

外周刃ブレードによる高精度スライシング加工に関する研究

—フランジ径がブレードの反りに与える影響—

水野雅裕*¹, 井山俊郎*¹, 星 純二*², 森 由喜男*³, 田牧純一*⁴

High-precision Slicing with OD-blade —Effect of Flange Size on Blade Deformation—

Masahiro MIZUNO, Toshirou IYAMA, Junji HOSHI, Yukio MORI and Jun'ichi TAMAKI

外周刃ブレードは、その製造法によって、焼結タイプ、電鋳タイプ、電着タイプなどに分類することができるが、いずれのタイプのブレードも製造段階の何らかの原因である程度の反りを持っているのが普通である。そしてそれが切断精度に大きな影響を与えるとされている。本研究では、反りを有するブレードをフランジで固定した際に、反り形状がどのように変化するかを理論解析した。解析の結果、フランジ径が大きくなるほど反りは小さくなるが、その低減率は反りの形状によって大きく異なることが明らかになった。

Key Words : OD-blade, Slicing, Flange Size, Blade Deformation

1. はじめに

外周刃ブレードは、その製造法によって、焼結タイプ、電鋳タイプ、電着タイプなどに分類することができるが¹⁾、いずれのタイプのブレードも製造段階の何らかの原因である程度の反りを持っているのが普通である。そしてそれが切断精度に大きな影響を与えるとされている²⁾。しかしながらそれを理論的に明らかにした報告は見あたらない。

そこで本研究では、それを明らかにするための基礎研究として、反りを有するブレードをフランジで固定したときの反りの変化を理論解析する。そして、さまざまなタイプの反り形状に対し、反

りの低減率に与えるフランジ径の影響を明らかにする。

2. 理論解析

図1のようにブレード回転中心に原点0を持つ円柱座標 (r, θ, z) を導入する。ここでは、半径 a のオールブレードタイプのブレードを、半径 b のフランジで固定する場合について解析する。

フランジで固定されたブレードの z 方向の反り(弾性的なたわみも含む)を $w(r, \theta)$ とおくと、 $w(r, \theta)$ は次式のように表すことができる。

$$w(r, \theta) = w_{\text{deform}}(r, \theta) + w_{\text{deflect}}(r, \theta) \quad (1)$$

ここで、 $w_{\text{deform}}(r, \theta)$ はブレードがもともと持っている反りであり、 $w_{\text{deflect}}(r, \theta)$ はフランジによる固定で生じるブレードのたわみである。

いま、 $w_{\text{deform}}(r, \theta)$ を次式で近似する。

$$w_{\text{deform}}(r, \theta) = \sum_{m=0}^M \left\{ \sum_{n=-N}^N I_{mn} r^n \cos m\theta + \sum_{n=-N}^N J_{mn} r^n \sin m\theta \right\} \quad (2)$$

ここで I_{mn} と J_{mn} は定数であり、(2)式がブレード

* 1 岩手大学工学部

(〒020-8551 盛岡市上田4-3-5)

* 2 三菱マテリアル

(〒330-8505 大宮市北袋町1-297)

* 3 宮城県工業技術センター

(〒982-0011 仙台市太白区長町8-7-20)

* 4 北見工業大学(〒090-0015 北見市公園町165)

学会受付日 1997年8月4日

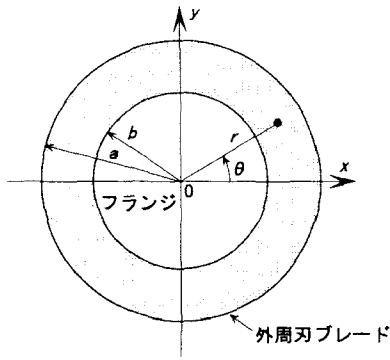


図1 極座標 (r, θ)

の反り形状を近似するように決定される。また、 M と N は近似の度合いに関係する値である。一方、 $w_{deflect}(r, \theta)$ は、平板のたわみ面に関する次の偏微分方程式を満足しなければならない³⁾。

$$\Delta w_{deflect}(r, \theta) = 0 \quad (3)$$

ここで、 Δ はラプラシアンである。

変数分離法を用い、式(3)の解を次式で近似する。

$$\begin{aligned} w_{deflect}(r, \theta) &= A_0 + B_0 \ln r + C_0 r^2 + D_0 r^2 \ln r \\ &+ (A_1 r + B_1 r^{-1} + C_1 r^3 + D_1 r \ln r) \cos \theta \\ &+ \sum_{m=2}^M (A_m r^m + B_m r^{-m} + C_m r^{m+2} + D_m r^{-m+2}) \cos m\theta \\ &+ (E_1 r + F_1 r^{-1} + G_1 r^3 + H_1 r \ln r) \sin \theta \\ &+ \sum_{m=2}^M (E_m r^m + F_m r^{-m} + G_m r^{m+2} + H_m r^{-m+2}) \sin m\theta \end{aligned} \quad (4)$$

ここで $A_m, B_m, C_m, D_m (m=0, 1, 2, \dots)$ は定数である。

次に本問題の境界条件を考える。ブレードは半径 b のフランジによって固定されているので、 $r=b$ におけるブレードの反りおよび反り角は零である。したがって、次式が成立しなければならない。

$$(w)_{r=b} = (w_{deform} + w_{deflect})_{r=b} = 0 \quad (5)$$

$$\left(\frac{\partial w}{\partial r} \right)_{r=b} = \left\{ \frac{\partial}{\partial r} (w_{deform} + w_{deflect}) \right\}_{r=b} = 0 \quad (6)$$

また、ブレード刃先での半径方向に垂直な断面での曲げモーメント M_r は零であるので、

$$\begin{aligned} (M_r)_{r=a} &= -D \left\{ \frac{\partial^2 w_{deflect}}{\partial r^2} + \nu \left(\frac{1}{r} \frac{\partial w_{deflect}}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 w_{deflect}}{\partial \theta^2} \right) \right\}_{r=a} \\ &= 0 \end{aligned} \quad (7)$$

となる。ここで、 D はブレードの曲げ剛さである。 E, ν, t を、それぞれブレードのヤング率、ポアソン比、厚さとすれば D は次式で与えられる。

$$D = \frac{Et^3}{12(1-\nu^2)} \quad (8)$$

さらに、ブレード刃先では半径方向に垂直な断面での刃厚方向のせん断力 Q_r とねじりモーメント $M_{r\theta}$ との間に次の関係が成立しなければならない。

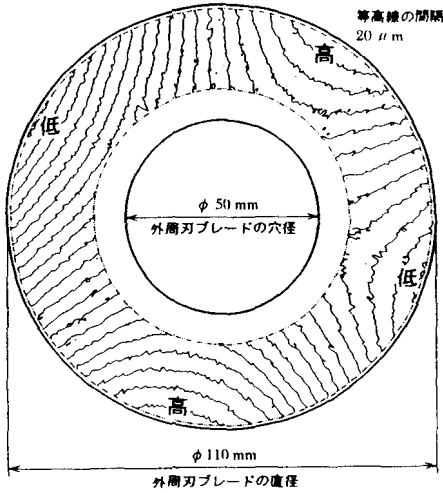
$$\begin{aligned} \left(Q_r - \frac{\partial M_{r\theta}}{r \partial \theta} \right)_{r=a} &= -D \left\{ \frac{\partial^3 w_{deflect}}{\partial r^3} + \frac{1}{r} \frac{\partial^2 w_{deflect}}{\partial r^2} - \frac{1}{r^2} \frac{\partial w_{deflect}}{\partial r} \right. \\ &+ (2-\nu) \frac{1}{r^2} \frac{\partial^3 w_{deflect}}{\partial r \partial \theta^2} \\ &\left. - (3-\nu) \frac{1}{r^3} \frac{\partial^2 w_{deflect}}{\partial \theta^2} \right\}_{r=a} \\ &= 0 \end{aligned} \quad (9)$$

以上の式からわかるように、フランジで固定されたブレードの反りに対してブレードのヤング率 E と厚さ t は理論的には全く影響を与えない。

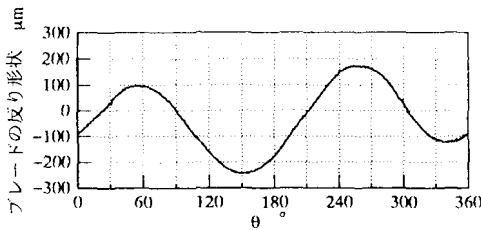
3. 検証実験

厚さ $207 \mu\text{m}$ (厚み誤差 $\pm 1 \mu\text{m}$)、外径 110mm 、穴径 50mm の焼結メタルボンダダイヤモンドブレード(粒径 $20/30 \mu\text{m}$ 、集中度 50)を用い、上述した理論解析の妥当性を検証した。

まず、拘束されていない(フランジに固定されていない)ブレードの反り形状を測定した。ブレードにできるだけ外力が加わらないよう、接着剤を用いてブレード側面を三点で支持し、スライサー主軸に取り付けた。そして、主軸端面に連結したステッピングモータで主軸を低速で回転させながらブレード円周方向の反りを三角測距方式のLED変位センサで非接触測定した。なお、測定に用いたLED変位センサのスポット径は約 1mm 、分解能はカタログ値で $1 \mu\text{m}$ であった(実際には測定点が移動するので分解能は $3 \mu\text{m}$ 程度になるが、ここでは



(a) 反り形状の等高線図



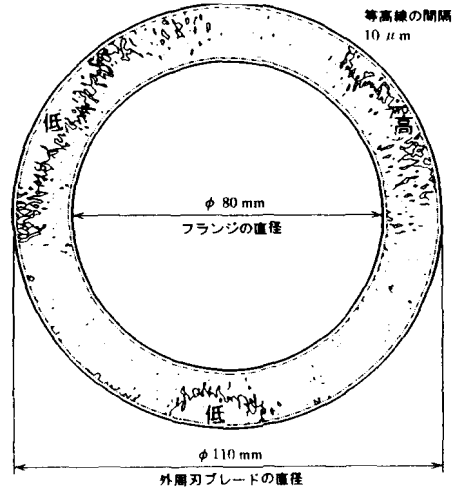
(b) $r=54\text{mm}$ におけるブレードの反り形状

図2 フランジで固定されていないブレードの反り形状の測定結果

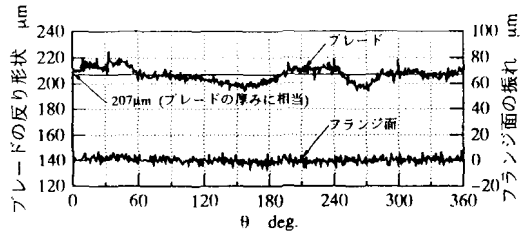
うねり成分が重要であるのでこの程度の分解能で十分と判断した). この測定を, ブレード半径33mmから54mmの範囲で1mm間隔で行った. なお, 円周方向の測定間隔はステッピングモータのステップ角に相当する 0.72° とした.

測定したブレードの反り形状を等高線図で表したのが図2(a)である(二つの二点鎖線の円は測定範囲を示している). 図から, 測定したブレードはフリル形に反っていることがわかる. 横軸に角度 θ をとり, ブレード外周から1mm内側の円上($r=54\text{mm}$)での反り形状を示したのが同図(b)である. 図から, 反りのP-V (peak to valley) 値が約 $400\mu\text{m}$ もあることがわかる.

次に, このブレードを直径80mmのフランジで固定し, 半径41mmから54mmの範囲で1mm間隔でブレードの反り形状を測定した. 測定した反り形状の等高線図を図3(a)に, また, ブレード外周から1mm内側の円上($r=54\text{mm}$)における反り形状および $r=39\text{mm}$ におけるフランジ面の振れを同図(b)に示した. 図から, ブレードをフランジで



(a) 反り形状の等高線図



(b) $r=54\text{mm}$ におけるブレードの反り形状とフランジ面の振れ
図3 フランジで固定されたブレードの反り形状

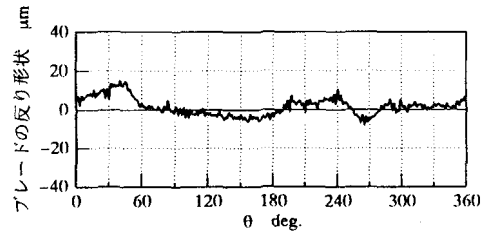


図4 $r=54\text{mm}$ におけるブレードの反り形状の解析結果

固定することによって, 反りが非常に小さくなることがわかる.

以上の測定結果を基に, 理論解析の妥当性を次のようにして検証した. まず, 拘束を受けていないブレードの反り形状の測定データから(2)式の I_{mn} , J_{mn} を決定する. 次に, 直径80mmのフランジでブレードを固定したときの $r=54\text{mm}$ の円上におけるブレードの反り形状を理論解析する. そして図3(b)と比較する. なお, I_{mn} , J_{mn} の決定に際しては $M=249$, $N=7$ として最小二乗法を用いた. また, ポアソン比は0.25として計算を行った.

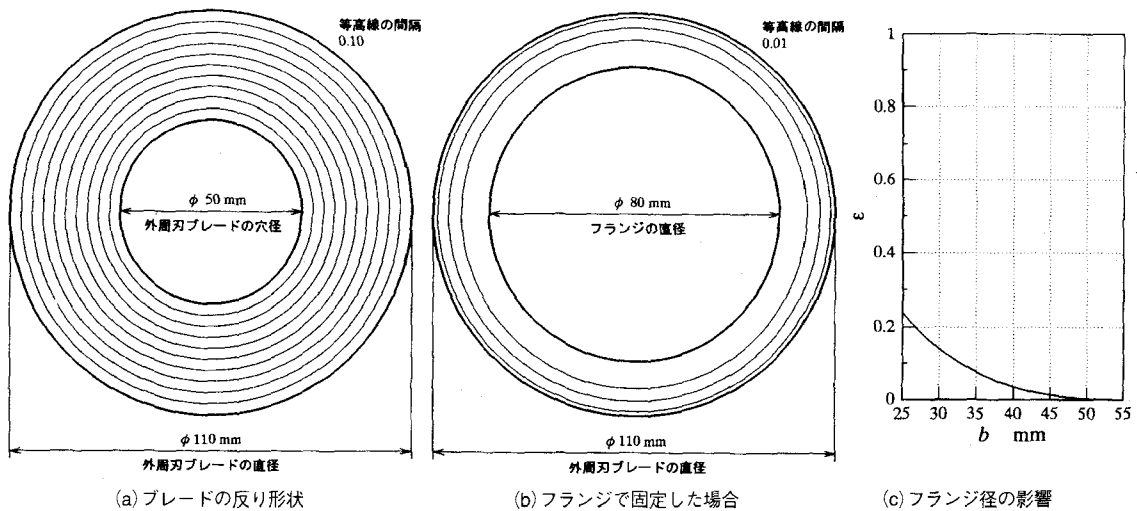


図5 中べこ形の反り形状を持つブレードの場合(その1)

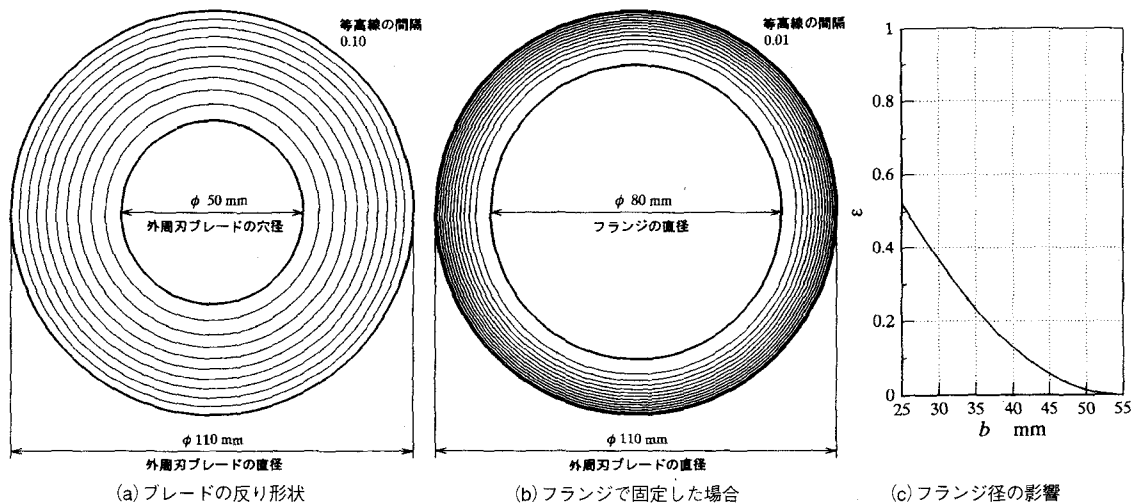


図6 中べこ形の反り形状を持つブレードの場合(その2)

理論解析から得られた $r=54\text{mm}$ の円上におけるブレードの反り形状を図4に示す。図4は図3(b)と定量的かつ定性的によく一致していることがわかる。よって本理論解析の妥当性が確かめられた。

4. 反りに与えるフランジ径の影響

本論文では、後述する三つのタイプの反り形状に対し、反りに与えるブレードサイズの影響を調べる。異なるタイプの反り形状を同じ基準で比較評価するため、拘束を受けていないブレードの反りのP-V値をいずれのブレードも1(無次元量)とする。これに対してフランジで固定したブレードの反りのP-V値を相対的に ϵ (無次元量)で表すことにする。

内径50mm、外径110mm、ポアソン比0.25のブレードについて解析した結果を以下に示す。

a. 中べこ形の場合

中べこ形の反りはさらに3つのタイプに分けることができる。一つは図5(a)に等高線図で示したように、反りの半径方向の変化が直線的であるタイプ、残る二つは反りの変化率がブレード外周側ほど大きいタイプ(図6(a))と逆にブレード内周側ほど大きいタイプ(図7(a))である。各図の図(b)にはこれらのブレードを直径80mmのフランジで固定したときの反り形状を等高線図で示した。また、図(c)にはフランジ半径 b に対する ϵ の変化を示した。これらの図から、半径方向に変化曲率を持つ図6(a)や図7(a)のようタイプの反り形状は、そ

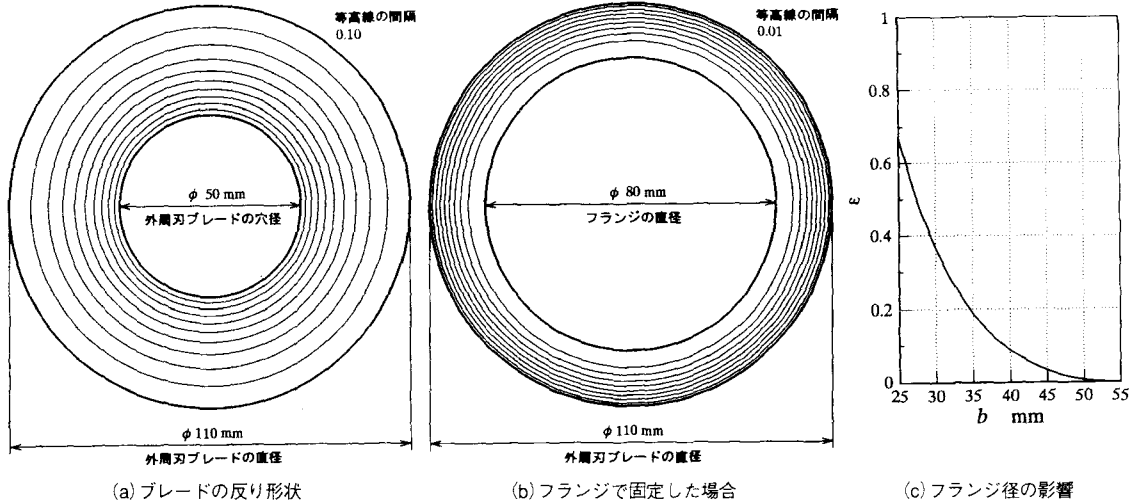


図7 中べこ形の反り形状を持つブレードの場合(その3)

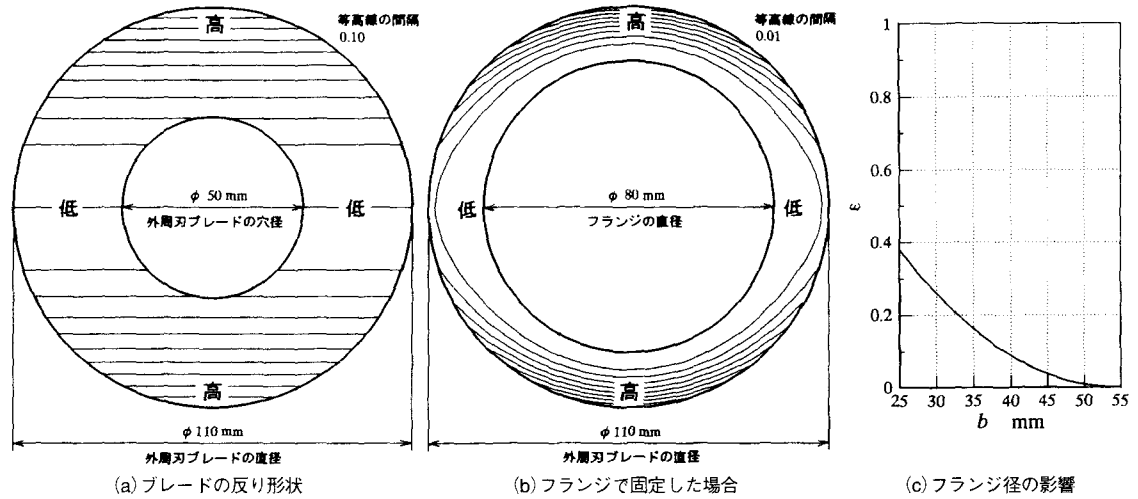


図8 U字形の反り形状を持つブレードの場合

れを持たない図5(a)のような反り形状に比べてフランジによる反りの低減率が小さいことがわかる。

b. U字形の場合

U字形の反り形状を有するブレードの場合について図8に示す。同図(b)のように、このタイプの反り形状を有するブレードをフランジで固定すると舟形になる。フランジによる反りの低減率は図6や図7よりは大きいですが、図5よりは小さい。

c. フリル形の場合

フリル形の反り形状は、図9(a)のようにブレードの外周側に比較的大きなフリルを有するタイプと図10(a)のようにブレードの内周側に比較的大きなフリルを有するタイプに分けられる。前者の場合、フランジ径が小さくてもブレードの反りの

低減率は非常に大きい。これに対し、後者のbとεの関係は図5(c)とほとんど同じである。なお、図10(a),(b)で、ブレードの反りの高低がフランジによる固定の前後で逆転するのは、フランジで固定する際に「高」の部分が押し下げられ、「低」の部分が押し上げられるためである。

5. 結 言

反りを有するブレードをフランジで固定したときの反り形状の変化を理論的に求める方法を示し、それを用いてブレードの反りに与えるフランジ径の影響を調べた。得られた結果を要約すると以下のようなになる。

(1) 中べこ形の反り形状を有するブレードの場合、

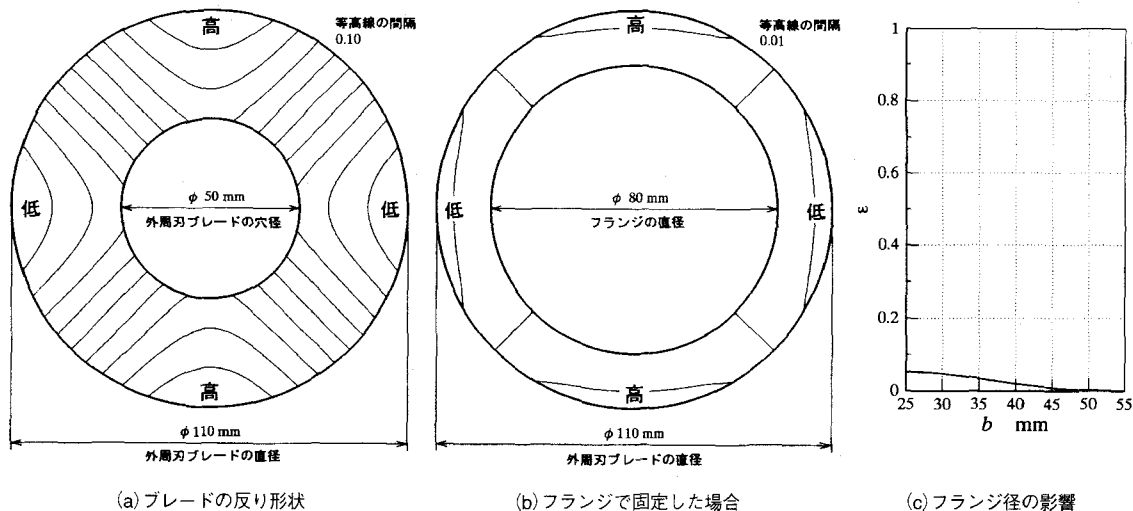


図9 フリル形の反り形状を持つブレードの場合(その1)

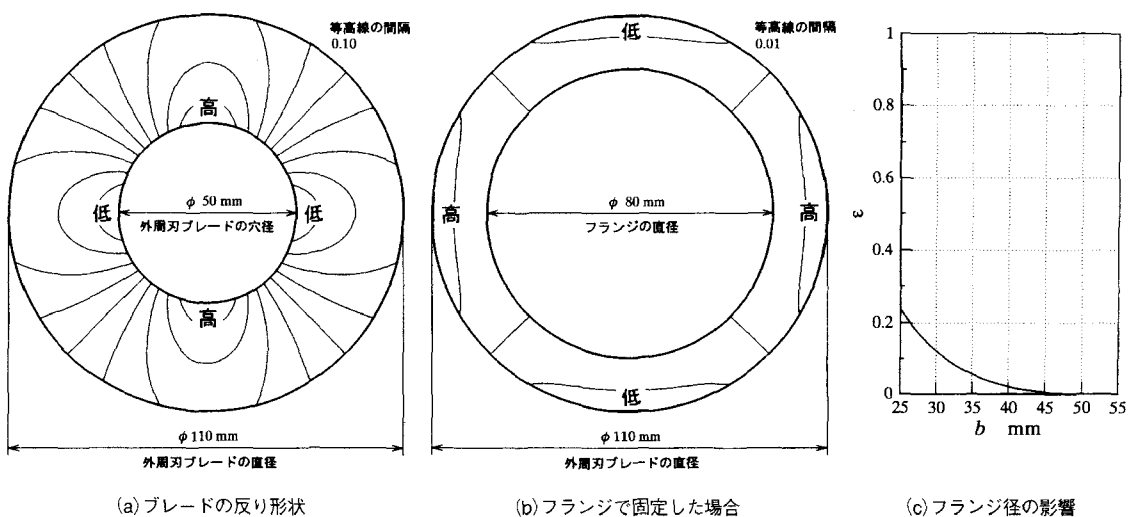


図10 フリル形の反り形状を持つブレードの場合(その2)

反りの半径方向の変化曲率が小さいほどフランジで固定したときの反りの低減率は大きくなる。

- (2) U字形の反り形状を有するブレードをフランジで固定すると舟形の反り形状になる。
- (3) 外周側にだけ強いフリルの反り形状を有するブレードの場合、フランジの径が小さくても反りの低減率は大きい。

参考文献

- 1) 石川憲一編著：硬脆材料の高効率・高精度スライディング加工，アイピーシー，(1995)75。
- 2) 村岡英一，高木純一郎，小林 裕，佐藤良幸，小林雅隆，薄刃切断ホイールによる高速切断に関する研究－ホイールの初期変形及び高速挙動が研削性能に及ぼす影響，1991年度精密工学会春期学術講演会講演論文集，575。
- 3) 中原一郎：応用弾性学，実教出版，(1980)98。