論　文

二重ねじ機構に基づく極めて緩みにくいボルト締結体の転造加工

竹増光家＊・宮原洋＊・新仏利仲＊＊

西田新一＊＊＊・野田尚昭＊＊＊＊・野田秀樹＊＊＊＊＊

Thread Rolling of Antiloosening Bolt Fastenings Based on Double-Screw Mechanism

Teruie TAKEMASU, Hiroshi MIYAHARA, Toshinaka SHINBUTSU

Shinichi NISHIDA, Naoaki NODA *and* Hideki NODA

(Received on June 28, 2004)

The purpose of this study is to establish the thread rolling process of the bolt fastenings based on the double-screw mechanism. Two-roller die plunge feeding is employed as the rolling method due to its high processing precision. The roller dies used in this experiments have special grooves whose shape is almost a reverse projection of the double-screw thread. The pitch ratio of the course and fine threads of the double-screw bolts is set to be 2:1. The double-screw bolts can be rolled precisely in the same process as the single-screw bolts using these dies. The deformation behavior of the workpiece during rolling is examined and the formed material fills the grooves of the dies in each cross section very smoothly. The rolled double-screw bolts completely pass the very severe vibration loosening test based on NAS3354. The fatigue tensile strength of the rolled double-screw bolts is increased twofold that of the cutting double-screw bolts.

Key words: form rolling, die design, profile measurement, deformation behavior, accuracy, bolt fastenings, double-screw mechanism, roller die, vibration loosening test, fatigue tensile strength

1．緒言

ねじ締結体は極めて使用頻度，重要度が高い機械要素であり，その使用の歴史は古く，社会的にも広く普及している．しかし，ねじ締結体の緩みは激しい振動や衝撃を伴う場合避けることができない課題であり，ねじの緩みから大事故を引き起こすことはよく知られた事実である[1]．このため，学問的にも緩みの原因が深く検証され[2)~5)]，各種の対策[6),7)]が施されている．しかし，現在の緩み止め部品のほとんどはねじ面間の摩擦力を強化したものにすぎず，決定的な緩み防止対策とはなっていない．

一方，同軸上にピッチの異なるねじ(並目ねじとそれよりピッチの小さい細目ねじ)をもち，各々のピッチに対応するダブルナット構造をした二重ねじボルト締結体(以後二重ねじと呼ぶ)は，ねじの機械的干渉効果と摩擦力とにより極めて優れた緩み防止効果を発揮することが分かっている[8)]．ところが，二重ねじはその複雑なねじ部の構造から，特に細目ねじ部は切削により加工されていた。このため価格は転造成形された市販のシングルねじの 10 倍以上と高価であり，その高い市場価値にも関わらずほとんど普及していなかった．このような状況に鑑み筆者らは二重ねじを通常のシングルねじ同様転造により量産できる加工法の開発を行い，そのプロトタイプを確立することができた．本報ではその具体的方法，成形結果および転造二重ねじの性能評価等について述べる．

＊　九州大大学院工学研究院知能機械システム部門
〒819-0395　福岡県福岡市西区元岡 744
＊＊　(株) ニッセー
〒409-0502　山梨県大月市富浜町鳥沢 2022
＊＊＊　佐賀大学理工学部機械システム工学科
〒840-8502　佐賀県佐賀市本庄町 1 番地
＊＊＊＊　九州工業大学工学部機械知能工学科
〒804-8550　福岡県北九州市戸畑区仙水町 1-1
＊＊＊＊＊　大喜工業 (株)
〒801-0856　福岡県北九州市門司区浜町 11-16

2．実験方法，装置および条件

2．1　二重ねじ

二重ねじとは **Fig.1** に示すようなピッチの異なるねじ(並目ねじと細目ねじ)を同軸上にもち，各々のピッチに対応し

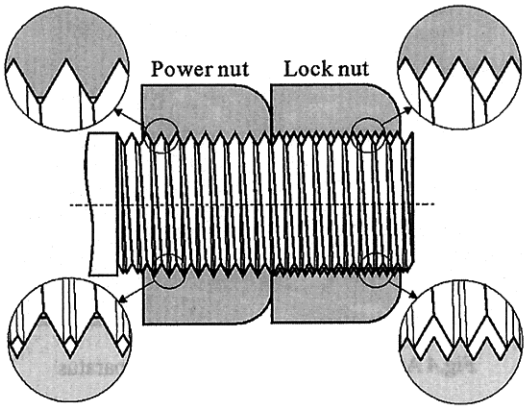
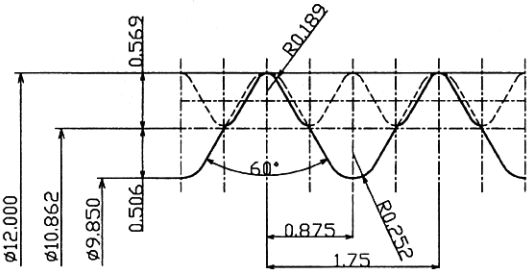
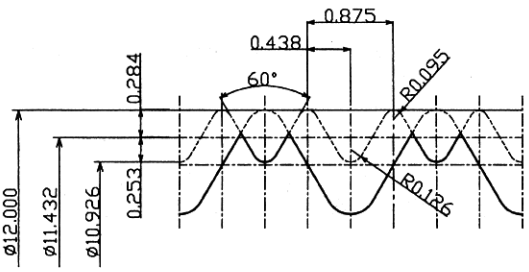


Fig.1 Sketch of double screws bolt



(a) 0 degree position



(b) 180 degree position

Fig.2 Ideal thread profiles of M12 double screws bolt

た並目ねじのパワーナットと細目ねじのロックナットとを締め込むことによりダブルナット構造にするねじ締結体のことである．通常のシングルねじをダブルナット構造にした場合，同一ピッチの二つのナット間の締め付けによる摩擦力のみで緩みを防いでいる．これに対し，二重ねじの緩み防止機能は，締め込まれた二種類のナットの干渉効果，すなわちナットのねじピッチが異なるために二つのナットが同時に回転移動できないことによる機械的ロックと摩擦力とにより強化されたものである．二重ねじの並目ねじと細目ねじとのピッチの比は任意に設定でき，その値が m 対 n の整数比である場合，ねじ山形状は並目ねじの n ピッチごとに周期的に変化する．本報では需要が多く成形状態や加工精度を評価しやすい M12，ピッチ比 2 対 1 の二重ねじを成形対象にした．**Fig.2**(a)と(b)に代表的軸断面における理想二重ねじ山形状を示す．(a)の 0 度位置では並目ねじと細目ねじとの位相が完全に一致し，(b)の 180 度位置では両者の位相が最もずれている(細目ねじの半ピッチ分)．M12 の並目ねじの基準ピッチは JIS 規格で 1.75mm であるので，細目ねじのピッチは 0.875mm となる．

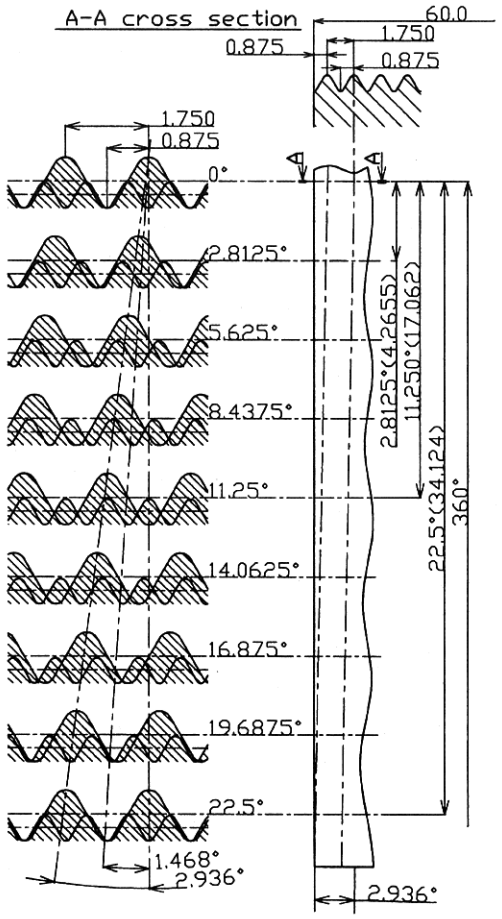


Fig.3 Groove profiles of rolling die for double screws bolt

2. 2 加工方法

二重ねじの生産コストを下げるためには，数万個単位で量産する必要があり，その量産技術は当然ながら転造加工法が最も望ましい．二重ねじの転造では並目ねじと細目ねじとが重畳したねじ山形状を同軸上に成形しなければならない．それにはいくつかの方法が考えられるが，本報では最も単純と思われる，二重ねじの周期的に変化するねじ山形状を逆転写した，**Fig.3** に示すような溝形状をもつ特殊ダイス(以後二重ねじダイスと呼ぶ)を用い，シングルねじ同様単一の転造工程により成形することとした．また，本研究では各種ねじ転造法のなかで最も加工精度が良いとされる 2 つの丸ダイスを用いるプランジ方式[9]を採用した．ダイスの大きさは転造装置の仕様に合わせ外径約 173mm としたので，図に示す形状が周期的に変化する溝はダイス外周に 22.5° おきに繰り返し現れることになる．

2. 3 実験装置および実験条件

Fig.4 に転造実験装置の加工部外観を示す．二重ねじダイスを両工具軸に取り付け，その間にボルトを支持するための支え板を設置している．二重ねじダイスの溝は非常に微細で複雑な形状をしていると同時に，通常のシングルねじダイスと異なり溝形状が周期的に変化する．このため二重ねじの加工では，2 つの丸ダイスの初期位相合わせと加工中の回転同期精度が非常に重要になる．本報では㈱ニッセー製 CNC2 ダイスプランジ式転造盤 GA-160B を使用し

た．この装置は4本支柱構造をしているため極めて高剛性であり，フィードバック制御により両工具軸の回転角度誤差は加工中常時±0.01°以内に保たれ非常に高精度であるので，二重ねじの加工には最適である．

加工条件として，工具の回転速度60rpm，工具の半径方向送り速度2mm/sec，片側工具押込み量1.02mmとした．したがってねじ一本当たりの正味の加工時間は約1秒である．転造用素材の材質はSS400材であり，素材ねじ部の初期直径は体積一定の条件から逆算して10.75mmとした．

3．実験結果及び考察

3·1　転造二重ねじ

Fig.5に転造された二重ねじの外観写真を，Fig.6(a)と(b)に転造二重ねじに二種類のナットをはめたねじ中央断面の拡大写真を各々示す．図よりねらい通りの同軸二重ねじが素材外周に成形され，パワーナットもロックナットもスムーズにねじ込むことができた．二重ねじのねじ山と二種類のナットのねじ山とは適度なあそびはあるが非常にうまく嵌合している．また，加工中切り屑やバリを発生することはなく，基本的に本報で提案した特殊ダイスを用いる転造法により二重ねじを問題なく成形できることが分かった．

Fig.7に転造成形された二重ねじと切削加工された二重ねじとの代表的円周方向位置におけるねじ山形状の比較を示す．図より各位置のねじ山高さは両者でほぼ同等であり，形状もよく一致している．しかし，切削されたものは加工中発生する切り屑やバリのため面粗度が粗い(5μmRa，12μmRy)．これに対し，転造されたものは研削加工されたダイスの面粗さがそのまま転写され，非常に滑らかで光沢のある仕上げ面となり(3μmRa，8μmRy)，細目ねじ溝もより明確に刻印されている．

3.2　二重ねじ転造成形プロセス

Fig.8に工具の半径方向押込み量0.62mm~1.02mmの間を0.1mmおきに5段階に分け(以後Step-1~Step-5と呼ぶ)，各ステップごとにねじの代表的軸断面に対応する工具溝に材料が充満していく状態の推移を示す．Step-1までは並目ねじ部のみが成形されるので，どの断面の材料も全く同様に変形している．この段階で既にねじ山頂部が凹み，フォールディングの状態が現れている．Step-2以降は各円周方向位置により溝底部の形状および断面積が異なるので，材料の変形や工具溝の充填状態も異なる．並目ねじ山と細目ねじ山との位相が一致するA断面では通常のシングルねじの場合と同様，フォールディング部が徐々に折りたたまれ，最終的には完全に潰されて溝部へ材料が充満する．位相が最もずれているC断面では，変形が進行するとフォールディング部中央の最も凹んだ部分が工具溝底部の突起先端と接触し，その後は材料がその突起を包み込むように工具溝の隙間に充満する．このため他の断面と比較して変形状態は最もスムーズである．また，この断面では材料の充填率が最も早く100%に達し，既にStep-4でほぼ成形が完了している．A断面とC断面の中間に位置するB断面では，まずフォールディングした材料左端の盛り上がり部が工具の浅い方の溝底部を完全に埋め，その後は材料右端の盛り上がりが工具溝底部の突起を包み込みように変形し，深い方の溝が完全に充満する．D断面でも左右は反対になるがB

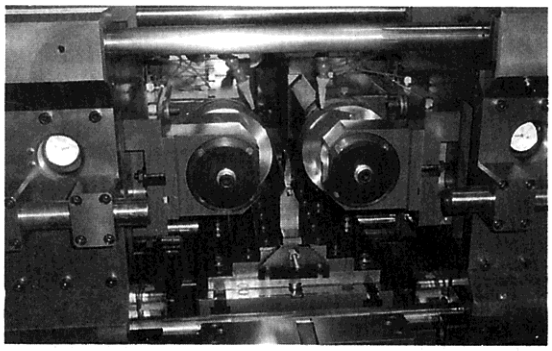


Fig.4 Appearance of experimental apparatus

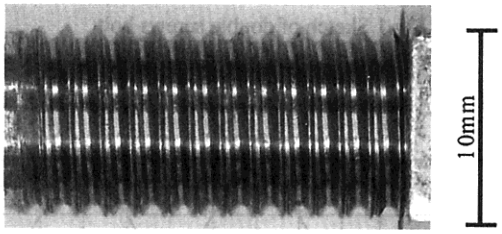


Fig.5 Appearance of the rolled double screws bolt

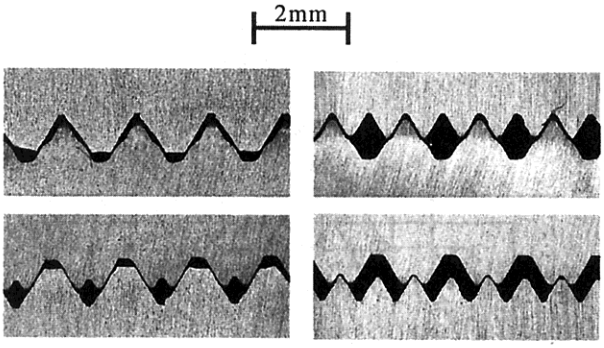


Fig.6 Contact state between double screws bolt and two kinds of nuts

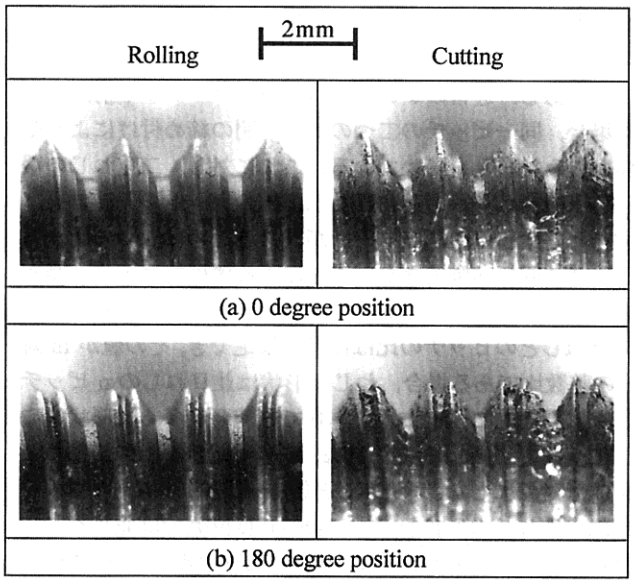


Fig.7 Comparison of thread appearance between rolled double screws bolt and cutting double screws bolt

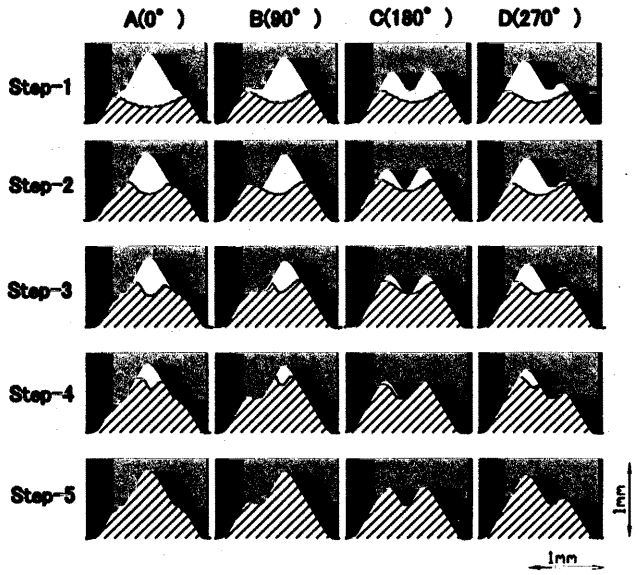
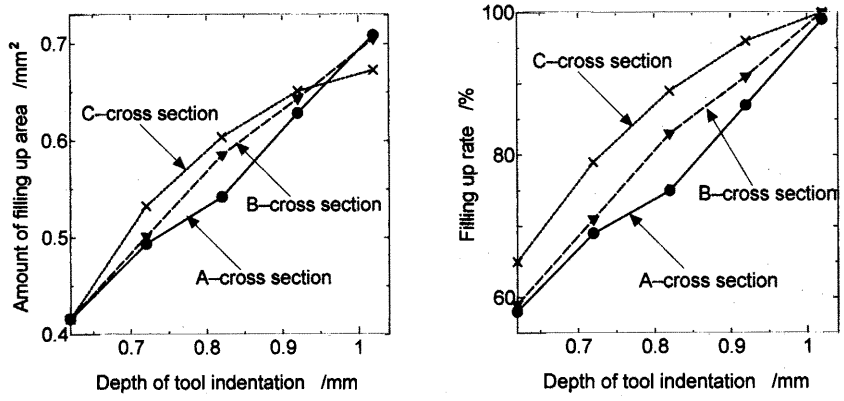
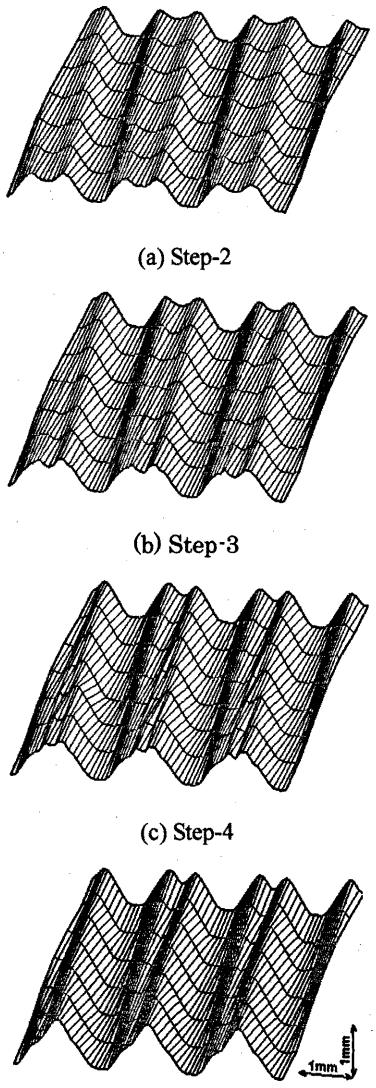


Fig.8 Comparison of filling up state of material in each cross section of die groove



(a) Filling up area (b) Filling up rate

Fig.9 Relationship between depth of tool indentation and filling up conditions of die groove



(a) Step-2

(b) Step-3

(c) Step-4

(d) Step-5

Fig.10 3D deformation behavior

断面と同様の変形状態が観察される.

さて，二重ねじ工具は円周方向位置により溝形状が周期的に変化し，それに伴い断面積も連続的に変化するので，特に細目ねじ部が成形される Step-2 以降の変形段階では各断面位置における材料の充填量や充填率(=充填量/工具溝横断面積)が異なる. Fig.9(a)および(b)に Step-1 以降の各断面の工具押込み量と材料の充填量および充填率の関係を各々示す. (a)より材料充填量は Step-1～Step-4 までは C 断面が最も多く，B 断面から A 断面に移行するにしたがい減少している. これは A 断面や B 断面では並目ねじ部と細目ねじ部との境界部に段差があり，これが抵抗となるためである. ところが，C 断面では工具押込み量の増加とともに充填速度が徐々に減少し，充填率が 95%を越える Step-4 以降は Fig.8 に示すように隙間面積が著しく小さくなるため，充填量や充填率の勾配が急に小さくなる. 最終充填率はほぼ 100%に達している. 一方，A 断面では Step-3 を過ぎる辺りから充填量や充填率の勾配が急に大きくなる. この断面は他に比べ面積が最も大きく，このため最終充填率は約 98%である. これらに対し B 断面では充填量も充填率も工具押込み量に比例してほぼ直線的に増加し，最終充填率はほぼ 100%に達している.

以上のように各断面における材料の充填状態に差異があるということは，二重ねじの転造工程ではシングルねじの場合と異なり，加工中円周方向への材料流動が発生していると考えられる. このことを確かめるために，各変形ステップごとに A 断面から C 断面までの半周分のねじ山形状を三次元的に平面展開し，それらを比較して材料の変形状態の推移を調べた. 結果を Fig.10(a)~(d)に示す. これらの図より，特に Step-4 から Step-5 の加工の最終段階で，並目ねじと細目ねじの位相が最もよく一致する領域近傍のねじ山頭頂部の材料が急激に盛り上がり，フォールディング部が潰され，全体として理想的な二重ねじ山が成形されていることが分かる. つまり，Step-4 でほぼ加工が終了した C 断面から A 断面へ向かう方向へ材料が流動し，結果的に各円周方向位置で形状の異なる二重ねじ山が材料の過不足を生じることなくうまく成形されるのである.

3.3 緩み試験

転造二重ねじおよび市販のシングルねじについて緩み試

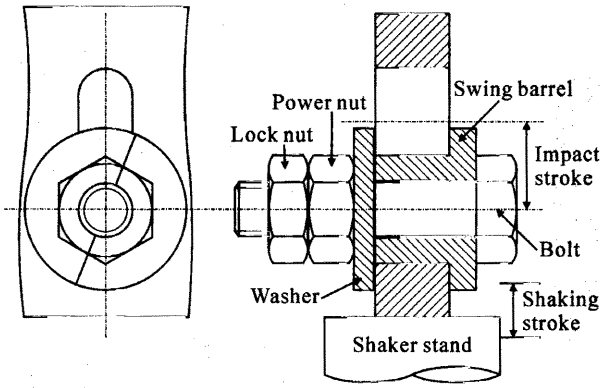


Fig.11 Schema of vibration loosening test apparatus

Table 1 Results of vibration loosening tests

Specification of screws	Fastening torque [Nm]		Test results
	Power nut	Lock nut	
Single screw bolt with single nut	50	—	Loosen for 25 seconds
Single screw bolt with double nuts	50	50	Loosen for 45 seconds
Double screw bolt with double nuts	50	30	Not loosen for 17 minutes

験を実施し，緩み止め性能の比較評価を行った．試験の形式は **Fig.11** に示す米国航空規格 NAS3354[10]に規定された衝撃緩み加振式である．この試験では，ボルトとナットとの締結体試験片を縦長の穴に置き，振動台上で上下に加振し，試験片が横穴の上下に打ち当たることにより衝撃力を加える．振動数 1,780cpm，加振台ストローク 11mm，インパクトストローク 19 mm とし，30,000 回(約 17 分間)上下に打ち当てた後取り出し，締結体の緩みと傷の有無を調べた．但し，試験中視認的に緩みが生じたと判明した場合には直ちに装置を停止した．試験条件と結果を **Table 1** に示す．ナットの締め付けトルクは，ボルトとナットとが理想的に嵌合した状態における両者の幾何学的接触状態から導出した式[8]により算出した．表よりシングルねじはダブルナット構造にした場合でも 1 分足らずで緩んでいる．これに対し，二重ねじは規定の時間緩まず，さらに試験時間を延長し9時間30分(約 10^6回上下に打ち当てる)試験を続けても緩まず，傷や損傷も無かった．以上の結果より，転造二重ねじの卓越した緩み止め性能を実証できた．

3.4 動的強度

Table 2 に示す加工プロセスの異なる 3 種類の二重ねじについて軸力疲労試験による動的強度評価を行った．いずれのねじも M12 で材質は SS400 相当材である．試験は島津サーボパルサーEHF10 を使用し，平均応力 230MPa，周波数 10Hz の条件で行い，2×10^6回繰り返しに耐える最大応力を疲労限度とした．ここで負荷応力はねじ部の最小断面(ϕd=9.6mm)における公称応力で計算した．表より，並目も細目も切削により加工した二重ねじ CD の疲労限度

Table 2 Processing conditions of screw specimens and comparison of dynamic stress strength

Screw Specimens [M12]	Processing conditions		Stress amplitude [MPa]
	First pitch	Second pitch	
CD	Cutting	Cutting	49
RCD	Rolling	Cutting	100
RD	Rolling	Rolling	100

は 49MPa であり，一般的な鋼ボルトの疲労限度 50MPa[1]と比較して向上は見られない．一方，並目を転造により，細目を切削により加工した二重ねじ RCD，および単一の転造工程により加工した二重ねじ RD の疲労限度は 100MPa であり，CD と比較して約 100%の大幅な疲労限度の向上を得た．このように並目ねじ部を転造により加工した二重ねじが動的強度の著しい性能向上を得た理由は，材料組織の繊維流動が生じたこと，および材料の加工硬化や圧縮残留応力の影響が相乗的に加わったためである．

尚，本研究は九州経済産業局地域新生コンソーシアム研究開発事業の援助を受けた．深くお礼申し上げる．

4. 結　言

(1) 二重ねじの周期的に変化するねじ山形状を逆転写した溝形状をもつ特殊ダイスを用いることにより，単一の工程で同軸二重ねじを成形することができる．
(2) 転造二重ねじは切削二重ねじに比べ面粗度が滑らかで，細目ねじ溝も明確に刻印される．
(3) 転造中円周方向に材料が流れることにより，円周方向の各位置で形状の異なる二重ねじ山が材料の過不足を生じることなく成形される．
(4) 転造二重ねじは米国航空規格 NAS3354 に基づく衝撃緩み試験でも緩まず卓越した緩み止め性能をもつ．
(5) 軸力疲労試験による動的強度評価から，転造二重ねじは切削二重ねじと比較して約 100%の大幅な疲労限度の向上を得る．

参 考 文 献

1) 西田新一：機械・構造物の破損解析と対策，(1986)，80-85，99-117 日刊工業新聞社．
2) 北郷薫：機論，30-215 (1964)，934-939．
3) 古賀一夫：機論，35-273 (1969)，1104-1111．
4) 山本晃：機誌，81-716 (1978)，617-622．
5) 神宮利夫：機論 A，61-586 (1995)，1398-1403．
6) 宮田忠治:機論 C，51-467 (1985)，1833-1837．
7) 佐瀬直樹，西岡輝，古賀進一，藤井洋：機論 C，62-597(1996)，1963-1968．
8) 名川政人・野田尚昭・山田真裕・市原寛之・西田新一・竹増光家：機械設計，47-10 (2003)，50-56．
9) 葉山益次郎：回転塑性加工，(1981)，79-81，近代編集社．
10) 例えば精密工学会組立データバンク分科会：組付け要素技術マニュアル，(1989)，125，日刊工業新聞社．