

タッピンねじ締結における締結力特性

Characteristics of Applied Forces for Tightening Self Tapping Screw Joints

精密工学専攻 41号 布川 将之

Masayuki Nunokawa

1. 序論

タッピンねじとは自身のねじ山で締結対象材の下穴へめねじ成形を行い、さらに締結を行うねじである。ナットが不要なため、小ねじ締結より作業性に優れ、自動締結に向いている。自動車、電子機器、家電製品などで薄い金属板や樹脂の締結に広く用いられている。

タッピンねじ形状として広く使用されているのが「タップタイト」である。めねじ形状を塑性加工する機能を持ったタッピンねじであり、特徴としてねじ部が三葉形状（おにぎり状）を持つ。Fig.1 にタップタイトの代表例を示す。

S-tite は薄板金属用であり、小ねじ形状との互換性を持つ。B-tite は S-tite と同様のねじ山形状をしており、ねじ込み性を高くするためにピッチを2倍ほど長くしたねじ部を持つ。Fit-tite はねじ込み性を高めるために S-tite のねじ山角度を半分にしたねじ部を持つ。本研究ではこれら3種類の特徴的タッピンねじを用いて、締結力特性を明らかにする。

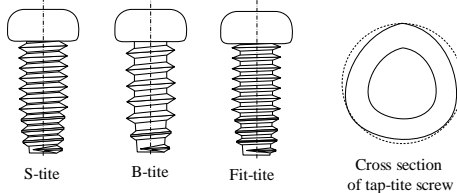


Fig.1 Typical geometries of tap-tite screws

通常のボルト締結の場合、締結力は軸力をもって評価される。しかし、タッピンねじの場合、薄板締結のため、軸力計測がほとんど不可能である。Fig.2 に示すように、ナットの役割を締結対象である薄板噛み合い部が担っていること、軸力を得るために必要なねじ頭とねじ部との間隔がほとんどないからである。したがって、Fig.2 右に示すようなねじ軸部の弾性変形による軸力維持はほとんど期待できない。

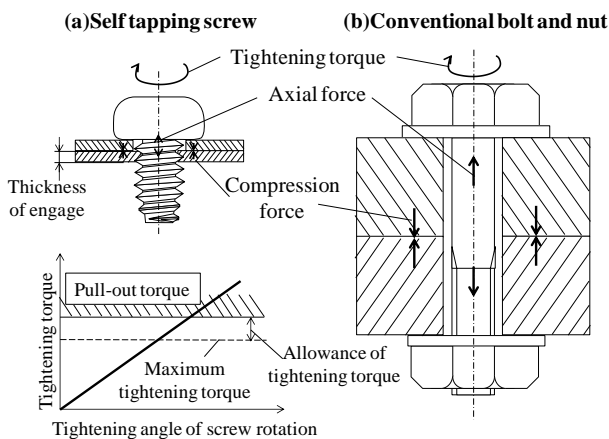


Fig.2 Characteristics of applied forces for tightening self tapping screw joints

タッピンねじでの締結強度を向上させるためには、できる限り大きな締付けトルクを採用しなければならない。この時、問題になるのは締付けトルクが過大になると、噛み合い部のねじ山が破壊されてしまうことである。特にタッピンねじで

薄板を締付ける場合には、噛み合い部のねじ山数が2~3山しかなく、せん断面積が小さいため、締付けトルクの軸方向分力によってせん断破壊されやすい。

以下の本文では、このめねじ部、すなわち被締結体である薄板ねじ山部の破壊を一般にも広く使われる用語「プルアウト (Pull-out)」と呼ぶことにする⁽¹⁾。

Fig.2 のトルク線図に示すように、プルアウトを防止しつつ、可能な限り締付けトルクを大きくする締付け管理が必要となってくる。この時、噛み合い部の摩擦係数などにバラつきがある場合、あるいはめねじ成形が不十分な場合、締付けトルクには一定の許容幅を設定しなければならない。

以下に述べる本研究では、このトルク設定の考え方をプルアウト防止の観点から考えていく。

2. 締結力の基礎理論

2.1 斜面の原理に基づくねじの力学⁽²⁾

Fig.3 にタッピンねじ及び被締結材の形状的な特徴と本論文で使用するパラメータを示す。

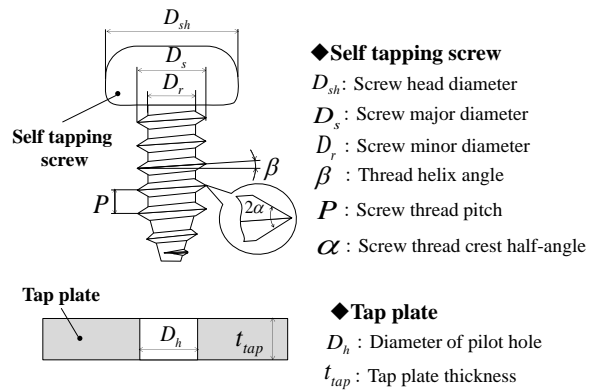


Fig.3 Parameters of self tapping screw and tap plate

ねじを締結するためにドライバから供給される駆動トルク T_D と発生する軸力 F の関係を Fig.4 を用いて以下に示す。

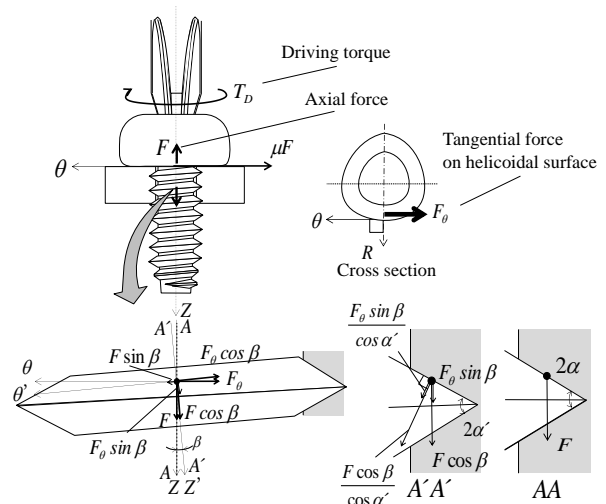


Fig.4 Balance of axial forces and the tangential forces

ねじ部に作用するトルク T_s は、締付け方向に回すためのねじ面接線力 F_θ を用いて(1)式で与えられる。

$$T_s = \left(\frac{D_s + D_h}{2} \right) \frac{F_\theta}{2} \quad \dots(1)$$

(1)式におけるねじ面接線力 F_θ は、Fig.4における力の釣り合いから得られる(2)式を変形した(3)式から求められる。

$$F_\theta \cos \beta - F \sin \beta = \mu \left(F \frac{\cos \beta}{\cos \alpha'} + F_\theta \frac{\sin \beta}{\cos \alpha'} \right) \quad \dots(2)$$

$$F_\theta = \left[\frac{\mu}{\cos \alpha} + \frac{P}{\pi \left(\frac{D_s + D_h}{2} \right)} \right] F \quad \dots(3)$$

よって(1)式及び(3)式より、ねじ山に作用するトルク T_s は次の(4)式で表される。

$$T_s = \left(\frac{D_s + D_h}{2} \right) \frac{F_\theta}{2} = \left[\frac{\mu}{\cos \alpha} \left(\frac{D_s + D_h}{2} \right) + \frac{P}{\pi} \right] \frac{F}{2} \quad \dots(4)$$

座面に作用するトルク T_w は次の(5)式で表される。

$$T_w = \mu D_w \frac{F}{2} \quad \dots(5)$$

ここで D_w はねじ頭の有効径を示す。

座面に働くトルク(5)式とねじ面に働くトルク(4)式の和がねじ締結に必要な駆動トルク T_D であり、次の(6)式で示される。

$$T_D = T_w + T_s = \frac{1}{2} \left[\frac{\mu}{\cos \alpha} \left(\frac{D_s + D_h}{2} \right) + \frac{P}{\pi} + \mu D_w \right] F \quad \dots(6)$$

(6)式は軸力 F と駆動トルク T_D の関係を示す基本式である。摩擦係数 μ 、ねじ形状の影響が反映された式となっている。軸力 F の増加は(6)式の軸力 F の係数の大きさによって支配され、係数が大きいほど駆動トルク T_D に対して発生する軸力 F が小さくなる。また、摩擦係数 μ は駆動トルク T_D と軸力 F に大きな影響を及ぼしていることが分かる。

2.2 プルアウトトルク

ねじ山せん断破壊はおねじとめねじのせん断強度が小さい方で発生する。ここでタッピンねじは、めねじよりはるかに高い強度を持っており、破壊されるのはめねじ部であると考えて、実用上問題は無い。そこで以下ではめねじ部の破壊、すなわちプルアウトについてのみ考えることにする。

プルアウトの発生するトルクを求める手順を Fig.5 の力の釣り合い図を用いて説明する。

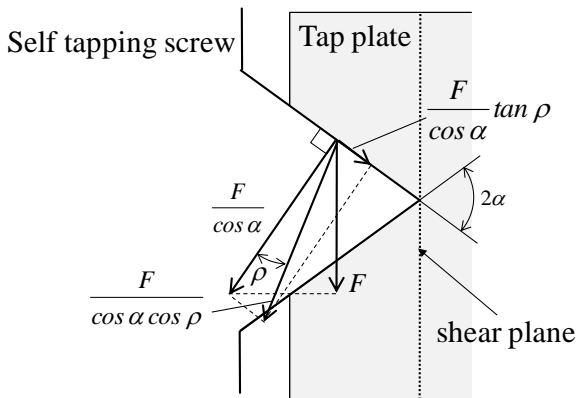


Fig.5 Axial force applied on the screw thread

めねじのせん断面積 A_p は次の(7)式で求められる。

$$A_p = \pi D_s L \quad \dots(7)$$

ここで L はねじ山の有効嵌め合い長さを意味しており、板厚 t_{tap} と等しくなり、次の(8)式でも表現できる。

$$A_p = \pi D_s t_{tap} \quad \dots(8)$$

プルアウトが発生するときの軸力 F_{max} は次の(9)式より求められる。 $\tau_{B-plate}$ は被締結材のせん断強さを示す。

$$F_{max} = \frac{\cos \alpha \cos \rho}{\cos(\alpha - \rho)} \tau_{B-plate} A_p \quad \dots(9)$$

同式の軸力 F を(6)式に代入すると、プルアウトが発生する場合のトルク T_P が次の(10)式のように導かれる。

$$T_P = \frac{1}{2} \left[\frac{\mu}{\cos \alpha} \left(\frac{D_s + D_h}{2} \right) + \frac{P}{\pi} + \mu D_w \right] \frac{\cos \alpha \cos \rho}{\cos(\alpha - \rho)} \tau_{B-plate} A_p \quad \dots(10)$$

上式より、被締結材が薄くなるほど、プルアウトトルク T_P は小さくなる事が分かる。

2.3 めねじ部成形に及ぼすスウェージングプロセスの影響

タッピンねじ締結の場合、めねじ部はスウェージングプロセスにおいて、おねじ、すなわちタッピンねじによって成形される。この過程においてめねじのねじ山部成形が不十分であると、(10)式で求めたプルアウトトルクを下回ってプルアウトが発生する可能性がある。

めねじ部ねじ山の成形が充分であるかどうかは、塑性加工に伴ってねじ山が①成形されるのに十分な量を確保できたかどうか、②成形過程でスウェージング効果により緻密なねじ山が成形されたかどうかの2点で評価される。

前者の①については、ねじ込んだタッピンねじのねじ山の体積がめねじ成形に大きく影響及ぼす。

後者の②は、いわゆる鍛造効果による材質の緻密化を期待するものである。スウェージングにより、材料がねじ山に沿っておねじの谷底に流れ、緻密で強固なねじ山を成形することを期待している。

以上の①、②はおねじのねじ山の形状と、被締結材下穴径との関係で決まる。下穴径がおねじに対して小さすぎると、過剰な材料流れが発生し、駆動トルクが増大する。一方、下穴径が大きすぎるとめねじ形成に必要な材料流れが不足し、不十分なめねじ形状となり、プルアウト強度が低下する。

2.4 カムアウト現象

駆動トルクが大きくなるとねじ頭とドライバビットが外れてしまうカムアウトが生じる場合がある。これはドライバビット駆動部の斜面によって、ドライバ駆動力が軸方向に分解されて発生する。

Fig.6にねじ頭とドライバビットの力の釣り合い図を示す。同図よりねじ頭斜面に垂直な力 N とすれば、その力による摩擦力 μN との合力がねじ頭の斜面によって回転方向の分力 F_T 、軸方向の分力 F_c となる。摩擦角 ρ を用いてこれらの関係は次の(11)式で表される。

$$F_c = \tan(\gamma - \rho) F_T \quad \dots(11)$$

ここで、回転方向の分力 F_T とドライバビットの中心軸から駆動点までの距離 r の積は駆動トルク T_D と釣り合うので軸方向の分力 F_c は次の(12)式で求められる。

$$F_c = \tan(\gamma - \rho) \frac{T_D}{r} \quad \dots(12)$$

軸方向の分力 F_c がドライバビットを押し付ける推力 F_{th} と同じ大きさになった時にカムアウトが生じると考えると、カムアウトを起こすトルク T_C は次の(13)式のように示される。

$$T_C = \frac{F_{th} r}{\tan(\gamma - \rho)} \quad \dots(13)$$

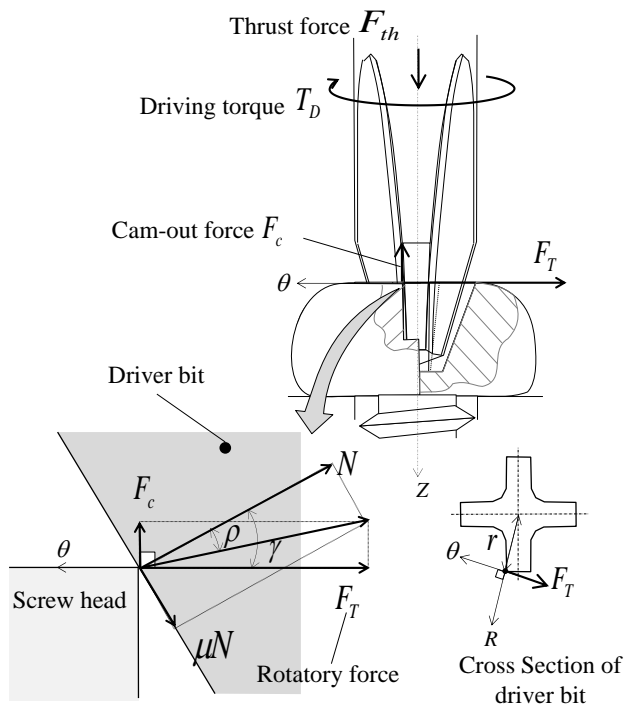


Fig.6 Balance of forces on the screw head and the driver

カムアウトは過剰な駆動トルク T_D がねじ頭に作用する時に生じるため、めねじの強度が高い場合の締結や、下穴径が小さく大きな駆動トルク T_D になるような場合に発生する。

3. 実験内容

Fig.2の考え方に基づく2章での解析を検証するために、タッピンねじによる締結実験を行った。使用した3種類のタッピンねじの仕様及び本締付け駆動条件をtable 1に示す。また、軟鋼製被締結材の板厚、及び下穴径についてtable 2に示す。

Table 1 Geometry of tap-tite and experimental condition

		Tap-tite		
		S-tite	B-tite	Fit-tite
Screw thread crest half-angle[deg]	α	30	30	15
Screw thread pitch[mm]	P	0.45	0.907	0.45
Screw major diameter[mm]	D_s	2.6		
Speed[rpm]	x	30		
Thrust force[N]	F_{th}	42		

Table 2 Parameter of tap plate

Parameter	Tap plate thickness[mm]	Diameter of pilot hole[mm]
Sample1-1	1.6	2.3
Sample1-2	1.0	2.3
Sample1-3	0.8	2.3
Sample2-1	1.0	2.1
Sample2-2	1.0	2.2
Sample2-3	1.0	2.4

実験のためのシステム構成を Fig.7 に示す。ドライバビットの駆動回転数、推力、及び締結シーケンスを自動制御可能である。駆動トルクはドライバユニットへの供給電流から検出可能である。

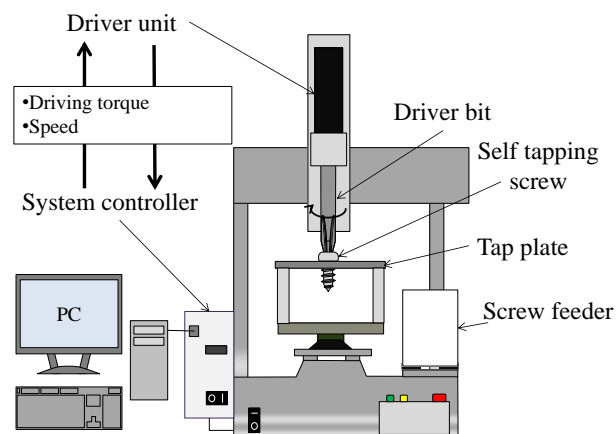


Fig.7 Experimental equipment

4. 実験結果と考察

4.1 トルク線図

タッピンねじによる薄板締結の代表的トルク線図を Fig.8 に示す。締結工程は、(a)ねじの着座、(b)めねじ成形(Swaging)、(c)仮締付け(Pre tightening)、(d)ねじ頭座面が薄板に着座して始まる本締付け(Tightening)の順で構成される。

それぞれの工程においてビット回転数が設定されており、必要なトルクに対応した電流が供給される。一般的にスウェーピングトルクは本締付けトルクより小さい。

プアアウト現象は本締付け工程でのトルク急増過程で発生する。ねじ頭が着座後一回転しないうちに発生する場合はほとんどである。このため、トルク値と締付け回転角をインプロセス測定してプアアウト発生を防止する制御系を構築するのが非常に困難である。通常はプアアウトが発生しない安全側のトルク値を設定しておき、本締付けトルクがその値に達した段階で停止する方法がとられている。

以下の実験結果では、プアアウトが発生するまで締付けを続行し、その時のトルクを計測してプアアウトトルクとした。

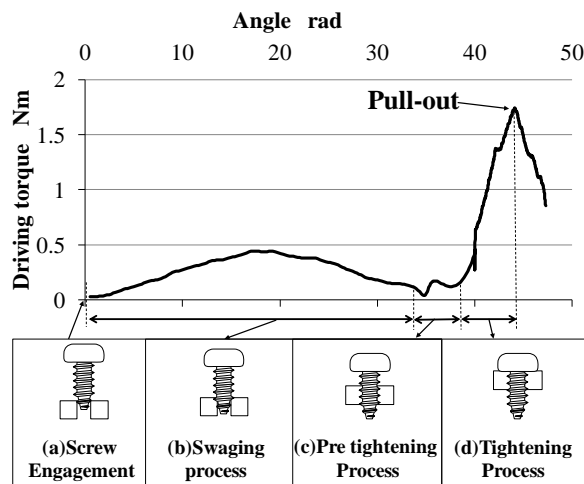


Fig.8 Typical torque record for self tapping screw

4.2 板厚変化によるプアアウトトルクへの影響

被締結対象の板厚を変化させた場合にプアアウトトルクに及ぼす影響を Fig.9 に示す。どのねじ種類も板厚に対して比例的にプアアウトトルクが増加している。S-tite が他の2種類より大きなプアアウトトルクとなったが、B-tite と Fit-tite の間には大きな差がなかった。

(10)式を用いて計算したプアアウトトルク理論値を同図に示す。ねじ形状の影響は大きな差ではなかったため、3種類の

平均値として示してある。理論値は板厚の影響をよく表しており、これは(8)式及び(10)式から理解できる。

しかし、プルアウトトルクに及ぼすねじ形状の差は理論値では大きくなく、実験値を十分に説明できていない。

その理由は、理論式に2.3節で述べたような材料の流れによるねじ山成形プロセス(Swaging)の影響が反映されていないためと考えられる。S-titeは本実験条件の場合、ねじ山成形に必要な十分な材料が供給される条件と考えられ、また鍛造効果も大きいと考えられることから、(10)式におけるせん断許容応力 $\sigma_{B-plate}$ 及び摩擦係数 μ が大きくなっていると考えられる。

したがって、スウェーピングプロセスにおける材料の流れを考慮したトルク予測式が有効と思われる。⁽⁵⁾

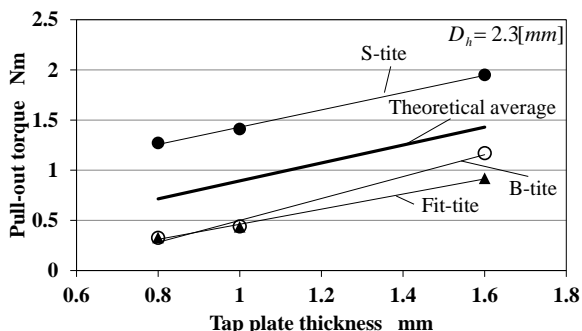


Fig.9 Influence of tap plate thickness on pull-out torque

4.3 下穴径がプルアウトトルクに及ぼす影響

下穴径を変化させた場合のプルアウトトルクに及ぼす影響を両対数軸の Fig.10 に示す。ただし S-tite の下穴径 $D_h=2.1, 2.2$ [mm] の条件では、最終的にプルアウトではなくカムアウトが発生した。同図ではカムアウトトルクとして示してある。

同図によれば、下穴径が小さくなるにつれて、プルアウトトルクは急増する。下穴径の減少により、プルアウトトルクが増加する理由は、めねじのねじ山成形に必要な材料の流れが十分に確保されるようになること、及び鍛造効果の発現と考えられる。このスウェーピングプロセスにおける下穴径減少によるねじ山強度の改善効果が本締付けにおけるプルアウトトルクの上昇の要因と考えられる。

ただし、ねじ山成形に必要な材料供給が過剰になると、2.3節に述べたように、トルクが急増し、カムアウトが発生してしまう。これらの現象は S-tite により強く表れ、そのことは Fig.10 の結果においても観察される。

ねじ山成形に必要な材料の量がプルアウトトルクに強く相関を持つことは Fig.11 の結果から明らかである。すなわちめねじ山体積の量が増加するにつれて、プルアウトトルクは上昇している。

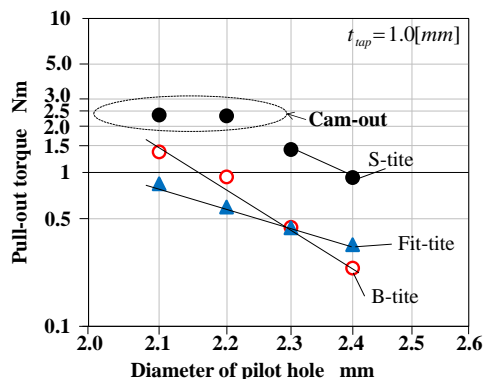


Fig.10 Influence of diameter of pilot hole on pull-out torque

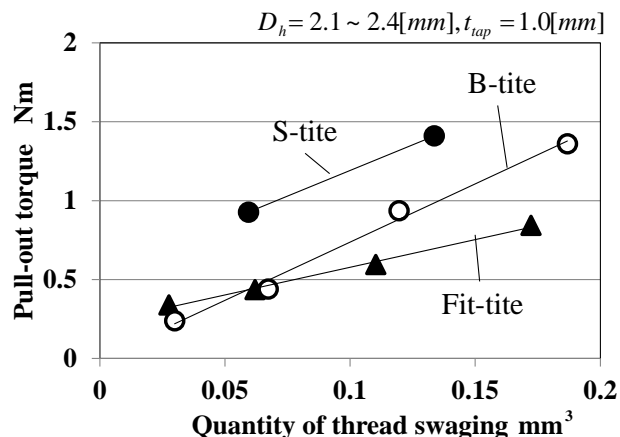


Fig.11 Influence of quantity of thread swaging on pull-out torque

6.まとめ

本研究では、タッピングねじ締結による薄板締め付け強度の改善を目的として、プルアウトトルクについて予測式を求め、その定量的な検証を行った。その結果は以下のようにまとめられる。

- (1) ねじの斜面原理を基本として、めねじ破壊に伴うプルアウト発生時のトルク予測式を導いた。
- (2) タッピングねじ締結の場合、めねじを成形するスウェーピングプロセスにおける材料の流れがプルアウトトルクに大きな影響を及ぼすことを指摘した。
- (3) タッピングねじ締結におけるプルアウトトルクの定量的検証を行うため、被締結体の板厚及び下穴径を変化させた実験を行った。
 - ① 板厚及び下穴径がプルアウトトルクに及ぼす影響については、プルアウトトルク予測式と実験値の傾向がほぼ一致した。
 - ② タッピングねじの形状と被締結材下穴寸法は、めねじ成形時の材料流れに大きな影響を及ぼしていると考えられる。
 - ③ 以上の①,②より、プルアウトトルクを定量的に十分な精度で予測するには、ねじの斜面原理による幾何学的な力のバランスだけでなく、スウェーピングプロセスでの材料流れ効果を織り込む必要がある。

今後の課題は、スウェーピングプロセスでのめねじ山成形状態をプルアウトトルクモデルに反映させることである。

参考文献

- (1) 山本匡人, 小径タッピングねじの締結特性解析と締付け制御に関する研究, 2007年度中央大学修士論文
- (2) 酒井智次, 増補ねじ締結概論, 養賢堂, 2007
- (3) Jason Miller, Alla Shved, Lingfeng Tang: "Model for Self-tapping Screw Tightening Process and Heat Generation"
- (4) Mongkorn Klingajay, Prof. Lakmal D. Seneviratne, Dr.Kaspar Althoefer, Parameter estimation during automated screw insertions (2002)
- (5) 吉岡篤史, くさびモデルに基づくタッピングねじ締結プロセスに関する研究, 2010年度中央大学修士論文