数値制御機能を用いたスラント研削に関する研究*

— 仕上げ面粗さ改善原理の解明 —

中川平三郎** 廣垣俊樹*** 岩崎義範**** 中澤秀夫**** 喜田義宏† 垣野義昭††

Study on Slant Grinding by Numerical Control

— A theory of Improvement of Ground Surface Roughness —

Heisaburo NAKAGAWA, Toshiki HIROGAKI, Yoshinori IWASAKI, Hideo NAKAZAWA,
Yoshihiro KITA and Yoshiaki KAKINO

This study deals with the improving method of ground surface roughness by numerical control function with a machining center. In the present report, we researched effective factors to improve the ground surface roughness after slant grinding by numerical control function. That is, we investigated the relationship between the surface roughness curves and slant grinding conditions. As a result, it is clear that there are two important parameters (hs: height formed by a cutting edge pre revolution and X0/Z0: incline of envelope curve of a cutting edge) to form the fine ground surface in slant grinding. Additionally, it was also confirmed that the wear of wheel was small in appropriate slant grinding conditions

Key word : grinding, CBN wheel, numerical control, machining center, surface roughness

1. 緒 言

マシニングセンタ(MC)上での金型加工において、研削加工は高精度・高品質の仕上げ加工として期待されている。そこで著者らは、MC上での小径砥石を用いた研削加工を対象に、良好な仕上げ面粗さの獲得を目的として、ドレッシング条件の検討や新しい研削方法の研究を進めてきた^{1)~2)}。その結果、比較的粗い粒度の砥石を用いた場合にも、加工能率を維持しつつ良好な仕上げ面粗さが得られる方法の一つとして、数値制御(NC)機能を活用した1パスオシレーション研削法を考案した²⁾。また、NC送り方式のヘリカルスキャン研削(以下HS研削)に関する報告^{3)~4)}では、1パスオシレーション研削の場合と同様に、比較的粒度の粗い砥石を用いた場合でも、仕上げ面粗さの改善を達成できることが実験で示されている。しかし、これらの研究では、仕上げ面粗さの改善について、その有効性を実験によって確認するのみに留まっており、仕上げ面粗さの改善原理に関する定量的な解明には至っていないようである。そのため、実際に上述の研削法を適用する場合、理論的に仕上げ面粗さの改善効果を予想し、加工条件を設定することができなかった。

そこで本報では、これら数値制御機能を活用した各研削法における仕上げ面粗さの改善原理の解明を試みる。はじめに、1パスオシレーション研削とHS研削が、等価な原理(スラント研削法)によって仕上げ面粗さの改善を達成していることを、実験によって確認する。その後、加工された研削面にフーリエ解析を適用し、仕上げ面形成のメカニズムを定性的にモデル化する。さらに、そのモデルを用いて仕上げ面粗さの改善効果を定量的に評価する解析パラメータを提案し、その妥当性を実験で実証する。最後に、砥石寿命や研削抵抗、砥石半径方向摩耗量等の研削性能について、従来型の研削との相違点を比較・検討する。

2. スラント研削における仕上げ面形成のメカニズム

2.1 スラント研削および1パスオシレーション研削実験

スラント研削と1パスオシレーション研削の概要を図1に示す。スラント研削とは、数値制御機能を用いることで砥石周方向と送り方向との間に角度 ψ を与えながら加工を行う研削法であり、本報では、 ψ と仕上げ面粗さ R_a の関係を容易に見ることができるHS研削法と同様の操作を行う。HS研削とは、報告³⁾において、①砥石軸を所定量傾斜させる、②NC送り機構を利用し砥石を所定角度の研削方向に送る、と定義されている。本報では、②の手法に従い、図1(a)に示すように研削を行う。一方、数値制御機能を活用して1パスオシレーション研削を行う場合、加工パスは図1(b)に示すように、振幅 $2a$ 、波長 λ の正弦波状になる。この時の正弦波を、振幅 $2a$ 、波長 λ の三角波に近似すると、砥石送り方向は、図1(b)の拡大図のように砥石周方向と $\pm\psi_0$ の角度を成す。角度 ψ_0 の定義を図内の式で示す。オシレーション研削およびスラント研削法では、砥石と工作物間に等価な送り運動を与えており、角度 ψ_0 が仕上げ面粗さに与える影響も等価になると考えられる。そこで本節では、角度 ψ_0 が仕上げ面粗さに与える影響を実験的に検証する。

Fig.1 Summary of oscillation grinding and slant grinding

* 原稿受付 平成14年12月14日
** 正会員 滋賀県立大学工学部(彦根市八坂町2500)
*** 正会員 同志社大学工学部(京田辺市多々羅都谷1-3)
**** 滋賀県立大学大学院
+ 正会員 大阪工業大学(大阪市旭区大宮5-16-1)
++ 正会員 京都大学大学院工学研究科(京都市左京区吉田本町)

Table 1 Dressing condition

Spindle speed	10000rpm
Rotary wheel speed	3258rpm
Diamond wheel	SD40Q75M ϕ 50
Peripheral speed ratio	0.8(Up cut)
Depth of cut	$2\mu\text{m} \times 5$
Dressing lead	0.075mm/rev

Table 2 Grinding condition

Workpiece	SUJ3 (HRC60), $t=10\text{mm}$
Spindle speed	10000rpm
Depth of cut	$10\mu\text{m}$
Feed speed F	100mm/min
Coolant	0.02m ³ /min

Table 3 Oscillating conditions

Oscillating type	Helical interpolation
Amplitude $2a$	0.07~0.7mm
Wave length λ	1mm

Table 4 Slant angle

Slant angle ψ	$10 \sim 45^\circ$
--------------------	--------------------

Fig.2 Effect of angle ψ , ψ_0 on surface roughness R_y

Fig.3 Photograph of ground surface

Fig.4 Profile curves after slant grinding ($F=400\text{mm/min}$)

実験は、マシニングセンタ上(安田工業製 YBM850V)で行う。実験には $\phi 20$ ビトリファイド CBN ホイールを用い、ドレッシングはテーブル上に固定したロータリドレッサを用いて行う。ドレッシング条件を表 1、研削条件を表 2 に示す。送り速度 F は、図 1 に示すように、砥石の進行方向に対して定義する。1 パスオシレーション研削とスラント研削の加工条件を表 3、4 に示す。1 パスオシレーション研削では、波長 λ を一定として振幅 $2a$ の異なるいくつかの条件を設定し、 ψ_0 を変化させた。加工後の仕上げ面粗さは触針式粗さ計を用いて最大粗さ R_y を測定した。測定方向は砥石軸方向とし、1 パスオシレーション研削では、 ψ_0 の近似誤差が小さい波長 λ , $\lambda/2$ 付近(図 1(b)中 A, B)で仕上げ面粗さの測定を行った。仕上げ面粗さの測定結

Fig.5 Fourier analysis of roughness profile after slant grinding

果を図 2 に示す。図よりいずれの研削法を用いても角度 ψ (ψ_0) で仕上げ面粗さが整理できることがわかる。

そこで次節以降では、スラント研削法をモデルとして、仕上げ面形成のメカニズムを検討する。

2.2 スラント研削における断面曲線のフーリエ解析

スラント研削面の拡大写真を図 3 に示す。図 3 より、 $\psi=0^\circ$ 、すなわち従来型の研削(ストレート研削)の場合には、砥石の送り方向に対して、直線状の研削痕が刻まれていることがわかる。一方、図 3 の $\psi=30^\circ$ のスラント研削の場合は、多数の小さな研削溝によって研削面が構成されていることがわかる。また、図中の特徴的な黒い研削溝に着目すると、砥石周方向に対する砥石一回転あたりの送りピッチ ($173\mu\text{m}/\text{rev}$) 毎に、溝の位置が砥石軸方向に一定量ずつ移動していることがわかる。次に各研削面の断面曲線の測定例を図 4 に示す。図より、 $\psi=0^\circ$ 、ストレート研削の場合の断面曲線には、大小の凹凸が不規則に存在している。これは、ドレッシングによって形成された、砥石作業面上の不規則な切れ刃の分布を反映しているものと考えられる。一方、スラント研削の断面曲線は、ストレート研削の断面曲線と比較して、全体的に大きな凹凸が少なくなり、仕上げ面粗さが改善されていることがわかる。特に、 $\psi=70^\circ$ の断面曲線には、規則的な小さな凹凸(図 4 中の間隔 Δ_1)が見られ、さらに、波長の大きなうねり成分(図 4 中の間隔 Δ_2)があらわれていることがわかる。ここで、測定した断面曲線のフーリエ解析を行った。断面曲線を構成している波形の波長 λ_s を横軸に、波形の振幅 $2A_s$ を縦軸にとり、解析結果を図 5 に示す。図より、 $\psi=0^\circ$ の断面曲線を構成する波形は、波長の分布のばらつきが大きく、また全体的に振幅の大きい波形であることがわかる。一方、スラント研削の断面曲線を構成する波形は、特定の波長でピークが表れていること(例えば、図 5(b)中 $\lambda_s=20$ 、図 5(c)中 $\lambda_s=40\mu\text{m}$ 付近)がわかる。以上の解析結果より、スラント研削の断面曲線には、規則的な間隔で凹凸が見られることがわかった。

2.3 単一切れ刃モデルによる仕上げ面形成メカニズムの解析

図 6 に示すような単一切れ刃モデルを用いて、仕上げ面形成のメカニズムを考える。加工では、砥石最外周に存在する切れ刃が仕上げ面の形成に影響することを考慮し、砥石の最外周(半径 R)に円錐状の一つの切れ刃が存在すると仮定する。そして、その切れ刃に主軸スピンドルによる回転運動と送り軸による送り運動を与え、工作物をモデル化した、厚さを無視できる基準板との干渉関係から、断面曲線の形成過程を調べる。また本解析では、基準板上で切れ刃が干渉した部分は、完全に削り取られると仮定する。

Fig.6 Grinding model based on a cutting edge

図6に示すように、回転数 N で回転している砥石の周速方向に対し傾斜角度 ψ の方向に送り運動を与えると、砥石最外周の単一切れ刃は、角度 ψ の方向に渦巻き状の運動を行う。この時、基準板に干渉した切れ刃の頂点を結んだ切れ刃先端の包絡線（以下、切れ刃包絡線）は、図中の点線のように曲線を描くと考えられる。図4のスラント研削の断面曲線（ $\psi=70^\circ$ ）に見られる波長の大きい成分は、切れ刃包絡線によるものと考えられる。また、切れ刃形状が円錐状と仮定した場合、基準板上には、図6の網目部で示される規則的な三角波状の削り残し（以下、切れ刃による微小削り残し）が形成されると考えられる。すなわち、図のスラント研削の断面曲線で見られる規則的な間隔の小さな凹凸は、切れ刃による微小削り残しと対応する。

図6に示す微小削り残しの凹凸の1波長に相当する、基準板上での干渉切れ刃頂点の間隔 l_f は、図6中に示す式によって計算することができる。この l_f は前節で示した、スラント研削の断面曲線のフーリエ解析結果において、ピーク値をとる波長と対応する。図5の横軸に対し、 l_f の計算値を太線で示す。図より、 l_f の計算値は、スラント研削の断面曲線のフーリエ解析結果において、ピーク値をとる波長とほぼ一致していることがわかる。

以上の解析結果より、スラント研削において形成された仕上げ面は、①最外周の切れ刃による微小削り残しや、②切れ刃包絡線等の幾何学的関係で説明が可能であることがわかった。そこで本章では、これらの幾何学的解析によって、スラント研削における仕上げ面粗さ改善効果の定量的評価を行う。

3. スラント研削における仕上げ面粗さ改善効果の定量的評価

3.1 切れ刃による微小削り残しが仕上げ面粗さに与える影響

スラント研削において、送り速度 F が異なる場合の断面曲線を図7に示す。図より、送り速度を変更した場合、切れ刃による微小削り残しの変化が、仕上げ面粗さに影響を及ぼすことがわかる。そこで図8に示すように、切れ刃包絡線を直線に近似

Fig.7 Effect of feed speed on profile curves ($\psi=70^\circ$)

Fig.8 Definition of h_s by a cutting edge

Fig.9 Effect of feed speed $F \sin \psi$ on surface roughness R_y

し、切れ刃形状を頂角 $2\theta_f$ の円錐形状と仮定した場合の切れ刃による微小削り残しの高さ h_s を提案する。 h_s は式(1)によって計算する。式において、 F は送り速度、 ψ は傾斜角度、 N は砥石回転数である。また、図7の粗さ曲線の谷部の平均頂角を求めた結果、 $2\theta_f=175^\circ$ 程度であった。

$$h_s \doteq \frac{l_f}{2 \tan \theta_f} = \frac{F \sin \psi}{2 N \tan \theta_f} \quad (1)$$

この時、パラメータとなる加工条件は、送り速度の砥石軸方向成分 $F \sin \psi$ と砥石回転数 N である。そこで、砥石回転数を一定とした場合に、送り速度の砥石軸方向成分 $F \sin \psi$ が仕上げ面粗さの改善効果に与える影響を、実験によって調べる。実験条件は、2.1節と同様である。

実験結果を図9に示す。また、図中の点線は h_s の計算結果である。図より、傾斜角度 ψ が小さくなる程、仕上げ面粗さの絶対値が大きくなる。 R_y について、 $\psi=10^\circ$ は $\psi=70^\circ$ の1.5~3倍)しかし、 $F \sin \psi$ の増加に伴う仕上げ面粗さの増分は、傾斜角度に関わらず、ほぼ同程度である。 $(F \sin \psi, 100 \rightarrow 200 \text{ mm/min}$ の時、 R_y の増分は $+0.2 \mu\text{m}$ 程度)また、 $F \sin \psi=100 \text{ mm/min}$ 以下では、仕上げ面粗さはほとんど変化しないことがわかる。

ここで、図において $F \sin \psi$ の変化が、仕上げ面粗さ R_y と h_s に与える影響を比較する。 $F \sin \psi$ が $0 \sim 1000 \text{ mm/min}$ の範囲において、 $F \sin \psi$ の増加に伴う、3通りの実験結果全てにおける仕上げ面粗さの増分と h_s の増分(斜線部)は、ほぼ一致することがわかる。すなわち、スラント研削において送り速度 F が仕上げ面粗さの改善効果に及ぼす影響は、切れ刃による微小削り残し量の大小にあらわれるものと考えられる。よって、 h_s をパラメータとすることにより、送り速度 F が仕上げ面粗さに及ぼす影響を定量的に評価できることがわかった。

Fig.10 Effect of tilt angle ψ on profile curves ($F=100\text{mm/min}$)

Fig.11 Cutting edge envelope by ellipse approximation

3.2 切れ刃包絡線の曲率が仕上げ面粗さに与える影響

本節では、図 9 において、 h_s がほぼ一定となる $F \sin \psi \leq 100\text{mm/min}$ の領域に着目し、この領域で仕上げ面粗さの改善効果に影響を与える要因を調べる。

スラント研削において、傾斜角度が異なる場合の断面曲線を図 10 に示す。図より、傾斜角度を変更した場合、波長の長い成分(うねり)の大きさが仕上げ面粗さに影響を与える。また、波長の長い成分の大きさは、図 11 に示すような切れ刃包絡線の勾配 X_0/Z_0 によって左右されると考えられる。そこで、この切れ刃包絡線を楕円近似の式によって表し、その勾配 X_0/Z_0 を幾何学的近似によって計算する。各式を式 (2)、(3) に示す。

$$\frac{z^2}{R^2 \tan^2 \psi} + \frac{(x-R)^2}{R^2} = 1 \quad (2)$$

$$\frac{X_0}{Z_0} = \frac{R}{Z} - \sqrt{\frac{R^2}{Z^2} - \frac{1}{\tan^2 \psi}} \quad (3)$$

式 (3) より、 X_0/Z_0 は傾斜角度 ψ だけでなく、砥石半径 R もパラメータとして含んでいることがわかる。そこで、砥石半径 R と傾斜角度 ψ の任意の組み合わせを設定して実験を行い、 X_0/Z_0 が仕上げ面粗さの改善効果に与える影響を調べる。実験条件は、ほぼ 2.1 節と同様であるが、 $F \sin \psi \leq 100\text{mm/min}$ の領域で実験を行えるよう、 $F=100\text{mm/min}$ とした。また、研削加工では砥石径を変更すると、砥石作業面上の切れ刃数の変化に伴って仕上げ面粗さの絶対値が大きく変化する。そこで、仕上げ面粗さの改善効果が比較しやすいよう、実験に用いる各砥石 ($\phi 12$, 20 , 36) に施すドレッシング条件を調整し、ストレート研削時(切れ刃が X 軸上にのみ存在、 $X_0/Z_0 \rightarrow \infty$)の仕上げ面粗さ Rys が ① $8\mu\text{m}$ 、② $3\mu\text{m}$ 、③ $2\mu\text{m}$ となる 3 つの条件を設定した。

実験結果を図 12 に示す。図より、 X_0/Z_0 が小さくなると仕上げ面粗さの改善効果が大きくなり、条件によっては $Ry=1\mu\text{m}$ 以下まで仕上げ面粗さが改善されることがわかる。また、 Rys と X_0/Z_0 が同じであれば、砥石半径 R や傾斜角度 ψ 、さらには粒度が異なる条件であっても、改善後の仕上げ面粗さはほぼ同程度になることがわかる。

Fig.12 Effect of slope of cutting edge envelope on surface roughness Ry ($F=100\text{mm/min}$)

Fig.13 Optimization algorithm of grinding conditions

以上の結果より、スラント研削において h_s がほぼ一定となる条件下(本報では $F \sin \psi \leq 100\text{mm/min}$)では、ストレート研削時の仕上げ面粗さ Rys と切れ刃軌跡の勾配 X_0/Z_0 を目安として、改善後の仕上げ面粗さを予測できることがわかった。

3.3 スラント研削における加工条件の最適化手順

パラメータ h_s , X_0/Z_0 を用いて、スラント研削における仕上げ面粗さの改善効果と加工条件の関係を定量的に評価した結果を応用し、仕上げ面粗さを目的関数として、スラント研削における加工条件の最適化手順について述べる。最適化における説明変数は、砥石半径 R 、傾斜角度 ψ 、送り速度 F とする。

図 13 に、加工条件の最適化手順のアルゴリズムを示す。最初に、工作物の加工最小半径から、使用する砥石半径 R を決定する。次に、工作物の加工面積と砥石の接触幅、および加工パス数を考慮して傾斜角度 ψ を決定する。この時、使用する砥石の、ストレート研削における仕上げ面粗さ Rys と X_0/Z_0 を目安にし、図 12 より、 h_s を考慮しない仕上げ面粗さの予測値 (Ryt) を得る。次に、加工効率を考慮して送り速度 F を決定する。この時、すでに ψ は決定済みであり、 $F \sin \psi$ と図 9 より、 h_s の計算値を得ることができる。最終的には、 Ryt と h_s の和が仕上げ面粗さ Ry の予測値となるが、予測値が所望の値を満たさない場合、加工条件の再設定が必要となる。砥石半径 R や傾斜角度 ψ の再設定を行う場合、加工パスの再検討が必要になるため、作業が煩雑になる。よって本報では、送り速度 F の調整によって、加工条件を最適化する手法を推奨する。

Fig.14 Relation between grinding length L and surface roughness R_y
(ϕ 20mm, $F=500\text{mm/min}$)

4. スラント研削における砥石寿命実験

前章では、スラント研削における仕上げ面粗さ改善効果の定量的評価を基にした、加工条件の最適化の手法を示した。この手法では、改善後の仕上げ面粗さを基準にし加工条件の最適化を行っている。しかし、実際の研削作業を行う場合、研削抵抗や砥石半径方向摩耗幅等も考慮する必要がある。また、砥石寿命の判断基準の一つとして、砥石作業面の摩耗に伴う仕上げ面粗さの悪化も考慮する必要がある。そこで本章では、スラント研削における砥石寿命を検討する。

4.1 研削距離と仕上げ面粗さの関係

実験では仕上げ面粗さ、研削抵抗、砥石半径方向摩耗幅の測定を行う。研削抵抗の測定には3成分動力計(KISTLER 9257B)を用い、研削抵抗の背分力 f_n と、砥石軸方向の研削抵抗成分 f_z を測定する。砥石半径方向摩耗量の測定はアクリル板を用いた転写法により行う。ストレート、およびスラント研削の実験条件は、2.1節とほぼ同様であるが、スラント研削の傾斜角度は $\psi=30^\circ$ とする。また、送り速度は、 $F=500\text{mm/min}$ とした。

図14に、仕上げ面粗さと研削距離の関係を示す。図より、研削初期の仕上げ面粗さは、ストレート研削では $R_y=3.5\mu\text{m}$ 程度だが、スラント研削では、 $R_y=2.3\mu\text{m}$ 程度まで改善されていることがわかる。また、研削距離の増加に伴う仕上げ面粗さの悪化について、ストレート研削では、研削距離30mm程度で仕上げ面粗さが $R_y=6\mu\text{m}$ を越えており、研削初期から $+3\mu\text{m}$ 程度粗さが悪くなっている。一方スラント研削では、仕上げ面粗さの悪化が緩やかで、研削距離が60mmに達しても $R_y=3\mu\text{m}$ 以下を保持し、研削初期からの粗さの悪化も $+1\mu\text{m}$ 以下になっている。

4.2 研削距離と研削抵抗、砥石半径方向摩耗量の関係

次に研削抵抗と砥石半径方向摩耗幅の変化に着目する。図15に実験結果を示す。図より、研削距離の増加に伴う研削抵抗と砥石半径方向摩耗量の変化については、ストレート研削とスラント研削の間で大きな差異は確認できない。研削加工では、主に砥石の回転運動によって、砥石作業面上の切れ刃による工作物の除去加工が行われる。この時の切削速度はきわめて大きく、本実験ではおよそ 624m/min である。スラント研削では、これに砥石軸方向の送り運動が加わるが、その送り速度は本実験において、 $F\sin\psi=250\text{mm/min}$ である。その差は比率にしておよそ $2500:1$ と非常に大きく、スラント研削における砥石軸方向の送り運動が、実際の砥石摩耗に与える影響は、極めて小さいことが示された。これは、各研削法において、砥石軸方向の研削抵抗成分 f_z にほとんど差がないことからわかる。

以上の実験結果より、スラント研削では同条件のストレート研削と比較して、より良好な仕上げ面粗さを長期間維持した加工ができることが実験的に示された。また、砥石の周速度と砥

Fig.15 Relation among grinding force, radial wheel wear and grinding length L
(ϕ 20mm, $F=500\text{mm/min}$)

石軸方向の送り速度成分 $F\sin\psi$ の差が、比較的大きい条件でスラント研削を行った場合、同条件のストレート研削とほぼ同程度の研削抵抗と砥石半径方向摩耗の進行が確認できた。

5. 結 言

数値制御機能を用いたスラント研削法を対象に、仕上げ面粗さの改善効果に関する解析や、研削性能に関する砥石寿命実験を行った結果、次のようなことがわかった。

- (1) 1パスオシレーション研削とスラント研削は、等価な原理によって仕上げ面粗さの改善が達成されていることがわかった。
- (2) 単一切れ刃モデルを用いたモデル解析によって、スラント研削における仕上げ面形成のメカニズムを解明した。
- (3) スラント研削において、仕上げ面粗さの改善効果に影響する幾何学的要素として、特定の切れ刃が生成する凹凸の高さ h_s と切れ刃軌跡の勾配 X_s/Z_s を提案した。その結果、ストレート研削時の仕上げ面粗さ R_{ys} を目安にし、加工条件から算出した h_s 、 X_s/Z_s の影響を考慮することによって、スラント研削時の仕上げ面粗さを予測できることがわかった。
- (4) スラント研削における研削性能を実験的に評価した結果、従来型のストレート研削よりも良好な仕上げ面粗さを長期間維持した加工ができることがわかった。また、研削抵抗や砥石半径方向摩耗幅については、ストレート研削とスラント研削において、大きな差はないことがわかった。

参 考 文 献

- 1) 中川平三郎, 廣垣俊樹, 岩崎義範, 林猛晴, 垣野義昭, 喜田義宏: 小径 CBN ホイールの研削性能に関する研究, 砥粒加工学会学術講演会講演論文集, 237(2001).
- 2) 中川平三郎, 廣垣俊樹, 岩崎義範, 林猛晴, 喜田義宏, 垣野義昭: マシニングセンタによる数値制御オシレーション研削に関する研究, 精密工学会誌, 68, 7 (2002) 923.
- 3) 相沢真樹, 緑川純一, 鈴木伸雄, 植松哲太郎, 鈴木清: ヘリカルスキャン研削の研究(第1報: 面粗さ向上の条件), 精密工学会秋季大会学術講演会論文集, 685 (1993).
- 4) 鈴木清, 植松哲太郎: 金属・セラミックス・ガラスのヘリカルスキャン研削(材料特性と面粗さの関係), 機械振興協会, 平成11年度加工技術データファイル, 3249 (1999).