プリント基板の小径ドリル加工 (第2報)*

— 有限要素法によるツイストドリルのねじり強度解析 —

雨宮恭子** 寺林隆夫** 大幸洋一*** 福岡信彦** 栢田正美†

Micro Drilling of Printed Circuit Boards (2nd Report)
— FEM Analysis of Torsional Strength for Twist Drill —

Kyoko AMEMIYA, Takao TERABAYASHI, Youichi DAIKOH, Nobuhiko FUKUOKA and Masami MASUDA

Drill breakage is one of the major problems in small hole drilling with twist drills. Therefore, it is important to know the influence of drill shape on torsional strength. Because of the small diameter and complex cross section, accurate evaluation of torsional strength is very difficult. This paper presents the process for analyzing the torsional strength of a twist drill using the three-dimensional Finite Element Method (FEM). An FEM analysis is performed using a short cutting length model with constant web thickness. The analytical results are in good agreement with experimental results and the effectiveness of this analysis was proved.

Key words: FEM analysis, twist drill, torsional strength, breaking torque

1. 緒 言

近年、各種電子機器の高性能化、小形化と共にプリント基板の配線密度も上昇の一途をたどっている。このため、配線寸法の微細化と同時に、高多層化が進んでいる。プリント基板はスルーホールにより配線層間の接続をとるため、高密度化に伴いスルーホール径は小さく、深さ・直径比（アスペクト比）は大きくなり、今日では直径で $\phi 0.3\text{mm}$ を切るもの、アスペクト比では20を超えるものも報告されている^{1) 2)}。

一方、スルーホールのドリル加工という点から見ると、比較的大径の穴あけでは、ドリル寿命は切れ刃摩耗による穴品質の劣化や穴位置精度の低下などにより決定されていたものが、 $\phi 0.5\text{mm}$ を切るような小径加工においては寿命を決める要因としてドリル折損が無視できなくなる。特に、アスペクト比が5~6を超えると切りくず詰まりに伴う切削力の上昇によるドリル折損が見られる³⁾。

図1は、多層ガラスポリイミド基板に、直径 $\phi 0.4\text{mm}$ の穴あけを行った場合のトルクとスラスト力を実測した例である。加工の進行とともに穴深さが 2mm を超えるあたりからまずトルクが急増し始める。これに対してスラスト力の増加開始時期は遅く、ドリル折損直前においてはじめてその上昇が認められる。このような場合のドリル折損は突発的な切りくず詰まりに伴うトルク上昇によって起こることがわかっている³⁾。したがって、小径穴加工においてはドリルのねじり強度を正確に把握した上で切削条件を決めることが重要である。しかしながら、ねじり強度についてはドリルが三次元的な複雑形状をしていることもあって検討された例は少ない⁴⁾。複雑断面形状棒のねじり問題の実用的解法として石鹸膜との類似⁵⁾のように他の物理現象との類似性を利用して近似解を得る方法もあるが実用的ではない。また、数値解析によりドリル強度を求める方法について一部報

Rev. speed of drill : 50000rpm
Feed rate : 0.03mm/rev

Fig.1 An example of torque and thrust force during drilling printed circuit board

告されているが⁶⁾、精度、実用性の面で課題は多い。

本論文では、簡単なモデルの有限要素法解析によりドリルのねじり強度を求める手法を提案すると同時に、それを用いて断面形状の影響について解析した結果について報告する。

2. 解 析 方 法

2.1 対象ドリル形状

図2に今回解析対象としたドリルの概略形状を示す。軸方向に一定の角度でねじれ、かつ先端から根元に向かって徐々に浅くなるフルートと呼ばれる2本の溝を有するアンダカットタイプのツイストドリルである。通常ドリル径と言えば先端のマージンと呼ばれる極く短い部分の直径を指し、それ以外の部分はアンダカット部と呼ばれ、加工中に穴壁との摩擦を避けるため、その径は先端のマージン部よりわずかに小さく加工されている。つまり、ドリルのねじり強度を支配するのはいわゆるドリル径ではなく、アンダカット径ということになる。したがって、解析におけるモデル直径はこのアンダカット径を用いた。なお、

* 原稿受付 平成8年9月30日

** 正会員 (株)日立製作所生産技術研究所 (横浜市戸塚区吉田町292)

*** 正会員 (株)日立製作所汎用コンピュータ事業部 (秦野市堀山下1)

† 正会員 新潟大学自然科学研究科 (新潟市五十嵐二の町8050)

Fig.2 Shape of twist drill

Fig.3 Short cutting length model

ウェブとはドリルの断面中心部の溝のない芯の部分进行指し、フルートとは逆に根元に行くにしたがって厚くなる。特に先端部のウェブ厚を先端芯厚と呼んでいる。また、ランドとは溝でない部分を指し、本論文で用いた溝幅比（フルート／ランド比）とは同図に示すように断面における溝部とランド部の開口角度比を意味する。

2.2 解析モデル及び解析条件

図2からもわかるようにツイストドリルは形状が複雑なため、そのねじり強度を解析的に厳密に求めるのは極めて困難である。したがって、必然的に有限要素法などの数値解析に頼らざるを得ないが、長い刃長のドリル強度を全長にわたって有限要素法により一度に処理しようとする要素数が膨大になり、多大の計算時間を必要とするため実用的でない。そこで、このねじり強度を比較的簡単なモデルにより解析する方法について検討した。

図3に解析モデルを示す。ドリルの軸方向の任意の位置での断面に着目し、その断面と同一断面形状を持ち、かつ元のドリルと同じねじれ角を持つ短刃長のモデルを考える。つまり、元のドリルとは異なり、このモデルではねじれはあるがそのウェブ厚はモデル全長にわたり一定である。この短刃長一定ウェブ厚モデルにねじりを加えた時に、モデルの長さ方向中央部分の断面に生じる応力から元のドリルの解析断面におけるねじり強度を推定するものである。このプロセスをドリル軸方向のいくつかの断面について繰り返す行うことで長さ方向のねじり強度分布を求める。また、各解析点の間の断面での強度は内挿により求める。

表1に今回解析対象としたドリルの寸法諸元を示す。異なる径を持つA、B、C三つのタイプのドリルを対象とした。ドリル径はアンダカット径で示してあるが、公称径はそれぞれφ0.3mm、0.4mm、0.56mmである。また、ドリル材質は超微粒子超硬合金である。

表2にこの形状に基づいて決定した解析条件を示す。ドリルの断面形状を規定する数値は、実際にドリルを断面研磨し形状

Table 1 Drill dimensions

Dimension	Type	A	B	C
Undercut diameter	mm	0.27	0.35	0.52
Effective flute length	mm	5.0	6.0	8.0
Helix angle	°	35	35	35
Top web thickness	mm	0.04	0.1	0.06
Web taper		0.0175	0.017	0.015
Flute/land ratio a/b		1.6	1.6	1.6

Table 2 Analytical conditions

Model dimension	Model No.	1	2	3
Diameter	mm	0.27	0.35	0.52
Helix angle	°	35	35	35
Flute radius	mm	0.124	0.235	0.276
Length	mm	0.5	0.65	1.0
Web thickness	mm	0.053-0.124	0.107-0.160	0.066-0.160
Young's modulus	N/mm ²	559000		
Poisson's ratio		0.3		
Shear strength	N/mm ²	2687		
Number of elements		1280		

測定した結果を用いた。モデル長と要素数については、各モデル直径に対して事前にせん断応力に及ぼすこれらの影響について調べ、応力の値が一定に収束するこれらの値の範囲を求めることで決定した。

解析には汎用構造解析プログラムMARC（日本マーク社）を使用し、要素タイプとしては六面体の8つの角と各辺の中央に節点を持つ3次元20節点立体要素を用いた。また、ドリル材料である超硬合金はぜい性材料であり、巨視的にはほとんど塑性変形せずに破断すると考えられるので、解析は弾性範囲で行った。

ところで、今回の解析では現実のドリルより短い長さのモデルで行うため、境界部分の取扱いは注意が必要である。後述するように実際のドリルのねじり試験では、ドリルの外周に力を加えることにより変形が与えられるが、短刃長モデルでの解析においてモデル端面の外周部分に力を加えると、力を加えた部分に明らかに実際とは異なると思われる局所的な変形が現れるため、ねじり変形を正確に評価することができない。

そこで、境界条件として、一方の端面を軸方向を除いて固定とし、もう一方の端面に軸方向のみフリーにした状態で強制回転変位を与えた。このような境界条件によりねじり変形を与えても、解析においては両端の拘束部位に現実の境界条件を反映してはいないと思われる大きな応力が発生するが、前述したように両端拘束の影響が最も小さい長さ方向中央部の断面での応力が実際のドリルの同一断面形状部分の応力を表すと考え、さらにその部分での応力値が一定の値に収束するようなモデル長さと要素数を採用することでねじり強度の評価を行った。

弾性計算であり、変位と外力の間に比例関係があることから端面に加える回転変位の値はいくつでも良いが、今回の解析ではドリル断面中心を原点とする直交座標系において、一方の端面の全節点に0.03radの強制回転変位を与え、端面に発生する反力を求めた。そして、その反力を式（1）により断面中心まわりのトルク T_i に換算し、端面のすべての節点についてそれらを加え合わせるにより、負荷端面全体のトルク T を求めた。

$$T_i = y \cdot R x_i - x \cdot R y_i \quad (1)$$

$$T = \sum_{i=1}^N T_i \quad (2)$$

- T : 負荷端面でのトルク
 T_i : 節点 i におけるトルク
 (x, y) : 節点 i の座標
 Rx_i : 節点 i における x 方向の反力
 Ry_i : 節点 i における y 方向の反力
 N : 負荷端面での全節点数

破壊条件としては、ねじり変形であることから、主せん断応力の最大値が、ドリル素材のせん断強度に達した時に破壊が生じると考え、破壊応力を求めた。また、最大主せん断応力 τ_{pmax} は次式⁵⁾から求めた。

$$\tau_{pmax} = (\text{主応力差の最大値}) / 2 \quad (3)$$

3. 実験方法

3.1 ドリルの破断トルクの測定

解析結果の検証のためには実際のドリルの破断トルクを求める必要があるが、ドリルのねじり試験については標準的な適切な方法がないため、ここでは以下の方法でねじり強度を求めた。

図4は今回考案したドリルのねじり試験方法の概要である。ドリルのシャンク部をスピンドルの回転主軸に取り付けたチャックでつかみ、その先端部分を切削動力計(Kistler9065)上に搭載したはんだ槽に浸漬した後、冷却固定した状態で主軸を回転させ、ドリルをねじり破壊させる。そしてこの時の最大トルクを破断トルクとするものである。この際、ドリルの破壊ははんだによる固定部と非固定部の境界近傍で発生することから、はんだに浸漬する長さを変えることで種々の断面での破断トルクを求めることができる。

図5にこの方法でねじり試験した時のトルクの測定例を示す。ねじりの進行につれてトルクが漸次上昇した後、破断して零に戻る様子がわかる。この時のトルクの最大値がはんだによる固定部と非固定部の境界面における断面での破断トルクを表していると考えることができる。

3.2 素材のせん断強度の測定

素材である超硬合金のせん断強度も基本的にドリルと類似の方法で測定した。ドリルと同じ材種の直径 $\phi 1\text{mm}$ の超硬合金線材を用いて図6のような試験片を作製し、この試験片の一端をスピンドルチャックに、他端を動力計側に固定した状態でスピンドルに回転を与えることで試験片をねじり破壊させ、その時の最大トルクを破断トルクとして式(4)により応力換算することで素材のせん断強度を求めた。

$$\tau_{max} = 2 T_{max} / \pi r^3 \quad (4)$$

- τ_{max} : 最大せん断応力
 T_{max} : 線材の破断トルク
 r : 線材の半径

図7は素材のトルク測定結果である。試験片は $527.4\text{N}\cdot\text{mm}$ で破断し、この破断トルクを式(4)により応力に換算した結果、ドリル素材のせん断強度は $2687\text{N}/\text{mm}^2$ と算出された。

Fig.4 Schematic drawing of torsion test

Fig.5 An example of drill breaking torque in torsion test

Fig.6 Wire specimen for shear strength measurement

Fig.7 Breaking torque of wire specimen in torsion test

4. 解析結果

4.1 せん断応力分布

図8(a)～(c)は表2のNo.1のモデルの一端に 0.03rad の強制回転変位を与えた場合に、長さ方向中央部の断面上に発生するせん断応力分布を示したものである。 τ_{zx} は溝底で、 τ_{zy} は外周部において最大になる。一方、式(3)で求めた主せん断応力分布は同図(c)のようになり、やはり、溝底で極端な応力集中が起こることがわかる。このことから、ドリルのねじり破壊は溝底部が起点として起こることが推定できる。そこで、解析においてモデルの長さ方向中央部の断面の溝底部に発生する主せん断応力の最大値が、ドリル素材のせん断

Fig. 8 Stress distribution on drill cross section

強度に達した時のトルクの値が、実際のドリルのねじり試験において得られる破断トルクに相当すると考え、次式により破断トルクに換算した。ここで、 T_B はドリルの破断トルクを意味している。

$$T_B = 2687 \times T / \tau_{pmax} \quad (5)$$

4.2 解析結果の検証

次に、表2のモデルNo.1, 2, 3についての解析結果と、対応する表1の3種類のドリル（タイプA, B, C）のねじり試験結果を図9～11に示す。横軸はモデルのウェブ厚、縦軸は破断トルクである。実験点はタイプA, B, Cのドリルをそれぞれ対応するウェブ厚の断面で図4の方法によりねじり試験したときの結果である。

ウェブ厚の増加につれて破断トルクはほぼ直線的に漸増する。そして、いずれの場合も実測結果と解析結果の間には20%程度の差があることがわかる。この実測結果と解析結果の差の原因としては、ねじり変形時に発生する軸方向変位による圧縮力を解析において考慮していないこと、この直径範囲ではドリルのウェブ厚公差は±0.02mm程度と、ウェブ厚そのものに対してかなり大きいので、同一仕様で製作したつもりのドリルでも実際には公差内での寸法ばらつきがあり、それが実測結果のばらつきとなってあらわれていることなどが考えられる。また、ねじり試験における破壊断面位置のばらつきなどもある。しかしながら、この程度の差があっても実用上は十分目的は達せられる。

なお、今回の解析では、超硬合金のポアソン比データが明確に把握できないためその値として0.3を使用した。ぜい性材料である超硬合金の値としては少々大きな値と思われる。そこで、1条件についてポアソン比を0.2として破断トルクを計算してみたが、破断トルクに与える影響は3%以下であり、計算結果に大きく影響していないことを確認している。

4.3 ねじり強度に及ぼす形状パラメータの影響

以上述べたように、本解析法により比較的良好な精度でねじり強度解析が可能になったことがわかった。そこで、No.1のモデルを用いてねじり強度に及ぼすウェブ厚以外の主要形状パラメータの影響について解析した。

図12は破断トルクに及ぼす溝幅比の影響を示したものである。応力集中が溝底に発生することから溝幅比の影響は大きいと思われたが、現実には溝幅比の増加につれて破断トルクはわずかに低下するだけで、ほとんど影響しないことがわかった。

Fig. 9 Relationship between breaking torque and web thickness

Fig. 10 Relationship between breaking torque and web thickness

Fig. 11 Relationship between breaking torque and web thickness

Fig. 12 Relationship between breaking torque and flute/land ratio

Fig. 13 Relationship between breaking torque and helix angle

Fig.14 Types of model cross section

次にねじれ角をパラメータとして、同様に破断トルクを計算した結果を図13に示す。この場合も、ねじれ角の増加につれてわずかに破断トルクも大きくなるが、その影響は小さい。結局、図9～11に示したように、破断トルクに対してはウェブ厚の影響が最も大きく、ねじり強度を高くするにはウェブ厚を大きくするのが最も効果的である。しかしながら、現実にはウェブ厚を大きくすることはフルート断面積が小さくなることであり、ねじり強度は高くなるが切りくずの排出性が悪くなり、強度増加以上に切削トルクが上昇する場合が起こりうる。したがって、ドリルのねじり強度を正確に把握した上で、実際の切削トルクとの兼ね合いでウェブ厚を決定することが重要である。

4.4 微小径ドリルのねじり強度解析

最近の小形電子機器用のプリント基板では直径が $\phi 0.1\text{mm}$ あるいはまれにそれを切るようなスルーホールが用いられる場合がある。このような穴のドリル加工では切削力の測定も難しく、また、本論文で述べたようなねじり試験法でもドリル強度の精度の良い測定ができないことなどから、全くの手探り状態で加工を行わなければならない。そこで、ここでは微小径ドリルのねじり強度レベルを明らかにする意味も兼ねて直径 $\phi 0.1\text{mm}$ のドリルを例にとって強度解析を行った。

解析したドリルは、市販されている直径 $\phi 0.1\text{mm}$ のツイストドリルであるが、径が細いため、図2で述べたようなアンダカットタイプではなく、先端から根元まで同一の外形を持つストレートタイプのドリルとなっている。カタログ標準品として市販されているもののうち図14に示すような代表的な3つの断面形状タイプ（No.4～6）のものについて破断トルクの解析を行った。なお、この場合も形状入力数値はドリルを実際に断面研磨し形状測定したデータを使用している。また、解析条件は表3に示す通りである。

図15に解析結果を示す。横軸はウェブ厚であり、縦軸は破断トルクである。図からわかるように破断トルクレベルは図9～11の例と比べると1～2けた低い、極めて微小なものである。また、この場合もウェブ厚の増加につれて破断トルクは大きくなる傾向が見られるが、直径が小さい分だけその影響の度合いは図9～11のドリルに比べてかなり小さいことがわかる。また、図15においてNo.4の曲線の延長上にNo.6の曲線がくるところから、両者では断面形状の影響はほとんどなく、単にウェブ厚範囲の差が破断トルクの差となって現れていると考えられる。しかしながら、No.5については他の二つのタイプとウェブ厚の値が同じでも破断トルクの値は25%程度小さい。これはこのドリルの溝幅比が他の二つのタイプより大きく、ねじれ角も小さいことの影響が現れていると考えられる。

Table 3 Analytical conditions

Model No.	4	5	6
Model dimension			
Diameter mm	0.1	0.1	0.1
Helix angle	35	24	30
Length mm	0.45	0.35	0.42
Web thickness mm	0.043-0.052	0.043-0.057	0.025-0.043
Young's modulus N/mm^2	559000		
Poisson's ratio	0.3		
Shear strength N/mm^2	2520		
Number of elements	1280

Fig. 15 Relationship between breaking torque and web thickness

5. 結 言

小径ツイストドリルのねじり強度を、簡単なモデルを用いた有限要素法により数値解析する方法について検討し、以下の結論を得た。

- (1) ドリルの軸方向の一断面と同じ断面形状を有し、元のドリルと同じねじれを持つ短刃長で一定ウェブ厚モデルによりドリルのせん断強度を有限要素法解析する手法を提案し、実測値と20%程度の誤差で合うことを明らかにした。
- (2) ドリルの破断トルクに対してはウェブ厚の影響が最も大きく、その増加に伴い破断強度も増加する。また、溝幅比の減少及びねじれ角の増加につれて破断トルクは増加するが、それらの影響はわずかである。
- (3) 小径ドリルの任意断面のねじり強度を実測する簡単なねじり試験法を考案した。

参 考 文 献

- 1) 若井勝郎ほか：大型コンピュータM8800の処理方式とハードウェア技術，日経エレクトロニクス，No.515，(1990) 209.
- 2) 黒澤啓治：穴あけ技術，電子技術，1987-6 別冊，p.56.
- 3) 大幸洋一，寺林隆夫，梶田正美：プリント基板の小径ドリル加工，精密工学会誌，60，12 (1994) 1795.
- 4) 長尾高明，西保木宏男：ドリルの応力解析，1993年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集，(1993) 977.
- 5) 倉西正嗣：応用弾性学，共立全書，共立出版，(1965) 186.
- 6) 小野元久，菅原章：微小径ドリル加工に関する研究，昭和63年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集，(1988) 805.