

カラーレスタイト締付けの解析



八木澤 正史
Tadashi Yagisawa
研究開発部

1. はじめに

カラーレスタイトは、同軸上に呼び径が異なりピッチが共通な2種類のねじ山を有し、樹脂素材で成る被締結材と相手材の双方にセルフタップ締付けを行うことにより、金属カラーやインサートナットを不要とする当社オリジナルのねじである。セルフタップ締付けとは、めねじ加工が施されていない下穴に、ねじ自身のねじ山（おねじ）でめねじを形成しながら行う締付けであり、軸力がなくてもおねじ-めねじ間を拘束する力が働く。カラーレスタイトでは、セルフタップ締付けを被締結材と相手材の双方に行うので、樹脂素材に顕著なクリープ特性（応力緩和）や熱膨張係数差による軸力低下が発生¹⁾しても、被締結材にはガタつきや緩みは発生しない。

また、カラーレスタイト締付けでは、相手材への締付けが被締結材への締付けに先行する。このことにより、被締結材へのセルフタップ時に、被締結材と相手材が密着し、着座後の増締めによって被締結材と相手材の間にも締結力が発生する。

2. 解析の背景

カラーレスタイト締付けには二つの特徴がある。

第一の特徴は、相手材だけでなく、被締結材にも締付けを行うことである。通常の締結では、被締結材にはねじ部を設けず、増締め時にねじに発生した軸力により、被締結物をねじ座面と相手材の間に挟み込み、固定（締結）する。それに対し、被締結材にもねじ部を設けると、増締め時にねじ座面と被締結材との間のみ締結力が発生し、被締結材と相手材との間には締結力が発生しない場合がある。被締結材と相手材との間に締結力が発生するか否かは締付け条件によって変わり、カラーレスタイト締付けでは締結力が発生する。

第二の特徴は、被締結材と相手材へセルフタップ締付けすることである。セルフタップ締付けでは、軸力が発生していない場合でも、被締結材や相手材に形成されるめねじ部と、ねじのおねじ部とを固定する力（拘束力）が発生する。この拘束力は、軸力による締結力

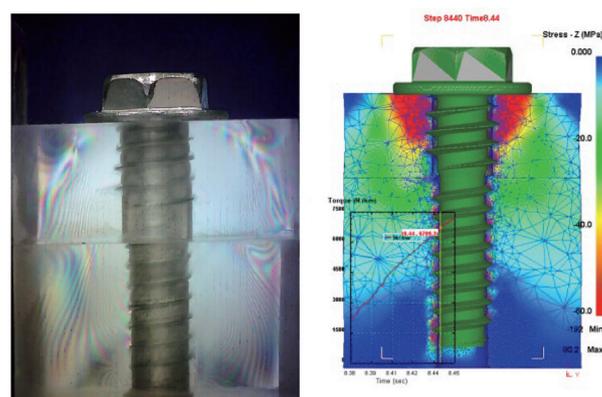


図-1 解析例（左：光弾性 右：FEM）

とは発生原理が異なる。

本報では、カラーレスタイトにおいて、被締結材-相手材間に締結力が発生する仕組みと、セルフタップ締付け時の拘束力についての解析（図-1）を行う。

3. 解析に用いる手法

3.1 光弾性効果を利用した応力観察

透明弾性体（等質等方性体）は、複屈折性（光が入射したとき二つの屈折光が現れる性質）を持たない。しかし、外力が加わり応力を生じると、一時的に光学的異方性を示し、複屈折現象を生じる。この現象を光弾性効果（photoelastic effect）という。

平板の試料に垂直に偏光を入射させた場合、複屈折によって分かれた2光波の通る経路内の主応力がそれぞれ σ_1 、 σ_2 であるとする、2光波の位相差は主応力差（ $\sigma_1 - \sigma_2$ ）に比例する。これをBrewsterの法則という²⁾。

$$\Delta = ct (\sigma_1 - \sigma_2) \quad (1)$$

Δ :複屈折された2光波の光路差

c:材料の光弾性係数

t:材料の板厚

$(\sigma_1 - \sigma_2)$:平板の面内に生じた主応力差

上式は平板の面内に2次元的に表れた応力の場合で

あり、ねじ締め状態を側面から観察する場合には、光路中の応力状態が積分される。

光弾性の実験装置には幾つかの構成があり、測定装置として市販されているものもあるが、当社では写真-1のような簡易的な装置を応力観察に利用している。この装置は、白色を表示させた液晶画面を偏光光源とし、観察物の透過光を偏光フィルタ付きカラーカメラで撮影し、画像をパソコンに取り込んでいる。光路差により二つの光波が干渉し、等応力面毎に色分けされた虹色の干渉画像が得られる。



写真-1 光弾性観察装置

3.2 FEM 解析を用いた応力解析

物体内部の応力分布や変位分布などを調べる数値的手法としてFEM (Finite Element Method) 解析がある。当社では、2013年度に塑性変形解析用FEMソフトであるDeform3D (Scientific Forming Technologies Corporation社製) を導入し、鍛造品の成形過程解析などに利用している。

FEM解析では、物体を有限個の微細な要素に分割するが、要素数が多くなるに従い、演算時間が増加する。そのため軸対称部品の圧造解析などでは、対称面で分割した4分割モデルなどを用いる³⁾。しかし、螺旋状のねじ山を持つねじには対称面はなく、分割モデルを用いることができない。そのため、本例ではフルモデルで解析を行った。

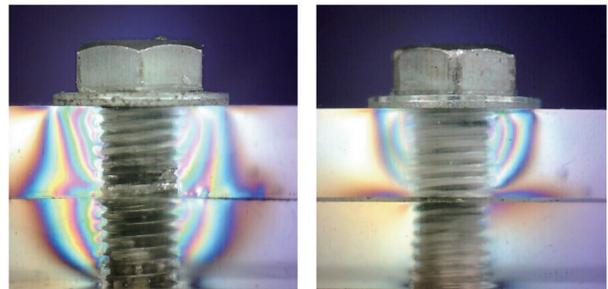
4. 解析結果

4.1 締結力の発生する仕組み

4.1.1 重ねたアクリル板の締め付け

写真-2は厚さ5mmのアクリル板を2枚重ね、M4のタップを立て、そこにM4ボルトを2.5Nmのトルク

で締め付けた場合の光弾性画像である。写真-2 (a) は重ねたアクリル板を密着させた状態で、写真-2 (b) は0.3~0.5mm程度の隙間が空いた状態でタップを立てたものである。写真-2 (a) では座面と上板めねじ部の間だけでなく、上板下面と下板めねじ部の間にも応力が発生している。写真-2 (b) では上下板間にはほとんど応力は見られず、上板下面に僅かに応力が現れているのみである。



(a) (b)
写真-2 重ねたアクリル板の締め付け

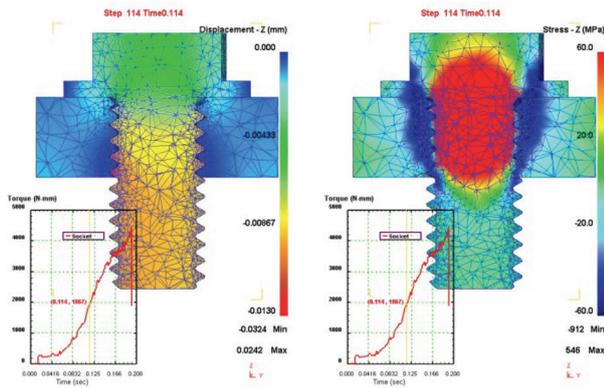
4.1.2 ボルトナット締め付けのFEM解析

前項の光弾性実験は、めねじを有する二つの相手材を重ね、M4小ねじで締め付けた場合でも、着座時に相手材間に隙間がなければ、締結力が発生することを示している。そこで続いて、FEM解析を用いて軸力が発生する仕組みの解明を目指した。

解析は、弾塑性体の鋼製ナットに弾塑性体の鋼製ボルトをセットし、ボルト頭に剛体のソケットレンチを嵌合した状態を初期状態 (Step0) とし、3.6秒で1回転 (1.745rad/sec) する回転速度で増締めする過程について、解析間隔を1msec (1msec/Step) として行った。Step0ではボルト座面はナット上面に接しているが、おねじ、めねじ間にクリアランスがあり締結状態とは言えない。なお、ナットは回り止めとして外周面のXY軸を拘束し、Z軸は拘束しない。各モデル詳細は表-1のとおりである。

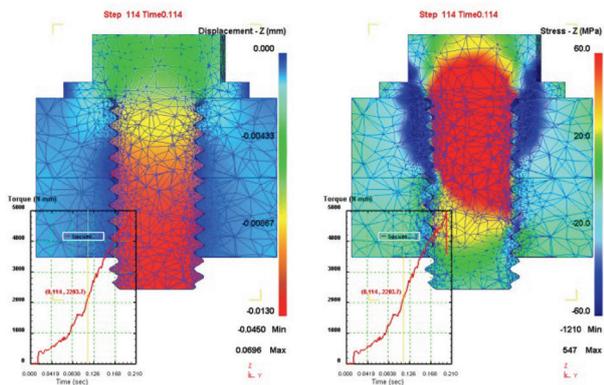
表-1 ボルト・ナット締め付け解析モデル

モデル	ソケット	ボルト	ナット
モデルタイプ	剛体金型	弾塑性体	弾塑性体
要素タイプ	ポリゴン	四面体	四面体
材質		S45C相当	S45C相当
初期要素数	2,902	57,832	上30,477
			下30,342
終了時要素数	2,902	54,455	上30,477
			下29,433



(a) 軸方向変位 (b) 軸方向応力
図-2 ボルト締付け時(ナット1個)断面分布

図-2はナットが一つの場合の解析結果である。ボルトは解析開始より14msec後のStep14にクリアランスのない締結状態(着座)となり、図に示すStep114は10°増締めした状態である。図-2(a)は軸方向変位であり、図-2(b)は軸方向応力である。ねじピッチは1mmであり、ボルト、ナットに変形がなければ、10°の回転でナットは約0.028mmだけ座面側(上方)へ引き寄せられる。実際にはボルト、ナット共に不均一に変形し、ナット下面の軸方向変位は0~-0.001mm、ナット下に出たボルトねじ部の軸方向変位は約-0.01mmである。この解析結果から、着座時にナットの下0.017mm未満の位置に第二のナットがあれば、10°の増締めで締結力が発生すると考えられる。なお、ボルトとナットの嵌合部には径方向や回転方向の変形もある。



(a) 軸方向変位 (b) 軸方向応力
図-3 ボルト締付け時(ナット2個)断面分布

図-3はナットが二つ密着して存在する場合の解析結果である。ボルトはStep14に着座し、Step114は10°増締めした状態である。第二のナットの存在により、ボルトの伸びが増え、ボルト内部には先端近くまで軸方向応力(軸力)が発生しており、二つのナット間には締結力が発生している。

4.1.3 カラーレスタイト締付けの光弾性画像

写真-3はカラーレスタイト締付けの光弾性画像である。被締結材、相手材ともにポリカーボネイトである。ポリカーボネイトは光弾性係数が大きく、応力変化が表れやすい反面、残留応力の影響も大きい。写真-3(a)に見られる虹色模様は残留応力と治具の影響による初期応力である。

相手材(下側)へ3回転ほどねじ込まれた状態の写真-3(b)では、セルフタップにより相手材内部に応力変化が表れている。写真-3(c)では更に大きな応力変化が相手材に見られるが、被締結材はねじ込み開始前であるので変化はない。写真-3(d)では、相手材へのねじ込みの推進力により、上部ねじ山が被締結材に押し付けられ、セルフタップ用の推力が発生している。写真-3(e)では被締結材と相手材間にも応力が発生している。着座、増締めすることにより、写真-3(f)のように大きな締結力(縞模様の間隔が狭いほど応力大きい)が発生している。

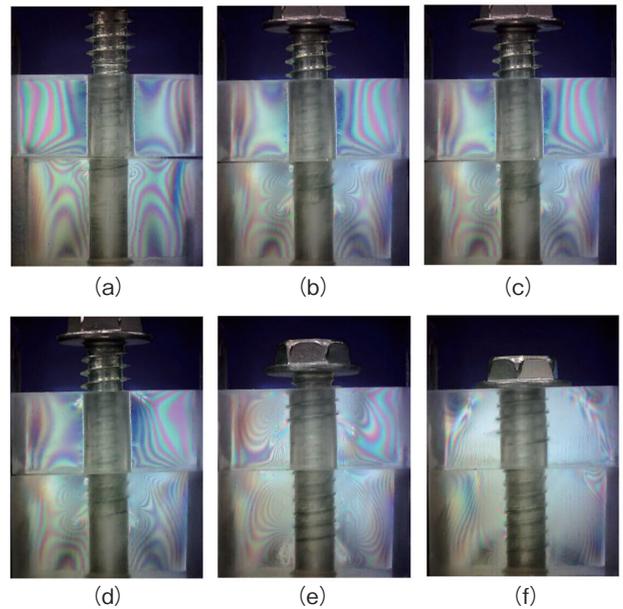


写真-3 カラーレスタイト締付け光弾性画像

4.1.4 カラーレスタイト締付けのFEM解析

厚さ7mmの樹脂素材と厚さ16mmのアルミニウム素材を重ね、長さ22mmのカラーレスタイトを締め付ける過程のFEM解析を行った。

図-4は解析モデル(着座時)であり、相手材の上に被締結材を重ね、剛体金型のカラーレスタイトを締め付ける。解析は、剛体金型であるカラーレスタイトの先端が相手材に接する状態を初期状態(Step0)とし、並進1.588mm/sec、回転6.28rad/secの速度でセルフタップし、着座後は並進速度0として増締めする過程について、解析間隔を1msec(1msec/Step)として行った。相手材と被締結材は、締付け開始から着座直前までは、剛塑性体とし、着座直前から増締め完了までは

弾塑性体とした。なお、回り止めとして被締結材および相手材の外周面のXY軸を拘束し、Z軸は拘束しない。ただし、開始から1回転の間は相手材底面のZ軸も拘束した。各モデル詳細は表-2の通りである。

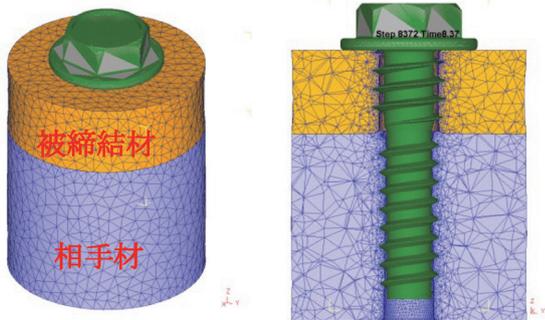


図-4 解析モデル (左:俯瞰図 右:断面図)

表-2 カラーレスタイト締付けモデル

モデル	カラーレスタイト	被締結材	相手材
モデルタイプ	剛体金型	剛塑性体	剛塑性体
増締め時		弾塑性体	弾塑性体
要素タイプ	ポリゴン	四面体	四面体
材質		GFRP	A1070
初期要素数	291,390	49,710	81,153
切替時要素数	291,390	44,635	82,321
終了時要素数	291,390	52,164	84,718

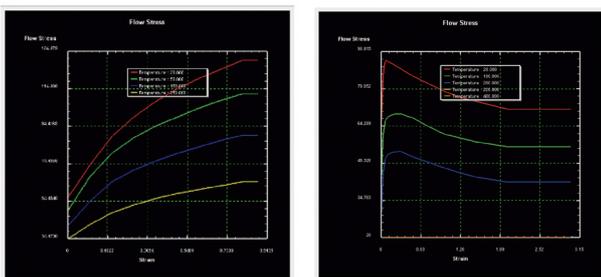
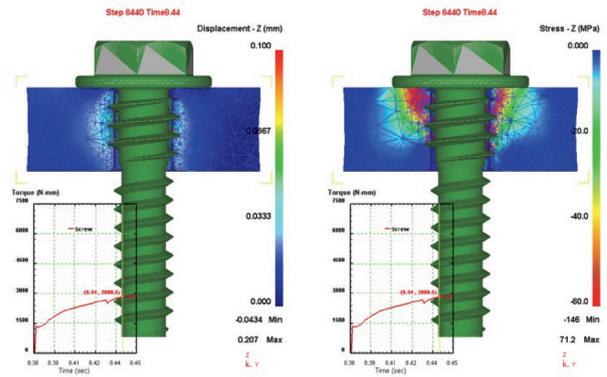


図-5 材料特性図 (左:A1070 右:樹脂)

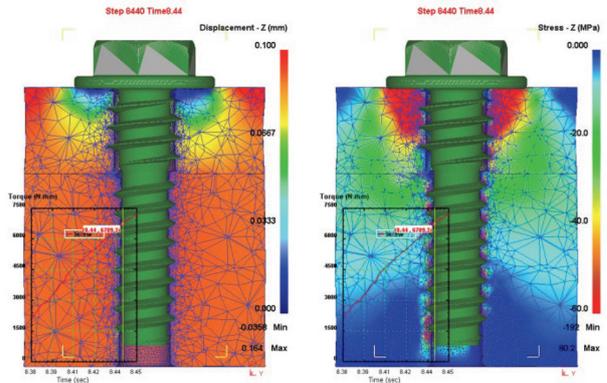
図-5は相手材(純アルミニウムA1070材)と被締結材(ポリアミド6系GFRP材)の材料特性図(S-Sカーブ)である。樹脂素材の粘弾性やクリープ特性は扱っていない。



(a) 軸方向変位 (b) 軸方向応力

図-6 増締め時(被締結材のみ)断面分布

図-6はStep8,380の完全着座(頭部座面全面が被締結材に密着)後に相手材を削除し、被締結材のみで60ステップ(0.06秒)増締めした場合の解析結果であり、着座から21.6°増締めした状態である。ねじピッチが1.588mmであるので、被締結材は約0.095mm座面側(上方)へ引き寄せられるはずであるが、めねじ部周辺の変形に留まり、底面はほとんど変形していない。



(a) 軸方向変位 (b) 軸方向応力

図-7 増締め時断面分布

相手材のある場合には、相手材は増締めのねじ回転に従ってねじのリード角に応じて座面側へと引き寄せられる。図-7は図-6と同様に着座後に21.6°増締めした状態である。相手材めねじ面は約0.095mm座面側へ引き寄せられる。しかし上方には、単体ではほとんど変位しない被締結材下面があり、相手材の変位は制限される。そのため相手材全体の変位は0.090mm程度である。

一方被締結材は、相手材によって底面が押し上げられ、(単体時と比べて)上方へと変位している。

被締結材と相手材が押し合うことにより、被締結材と相手材の境界面周辺の広い範囲に軸方向応力が発生

している。すなわち、被締結材と相手材との間に締結力が発生している。

4.2 セルフタップねじの拘束力

通常のタップ加工は、下穴周辺の素材を削り取ってめねじを形成している。それに対しカラーレスタイトを含むセルフタップねじの多くは、相手材の下穴周辺を塑性変形させてめねじを形成する。相手材は弾塑性体であり、塑性変形するには必ず弾性変形を経由⁴⁾しており、セルフタップ後には弾性変形による応力がねじを抑え込み、ねじと相手材を固定する。この力がセルフタップねじの拘束力である。

光弾性実験に用いた樹脂材料は、変形が大きい場合には応力が残留しやすく、拘束力となる弾性ひずみによる応力の観察には適していない。そこで、FEM解析を用いて拘束力を解析する。

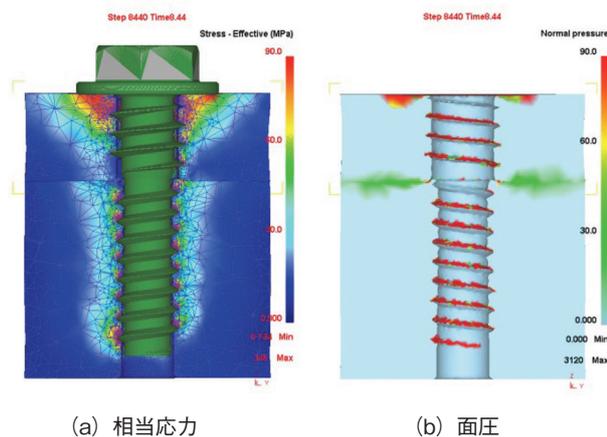


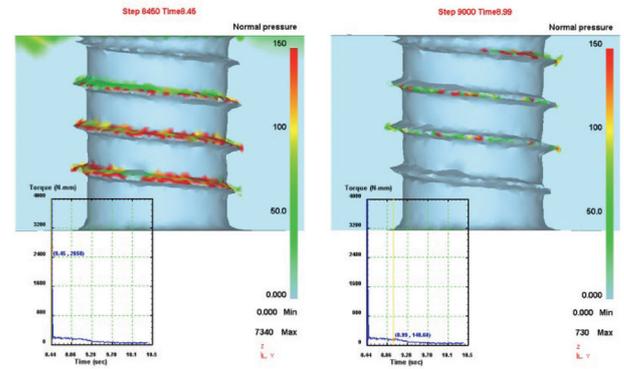
図-8 増締め時分布

図-8は前章の図-7と同様に着座後21.6°増締めした状態の相当応力と面圧である。

図-8 (a) の相当応力を見ると増締めによって生じた応力分布が良く分かるが、ここには塑性変形による応力も含まれており、ここからねじの拘束力を読み取ることはできない。

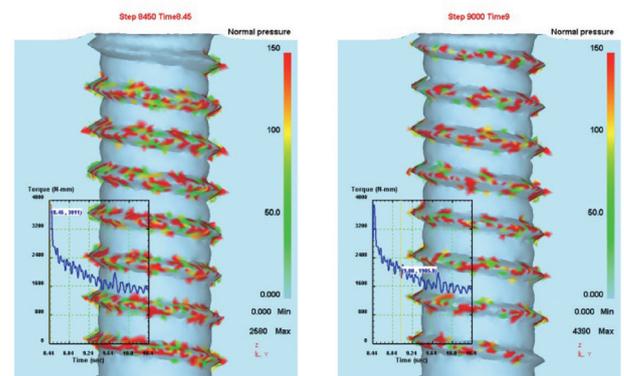
図-8 (b) の面圧を見ると、ねじ座面（非表示）と被締結材上面に生じている面圧、被締結物下面と相手材上面に生じている面圧、およびおねじ（非表示）とめねじのフランク面に生じている面圧が見て取れる。この面圧によりねじが拘束され、生じる摩擦力がねじの緩め止めトルクとなる。ただし、図-8は、軸力により発生した面圧が大きく、セルフタップによる拘束力を読み取ることはできない。そこで、ねじを解く解析を行い、軸力がない場合の拘束力を調べる。なお塑性変形割合の大きなセルフタップ解析では、摩擦タイプはせん断摩擦（せん断応力に比例）としたが、

弾性変形主体のねじ解き解析では、クーロン摩擦（接触圧力に比例）とし、摩擦係数を鋼-GFRP間0.24、鋼-アルミニウム間0.36とした。



(a) 離座前 (b) 離座後半回転
図-9 めねじ面の面圧（被締結材のみ）とトルク

図-9は、着座後21.6°増締めした後に相手材を除去し、被締結材のみとし、推力を加えずにねじを解く過程におけるめねじ面の面圧とトルクである。図-9 (a) は離座しておらず、軸力の影響によりめねじ面上側に150MPaを超える面圧が広範囲に表れ、トルクも2.6Nmを超えている。図-9 (b) は離座後半回転での状態である。めねじ谷底近辺に150MPaを超える面圧が散見され、トルクは約0.148Nmである。これがねじ上部と被締結材間の拘束力である。なお、ねじ上部と被締結材のひっかかり率は0.48、嚙合山数は4である。

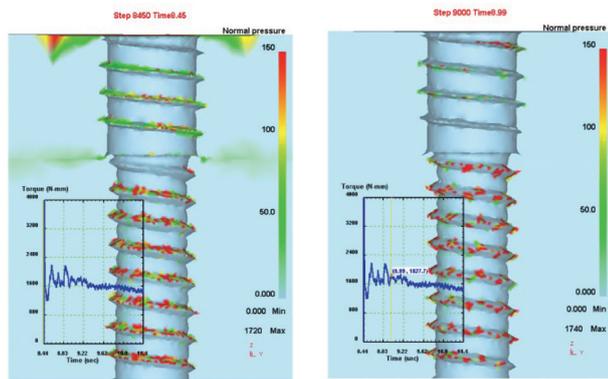


(a) 離座前 (b) 離座後半回転
図-10 めねじ面の面圧（相手材のみ）とトルク

図-10は、着座後21.6°増締めした後に被締結材を除去し、相手材のみとした状態でねじを解く過程におけるめねじ面の面圧とトルクである。ねじ座面下に被締結材がないので軸力は働いていない。離座前、離座後共に150MPaを超える面圧が広範囲に表れ、トル

クも1.9Nmを超えている。これがねじ下部と相手材間の拘束力である。なお、ねじ下部と相手材のひっかかり率は0.48、噛合山数は8である。素材強度が大きく、噛合山数が多いため、被締結材に比べてねじの拘束力は大きくなっている。

なお、**図-9**および**図-10**は変形解析結果であり、熱伝達との連成解析はしていない。



(a) 離座前 (b) 離座後半回転

図-11 めねじ面の面圧とトルク

図-11は、着座後21.6°増締めした後に、ねじを解く過程における被締結材および相手材のめねじ面の面圧とトルクであり、熱伝達も含めた連成解析結果である。**図-11 (a)**は離座前であり、被締結材、相手材ともに軸力の効果が大きく表れており、めねじ面の面圧もトルクも大きい。**図-11 (b)**は離座後半回転の状態であり、軸力がなくなっており、離座前に比べて面圧は小さくなっているが、被締結材、相手材共に150MPaを超える面圧が広範囲に表れ、トルクも1.8Nmを超えている。これが本解析条件において、被締結材と相手材からカラーレスタイトに加わる拘束力である。

なお、面圧やトルクは被締結材や相手材の材料特性や組合せ、ねじのひっかかり率、あるいは摩擦状態などの影響が大きく、解析結果の数値と実測値には相違が生じることが予想される。

5. 今後の課題

前章の前半にて、共にねじ部を持つ二つの部材をねじで締結する場合に、部材間に締結力が発生する仕組みと条件を、光弾性実験とFEM解析を用いて調べた。発生する条件には、締結される二つの部材の変形の仕方が関係していた。従って、部材の材料特性や組合せにより、発生する締結力の大きさは変化する。また、上部ねじおよび下部ねじの噛合山数やひっかかり率にも影響されると考えられる。

今後は、使用が予想される主な素材について、下穴径（ひっかかり率）や噛合山数、および組合せを変えた解析と実験を行い、その傾向を理解し、顧客に適切な提案ができるようにする必要がある。

次に後半部にて、セルフタップねじの拘束力についてFEM解析を用いて調べた。この拘束力も材料特性やねじのひっかかり率などの影響を受ける。従って、それらを変えた解析と実験を行い、その傾向を理解する必要がある。

また、鋼製のねじを熱膨張係数の異なる軽金属や樹脂素材にセルフタップ締付けする場合には、温度変化の影響を考慮しなければならない。これについて、現在は検討案件ごとに実際のワークを用いたヒートサイクル試験が実施されている。しかし、セルフタップ締付けにおいて、温度変化がどのように作用するかの知見は十分でない。今後、各種解析法を用いた説明が望まれる。

6. おわりに

当社では2013年度に塑性加工用FEM解析ソフトDEFORM-3Dを導入し、外部研究機関との共同研究も実施しながら製品の改良などに役立ててきた。さらに本年度には、新規に金属加工業界向け生産プロセスシミュレーションソフトSimufact Formingを導入した。今後は両者を用い、外部機関との連携も強化して解析精度向上や適用対象の拡大を進め、当社製品の品質や信頼性の向上に役立てていきたい。

〈参考文献〉

- 1) 酒井 智次「ねじ締結概論」養賢堂, 2002, p.54-65
- 2) 河田 幸三「光弾性,光塑性の実験法」高分子, 8巻3号, 1959, p.153-157
- 3) 山田 知典「初めての精密工学 FEMメッシュの切り方」精密工学会誌 Vol.76, No11, 2010, 1244-1247
- 4) 柳本 潤「変形加工による変形形状制御-薄鋼板の温間プレス成型-」生産研究, 59巻5号, 2007, p.45-55