

# 卒業論文

三次元有限要素法による  
ナイロンナットのゆるみ止め性能解析  
1P ~ 51P完

平成 18 年 2 月 3 日提出  
指導教員 泉 聡志 助教授  
40204 柴田 裕之

# 目次

<b>第1章</b>	<b>序論</b>	5
1.1	研究の背景	5
1.2	本研究の目的	6
1.3	本論文の構成	6
<b>第2章</b>	<b>完全座面すべりに対するナイロンナットの性能評価</b>	7
2.1	緒言	7
2.2	完全座面すべりについて	8
2.3	有限要素法解析手法	11
2.4	解析結果	15
2.5	考察	17
2.5.1	通常のナットとナイロンナットの違い	17
2.5.2	常温と高温のナイロンねじ部の挙動	19
2.6	結言	21
<b>第3章</b>	<b>微小座面すべりに対するナイロンナットの性能評価</b>	22
3.1	緒言	22
3.2	微小座面すべりについて	23
3.3	有限要素法解析手法	26
3.4	解析結果	28
3.5	考察	34
3.6	結言	37
<b>第4章</b>	<b>高温状況下長時間使用におけるナイロンナットの性能評価</b>	38
4.1	緒言	38
4.2	クリープについて	39
4.3	M48 ナイロンナットクリープ解析	41
4.3.1	有限要素法解析手法	41
4.3.2	解析結果	42
4.4	M10 ナイロンナットクリープ解析	44
4.4.1	有限要素法解析手法	44
4.4.2	解析結果	45
4.5	考察	47
4.6	結言	48
<b>第5章</b>	<b>結言</b>	49
5.1	本研究の結言	49

# 目次

図 2-1	横山による有限要素法ボルトナット締結モデル	8
図 2-2	ヒステリシスループとボルトの接触状態	9
図 2-3	ゆるみ角度とボルトの接触状態	10
図 2-4	ボルト・ナット締結モデルの断面図(通常のナット)	13
図 2-5	ボルト・ナット締結モデルの拘束条件(通常のナット)	13
図 2-6	ボルト・ナット締結モデルの断面図(ナイロンナット)	14
図 2-7	ボルト・ナット締結モデルの拘束条件(ナイロンナット)	14
図 2-8	ナットのゆるみ角度の比較	15
図 2-9	ボルトのねじれの比較	16
図 2-10	ヒステリシスループの比較	16
図 2-11	ゆるみ角度の差の比較(初期 1/4 サイクル)	17
図 2-12	0.13 サイクル目のねじ面・座面の接触状態の比較	18
図 2-13	0.07 サイクル目のねじ面・座面の接触状態の比較	18
図 2-14	0.25 サイクル目のねじ面・座面の接触状態の比較	18
図 2-15	常温ナイロンナットのナイロン部圧力側ねじ面のすべり距離	19
図 2-16	常温ナイロンナットのナイロン部非圧力側ねじ面のすべり距離	19
図 2-17	高温ナイロンの圧力側ねじ面のすべり距離	20
図 2-18	高温ナイロンの非圧力側ねじ面のすべり距離	20
図 3-1	木村による有限要素法ボルト・ナット締結モデル	23
図 3-2	賀勢らによる実験結果	24
図 3-3	ゆるみ角度の比較	24
図 3-4	ボルト・ナット締結モデルの拘束条件	26
図 3-5	ボルト・ナット締結モデルの断面図(通常のナット)	27
図 3-6	ボルト・ナット締結モデルの拘束条件(通常のナット)	28
図 3-7	ボルト・ナット締結モデルの拘束条件(ナイロンナット)	28
図 3-8	ナットのゆるみ角度の比較(300N)	29
図 3-9	ボルトのねじれ角度の比較(300N)	29
図 3-10	相対回転角度(300N)	29
図 3-11	ナットのゆるみ角度の比較(500N)	30
図 3-12	ボルトのねじれ角度の比較(500N)	30
図 3-13	相対回転角度(500N)	30

図 3-14	ナットのゆるみ角度の比較 (600N) .....	31
図 3-15	ボルトのねじれ角度の比較 (600N) .....	31
図 3-16	相対回転角度 (600N) .....	31
図 3-17	ナットのゆるみ角度の比較 (900N) .....	32
図 3-18	ボルトのねじれ角度の比較 (900N) .....	32
図 3-19	相対回転角度 (900N) .....	32
図 3-20	通常のナットの相対回転角度 (300N) .....	33
図 3-21	通常のナットの相対回転角度 (500N) .....	33
図 3-22	通常のナットの相対回転角度 (600N) .....	33
図 3-23	相対回転速度 .....	34
図 3-24	300N 時の接触状態の比較 .....	35
図 3-25	600N 時の接触状態の比較 .....	35
図 3-26	相対回転角度の比較 (500N) .....	36
図 3-27	相対回転角度の比較 (600N) .....	36
図 4-1	クリープ曲線 .....	39
図 4-2	応力別クリープひずみ (80 ) .....	40
図 4-3	温度別クリープひずみ (9.8MPa) .....	40
図 4-4	M48 ボルトナット締結二次元モデル (ナイロンナット) .....	42
図 4-5	プリベリントルクの変動 (M48 ナイロンナット) .....	43
図 4-6	M10 ボルトナット締結二次元モデル (ナイロンナット) .....	45
図 4-7	プリベリントルクの変動 (M10 ナイロンナット) .....	45
表 1	90 のプリベリントルクの比較 .....	42
表 2	長時間経過後のプリベリントルクの比較 .....	43

# 第1章 序論

## 1.1 研究の背景

ボルトとナットを用いた結合は一般的な結合方法であるとともに、さまざまな機械構造物に用いられている。溶接などの他の結合方法とは違い取り外しができるという点がボルトナット大きな利点であり、今日においても第一線で使用される要因として挙げられる。しかしながら取り外し可能という点は同時に外力が働くことによってゆるみが生じてしまうという危険性も孕んでいる。日常的な機械構造物だけでなく非常に重大で複雑な機械構造物にまで使用されているだけにボルトのゆるみや破損は予測以上の惨事を招く可能性がある。

このような背景を基にゆるみのメカニズムやゆるみ防止の研究が行われてきた。現在ゆるみ発生の大きな要因として軸直角方向の外力によるゆるみが考えられている。ボルト軸線に軸直角方向からの外力が被締結物に繰り返し加えられると締結部の接触面等ですべりが発生し、このすべりがボルト・ナットの座面においても発生すると戻り回転へと繋がりゆるみが生じる。この場合のゆるみが軸力低下にも直結しやすいものとして重要視されており、このようなゆるみを防ぐために数多くのゆるみ止め対策が提案されている。特にナットに関してはスリットを入れたりバネを組みこんだりと様々な商品開発が行われている。しかしながら、そのようなナットにおいてどれほど効果があるのか懸念されているものも数多く存在する。

## 1.2 本研究の目的

プリベリントルク形ナットとして JIS の B1199-1 非金属インサート付き六角ナットが登録されている。非金属インサート付き六角ナットにおいて、この非金属インサートにナイロンを使用しているのがナイロンナットである。ナイロンナットはナイロン部分の摩擦力によるトルクでゆるみの発生を防ぐとされている。本研究では三次元有限要素法モデルを用いてナイロンナットのゆるみ防止効果についての検証とともにゆるみのメカニズムについて考察する。とくにナイロンは常温と高温で性質が異なるために高温の状況下によってゆるみ止め効果にどのような影響があるかについても考察する。これらを踏まえた上で最終的にゆるみ止め性能を評価する事を目的とする。

## 1.3 本論文の構成

第 1 章では本研究の背景と目的について述べた。

第 2 章として完全座面すべりに対するナイロンナットのゆるみ進行を考察した。

第 3 章として微小座面すべりに対するナイロンナットのゆるみ進行を考察した。

第 4 章として高温状況下長時間使用におけるナイロンナットのプリベリントルクの変動を解析し、ゆるみ止め効果を考察した。

# 第2章 完全座面すべりに対するナイロンナットの性能評価

## 2.1 緒言

ボルト・ナット締結体のゆるみについて長い間研究が行われてきたが、その中においてもっとも焦点を当てられてきたのが座面部で完全なすべりを起こす場合のゆるみである。以降このゆるみは完全座面すべりによるゆるみと定義する。

通常、被締結体に外力が加わった場合でもその外力が座面部で生じる静止摩擦力を上回ることがなければ局所的なすべりは生じても直接的に大きなゆるみに繋がることはない。しかしながら静止摩擦力を上回るほどの外力が生じたとき座面部では完全なすべりが発生しゆるみが進行する。

本章では完全座面すべりを発生させた場合において通常のナットとナイロンナットでどれほどゆるみの進行に変化が現れるかについて調べる。またナイロンナットは常温(23 )と高温(90 )の 2 種類を使用し温度によるゆるみの進行度の違いについても調べる。また以上を踏まえ、ナイロンナットのゆるみのメカニズムについても考察する。

本章の構成を以下に記す。

- ・緒言
- ・完全座面すべりによるゆるみについて
- ・有限要素法解析手法
- ・解析結果
- ・考察
- ・結言

## 2.2 完全座面すべりによるゆるみについて

完全座面すべりによって生じるゆるみのメカニズムについて説明していく。完全座面すべりによるゆるみの挙動は山本ら[1]によって提案され、横山の行った有限要素法による解析でも再現されている。以下は横山らによって行われた解析の結果である[2]。このときの解析モデルを以下に記す。

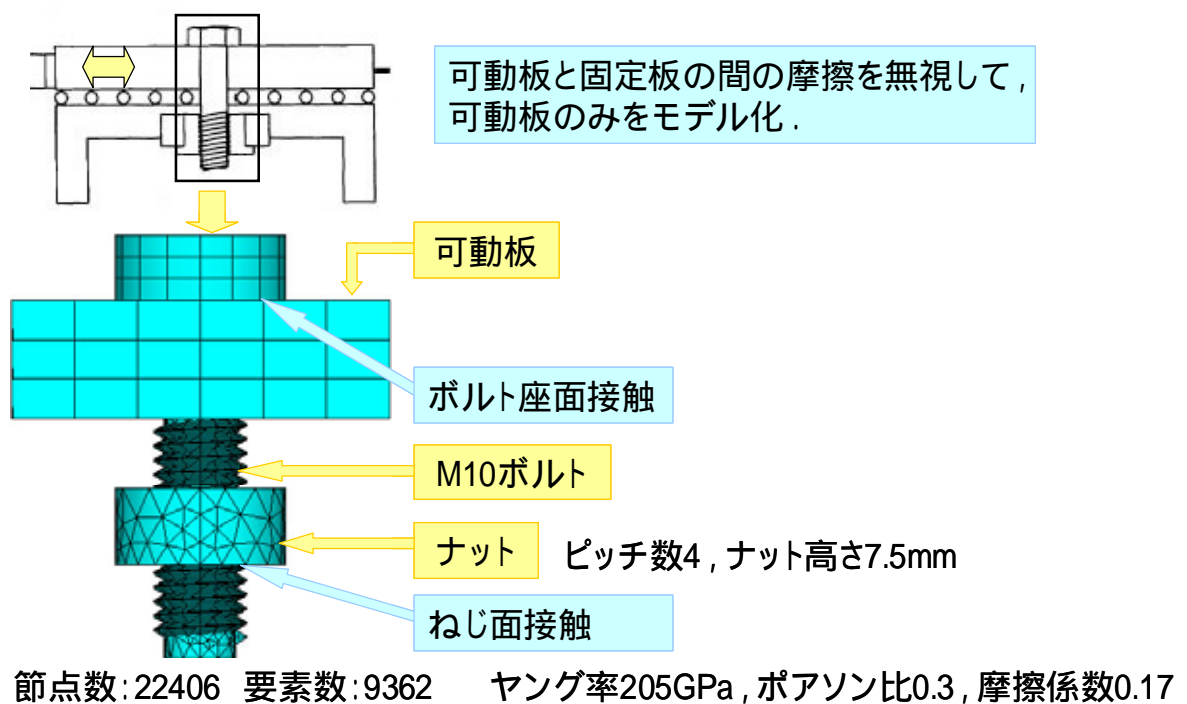


図 2-1 横山による有限要素法ボルトナット締結モデル



接触面の様子について、以下のボルトに与えた並進変位をx軸、それに要する並進力をy軸としたヒステリシスループを用いて説明する。

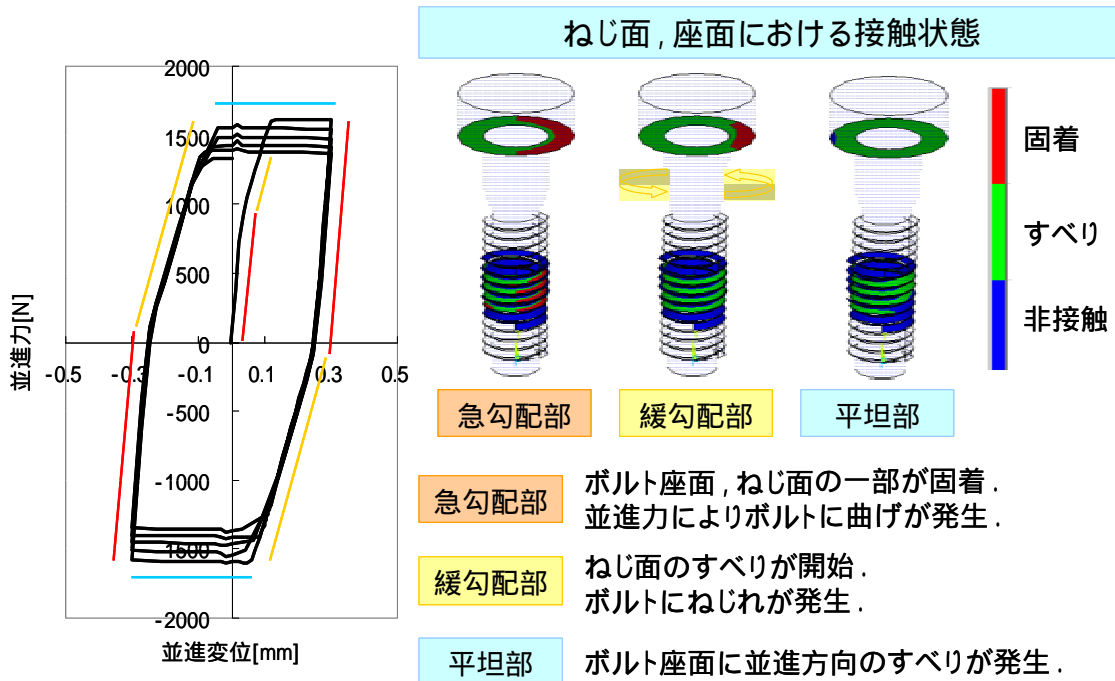


図 2-2 ヒステリシスループとボルトの接触状態

2004 横山喬 修士論文 PPT

ボルトに並進方向の外力を与えたときにヒステリシスループは急勾配部、緩勾配部、平坦部の3通りの状況に分けられる。まずはじめにボルトに並進力を加えていくとヒステリシスループの急勾配部にさしかかる。急勾配部においてはボルト座面、ねじ面の一部が固着しているために、ボルトに並進方向の曲げが生じている。さらに並進力を加えていくと緩勾配部となり、ボルト座面より先にナットのねじ面においてすべりが生じる。このすべりはリード角によってねじがゆるむ方向にも働く。このとき、ボルト座面が固着した状態でボルト軸部はゆるみ方向に回転するため、ボルトの軸部にはゆるみ方向のねじれが発生する。さらに並進力を増加させると平坦部へとなり、ねじ面に続きボルト座面においてもすべりが生じる。この座面すべりによって、ボルト軸部に生じたねじれを解消しようとボルト頭部がボルトをゆるめる方向に回転する。このような急勾配部 緩勾配部 平坦部の一連の流れによってボルトのゆるみは発生する。

以下にボルト 3 点における回転角を求めたグラフを示す。  
 それぞれの勾配部における現象がイメージしやすくなると思われる。

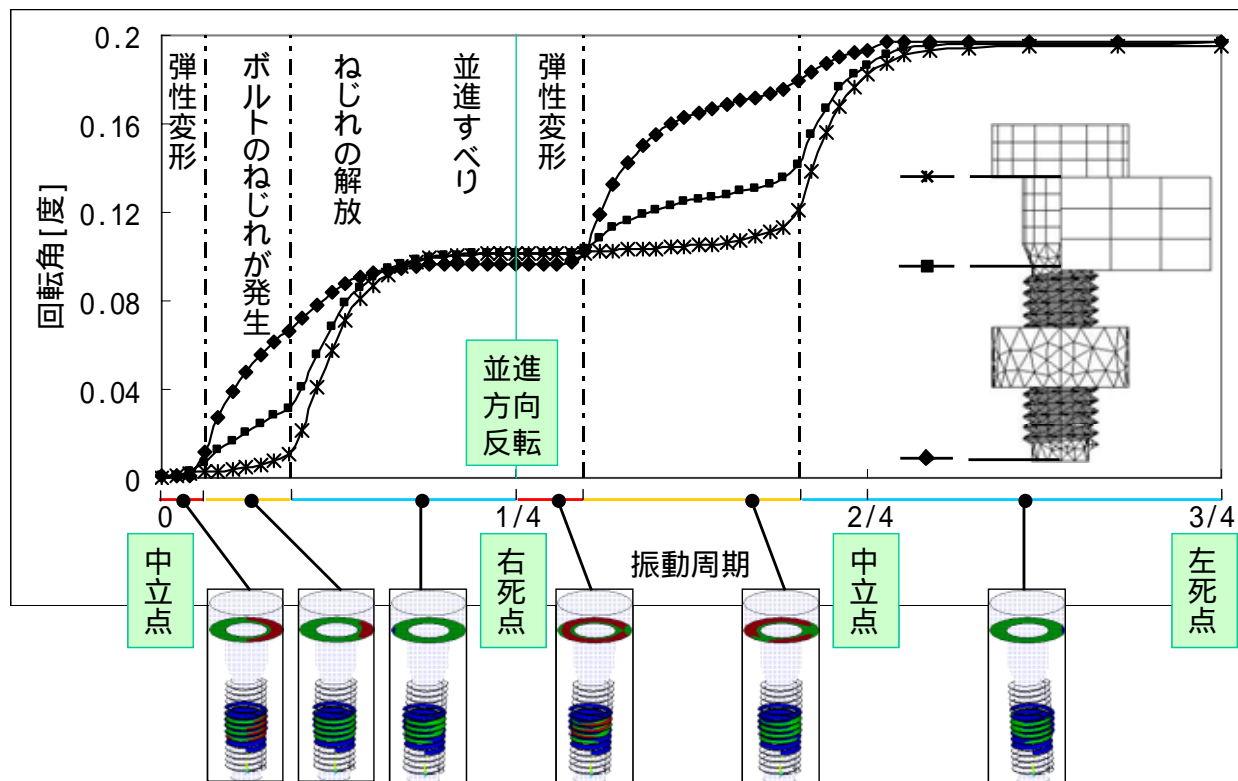


図 2-3 ゆるみ角度とボルトの接触状態

2004 横山喬 修士論文 PPT

## 2.3 有限要素法解析手法

本解析では木村[3]が微小座面ゆるみで使用したモデルを模擬した有限要素法モデルを使用する。以下の解析モデルでは座標軸としてボルトの軸方向上向きにy軸をとり、可動板変位方向にx軸を図の右側が正となるようにとった。z軸は手前が正となるように定義する。ナットの回転角やボルトのねじれ方向の定義としてy軸に対しての回転とする。このため、解析モデルを上から見てy軸に関して反時計回りの方向が正方向の回転となる。

寸法についてはメートル並目ねじM10のボルトを締め付け長さ28mmで用い、ボルト穴径は3級(12)とした。おねじのねじ山数は15ピッチであり、ボルトねじ部は通常のナットでは約3.5ピッチ、ナイロンナットでは約1.5ピッチ分突き出している。通常のM10六角ナットはめねじのねじ山数を5ピッチとし、M10ナイロンナットは鉄鋼部のめねじのねじ山数を4ピッチ、ナイロン部を1ピッチとしている。モデル簡略化のためにねじ谷底の丸みは考慮せずにナットの外径は二面幅を直径とする円形とした。可動板と固定板との間の摩擦力は無視し、可動板のみをモデリングしている。可動板は奥行き40mm、幅40mm、高さ12.5mm、ボルト穴径13mmとなっている。

拘束条件はボルト頭の外周部分を全自由度拘束、可動板をy軸z軸拘束としている。また可動板に対してx軸方向に均等に変位を与えるため、可動板の右端と左端の面の節点をカップリングしている。接触要素はボルト座面・可動板上面間に設定。通常の六角ナットの解析ではボルト圧力側ねじ山・ナット圧力側ねじ山間のみ接触要素を定義し、ナイロンナットの解析ではボルト圧力側ねじ山・ナット圧力側ねじ山間、ボルト非圧力側ねじ山・ナイロン非圧力側ねじ山間に接触要素を定義する。ナイロン部とナットの鉄鋼部の接触は固着(常時)を設定した。ボルト軸部と可動板穴径に関してはこの解析では接触が生じないので接触を定義しなかった。また、接触についてはすべて拡大ラグランジュ法を用い、計算時間短縮のために接触は非対称接触を用いた。

材料特性に関しては、鉄鋼部(SS400)はヤング率205GPa、ポアソン比0.3、摩擦係数0.115、線膨張係数 $11.6E-6/$ を使用した。ナイロン部はヤング率3000MPa(23) $\cdot 9.90MPa(90)$ 、ポアソン比0.34、摩擦係数0.45、線膨張係数 $8.0E-5/$ (23) $\cdot 13.7E-5/$ (90)を使用し、23から90の間のヤング率と線膨張係数は線形関数によって補完した。また、これらのナイロンに関する物性値は旭化成のナイロン(レオナ1300S)の物性値を参考とした。

可動板を加振する際に力による加振と変位による加振が考えられるが今回の解析では横山の解析手法に合わせて変位による加振を用いる。この際に与える変位は0.3mmとし、x軸上において0から0.3、0.3から0、0から-0.3、-0.3から0となる可動板の一連の動きを1cycleとする。解析では3サイクル分行う。ナイロンナットの解析の際には温度を指定し、高温のナイロンナットでは23から90に温度を変えた状態で

変位による加振を与える。

また、ナイロンナットのプリベリントルクは JIS B1056 の表 8 の 5 回目のねじ戻しの値を参考[4]に常温で  $1.0\text{N}\cdot\text{m}$  となるようにナイロンのねじ部をボルト側に食い込ませて調整した。90 においてプリベリントルクを計測したところ  $0.34\text{N}\cdot\text{m}$  となった。

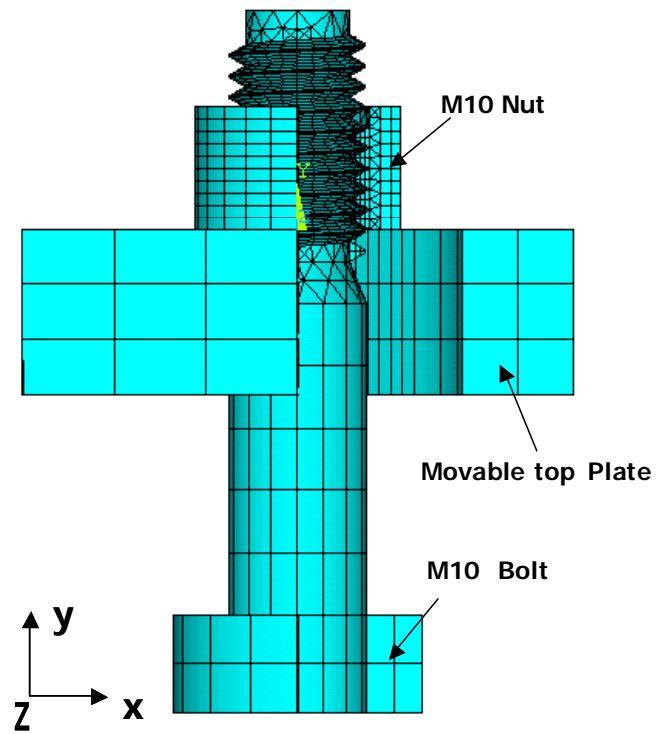


図 2-4 ボルト・ナット締結モデルの断面図(通常のナット)

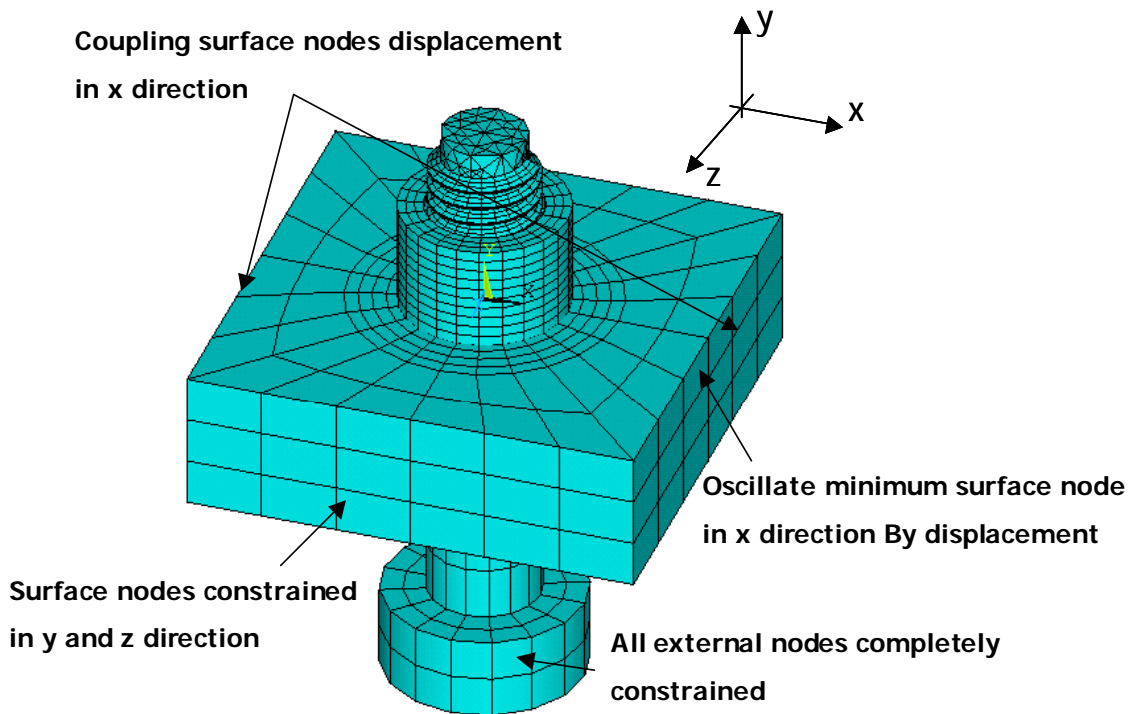


図 2-5 ボルト・ナット締結モデルの拘束条件(通常のナット)

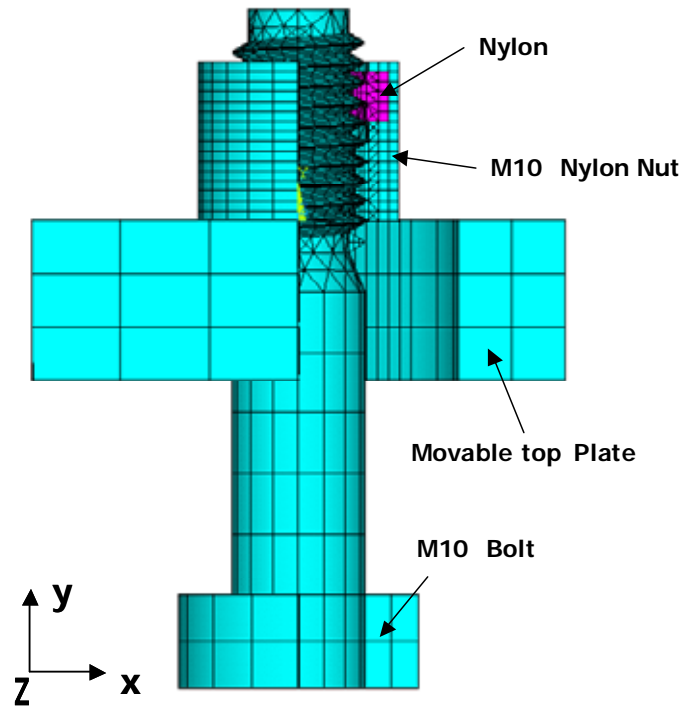


図 2-6 ボルト・ナット締結モデルの断面図(ナイロンナット)

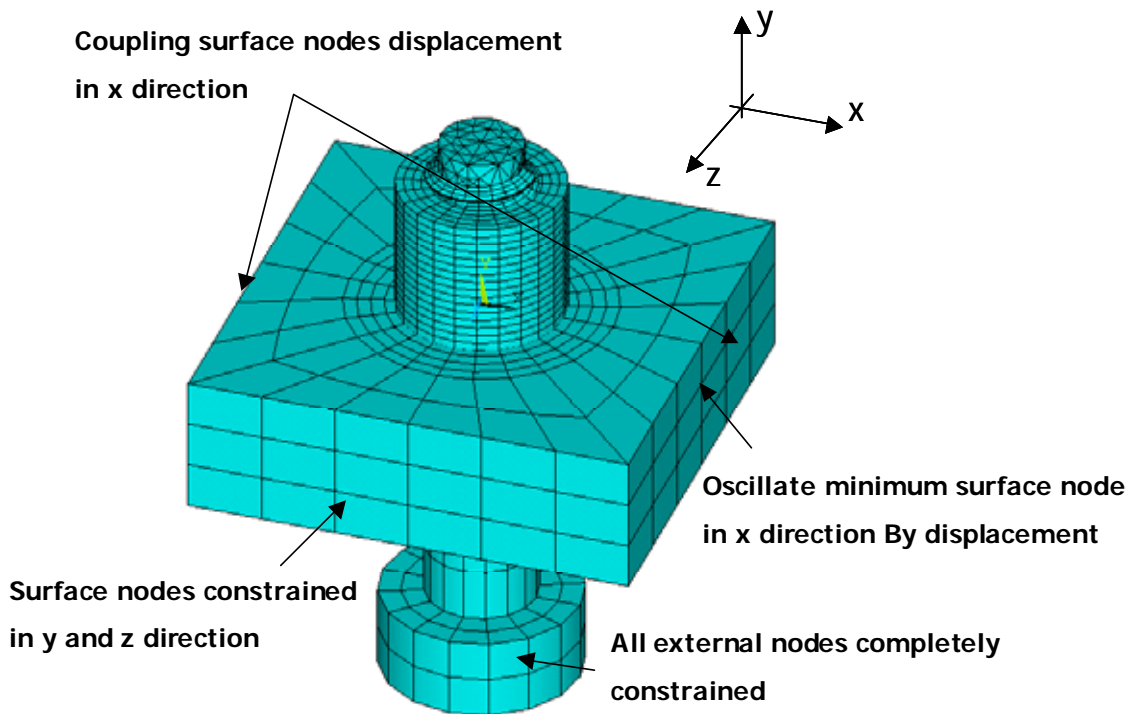


図 2-7 ボルト・ナット締結モデルの拘束条件(ナイロンナット)

## 2.4 解析結果

以下にそれぞれのナットの回転角の推移を示す。

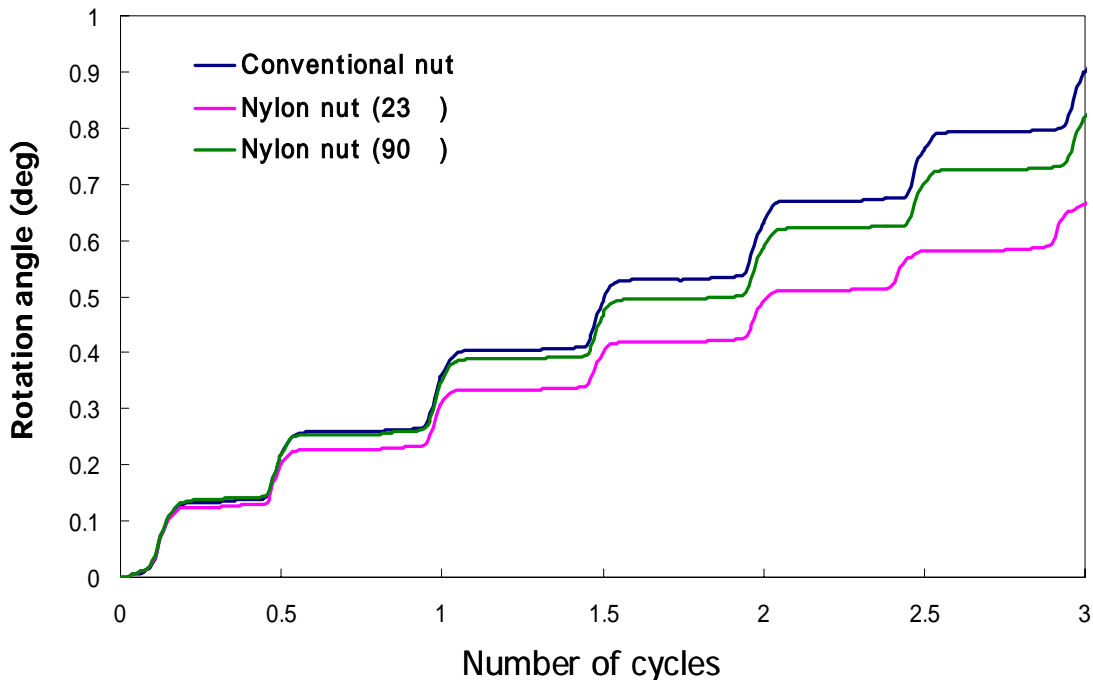


図 2-8 ナットのゆるみ角度の比較

通常の六角ナットと温度別ナイロンの回転角の推移を図2-8に示す。回転角はそれぞれのナットの上端の回転角を示している。グラフを見るとゆるみ進み方はいずれのナットも同じ形になっている。ゆるみの進行はナイロンナットの方が通常の六角ナットより若干遅れている。この中では常温のナイロンナットの回転角がもっとも小さく、ゆるみの進行が遅いがあまりゆるみ止め効果は大きくない。

またボルトのねじれ回転角を図2-9に示す。サイクルが進むにつれてボルトがゆるみ方向にねじれている。こちらは微小ではあるがナイロンナットの方が進行が早く、常温のナイロンナットがもっとねじれている。

並進方向変位をx軸、変位を与えるのに必要な並進力をy軸にとってプロットしたヒステリシスループを図2-10に示す。いずれのナットもほぼ同一のループをたどっている。このことから限界すべり量はナットとナイロンナットでほとんど差がないと思われる。

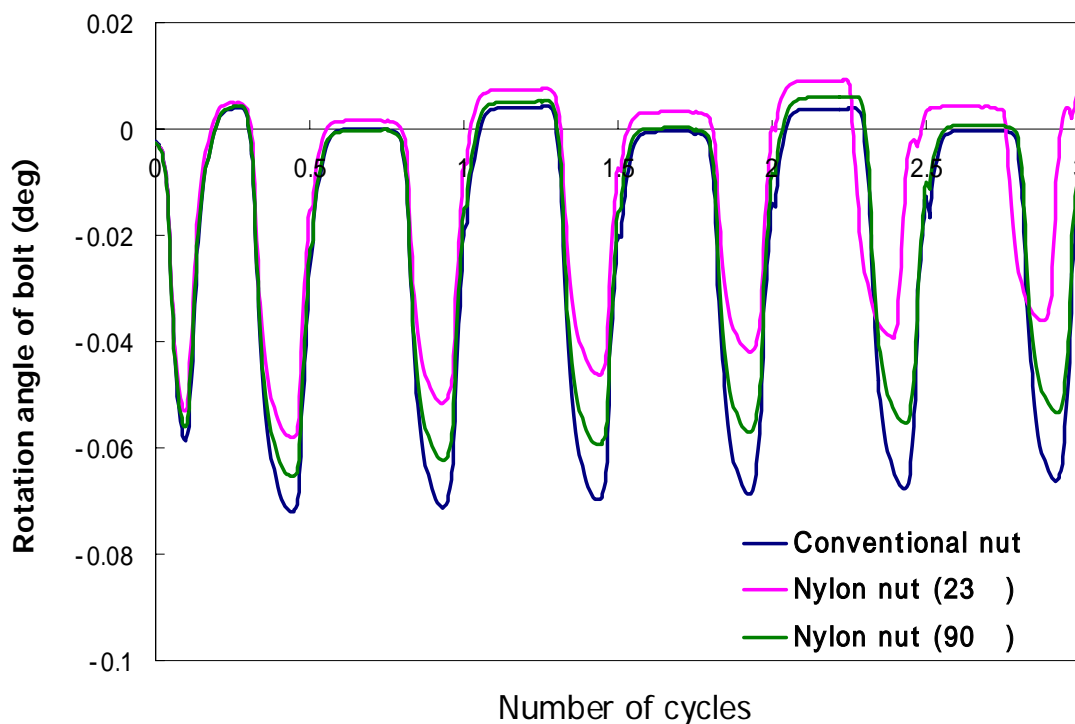


図 2-9 ボルトのねじれの比較

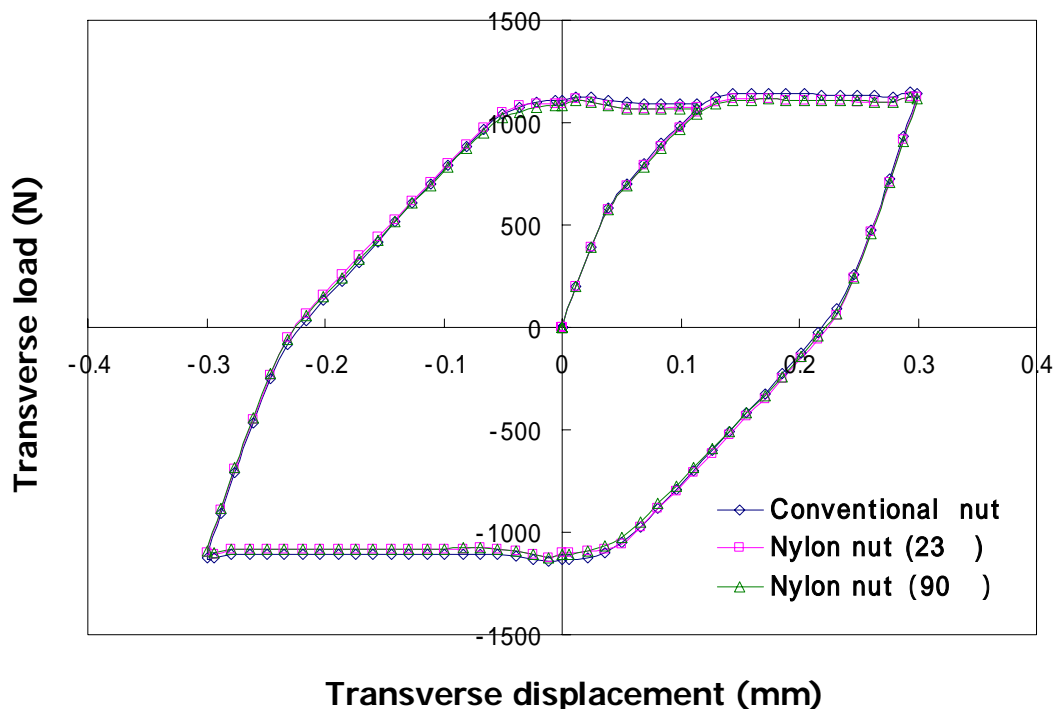


図 2-10 ヒステリシスループの比較



## 2.5 考察

### 2.5.1 通常のナットとナイロンナットの違い

図 2-8 の解析結果よりナイロンナットは通常の通常のナットよりもゆるみの進行が遅くなっていることが見て取れる。高温のナイロンナットではその差は微小であるが、常温のナイロンナットではゆるみの進行の差が顕著に現れている。

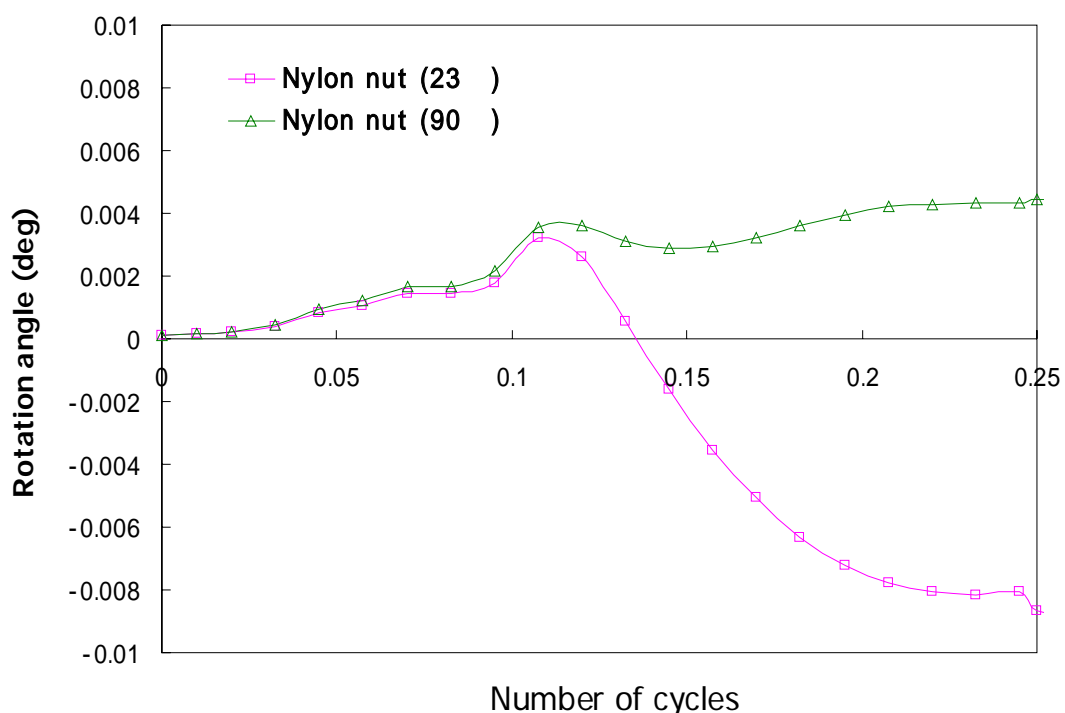


図 2-11 ゆるみ角度の差の比較(初期 1/4 サイクル)

ゆるみの進行の様子を細かく見るために最初の 1/4 サイクルについて回転角の差の比較を図 2-11 に示す。始めの 0.03 サイクル付近から通常のナットとナイロンナットでゆるみの進行に差が出始める。その後 0.13 サイクル付近で常温と高温のナイロンナットの間で差が生じ始める。この 0.13~0.2 サイクル過程においてゆるみの進行に大きく差が生じる。この 0.13 サイクル付近におけるそれぞれのナットのねじ面と座面の接触状態を次の図 2-12 に示す。接触状態の配色は赤が固着、オレンジがすべり、黄色が近距離となっている。

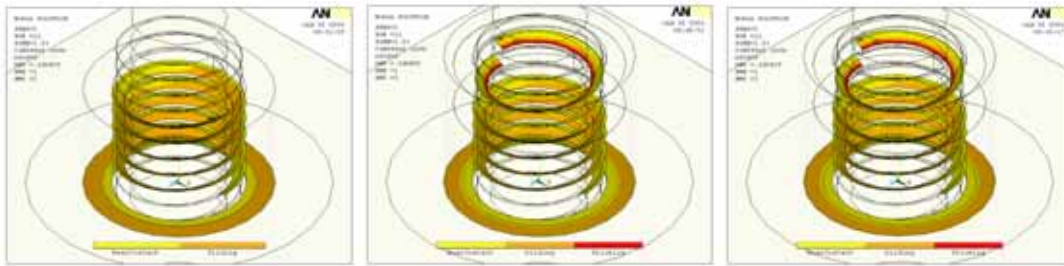


図 2-12 0.13 サイクル目のねじ面・座面の接触状態の比較(左より通常のナット、常温のナイロンのナット、高温のナイロンのナット)

見やすくするためにナイロンの非圧縮側のねじ面は省略している。通常のナットを見ると座面とねじ面で完全なすべりが発生していることが分かる。これに対してナイロンのナットでは座面と鉄鋼部のねじ面では完全にすべっているが、ナイロンのねじ面で固着している部分がある。

次に0.07 サイクル、0.25 サイクル付近の接触状態をそれぞれ図 2-13、図 2-14 に示す。

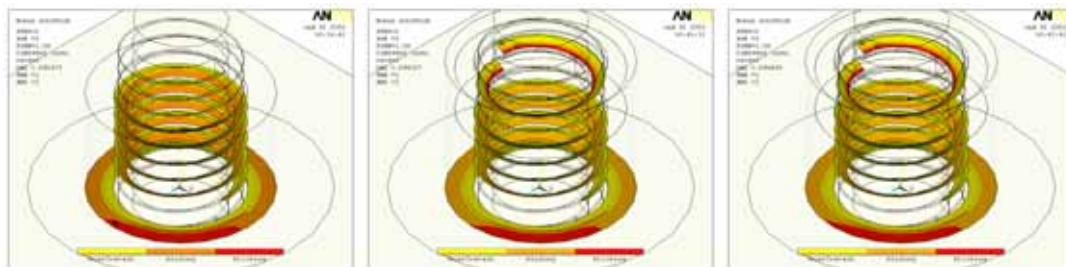


図 2-13 0.07 サイクル目のねじ面・座面の接触状態の比較

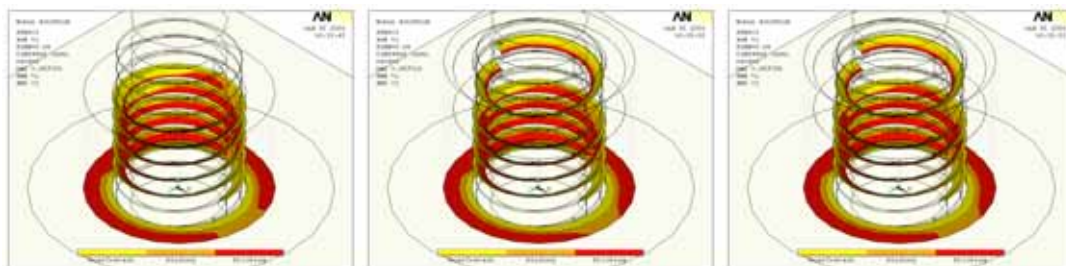


図 2-14 0.25 サイクル目のねじ面・座面の接触状態の比較

これらの3段階のサイクルの接触状態を見比べるとナイロン部分のねじ面では常に固着が生じている事が分かる。また、ナイロン部分以外の接触状態はナットとナイロンナットでほぼ一致している。3サイクル間を通して接触状態を見てもナイロン部分以外の接触状態はほとんど変わりがなく、そしてナイロンのねじ面は常に固着が生じている。通常、座面やねじ面などに定常的な固着があるとゆるみは発生しないがナイロンナットでは図2-11のようにゆるみが発生している。この点について考えるためにナイロンのねじ面のすべり距離の変動について調べてみた。

## 2.5.2 常温と高温のナイロンねじ部の挙動

以下にナイロンのねじ面におけるすべり距離を左から1cycle毎に示す。図2-15が圧力側ねじ面、図2-16が非圧力側ねじ面となっている。

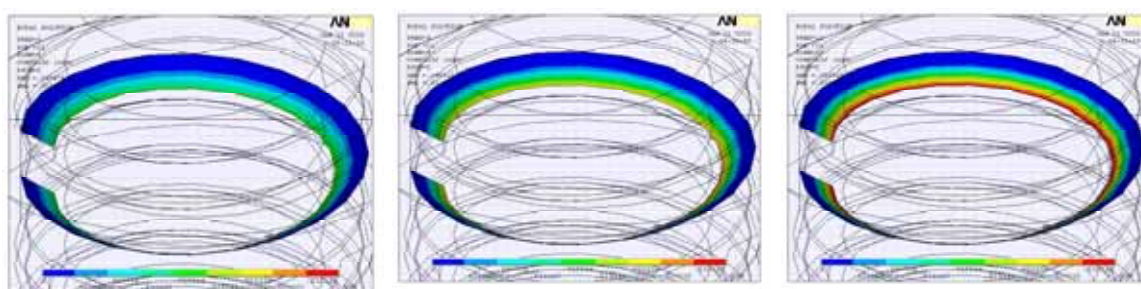


図 2-15 常温ナイロンナットのナイロン部圧力側ねじ面のすべり距離(左から1サイクル目、2サイクル目、3サイクル目)

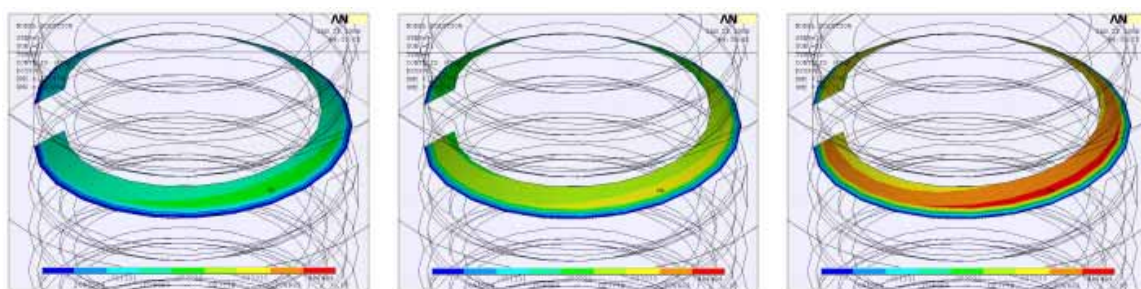


図 2-16 常温ナイロンナットのナイロン部非圧力側ねじ面のすべり距離

また高温ナイロンナットのねじ面の接触すべり距離についても示す。

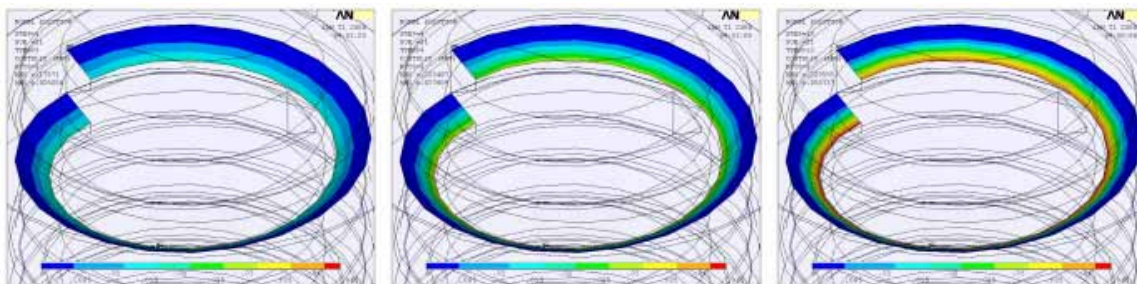


図 2-17 高温ナイロンの圧力側ねじ面のすべり距離

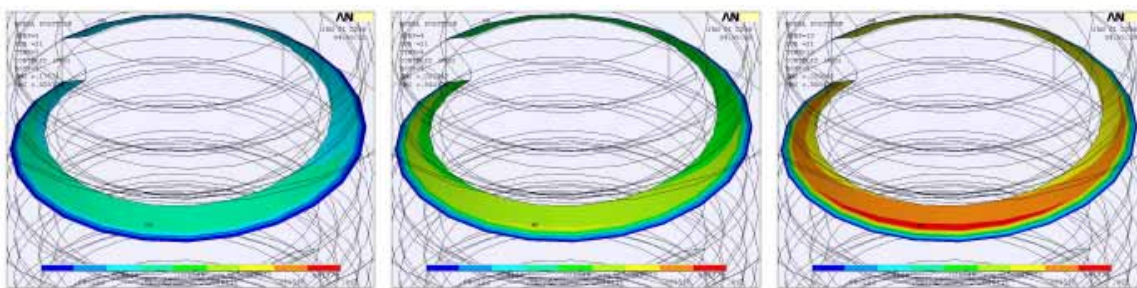


図 2-18 高温ナイロンの非圧力側ねじ面のすべり距離

これらのナイロンの両ねじ面を見ていくと固着の部分においても実際にはすべりが発生していることが分かる。左から右へ1cycle進むごとにすべり距離は増加していている。ANSYSにおいて接触状態は、 $(\text{摩擦力}) > (\text{摩擦係数} \times \text{接触圧})$ のときに固着、 $(\text{摩擦力}) < (\text{摩擦係数} \times \text{接触圧})$ のときにすべりと判定される。しかし実際問題として $(\text{摩擦力}) > (\text{摩擦係数} \times \text{接触圧})$ のときでも微小な相対変位は生じる[6]。本解析においてはこのような微小な変位が生じたために実際にはすべりが生じていても固着判定されたと考えられる。

また、常温と高温ですべり距離を比較すると高温の方がすべり距離が大きくなっている。このことは図 2-8 における常温と高温のナイロンナットで、高温の方がゆるみが進行していることに合致している。高温になるとヤング率とプリベリントルクが減少するためゆるみの進行が促進されたと考えられる。

## 2.6 結言

本章では温度別にナイロンナットの完全座面すべりを三次元有限要素法モデルを用いてシミュレーションし、通常の六角ナットのシミュレーションとの比較を行った。以下に本章の結論を述べる。

・完全座面すべりにおいてナイロンナットと通常のナットではナイロンナットの方がゆるみの進行が若干遅れることが分かった。特に常温のナイロンナットの方が進行を遅らせる効果があり、高温ではあまり通常のナットと差がなかった。

・しかし、座面すべりは発生してしまうためにゆるみ防止の効果はあまり期待できないと思われる

# 第3章 微小座面すべりに対するナイロンナットの性能評価

## 3.1 緒言

ボルト締結体のゆるみに関する研究はこれまで完全座面すべりによるゆるみを中心に行われてきた。そのため、まず第二章においても完全座面すべりにおける解析を取り上げてきた。しかしながら一方で、近年において完全座面すべり以前においてもゆるみが発生する事が賀勢[5]により示され、木村[3]の有限要素法モデルによってそのメカニズムが考察されている。このようなゆるみを以降では微小座面すべりによるゆるみと定義する。

微小座面すべりによるゆるみは非常に小さいがその繰り返しによって軸力の低下を招き、最小的には小さな外力によっても完全座面すべりに繋がると考えられている。実際のねじの使用におけるゆるみの多くもこの微小座面すべりによるものと考えられる。

本章では 3 種類の微小座面ゆるみが発生させた場合において通常のナットとナイロンナットでどれほどゆるみの進行に変化が現れるかについて調べる。またナイロンナットは常温(23 )と高温(90 )の 2 種類を使用し温度によるゆるみの進行度の違いについても調べる。

本章の構成を以下に記す。

- ・緒言
- ・微小座面すべりによるゆるみについて
- ・有限要素法解析手法
- ・解析結果
- ・考察
- ・結言

### 3.2 微小座面すべりによるゆるみについて

微小座面ゆるみ状況下においてのゆるみについて説明していく。微小座面ゆるみ状況下のゆるみの挙動は賀勢ら[4]によって提案され、木村[3]の行った有限要素法による解析でも再現されている。以下は木村により行われた結果である。この時の解析モデルを以下に示す。

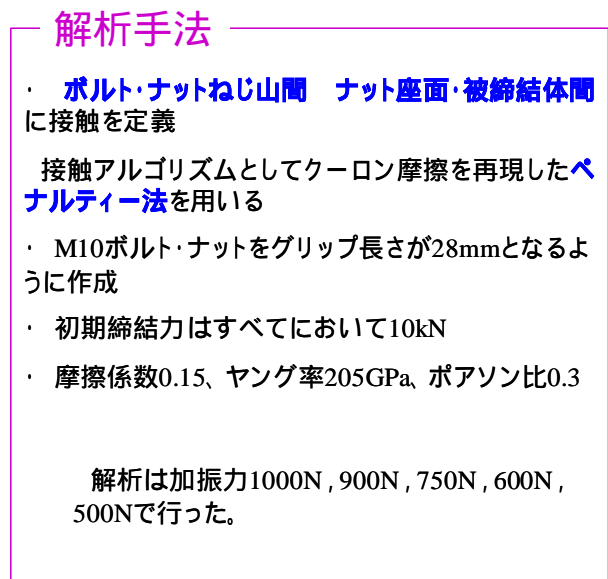
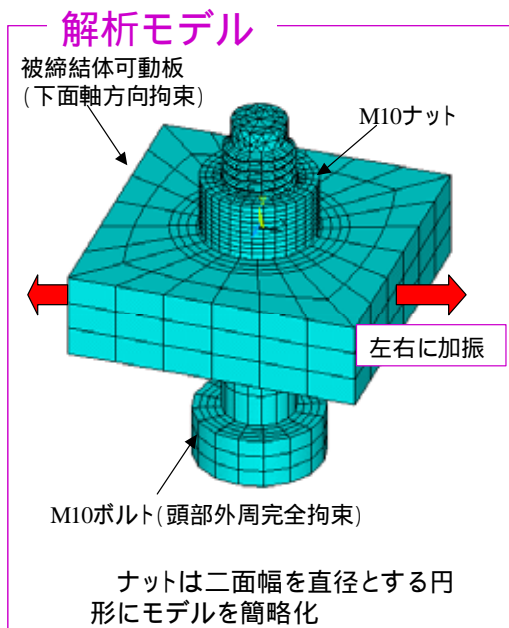
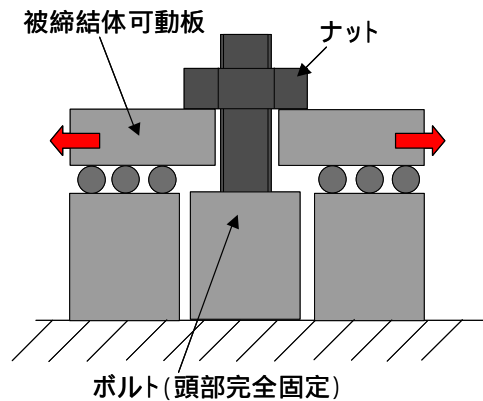


図 3-1 木村による有限要素法ボルト・ナット締結モデル

以下に実験と解析のそれぞれのゆるみ進行の様子を示す。

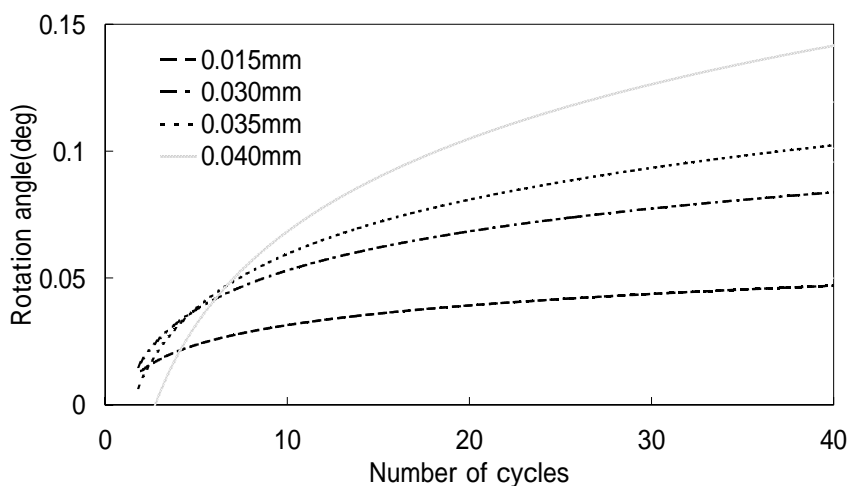


図 3-2 賀勢らによる実験結果

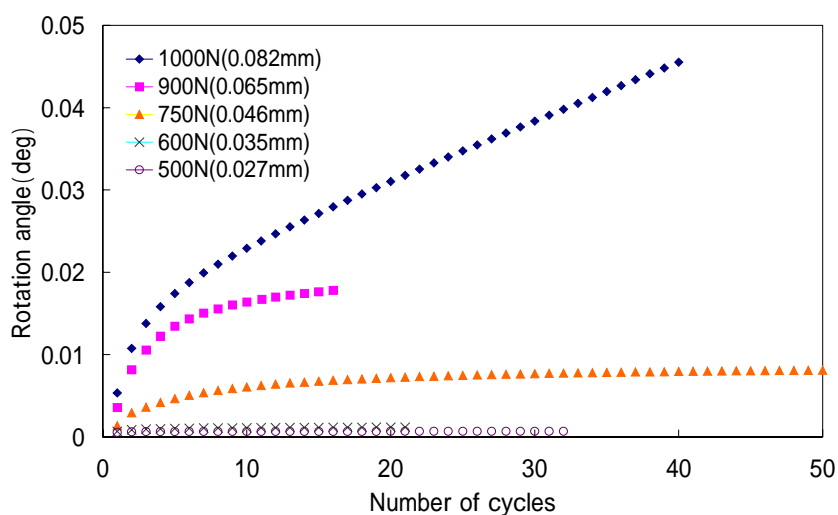


図 3-3 ゆるみ角度の比較

2005 木村成竹 卒業論文 PPT

解析結果は実験による微小座面すべりのゆるみ進行の傾向と定性的に一貫している。微小座面すべりではナットの回転角はボルト軸にねじれの生じていない始めの数サイクルで急激にゆるみ、その後はボルト軸のねじれが一定の値に収束するにつれて次第に傾きが緩やかになる。この後最終的に直線になって一定の回転角を保ちながらゆるむかほとんどゆるみが進行しないかに分かれる。1000Nを見ると一定の回転角を保ちながらゆるみが進行しているのが分かる。逆に 750N では傾きが次第に緩やかになり最終的にはほとんどゆるみが進行していない。



加振力 750N の 1 サイクル内でのねじ山の接触状態を3つ示す。

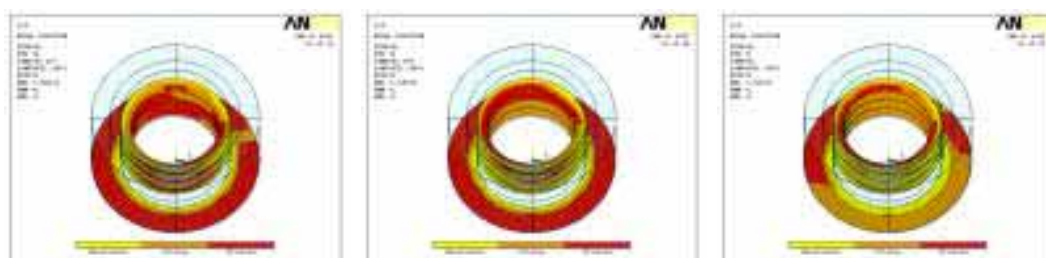


図 3-4 座面・ねじ面での接触状態

2005 木村成竹 卒業論文

接触状態を見るとねじ山のどの部分においてもサイクル内で最低一度はすべりが生じている。これによって固着部分が存在してもサイクル内ではねじ面ですべりが進行し、ボルト軸にねじれが生じることが分かる。しかしながら、ねじ面すべてで同時にすべりが生じることはないのでボルト軸のねじれ蓄積はゆっくりとなり、ゆるみ速度は非常に遅くなる。これに対し 1000N ではねじ接触面で完全なすべりが発生するため一定の回転角を保ち、ゆるみが進行する。

### 3.3 有限要素法解析手法

本解析で使用する解析モデルは2章で用いたものと同じものを使用する。また比較も通常のナット、常温のナイロンナット(23 )、高温のナイロンナット(90 )で行い、物性値などの変更はない。しかし、ナイロンナットと比較する通常のナットの解析はM10でめねじのねじ山数をピッチ数4のものに変更する。またピッチ数4のナットとピッチ数5のナットでも座面微小すべりの比較を行う。

また、可動板を加振する際に今回の解析では木村の解析手法に合わせて力による加振を用いる。この際に与える力は300N、500N、600Nとし、x軸方向に±の加振力を交互に与える。300N から-300N のような加振力の変動を1cycle とする。解析では20サイクル分行う。

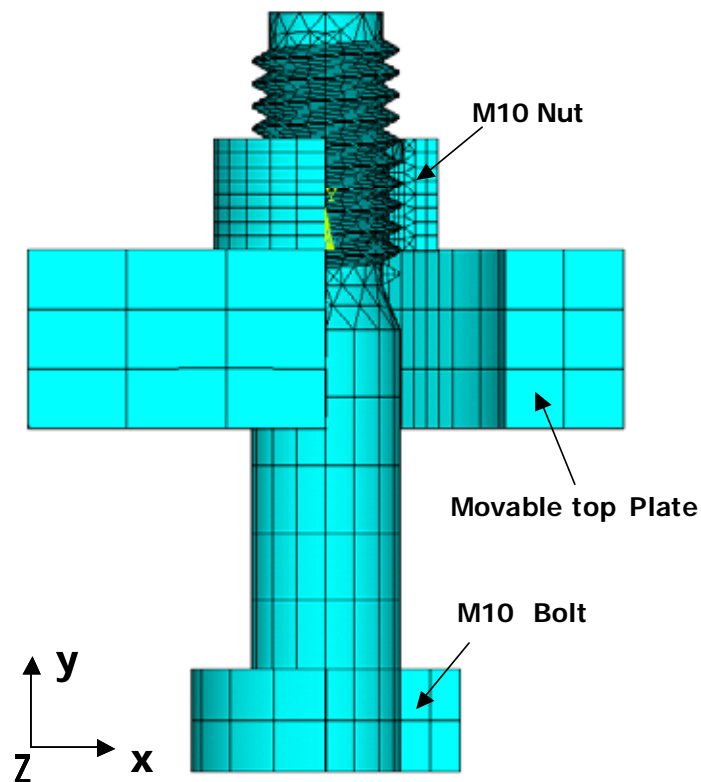


図 3-5 ボルト・ナット締結モデルの断面図(通常のナット)

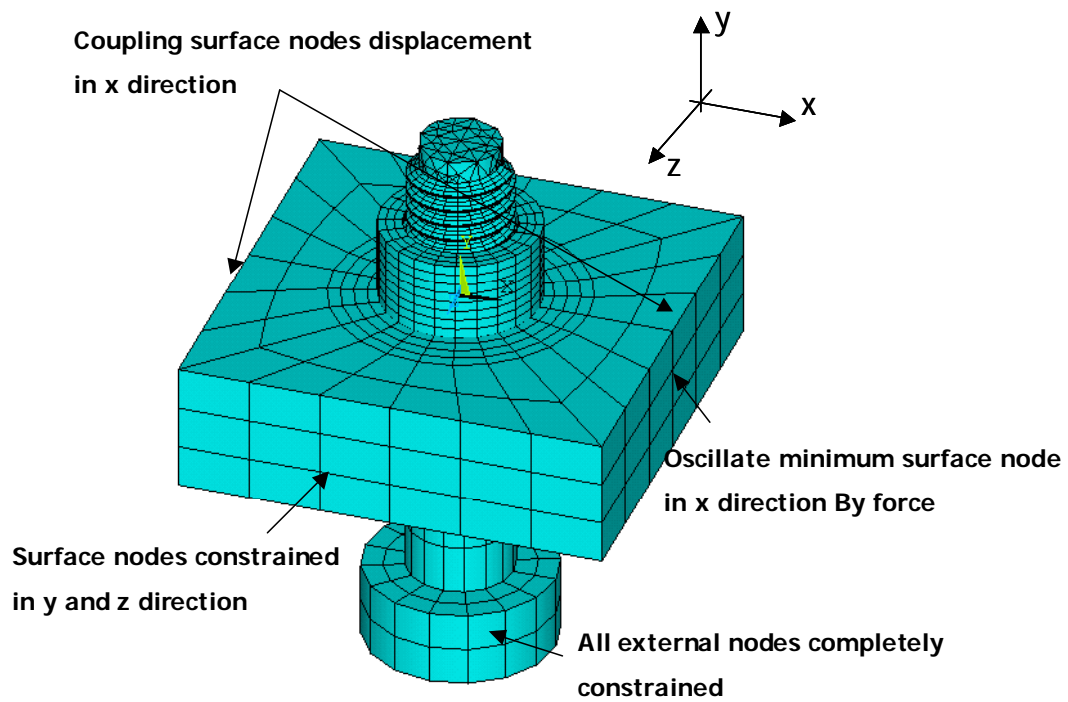


図 3-6 ボルト・ナット締結モデルの拘束条件(通常のナット)

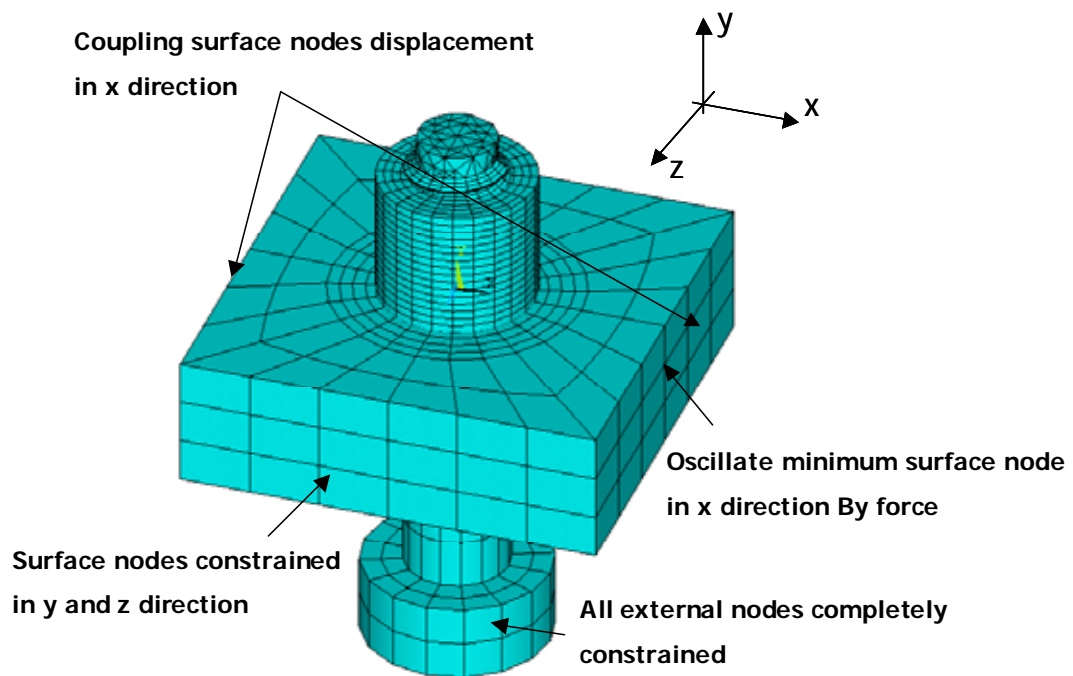


図 3-7 ボルト・ナット締結モデルの拘束条件(ナイロンナット)

### 3.4 解析結果

以下にそれぞれの加振力ごとのナットの回転角、ボルトのねじれ、相対回転角を示す。完全座面すべりではサイクルにおいてボルトのねじれがほとんど回復し、あまり進行しないために相対回転角度は考慮しなかったが、微小座面すべりではナットの回転角だけでなくボルトのねじれも重要になってくるのでナットの回転角とボルトのねじれの差である相対回転角も結果に含めた。

それぞれの加振力ごとに結果を見てみる。

加振力 300N の場合について。ナットの回転角度を見てみるといずれもゆるみ方向に回転している。しかし 0.0003deg あたりから振幅が始まり、それ以上はゆるみ角度は進んでいない。またそれぞれのナットの回転角を比べてみるとがほとんど同一曲線になっている。ボルトのねじれ角度を見てみるとゆるみと逆方向にねじれが発生し、ナットと同様に -0.0014deg 以上にはねじれが進行していない。ナットごとにねじれ角を見比べてみると通常のナットよりもナイロンナットの方がねじれが小さくなっている。また、常温と高温でナイロンナットではあまり差が見られない。相対回転角を見てみるとナイロンナットの方が通常のナットよりゆるみが小さいがいずれのナットにおいてもゆるみは進行していない。

加振力 500N の場合について。ナットの回転角について見てみると 300N の場合に比べてゆるみが進行している。またナイロンナットにも差が現れ、常温のナットの方が高温のナットよりもゆるみ角度が小さくなっている。ボルトのねじれ角を見てみても 300N に比べてねじれが緩やかに進行し、またナイロンナットにおいても常温の方が高温よりもねじれ角度が小さくなっている。相対回転角度を見てみると緩やかにゆるみが進行している。通常のナットよりもナイロンナットの方が相対回転角度が小さく、ナイロンナットでは常温の方が小さい。また 300N に比べて回転角度のオーダーが 10 倍程度になっている。

加振力 600N の場合について。ナットの回転角度、ボルトのねじれ角度、相対回転角度のいずれも 500N とほぼ同じグラフの形となった。ただ全体的に角度のオーダーがあがり、そのため 300N のような振幅はほとんど見られなくなり曲線が滑らかになった。

加振力 900N の場合について。ナットが直線的にゆるみ始め、ゆるみが進行している。また、ボルトのねじれ角度は -0.07deg で止まりそれ以上進行していない。相対回転角を見てみるとそれぞれゆるみが進行している。通常のナットよりもナイロンナットの方がゆるみの進行が小さく、常温がもっとも傾きが小さくなっている。

## Loading of 300N

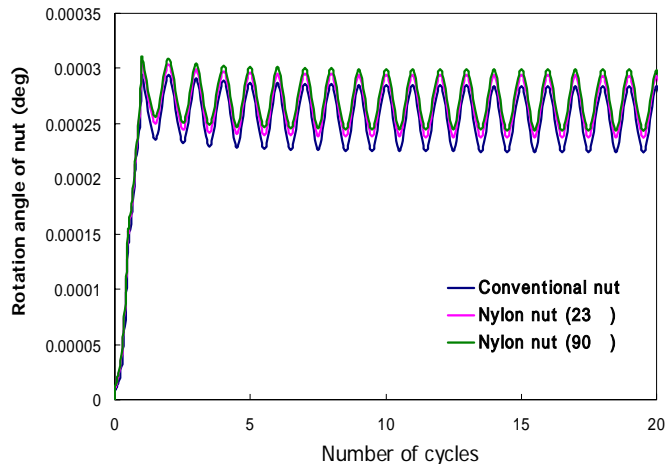


図 3-8 ナットのゆるみ角度の比較(300N)

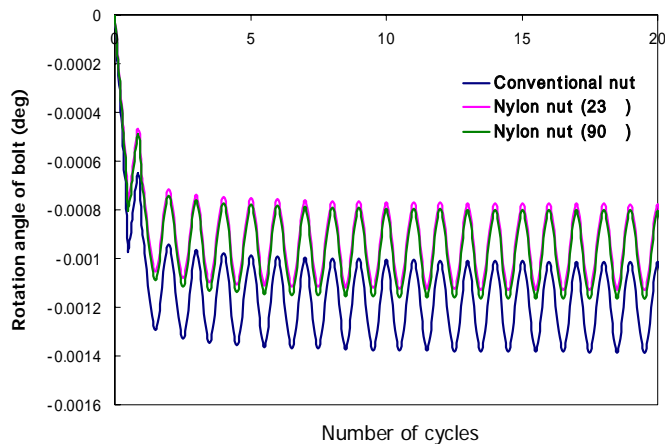


図 3-9 ボルトのねじれ角度の比較(300N)

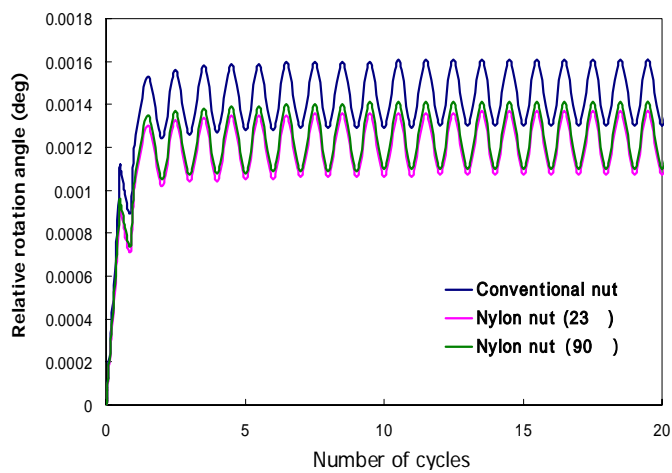


図 3-10 相対回転角(300N)

## Loading of 500N

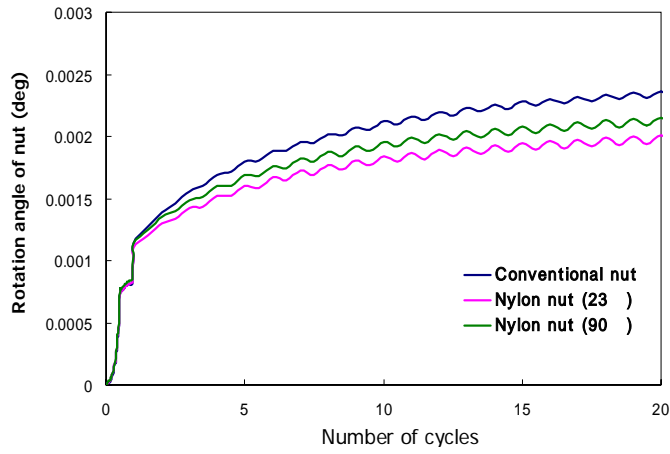


図 3-11 ナットのゆるみ角度の比較(500N)

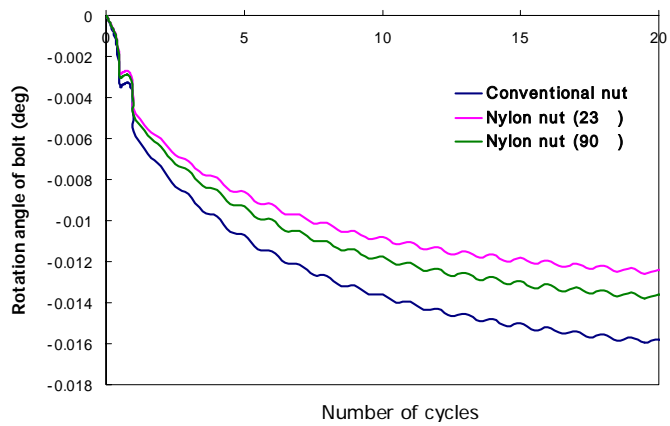


図 3-12 ボルトのねじれ角度の比較(500N)

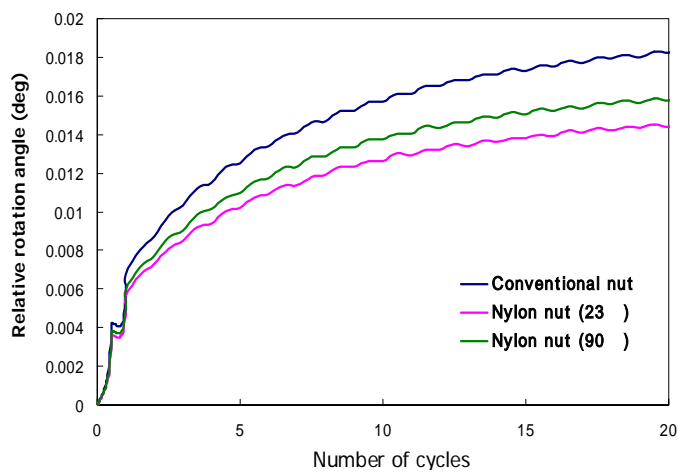


図 3-13 相对回転角(500N)

## Loading of 600N

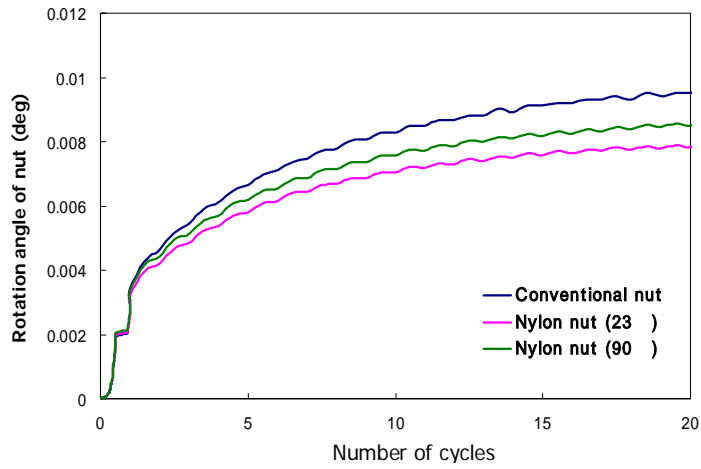


図 3-14 ナットのゆるみ角度の比較 (600N)

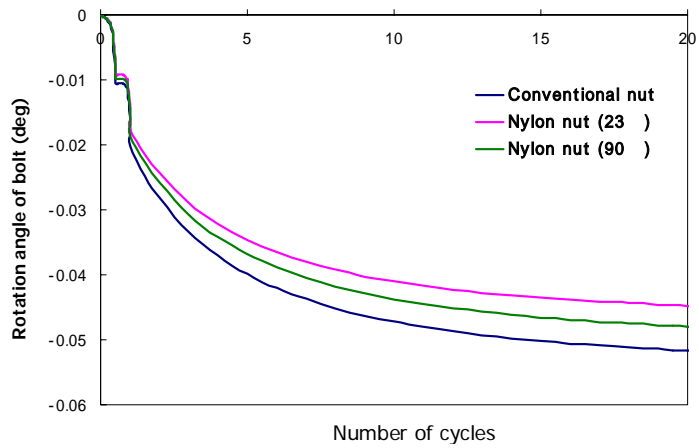


図 3-15 ボルトのねじれ角度の比較 (600N)

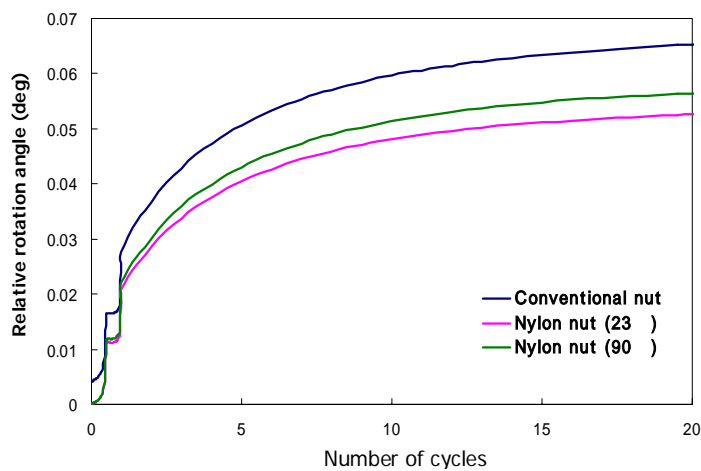


図 3-16 相対回転角 (600N)

## Loading of 900N

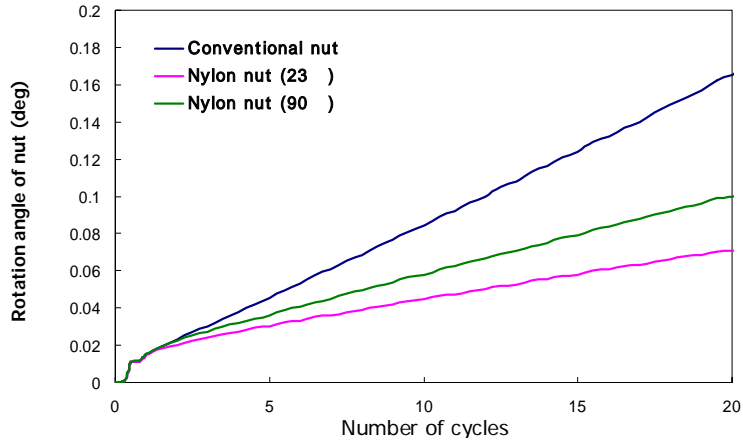


図 3-17 ナットのゆるみ角度の比較 (900N)

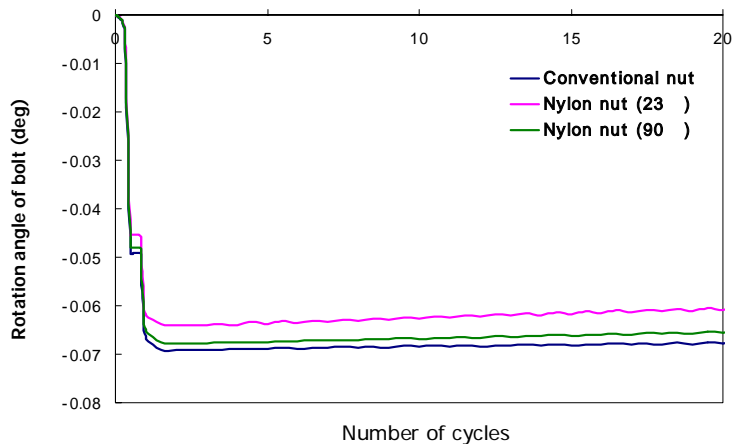


図 3-18 ボルトのねじれ角度の比較 (900N)

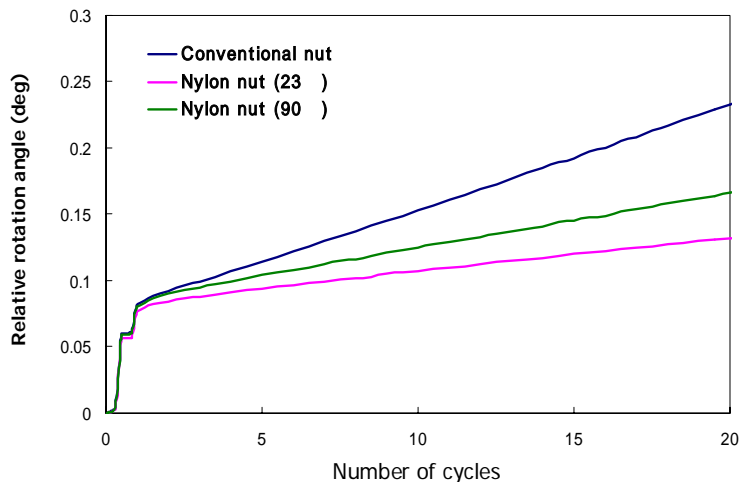


図 3-19 相対回転角度 (900N)



めねじのねじ山数がピッチ 5 とピッチ 4 の通常のナットでの微小座面すべりを起こした  
 場合の相対回転角を比較する。

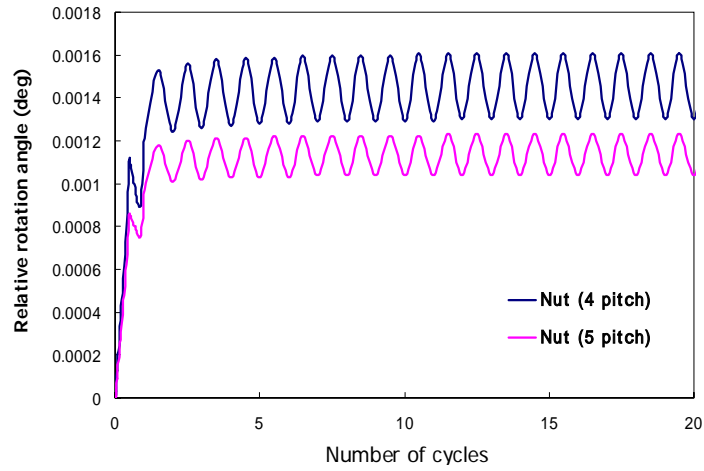


図 3-20 通常のナットの相対回転角 (300N)

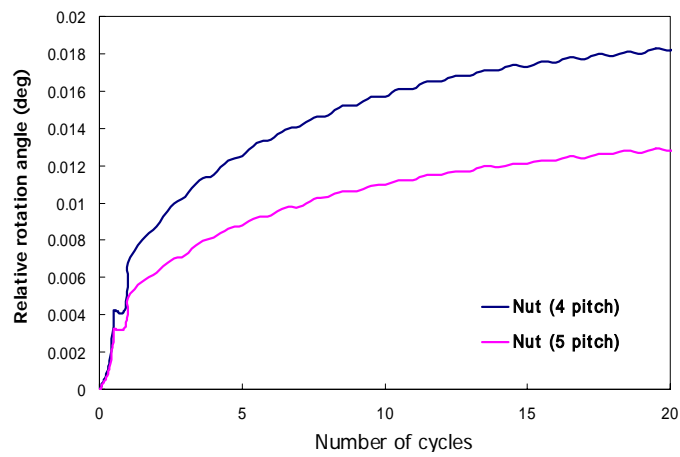


図 3-21 通常のナットの相対回転角 (500N)

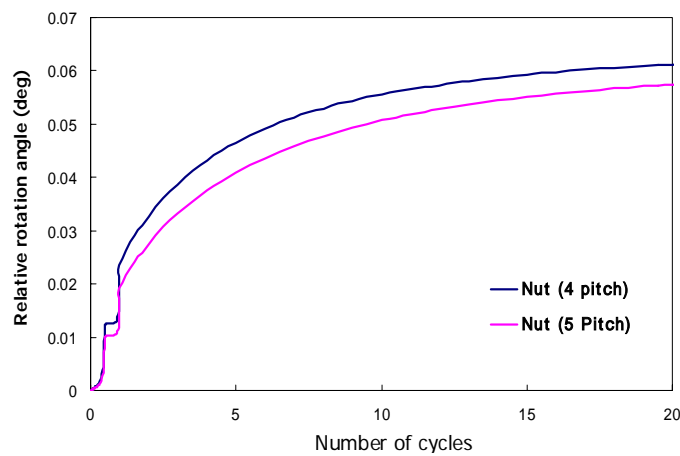


図 3-22 通常のナットの相対回転角 (600N)

### 3.5 考察

ナイロんなットと通常のナットの相対回転角の推移を見ていくと完全座面すべりのときと同様にナイロんなットの方がゆるみ方向の回転角度が若干小さくなっているのが分かる。これはナイロンのプリベリング力によってナットの回転とボルトのねじれを抑えているためだと思われる。

各加振力の相対回転角の推移を見て行くと、いずれの回転角もしだいに傾きが小さく緩やかになっている。20 サイクル進んだとき、1 サイクルあたりのそれぞれの相対回転の速度がどのようになっているかを図 3-23 に示した。Fcr は座面すべり開始荷重のことであり、締結力×摩擦係数で与えられる。

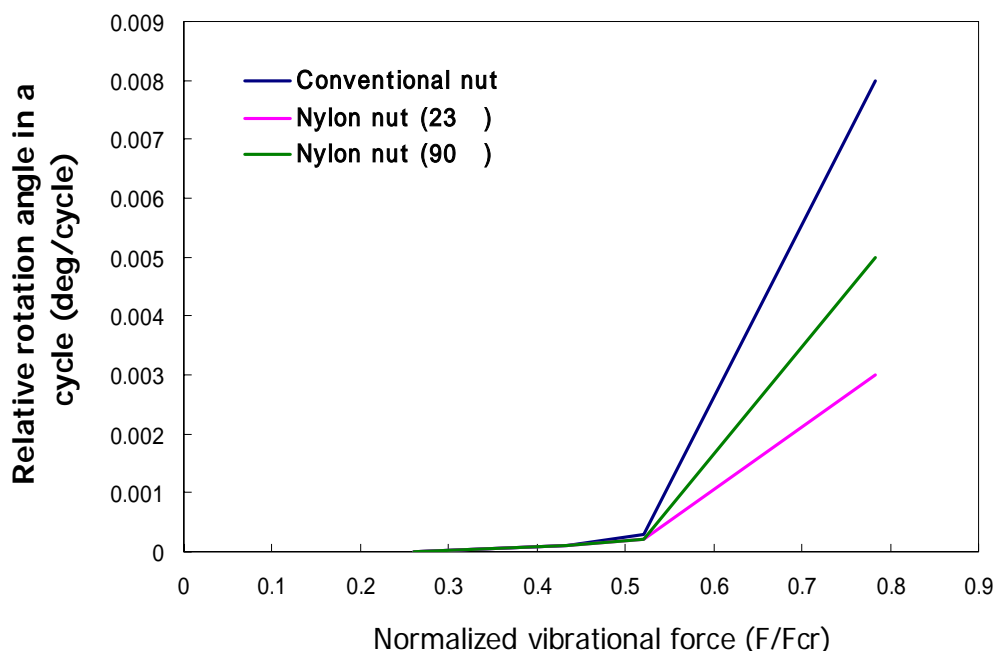


図 3-23 相対回転速度

ゆるみ開始点を見てみるといずれのナットもほぼ一致していることから、座面微小すべりにおいてもゆるみの発生する加振や変位は変わらないことが分かる。ゆるみ速度の推移を見て行くと通常のナットに比べてナイロんなットの方がゆるみ速度が小さいことが分かる。また座面微小すべりにおいても常温のナイロんなットの方が高温のナイロんなットに比べてゆるみの速度が小さい。

次にねじ山のピッチ数違いの通常のナットを比較してみる。ピッチ数4とピッチ数5のナットを比較するとピッチ数5のナットの方が相対回転角が小さくなっている。これはねじ山のピッチ数が多いほうがねじ面との接触面積が多いため、固着の領域が増えて相対回転角が小さくなっていると思われる。また、少しずつ加振力が増加していくとピッチ数4とピッチ数5であまり差が生じなくなってくる。加振力が大きくなるとすべり領域が増えるために相対回転角の差が小さくなっていると考えられる。以下に 20 サイクル目のピッチ数違いの通常のナットの接触状態を 300N と 600N について示す。

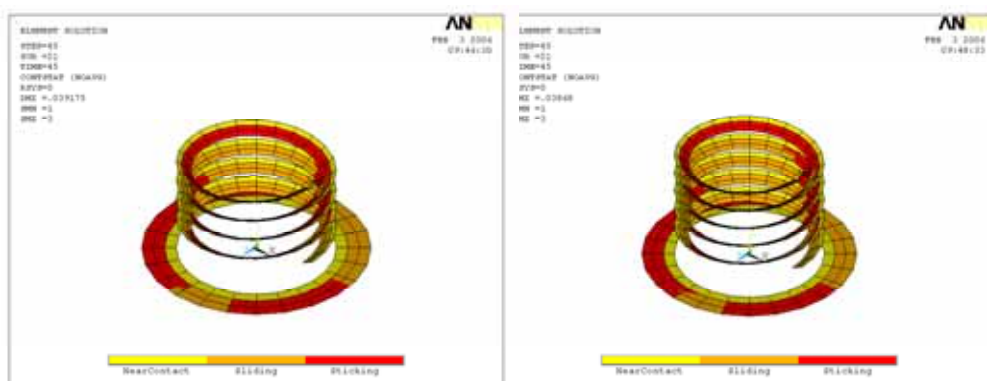


図 3-24 300N 時の接触状態の比較 (左がねじ山のピッチ数4、右が5)

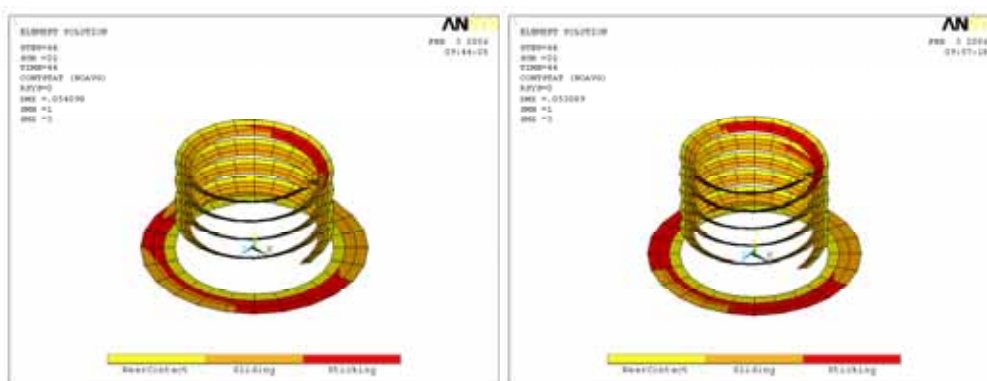


図 3-25 600N 時の接触状態の比較

またねじ山のピッチ数 5 の通常のナットの相対回転角とナイロンの相対回転角を図 3-26 に示す。比べてみると加振力が 500N 程度のときは通常のナットのほうが回転角が小さい。しかし、少しずつ加振力を強めて行くと 600N のあたりでナイロンの相対回転角と通常のナットの相対回転角が交差する。完全座面すべりではナイロンの相対回転角の方がゆるみの進行が遅かったことを考えるとこの後加振力を強めて行くとナイロンの相対回転角が小さくなっていくと思われる。

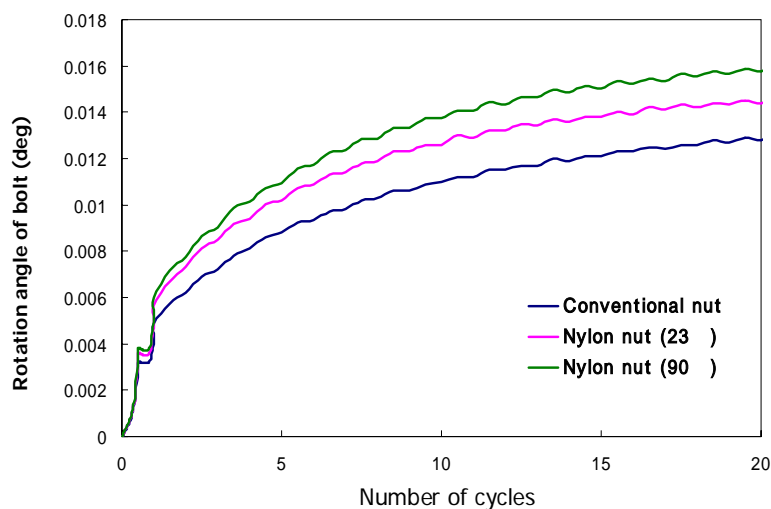


図 3-26 相対回転角度の比較 (500N)

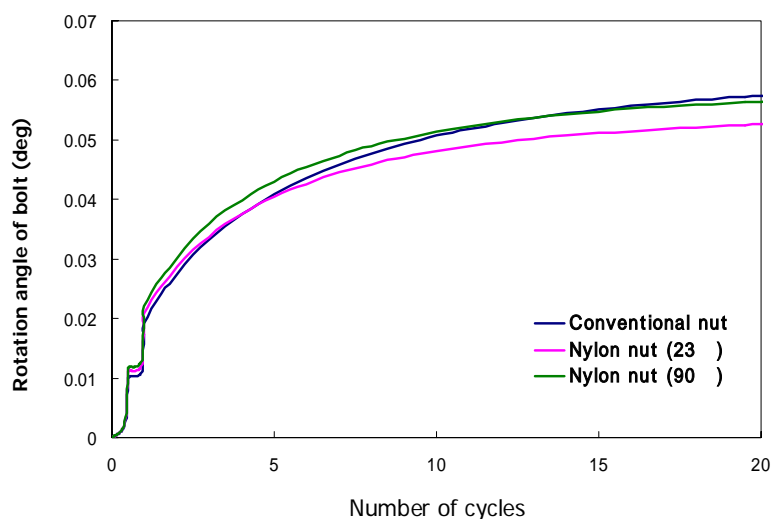


図 3-27 相対回転角度の比較 (600N)

### 3.6 結言

本章では温度別にナイロンナットの微小座面すべりを三次元有限要素法モデルを用いてシミュレーションし、通常の六角ナットのシミュレーションとの比較を行った。以下に本章の結論を述べる。

・加振力 600N 程度までの微小座面すべりであればナイロンナットよりも同じねじ山数のナットの方がゆるみが進行しない。しかし、それ以上の加振を与えていくとナイロンナットの方がゆるみの進行が遅くなる。

加振力が増加するほど完全座面すべりに近くなり、ナイロンナットの方がゆるみの進行が遅くなる。しかしながら、座面微小すべりが発生するのであまりゆるみ止め効果は期待できない。

# 第 4 章 高温状況下長時間使用におけるナイロンの性能評価

## 4.1 緒言

これまで高温状況下でのナイロンの解析はヤング率、線膨張係数の変動のみを考慮に入れて行ってきた。しかし実際にナイロンのような高分子材料を高温で使用するとクリープ現象を引き起こすことがある。クリープは物体に力が加わった場合に時間とともにその変形が進行する現象であり、その進行は応力と時間に比例する。

ナイロンはナイロン部分で生じるプリベリントルクによってゆるみの進行を抑えたとされている。しかし、ナイロンを高温状況下で長時間使用する場合、クリープによってナイロン部分のねじ面で応力緩和が発生しプリベリントルクが減少することが考えられる。

本解析ではナイロンを高温状況下で長時間使用した際にどのようにプリベリントルクが変動するか調べる。三次元有限要素法モデルを用いてクリープ解析をするのは困難なので二次元の軸対称モデルを使用する。そして長時間たった後のプリベリントルクを三次元ナイロンのプリベリントルクと比較し、そのゆるみ止め効果を推測する。

本章の構成を以下に記す

- ・緒言
- ・クリープについて
- ・M48 ナイロンナットクリープ解析
- ・M10 ナイロンナットクリープ解析
- ・考察
- ・結言

## 4.2 クリープについて

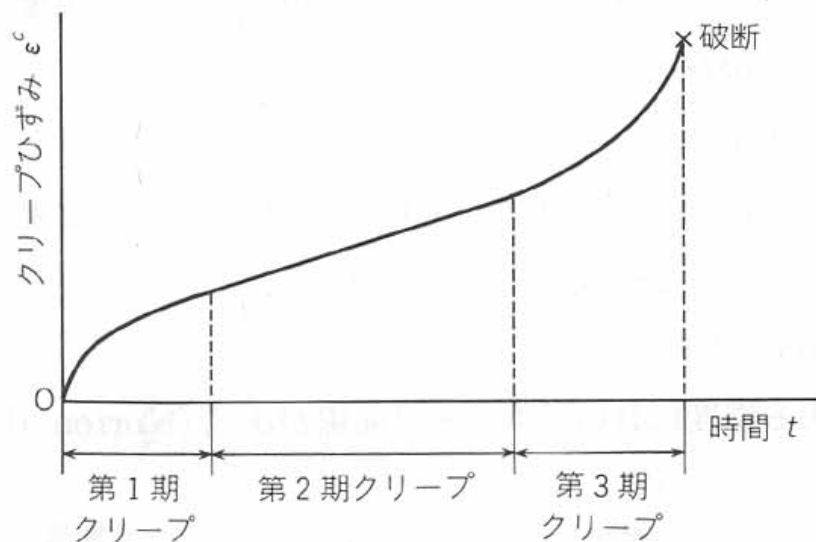


図 4-1 クリープ曲線

矢川元基/宮崎則幸 「有限要素法による熱応力・クリープ・熱伝導解析」

Figのようにクリープひずみは三段階に分けられる。第一期ではひずみ速度が時間とともに減少し、第二期ではほぼ一定のひずみ速度をもつ。そして第三期ではひずみ速度が次第に増加し、最終的には破断へと繋がる。

クリープひずみ( $\varepsilon_c$ )は応力( )と時間( $t$ )と温度( $T$ )を変数にとるので一般的には

$\varepsilon_c = f(\sigma, t, T)$  の形で表される。しかしながら応力や温度が変動する際には硬化則が必要になってくる。この硬化則において、クリープひずみが速度がその時点の応力と温度およびクリープ開始からの時間に依存すると仮定するものを時間硬化則と言う。また、この応力の反転にも対応できる時間硬化則として修正時間硬化則が提案されている。以下に修正時間硬化則のクリープ式を示す。

$$\varepsilon_c = C_1 \sigma^{C_2} t^{C_3+1} e^{-C_4/T} \quad (C_1 > 0)$$

修正時間硬化則は第一期クリープに対応している。本解析ではクリープの進行をこの修正時間硬化則を用いてシミュレーションに導入する。

修正時間硬化則のクリープ式の係数はグラフとの合わせこみによって求める。

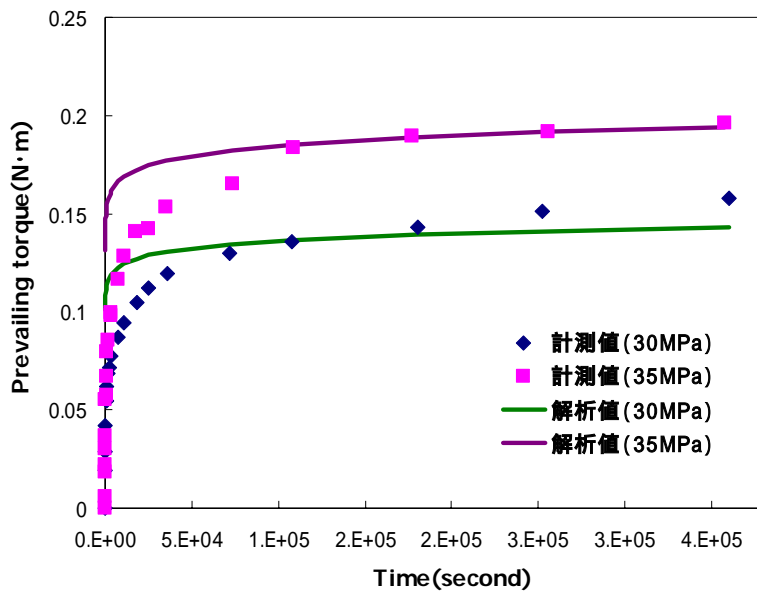


図 4-2 応力別クリープひずみ(80 )

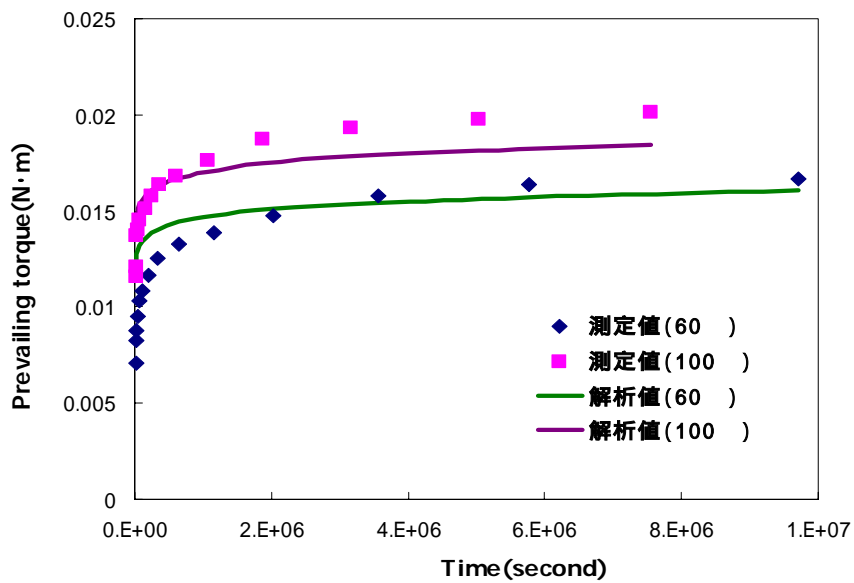


図 4-3 温度別クリープひずみ(9.8MPa)

図 4-2、4-3 は旭化成の計測値を使用

C2に関しては図 4-2 の応力別のクリープひずみのグラフ、C4に関しては図 4-3 の温度別のクリープのグラフを用いて求めます。その後クリープ曲線の傾きから C3 を求め、最後にグラフから C1 を求めます。このような割り出しによって C1=2.31E-4、C2 = 1.98、C3=-0.96、C4 = 288 となった。



## 4.3 M48 ナイロンのクリープ解析

### 4.3.1 有限要素法解析手法

本解析ではM48のナイロンのクリープ解析を行う。このM48のナイロンのナットは某建設機メーカーで使用されているものであり、有限要素法のモデルは以下のような二次元の軸対称モデルとなった。ボルトとナットに締結力を与えるだけなのでボルトのねじ部以外の部位、被締結体は省略した。

M48のボルト、M48のナイロンのナットはそれぞれピッチ2mmの特殊なボルトとナットを使用している。M48ボルトのおねじのねじ山数は27ピッチであり、M48ナイロンのナットでは鉄鋼部のめねじのねじ山数が17ピッチ、ナイロン部のめねじのねじ山数が5ピッチとなっている。ナイロンのナットのプリベリントルクは測定値をもとに5で136N・mとなるようにナイロンのねじ部をボルト側に食い込ませて調整した。

拘束条件は、ボルトの中心軸をx軸方向拘束、ボルトの下端をy軸方向拘束、ナイロンのナットの下端をy軸方向拘束としている。またナイロンのナットの下端にy軸方向0.057mmの変位を与え、軸力430kNを発生させる。接触要素はナイロンのナットの鉄鋼部ではボルト圧力側ねじ山・ナット圧力側ねじ山間のみ設定し、ナイロン部ではボルト圧力側ねじ山・ナット圧力側ねじ山間、ボルト非圧力側ねじ山・ナイロン非圧力側ねじ山間に設定する。ナイロン部とナットの鉄鋼部の接触は固着(常時)を設定した。また、接触についてはすべて拡大ラグランジュ法を用い、計算時間短縮のために接触は非対称接触を用いた。

材料特性に関しては、鉄鋼部(SS400)はヤング率205GPa、ポアソン比0.3、摩擦係数0.115、線膨張係数 $11.6E-6/$ を使用した。ナイロン部はヤング率3430MPa(5 )・990MPa(90 )、ポアソン比0.34、摩擦係数0.45、線膨張係数 $9.0E-5/$  (5 )・ $13.7E-5/$  (90 )を使用した。また修正時間硬化則のクリープ式によってナイロン部にはクリープ特性を設定する。

解析方法は5の物性値でプリベリントルクが136N・mとなるボルトナット締結モデルに対して90の物性値を使用した際に、プリベリントルクがどのように変動するかを見る。次に90の物性値を用いたままクリープ解析を行い、時間とともにプリベリントルクがどのように変動するか調べる。

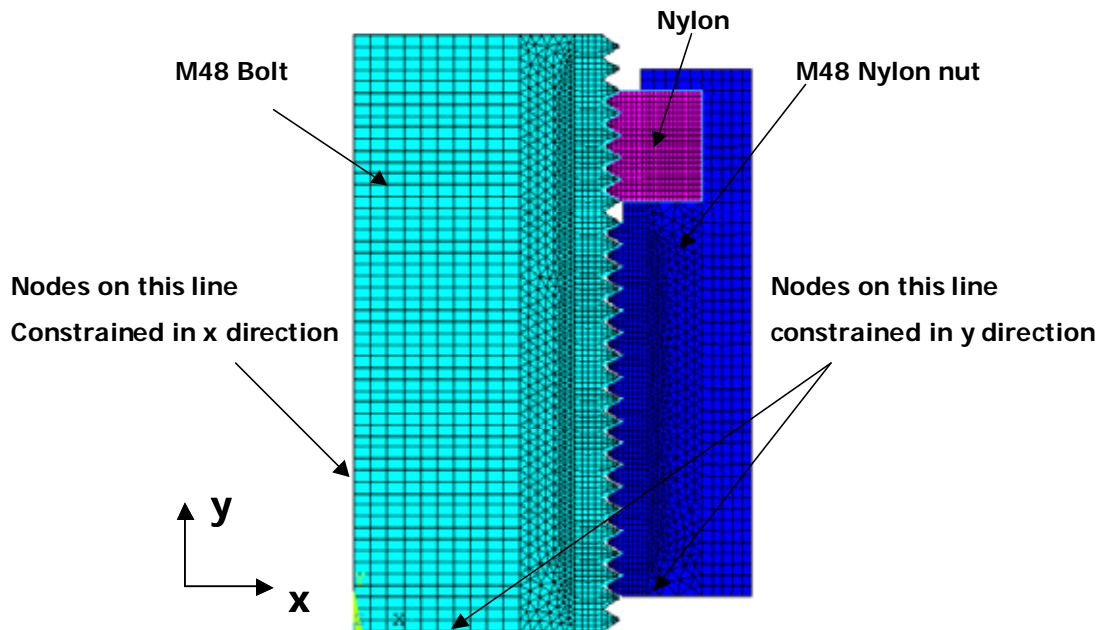


図 4-4 M48 ボルトナット締結二次元モデル(ナイロンナット)

### 4.3.2 解析結果

まず解析による 5 と 90 のプリベリントルクを某建設機メーカーによる測定値と比較する。結果を表 1 に示す。

	5	90
計測値 (N・m)	136	98
解析値 (N・m)	136	81

表1 90 のプリベリントルクの比較

計測値と解析値を比較してみると 90 のプリベリントルクの値は解析値の方が少し計測値より小さくなっているがほぼ一致していると考えられる。これより温度差によるプリベリントルクの変動を物性値によって再現できた。

次にクリープ解析によるプリベリントルクの変動を見る。グラフを図 4-5 に示す。

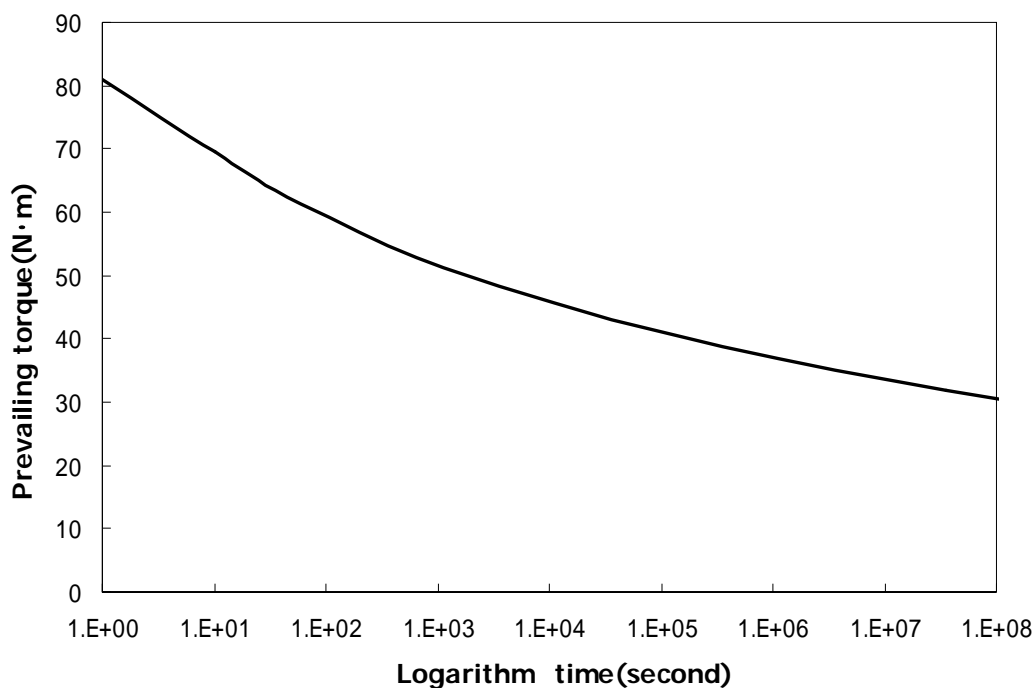


図 4-5 プリベリントルクの変動(M48 ナイロンナット)

プリベリントルクの変動をみると最初の数十秒で急激に減少し、その後緩やかに減少が進んでいるのがわかる。次に 3000 時間実機で使用後のプリベリントルクの計測値を解析値と比較する。結果を表2に示す

	3000(Hr)
計測値 (N·m)	42.5
解析値 (N·m)	33.4

表2 長時間経過後のプリベリントルクの比較

計測値と解析値を比較すると 3000 時間後ではほぼ等しくなっている。実機で 3000 時間使用であることを踏まえると、長期的に見た場合においてはクリープによるプリベリントルクの減少はほぼ再現できたと思われる。

## 4.4 M10 ナイロンのクリープ解析

### 4.4.1 有限要素法解析手法

M48 のナイロンのクリープ解析でプリベリントルクの減少を合わせこむことができたので同じ物性値と修正時間硬化則のクリープ式を用いてM10 ナイロンのクリープ解析を行う。

メートル並目ねじのM10 のボルト、M10 のナイロンナットを使用している。M10 ボルトのおねじのねじ山数は9ピッチであり、M10 ナイロンナットでは鉄鋼部のめねじのねじ山数が4ピッチ、ナイロン部のめねじのねじ山数が1ピッチとしている。ナイロンナットのプリベリントルクはJIS B1056の表8の5回目のねじ戻しの値を参考に常温(23℃)で1N・mとなるようにナイロンのねじ部をボルト側に食い込ませて調整した。

拘束条件は、ボルトの中心軸をx軸方向拘束、ボルトの下端をy軸方向拘束、ナイロンナットの下端をy軸方向拘束としている。またナイロンナットの下端にy軸方向0.0351mmの変位を与え、軸力10kNを発生させる。接触要素はナイロンナットの鉄鋼部ではボルト圧力側ねじ山・ナット圧力側ねじ山間のみ設定し、ナイロン部ではボルト圧力側ねじ山・ナット圧力側ねじ山間、ボルト非圧力側ねじ山・ナイロン非圧力側ねじ山間に設定する。ナイロン部とナットの鉄鋼部の接触は固着(常時)を設定した。また、接触についてはすべて拡大ラグランジュ法を用い、計算時間短縮のために接触は非対称接触を用いた。

材料特性に関しては、鉄鋼部(SS400)はヤング率205GPa、ポアソン比0.3、摩擦係数0.115、線膨張係数 $11.6E-6/℃$ を使用した。ナイロン部はヤング率3000MPa(23℃)・990MPa(90℃)、ポアソン比0.34、摩擦係数0.45、線膨張係数 $8.0E-5/℃$ (23℃)・ $13.7E-5/℃$ (90℃)を使用した。また修正時間硬化則のクリープ式によってナイロン部にはクリープ特性を設定する。

解析は4.3のM48ナイロンナットと同様に90℃の状態でのクリープ解析を行い、プリベリントルクの変動を調べる。

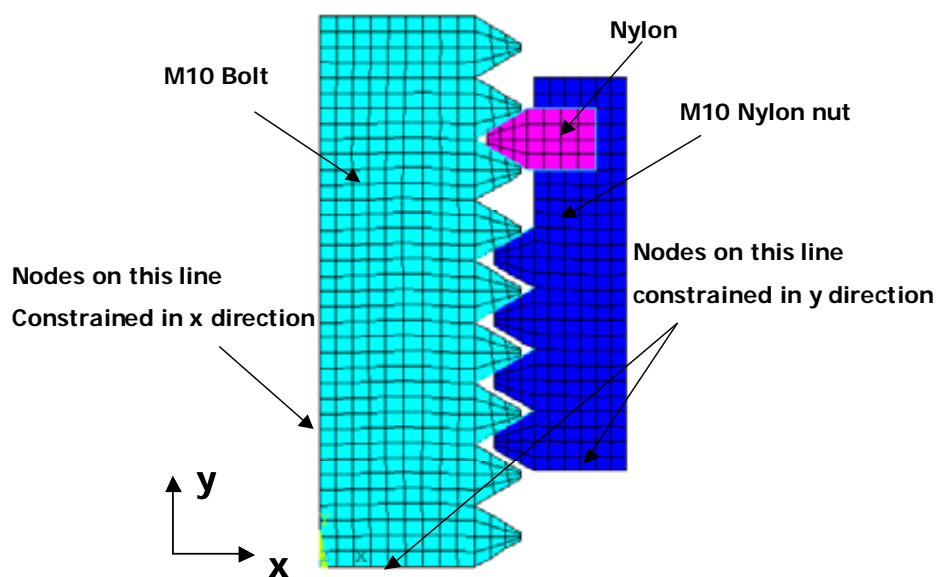


図 4-6 M10 ボルトナット締結二次元モデル(ナイロンのナット)

#### 4.4.2 解析結果

プリベリグトルクの推移を以下の図 4-7 に示す。

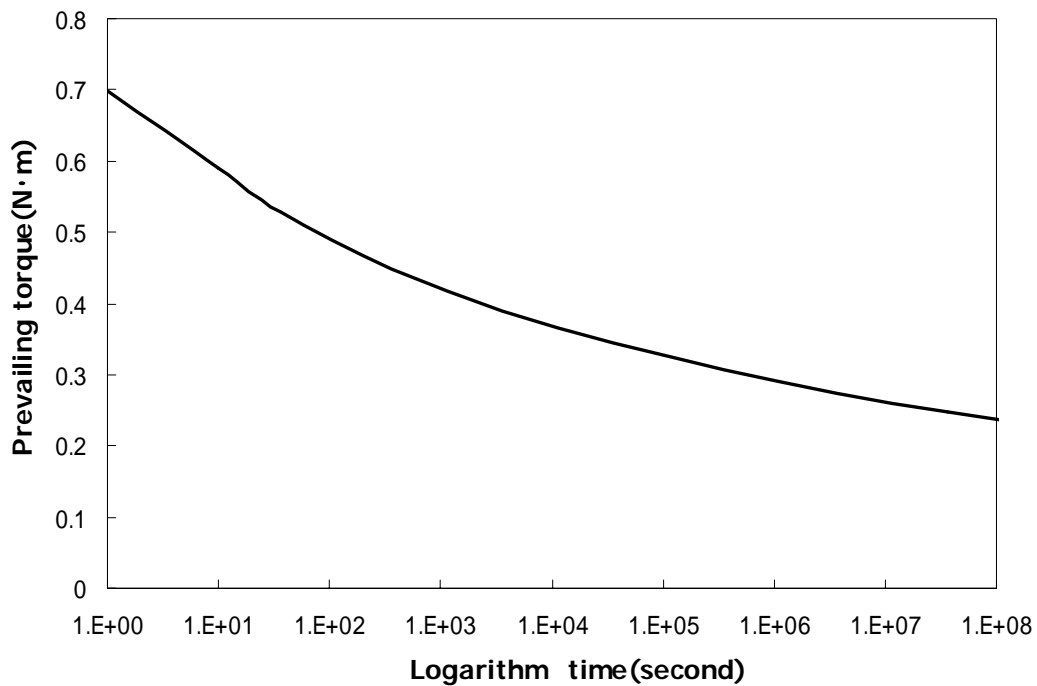


図 4-7 プリベリグトルクの変動(M10 ナイロンのナット)

プリベリントルクの変動を見てみると減少の仕方が M48 ナイロンナットの解析とほぼ同じ形をしている。最初の数十秒の間に急激に減少し、その後は緩やかに減少が進んでいっている。

## 4.5 考察

図 4-7 を見ると最終的には  $0.2\text{N}\cdot\text{m}$  付近にプリベリントルクが落ち着いているのが分かる。第 2 章、第 3 章で行った高温のナイロンナットのプリベリングが  $0.34\text{N}\cdot\text{m}$  だったことを考えるとあまりゆるみ進行を抑える効果は期待できないと考えられる。

## 4.6 結言

本章では高温のナイロンナットのクリープ現象を二次元有限要素法モデルを用いてシミュレーションし、M48のナイロンナットのモデルからM10のナイロンナットのクリープ現象を推測した。以下に本章の結言を述べる。

- ・クリープによるプリベリングトルクの減少を二次元有限要素法モデルを用いたシミュレーションによって再現できた。
- ・クリープによってプリベリングトルクが減少するため、ナイロンナットのゆるみ止めはさらに効果が期待できなくなると考えられる。



## 第5章 結言

### 5.1 本研究の結言

以下に本研究の結言を示す。

・ナイロンナットは高温ではわずかししかゆるみ止め効果が見られず、クリープを考えるとほとんど効果はないように思われる。常温においては若干の効果が見られたがあまりゆるみ止め効果は大きくない。

## 参考文献

- [1] 山本晃、賀勢晋司 “軸直角振動によるねじのゆるみに関する研究-ゆるみ機構の解明”、精密機械 43 巻 4 号 p82(1977)
  
- [2] 横山喬 “鉄道車両偽装レール締結部の破損リスク評価と三次元有限要素法によるゆるみ挙動解析” 2004 年度 修士論文
  
- [3] 木村成竹 “有限要素法解析によるねじ締結体緩み止め部品の性能評価” 2005 年度 卒業論文
  
- [4] JIS B1056 プリベリングトルク形鋼製六角ナット - 機械的性質及び性能、JISC日本工業標準調査会 (<http://www.jisc.go.jp/index.html>)
  
- [5] 賀勢晋司、吉田諭、石橋久典、岡田学 “ねじ座面滑りとゆるみ(微小滑り時に関する考察)”、日本機械学会 2004 年度年次大会講演論文集(4)、233、3225
  
- [6] 久田俊明、野口裕久 “非線形有限要素法の基礎と応用” p333 (1995) 丸善

以上

1P ~ 51P完

卒業論文

平成 18 年 2 月 3 日

柴田 裕之