

# 三次元有限要素法による傾斜ねじナットの弾塑性解析

西山修二，清水功史  
右田博章\*1，片岡光正\*1

## Elasto-Plastic Analysis of Screw Inclined Nut by Three-dimensional Finite Element Method

Shuji NISHIYAMA, Kohshi SHIMIZU  
Hiroaki MIGITA and Mitumasa KATAOKA

Bolted joints are widely used in mechanical structures since the disassembly for maintenance is easy without high cost. However, vibration induced loosening due to dynamic loading has been unsolved subject for a long time. We have developed a new type of nut named 'Screw Inclined nut (SIN)', which realizes anti-loosening performance without complicated tightening process and tool. In this study, we have investigated the mechanisms of bolted joint with SIN, and tightening behavior are analyzed by mean of three-dimensional finite element method. Results are compared with the experimental results for SIN. Good qualitative agreement is observed between analytical results and experiments with respect to tightening force, tightening torque and stress. We found some new aspects and superior points for bolted-joint with SIN than that of standard nuts. It is found that tightening torque of SIN is higher than that of standard. It is also found that the anti-loosening performance can be realized by the thread contact force at the slit region and angular facing on bearing surface. Moreover, it is concluded that SIN involves sufficient strength in practical use.

**Key Words:** Finite Element Method, Machine Element, Bolted Joint, Fracture Mechanics, Elasto-Plastic Analysis

ボルト締結体は維持やメンテナンスに高いコストを必要とせず，また操作が簡単のために，機械構造物に広く使用されている．しかしながら，動的な荷重のために引き起こされるねじの弛みは，いまだに解決されていない．我々はゆるみ止め性能が期待される新しいタイプの傾斜ねじナットを開発した．本報では，傾斜ねじナットのゆるみ止めのメカニズムについて三次元有限要素法を適用して解析的に明らかにした．解析結果から JIS 標準ナットより弛み止め性能が優れていることが明らかとなった．

キーワード：機械要素，ボルト締結体，構造力学，傾斜ねじ

### 1. はじめに

機械や構造物を組み立てる際に使用される結合法の一つであるボルト締結は，取り付けや取り外しの容易さ，価格の安さなどの面から幅広く使用されている．

しかし，ボルト締結体に衝撃や振動，あるいは熱負荷などの動的な外力が作用すると，ナットはしばしば戻り回転を開始し，ボルト締結体は締結力を失い，締結部はその機能をはたさなくなる．

現在に至ってもなお産業界において，ボルト・ナ

ットのゆるみに起因する事故が多く発生している．ボルト・ナットによる締結体のゆるみの問題は工学分野において解決すべき重要な課題の一つである．

ボルト締結体のゆるみの問題を解決する一つの方法として，新しいゆるみ止め機構を備えていることが期待される傾斜ねじナット (Screw Inclined Nut:以下 SIN と略記する) を開発した．

傾斜ねじナット(SIN)は図1に示すとおり，1種六角ナットと同等の形状を有し，かつ締付けの際に複雑な工具や手順を要しないことを特徴とする．

\*1(株)エコーワールド(〒733-0003 広島市西区三篠町6-9)

傾斜ねじナット(SIN)は、ゆるみ止め性能を有するナットである。傾斜ねじナット(SIN)は1種六角ナットに図のような平行なスリットを加工して作成する。スリットの位置はナット座面とは反対側のナット上面に近い位置に設けられている。さらに、ナットねじ部の軸心は所定角度(1°~6°)に傾斜して加工してある。

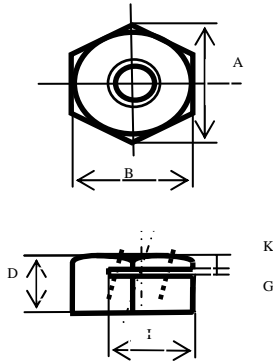
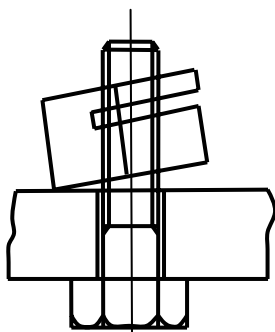


図1 傾斜ねじナットの形状

図2(a)は、傾斜ねじナット(SIN)の実物写真を示す。図2(b)は、取り付け初期の状態を示す。表1は、M16の場合の傾斜ねじナット(SIN)の外径寸法を示す



(a) 傾斜ねじナットの実物写真



(b)取り付け初期の状態

図2 傾斜ねじナット

表1 傾斜ねじナット(SIN)の外径寸法

d	A	B	D	G	K	P
M16	27.7	24.0	16.0	1.2	4.4	2

d: ねじの呼び径 A: 対角寸法 (mm) B: 平行面間距離 (mm) D: ナット高さ (mm) G: スリット幅 (mm) I: スリット部の深さ (mm) K: スリットからナット上面までの長さ (mm) P: ピッチ (mm)

傾斜ねじナット(SIN)は、傾斜ねじにより締付け初期に座面に傾斜角度が発生し、締付け軸力が増加するに従い、はめあいねじ部に大きな接触力を発生させ、さらにスリットの変形によりゆるみ防止効果を発揮することが期待される。

本報では、三次元有限要素法を適用して、傾斜ねじナット(SIN)を使用したボルト締結体の性能を解析的に評価する。評価する性能として、締付け時のトルク管理に不可欠な締付け回転角と軸力および締付けトルクの関係およびねじ各部の応力解析を行う。

## 2. 解析

2.1 傾斜ねじナットのモデル化 傾斜ねじナットのゆるみ防止メカニズムを三次元有限要素法を用いて解析する。解析ソフトとして ADINA 8.0 を使用する。解析はナット回転角法による弾塑性締付けをモデル化し、実施する。ボルトの遊びねじ部は5山、グリップ長さを80mm、被締結物は剛体と仮定し、ボルト座面と被締結物は固着とする。ねじ寸法は6H/6gの公差域内の呼び径M16のメートル並目ねじとする。解析においては、傾斜ねじの所定角度は1°とする。要素は一次元四面体要素を用い、ねじ面接触部およびナット座面の部分は締付けトルクを精度よく解析するために要素を密に分割する。ナット座面、ねじ面、被締結物接触面には接触要素を設定する。

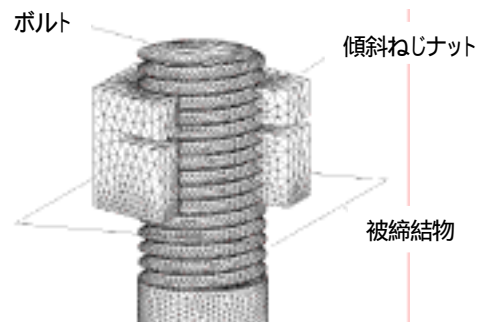


図3 傾斜ねじナット(SIN)の三次元有限要素モデル

解析に用いた材料物性値として、ボルト・ナットの縦弾性係数は200GPaとする。また、ボルト・ナットのポアソン比は0.3とする。ボルトの強度区分は10.9、ナットを8とする。初期降伏応力はボルトを790MPa、ナットを790MPaとする。塑性則は線形硬化弾塑性体とし、塑性の接線係数はボルト・ナット共に2700MPaとする。

解析の種類は材料非線形、幾何学的非線形を考慮した弾塑性解析を行う。接触面における摩擦係数は0.15とし、締付け過程において摩擦係数は変化しないものと仮定する。

2.2 傾斜ねじナットの解析条件 解析諸元は表2に示す。さらに、システムの詳細設定は、文献(1)に示すように設定した。また、HRNの三次元有限要素モデルのノード数は18888、また要素数は86611である。解析はナット回転角を0.1°毎に計算を進めていき、150°まで進める。計算結果は1°おきに出力する。CPUはPentium 4, 2.4GHzのコンピュータを使用して計算時間は48時間である。

表2 解析諸元

元	値
ねじの種類	メートル並目ねじ
ねじの呼び径	M16
ねじの公差	6H/6g
モデルの要素	一次元四面体要素
被締結物接触面	接触要素
ボルト・ナットの縦弾性係数	200GPa
ボルト・ナットのポアソン比	0.3
ボルトの強度区分	10.9
ナットの強度区分	8.8
ボルトの初期降伏応力	790MPa
ナットの初期降伏応力	790MPa
解析の種類	弾塑性解析
接触面における摩擦係数	0.15

### 3. 解析結果

#### 3.1 回転角と締付け軸力および締付けトルクの関係

図4~6は計算結果を示す。図4はナット回転角と締付け軸力の関係を示す。横軸は回転角、縦軸は締付け軸力を示す。図において太い実線はSIN、細線JIS標準ナットの場合の解析結果を示す。

傾斜ねじナット(SIN)は、回転角が約10°くらいまでは軸力は発生しない。これは、ナットのねじ部が所定角度1°傾斜しているために、締付けの初期において、ナット座面が傾斜していることによる。回転角が11°から49°くらいまでは、ゆるやかではあるが、

軸力が発生する。この区間の単位角度あたりの軸力の増加率は34.6kgf/degである。回転角が50°以上になると勾配が急に大きくなる。

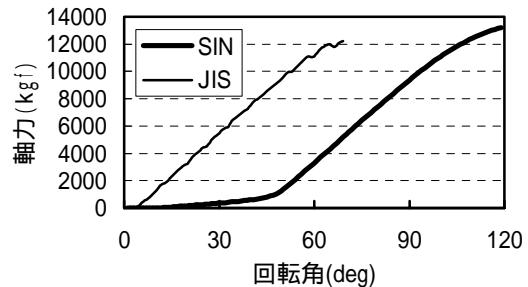


図4 軸力と回転角の関係

これは、傾斜ねじナットの座面が、回転角が50°に達すると、ナットの座面が完全に被締結物に着座することによるものと思われる。

一方、JIS標準ナットはナット回転が7°くらいから軸力が一様に増加する。回転角が67°くらいまでは締付けトルクは一様に増加する傾向を示す。

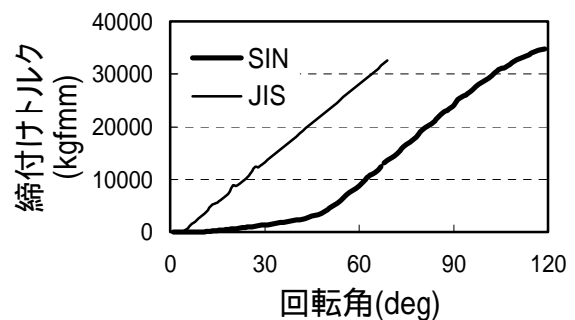


図5 締付けトルクと回転角の関係

図5は、ナット回転角と締付けトルクの関係を示す。図において、太い実線がSIN、細線がJIS標準ナットの場合を示す。横軸は回転角、縦軸は締付けトルクを示す。回転角と締付けトルクの関係も、図3(回転角と締付け軸力の場合)と同様の特性を示す。回転角が約10°くらいまでは締付けトルクは発生しない。これは、ナットのねじ部軸心が1°傾斜しているために、締付けの初期において、ナット座面が傾斜していることによるものと思われる。ナットが回転して回転角が11°をすぎるくらいから46°くらいまでは、ゆるやかではあるが、締付けトルクが発生する。この区間の単位角度あたりのトルクの増加率94.2kgfmm/deg

である。回転角が 46° 以上になると勾配が急に大きくなる。これは、傾斜ねじナットの座面が、回転角が 46° に達すると、ナットの座面が完全に被締結物に着座することによるものと思われる。

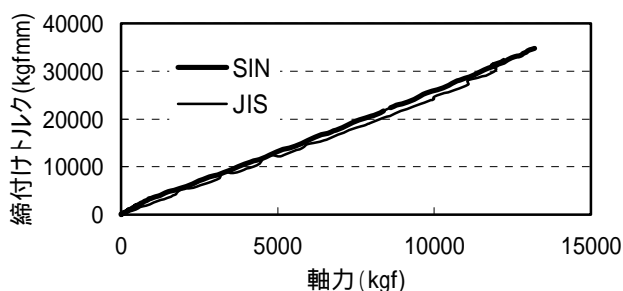


図6 軸力と締付けトルクの関係

図6は軸力と締付けトルクの関係を示す。横軸は軸力、縦軸は締付けトルクを示す。軸力が増加すると、締付けトルクも一様に増加する。図において、太い実線がSIN、細線がJIS標準ナットの場合を示す。

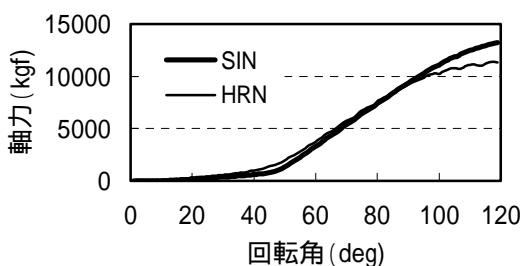


図7 軸力と回転角の関係

図7~8はハイパーロックナットと傾斜ねじナットの比較を示す。

図7は回転角と軸力との関係を比較している。回転角が 86° くらいまでは、ハイパーロックナットが傾斜ねじナットより軸力が大きくなるが、86° 以降では傾斜ねじナットの方が大きくなる。

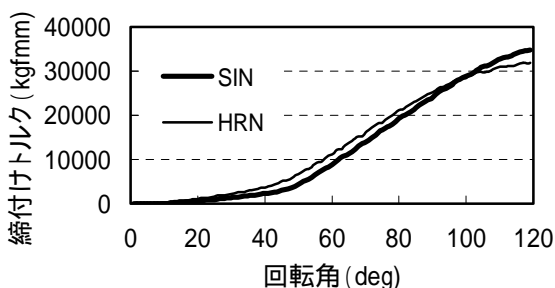


図8 締付けトルクと回転角の関係

図8は回転角と締付けトルクとの関係を比較している。回転角が 100° くらいまでは、ハイパーロックナットが傾斜ねじナットより締付けトルクが大きくなる。100° 以降では傾斜ねじナットの方が大きくなる特性を示す。

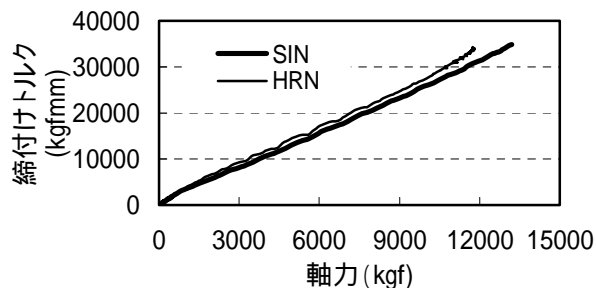


図9 締付けトルクと軸力との関係

図9は、軸力と締付けトルクとの関係をSINとHRNで比較している。軸力が全ての帯域において、ハイパーロックナットが傾斜ねじナットより締付けトルクが大きくなる特性を示す。

ハイパーロックナットは軸力の最終段階においてスリットの効果により、締付けトルクがやや上昇する特性を示すが、傾斜ねじナットにおいては、スリットによる締付けトルクが上昇する顕著な傾向は見受けられないようである。

軸力が 3000kgf で締付けトルクはHRNの方が 1030kgfmm(34.3%)大きい。軸力が 6000kgf で 1172kgfmm(19.5%)、9000kgf で 1283kgfmm(14.2%)、12000kgf で締付けトルクはHRNの方が 535kgfmm(21.2%)大きい。

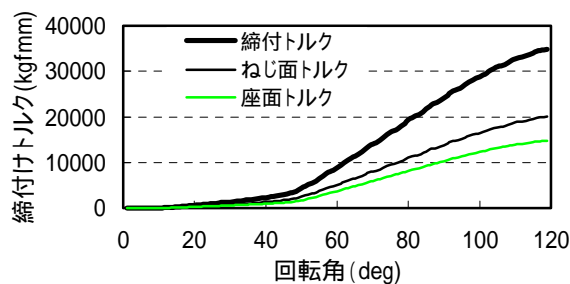


図10 締付けトルクと回転角の関係

図10は傾斜ねじナットの締付けトルクと回転角の解析結果を示す。横軸はナットの回転角、縦軸は締付けトルクを示す。締付けトルクは座面トルクとねじ面トルク、リード角トルクの和となる。

3.2 傾斜ねじナットの応力評価 図 11～16  
 は、傾斜ねじナット、HRN および JIS 標準ナットの場合についての計算結果を示す。軸力が 50kN および 100kN の場合の応力分布を示す。図における、カラー  
 スケールの単位は  $\text{kgf}/\text{mm}^2$  である。

図 11 は、軸力が 50kN の場合の SIN の応力解析の計算結果を示す。スリットの反対側のボルト表面近傍に  $65 \text{ kgf}/\text{mm}^2$  の応力が発生している。

図 12 は、軸力 100kN の場合についての、SIN の応力解析の計算結果を示す。軸力が 100kN になると、 $85 \text{ kgf}/\text{mm}^2$  の応力がかなり広範囲に発生する。スリット近傍の応力値は上昇せず、スリットがあることによって、構造的に強度が低下することはないようである。

図 13 は、軸力が 50kN の場合の HRN の応力解析の計算結果を示す。スリットの反対側のボルト表面近傍に  $65 \text{ kgf}/\text{mm}^2$  の応力が発生している。

図 14 は、軸力 100kN の場合についての、HRN の応力解析の計算結果を示す。軸力が 100kN になると、 $85 \text{ kgf}/\text{mm}^2$  の応力がかなり広範囲に発生する。スリット近傍の応力値は上昇せず、スリットがあることによって、構造的に強度が低下することはないようである。

図 15、図 16 は、軸力が 50kN の場合および 100kN の場合について、JIS 標準ナットの応力解析の計算結果を示す。JIS 標準ナットの場合は軸心を中心として対称に応力が発生している様子がうかがわれる。軸力が 100kN の場合について、SIN、HRN、JIS 標準ナットの応力分布を比較してみると、HRN のスリット側の応力分布は JIS 標準ナットの場合と大差はないが、スリットとは反対側はやや大きく応力が発生している様子がうかがわれる。

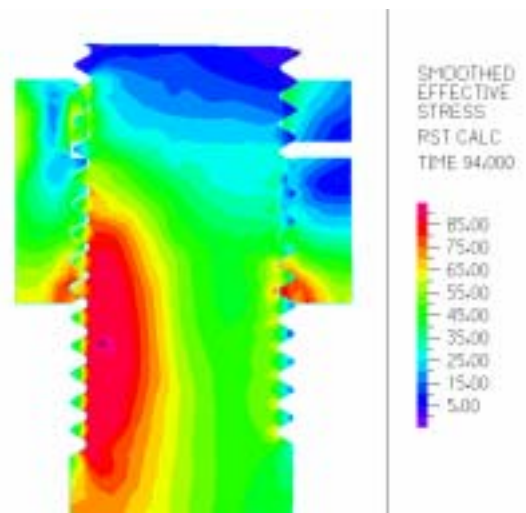


図 12 SIN の応力解析（軸力 100kN の場合）

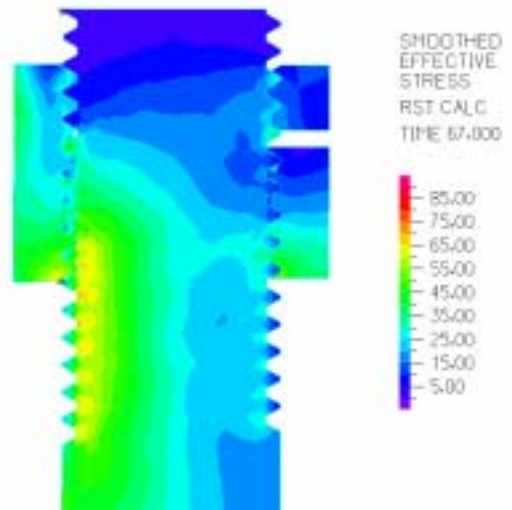


図 13 HRN の応力解析（軸力 50kN の場合）

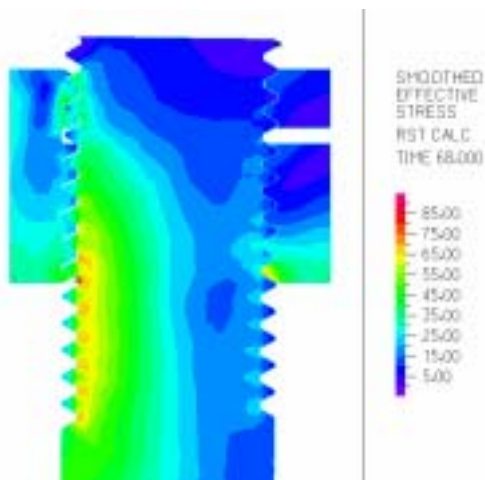


図 11 SIN の応力解析（軸力 50kN の場合）

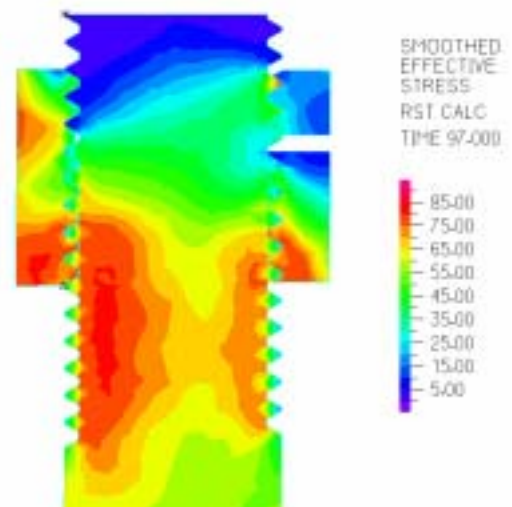


図 14 HRN の応力解析（軸力 100kN の場合）

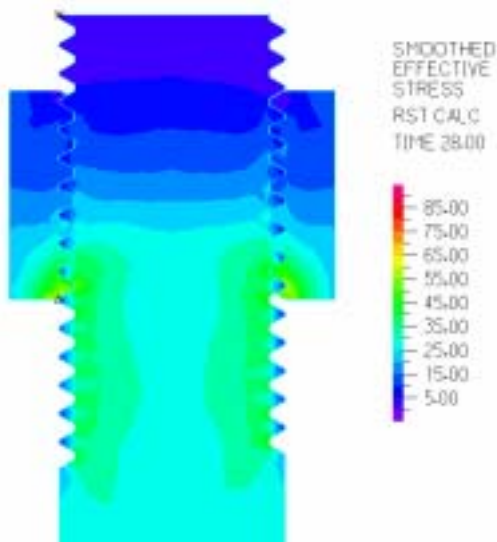
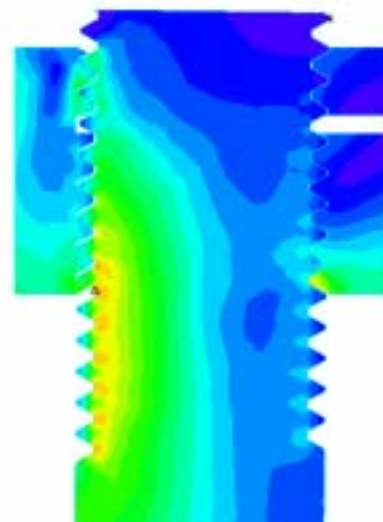


図 15 JIS 標準ナットの応力解析  
(軸力 50kN の場合)



(a)SIN

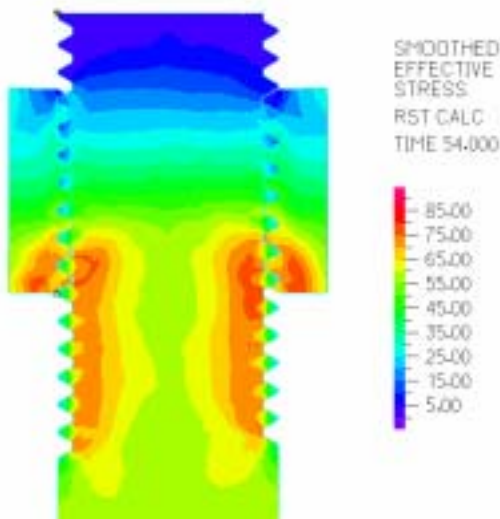
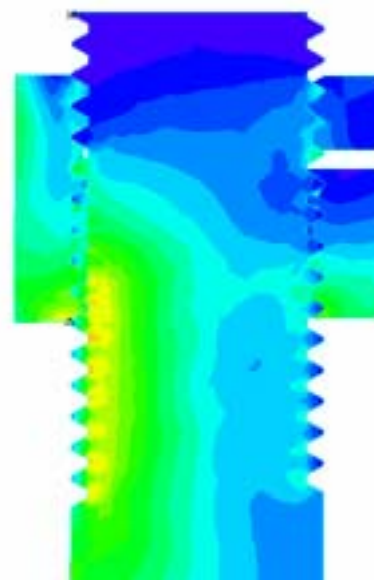
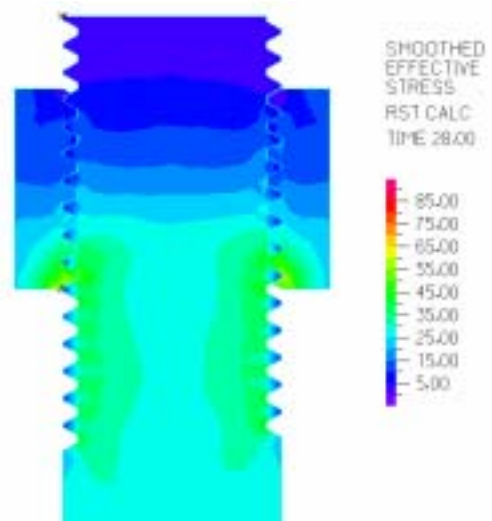


図 16 JIS 標準ナットの応力解析  
(軸力 100kN の場合)



(b)HRN

図 17~18 は、SIN、HRN、JIS について応力分布の比較を示す。図 16 は軸力が 50kN の場合、図 17 は軸力が 100kN の場合をそれぞれ示す。JIS 標準ナットでは応力分布は左右対称に発生するが、SIN および HRN では、スリットとは反対側に高い応力が偏在する非対称の分布となる。SIN と HRN を比較すると、HRN はスリットとは反対側のナットおよびスリット側のボルトに高い応力が発生しているが、SIN ではこの様な傾向は見受けられない。



(c)JIS

図 17 応力分布の比較 (軸力 50kN の場合)

#### 4. 考察

ボルトとナットはその構造にゆるみ防止構造も持っている。ボルトもナットも締結座面と、おねじとめねじの接合面との二つの面がゆるみ防止構造である。ゆるみ防止能力は二つの面の摩擦力と摩擦中心の半径との積である。座面の摩擦力は軸力と摩擦係数の積であり、ねじ面の摩擦力は軸力のねじ面垂直分力とねじ面摩擦係数との積である。従って、摩擦係数の大きいボルト・ナットや座面半径の大きいボルト・ナットはゆるみにくい。傾斜ねじナットの傾斜ねじおよびスリットのゆるみ止め機構について考察する。

4.1 SINの傾斜ねじによるゆるみ止め機構 SINの傾斜ねじはねじ山の嵌合がおねじとめねじのフランク面での接合だけでなく、おねじ山頂部とめねじ谷底の接合をももたらす特徴がある。SINとボルトの締結初期はナットの回転によって座面の一部が着座すると、ボルト軸力が生じ、ナットの回転角の増加に比例して軸力も増加すると共に着座面積が増加する。この時、座面が密着する課程で座面傾斜角があるためにSINは回転中心線がボルトの中心線から変位しながら回転し、かつボルトを曲げる。SINではナット中心が偏心してくるので、傾斜側のおねじ山頂とめねじ谷が噛み合いながら、フランク面が接合している。この現象をトルクの値で考えると、SINのフランク面接触での摩擦力はJIS標準ナットでのフランク面の摩擦力にほぼ等しいが、これに加えて、おねじの半周側において、おねじ山頂での接触はおねじのねじ山が楔の形でめねじの谷に食い込むので、山頂の楔接合の摩擦力とおねじ半径の積としてのトルクが発生する。このため傾斜座面を有するナットはJIS標準ナットよりも高いトルクをもたらす。傾斜座面が全面密着した後も、軸力の増加によりボルトの傾きは増加するので楔接合は強くなる。傾斜座面は、ねじ山の干渉を増し、摩擦力を増加させる機能を有する。

4.2 SINのスリットによるゆるみ止め機構 スリットの機能はスリットが狭小になるとき、めねじの総合ねじピッチが崩れてくることにより、正常なフランク面接合のみならず、背面での接合が生じる事である。ナットの各ねじ山に生じる軸力の負担は座面から近いねじ山が大きく、ナット高さ方向に移るほど軽減する。スリットより上側のナットねじ山が負担する軸力で、スリットの幅は弾性的に狭小に変位する。傾斜座面があるのでナットの中心線はスリット側に変位するから、おねじとめねじの嵌合はスリット側で楔形に食い込み、スリットの反対側ではフランク面のおねじとめねじ間の隙間が増加する。この時にスリットが狭小になれば

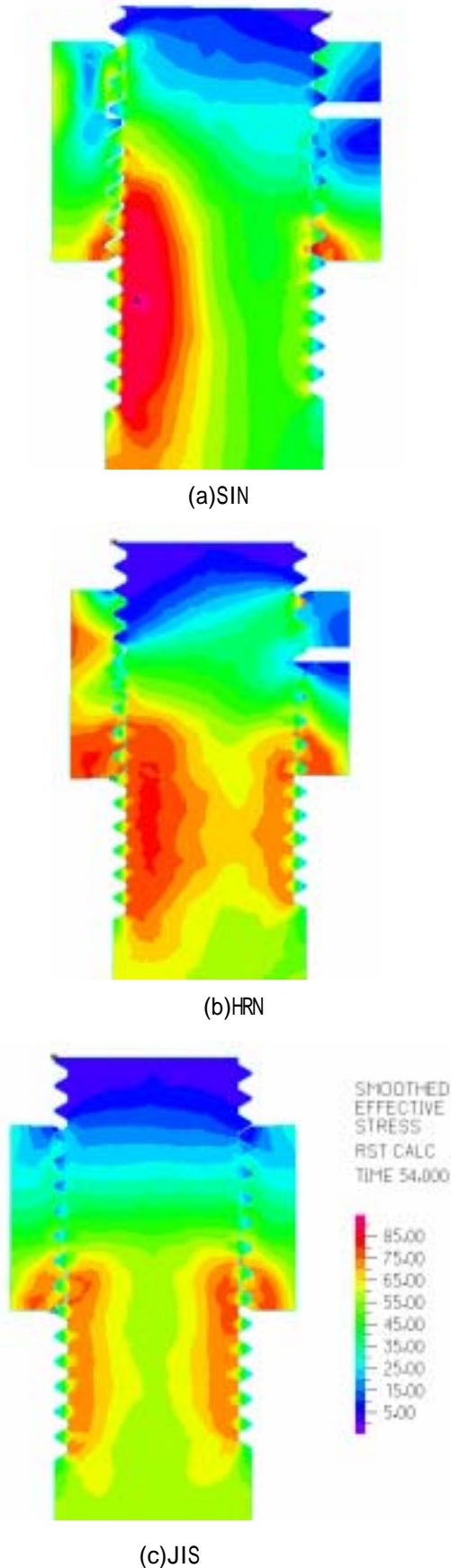


図 18 応力分布の比較  
(軸力 100kN の場合)

背面側フランク面のおねじとめねじの間隙が減少し、更に狭小になればスリットの上のめねじ山はボルトおねじの上面と接触し、おねじ山を挟みつける。

傾斜ねじの所定角度が $1^\circ$ の場合はスリットによるゆるみ止め効果が顕著に見受けられなかった。

#### 5. おわりに

複雑な締付け手順や工具等を必要としない、ゆるみ防止機能を有する傾斜ねじナットを三次元有限要素法により理論的に解析した。本研究により得られた結果をまとめると次のとおりである。

- (1) 三次元有限要素を適用して開発したナットの解析を実施した。解析結果を理論値等と比較し、解析に用いたモデル化および解析結果の妥当性が確認できた。
- (2) 締付けトルクに及ぼすナット回転角の影響を明らかにした。計算結果から、傾斜ねじナットはナット回転角が $10^\circ$ くらいまでは、締付けトルクが発生しない。 $11^\circ$ を過ぎたくらいから徐々に締付けトルクが発生し、 $49^\circ$ くらいまで同じ勾配で増加する。 $50^\circ$ を過ぎたくらいから、JIS標準ナットと同様に急激に増加する特性を示す。

(3) 傾斜ねじナットはハイパーロックナットに比較して軸力の全帯域において、1000 から 2500kgfmm 程度の低い締付けトルクを有している。

(4) 傾斜ねじナット、ハイパーロックナット、JIS標準ナットの応力分布について比較した。傾斜ねじナットは、ハイパーロックナットに比較して、ナットおよびボルトに及ぼす応力が緩和される。

(5) 傾斜ねじナットのゆるみ止め機能は、傾斜ねじ部の役割が大きく、ハイパーロックナットに見られるように軸力が大きくなると、スリット部が変形してねじ山の接触力を増大させる効果は顕著に見受けられない。

#### 参考文献

- (1) 西山修二，ゆるみ防止機能を有するハイパーロックナットに関する研究，平成 17 年度経済産業省中小企業ベンチャー挑戦支援事業研究報告，2006 年 3 月。
- (2) 工業所有権，ゆるみ止めナット，特願 2006-143929。