研究

精密旋削面におけるにじ面と鏡面の
相違について*

清水嘉重郎** 藤本定正***

On the Difference between Iridescent and Specular Surfaces
turned with Diamond Tools

Kajūrō SHIMIZU, Yasumasa FUJIMOTO

There are two kinds of worked surface turned with diamond tools. One of them is called iridescent surface and the other is called specular one.

In this paper, the difference between these surfaces is discussed theoretically using Kirchhoff's diffraction theory, and the result is compared with experiment.

It is assumed that the worked surface has parallel grooves of equal spacing and each groove has tri-angular section. If the two slopes of each tri-angular groove are perfectly flat and smooth, and when monochromatic parallel light is incident upon the worked surface, the diffracted light falls only near the two directions of the exact reflection arising from the two flat slopes. Usually the order of diffraction is large in these directions, so that spectrum bands, when white light is used, overlap each other and no iridescence but specular light can be observed. This case corresponds to specular surface.

However, when there exist additional fine structure on the slopes, the diffracted light covers a wide range of direction. In this case, distinct iridescence can be observed in the vicinity where the diffraction order is small. This case corresponds to iridescent surface. All these results are consistent with experiment.

1. 緒 言

ダイヤモンド・バイトを用いて精密旋削された金属加工面に光を当てると美しいにじ光の見える面をにじ面といい時計やカメラの外装用に利用されている。これに対して同じような加工条件にもかかわらず金属光沢があってそれほど色づいて見えない加工面を通俗的に鏡面といて両者は区別されている。

にじ面によるにじ光の発生原因は藤本, 鮎沢, 巢山¹⁾により加工面の切削条こんによる光の回折現象であり, 特に加工面にある彫刻みぞの断面形状が三角波形であるとき, その斜面に存在する平行な条こんが重要な意味をもつと指摘された。しかしこの斜面に存在する条こんのにじ光に与える影響についてその理論的根拠はまだ十分明らかにされていない。一方斎藤, 鴨川, 佐田²⁾は加工面の断面形状が正弦波形をなす場合を基礎として断面形状と反射スペクトルの関係を理論的に考察し, 美麗な彩度

の高いにじ光を得るには一定の波形が正しいピッチでくり返されるように断面形状を仕上げるべきであるとし, 鴨川, 斎藤, 佐田²⁾はこれを実験的に支持した。

しかし工場現場で実際に製作されている加工面はその断面形状をあらさ計で調べてみると基本的には三角波形になっており, 金属顕微鏡下で観察すると鏡面の場合には図1(a)のように送りマークのみあって条こんがなく, にじ面の場合には図1(b)のように彫刻みぞ斜面に多数の条こんが認められる。さらに通常のにじ面加工の場合旋盤の送りピッチは 40μ 程度とかなり大きく, 精密旋盤を用いれば相対的にローランドゴーストを無視し得る程度の精度は期待できる。このため鏡面の場合もにじ面の場合もいずれも断面波形は正しいピッチでくり返されていると考えてよい。このような場合に, あるときは鏡面となりあるときにはにじ面となる理論的根拠は明らかにされていない。

以上の考察からわれわれはにじ面加工の現実を出発点とし, 加工面の断面形状は三角波形が基礎であるとした。さらに彫刻みぞ斜面に存在する条こんのモデルとして, 各斜面上に互いに平行で帯状の完全反射面と吸収面とが交互に並んだ振幅格子が重畳していると仮定してキルヒホッフの回折理論による理論解析を行なった。これ

*原稿受付 昭和44年10月21日。昭和43年度春季大会学術講演会(昭和43年4月5日)にて発表。

**工業技術院機械試験所(東京都杉並区井草 4-12-1)

***正 会 員 長野県精密工業試験場(長野県岡谷市 9959 番地)

(a) 鏡面

(b) にじ面

送り 0.04 mm/rev, 切込み 0.05 mm
切削速度 550 m/min

図1 鏡面, にじ面の顕微鏡写真

によって同様の加工条件にもかかわらずあるときは鏡面が, またあるときはにじ面の得られる理論的根拠が明らかにされ, また工場現場で彩度のよいにじ面を得るための条件が明確にされた。

2. 理論的考察

切削面の断面形状が図2のように三角波形をしており, その三角形の両斜面 AB および BC 面には互いに平行で帯状の完全反射面 (図に実線で示した部分) と完全吸収面 (図に破線で示した部分) とが等間隔で交互に存在していると仮定する。すなわち, B 点の y 座標を d , 旋盤の送りによってきまるピッチ AC を a とし, こう配 G の AB 面, こう配 H の BC 面にそれぞれ K 個ずつの帯状反射面と吸収面があるとす。このとき帯状反射面の y 軸方向に投影した幅 (以後幅はこの意味) は二つの斜面に関してそれぞれ $d/2K$, $(a-d)/2K$ である。またピッチ a の三角波形は観察する視野内で総数 N 個あるとする。

$$I_1 \propto \left[\frac{kd(\lambda + \mu G)}{2K} \left(\frac{\sin k(\mu - \lambda G)d/4K}{k(\mu - \lambda G)d/4K} \right) \left(\frac{\sin k(\mu - \lambda G)d/2}{\sin k(\mu - \lambda G)d/2K} \right) \right]^2 \\ + \left[\frac{k(a-d)(\lambda - \mu G)}{2K} \left(\frac{\sin k(\mu + \lambda H)(a-d)/4K}{k(\mu + \lambda H)(a-d)/4K} \right) \left(\frac{\sin k(\mu + \lambda H)(a-d)/2}{\sin k(\mu + \lambda H)(a-d)/2K} \right) \right]^2 \\ + \frac{k^3 d(a-d)(\lambda + \mu G)(\lambda - \mu H)}{2K^2} \left(\frac{\sin k(\mu - \lambda G)d/4K}{k(\mu - \lambda G)d/4K} \right) \left(\frac{\sin k(\mu - \lambda G)d/2}{\sin k(\mu - \lambda G)d/2K} \right)$$

図2 切削面の模型

このような面に入射角 ϕ (平均切削面の法線と入射光とのなす角で常に正にとる) で波長 l の平行光が入射し, ϕ 方向 (法線に対して入射光と同じ側を正, 反対側を負) に回折されるとき回折光の強度 I は

$$\left. \begin{aligned} \lambda &= \cos \phi + \cos \phi, \mu = \sin \phi + \sin \phi \\ k &= 2\pi/l \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

とすると, Hatcher ら⁴⁾ による回折の理論式を拡張してつぎのように求められる。

まず m を $K-1$ 以下の値をとる 0 および正の整数とすると, 関数 $f(y)$ および $g(y)$ を次式で定義する。

$$\left. \begin{aligned} f(y) &= 1, (2m/2K)d \leq y \leq (2m+1/2K)d \\ &\text{のとき} \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

$$\left. \begin{aligned} f(y) &= 0, \text{その他のとき} \\ g(y) &= 1, d + (2m/2K)(a-d) \leq y \leq d \\ &\quad + (2m+1/2K)(a-d) \text{のとき} \\ g(y) &= 0, \text{その他のとき} \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

このとき回折光の強度 I は, (1), (2) および (3) 式を用いて次式のように表わせる*。

$$I = \left(\frac{\sin(k\mu Na/2)}{\sin(k\mu a/2)} \right)^2 I_1 \quad (4)$$

$$I_1 \propto \left| (\lambda + \mu G) \int_0^d f(y) e^{ik(\mu - \lambda G)y} dy + (\lambda - \mu H) e^{-ik\lambda H a} \int_d^a g(y) e^{ik(\mu + \lambda H)y} dy \right|^2 \quad (5)$$

(4) 式の右辺第 1 の係数 $[\sin(k\mu Na/2)/\sin(k\mu a/2)]^2$ からはピッチ a の格子による回折光の各次数スペクトル方向が定められ, (4) 式右辺第 2 の係数すなわち (5) 式の I_1 からは上記各次数スペクトルの相対強度を決める包絡線の形が求められる。(1), (2), (3) の関係を (5) 式に代入して計算し, 整理すると,

* (5) 式は形式的には Hatcher らの (15a), (15b) 式に相当⁴⁾

$$\times \left(\frac{\sin k(\mu+\lambda H)(a-d)/4K}{k(\mu+\lambda H)(a-d)/4K} \right) \left(\frac{\sin k(\mu+\lambda H)(a-d)/2}{\sin k(\mu+\lambda H)(a-d)/2K} \right) \cos \left(k \frac{-2Gd\lambda + ((2K-1)a+2d)\mu}{4K} \right) \quad (6)$$

が得られる。

(6)式および(4)式は図2のように切削みぞの斜面上にさらに振幅格子が重畳しているときの回折光の強度分布を与える一般式である。

なお、図2の各斜面上に何の構造もないときには(5)式で $f(y)=g(y)=1$ とおいて I_1 を求めればよい。このときの I_1 の式は Hatcher らが導いており⁴⁾、これを若干変形すると次式ようになる。

$$I_1 \propto \left[\frac{kd(\lambda+\mu G) \sin k(\mu-\lambda G)d/2}{2k(\mu-\lambda G)d/2} \right]^2 + \left[\frac{k(a-d)(\lambda-\mu H) \sin k(\mu+\lambda H)(a-d)/2}{2k(\mu+\lambda H)(a-d)/2} \right]^2 + \frac{k^2d(a-d)(\lambda+\mu G)(\lambda-\mu H)}{2} \left(\frac{\sin k(\mu-\lambda G)d/2}{k(\mu-\lambda G)d/2} \right) \left(\frac{\sin k(\mu+\lambda H)(a-d)/2}{k(\mu+\lambda H)(a-d)/2} \right) \cos \frac{k\mu a}{2} \quad (7)$$

さて、(6)式にもどってこの式の右辺第1項に着目すると、この項は図2のAB面のみが単独に存在する場合の回折光の強度を表わしており、回折角 ϕ に関する三種の関数の積の形となっている。

すなわち、この関数形の第1のものはAB面による回折光の inclination factor $(\lambda+\mu G)$ であり、第2のものは幅 $d/2K$ の帯状反射面による回折を表わすスリット関数 $\sin(k(\mu-\lambda G)d/4K)/k(\mu-\lambda G)d/4K$ であり、第3のものは斜面にある K 個の格子構造による干渉を表わす関数 $\sin(k(\mu-\lambda G)d/2)/\sin(k(\mu-\lambda G)d/2K)$ (以下これを干渉関数と呼ぶ) である。

同様に(6)式第2項はBC面が単独に存在する場合の回折光の強度を表わし、やはり3種類の関数の積の形となっている。さらに(6)式第3項は、AB面とBC面とによる回折光の間の相関を表わす項になっている。なお以上にのべた(6)式の各項は回折角 ϕ の関数であるばかりでなく、斜面上に存在する格子構造の数 K の関数にもなっている。この K の値の変化は以下の計算結果からも明らかとなるが、 I_1 の強度分布に大きな影響を与える。

以下具体的な数値計算例により回折光の強度 I の回折角 ϕ および格子構造数 K に対する依存性を考察する。

まず切削みぞの具体的な形状は次のように選んだ。すなわち、アルミニウム合金等を切削する場合、通常ダイヤモンド・バイトは刃先に7個の直線切れ刃をもつバイトが多く使用されている。これはダイヤモンドの原石の角を研磨して均等に8個の角をつけたためである。このとき原石の角は約 75° であるからバイトの刃先の一つの角は約 167° になる。このようなバイトを用いて切削断面が対称な三角波形となるように材料を旋削すると、図2の斜面ABおよびBCのこう配はいずれも $G=H=\tan 6^\circ 30'$ となる。また旋削における送りピッチは $a=40\mu\text{m}$ 程度が工場現場で使用されている実用的な値となっている。このような実用上の数値から $a=2d=40\mu\text{m}$ 、 $G=H=\tan 6^\circ 30'$ と定めた。

つぎににじ面を観察しやすい入射角として $\phi=50^\circ$ を仮定し、また使用光の波長を $\lambda=0.546\mu\text{m}$ として、まず単色光について K の値を変化させたときの回折角 ϕ に対する強度分布 I_1 および I の変化を計算した。

はじめに理論的考察を容易にするため、上記 I_1 の各項をさらに各関数の要素に分解してグラフに示してみた。

まず図3は斜面上に格子構造のない場合の例で、図に実線で示した二つの曲線はそれぞれ(7)式第1項すなわちAB面による inclination factor およびスリット関数の回折角 ϕ に対する依存性を示したものである。このスリ

対称三角山形、こう配 $G=H=\tan 6^\circ 30'$ 、
ピッチ $=40\mu\text{m}$ 入射角 50° 、照明光波長
 $=0.546\mu\text{m}$

図3 鏡面の解析

条件は図3と同じ

図4 にじ面の解析 ($K=4$)

ット関数曲線の最大ピーク位置は(7)式より $\mu - \lambda G = 0$ を満足する回折角 ϕ_1 でおこり, $\phi_1 = -37^\circ$ になる. これは AB 面による正反射方向と一致する.

これに対して図 3 に破線で示した二曲線はそれぞれ(7)式第 2 項すなわち BC 面による inclination factor およびスリット関数を表わす曲線で, この場合には後者の曲線の最大ピーク位置はやはり(7)式によって $\mu + \lambda H = 0$ の条件から回折角 $\phi_2 = -63^\circ$ と求められる. なお(7)式第 3 項のグラフは図がはん雑になるので省略した.

以上図 3 の各曲線と(7)式から, 切削みぞの斜面に格子構造のないときにはこの斜面による二つの正反射の方向 $\phi_1 = -37^\circ$ および $\phi_2 = -63^\circ$ 近傍でのみ回折光が観察され, その他の方向には光はほとんどこない.

一方図 4 は図 3 と同様にピッチ $40 \mu\text{m}$ で, 図 2 のように切削みぞの斜面にさらに格子構造の存在する場合を考察したものである. ここでは(6)式で $K=4$ と選び, このときのスリット関数および 4 個の格子構造による干渉関数を回折角 ϕ を横軸にとってグラフに示した.

この場合には帯状反射面の幅 $d/2K$ の値は $2.5 \mu\text{m}$ となり, スリット関数の曲線は図 3 の場合よりも 8 倍に広がってくる. また 4 個の格子構造による干渉関数は図のようにその曲線は 1 周期当り 6 個の極大または極小値を有するほぼ周期的な構造になる. なお, AB 面および BC 面による各 inclination factor はいずれも図 3 の場合とまったく同一であるので図 4 のグラフでは省略した.

以上図 4 の各曲線と(6)式から, 斜面に格子構造のあるときには回折光強度分布の包絡線 I_1 , したがって各次数スペクトル線の強度分布 I は K の値によって相当に複雑に変化することが予想される.

図 5 および図 6 は, これまでと同一条件のもとで(7), (4)および(6), (4)式を計算した結果を示したものである.

まず図 5 は斜面に格子構造のない場合で, 破線は(7)式 I_1 の計算結果を, また実線は(7)式を(4)式に代入して得られた回折光強度 I の計算結果である.

図 3 の考察で予想されたように, 光源が単色光のとき

図 5 三角山形の斜面に格子構造のない場合の計算結果

二つの特定の回折角 ϕ_1, ϕ_2 の近傍でのみ 2 ないし 3 本のスペクトル線が観察される. 光源が白色光のときには, これらのスペクトル線はにじ光となるはずである. しかし ϕ_1 および ϕ_2 におけるスペクトル線の回折次数はこの場合それぞれ $+12$ および -9 次というかなり高い次数となっている. したがって通常の回折格子の場合と同様にスペクトル帯間の重なりが考えられ, このため白色光源に対しては結果としてにじ光は観察されなくなる.

これに対して図 6 は $K=4$ の場合で, 図の破線および実線はそれぞれ(6)式の I_1 および(6)式を(4)式に代入した I の値の計算結果を示す.

この場合には破線で示したように強度包絡線の形にはいくつかの分離した山が認められる. したがって光源が単色光のとき, スペクトル線は特定の回折角方向だけに限らず 0 次の回折光方向 (回折角 $\phi_0 = -\phi$ に対応) を含むかなり広い角度範囲にわたって観察される. 光源に白色光を用いれば, これらスペクトル線はにじ光となり, 特にスペクトル帯の重なりが少ない 0 次の回折角方向およびその近傍で鮮明なにじが認められるようになる.

3. 光度計および写真による測定

実験に使用した材料はアルミニウム合金 A 2 B 2 で, 大きさは $70 \text{ mm}\phi \times 37 \text{ mm}$ であった. 使用されたダイヤモンド・バイトは先端角を 167° に研磨したものである. なおにじ面と鏡面についてはそれぞれにじ面用および鏡面用のバイト²⁾を使用した. 切削条件は自動送り 0.04 mm/rev , 切削速度 550 m/min , 切込み 0.05 mm とした.

このようにして切削した加工面を金属顕微鏡でみると図 1 (a) および (b) のようになる.

図 7 (a), (b) は図 1 (a), (b) の試料に関する断面あらさ曲線である.

図 8 および図 9 は, それぞれこの試料による回折スベ

図 6 $K=4$ の場合の計算結果

図1 (a)(b)の試料と同じ
図7 鏡面, にじ面の断面曲線

入射角 50°, 照明光波長 0.546 μm
試料, 図1 (a), (b)と同じ
図8 鏡面, にじ面によるスペクトル写真

入射角 50°, 照明光波長 0.546 μm
試料, 図1 (a), (b)と同じ
図9 光度計による鏡面, にじ面のスペクトル

クトルの強度分布を写真および分光光度計によって記録したものである。

図8および9から鏡面については正反射方向以外では回折光は非常に弱いことがわかる。これに対してにじ面については正反射方向およびその近傍とその中間方向にも鋭い回折光の強度分布が認められる。この強度分布は一般に切削みぞの形状によって異なるが、切削みぞ斜面に微細構造として振幅格子が重畳していると仮定して計算した図6の結果と傾向はよく一致している。

4. 結 論

旋削加工面について、その断面形状が周期的で対称な三角波形をしており、そのピッチが 40 μm、一つの三角の頂角が 167° 位のものを考えたとき、この加工面ににじ面となるかまたは鏡面となるかその条件を光の回折理論および実験によって明らかにした。得られた結論はつぎのとおりである。

(1) 旋削加工面における鏡面では、周期的な切削みぞの各斜面はなめらかな平面に近く、斜面上には切削条こんは認められない。この場合加工面に単色光を平行入射させると、回折光は上記斜面による二つの正反射方向近傍のみに集中する。一般にはこの正反射方向は回折次数の高いところにあり、したがって白色光源を用いたときには各回折次数のスペクトル帯間に重なりを生ずる。このため結果としてにじ光は認められなくなる。むしろ正反射光による金属光沢が強調されて通常の鏡面に近い外観を示す。このように切削みぞ斜面がなめらかな平面となるように加工面を製作することが鏡面を作る条件である。

(2) にじ面の場合には切削みぞ斜面には多数の条こんが認められる。これを切削みぞ斜面に微細構造として振幅格子が重畳しているというモデルに置きかえ理論的考察を加え、にじ光発生の原因を明らかにすることができた。この場合には回折光は切削みぞ斜面による二つの正反射方向に限らず、その中間にも分布するようになる。回折次数が0次の方向はちょうどこの中間方向に存在し、その近傍ではスペクトル帯間の重なりはまったくないか有ったとしてもごくわずかである。したがって上記モデルの場合0次回折光の近傍で鮮明なにじ光が観察されることになる。このような事実は実験からも確認することができ、結局にじ面を作るためには切削みぞの斜面にむしろ積極的に条こんを作るようにすべきことが明らかになった。工場現場などで使われるにじ面用のバイトの刃先に多数の凹凸を作るのは¹⁾、この意味において理解することができる。

文 献

- 1) 藤本定正, 鮎沢 隆, 栗山博美: にじ面の研究, 精密機械, **32**, 6 (1966) 409.
- 2) 齊藤弘義, 鴨川昭夫, 佐田登志夫: 切削加工面による光の回折, 精密機械, **35**, 7 (1969) 452.
- 3) 鴨川昭夫, 齊藤弘義, 佐田登志夫: 切削加工面からの虹光に関する実験, 精密機械, **35**, 8 (1969) 517.
- 4) D. Hatcher and H. Rohrbaugh: Theory of the Echellette Grating I, J. Opt. Soc. Amer., **46**, 2 (1956) 104.