



# ねじ締結体のトラブル 原因と対策

## —非回転ゆるみ編—

### 目次

1. ねじのゆるみとは	1
2. ねじのゆるみの種類とその対策	1
● ナットが回転しないで生じるゆるみ	1
(1) 初期ゆるみ（締付け後の塑性変形）	1
(2) 陥没ゆるみ（締付け後の塑性変形 クリープ変形）	3
(3) 微動摩耗によるゆるみ（摩耗）	4
(4) 密封材の永久変形によるゆるみ（締付け後の塑性変形 クリープ変形）	5
(5) 塗装材や厚めつき材の破損によるゆるみ（締付け後の塑性変形）	6
(6) 過大外力によるゆるみ（締付け後の塑性変形）	6
(7) 熱的原因によるゆるみ（温度変化/可逆変化）	7



ハードロック工業株式会社

# 1. ねじのゆるみとは

ねじ締結体は、ねじの締付けによってボルト軸部に発生した引張力（ボルト軸力または軸力という）と被締結部材に発生した圧縮力（締付力という）とにより一体化されています。このねじ締結体に外力が作用していないときは、ボルト軸力と締付力とは互いにつり合っており、この状態における両者を総称して「予張力」といいます。

締付け直後に発生した予張力は、何らかの原因で低下することがあります。このような予張力（軸力及び締付力）の低下を「ねじのゆるみ」といいます。

しかし、どの程度の予張力の低下までがねじ締結体の機能を損なうことがないのかといった具体的な定義付けはいまだなされていないのが現状です。

## 2. ねじのゆるみの種類とその対策

「ねじのゆるみ」は、以下のように大別できます。

- ナットが回転しないで生じるゆるみ
  - (1) 初期ゆるみ（締付け後の塑性変形）
  - (2) 陥没ゆるみ（締付け後の塑性変形 クリープ変形）
  - (3) 微動摩耗によるゆるみ（摩耗）
  - (4) 密封材の永久変形（締付け後の塑性変形 クリープ変形）
  - (5) 塗装材の破損によるゆるみ（締付け後の塑性変形）
  - (6) 過大外力によるゆるみ（締付け後の塑性変形）
  - (7) 熱的原因によるゆるみ（温度変化/可逆変化）
- ナットが回転して生じるゆるみ
  - (1) 軸回り方向繰り返し外力によるゆるみ
  - (2) 軸方向繰り返し外力によるゆるみ
  - (3) 軸直角方向繰り返し外力によるゆるみ

ナットが回転しないで生じるゆるみについては、経時変化によるものが多く、事前に対策を立てればある程度防止することが可能となります。

ナットが回転して生じるゆるみは、通常「ねじがゆるむ」と言われるもので、その中でも特に、軸に対して直角な方向（軸直角方向、あるいはトランスバース方向）の繰り返し外力によるゆるみについては、いまだ有効な対策を立てることが難しく、設計技術者にとっては非常に頭の痛いところです。

今回は、ナットが回転しないで生じるゆるみ（非回転ゆるみ）の種類について概説するとともに、そのゆるみ止めの対策について紹介していきます。

- ナットが回転しないで生じるゆるみ
  - (1) 初期ゆるみ（締付け後の塑性変形）

ねじ締結体は、負荷ねじ面、ナット座面、ボルト頭座面、被締結部材同士の接合面のそれぞれにおいて圧縮力の下に接触しています。これらの各接触面には、表面の粗さ、うねり、微小な凹凸部分が程度の差はあれ存在するため、締付け後に作用する外力の変動によって圧縮力が変動し、局所的なへたりが時間の経過とともに進行し凹凸が平坦化していきます。その際、締付け長さ（ボルト

頭座面とナット座面間の距離)の減少につながり、軸力の低下をきたすこととなります。またボルトやナットが安定的な状態で締付けられておらず、締結後に安定的な状態に移行した時に軸力の低下が発生します。これらを初期ゆるみといい、どのようなねじ締結体においても程度の差はあれ、必ず発生する現象となります。しかし、この現象は、へたるだけへたった後は進行が止まるため、この現象をあらかじめ理解できていればそれほど危険性はありません。

一般的に通常の締結では、へたり量は  $10\mu\text{m}$  程度以下と言われており、少なくとも 5-10% 程度の軸力低下は発生すると考えた方が良いでしょう。

\*参考までに、ユンカーによれば、接合面のへたり量については、ねじ面で  $5\mu\text{m}$ 、切削仕上げの接合面では軸方向の荷重が加わる場合は  $4\mu\text{m}$ 、軸直角方向の荷重が加わる場合は  $8\mu\text{m}$ 、一方、研磨仕上げの接合面では、軸方向の荷重が加わる場合は  $2\mu\text{m}$ 、軸直角方向の荷重が加わる場合は  $4\mu\text{m}$  と言われております。

例えば、切削加工状態の 2 枚の鉄板をボルト・ナット、平座金で締結し、そこに軸方向に繰返し外力が作用するケースを想定します。もしこの考えに基づくとすれば、

ねじ面でのへたり量は  $5\mu\text{m}$

接合面でのへたり量はボルト頭座面と鉄板、鉄板同士、鉄板とナット座面の 3 か所なので、 $4(\mu\text{m}) \times 3(\text{か所}) = 12(\mu\text{m})$

したがって、全体のへたり量としては、 $5+12=17(\mu\text{m})$ ということになります。

なお、被締結部材数が多くなれば接合面が当然増えますので、へたり量もより大きくなる可能性があり、設計、施工の際にはこの分を考慮する必要があります。

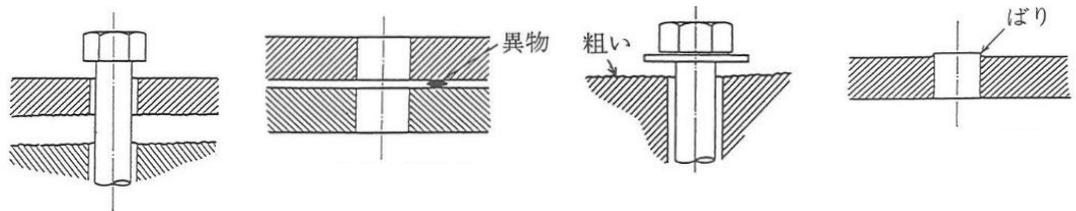


図 1. ボルト・ナット・座金・被締結部材に及ぼす初期ゆるみの例<sup>1)</sup>。

### <初期ゆるみ防止対策>

なじみ・へたりを小さくする方法として、以下が挙げられます。

- ・接合面をなめらかにする。面粗さを小さくする（機械加工品など）。
- ・平面度をよくする。
- ・接合面の数を少なくする。

実例 1：初期なじみを除去する方法として、ボルトとナットを被締結部材に設定締付けトルクの半分程度のトルクで 2-3 回程度着脱させ、最後に本締めを行います。こうすることで、ボルト・ナットの負荷ねじ面、ナット座面、ボルト頭座面、被締結部材同士の接合面のそれぞれの加工時にできた小さな凹凸をある程度取り除くことができ、初期の軸力低下が防がれるケースがあります。

実例 2：特に作業性を重視される自動車関連業界では、事前に軸力低下分（10-20%）を初期軸力に加算し強く締付けて管理されているケースがあります。ただし、温度が高い環境下で、ねじ締結体に荷重が長時間かかる条件下では、初期軸力に軸力低下分を加算しても、かえってクリープ（後述）を加速させ軸力低下を促進させるので注意が必要です。

## (2) 陥没ゆるみ（締付け後の塑性変形 クリープ変形）

被締結部材とナットやボルトの接触部における面圧が高すぎると、小さな表面の凸凹が多少平坦化する程度を超えて被締結部材の接触部表面が塑性変形する場合があります。この変形が締付けの際にだけ生じ、被締結部材の加工硬化現象によって進行が止まる場合にはあまり問題にはなりません。が、締付け後に時間経過によるクリープ（後述）や外力の作用のために、さらに進行する場合は重大な問題となりえます。この種類のゆるみを陥没ゆるみといいます。

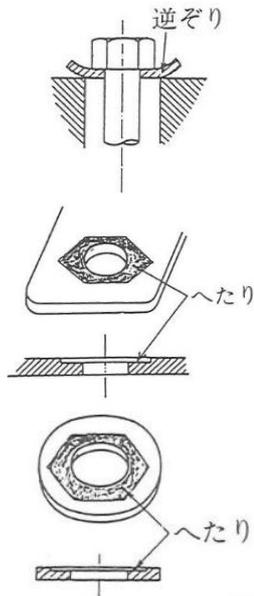


図2. 陥没ゆるみの例<sup>1)</sup>。



図3. 平座金が陥没した例。

### <陥没ゆるみ防止対策>

表1. 各種材料の限界面圧<sup>2)</sup> (VDI<sup>3)</sup> によるデータ参照)。

種類	材料 JIS 相当規格	引張強さ (N/mm <sup>2</sup> )	限界面圧 (N/mm <sup>2</sup> )
低炭素鋼	S10C	370	260
中炭素鋼	S30C	500	420
熱処理炭素鋼	S45C	800	700
CrMo 鋼	SCM440	1000	850
ステンレス鋼	SUS316	500-700	210
铸铁	FC150	150	600
	FC250	250	800
	FC350	350	900
Mg 合金鋳物	MC2	300	220
Al 合金鋳物	AC2B	-	200
Al 合金	A1200	160	140
	A7075	450	370
FRP	-	-	120-140

- ・ねじ締付け時に発生する座面の面圧が被締結部材の面圧許容値（限界面圧、表1）より小さければ陥没は生じません。したがって、設計をする際には、外力が作用してもボルト軸部の応力

が被締結部材の降伏応力（限界面圧）を超えないように設計する必要があります。

- ・ねじ締付け時の面圧が被締結部材の限界面圧を超える場合には、高強度の座金を採用し、被締結部材の限界面圧以下に面圧を抑えるという対策は有効です。

### 補足：クリープ現象のゆるみ

材料に荷重を長時間負荷した状態にしておくと、時間の経過とともにいつまでも停止することなく、ひずみが増加する現象をクリープといい、一般的に応力と温度が高くなるほど顕著で、通常、絶対温度であらわした融点の 4-5 割程度以上で問題となります。一般的には内部組織が不安定な材料がクリープに弱く、特に SUS304 等には注意が必要です。これにより、ボルトのクリープ伸びや被締結部材の圧縮クリープ等の変形により軸力低下（ゆるみ）が生じることになるのです。

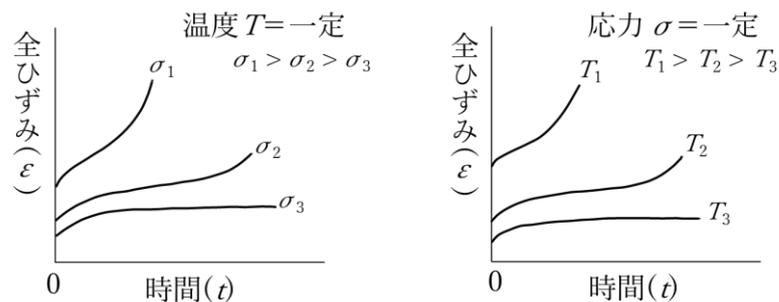


図 4. クリープ試験のひずみ-時間曲線における応力と温度の依存性。

### <クリープによるゆるみ防止対策>

- ・クリープ強さの大きい材料を選定します。代表的な耐クリープ材として、低合金鋼（Mo 鋼、Cr-Mo 鋼）、高クロム鋼（Cr 16%以上）、オーステナイト系耐熱鋼（高 Cr-高 Ni）、耐熱合金（Fe 基、Ni 基、Co 基等）等があります。
- ・締結部周辺の温度を低く保ちます。ねじ締結体から熱源をはなす、冷却する、蓄熱しないようにするなどして、温度が上がりにくい環境を整えることも大切です。
- ・締付けによる応力を小さく押さえます。軸力が低くてもねじ締結体として成り立つような設計をすることも重要です。

注意：事前に軸力低下分を初期軸力に加算して強く締付けることは、作用応力を大きくしてクリープを加速させ軸力低下につながるので効果はほとんどありません。

### (3) 微動摩耗によるゆるみ（摩耗）

接合面の摩耗は微動摩耗によるものが多く見受けられます。被締結部材同士の接触部が外力の作用によって滑り、繰返し回数が増加するほど初期ゆるみによる軸力低下分を除き、摩耗を生じてある程度の軸力低下（ゆるみ）が発生することがあります。

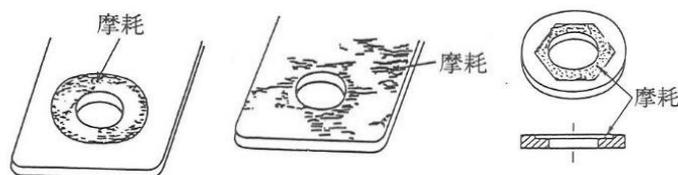


図 5. 微動摩耗によるゆるみの例<sup>1)</sup>。

### <微動摩耗によるゆるみ防止対策>

- ・耐摩耗性のよい材料（硬い材料）にします。
- ・ボルトと被締結部材の強度を上げて、大きな軸力を与え、すべり量をなくすか小さくします。
- ・接触面積を大きくして面圧を下げます。
- ・大きな軸力を与え、接合面近辺の剛性を上げて弾性変形に起因する微小すべりを小さくします。
- ・すべり面に潤滑剤を塗布して潤滑させます。

注意：すべりが存在する場合には、軸力が大きいほど摩耗量は大きくなります。したがってすべりがあっても摩耗以外に問題がないのであれば、軸力は小さいほうが良好です。

### (4) 密封材の永久変形によるゆるみ（締付け後の塑性変形 クリープ変形）

ガスケット等の異種材料の密封材が用いられている場合、そのへたりによる軸力低下（ゆるみ）を考慮する必要があります。密封材はその材料構成から、金属とは異なる圧縮特性を持つことが多く、特に温度や時間効果が大きいと予想されます。

### <ガスケットの締付けトラブルとその対策>

プラントにおけるガスケットのトラブルは多々ありますが、施工不良によるものが60%以上占めると言われており、その中でもガスケットが永久変形してトラブルにつながるケースは以下の通りです。

#### i. ねじの締付け不足によるトラブル

ねじの締付け不足やクリープ緩和で締付面圧低下が起こった場合には、フランジとガスケット間の摩擦力が低下し内圧によってガスケットが押し出され、全周もしくは製品の一部分が永久変形もしくは破断して漏れる場合があります。

#### (ゆるみ防止対策)

- ・目標締付け力が達成できるようにトルクレンチを用いてねじの締付け管理を行います。
- ・目標締付け力に耐えうる適切な強度のボルトを選定します。
- ・クリープに対しては、総合的に判断し気密限界面圧の低い（漏れにくい）ガスケット等を利用するのも選択肢の一つとなります。

#### ii. ねじの過剰締付けによるトラブル

ねじの過剰締付けでは、ガスケットが永久変形を乗り越えて圧縮破壊が発生し、多数の周状の亀裂が生じ締付面圧が低下し漏れる場合があります。

#### (ゆるみ防止対策)

- ・目標締付け力がガスケットの限界面圧を超えない軸力となるように締付けトルクを設定し、締付け管理を実施します。

#### iii. ねじの片締めによるトラブル

ガスケットに部分的な「締付け不足」「過剰締付け」もしくは両方ある状態のことをいい、ガスケットの永久変形、破損、圧縮破壊が一部分に生じ、漏れる場合があります。

#### (ゆるみ防止対策)

JIS B 2251: 2008（フランジ継手締付け方法）に準拠し、十分な準備を怠らず、ボルトの仮締付けを行った後、本締付けを適切に実施することが重要です。特に、フランジボルト本数が12本以上の場合は、締付け中のボルト同士の弾性相互作用による目標締付け力の達成率低下を防

ぐために、指定された締付けトルクの 10%アップを目標締付けトルクとしていくことが記されておりますので、十分な注意が必要となります。

#### (5) 塗装材や厚めっき材の破損によるゆるみ（締付け後の塑性変形）

塗装や溶融亜鉛めっきのような厚めっきを施したボルト・ナットや被締結部材を締付ける場合、塗装やめっきがはがれることがあり、その程度の差によって軸力の低下の差はあるものの発生する場合があります。

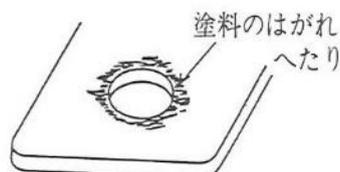


図 6. 塗装材の破損によるゆるみの例<sup>1)</sup>。

#### <塗装材や厚めっき材の破損によるゆるみ防止対策>

- ・ボルト頭面、ナット座面、座金の接合面に対しては、塗装されている場合は、一旦塗装を落とし、ねじ締結を行った後、塗装を施すと、塗装の破損による軸力低下を防ぐことができます。
- ・溶融亜鉛めっきのようなめっきの膜厚が  $49\mu\text{m}$  を超える厚めっき材の場合、締付け時、締付け後の外力によって、めっきの破損が発生する可能性が非常に高いので、設計・施工時に軸力低下分を考慮した対策が重要となりますが、実際のところ管理していくのは非常に難しいところがあります。

#### (6) 過大外力によるゆるみ（締付け後の塑性変形）

ボルトまたは被締結部材が締付け後の外力によって塑性変形を起こすと軸力低下（ゆるみ）が生じます。被締結部材の面圧による陥没以外に、外形的な塑性変形が軸力低下（ゆるみ）の原因になるのは当然のことと言えます。ボルト自体の塑性変形の進行による軸力低下（ゆるみ）は、塑性域締付け等で高い軸力を与えボルトがさらに塑性変形を起こしやすい場合に検討が必要です。

##### \* 塑性域締付け方法とは

JIS B 1083 では、締付け管理を「締付け作業における初期締付け力の管理」と定義しています。一般に直接締付け力を観察しながら締付けを行うことはできないので、ある指標によって締付け力を推定し、それによって締付け力を管理していきます。

機械部品のねじ締結では、一般に初期締付け力の目標値をボルトの規格降伏点又は耐力の 60-70%の弾性域にとり、締結体に外力が作用してもボルトが弾性限界を超えないように十分余裕を見込んで設計されています。しかし、近年高い締付け力を得るとともにボルト自体の特性を利用してばらつきのある小さな締付け管理を行うためにボルトの弾性限界又は塑性域まで締付ける回転角法による塑性域締付け方法も行われるようになっております。

回転角法による塑性域締付け方法では、初期締付け力のばらつきは、主として締付け時のボルトの降伏点に依存し、回転角の誤差の影響は受けにくく、そのボルトの能力を最大限に利用できる（より高い締付け力が得られる）という大きな利点を持ちますが、ボルトのねじ部又は円筒部が塑性変形を起こすため、ボルトの延性が小さい場合又はボルトを再使用する場合には注意が必要です。また、JIS B 1051 ではボルトの降伏点及び引張強さの最小値しか規定されていないため、塑性域の回転角法締付けでは、使用するボルトの降伏点及び引張強さの上限値を管理していく必

要があります。

#### <過大外力によるゆるみ防止対策>

- ・ボルトに引張負荷荷重が作用してもボルトが降伏しない締付けとします。
- ・ねじ締結体の内外力比を小さくしてボルト引張負荷荷重を小さく押さえます。
- ・降伏後の加工硬化量の大きいボルトを使います。

#### (7) 熱的原因によるゆるみ (温度変化/可逆変化)

締結体各部の材料に違いがあり、ねじ締付け時と使用時に温度変化があると、線膨張係数(表2)の違いによる熱変形のため軸力が変化します。

#### <熱的原因によるゆるみ防止対策>

- ・ボルトと被締結部材の熱膨張係数の差を小さくします。
- ・締結部の温度変化を小さくします。

表 2. 各種材料の線膨張係数 (単位:  $10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ )<sup>4)</sup>。

材料	線膨張係数
低炭素鋼	11.3-11.6
中炭素鋼	10.7
高炭素鋼	9.6-10.9
クロム鋼	12.6
クロムモリブデン鋼	12.3
ニッケルクロム鋼	13.3
マルテンサイト系ステンレス鋼	9.9
フェライト系ステンレス鋼	10.8
オーステナイト系ステンレス鋼	17.3
ねずみ鉄	9.2-11.8
快削黄銅	20.6
りん青銅	18.2
純アルミニウム	23.6
アルミニウム鋳物合金	21.5
アルミニウムダイカスト合金	21.0
ジュラルミン	23.4
超ジュラルミン	23.2
超々ジュラルミン	23.6

今回は、「ねじ締結体のトラブル 原因と対策 —非回転ゆるみ編—」と題して、非回転ゆるみとその対策について概説しました。次回以降、3種類の回転ゆるみ（軸回り、軸方向、軸直角方向）について紹介するとともに、その対策について、ばね性座金を用いる初期ゆるみ対策、戻り止め（割りピンなどを用いる機械的回り止め方式、戻しトルクが増大するプリベリングトルクナットなど）、戻り回転を防止するゆるみ止め（ダブルナット、嫌気性接着剤、ハードロックナット）について説明する予定です。また、それに付随してナットが回転して生じるゆるみに対する試験方法：

・NAS式：<https://youtu.be/ywWd0kRG5xo>

・ユンカー式：<https://youtu.be/TjPPuflx9p4>

とゆるみ止めに対する評価についても触れます。引き続きお読みいただければ幸いです。

## 参考文献

この資料は主に以下の書籍を参考にして作成されました。

- ・吉本 勇編：JIS 使い方シリーズ ねじ締結体設計のポイント（改訂版），日本規格協会（2002）.
- ・山本 晃：ねじのおはなし（改訂版），日本規格協会（2003）.
- ・山本 晃監修：JIS 使い方シリーズ ねじ締付機構設計のポイント（改訂版），日本規格協会（1973）.
- ・酒井智次：ねじ締結概論，養賢堂（2000）.

また、引用文献は以下の通りとなっています。

- 1) 酒井智次：ねじ締結概論，養賢堂（2000） p. 98-102.
- 2) 山本晃：ねじ締結の原理と設計，養賢堂（1995） p. 106.
- 3) VDI 2230（1986）高強度ねじ締結の体系的計算法—円筒状一本ボルト締結— [丸山一男・賀勢晋司・沢 俊行 訳]，日本ねじ研究協会（1989） p. 97.
- 4) 2)と同じ， p. 111. ただし、原典は、日本機械学会編（1987）：機械工学便覧，B4-7 ページ表2による。