

動力伝達系における締結信頼性評価法と そのシミュレーション技術

Reliability Evaluation Method of Nut Tightened Condition in Power Transfer System and
Simulation Technique

高 木 良 有* 齋 藤 俊 博*
Yoshiari TAKAGI Toshihiro SAITO

左久間 信 次* 平 岡 昌 巳*
Shinji SAKUMA Masami HIRAOKA

要 旨

動力伝達系におけるナットを使った締結部について、動的な締結状態が定量的に判断できる評価技術を確立した。また、被締付け部品間のすべりによって生じる突き当て面の摩耗が原因となる締付け力の低下を予測する技術も確立した。

更に、本研究で得られた知見を用いて、運転時間の経過による締結状態の変化を解析するシミュレーション技術を構築し、締結部の信頼性評価を可能にした。

ABSTRACT

We have established reliability evaluation technique of nut tightened condition in power transfer system by which dynamically tightening condition can be quantitatively checked. Slip of tightening parts causes wear of contact faces which causes reduction of tightening force. We also have established technique of estimating such reduction of force.

Additionally, with results from this research, we have made up simulation technique of analyzing the change of tightened condition as operation time passes. This procedure is capable of evaluating reliability of tightened area.

1. はじめに

動力伝達部材を回転軸に結合する設計の一つに、ねじを使った締結構造がある。動力伝達部材は、スプラインを介して回転軸に圧入され、更に軸端末に配したナットによるねじの締付け力(以下、軸力と称す)を併用して結合される構造が一般的であり、その設計において、小型化要求と信頼性要求をいかに両立させるかが課題である。しかも、複雑な外力が繰り返し作用する動力伝達部材を回転軸に結合する場合、従来の静的なねじの弛み理論だけでは締結の状態を評価することが困難なため、実験によるトライ・アンド・エラーによって締結信頼性を評価せざるを得なかった。

本研究は、回転軸にナットを用いて動力伝達部材を結

合する構造において、ナットの動的な締結状態を定量的に評価する技術を確立し、更にその技術を基にシミュレーション解析技術を構築した。その結果、設計段階で締結部の信頼性の評価が可能になった。

本稿では、ここで得られた知見を述べる。

2. 締結の基本メカニズム

2. 1. 軸力と「ナットの自立状態」

ナットを使った締結構造は、ナットの締付けで生じる軸力により、おねじ側の回転軸に引張り力、被締結部材である動力伝達部に圧縮力が作用し、被締付け部品間の突き当て面に生じる摩擦力によりそれぞれの部品を回転軸に結合する構造である。また、ナットのねじ面、座面

にも被締結部材と同様に摩擦力が生じる。この摩擦力は、回転軸とナットの相対すべりを防ぎ働きをし、戻り回転せずにその位置に留まっている。この状態を「ナットの自立状態」と定義し、釣り合い状態をFig.1に示す。

2.2. 弛みの現象

ナットの締付けで生じた軸力が、外的影響により低下する現象を「弛み」と定義する。また、弛みの現象は「回転弛み」と「非回転弛み」の二つに大別でき、以下のように定義する。

(1) 回転弛みの定義

ナットの自立状態が崩れて弛み方向に相対すべりを生じ、軸力が低下する。この現象をナットの「回転弛み」と定義する。

(2) 非回転弛みの定義

ナットは、おねじ側の回転軸に対し相対回転ずれを生じないが、被締付け部品間の突き当て面摩擦により、軸力が低下する現象を「非回転弛み」と定義する。Fig.2に、締付けひずみ線図から摩擦量と軸力低下量の関係を示す。

2.3. ナットに作用する外力の検証

ナットに作用する外力成分を検証するために、動力伝達系締結部に負荷される入力形態を検討した。入力形態は回転軸に対し、軸直角方向と往復回転方向に負荷入力する形態があり、この二形態により、ナットに作用する外力成分を検討した。

軸直角方向の負荷入力の場合、ラジアル荷重成分と負荷入力による回転軸の変形による曲げモーメント成分がナットに作用する。

負荷入力方向が変わる往復回転方向の負荷入力の場合には、軸直角方向の負荷入力と同様にラジアル荷重成分と曲げモーメント成分がナットに作用するが、他にトルク成分が付加される。

これら二形態の負荷入力において、Fig.3に示す四種類の外力成分がナットに作用することが検証できた。

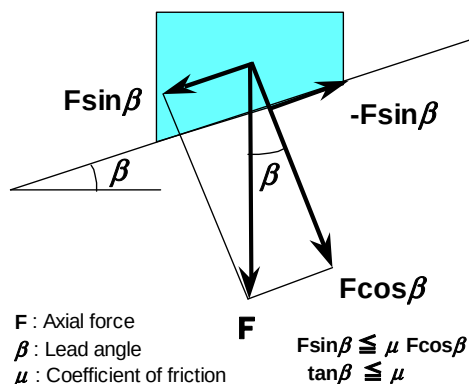


Fig.1 Independent condition of nut

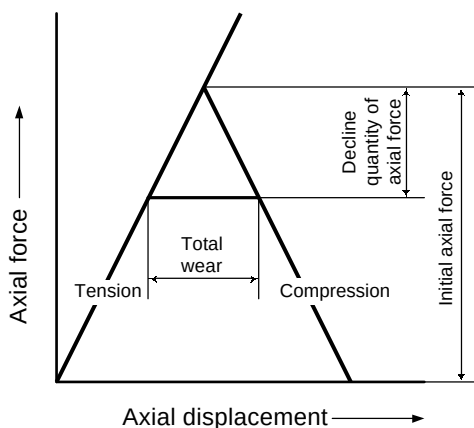


Fig.2 Tightening strain diagram

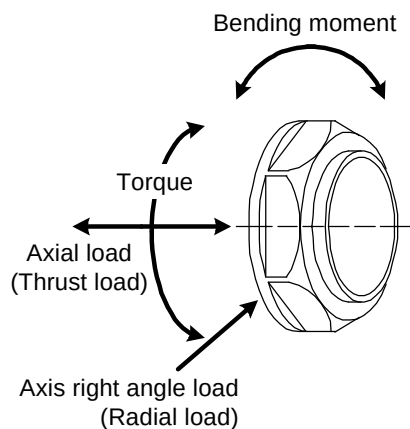


Fig.3 The external force component acting the nut

3. 弛みメカニズムの推定

(1) 回転弛みのメカニズム

ナットの自立状態が、2.3.項で検証した四成分の外力により、どのように影響されるかを推定した。四成分の外力は、ナットのネジ面、座面の摩擦力に対して軸直角方向と回転方向の二方向にそれぞれ作用し、ナットのねじ面、座面をすべらせる作用をし、自立状態を崩す働きを持っていると推定される。Fig.4は、ナット座面の摩擦円一点を示し、座面に作用する摩擦力と外力成分の関係を表したものである。

(2) 非回転弛みのメカニズム

被締付け部品の突き当て面には軸力により、高い面圧が生じる。一般的に被締付け部品間の金属接触面においては、すべりを生じさせない設計をするが、複雑かつ大きな外力が作用する動力伝達部材を締結部に構成した場合、その理想設計は困難であり、突き当て面がすべり、摩耗することにより「非回転弛み」を生じる場合がある。

また、「非回転弛み」の進行度合は、接触面の真実面圧の大きさ、すべり量、材質、潤滑状態等により決定される。

(3) 動力伝達系締結部の弛みメカニズム

動力伝達系締結部の弛みメカニズムは、初期非回転弛みを生じ、軸力の低下に伴いナットの二面に作用する摩擦力が低下することによりすべりを生じ、ナットの自立状態を崩すと推定される。このメカニズムをFig.5に示す。

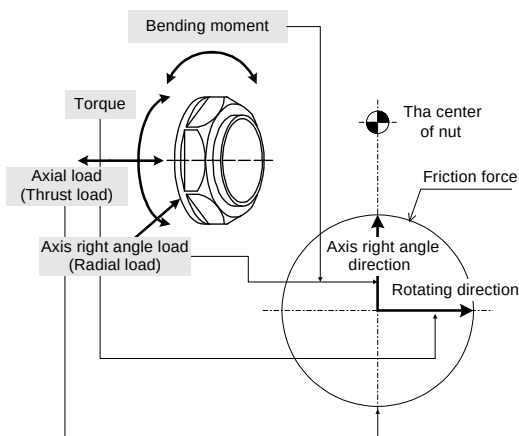


Fig.4 The external force component acting on the friction force

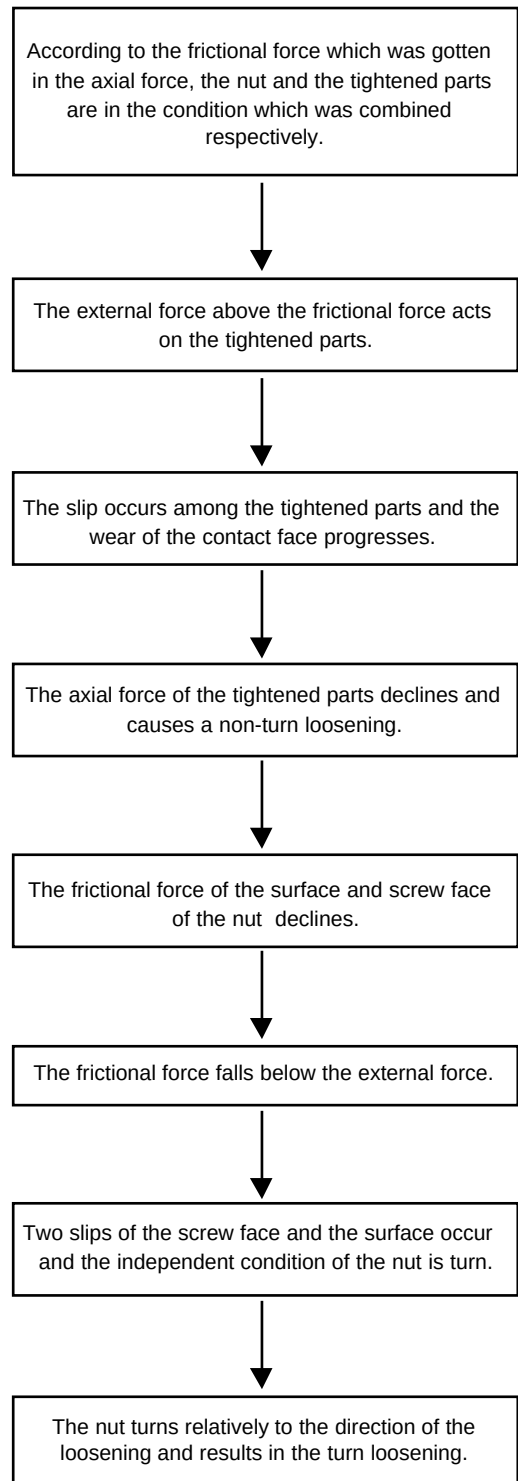


Fig.5 Flow of nut loosening in the shaft

4. すべり限界メカニズムの検証

4.1. すべり限界メカニズムの検証

ナットの自立状態に影響を与えると推定されるすべりに対し、すべりに至るメカニズムを実験モデルを用い検証した。実験モデルは、解析の単純化を図るため、Fig.6に示すねじ面側摩擦力の影響を無くしたナットのモデルを考案し、負荷入力条件を軸直角方向と回転方向の二方向に作用する外力成分とし、座面側を検証の対象とした。

実験の結果、図に示すように二方向に作用する外力成分の合力が、摩擦力と一致した時点で被締結部品モデルとナットモデルは、相対すべりを生じた。すなわち、摩擦力と外力が一致した時点が「すべり限界」であることが確認でき、Fig.7に示すすべり限界線図が得られた。このメカニズムはタイヤの駆動力と横方向抗力の関係で一般に知られる「タイヤの摩擦円」と同じである。

4.2. 動力伝達系における「すべり限界」の特徴

すべり限界線図を基に作成したFig.8の概念図を用い、すべり限界に至る負荷形態の特徴を考察する。

ラジアル荷重成分が大きくトルク成分が小さい軸直角方向の負荷形態においては、すべり限界に対し、ラジアル荷重成分に余裕があるためにすべり限界に至りにくい。

また、ラジアル荷重成分が小さくトルク成分が大きい往復回転方向の負荷形態においては、摩擦力のほぼ全体をトルク成分に支配され、ラジアル荷重成分の外力に対し、余裕が少ないために小さなラジアル荷重成分の外力により、すべり限界に至る。このことより、トルク成分の大きな負荷入力、ナットの回転弛みを生じやすいことが推定できる。

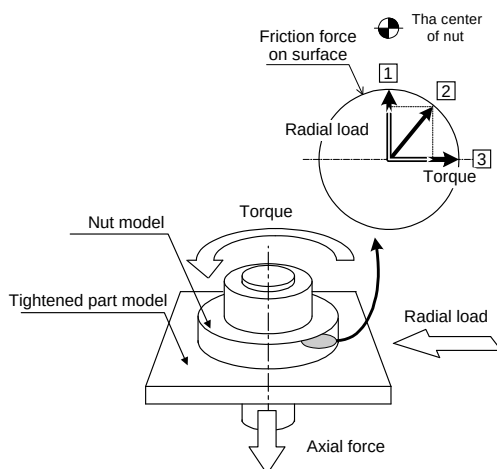


Fig.6 The slip limit experiment model

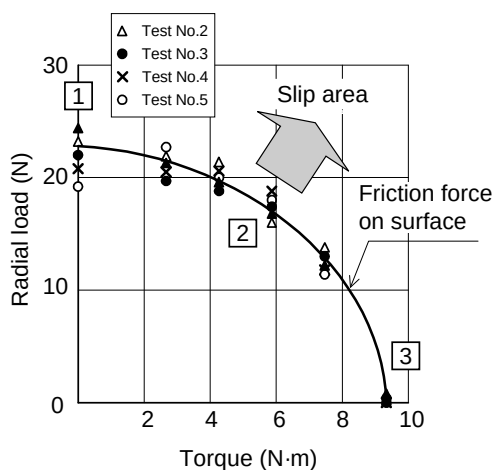


Fig.7 Slip limit diagram

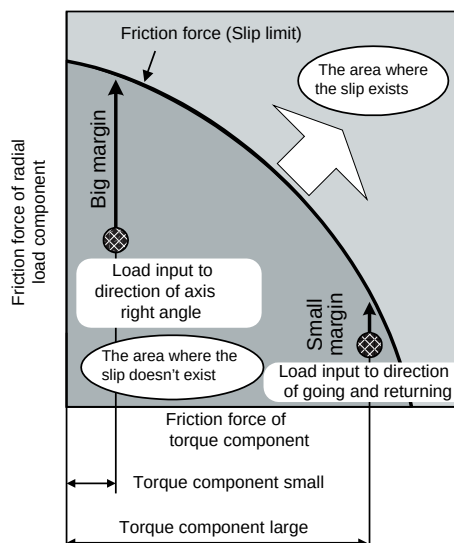


Fig.8 Point of view with slip limit

4. 3. ナットの挙動測定

ねじ面、座面の二面すべりに至るメカニズムと二面すべりがナットの自立状態に及ぼす影響を検証するために、Fig.9に示すねじ面挙動測定用変位センサ①と座面挙動測定用変位センサ②を使い、ナットのねじ面、座面の相対変位を測定した。入力条件は、すべり限界に至りやすいトルク成分の大きい負荷とした。

Fig.10に示すように負荷入力するとトルク成分の影響で座面に比べ平均有効半径の小さいねじ面が、スプラインの歯面に当たるまで回転方向にすべり出す。次にスプラインの歯面に当たった時点(A部)で座面は、軸直角方向にすべり出し、ねじ面、座面の二面すべりを生じた。この時点でナットは自立状態を崩し、相対回転ずれを生じた。この結果は、推定したメカニズムと一致した。

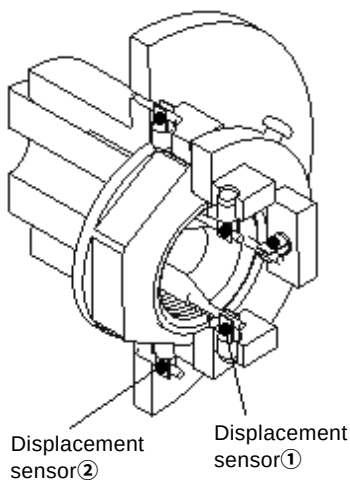


Fig.9 The measurement method of the nut behavior

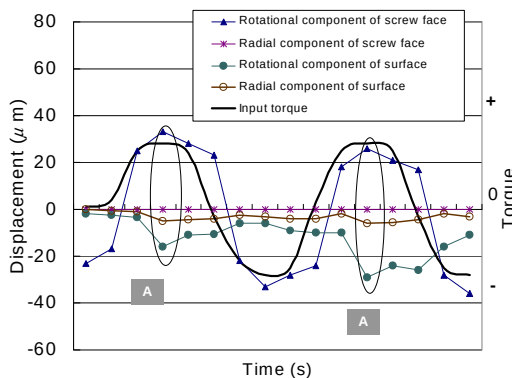


Fig.10 The measurement result of the nut behavior

5. 締結信頼性の評価基準

5. 1. 締結信頼性の評価基準

ねじ面、座面の二面すべりを生じる限界、すなわちナットの自立状態が崩れる限界を「すべり限界」と定義し、締結信頼性の評価をするために「すべり限界指数」と締結信頼性「Si」の基準を設定した。Fig.11にすべり限界とすべり限界指数で評価する領域を示す。

5. 2. 「すべり限界指数」の設定

ねじ面、座面に作用する摩擦力とそれに作用する外力の比を「すべり限界指数」とし、すべり限界に対する割合を表す。Fig.12にすべり限界指数の概念を示す。

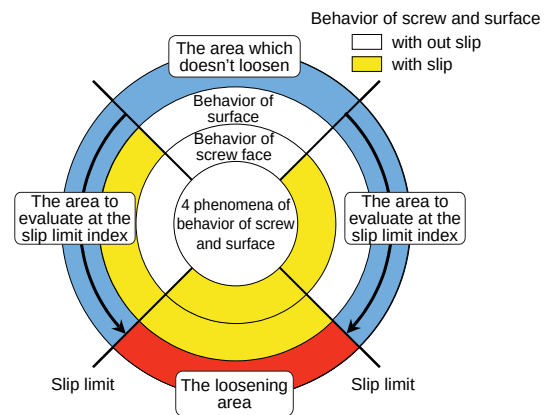


Fig.11 Point of view with toughness index

$$\text{Slip limit index} = \frac{\text{Friction force}}{\text{External force}}$$

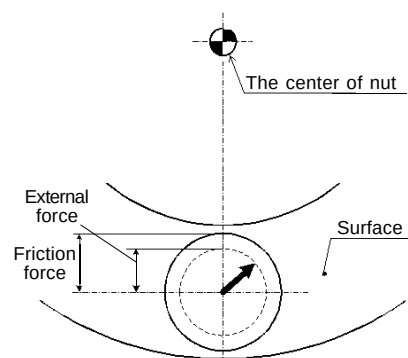
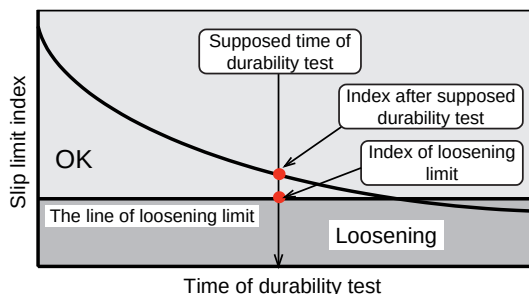


Fig.12 Point of view with slip limit index



$$Si = \frac{\text{Slip limit index (after supposed durability test)}}{\text{Slip limit index (Loosening limit)}}$$

Fig.13 Point of view with loosening safety factor

5.3. 締結信頼性「Si」の設定

運転時間の経過による締結状態の変化を考慮し、すべり限界のすべり限界指数と目標とする運転時間「仮想耐久」後のすべり限界指数の比を「Si」とし、運転時間を考慮した締結信頼性を評価する指標として表す。Fig.13に締結信頼性「Si」の概念を示す。

6. シミュレーションツールの確立

6.1. シミュレーションの狙い

「すべり限界指数」を把握するため、

- (1) ナットのねじ面、座面に作用する摩擦力と外力
- (2) 被締付け部品間の突き当て面圧、すべり量を算出することを狙いとした。

6.2. 締結状態の再現

6.2.1. シミュレーションモデルの基本技術

シミュレーションモデルは、NASTRANによる接触解析を基本とし、Fig.14に示すクリアランス、摩擦係数を導入したGap要素を取り入れた。その結果、ねじ面、座面に作用する外力および被締付け部品間の突き当て面圧、すべり量が得られ、「すべり限界指数」を予測計算することが可能になった。Fig.15にその適用手法を示す。

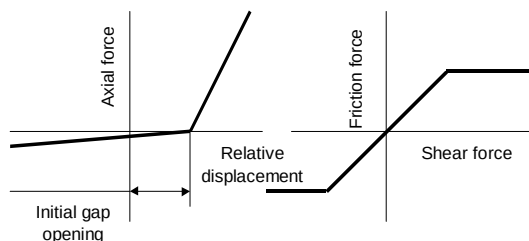


Fig.14 Gap element

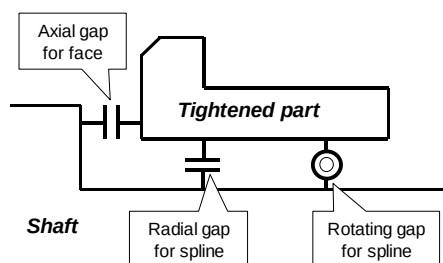


Fig.15 Technique of application of gap element

6.2.2. 計算精度の向上と検証

(1) ナットに作用する外力計算値の検証

通常の計算は、ナットの締付け時において被締付け部品の圧入工程と動力伝達部材に負荷入力する工程を同時に行うが、計算精度の向上を図るため、それらの工程を別々に計算する経路シミュレーションを取り入れた。その結果、ナットに作用する外力の計算値は、Fig.16のように実測値と良い一致を示した。

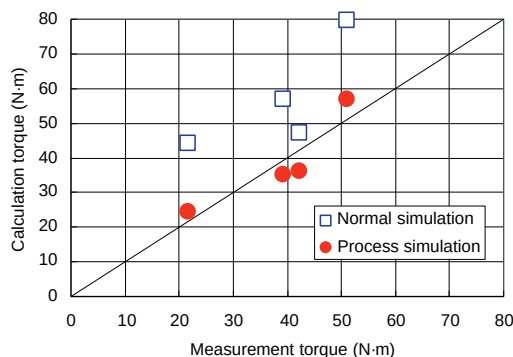


Fig.16 Comparison of external force loaded to nut

(2)「すべり限界指数」の検証

通常は、固定した任意の位置に荷重をかける計算を行うが、動力伝達系に作用する外力成分が異なる締結部に対応するため、負荷入力を受ける被締結部の荷重位置(角度)を移動させ、より実際の入力条件に近づけたシャフト擬似回転シミュレーションを考案した。

その結果、動力伝達状況の異なるType AとBの締結部においても「すべり限界指数」のすべり限界値が一致した。Fig.17に軸力とすべり限界指数の関係を示す。

(3)突き当て面摩耗推移「非回転弛み」の検証

突き当て面の摩耗推移を再現するため、被締付け部品の突き当て面面圧とすべり量をシミュレーションにより算出し、実験から求めたFig.18に示す摩耗率を用い、被締結部品間の摩耗量を予測する手法を構

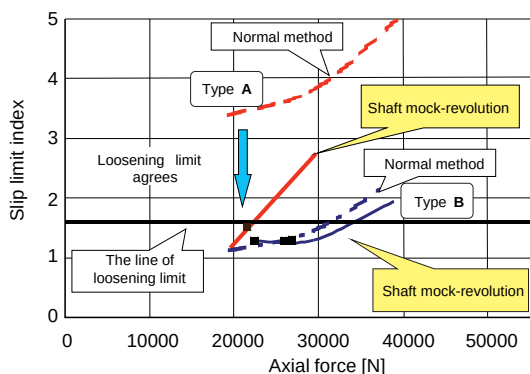


Fig.17 Comparison between toughness index and loosening limit value

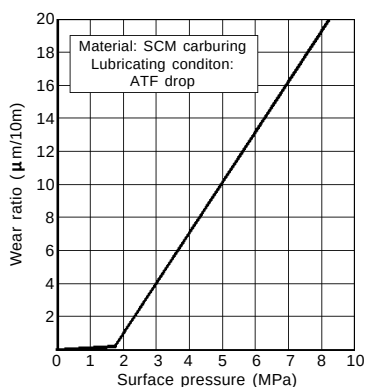


Fig.18 Wear characteristic

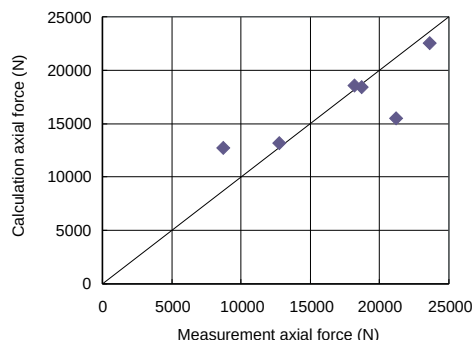


Fig.19 Comparison of axial force after durability test

築した。このとき、被締結部品間の面粗度の影響は、突き当て面面圧の大きさに反映されている。この手法により、運転時間を考慮した軸力推移の予測が可能になり、Fig.19のように計算値と実測値は良好一致を示した。

(4)締結信頼性「Si」の検証

すべり限界指数および軸力推移の検証結果から、運転時間の経過による締結信頼性を「Si」により評価できることが裏付けられた。

6.3.シミュレーションツール化

以上のシミュレーションを設計段階でツールとして使うために約800のGap要素の設定と結果処理を自動化し、計算工数を大幅に短縮した。Fig.20にシミュレーションツールのフローを示す。

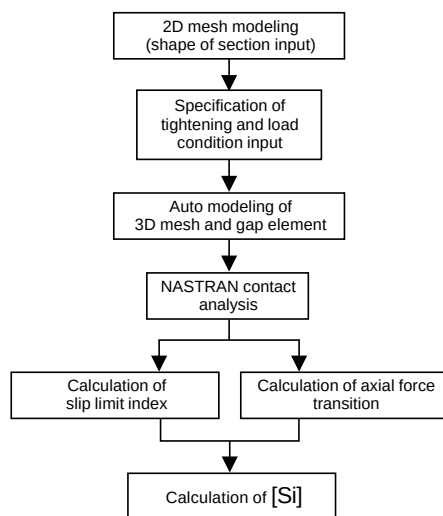


Fig.20 Flow of simulation tool

6. 4. シミュレーションツールの適用事例

本ツールの適用事例として、Fig.21に負荷入力と圧入部の支持剛性に対する解析結果を示す。負荷入力が増加すると S_i は、4から2まで低下する。また、圧入部の支持剛性の違いにより、 S_i はさらに1.2まで低下する。

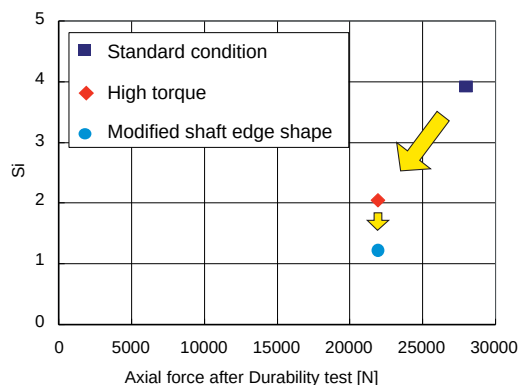


Fig.21 Shaft edge shape input torque and loosening safety factor

7. まとめ

動力伝達部材を回転軸に締結する構造において、以下技術項目を確立することにより、シミュレーション解析技術を構築した。

- (1) 締結部の信頼性評価技術
 - (2) NASTRAN接触解析を応用した動的解析により、ナットのねじ面と座面のすべり限界を再現するシミュレーション技術
 - (3) 被締結部品のすべりが原因となる突き当て面の摩耗推移(軸力推移)を予測計算する技術
- その結果、設計段階で締結部の信頼性評価が可能となり、開発効率の向上に大きく貢献した。

■ 著 者 ■



高 木 良 有



斎 藤 俊 博



左 久 間 信 次



平 岡 昌 巳