

TiN コーティングハイスドリルによる SUS304の低周波振動ドリル加工

吉川 晃*, 櫻井 恵三*, 足立 勝重*, 沖田 耕三*

A Study on Low Frequency Vibratory Drilling of SUS 304
by TiN Coating Drills

YOSHIKAWA Akira, SAKURAI Keizo, ADACHI Katushige, OKITA Kozo

Abstract

In this paper, a friction test was conducted with a friction testing machine to examine the basic interaction phenomena (frictional force, frictional temperature etc.) resulting from adhesion or welding between the test piece (SUS 304) and TiN coating. For comparison, black oxide coated test pieces were employed.

Beside, cutting characteristics (tool life, cutting force, drill wear, etc.) during the drilling of SUS 304 with TiN coated drills was investigated and the results were compared with these of cobalt HSS drills (JIS SKH 56).

The experimental results revealed a marked difference in performance between both type of drills with TiN coated drills showing superiority in every domain.

Moreover the experimental results were compared with those in drilling by cobalt HSS drills. From this study, it is found that cutting characteristic in drilling of SUS 304 by TiN coating drills is more superior to those by cobalt HSS drills.

Key words : Drilling, Low frequency vibratory drilling, Twist drills, Cutting force,
Tool wear, TiN coating

1. 緒言

ステンレス鋼は熱伝導率が鋼に比較して約1/3であり、かつ加工硬化しやすく、難削材であるため能率的な加工法が求められている。

そこで、近年、注目を集めているTiNコーティングドリルを用いた高能率穴あけ法について研究した。

TiN膜は一般に摩擦抵抗が小さく、高硬度でアブレシブ摩耗に強く熱的損傷にも強いと言われている。しかし、ステンレス鋼の穴あけは効果がないという報告¹⁾もある。また、実際に、ドリル用工具材のTiNコーティング高速度鋼とステンレス鋼との間の摩擦特性、温度特性の実験データもないため、穴あけ適性切削条件を見いだすことは困難である。そこで、まず、TiN膜の効果を調べるため、TiN膜コーティング高速度鋼とステンレス鋼との迅速摩擦試験を行い、界面の摩擦トルク、摩擦温度に関するデータを求め、その知見を基にして、穴あけ実験を行った。また、低周波振動をドリルに付加することにより、高能率穴あけ加工を試みた。

2. 実験方法

2.1 TiNコーティング高速度鋼とステンレス鋼との迅速摩擦試験方法

TiN膜は厚さが約3 μm と極めて薄いため、その膜の特性そのものを正確に調べることは困難である。そこで、本実験に用いる被削材およびドリル用工具材を用い、Fig.1に示した迅速回転摩擦試験方法²⁾でTiN膜の有無による摩擦特性の差異を調べた。

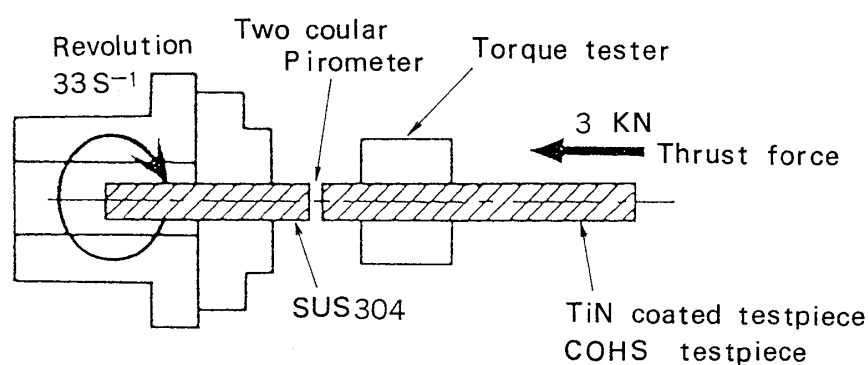


Fig.1 Schematic of friction testing apparatus

この迅速回転摩擦試験装置は、一方の材料を回転し、他方の材料にスラスト荷重を与えて摩擦を起こさせるものである。試験片は実際に穴あけに使用する同種のドリル用工具材およびステンレス鋼より、本実験のために特別に製作したものであり、回転側にSUS304で直径は

15mm, スラスト荷重側は高速度鋼にTiNコーティングした直径が15mmのものである。なお比較のため, TiNコーティングしていない窒化酸化高速度鋼も使用した。

摩擦条件は回転数 33.3s^{-1} , スラスト荷重 3 kNとした。摩擦トルクは歪ゲージ式のトルク検出器で摩擦温度は2色式放射温度計³⁾で測定した。

2.2 穴あけ試験装置

穴あけ試験に使用したのはNCフライス盤 (NR-F Enshu Co.,Ltd, 2.2kW) である。ドリルの保持には調整ねじ付きコレットチャックを用い, 突出し長さを一定 (165mm) に取付けた。切削抵抗はキスラー製の圧電式切削動力計 (Type 9273) で測定し, 得られたデータを電算機で処理した。

2.3 ドリルと被削材

実験に使用したドリル (直径 6 mm, SKH 56相当) はTiNコーティングコバルトハイスドリル (以下, TiNドリルと略す) とTiNコーティングせず窒化酸化処理したコバルトハイスドリル (以下, COHSと略す) を使用した。ドリル形状のばらつきをなくするためにドリル形状を測定し, 規定寸法公差内に入っているものだけを使用した。Fig.2にドリルの主要寸法を示す。被削材はSUS304を溶体化処理 (1373Kで1時間保持) したもので, 表面を研削加工した。Table 1にSUS304の化学成分を示す。Table 2に機械的特性を示す。使用した切削油剤 (JIS W2-3) は3.2l/minである。

Table 1 Chemical composition of workpiece

Ni	Cr	Mn	Si	C	P	S
8.34	18.0	0.99	0.53	0.068	0.027	0.020

Table 2 Mechanical properties of workpiece

Yield strength	245MPa
Tensile strength	598MPa
Elongation	71%
Brinell hardness	138

2.4 低周波振動ドリル加工装置

Fig.3は低周波振動ドリル加工装置を示す。この装置は, とくに本研究用に試作したものである。低周波振動ドリル加工装置は電気油圧サーボ弁によってドリルの送り方向の低周波振動を与えるので, ドリルの回転と同時に送り方向に100Hzまでの低周波振動を与えることができる。

Fig.4は低周波振動ドリル加工装置の原理を示すサーボ系の基本構成図である。低周波振動

Web thickness	0.87 mm	Helix angle	36.30 deg.
Relief angle	14 deg.	Width of margin	0.43 mm

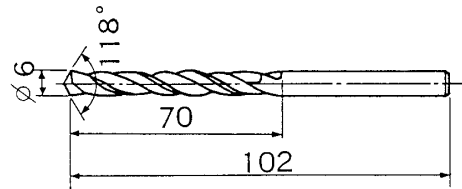


Fig.2 Twist drill with dimensions

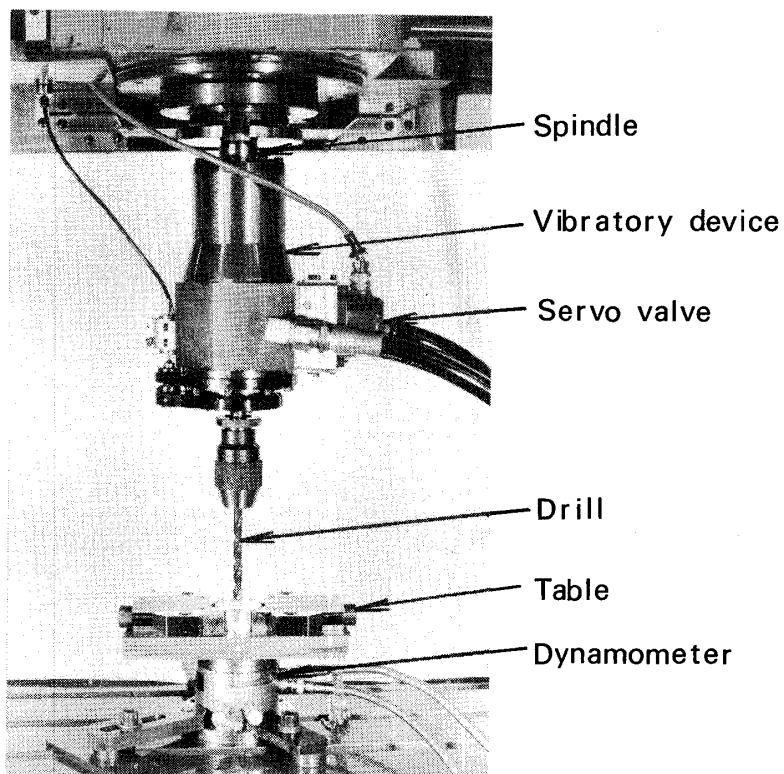
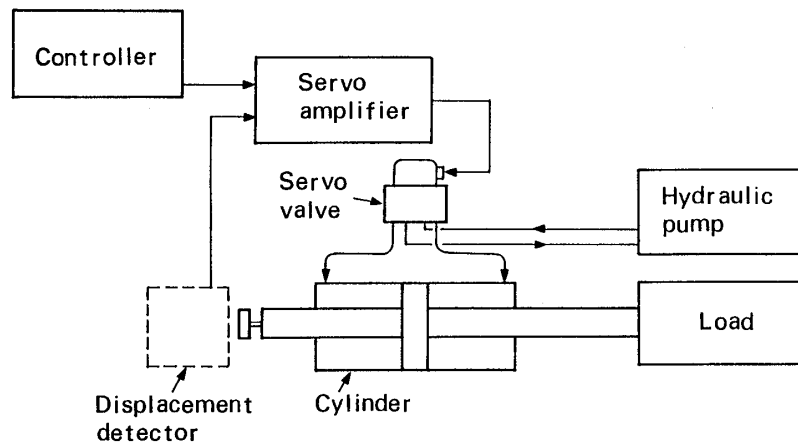
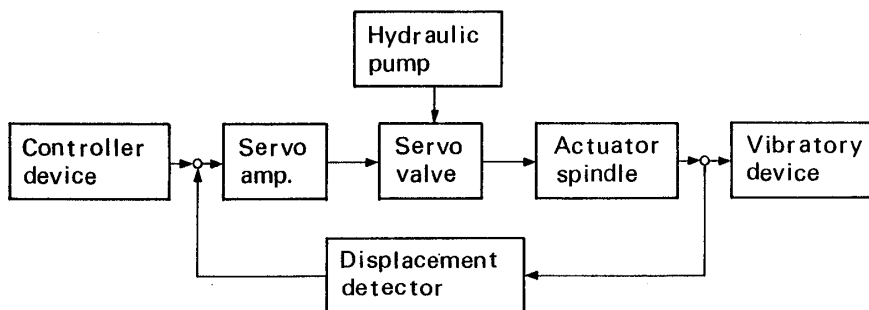


Fig.3 Appearance of low frequency vibratory drilling apparatus

発生装置は振動源の入力信号に正弦波を与えてサーボ制御により位置決めをして作動するもので、まず位置決め信号として制御盤の指令装置（発信機）から電気油圧サーボ弁に指令電圧（入力信号）が与えられる。その指令電圧の変位量によって油圧装置に取り付けた油圧ポンプからの圧油によってサーボ弁のスプールが制御されて油圧シリンダーの速度が制御されるような機構になっている。



(a) Block diagram of servo system



(b) Setup of servo system

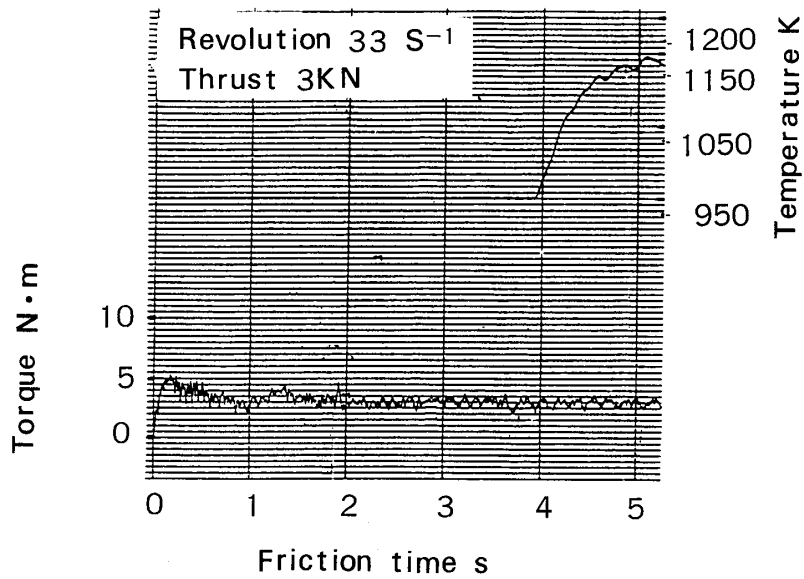
Fig.4 Schematic of low frequency vibratory drilling apparatus

3. 実験結果と考察

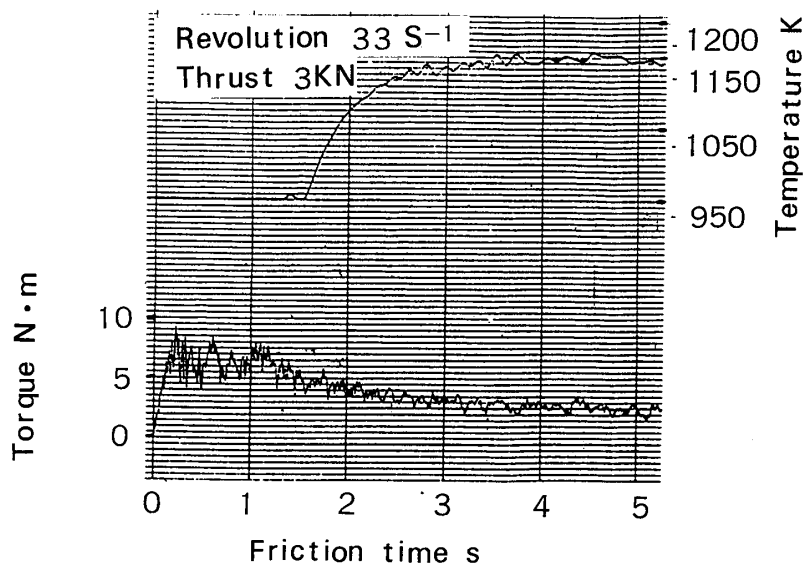
3.1 TiN膜の迅速摩耗特性

Fig.5は摩擦特性試験結果で、同図 (a) はSUS304の丸棒とTiNコーティングハイス丸棒（以下、TiNテストピースと略す）の場合、同図 (b) はSUS304の丸棒とTiNコーティングしないコバルトハイス丸棒（以下、COHSテストピースと略す）の場合である。

TiNテストピースの場合の摩擦トルクは、接触初期においては $5\text{ N}\cdot\text{m}$ となっているが、COHSテストピースの場合は約 $9\text{ N}\cdot\text{m}$ となっており、約1.8倍増加しているのが認められる。そして時間が経過していくにつれてトルクは双方とも減少傾向を示す。TiNテストピース側の摩擦トルクは1秒経過後にはほとんど一定で定常状態を示すが、COHSテストピースの場合は4.8秒経過後にTiNテストピースと同一になっている。摩擦面の外周温度が 973 K の時を比較すると、トルクはTiNテストピースの場合、 $3.0\text{ N}\cdot\text{m}$ で、COHSテストピースの $4.5\text{ N}\cdot\text{m}$ の場合に比べて約34%の低下が認められる。



(a) TiN testpiece



(b) COHS testpiece

Fig.5 Results of friction characteristic test

このことより、TiN膜は耐摩擦性に優れ、特に接触時にその特性が優れていることをこの実験の範囲内で示している。

摩擦温度(摩擦面の外周温度)は、この温度計の測定範囲上、973K以上しか測定できないが、973Kに達するまでの時間はTiNテストピース側では約4秒であり、COHSテストピースの場合は約1.6秒である。また、約1173Kで一定の温度になっているが、その摩擦温度はCOHSテストピースの場合、約3.3秒後に達している。一方、TiNテストピース側は約5秒後となっており、

TiN膜が摩擦温度の上昇を抑制していることを示している。しかし、1173Kの摩擦温度に達し、試験開始後5秒でTiN膜が破壊されるとトルク、温度とも同一値となっている。

これらの結果より、TiNドリルを効果的に使用するには、切削温度が上昇しない短時間の切削が良好と考えられ、また、耐摩擦性が良好であって、高送りが良好で、また熱収支を考えると、被削材の板厚にも影響を受けるものと考えられる。また、低周波振動ドリル加工のように断続して穴あけをする方法も適していると考えられる。

3.2 ステンレス鋼の穴あけにおける切削特性

Fig.6は実際にTiNコーティングした場合（TiNドリル）およびしない場合（COHS）のドリルの穴あけにおけるスラスト、トルクの測定例である。切削条件は同図に示す通りである。同図より、切削時間が1秒後にスラスト、トルクとも急増するが、そのピークはTiNドリルの方がCOHSドリルより低いことが認められる。その後、時間の経過にしたがって一定値で推移している。その値はTiNドリルのトルクで $1.37\text{N}\cdot\text{m}$ 、COHSドリルで $1.52\text{N}\cdot\text{m}$ とTiNドリルより約10%トルクが減少している。スラストについてはTiNドリルで525N、COHSドリルで605NでTiNドリルより約13.2%、スラストが減少しているのが認められた。迅速摩擦試験結果に比較してTiNのトルクの低下率は異なるが、ステンレス鋼に対して、実際のドリル加工においても耐摩擦性の向上が認められる。

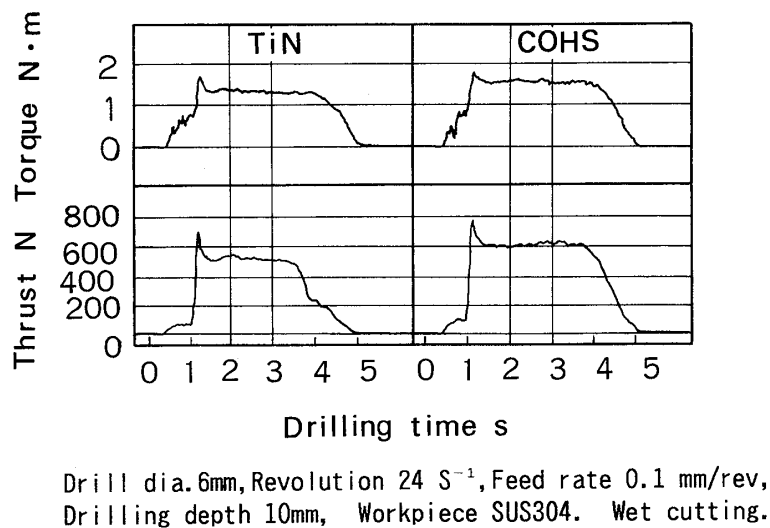


Fig.6 Comparison of cutting force

3.3 ドリルの平均寿命個数に及ぼす被削材板厚の影響

3.1の迅速摩擦試験結果の知見をもとに、TiNコーティング膜の特性を生かすため、板厚の影響について調べた。その結果をFig.7に示す。ドリル径6mmに対しては板厚を10mmから

25mmとし貫通穴あけとした。本文での平均寿命個数とは、ドリルが穴あけ不能になるまでの穴あけ個数の4本での平均値である。Fig.7より、板厚10mm ($L=1.6d$) の場合、TiNドリルでは520個に対してCOHSドリルは112個で約4.8倍となっている。その穴あけ個数は板厚が増加するにつれて低下し、同図に示すように概ね板厚25mm付近になるとほぼ同じ穴あけ個数となり、TiN膜の効果は生じなかった。

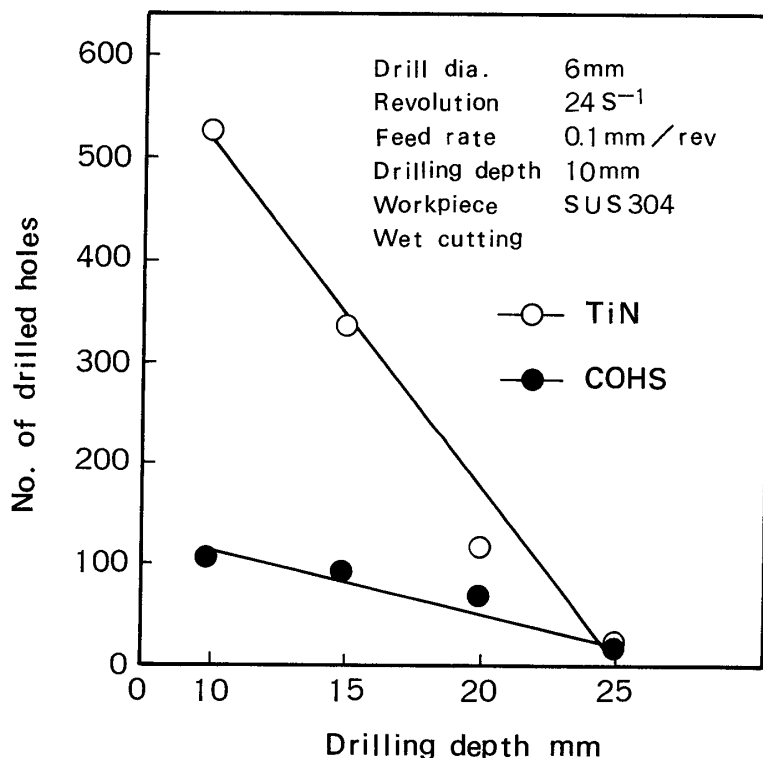


Fig.7 Relation between drilling depth and tool life

この平均穴あけ個数をもとに、切削距離について示したのがFig.8である。COHSドリルの場合、板厚の影響はそれほど受けずほぼ同程度の切削距離であるが、板厚が小さい場合、接触時の摩擦が大きく、さらに、それを繰り返す穴あけ回数が多いにもかかわらず切削距離が長くなっている。その理由の一つは、TiN膜がFig.6に示したように接触時のトルクの低減効果によることも大きい。切削温度が低いためTiN膜の摩耗を防いでいるものと推定される。すなわち、ステンレス鋼のように熱伝導性の悪い材料では、深穴になるほど切削温度の低下効果は望めず薄板の場合ほどTiN膜の効果が生きていくものと推察される。

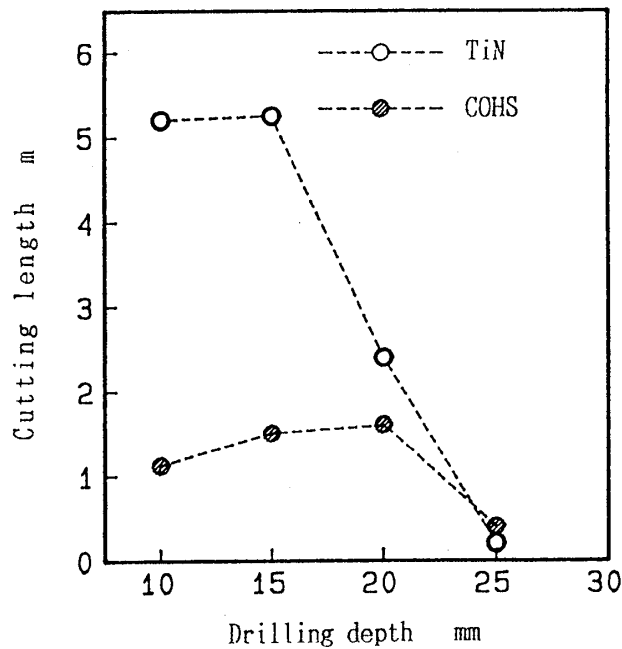
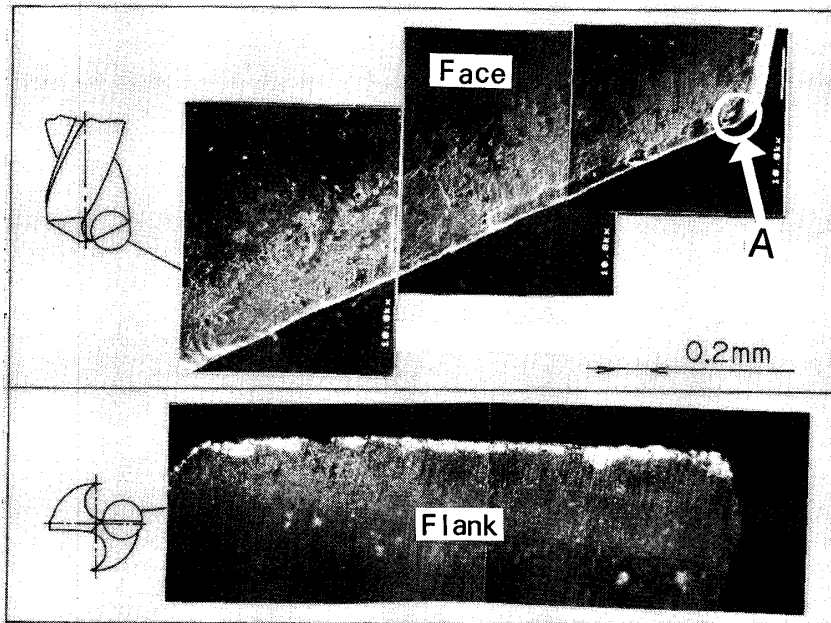


Fig.8 Relation between drilling depth and cutting length

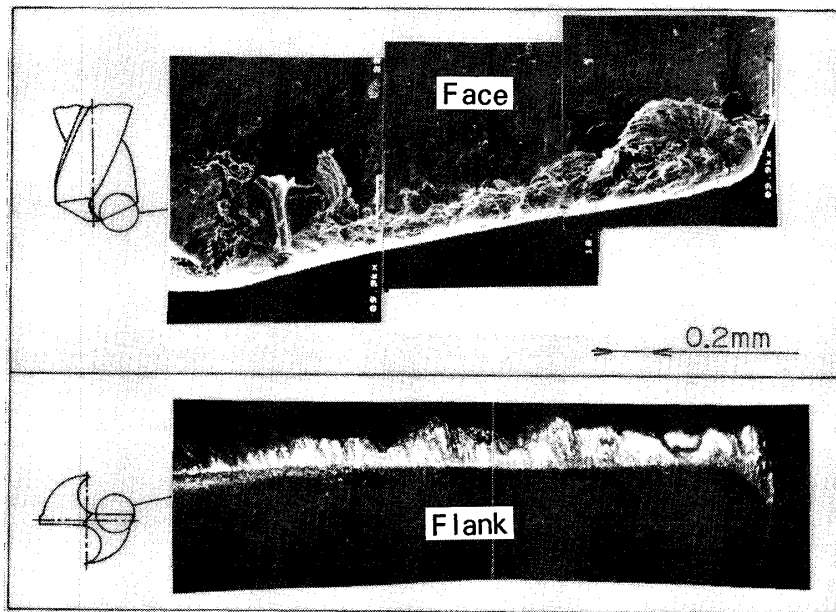
Fig.9はFig.7での穴あけ試験に用いたTiNドリルとCOHSドリルの刃先部の摩耗状態を示したものである。TiNドリルの切れ刃のすくい面、逃げ面には溶着物がほとんど見られないが、外周近傍の先端すくい面には小さなクレータ摩耗が生じている。そこで、TiN膜の状態を調べるためにTiNドリルの切れ刃すくい面のA部について走査型電子顕微鏡で表面観察を行い、EDAXでTiの分布状態を調べた。

Fig.10 (a) はSEMでの表面写真，同図 (b) は同じ位置でのTiの分析結果の写真を示す。同図 (c) はTiの分布状態を調べるために写真 (a) (b) を重ね合わせたものである。同図 (a) においては，切れ刃刃先で20~30 μm の幅のクレータ部がみられ，かなり損傷しているのが認められる。この結果とTiの分布状態についてみてみると，同図 (c) に示すように，切れ刃刃先部から約20 μm の幅でTiN膜は消滅していることが認められた。とくに，同図 (a) の左下のクレータ部に当たる部分が多少凹状になって変形しているにもかかわらず，同図 (c) のように，その部分にTiが観察されることから，TiN膜の蒸着による密着強度が大きいといえることができる。そして，クレータ部の摩耗の進行によってTiN膜が剥離していくものと推察できる。したがって，このようにして刃先部におけるTiN膜の消滅が穴あけ個数の減少を起す一つの理由と考えられる。

これに対し，COHSドリルの場合はFig.9に示すように逃げ面の切れ刃全般にわたって溶着物が見られ，すくい面にも大きな溶着物とクレータ摩耗が広範囲にわたって観察される。溶着物の付着状態についてもTiN膜の有無により大きな差があることが認められた。



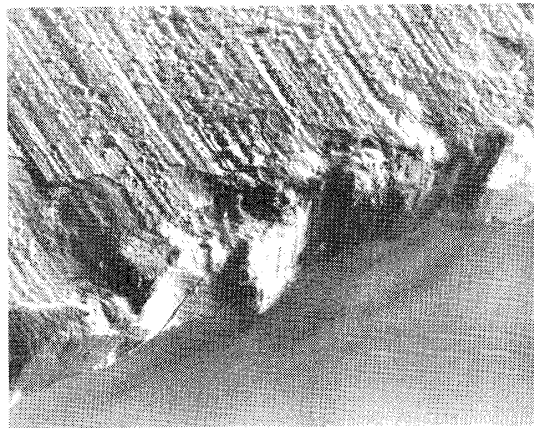
(a) TiN drills (140 holes)



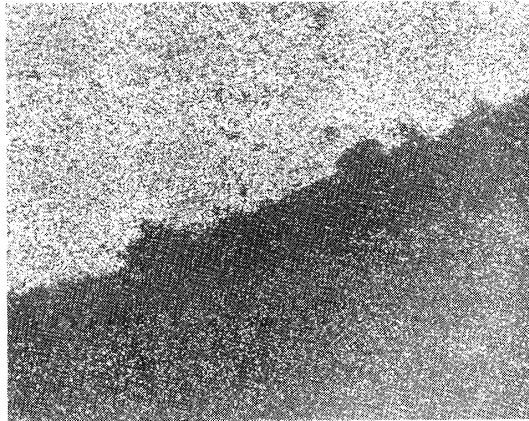
(b) COHS drills (90 holes)

Drill dia. 6mm, Revolution 24 S^{-1} , Feed rate 0.1 mm/rev,
 Drilling depth 10mm, Workpiece SUS304. Wet cutting.

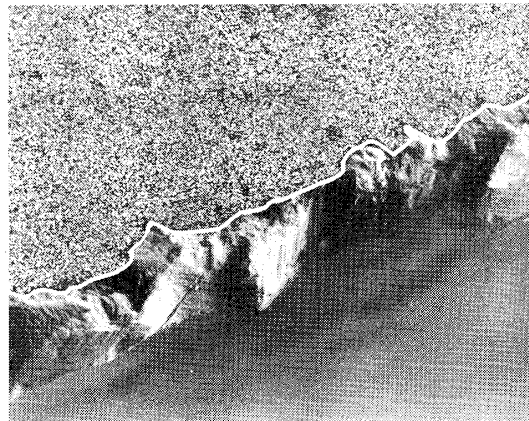
Fig.9 SEM photographs of wear of cutting edge



(a) Microphotograph of drill wear observed under the SEM



(b) Microphotograph of Ti analysis observed under the EDAX



(c) Combined Microphotograph of (a) and (b) depicting the distribution of Ti

Fig.10 SEM and X-ray images of worn cutting edge

3.4 厚板の低周波振動ドリル加工

板厚が薄くなるにつれて、TiN膜の効果が大きであることが3.3により判明した。板厚が厚くなるとその効果は減少するが、工具側の送り方向に振動を与えることにより、切れ刃を被削材より切り離して、切りくず切斷しうるような状態に近づけることにより、加工能率をどの程度あげられるかを検討した。

3.4.1 低周波振動ドリル加工によるTiNドリルの切削抵抗

Fig.11は低周波振動を与えた場合のドリル加工での切削抵抗（スラスト，トルク）を示したものである。切削条件はFig.8と同様であるが，板厚が25mmで周波数比が0.1Cycle/revである。低周波振動ドリル加工における切削抵抗はFig.11のように変動するのが特徴である。この変動する幅を動的成分とし，変動する平均値の0からの値を静的成分とした。この切削抵抗を穴あけ開始後の付近で測定して比較すると，TiNドリルの場合，動的成分はスラストで約380～550N，トルクで約0.8～1.3N・m，COHSドリルでスラスト380～500N，トルクで約0.9～1.4N・mであり，スラスト，トルクとも高い方の値ではTiN膜でかなり低下しているのが認められる。静的成分ではTiNドリルでスラストは440N，トルクは1.05N・mである。COHSドリルの場合でスラスト465N，トルクは1.15N・mである。TiNドリルでのドリル加工でSUS 304を加工した場合，静的成分ではTiNドリルの方がCOHSドリルの場合よりスラストで約5.4%，トルクで約8.7%減少している。

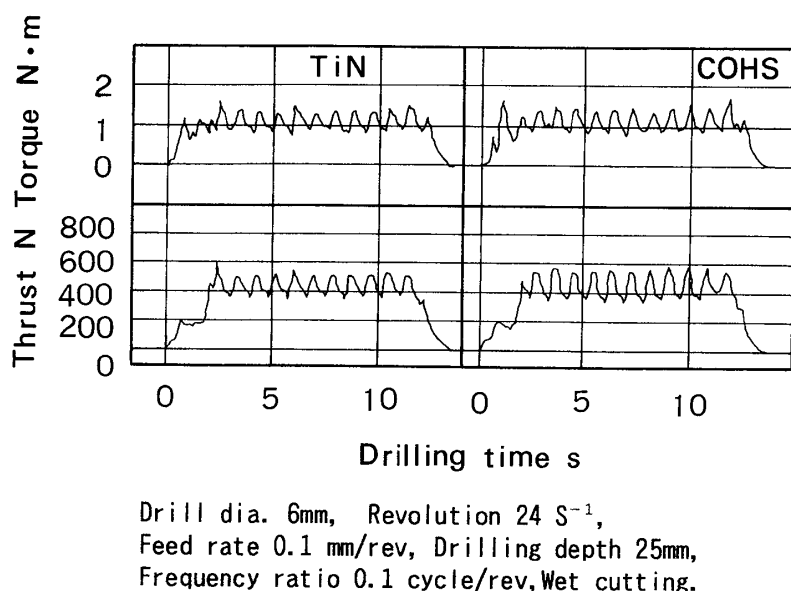


Fig.11 Variations of cutting force on the low frequency vibratory drilling

また、この低周波振動を適用したTiNドリル加工の場合の切削抵抗（静的成分）は切削条件が同一のFig. 2のCOHSドリルの場合（2～3秒間）に比べてスラスト、トルクでそれぞれ約16.2%、23.3%小さくなっている。

4.4.2 穴あけ寿命個数

Fig.12はTiNドリルとCOHSドリルによる板厚25mmのSUS304の穴あけ加工した結果を示したものである。

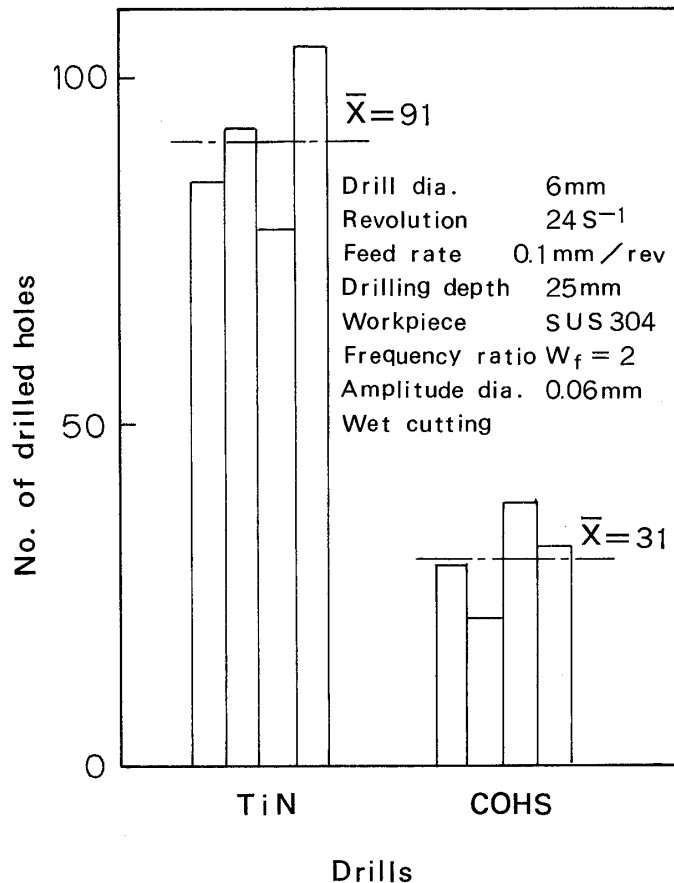
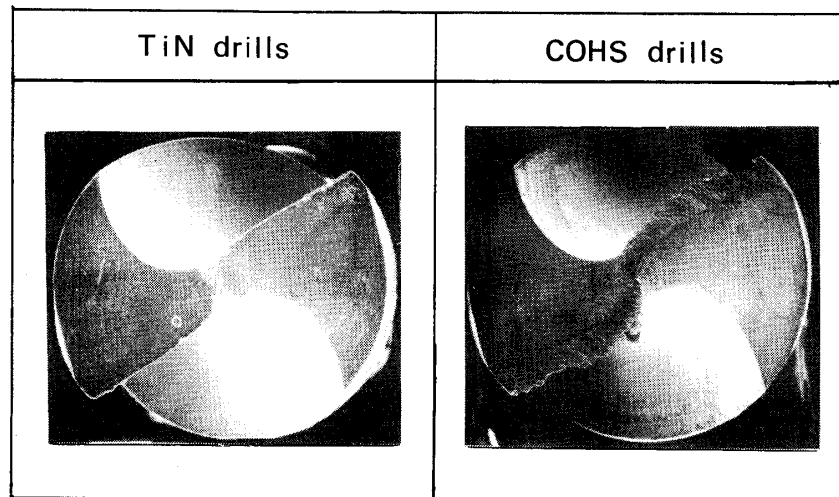


Fig.12 Cutting life of TiN coated drills and cobalt COHS drills

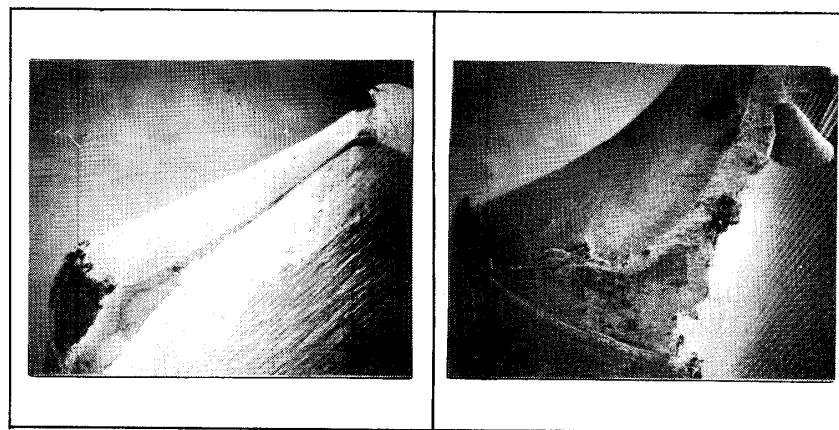
これは4本のドリルでの穴あけ個数を示したものである、TiNドリルの場合は平均で91穴、COHSドリルの場合は31穴である。低周波振動を付加することにより、TiNドリルの場合、約3倍も穴あけ個数が増加したことになる。

3.4.3 ドリル切れ刃の摩耗

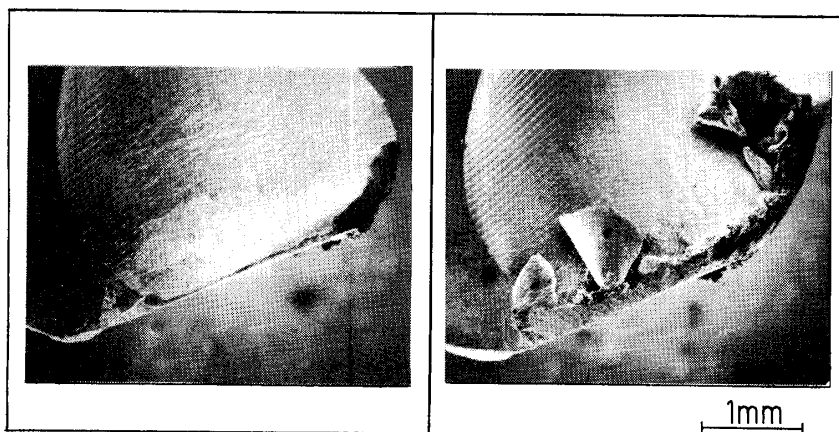
Fig.13は振動加工法を適用した場合のTiNドリル（80穴目）とCOHSドリル（40穴目）のドリル切れ刃の損傷状況を示したものである。Fig.13 (a) はチゼル側からみた切れ刃の状況、Fig.13 (b) は逃げ面の状況そしてFig.13 (c) はすくい面の状況を示したものである。これらの写真より、TiNドリルはCOHSドリルに比較して、チゼル部、逃げ面、すくい面とも溶着物



(a) Wear from chisel side



(b) Flank wear



(c) Face wear

Drill dia. 6mm, Revolution 24 S^{-1} , Amplitude 0.1mm,
 Feed rate 0.1 mm/rev, Frequency ratio 0.1 cycle/rev,
 Drilling depth 25mm, Workpiece SUS304, Wet cutting.

Fig.13 SEM photographs of damage of cutting edge after the low frequency vibratory drilling

があまり認められないが、ドリル先端切れ刃に摩耗が認められる。Fig.8に示したと同様に、EDAXにて観察したところ、この摩耗部分にはTiNコーティング層は認められなかった。このことにより、TiNコーティング効果が減少し、90穴程度で工具寿命に達したものと考えられる。

低周波振動を付加することにより、TiNドリルはCOHSドリルの場合に比べて約3倍の効果があることが明らかとなった。この理由としては振動を付加することによりパルス⁴⁾的な衝撃作用による切りくずの切断、排出が良好になりドリル摩耗が伸びたものと考えられる。この作用に重畳してTiNコーティングによる耐摩耗および切削温度を低下させる作用によりステンレス鋼の深穴加工に効果があったものと考えられる。

4. 結 言

(1) ドリル用工具材 (SKH56相当) 表面にTiNコーティングを施したものを被削材でステンレス鋼 (SUS304) との間で迅速摩擦試験をした結果、TiNコーティングを施さないものに比較して、接触初期において大幅な摩擦トルクの減少が見られた。摩擦温度については、接触後、TiNコーティングした場合、温度上昇速度は遅れた。

(2) TiN膜により、接触初期における摩擦トルクの減少、摩擦温度の上昇が遅れるという知見を基にして、ステンレス鋼のドリル加工に効果があるものと考え、実際にステンレス鋼のドリル加工時の切削抵抗を測定したところ、トルクで約10%、スラストで約13%減少している結果が得られた。

(3) ステンレス鋼のドリル加工時において、板厚10mmで、TiNドリルの工具寿命はCOHSドリルに比べて約4.8倍となり、板厚が25mmではCOHSドリルの場合とほぼ同一の穴あけ個数となった。TiNコーティングドリルは板厚により効果が異なることが判明した。

(4) 低周波振動をドリルに付加した場合、板厚が25mmの場合、TiNコーティングドリルは穴あけ個数が約3.6倍と増加した。

(5) TiNコーティングによる耐摩擦トルクの減少 (摩擦温度の低下作用) に低周波振動を付加することによる相乗効果で、ステンレス鋼の深穴加工でドリル寿命が向上した。

参考文献

- 1) H. Brandis, P. Gompel and E. Haberling, Improvement of the Cutting Performance of PVD-Coated HSS Tools, Bull. Cercle Etud. Metaux, Vol. 15, No.9, (1985), pp.5-11.
- 2) 沖田耕三, オーステナイト系ステンレス鋼の摩擦圧接に関する研究, 慶應義塾大学学位論文, (1985).
- 3) K. Okita and M. Aritosi, Measurement of the Friction Temperature under Steady State by Conventional Driving Method, Japan Welding Society, Vol.13, No.2, (1982), pp.83-88.

- 4) 新井典久, 足立勝重, 西口正純, 沖田耕三, 杉原輝明, 日本機械学会論文集C編, Vol.55, No.514号, pp.1550-1555.