

低周波振動ドリルによる SUS 304 の穴あけ加工 (切削特性とドリル切れ刃の温度)

A Study on Low Frequency Vibratory Drilling of SUS304
(Cutting Temperature of Drill Point)

足立勝重¹⁾, 新井典久²⁾, 吉川晃³⁾

Katsushige ADACHI, Norihisa ARAI, and Akira YOSHIKAWA

The main object of the present paper is to discuss cutting temperature of the drill point in low frequency vibratory drilling of SUS304. Although many studies dealing with drill wear in conventional drilling have been presented, there has been hitherto no study dealing with cutting temperature of the drill point in low frequency vibratory drilling of SUS304. For this reason, cutting temperature of drill point in low frequency drilling of SUS304 was chosen as the subject of our studies, that is, cutting temperature at the drill face was measured by using cobalt high speed steel drills brazed with sheathed thermocouples, and the experimental results were compared with those of conventional drilling. On the other hand, cutting temperature of drill point was computed by finite element method. From this study, distribution of cutting temperature of drill point was clarified.

1. 諸 言

機械加工分野におけるドリル加工の占める割合は非常に大きく、その自動化も大いに推進され、それに伴ってドリル寿命の向上、より効果的な切りくず処理、加工精度の向上などが要求されるようになってきている¹⁾。一方、加工材料としてステンレス鋼、チタン合金等の難削材が近年多く使用されるようになり、これらの材料に適合したドリル加工法を見出すことが、この分野における重要な課題の一つとなっている²⁾。しかし、これらの難削材は加工硬化性が大きい、熱伝導性があるなどの原因で穴あけ加工時の切りくずの排除が困難となり、その結果、切れ刃に温度上昇を生じ、工具摩耗が大きくなる。また、工具すくい面への切りくず溶着現象も激しく、さらに、チップングを起こしやすいなどいろいろ問題を抱えている³⁾。これらの難削材に対する有効なドリル加工方法のひとつとして低周波振動ドリル加工⁴⁾が考えられる。しかしこれに関する研究は少なく、ただ、E.A.SATEL⁵⁾のステンレス鋼にこの方法を適用した研究があるにすぎない。

このような情勢のもとで、筆者らは低周波振動ドリルによる SUS304 の穴あけ加工を本研究の課題として取り上げ、ドリル切れ刃の切削温度を中心に切削抵抗、工具摩耗を実験的に調べた。そして、低周波振動ドリル加工時の切削温度と工具摩耗との相関について検討した。さらに、ドリル刃先部における三次元熱伝導解析を試み⁶⁾、ドリルすくい面、逃げ面における温度分布についても考察した。

平成2年6月25日原稿受理

1) 3) 大阪産業大学 工学部

2) 同志社大学 工学部

2. 実験装置と方法

2.1 実験装置

図1は本実験に使用した低周波振動ドリル加工装置を示す。振動発生装置は電気油圧サーボ機構によってドリルに送り方向の振動を与えるもので、ドリルの回転と同時に送り方向に0～100Hzまでの低周波振動を与えることができる。切削抵抗はキスラー製の圧電式切削動力計(9273型)で測定し、電算機で処理した。

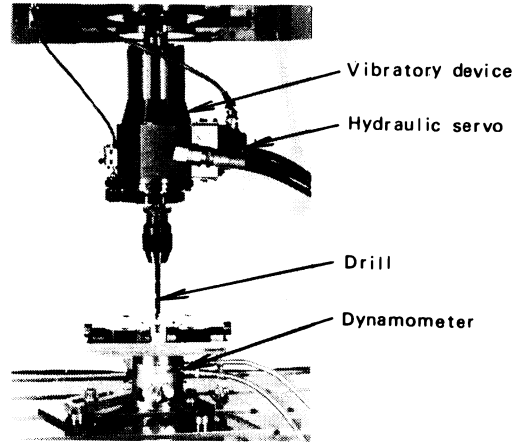
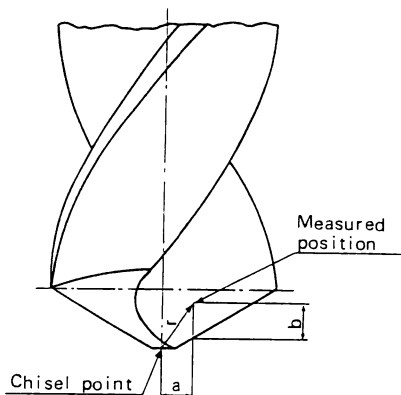


図1 低周波振動ドリル加工装置

2.2 切削温度の測定方法

ドリル切れ刃の切削温度についてはシース熱電対を用いて測定した。このドリルすくい面上の切削温度の測定はほとんど行われた例はなく、本研究での方法は独創的なものである。

すなわち、ドリルのマージン上に細いみぞを切り、それを通して、すくい面上に埋め込んだシース熱電対を導くようにしたドリルを考案し、工作物を回転、ドリルを軸方向に送って測定を行った。図2はシース熱電対の埋め込み位置を示す。図中のC-1, C-2およびC-3は測温点($r=2.7\text{mm}$, 3.5mm , 5.9mm)の異なるドリルの記号である。また、ドリルのすくい面温度測定実験のブロックダイアグラムを図3に示す。



Drill	a(mm)	b(mm)	r(mm)
C-1	1.3	1.7	2.7
C-2	1.7	2.2	3.5
C-3	3.2	3.1	5.9

図2 シース熱電対の埋め込み位置

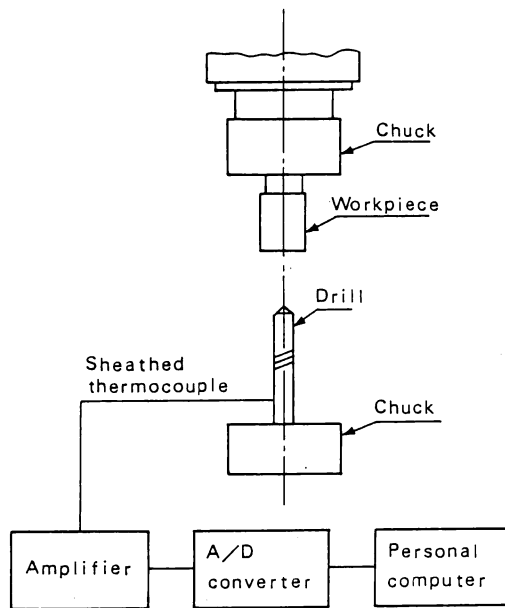


図3 実験装置および切削温度の測定ブロックダイアグラム

2.3 被削材とドリル

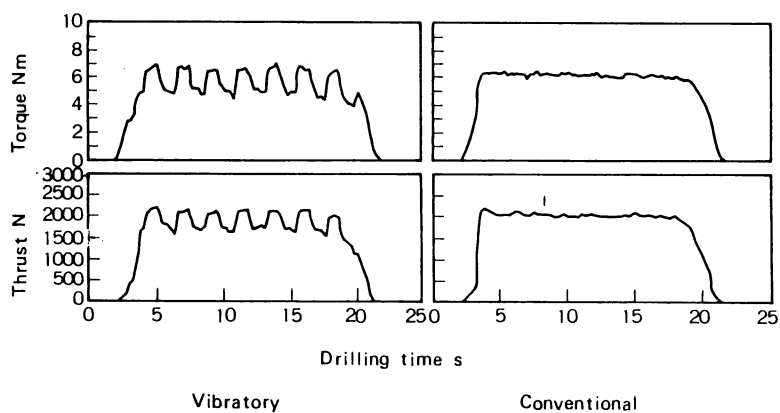
本研究に使用した被削材は溶体化処理（1100℃で1時間熱処理）した板材（200×300mm）で、その表面は研削加工がしてある。ドリルは直径6mm（JIS SKH56）で、ばらつきをなくすため、同一ロットで製作したものを使用した。切削油剤（JIS W 2-3）は、3.2ℓ/minで供給した。

3. 実験結果と考察

3.1 切削抵抗と工具摩耗

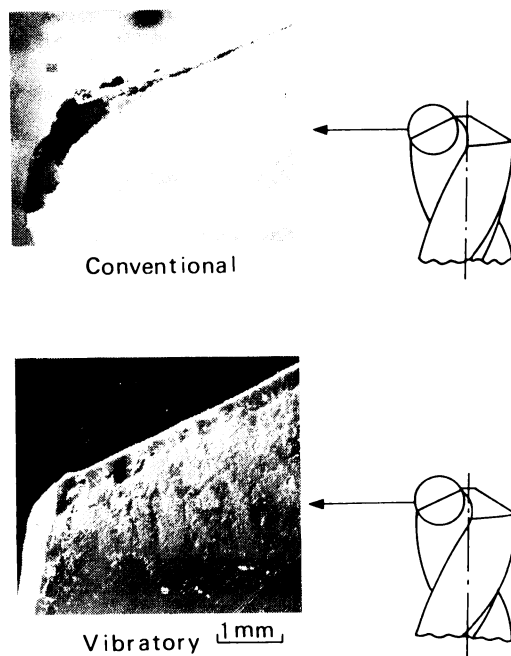
図4は低周波振動ドリル加工（以下、振動加工と称す）の場合の切削抵抗（スラスト、トルク）を示す。また同図には慣用ドリル加工（以下、慣用加工と称す）の場合の測定結果も併記し比較してある。振動加工の場合、切込み厚さが周期的に変化する⁷⁾ので、切削抵抗（スラスト、トルク）は図に示すように大きく変動する。これらの切削抵抗を穴あけ後5秒付近のところのみみると、振動加工の場合、スラストで約380~550N、トルクで約0.8~1.4Nmとなる。すなわち、静的成分（変動の平均値）のみみると、スラストで465N、トルクは1.1Nmとなる。これに対し、慣用加工の場合はそれぞれ、605N、1.52Nmで、振動加工の切削抵抗は慣用切削の場合に比べて、スラストで約23%、トルクで約27%減少している。

図5は振動加工と慣用加工の場合の切れ刃逃げ面の摩耗写真の一例を示す。全般的にみて、振動加工の場合、切れ刃逃げ面には溶着物が認められず、チゼル部にわずかに摩耗がみられる程度で、切れ刃全体がほぼ均一に摩耗している。これに対し、慣用加工の場合は切れ刃逃げ面の外周コーナ部が丸く摩耗しているのが観察される。すなわち、慣用加工の場合、コー



Drill dia.10mm. Cutting speed 14.5m/min. Feed rate 0.15mm/rev.,
 Drilling depth 20mm. Amplitude 0.1mm. Frequency ratio 0.1 cycle/rev.

图4 切削抵抗



Drill dia. 10mm. Revolution 440 rpm
 Feed rate 0.15mm/rev.. Drilling depth 20mm
 Frequency ratio 0.1 cycle/rev.. Oil cutting

图5 工具磨损

ナ部の切れ刃の摩耗の進行が早くなり、その部分からチゼル部にかけて溶着物（構成刃先）の累積により、切りくず詰まりが生じて工具折損を早めるものと思われる。以上の結果から、振動加工の適用は慣用加工の場合に比べて、切削抵抗、工具摩耗の観点から効果的であることがわかった。この理由として、ドリル刃先の摩擦熱の減少と構成刃先の抑制が考えられるが、とくに摩擦熱の減少がドリル刃先の摩耗の程度に大きく関与するものと推察できる。

3. 2 ドリル切れ刃の切削温度

つぎに、両加工のすくい面温度を調べた。図6は穴深さ20mmの位置でのすくい面温度を示す。併せて慣用加工の場合も比較した。図に示すように、両者ともチゼルエッジ付近（C-1）およびマージン部付近（C-3）のすくい面温度は中央部（C-2）よりも高い。また、振動加工の場合はチゼル部およびマージン部での発熱の影響が小さいためにチゼル側、マージン側のすくい面温度が慣用加工の場合に比べて低下している。図7は穴深さと切削温度の関係を示す。図に示すように、振動加工時のすくい面上（C-1）の切削温度は慣用加工の場合に比べ、10~30℃全般的に低いことがわかる。とくに振動加工の場合は穴深さの進行に伴う温度曲線にかなり凹凸がみられる。この切削温度の低下および温度曲線の凹凸はドリル刃先にパルス状に動的な加圧作用を与えるために生じるものと思われる。すなわち、切削油剤の浸透作用⁸⁾による冷却効果の促進が容易になる。従って、ドリル刃先の摩擦熱の減少とドリル刃先部の摩耗損傷の抑制がなされるものと思われる。このことは工具摩耗、切削抵抗（静的成分）の減少からも裏付けされる。

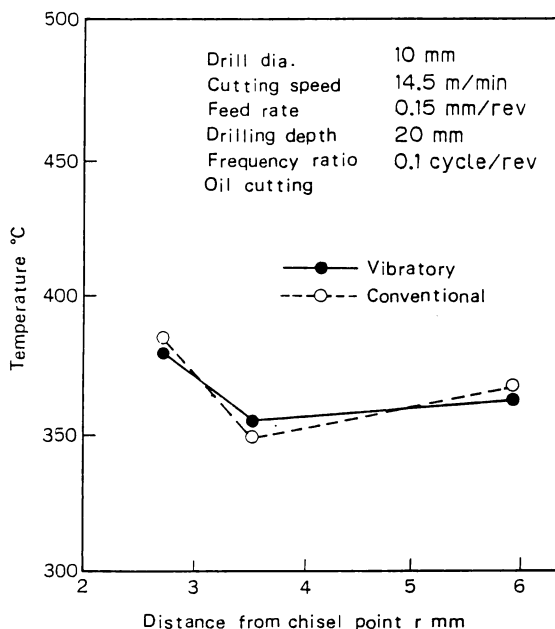


図6 温度測定結果

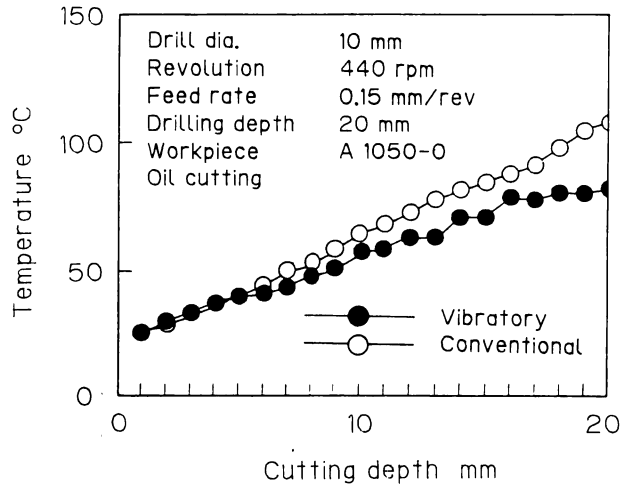


図7 穴深さと切削温度の関係

4. 有限要素法によるドリル刃先の温度解析

前節で述べたようにドリルすくい面の局所的な切削温度を測定することはできるが、ドリルの切れ刃は複雑な3次元形状をしているため、ドリル切れ刃全体の切削温度を正確に測定することは非常に困難である。したがって、このような場合有限要素を用いて解析することは有効である。しかしながら、いままでにドリルの切削温度を有限要素法で解析した研究はほとんどみられない。そこで、筆者らは有限要素による慣用加工の場合のドリル刃先の切削温度について理論解析を試みた。この場合、3次元的な熱の流れを考慮した理論的解析を行うことは非常に難しいので、本報では連続切りくずが生成する場合の定常問題として取り扱った。

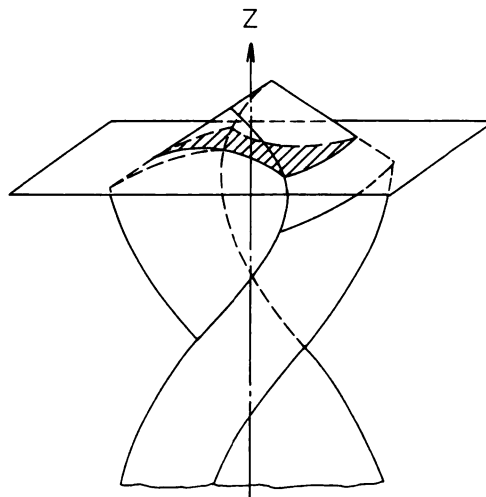


図8 軸直角断面の一例

4. 1 ドリル刃先の解析手法

これまで工具すくい面の温度分布を理解するために提案された手法として臼井らの方法⁹⁾があるが、これは非定常の熱伝導方程式を解くことにより最終的な定常温度分布を知ろうとするものである。しかし、一様な材料条件での定常な材料流れ、材料内の発熱のもとでは、その温度分布は定常状態にあるものと考えられる。したがって、最初から一定時間を経過した後の定常問題として扱うことにすれば、計算時間の短縮などの点から実用的であると考えられる。そこで本研究においては、式(1)の非定常熱伝導の基礎微分方程式¹⁰⁾を用い、これを有限要素法により解いた。

$$k \cdot 2TV + \dot{Q} - \rho C \frac{\partial T}{\partial t} = 0 \quad (1)$$

ただし、 T は温度、 t は時間、 Q は内部発熱率であり、 ρ 、 k 、 C はそれぞれ密度、熱伝導率、比熱である。ドリルの切れ刃は三次元切削しているため、バイトの三次元切削のように切れ刃にそっての熱の流れを無視できない。また、切りくずからドリルへの熱伝導を考えなければならない。したがって、境界条件としては熱伝導境界、熱流速境界を考慮せねばならない。しかし、厳密にはドリル全体の温度分布を求めることは不可能であるので、具体的には定常熱伝導での境界条件として温度 T が規定する場合とし、式(1)を有限要素法として定式化する方法をとった。すなわち、工具を要素に分割し、ある要素の温度分布を式(2)と表現する。

$$T(x, y, z) = \sum_{i=1}^n N_i(x, y, z) \psi_i(t) \quad (2)$$

ここで、 $N_i(x, y, z)$ は形状関数、 $\psi_i(t)$ は時刻 t における節点 i の温度、 n は1要素当たりの節点数である。式(2)を定式化すると式(3)の定常熱伝導有限要素式と表される。

$$[K_{mm}] \{\psi_m\} = \{R_m\} + \{S_m\} \quad (3)$$

ただし、使用プログラムは矢川らの三次元熱伝導解析プログラム¹¹⁾を参考にした。

4. 2 要素分割

ドリル刃先にはねじれた溝があり、また、先端部は軸に直角な断面形状がしだいに小さくなることから、三次元的に要素分割を行うことは非常に困難である。そこで本実験では図9に示すような、ドリル軸に垂直な断面をとり、それらをつなぎ合わせるにより形状をモデル化した。分割要素はアイソパラメトリック六面体8節点要素を用いた。各断面で同じ数の要素に分割することが望ましいが、断面の大きさがドリル先端に近づくにしたがって小さくなるため、要素の大きさを考慮して各断面の外周における要素数を減らす工夫をした。また、この要素を用いてチゼル部を表現することができないため、チゼル部から0.1mm下の断面を第1断面とし、ドリル先端から4.9mmの間を15段(A～P断面で16面)に分割した。各断面のZ座標を表1に示す。この各断面を四角形要素に分割し、その分割図の一例を図9に示す。なお、L断面からP断面は同一形状である。また、A断面からL断面の外形を重ね合わせたものを図10に示す。このモデルの総要素数は2800、総節点数は3542である。図11はチゼル先端から約3mmのところのすくい面(a)及び逃げ面(b)の分割図である。

表1 軸直角断面のチゼル先端からの距離

Section	Z - coordinate (mm)	Section	Z - coordinate (mm)
A	0.1	I	2.4
B	0.3	J	2.7
C	0.6	K	3.0
D	0.9	L	3.3
E	1.2	M	3.7
F	1.5	N	4.1
G	1.8	O	4.5
H	2.1	P	4.9

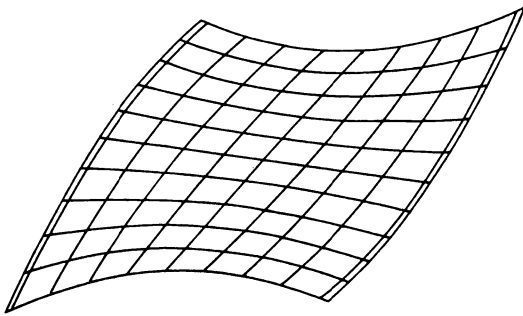


図9 軸直角断面Fの要素分割例
(節点数121, 要素数100)

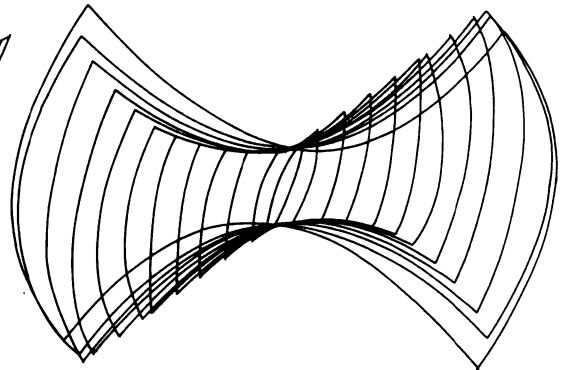


図10 軸直角断面A~Lの重ね合わせモデル

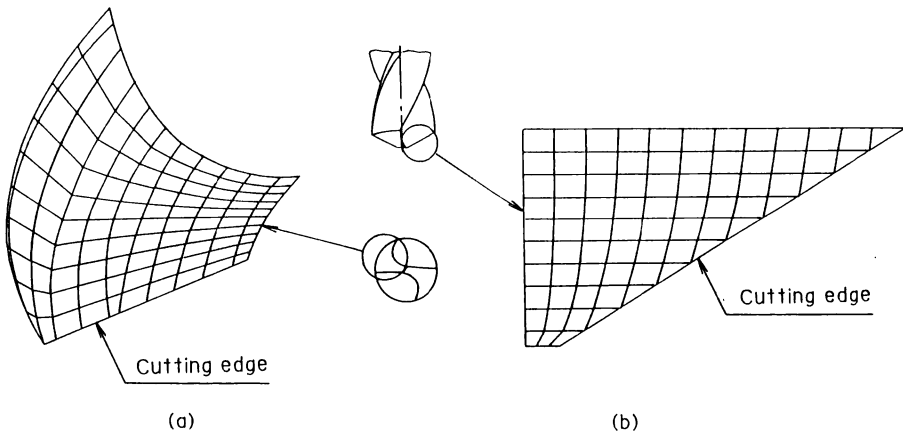


図11 ドリル逃げ面、すくい面の分割例

4. 3 境界条件

境界条件としてはすくい面温度測定実験により得られた測定値を入力した。つぎにチゼル部およびマージンの各断面での温度（最高温度）を固定した。また、それ以外の境界は断熱境界とした。なお、チゼル部およびマージン部における温度は、被削材に熱電対を埋め込むことにより測定した結果をもとにして、各周コーナからの温度差を考慮した値を用いた。計算に用いた ρ 、 C 、 K の値はそれぞれ $7.82\text{Mg}/\text{m}^3$ 、 $0.536\text{KJ}/\text{kg}\cdot\text{K}$ および $42.6\text{W}/\text{m}\cdot\text{K}$ である。

4. 4 数値解析結果および測定結果の比較

図12、13は前述したように、チゼル先端から約3mmのところのすくい面および逃げ面上における等温度分布の計算結果を示す。図からすくい面上における温度勾配を知ることにより、切りくずの流れの方向を、また、逃げ面上における温度勾配より、チゼル部の発熱の状況を知ることができる。一方、すくい面上における温度を測定結果と比較すると、C-2ドリ

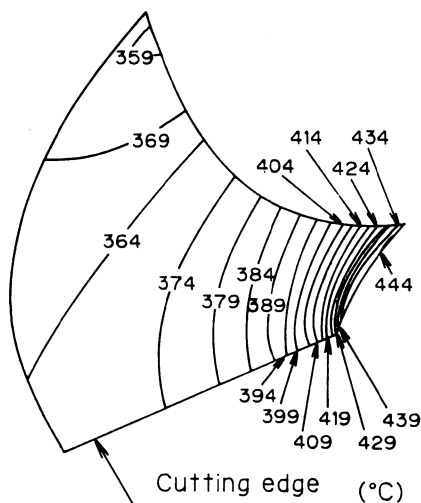


図12 ドリル逃げ面温度の計算結果

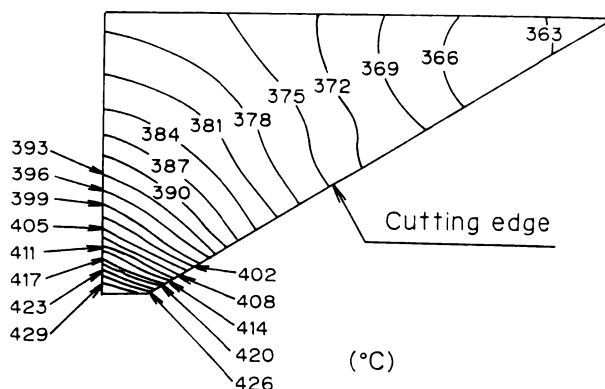


図13 ドリルすくい面温度の計算結果

ルにおける測温点での温度差は、約15℃とかなりの差があるが、C-1ドリルおよびC-3ドリルの測温点での差は約8℃と良好である。切削抵抗が変動する場合の振動加工の温度については切込み厚さの変化、切削油剤の影響、切りくずとの接触面積等、熱の流れに関する種々の要因¹²⁾を考慮すべきであるが、図7から推察して本実験の範囲では10～30℃の補正を考慮すべきである。

5. 結 言

1. 振動ドリル加工は慣用ドリル加工に比べて切削抵抗（静的成分）、工具摩耗は小さい。したがって、またドリル刃先のチゼル部、マージン部のすくい面温度は低い。その結果、振動ドリルの切れ刃が均一に摩耗するものと考えられる。
2. すくい面上に埋め込んだシース熱電対ドリルを考案し、穴あけ加工時のドリル切れ刃各部の切削温度を測定することができた。
3. 慣用ドリル加工時の刃先温度の解析を有限要素法により行い、ドリル刃先の切削温度状態を明らかにした。また、測定結果とほぼ一致することを示した。
4. 振動ドリル加工時の刃先温度は慣用ドリル加工に対する計算結果より10～30℃の補正（低い値）を考えるべきで、その数式化は今後の検討課題である。
なお、本研究は平成元年度大阪産業大学特別研究費によるものであることを付記し感謝の意を表したい。

参考文献

- (1)足立勝重：振動切削による難削材の穴あけ加工、BOUNDARY、5、2（1988）72.
- (2)足立勝重、新井典久、西口正純、沖田耕三：難削材の低周波振動ドリル加工に関する研究、日本機械学会論文集、55、514、C（1989）1550.
- (3)足立勝重、新井典久、沖田耕三、脇坂彰一：低周波振動ドリル加工時に生成されるバリに関する研究、精密工学会誌、52、7（1986）97.
- (4)足立勝重：機械の研究、振動ドリル加工、31、11（1979）44.
- (5)E. A. SATEL：Russian Engg. J. 42（1962）56.
- (6)新井典久、足立勝重、中村貢：SUS304の低周波振動ドリル加工に関する研究（ドリル刃先部の切削温度）、日本機械学会論文集、56、527、C（1990）
- (7)足立勝重、新井典久、脇坂彰一、原田進、服部英樹：低周波振動ドリル加工に関する研究、日本機械学会論文集、492、C（1987）1877.
- (8)益子正巳、榊田勝美、横田裕充：振動切削による切削油剤の評価について、潤滑13、8（1968）413.
- (9)F. 井英治：切削・研削加工工学上巻、共立出版、（1971）177.
- (10)秋山俊彦、覚知尚志：有限要素法による切削工具の熱変形解析、精密機械、40、6（1975）512.
- (11)矢川元基：流れと熱伝導の有限要素法入門、培風館（1983）223.
- (12)足立勝重、小川恒一、新井典久、井垣久：アルミニウムの低周波振動ドリル加工時における刃先温度の測定と加工特性、軽金属、40、3（1990）71.