

ダイヤモンドの特性の可視化と輝きの定量化について

井 上 一 夫
ジェイ・ディ・エム社

最近の、コンピュータグラフィクスの急速な進歩によって、複雑な多面体であるダイヤモンド中での光の軌跡の可視化が可能になった。これをダイヤモンドの特性の定量化に利用し、計算機を介して本論文では、ダイヤモンドの「輝き」の違いを数値化することを試してみた。その結果、求められた数値の変化とダイヤモンドのプロポーシヨンの間に非常に高い相関が確認された。従って、この方法がダイヤモンドの「輝き」の客観的な判定手段として有効であると考えられる。

VISUALIZATION OF CHARACTERISTICS OF DIAMOND AND QUANTIFICATION OF ITS BRILLIANCE

kazuo INOUE
JAPAN DIAMOND MIND CO., LTD
1-23-7 Nishi-Shinbashi Minato-ku Tokyo 105, Japan

In this paper, we propose a method to analyze, visualize and quantify characteristics of diamond by using computer graphics techniques. Diamond of the brilliant cut is defined as a polygon in computer. Performance of light incident to the diamond is followed by the ray tracing algorithm and displayed on a graphic terminal with the rendering method of three dimensional computer graphics. Furthermore we introduce a new measure to represent the "brightness" of diamond quantitatively basing upon the above ray tracing method and show experimentally that this measure is highly correlated with the proportion of diamond.

1. はじめに

ダイヤモンド評価法は4C(カラット(Carat)・カラー(Colour)・クラリティー(Clarity)・カット(Cut))のグレーディング結果によるが、その4Cは稀少性(先天的)価値(Colour:Clarity:Carat)と人為的(後天的)価値(Cut)とに二分できる。

なかでもカットだけが、唯一我々人間が関与できる要素であるが、後天的価値を左右するカットの基準は未だに満足できるものではない。実際、ダイヤモンドのプロポーシヨンの計測としての二次元外形寸法計測結果⁽²⁾と、今までの経験が判定基準となってグレーディングが決定されている。

しかしながら、これでは複雑な多面体をしたダイヤモンドの判定基準としては不十分である。

一方、最近では、コンピュータグラフィックスの進歩によって、ダイヤモンド中での光の振る舞いを可視化することが可能になりつつある。⁽¹⁾

しかしながら、それをダイヤモンドの特性の定量化や形状の設計に利用した例はまだない。

そこで、ダイヤモンドのプロポーシヨンを立体的に計測し、プロポーシヨンの違いによってダイヤモンドの輝きにどのような影響が生じるかを考えた。そして、その結果をごく一般的58面体ラウンド・ブリリアント・カット(Round Brilliant cut)のダイヤモンド数種に適用し、計算機を介して「輝き」の違いを数値で表わすことを具体的にに行った。

具体的な方法としては、視点位置から、光線の入射方向を逆にたどる光線追跡法(Ray tracing algorithm)を用い、ダイヤモンドへの入射光の入射位置、入射方向、光量を与えて、ダイヤモンドの各面での反射、透過の方向、光量、光強度を計算することにより、輝きの差を定量化して、その数値的差異がどのようにプロポーシヨンの違いと関わっているかを明らかにしようとする。

2. 光線追跡の方法

光源からの光線は、ダイヤモンドに入射後、反射と屈折を繰り返す、ダイヤモンドの外部へと出

ていく。この時の入射点に当たる光の強度を100として、上面へ出る迄の光の減衰を計算すればダイヤモンド上面から出て来る光の量を数値化することができる。具体的には、光線追跡法によって上面に出てくる全ての光線について、対応する光源と光の経路と入射点が求め途中での減衰を逆計算する。

2. 1 ダイヤモンド内部の光の経路の計算

- 1) 光源からの光がダイヤモンドに当たった面とそこでの面に対する光線の角度から屈折角を計算し、ダイヤモンド内部での光の進行方向を求める。
- 2) ダイヤモンド内部では光は直進し、次の面に当たるが、光の方向や位置によってどの面にも当たる可能性があるので、光が当たる面かどうかの確認を順次行い、光が当たる面が見つかったら、その面と光の方向から面への入射角を求め、臨界角と比較する。
- 3) 求めた角度が臨界角より大きければ、光線はその面で全反射し再びダイヤモンド内部を進む。一方臨界角より小さければ一部はダイヤモンド内部で反射するものの大半の光は屈折して外へ出ていく。

従って、

屈折する場合=屈折率から外部へ出る光の方向を計算する。

反射する場合=入射角から反射光の方向を計算し、次に光が当たる面を求める。

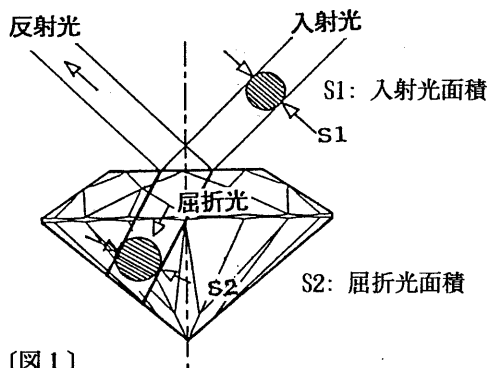
- 4) ガードル面は曲面であり他の平面とは異なるが、計算手順は同じであり、ガードル面に光が当たったら、その点の法線(常にダイヤモンドの中心に向かう水平線)を計算し、入射角、屈折角あるいは反射角を計算する。
- 5) 上記の手順を、光線がダイヤモンドの外部へ出るまで繰り返し、光源からの光線のダイヤモンド内部での経路を求める。
- 6) この計算1)～5)を必要な光線のすべてについて行う。

2. 2 屈折光の強度

ダイヤモンド上面に外から入射する光線を追跡し、この光線に基づく屈折光による輝きの度合いを定量化する。ただし、単位光線ごとの光の強度は、次の仮定に従うものとして計算する。

1) 光線が屈折する場合の屈折光のエネルギーはフレネルの法則に従う。更に単位面積当りの光の強度は、屈折角に応じた入射光と屈折光の面積変化に逆比例する。

例えば、図1について説明すると、入射光のエネルギーの内20%が反射光となり、80%が屈折光となった場合、屈折光の総エネルギーは80%であるが、単位面積当りのエネルギーは、 $80 \times S1 / S2$ %となる。



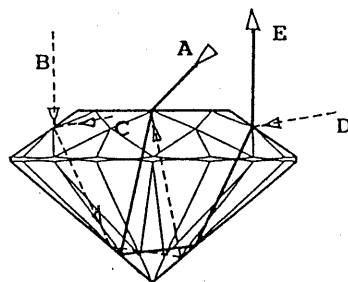
(図1)

- 2) 光線が全反射する場合には強度の変化はないものとする。(吸収及び乱反射はないものとする)
- 3) ダイヤモンド内部での反射光がダイヤモンドの内表面に入射する場合、入射角が臨界角以下になったときは、1)と同様の計算によって得られる強度の屈折光が外部に出て来るものとする。光がダイヤモンド内部から外部へ出る場合入射角が臨界角以上になると内部で全反射し、臨界角以下では、外部へ出るものとして計算する。

図2で外部から見える(E)の光の強度を求める場合は(A)(B)(C)(D)等、全ての光について、その影響を計算しなければなら

ないが、(B)(C)(D)は無視し、主軸光(A)のみに限定して追求する。

なお、これらの条件は、光の損失が全く無い(反射光エネルギー+屈折光エネルギー=入射光エネルギー)という前提でのみ成立するが、実際にはダイヤモンドの表面状態によって数%程度の光が吸収または乱反射で失われ、特に表面が汚れているような場合は数10%以上の損失があると考えられるが、これらの損失の定量化は困難であるため、ここでの計算では考慮していない。



(図2)

2. 3 設定条件

1) ダイヤモンドのカットプロポーションの設定条件は、図3で示すようにガードル直径を100%としたとき各々の比率で表す。

- ・テーブル径.....TB
- ・スター面：アッパーガードル面比(投影長さの比率)...U:S
- ・ローガードル面との接点比率...LG
- ・クラウン高さ.....CH
- ・パビリオン深さ....PD
- ・ガードル厚さ.....GH

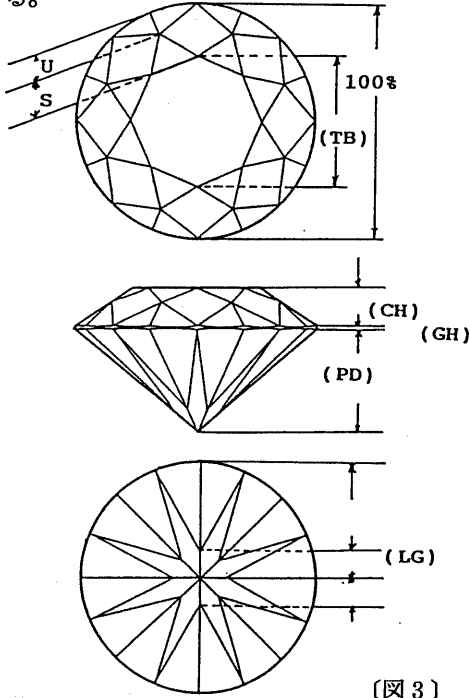
- 2) ダイヤモンドを直交座標系(X, Y, Z)の中心におき、ダイヤモンドの中心軸をZ軸に、またガードル面下側を原点に一致させる。
- 3) ダイヤモンドには、その全周からすべての部分に強度100の光が均一にあたっているものとする。
- 4) ダイヤモンドを真上から見た時、ダイヤモン

ドから目に届く光を平行光線とする。

5) ダイヤモンド表面での反射光及び屈折光の比率はフレネルの法則によるが、その計算はE. ギェベリン (E. Gubrlin)の資料〔表1〕を使用した。

6) 計算に使用した光の波長は5893 Å (黄色)の単色光 (D光線)である。

7) ダイヤモンドの屈折率は、2.4173とする。



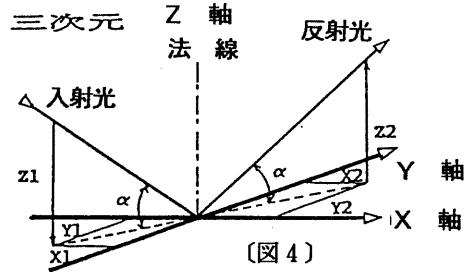
〔図3〕

以上の設定条件下において、視点とダイヤモンドのある点を結ぶ直線を考え、この直線を逆に追跡しダイヤモンドの表面で入射角、屈折率から屈折角を求め、さらに、ダイヤモンド内部の光線を逆に追跡する。以下、次々とダイヤモンド内部反射をたどり、外部から入射する入射角度の計算を繰り返す。入射光がパビリオン面以下から (Z軸座標値が0以下) の場合は光強度を0%として処理し、入射光のZ座標が正であれば、その光強度を求める。

計算はダイヤモンド上面全体について行い、その総和をダイヤモンドから目に届いた光のエネルギー総量 (強度) とする。

3. 計算の方法

図4で明らかのように、反射や屈折は反射面 (XY平面) と法線 (Z軸) に対する光線の関係式を用いて表される。



ダイヤモンドは立体であり、反射や屈折は下記の式で計算される。

3.1 原理

1) ダイヤモンド表面上の任意の一平面にX'軸 Y'軸を取り、その法線をZ'軸とする直交座標系を考える。X' Y' Z'座標系の基ベクトルを基本XYZ座標系で

$$\begin{pmatrix} f & g & h \\ i & j & k \\ l & m & n \end{pmatrix} \text{と表すと、光線のXYZ座標系での}$$

$$\text{ベクトル } \begin{pmatrix} c \\ d \\ e \end{pmatrix} \text{とX' Y' Z'座標系のベクトル}$$

$$\begin{pmatrix} c' \\ d' \\ e' \end{pmatrix} \text{の間には、次の関係が成り立つ。}$$

$$\begin{pmatrix} c \\ d \\ e \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} f & g & h \\ i & j & k \\ l & m & n \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c' \\ d' \\ e' \end{pmatrix} \quad \text{式 (1)}$$

2) X' Y' Z'座標系に於いて光が外部からダイヤモンドに入射する時の入射光ベクトルを

$$\begin{pmatrix} c^{\circ} \\ d^{\circ} \\ e^{\circ} \end{pmatrix} \text{、また屈折光を } \begin{pmatrix} c' \\ d' \\ e' \end{pmatrix} \text{と表すと}$$

$$\left. \begin{aligned} c^{\circ} &= c' \times r \\ d^{\circ} &= d' \times r \\ e^{\circ} &= \frac{1}{\sqrt{1-r^2}} \sqrt{(c')^2 + (d')^2 + (e')^2 - (c^{\circ})^2 - (d^{\circ})^2} \end{aligned} \right\} \text{式 (2)}$$

但し、 r は屈折率 (= 2.4173)

3) ダイヤモンド内部での反射または屈折は

$$\frac{\sqrt{(c')^2+(d')^2}}{\sqrt{(c')^2+(d')^2+(e')^2}} \text{ が}$$

$$\left. \begin{array}{l} < \frac{1}{r} \text{ならば屈折} \\ > \frac{1}{r} \text{ならば全反射} \end{array} \right\} \text{ - 式 (3)}$$

4) ダイヤモンド内部から光が屈折して外に出る場合

$$\left. \begin{array}{l} c'' = c' \times r \\ d'' = d' \times r \\ e'' = \frac{e'}{r} \sqrt{(c')^2+(d')^2+(e')^2-(c'')^2-(d'')^2} \end{array} \right\} \text{ - 式 (4)}$$

5) ダイヤモンド内部で光が反射する場合

$$\left. \begin{array}{l} c'' = c' \\ d'' = d' \\ e'' = -e' \end{array} \right\} \text{ - 式 (5)}$$

6) $X' Y' Z'$ 座標系で求めた光のベクトル (c'', d'', e'') を XYZ 座標系に戻すと

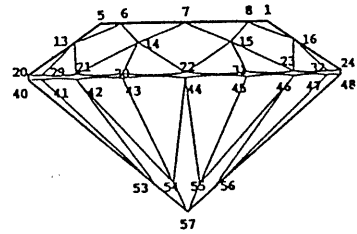
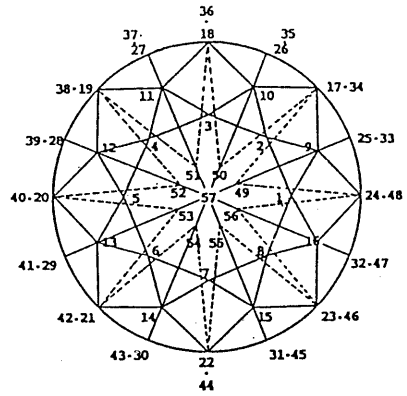
$$\left(\begin{array}{c} c''' \\ d''' \\ e''' \end{array} \right) = \left(\begin{array}{ccc} f & g & h \\ i & j & k \\ l & m & n \end{array} \right)^{-1} \left(\begin{array}{c} c'' \\ d'' \\ e'' \end{array} \right) \quad \text{- 式 (6)}$$

ダイヤモンドは屈折率が高く、ダイヤモンド内部では反射を何度も繰り返すため、ダイヤモンドに入った光が外部に出るまで (入射角が臨界角以下になるまで) 反射、屈折の計算を繰り返し行なう。ダイヤモンドの表面を細分化し、各々の点について、上記の計算式を基に光の強度を求めればダイヤモンドの輝きを示す光の強度分布のパターン化が出来る。

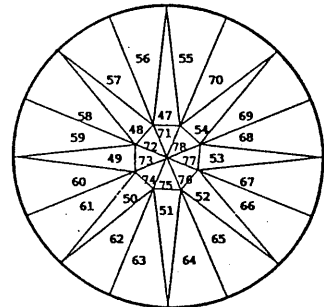
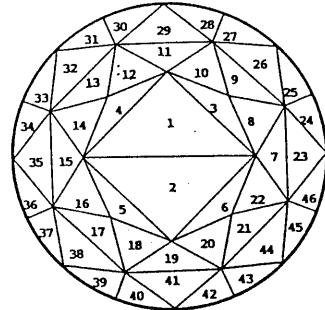
3. 2 計算手順の実現

1) ダイヤモンド表面の定義

ダイヤモンドの表面は、図5のように57の平面とガードル面 (円柱曲面) で構成されている



〔図5〕



〔図6〕

2) ダイヤモンド表面の計算のための分割

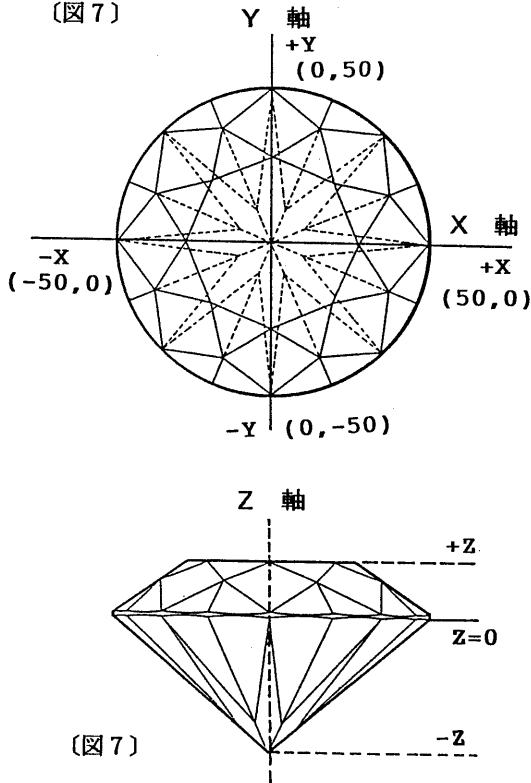
ダイヤモンドの各面は、三角形、四角形、または、八角形であるが、計算上の理由から図6で

示すように四角形と八角形はそれぞれ二個の三角形と六個の三角形に分割し、表面を全て三角形の組み合わせで表現する。したがって平面は全部で、78の三角形に分割される。ただし、ガードル面は曲面であるため、この面だけは円柱座標系で表し79番目の面とする。

3) 座標系

2. 3 2) で、述べたように中心軸をZ軸に合わせ、Z=0をガードル面の下縁にとる。

〔図7〕



〔図7〕

3. 3 実験結果

1) このプログラムは、ラウンド・ブリリアントカット・ダイヤモンド(58面体)の外形寸法(写真1)、あるいは57の各座標点を入力(写真2)すると、そのプロポーショナル形状(写真3)を表示し、平面は(写真4)で示すように78の三角形に分割する。

2) 光線軌跡の分布表示

ガードル面下縁より下からの入射光線は、その

軌跡を白色で表示し、光の強度は0%として処理するが、上面からの入射光の場合は、その強度を赤色の濃淡で表現する。(写真5)

4. 考察

実際市場にあるダイヤモンドを選び、プロポーショナルの測定結果を入力し、プログラムによって有効光線分布状態を解析した結果、求めた数値の違いがダイヤモンド・プロポーショナルの違いと非常に高い相関関係をもっていることが確かめられた。

定量化する数値は

Rear = 背面光 (パビリオン面からの入射光)

Average = 入射光100とした時、上面に出てくる光の強度の全体での平均値

とし、以下、具体的な計算結果を、サンプル1~3(写真6~8)で、説明する。

SAMPLE. 1

TB.	62.48%
SU.	56:44%
LG.	10.40%
CH.	12.89%
PD.	46.86%
GH.	4.55%

本石は、テーブル面がやや広く、パビリオンが深く、全体のシンメトリーが悪い。75%以上の最も強いエネルギーの面積が、0.5%と極端に少ない。Rearが22.8%と輝きの無い面積がダイヤモンド全体の1/5強あることが判る。輝きのAverageは45.10%であった。

実際のダイヤモンドを観察すると、テーブル面の面反射が多く、Rearは石の外周部分に集まって要るために、石の丸みを欠きギザギザしており、ひとまわり小さく見える。(写真6)

SAMPLE. 2 (プロポーション)

TB. 62. 72%
 SU. 56 : 44%
 LG. 19. 67%
 CH. 14. 09%
 PD. 44. 89%
 GH. 5. 56%

本石は、ごく一般的に見掛けるプロポーションである。エネルギーの分布状態は、60%~<75% 52%弱と石の大半を占めている。Rearは18.2%と輝きの無い面積も多く、特に、テーブル面内の外周部に目立つ。Average49%と低い。現物のダイヤモンドを観察すると、丸みを欠き、テーブル面内部が暗い。(写真7)

SAMPLE. 3 (プロポーション)

TB. 54. 00%
 SU. 57 : 43%
 LG. 20. 00%
 GH. 15. 70%
 PD. 43. 08%
 GH. 2. 50%

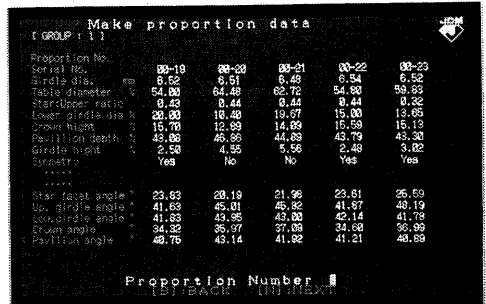
本石は、大変シンメトリーの良いプロポーションである。全体のバランスもよく、幾何学模様
 のエネルギー分布が判る。Rearは5.43%と
 少なく、Averageは60%を越している。
 現物のダイヤモンドを観察すると、石全体の丸
 みと、強い内面反射光が観察出来る。(写真8)

従って、ここで得られた数値がダイヤモンドの
 輝きの客観的な判定手段として有効であると考え
 られる。

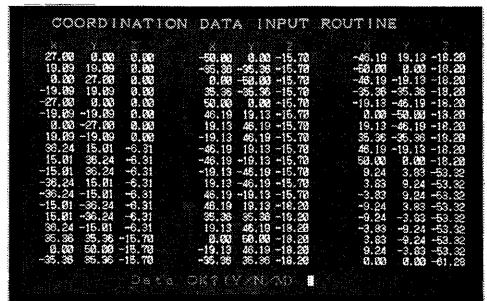
(表1)

ダイヤモンドの表面における反射光と屈折光

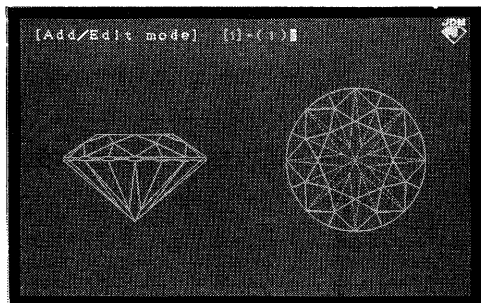
入射角(i)	反射光 (約%)	屈折光 (約%)
1°	16.99	83.01
10°	17.23	82.77
20°	17.36	82.64
30°	17.36	82.64
40°	17.77	82.23
50°	18.73	81.27
60°	21.12	78.88
67.31°	24.85	75.15
70°	27.21	72.79
80°	43.33	56.67



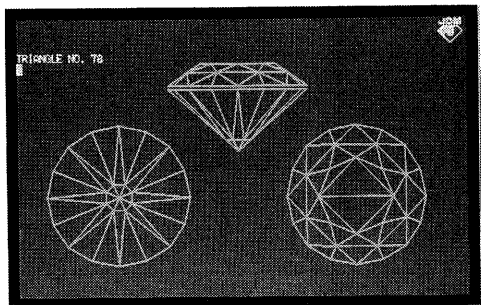
(写真1) ダイヤモンドの外形寸法を入力。



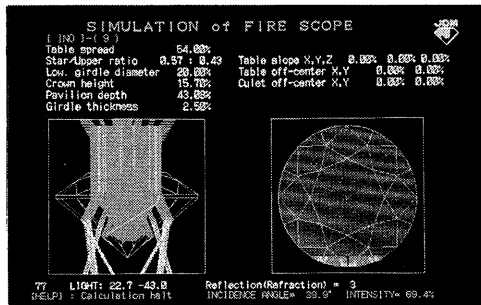
(写真2) 57の各座標点の表示。



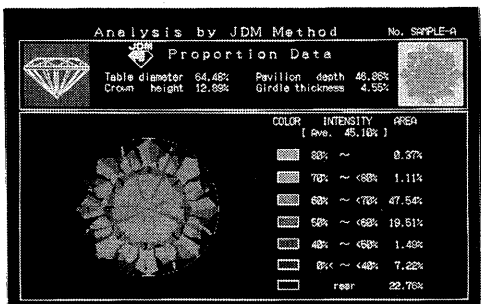
(写真3) プロポーション形状を表示する。



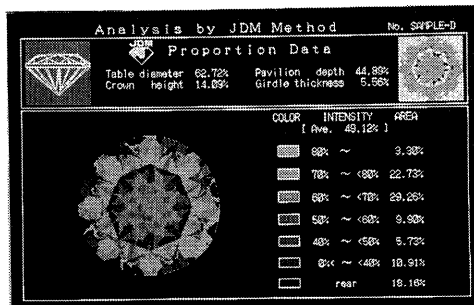
(写真4) 78の三角形に分割された平面が表示される。



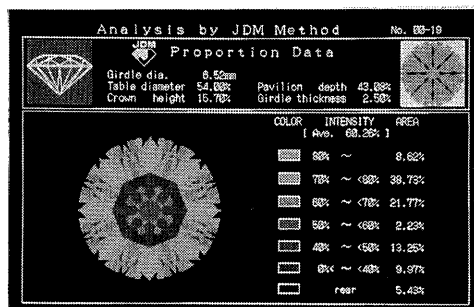
(写真5) 画面下側に、計算中の入射位置、入射強度、入射方向を表示。



(写真6) SAMPLE. 1



(写真7) SAMPLE. 2



(写真8) SAMPLE. 3

謝辞

本原稿に関して、貴重なコメントをいただいた名古屋大学情報工学科鳥脇純一郎教授に深謝の意を表す。また、同大情報工学教室安田孝美氏に、ご協力いただき、衷心より感謝いたします。

参考文献

- (1) 鳥脇, 横井 : 宝石学会誌, Vol. 12 NO. 1~4 (1987) PP. 3-11
- (2) M. Tolksowsky : DIAMOND DESIGN A STUDY OF THE REFLECTION AND REFRACTION OF LIGHT IN A DIAMOND, E. & F. N. SPON, 57 HAYMARKET, S. W.