping through non-lens surfaces; this is avoided by making the non-lens surfaces semi-transparent where the surface roughness is around $1\ \mu\text{m } R_{\text{max}}$. Through use of the above-mentioned information to improve the cutting process, desirable optical characteristics were achieved for Fresnel screens used in projection TVs.

Key Words: Cutting, Deburring, Die, Groove Cutting, Burr, Cutting Routine, Fresnel Screen, Surfaces, Semi-Transparent, Optical Characteristic, Projection TV

1. 緒 言

本研究で対象とした背面投影形プロジェクションTV(以下PTVと略す)は、高画質化に向けた光学的な種々の改良がなされており⁽¹⁾、画質も直視形ディスプレイに近いレベルにある⁽²⁾。しかし、レンズの形状自体やその誤差による不要光の干渉等のために、同心円状暗線の発生原因である金型のバリ低減や、カラーコーン(画面の色ずれの一種)の低減といった、より一層の高画質化を図る上でのスクリーンの精度向上が課題となっている。

このフレネルスクリーンは、多数の同心円状のプリズム面を有する溝(以下フレネル溝と呼ぶ)から形成されているが、この形状が複雑なため、一般に剣状のダイヤモンドバイトで切削した金型を用いて、プラスチック成形されている。この金型は面積が広いため、高精度に切削加工するには、加工精度のみならず工具寿命が大きな問題である。この工具寿命向上に関しては、工具形状⁽³⁾や面粗さ向上を図るための被削材の結

晶方位⁽⁴⁾、また、工具の切れ刃稜の使用個所⁽⁴⁾といった観点からの報告がなされている。しかし、加工条件の形状精度、特に溝肩部の形状精度や、これらの光学特性への影響については、まだ明らかにされていないのが現状である。

ところで、対象とした金型は面積が広く、そのために大きな加工機を必要とし、また切削実験にも多大の時間が必要になる。そこで本研究では、まず最初に、 $\phi 140\ \text{mm}$ のモデル金型により、最も問題となるであろう最大傾斜角でのフレネル溝切削について切削実験を行い、形状精度を確保するための課題とその対応策を把握している。次いで、そのデータをもとに、実寸大のフレネルスクリーン成形金型を対象に、切削加工におけるバリ発生原因とその抑制策を明確にするとともに、切削された金型による成形レンズのカラーコーン発生原因の究明とその対応策について検討している。

2. $\phi 140\ \text{mm}$ モデル金型による フレネル溝切削

2・1 実験装置および実験条件 プリズム面の面粗さ向上およびNC制御系指令の簡素化を図る観点から、フレネル溝の切削には、図1に示すように、非

* 原稿受付 1996年10月28日。

^{*1} 正員、(株)日立製作所生産技術研究所(〒244 横浜市戸塚区吉田町292)。

^{*2} 正員、新潟大学(〒950-21 新潟市五十嵐2の町8050)。

^{*3} 日立精工(株)(〒234 海老名市上今泉2100)。

球面創成機(Moore Special Tools社, M-18AG)の主軸上にチャッキングされた $\phi 140$ mmのモデル金型に、単結晶ダイヤモンド剣バイト(以下単に剣バイトという)を用いて、溝深さ方向にのみ切込みを与えるプランジカット方式により切削実験を行っている。特に断らない限り表1に示す切削条件により、切削実験を行った。

このプランジカット方式のフレネル溝の鏡面切削では、溝肩部でのバリ発生が大きな問題になることが予測された。そこで、すくい角 3° 、頂角 45° の剣バイトを用いて、最も傾斜角の大きいプリズム角 θ が 55° 、逃げ角 α が 10° のフレネル溝形状を、切削速度 100 m/min、切込み速度 $10 \mu\text{m}/\text{rev}$ で切削し、バリの発生挙動について観察した。この場合、剣バイトの両切れ刃後で溝を総形切削している。

加工されたフレネル溝の断面は、バリへの影響の小さい冷間埋込み樹脂を用いて固め、断面を切削・研磨した試料を観察した。

2.2 一定傾斜角溝の総形プランジ切削 上記の条件下で切削されたフレネル溝の上面および断面写真の一例を図2に示す。平らな鏡面に写真の右から順に3本の同一形状溝をプランジ切削した例である。非レンズ面の肩部にバリA、プリズム面の肩部にバリBが発生している。両者のバリ高さをそれぞれ a, b とする。逃げ角 α の小さなバリAでは、バリ高さ a は大きく、逃げ角 α' の大きな肩部ではバリ高さが極めて小さく、無視できる程度である。

Table 1 Experimental conditions for $\phi 140$ molding die model

Machine tool	Asherical generator (Moore Special Tools, M-18AG)
Cutting tool	Single crystal diamond Rake angle : 3° , Tip angle : 45°
Workpiece	Molding die model(T3 $\times \phi 140$ mm) Brass(C2801) Bottom angle of grooves : 45°
Cutting conditions	Cutting speed : 100 m/min Down feed rate : $10 \mu\text{m}/\text{rev}$ Cutting fluid : UP-2T

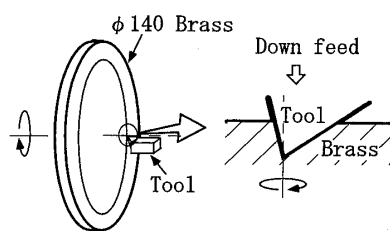


Fig. 1 Model of Fresnel groove cutting

図3の切りくずSEM写真に示すように、切りくずの断面形状が鈍角三角形状となっており、逃げ角 α が小さいほど切りくずの幅に対する切りくず厚さが大きくなり、せん断面に働く圧縮応力の溝幅方向の成分が大きくなることから推測される。このバリの発生現象は、1パス切削とプランジ切削の相違はあるが、V溝を総形で1パス切削している場合について述べている既報⁹⁾の結果とほぼ一致している。しかし、バリ高さが $20 \mu\text{m}$ を超える大きなバリBについては、これらと同様のバリ発生機構では説明できず、隣接溝のプランジ切削による溝の相互干渉に起因してバリBが発生していると考えられる。

次に、切削の進行とともに、これらのバリ高さがどのように変化するかを把握するために、切込み深さとバリの高さとの相関について測定した。その結果を図4, 5に示す。バリ高さ a, b は切込み深さに比例して

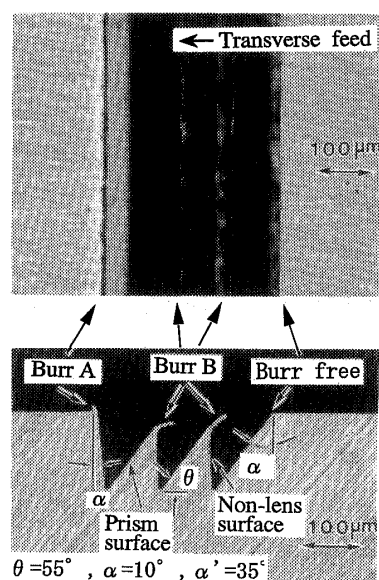


Fig. 2 An example of cross sectional profile as Fresnel Groove cutting

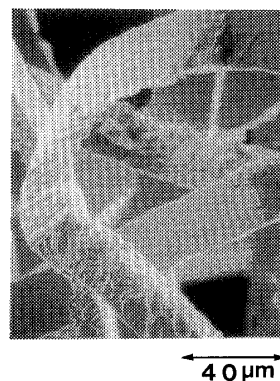
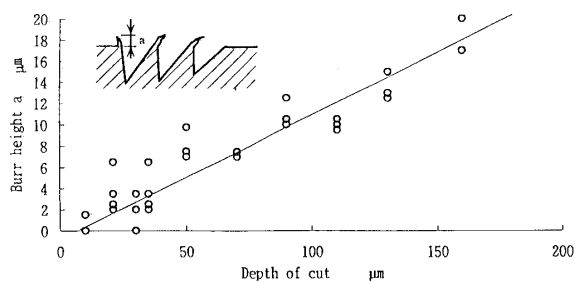
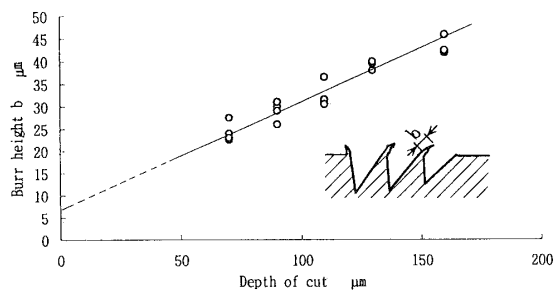


Fig. 3 An example of SEM photograph of chip

Fig. 4 Influence of depth of cut upon burr height a Fig. 5 Influence of depth of cut upon burr height b

成長しており、切込み深さの増大とともに、被削材が逃げて薄片化したバリとなって累積され成長していくといえる。また図5において、グラフの延長線と縦軸との切片から、切込み深さ零のときに、すでにバリ高さ b は約 $6\ \mu\text{m}$ であることを示している。この結果は既報⁵⁾に述べている初期段階に発生するバリ A の高さとはほぼ一致していることから、バリ B が、バリ A の影響を受けて成長しているといえる。すなわち、図6の切削時のバリの変形モデルに示すように、先に発生した「フィン」状のバリ A が後続のプリズム面形成時に、溝肩のバリが弾性変形して逃げ、そのまま溝肩部に連結残存した状態で切削が進行し、特にこの連結している肉厚が薄く、プリズム面形成側が自由空間であるため、被削材が極めて逃げやすく、バリ高さ b が増大したといえる。したがって、実際のフレネルスクリーン金型の仕上がり形状にはバリ B しか存在しておらず、このバリ B の起点となっているバリ A を低減することにより、バリ B も低減できるといえる。この考え方に基づいたバリ抑制切削法について、後述の3・2節で述べる。

なお、バリ A の肉厚は、切込み深さには依存せず、約 $7\ \mu\text{m}$ とほぼ一定となっていることを確認した。

次に、切込み速度および切削速度のバリ高さ b への影響について実験検討した。切込み速度は、加工能率を支配し、大面積の金型では切削速度が広範に変化するため、両者とも極めて重要なパラメータである。切込み速度、切削速度とバリ高さ b との相関を図7に示

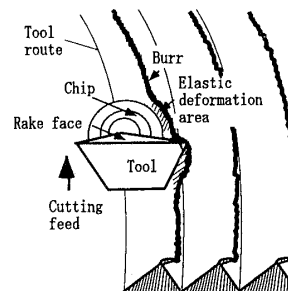
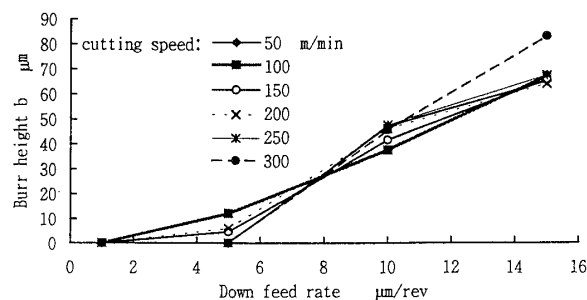


Fig. 6 Schematic drawing of Elastic deformation area of cutting

Fig. 7 Influence of down feed rate upon burr height (case of $\theta=55^\circ$, $\alpha=13^\circ$)

す。このときの切込み深さは $160\ \mu\text{m}$ 一定とした。

図7から明らかなように、切込み速度が $1\ \mu\text{m}/\text{rev}$ のときにはバリが発生していないが、切込み速度の増大に伴いバリ高さ b も増大する。これは、1回転当たりの切込み量が増大すると、せん断面に働く圧縮応力の溝幅方向の成分が大きくなり、バリ B の生成を加速させたと考えられる。また、図7から明らかなように、バリ高さ b は、切削速度にほとんど依存せず、大面積のフレネルスクリーン金型加工にとっては好都合な結果を示している。

2・3 プリズム面の片面切削 上記の切削実験では、剣バイトの両側の二つの切れ刃を使い、同時にプリズム面と非レンズ面の二面を加工しており、切りくずとなるべき被削材部が、切削方向のせん断だけでなく、溝幅方向に拘束され、逃げ場を失った被削材がこの溝幅方向にも大きなせん断応力を受け、切削抵抗が大きく、バリ発生を助長していると考えられる。

この切削抵抗を低減するため、図8に示したプリズム面と非レンズ面を個別の行程で切削する片切刃切削法について検討した。なお、フレネルスクリーンの機能上、非レンズ面とプリズム面の最小挟角(溝底角)は 40° と設計されているため、ここでは頂角 40° の剣バイトを使用した。

この片切刃切削法では、第1行程でのプリズム面を

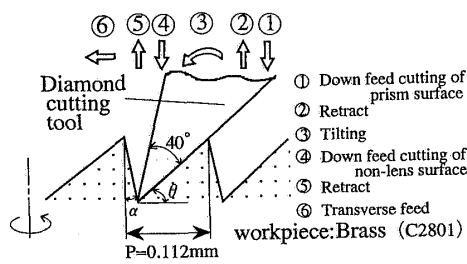


Fig. 8 Two way Cutting process

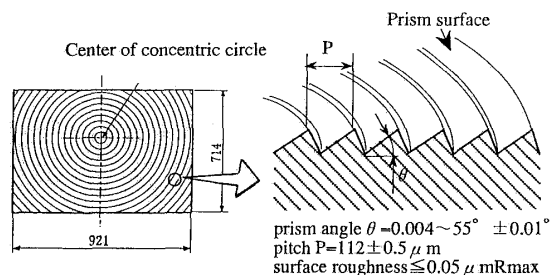


Fig. 11 Scheme of Fresnel Screen

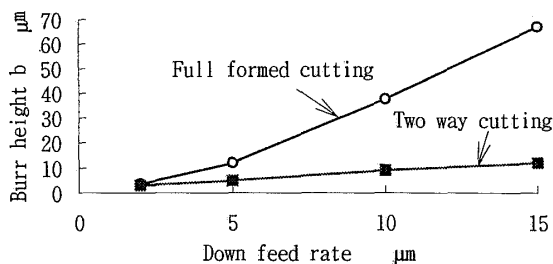


Fig. 9 Influence of full formed cutting and two way cutting upon burr height

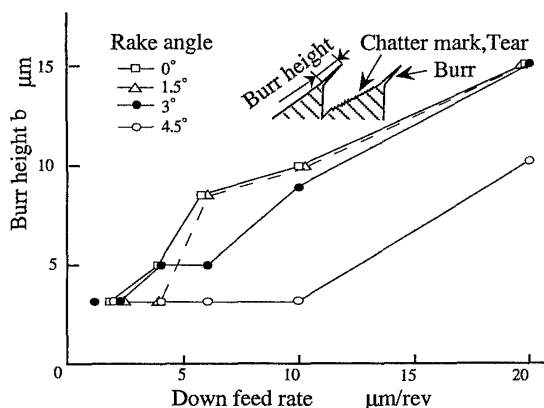


Fig. 10 The Influence of down feed rate upon burr height in prism surface cutting

切削する際に発生したバリ A は、第 2 行程の非レンズ面切削時には除去され、また第 2 行程での溝幅方向の拘束がほとんどなくなるため、切りくず排出も容易になり、切削抵抗も小さくなる。この片切刃切削法によるバリ B への影響について、前述の総形切削法との比較を行った。図 9 にその結果を示す。この片切刃切削法がバリ低減に極めて有効であることがわかる。したがって、以下に述べる切削実験では、片切刃切削法を使用した。

以上のフレネル溝切削実験の結果により、片切刃切削法および低切込み速度とすると、バリ低減に効果があることが明らかになった。しかし、実際のフレネルスクリーン金型が $\phi 1300$ mm と大きいため、低切込み速度では、金型の総切削加工時間が著しく長くなる

という問題が生ずる。生産性の点からは、切込み速度を向上することが望ましい。

そこで、種々のバイトすくい角のもとで、切込み速度とバリ高さとの相関について実験検討した。その結果を図 10 に示す。バイトすくい角 0° 、 1.5° に比べ、 3° と 4.5° のほうがバリ高さが小さく、特に 4.5° の場合には、切込み速度を $10 \mu\text{m}/\text{rev}$ 以下では、切込み速度による影響がほとんどなく、バリ高さが $3 \mu\text{m}$ 一定となる。なお、このような鋭角の剣バイトでは、さらにすくい角を大きくすることは、刃先強度が低下するため、極めて難しい。

以上のフレネル溝の切削結果を基に、図 11 に示すような 42° PTV 用フレネルスクリーン成形金型 ($921 \times 714 \times T3$ mm) の切削加工実験を行った。以下に、そのバリ発生挙動および対策について述べる。

3. フレネルスクリーン金型の 大面積溝切削

3.1 実験装置および実験条件 実寸大のフレネルスクリーン金型に対しては、図 12 の精密ジグポラ (SIP 社 740 型) を用いて実験を行った。以下、特に断らない限り表 2 に示す条件により切削実験を行った。

ここでは、両切れ刃稜の交差する先端に $R5 \mu\text{m}$ のノーズ半径をもつ剣バイトを使用していた。このため図 12 に示した装置の工具保持系には、このノーズ半径の中心を回転中心として回転可能で高剛性のセクタ状動圧軸受機構を採用しており、この工具保持系を、ポーリングヘッド主軸部端面に固定した。この機構を用いることにより、各プリズム角に対応した剣バイト傾斜の際の切刃先端位置の移動誤差をなくし、制御指令を簡便にした。

また工作物支持系には、精密空気軸受 (PIC 社、10B) を採用した大径のロータリテーブルを用いて、真空チャックにて工作物をチャッキングした。

Table 2 Cutting conditions of Fresnel Screen molding die

Machine tool	Precision Jig borer (SIP740)
Cutting tool	Single crystal diamond Rake angle : 4.5° , Tip angle : 45°
Workpiece	Molding die (T3×φ 1300mm) Brass(C2801) Prism angle of groove : 0~ 55° Relief angle of groove : 2~ 15°
Cutting conditions	Cutting speed : 0.11~580 m/min Down feed rate : 10 μm/rev Cutting fluid : UP-2T

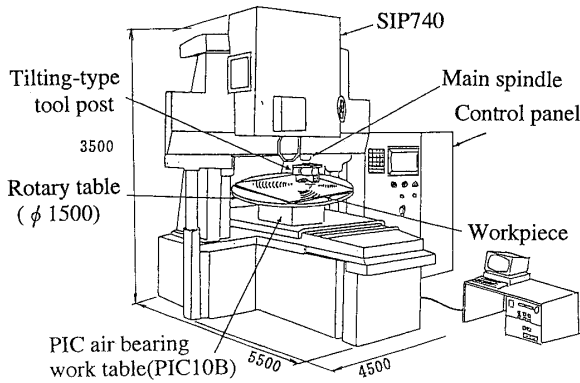


Fig. 12 Experimental equipment

3・2 バリ抑制切削法を用いた異なる傾斜角度をもつプリズム面の切削 2章では、傾斜角度が一定の実験結果を述べた。しかし、実際のフレネルスクリーン金型では、逃げ角 α とプリズム角 θ が外周に向かって、徐々に増大するという種々の異なる傾斜角度をもつ多面形状をしており、切削加工する際に、プリズム面と非レンズ面の交差する山頂部に、傾斜角度の相違によるとり代の変動が原因と考えられるバリが多発した。またバリ高さ b はプリズム角と逃げ角に依存し、バリ高さが変動している。このバリ高さが変化した理由は、Burnham⁽⁶⁾ の工具のシャープネスや2・2節で述べたように、切込み速度が変化したためとは言い難い。この個所にバリが形成される理由としては、図4に示すように切込み量が増すに伴い、バリ高さも増大することから、バイトが金型の前加工面から切り込む際、プリズム角や逃げ角が変化し、山頂部より上方にあるとり代が変化するためと考えられる。

この仮説に立てば、バリ発生を抑制するには、

- (1) 図4に示しているグラフの縦軸との切片を下げることで、また
- (2) プリズム面を切削する工具切れ刃と、この余肉を除去した面とのなす角 θ' を鈍角化すること。

により、バリを低減できるといえる。すなわち

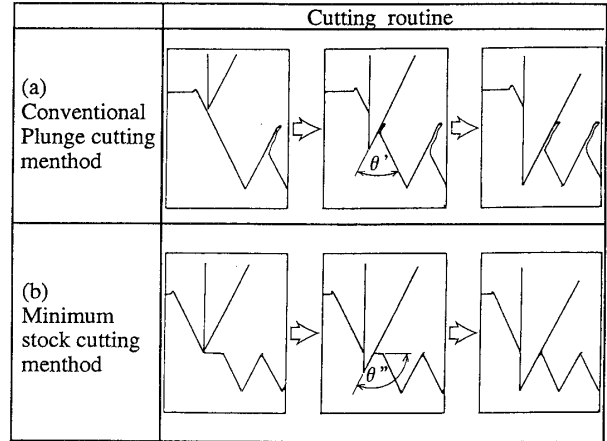


Fig. 13 Comparison of cutting routine for controlling burr

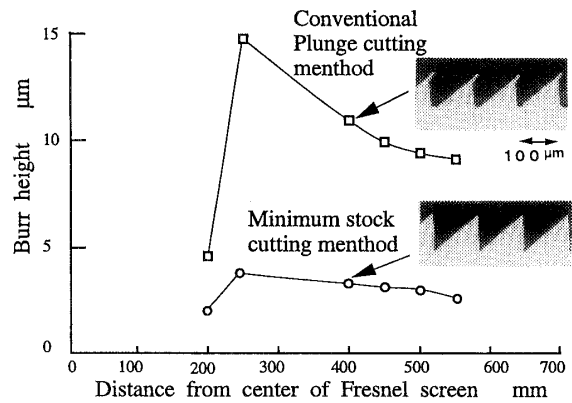


Fig. 14 Correlation between distance from center of Fresnel screen and burr height

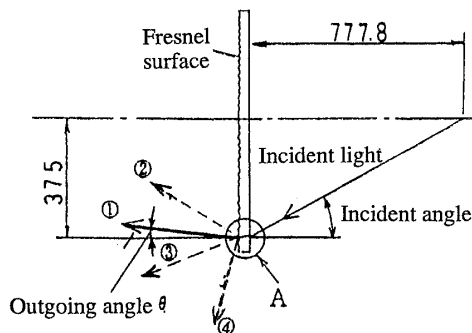
- (1) プリズム面を加工する前に、あらかじめバリとなる被削材の余肉部分を削除しておき、表面から溝底までの距離をプリズム高さに一致させる工具軌跡が有効である、
- (2) 上記(1)の場合に、プリズム面を切削する工具切れ刃と、この余肉を除去した面とのなす角 θ' が大きな鈍角 ($\theta' \ll \theta''$) となるため、図2からも明らかなように、バリ発生を抑制できる、
 といえる。このバリ抑制を目的とした切削法を図13に、また、その切削結果を図14に示す。図13から明らかなように、従来の切削法では、剣バイトを金型からいったん逃がした状態で1ピッチ送った後、次のプリズム面を形成するが、この場合、とり代が大きいため、バリ高さは10 μm以上に達している。これに対し、ここに提案したバリ抑制切削法では、非レンズ面を切削した後、バイトを次に形成するプリズム面の山頂部の高さまでに引き戻し、ピッチ送り方向に切削を行い、続いてプリズム面を切削する。この結果、プリ

ズム面形成時のプリズム面と非レンズ面の交差する山頂部におけるとり代を著しく減少でき、バリ高さが光学的に無視できるレベルである $5\ \mu\text{m}$ 以下に低減することができた。

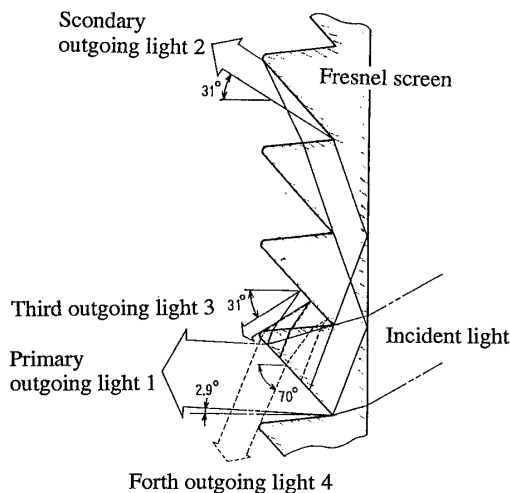
4. 成形されたフレネルスクリーンの光学特性

4.1 光学特性の評価 前述した切削法でフレネルスクリーン金型を製作し、この金型を用いて、スクリーンをプラスチック成形した。成形されたスクリーンの光学的評価を行ったところ、バリ発生に起因していた暗線(同心円状の黒すじ)が無視できるまでに、光学品質が大幅に改善された。しかし、画面上に不要出射光による画面の色ずれの一種であるカラーコーンが未解決のままである。

このカラーコーンの発生原因を究明するため、入射した光のスクリーン内における光路追跡を行ったところ、出射光の出射角度が -70° 、 -30° と $+30^\circ$ の個所



(a) A model of light route passing through point A of Fresnel screen



(b) Close-up around point A

Fig. 15 Generating model of undersirable outgoing lights

に不要出射光のピークがあり、これらがカラーコーンの発生原因であることが解明した。この不要出射光の発生モデルを図 15 に示す。図 15 より、主要出射光第 1 以外の第 2, 第 3, 第 4 の不要出射光の発生原因は、レンズ面であるプリズム面内面で反射した光が、非レンズ面から出射されるためである。すなわち、入射光の一部はプリズム面の内面で反射され、この反射光の 55% が、透過率の高い鏡面を有する非レンズ面から出射し、隣接した別のプリズム面で反射する。これが第 3 の不要出射光となり、または、再び元のプリズムの非レンズ面に入射し、第 4 の不要出射光となる。一方、残りの 45% の反射光は、いったん底面で反射し、非レンズ面を経由してから、別のプリズム面で反射され、第 2 の不要出射光となる。このように、不要出射光の光量は非レンズ面の光学特性に依存すると考える。

4.2 非レンズ面の粗面化による不要出射光量の低減 これに対し、まずアクリル平板サンプルの表面を各種の砥粒を用いて研磨して粗面にし、その面粗さと透過率、出射された光パワー(出射光量)との相関を測定した。その結果を図 16 に示す。ここでの透過率とは、透過光の光量と入射光の光量との比である。またパワーメータ(アンリツ社製, ML96A)を用いて、出射した光量を測定しており、ここでは、光パワー(単位: mW)と呼んでいる。同図より、粒径 $0.2\ \mu\text{m}$ のアルミナを用いてアクリル平板を研磨した場合の面粗さは $0.2\ \mu\text{m}\ R_{\text{max}}$ 以下になり、光パワーおよび透過率は研磨前と大差がない。砥粒径を $10\ \mu\text{m}\ (#1500)$ 以上の粗粒にすると、面粗さが $1\ \mu\text{m}\ R_{\text{max}}$ 以上になり、光パワーが急激に低下していくことがわかる。しかし、非レンズ面からの光パワーが小さく、すなわち透過光が減少し過ぎると、PTV スクリーンのカラーコーンは消えるが、フレネルスクリーン固有の細い同心円状の暗線が発生するという新たな問題が生じる。光学的な

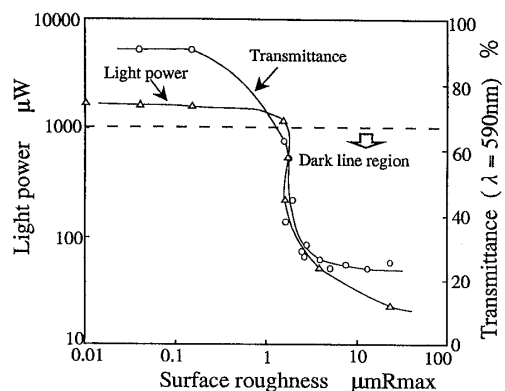
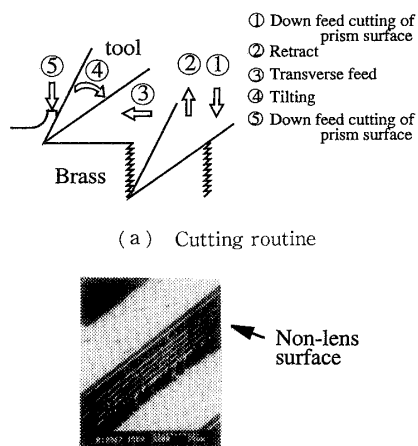


Fig. 16 Influence of surface roughness upon transmittance and light power



(b) An example of non-lens surface

Fig. 17 A rough surface cutting of non-lens surface to reduce undesirable outgoing light

試算から、カラーコーンが消え、暗線も目立たない許容範囲は、非レンズ面における透過率が65~75%であることがわかったので、 $1\ \mu\text{m}\ R_{\text{max}}$ の非レンズ面の面粗さを目標とした。

4.3 非レンズ面の粗面化切削 前述した加工法では、プリズム面、非レンズ面ともに鏡面に仕上げられていた。しかし、上記の光学特性評価結果から、非レンズ面の粗面化が必要である。この粗面をダイヤモンド切削とは異なる別プロセスで得ることは、新たな課題を生じるため、ここでは、同じダイヤモンド切削工具を用いて、非レンズ面を粗面化することとし、上記の粗面を得るための加工条件について検討した。本切削法では、2.3節の片切刃切削法と3.2節のバリ抑制切削法の検討結果をもとに、非レンズ面を剣バイト先端のノーズR部で切削するが、切刃が工作物・バイト間の相対振動や加工面のむしれ等により劣化するため、理論面粗さに対しほぼ2倍の粗面となっていた。ここでは、バイトのノーズRの半径を $5\ \mu\text{m}$ 、切込み速度を $4\ \mu\text{m}/\text{rev}$ にすることにより、非レンズ面粗さをほぼ $1\ \mu\text{m}\ R_{\text{max}}$ にできる加工条件が得られた。

しかし、この粗面化切削方法をとるには、逃げ角 $\alpha=0^\circ$ とする必要がある。これに対し、

- (1) 前述したバリ抑制切削法を用いることにより、逃げ角 $\alpha=0^\circ$ でも、バリ高さを光学的に無視しうるレベルにまで低減できること、
 - (2) この金型を用いたプラスチック成形条件の検討から、逃げ角 $\alpha=0^\circ$ であってもプラスチック成形が可能であること
- がわかり、逃げ角の設計値 2° を 0° に変更することに

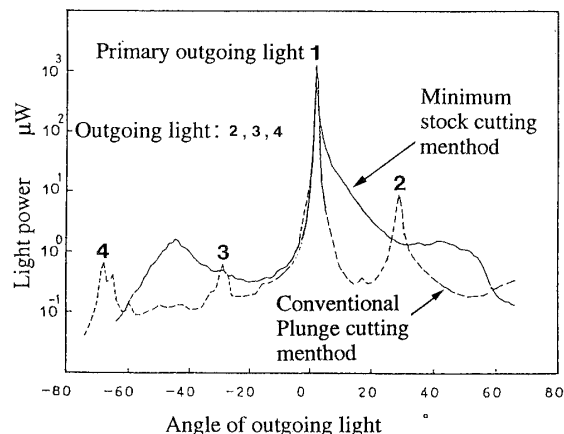


Fig. 18 Effect of cutting method reducing undesirable outgoing light

よって、上記非レンズ面の粗面化切削の採用を可能とした。ただし、剣バイトの頂角を 40° としたため、プリズム角が 50° (最大設計値は 54°)以上になると、上記の粗面化切削が困難で、非レンズ面を鏡面にせざるを得ない。ただし、光路追跡の結果からも明らかなように、カラーコーンは、外周方向への光の散乱に起因しているため、プリズム角 50° 以上の外周部分では、カラーコーンの発生が本質的に観察されず、非レンズ面を鏡面にしても、実用上は支障がない。

上述した最適加工条件をもとにして、切込み原点に剣バイトを上昇させた後、所望のプリズム角に一致するようにバイトを傾斜させ、非レンズ面をバイト先端のノーズ部で切削するとともに、同時一方の切れ刃稜でプリズム面の鏡面切削を行う。その後、バリ抑制切削の目的で隣接したプリズム山頂の山高さまで後退し、1ピッチ分に相当した距離をピッチ送り方向に剣バイトを送って余肉を削除する切削を行う切削法とした。この非レンズ面の粗面化切削法の概略図を図17(a)、非レンズ面の粗面加工結果を図17(b)に示す。

以上の検討結果からリコメンドされる切削諸元により金型を製作し、この金型を用いて成形したフレネルスクリーンの不要出射光を測定した。その結果、図18に示すように、不要出射光量の最大値は従来の約1/8に低減し、フレネルスクリーンとしての光学特性が大幅に向上させることができた。

5. まとめ

PTVの高画質化を目的に、プリズム面におけるバリの抑制と非レンズ面の粗面形成による不要出射光を低減できるフレネルスクリーンの成形金型切削技術に

ついて、フレネル溝切削、成形金型切削実験を通し、以下のことを明らかにした。

(1) フレネル溝切削時のバリの発生原因を明らかにし、このバリ発生を抑止できる片刃切削法を提案した。

(2) 成形金型加工に当たっては、バイトのすくい角の増大および切込み速度の低減により、バリ高さを抑制できる。

(3) 上記金型のバリはフレネル面の余肉を切削する間に成長することを明らかにし、プリズム面の余肉をあらかじめ削除する工具軌跡ルーチンにより、バリ高さを光学的に無視できるレベルに低減できる。

(4) 上記金型により成形されたフレネルスクリーンのカラーコーンの発生原因は、非レンズ面からの光の漏えいに起因し、非レンズ面の面粗さを約 $1\ \mu\text{m}$

R_{max} とすることにより、カラーコーンを抑制でき、また暗線も許容レベルにできる。

文 献

- (1) 大沢通孝・吉川博樹・福田京平, ED, HD ディスプレイ, テレビジョン学会誌, **44-12** (1990), 1678-1679.
- (2) 山崎映一, CRT(ブラウン管)大型, 高画質・フラット化でハイビジョンに対応, 電子技術, **30-12** (1988), 4-8.
- (3) 例えば, 小島一志, 超精密切削工具, 超精密生産大系, **2** (1994), 717-719, フジ・テクノシステム.
- (4) 上田勝宣・住谷充夫, 微細溝の超精密切削加工, 精密工学会誌, **52-12** (1986), 2016-2019.
- (5) 西口 隆・榊田正美, ダイヤモンドの微細成形加工(第1報), 精密工学会誌, **54-8** (1990), 1519-1524.
- (6) Burnham, M. W., The Mechanics of Micromachining, *SPIE Advance in Precision Machining of Optics*, **93** (1970), 40.