

5.2 超微小硬さによるナットの強度評価<sup>(6)</sup>

## 5.2.1 はじめに

イギリスにおける産業革命時の1841年に考案されたウェットねじに端を発するねじ締結体は、機械設計において必要不可欠な機械要素の一つである。機械は本来、いろいろな機能要素、例えば軸や軸受、歯車、ベルト等を組み合わせ結合させて目的の機能を創り出すものであるが、それらの結合方法の一つにねじがある。ねじは、比較的分解組み立てが容易に行えるという長所と結合の強度が非常に高いという利点から、非常に多用されている結合方法である。

ねじ締結において、ボルトやナットの特にねじ山の強度は、軸力を支持するために設計上重要な役割を担っている。特に塑性域締め付け方式のように高荷重がボルトやナットのねじ山に負荷される場合、ボルトの軸力保持の信頼性においてはナット強度やねじ山のせん断強度が重要な意義を持つことになる<sup>(6)</sup>。ISO（国際標準規格）やJIS（日本工業規格）のナットの規格においてスタイル2と称してナット高さが高いナットが規定されたのも塑性域ねじ締結への応用が一つの理由であるとされている。

ねじが破壊する場合、ボルトやナットのねじ山がせん断破壊することによって破損する場合が非常に多く、ねじを設計する場合には、ねじ山の強度を把握することが非常に重要である。そのために、JIS規格においては、ボルトやナットの機械的性質を各種試験（保証荷重試験および硬さ試験）を規定し、それらの試験によって求めている。しかし、保証荷重試験および硬さ試験は、ねじ山の強度を直接保証するものではなく、例えば硬さ試験の場合には、規格ではビッカース硬さ試験で実施するように規定されているが、一般的にはロックウェル硬さ試験やブリネル硬さ試験が多く用いられており、しかも、ナットの座面や上面、側面等の硬さによって高荷重が負荷されるナットのねじ山の強度を間接的に代表的な値として利用しているというのが現状である。そのためにも現行の硬さ試験を実施する箇所とねじ山の硬さとの関係を明らかにすることは非常に重要である。そこで、本項ではナットのねじ山の硬さと機械的特性との関係について、従来から実施されている硬さ試験では測定が困難であったナットのねじ山の断

面の硬さを、本研究で取り扱っている超微小硬さ試験によって求め、ナットのねじ山の硬さ分布、超微小硬さと従来から実施されている硬さとの関係、超微小硬さとねじ山のせん断強度との関係等について詳細に検討を加え、それらの関係を明らかにする。

### 5.2.2 試験装置および試験方法

本実験において超微小硬さを測定するために使用した試験機は、第2章で既に述べたものと同じ試験機を使用して測定を行っているために、ここでは試験機の簡単な記述だけに留める。

試験機は、超微小押し込み硬さ試験機（エリオニクス社製：ENT-1100）で、通常ダイヤモンド三角すい圧子（稜間角度：115°）を試料の試験面に設定荷重で押し込み、その時の圧子の押し込み深さを変位計（分解能0.3nm）により測定することによって、押し込み荷重と圧子の押し込み深さとの関係を連続的に測定し、試験面の押し込み硬さ特性を評価するものである。

試験方法は、押し込み荷重を20gfに設定し、ダイヤモンド三角すい圧子をナットのねじ山の断面に押し込む。測定時の荷重負荷時間は、全測定と通じて設定荷重（本実験においては20gf）に対して10秒とし、設定荷重の荷重保持時間は、全測定と通じて1秒とした。設定荷重到達後に設定荷重を1秒間保持した後に、設定荷重を10秒間で除荷し、1回に測定を終了とした。

### 5.2.3 試験試料

ここでは、ナットのねじ山の断面とねじ山表面の硬さに注目して評価を行うためにナットを切断し、その切断面のねじ山表面とを試験試料とした。切断したナットは、常温硬化メチルメタアクリレート樹脂（西独Kulzer社製）に埋め込んで固定した後に9 $\mu$ mのシートを使用してラッピングを行い、その後に3 $\mu$ mのダイヤモンドスラリーを使用してポリッシングを行い、最終的には試験面を鏡面に仕上げた。ねじ山表面測定用試料は、ねじ山の角度（60度）とリード角（2.9度）を傾斜させた状態で研削により試料を作成した。本試験で使用したナットは

炭素鋼 (S45C) で、その化学成分を表 5-3 に示す。

表 5-3 炭素鋼の化学成分 (%)

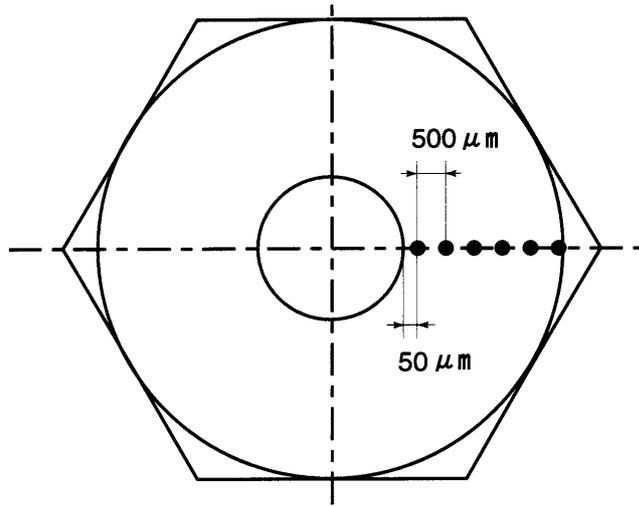
C	Si	Mn	P	S	Cu	Cr
0.43	0.19	0.72	0.015	0.006	0.01	0.06

また、この化学成分を一定として、熱処理方法の違いによりナットの強度区分を以下に示す3種類とした。

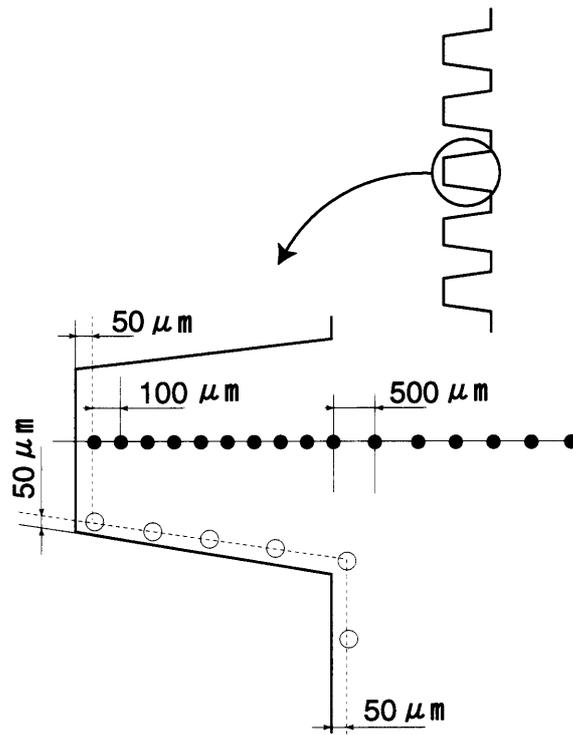
ナットの場合： 強度区分： 5T (熱処理無し)  
 強度区分： 9T (860℃, 30min, 590℃, 60min)  
 強度区分： 10T (860℃, 30min, 490℃, 60min)

ここで、ナットの強度区分については、呼び保証荷重応力のみを規定しているので、強度区分が10Tの場合には、呼び引張強さの最小値が1000N/mm<sup>2</sup>であることを意味している<sup>(7)</sup>。

図 5-47 に、ナットの超微小硬さの測定位置を示す。(a) はナットの座面を、(b) はナットねじ山の断面を示す。測定点は、ナットの座面 (端面) のナットの内径の縁から 50 μm の点を基点として基点から 500 μm 間隔に半径方向に 6 点 (図 5-47 (a) の●印) と、ナットのねじ山の断面の歯幅の中心線上のねじ山先端から 50 μm の点を基点として基点から 100 μm 間隔に 10 点 (基点を含む) と、その後 500 μm 間隔に 6 点 (図 5-47 (b) の●印)、また、ナットのねじ山断面についてはねじ山に沿った 6 点 (図 5-47 (b) の○印) である。



(a) ナットの座面



(b) ナットねじ山の断面

図 5-47 ナットの超微小硬さの測定位置

5.2.4 ナットの強度評価

図 5-48 に、ナットのねじ山の超微小硬さにおける押し込み荷重と圧子の押し込み深さとの関係の一例を示す。これは、強度区分が5Tの場合で、図中には、ナットの座面の内径の縁から半径方向に  $1050 \mu\text{m}$  の測定点 (図中●印: Nut surface) と、ナットのねじ山断面の中心線上のねじ山表面 (先端) から  $950 \mu\text{m}$  内側の測定点 (図中○印: Inside surface) における押し込み荷重と圧子の押し込み深さとの関係を連続的に示してある。図中●印がナットの座面を、○印がナットのねじ山断面における測定結果である。これより、ナットの座面の硬さ値とねじ山断面の内側の硬さ値とは大きく異なる値を示していることが分かる。

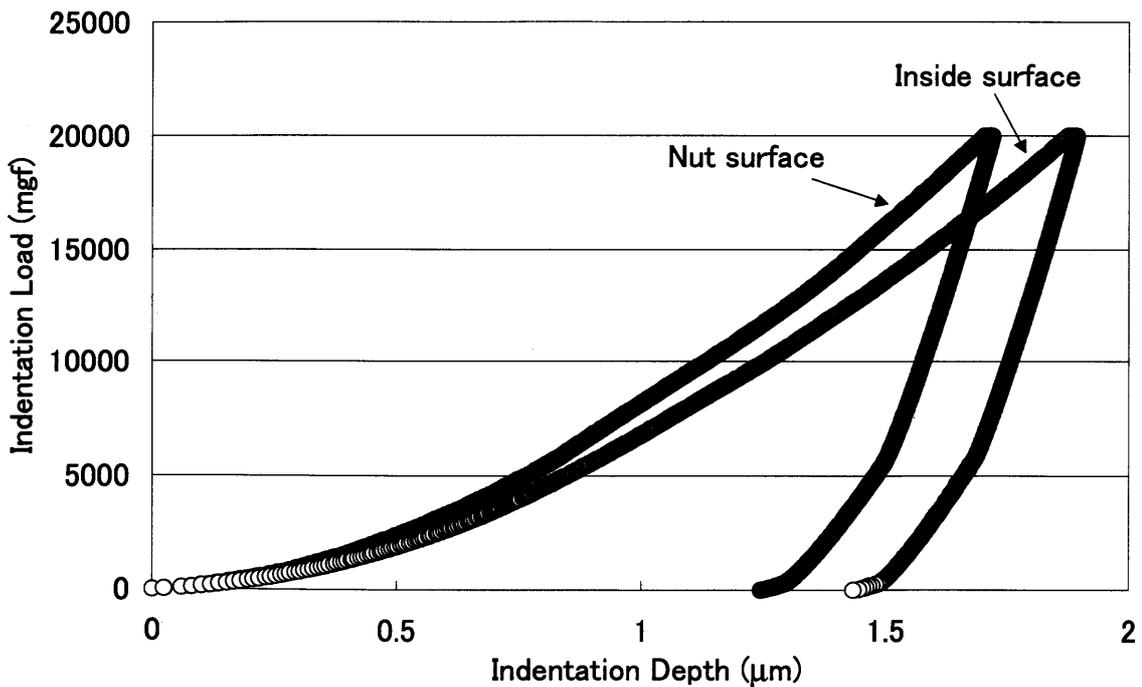


図 5-48 ナットのねじ山の超微小硬さにおける  
押し込み荷重と圧子の押し込み深さとの関係

図 5-49 に、ナットの座面の内径の縁から  $50 \mu\text{m}$  の点を基点とし、半径方向に  $500 \mu\text{m}$  間隔に測定した超微小硬さ分布を示す。図中には、3段階の各強度区分における測定結果が示してある。これより、ナットの座面の内径の縁から  $50 \mu\text{m}$  の点を基点を除くと、各強度区分ともに、非常に安定した硬さ分布を示すことが分かる。しかし、ナットの座面の内径の縁から  $50 \mu\text{m}$  の点においては、強度区分が 10T の場合の硬さ値が他の強度区分の硬さ値と比較して小さな値を示していることが分かる。ここで、熱処理を施していない 5T の場合に高い超微小硬さ値を示すのは、ナットの製造過程（転造）時の加工硬化のために、また、10T の場合に低超微小硬さ値を示すのは、熱処理条件による影響のためであると考えられる。このことは、ナットの座面の内径近傍においては、硬さ値がナットの強度区分を適切に評価しているとは言い難く、仮に低押込み荷重であってもナットの座面の内径近傍での硬さ測定は避けるべきであることを示唆している。

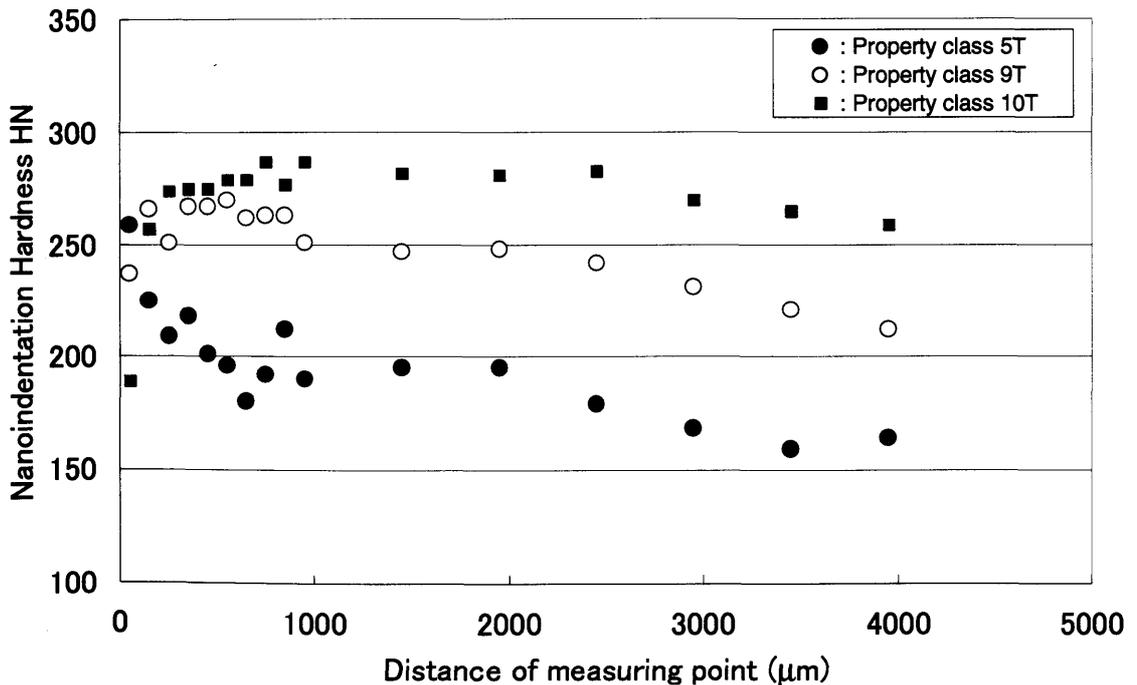


図 5-49 ナットの座面の半径方向の超微小硬さ分布  
(内径の縁から  $50 \mu\text{m}$  の点を基点として  $500 \mu\text{m}$  間隔)

図 5-50 に、ナットのねじ山断面の中心線上（図 5-47 (b) の●印）のねじ山表面から  $50 \mu\text{m}$  内側の点を基点とし、内側の半径方向に  $100 \mu\text{m}$  間隔に 10 点（基点を含む）と、その後  $500 \mu\text{m}$  間隔に 6 点測定した超微小硬さ分布を示す。図中には、3 段階（5T, 9T, 10T）の各強度区分における測定結果が示してある。これより、ねじ山表面から  $150 \mu\text{m}$  までの測定点を除くと、熱処理を施してある強度区分が 9T の場合には、ナットのねじ山先端から約  $1\text{mm}$  まで、10T の場合には約  $2.5\text{mm}$  までほぼ一定の値を示しているが、測定点がねじ山表面から内側になるに従って超微小硬さ値は徐々に低下する傾向を示している。これに対して、熱処理を施していない強度区分が 5T の場合には、ナットのねじ山先端から約  $0.8\text{mm}$  までは、ねじ山先端から離れるに従って超微小硬さ値は減少する傾向を示すが、約  $0.8\text{mm}$  から  $2\text{mm}$  までは超微小硬さ値はほぼ一定値を示す。ナットのねじ山先端から約  $2\text{mm}$  の測定点より内側になると、熱処理を施してあるナットと同様に内側になるに従って超微小硬さ値は徐々に低下する傾向を示している。

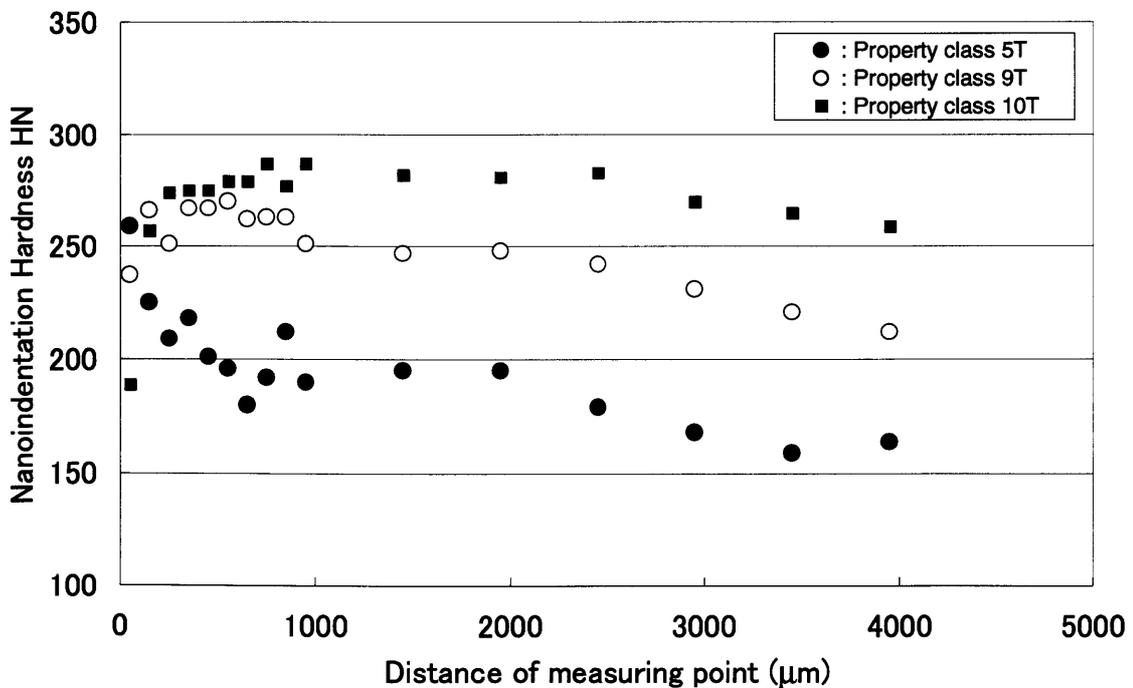


図 5-50 ナットのねじ山断面の超微小硬さ分布  
(ねじ山表面から  $50 \mu\text{m}$  内側の点を基点として内側の方向)

図 5-51 に、ナットのねじ山断面において、ねじ山表面から 50  $\mu\text{m}$  内側 (図 5-47 (b) の○印) のねじ山の稜に沿った超微小硬さ分布を示す. これは、ねじ山先端から 550  $\mu\text{m}$  までの情報であるために、図 5-50 の 550  $\mu\text{m}$  までの値とほぼ同様な値を示していることが分かる. また、各強度区分においても、ナットのねじ山断面の中心線上の測定結果とほぼ同様な傾向を示していることが分かる.

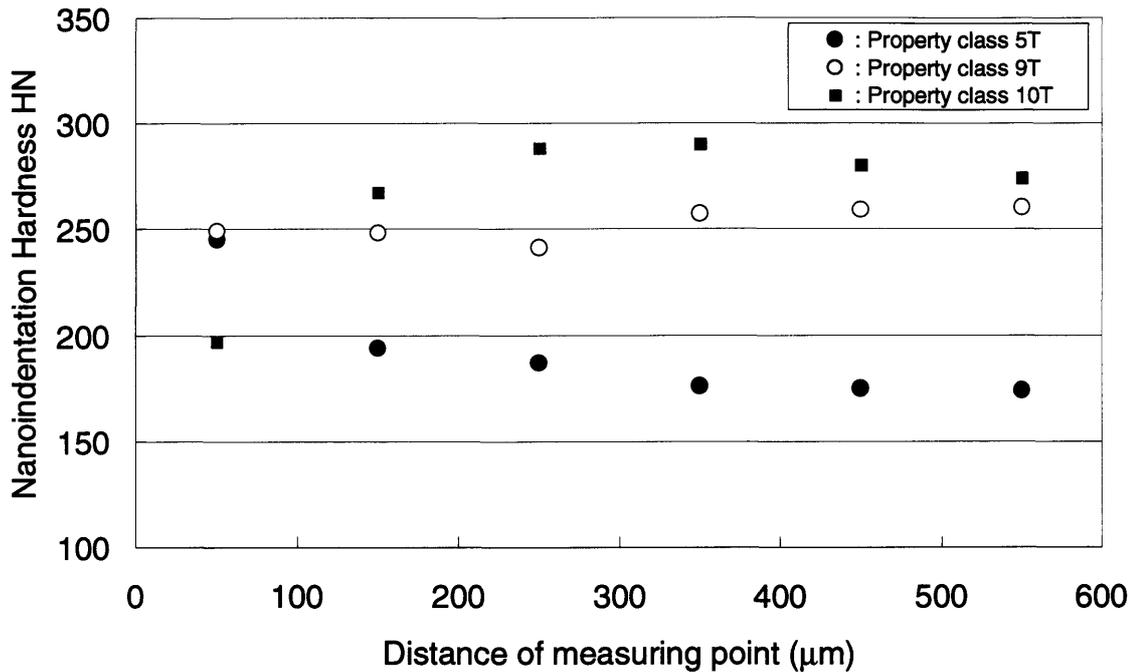


図 5-51 ナットのねじ山断面の超微小硬さ分布  
(ねじ山表面から 50  $\mu\text{m}$  内側のねじ山に沿った部分)

図 5-52 に、ナットの超微小硬さとナットのねじ山のせん断破壊強度との関係を示す. 図中には、ナットの座面の硬さ (●印), ねじ山表面の硬さ (○印), ナットのねじ山の先端部分の硬さ: ねじ山の先端から 150  $\mu\text{m}$  の位置 (□印), ナットのねじ山の中心線上の内側の硬さ: ねじ山の先端から 3950  $\mu\text{m}$  の位置 (■印) の測定結果が示してある. なお、横軸に示してあるねじ山のせん断破壊強度は、「JIS B 1052 鋼製ナットの機械的性質」の保証荷重方式によって求めたナットの破壊時における最大荷重から算出した値である. これより、ナットのせん断破壊強度は、ナットのねじ山の先端部分の硬さやナットのねじ山の中心線上の内側の硬さと非常に良い相関関係があることが分かる. これに対して、ナッ

トの座面の硬さやねじ山表面の硬さとの間には、あまり良い相関関係がないことが分かる。即ち、従来から実施されているナットの座面の硬さ測定では、ナットのせん断破壊強度を十分にしかも的確に評価しているとは言い難く、硬さによってナットのせん断破壊強度を適切に評価する場合には、ナットのねじ山の先端部分の硬さやナットのねじ山の中心線上の内側の硬さによって評価しなければ不十分であると考えられる。ねじ山表面の硬さについては、どの強度区分においてもナットの座面の硬さよりも大きな値を示すが、ねじの破壊はほとんどの場合ねじ山から破壊することを考えると、ねじ山表面よりも内側の硬さを大きな値にすることが先決であると考えられる。また、各硬さ値は測定位置によって大きく異なり、しかも熱処理を施してあるナットよりも熱処理を施していないナットの場合の方がその影響を大きく受けていることが分かる。これより、非調質ねじのように熱処理を施せず(熱処理を省略することによって低コスト化を図る)に強度を確保しようとする製造方法が行われているが、この場合には、強度の面で十分な余裕を見込む必要がある。なお、ナットのねじ部の強度に最も関係するナットのねじ山の内側の硬さ値が、従来から実施されているナットの座面の硬さ値よりも低い値を示していることから、ねじの強度を実際よりも大きく見積もっていることになり、この点にも注意を要すると考える。

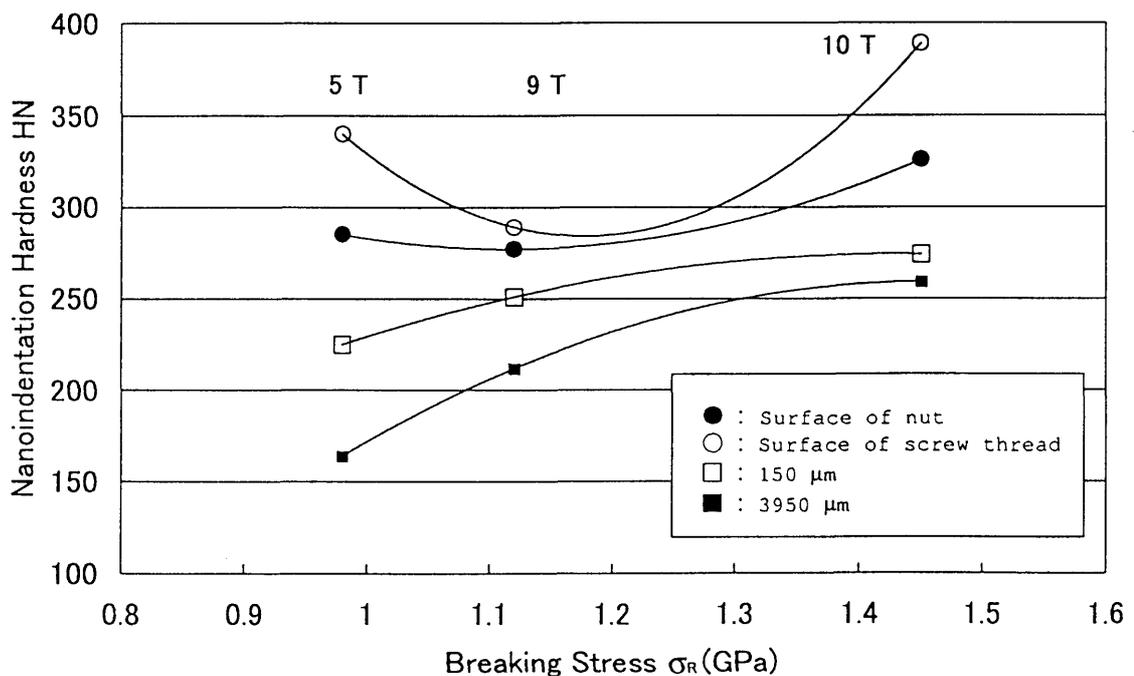


図 5-52 ナットの超微小硬さとねじ山のせん断破壊強度との関係

図 5-53 から図 5-56 に、ナットの各部におけるくぼみの電子顕微鏡写真を示す。図 5-53 は強度区分が 5T の場合の座面のくぼみ（内径の縁から半径方向に  $550 \mu\text{m}$  の位置）、図 5-54 は強度区分が 5T の場合のねじ山断面の先端部から  $50 \mu\text{m}$  の位置のくぼみ、図 5-55 は強度区分が 5T の場合のねじ山断面の先端部から  $950 \mu\text{m}$  の位置のくぼみである。また、図 5-56 は強度区分が 10T の場合のねじ山断面の先端部から  $950 \mu\text{m}$  の位置のくぼみである。これより、強度区分の違いによってくぼみの大きさも変化していることが分かる。また、強度区分が 5T の場合には、ナットの座面のくぼみと比較して大きく変化していることが分かる。

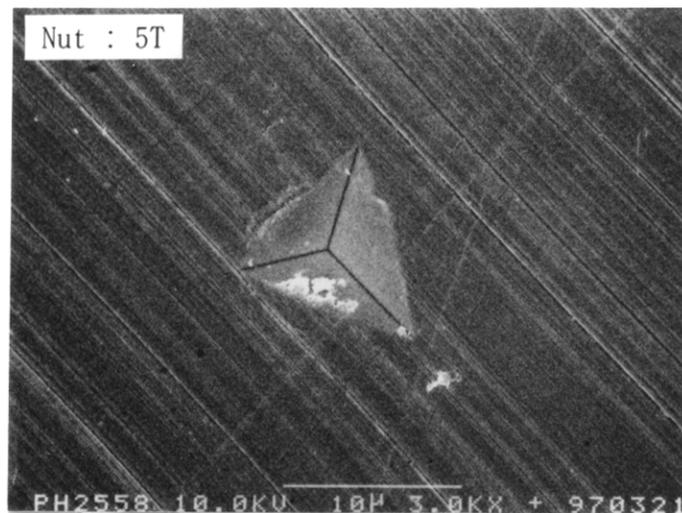


図 5-53 ナット座面の内径の縁から半径方向に  $550 \mu\text{m}$  の位置のくぼみの SEM 写真 強度区分 : 5T の場合

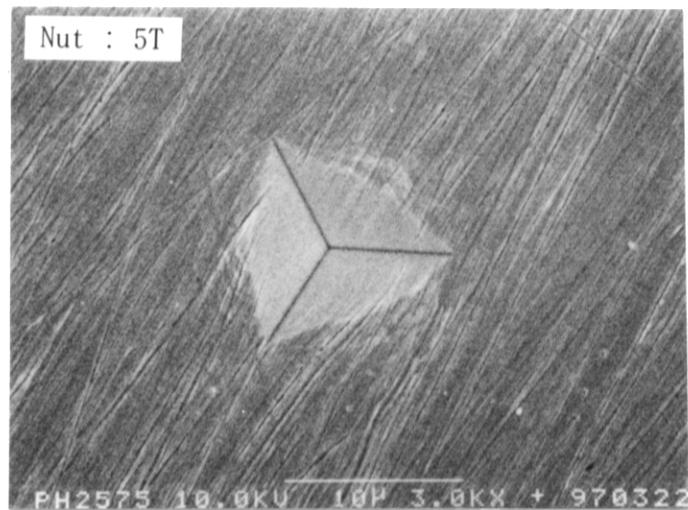


図 5-54 ナットのねじ山断面の先端部から  $50 \mu\text{m}$  の位置のくぼみの SEM 写真 強度区分 : 5T の場合

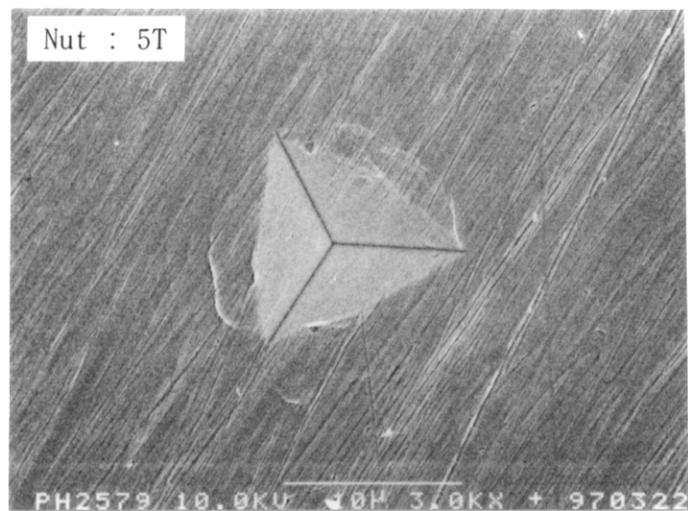


図 5-55 ナットのねじ山断面の先端部から  $950 \mu\text{m}$  の位置のくぼみの SEM 写真 強度区分 : 5T の場合

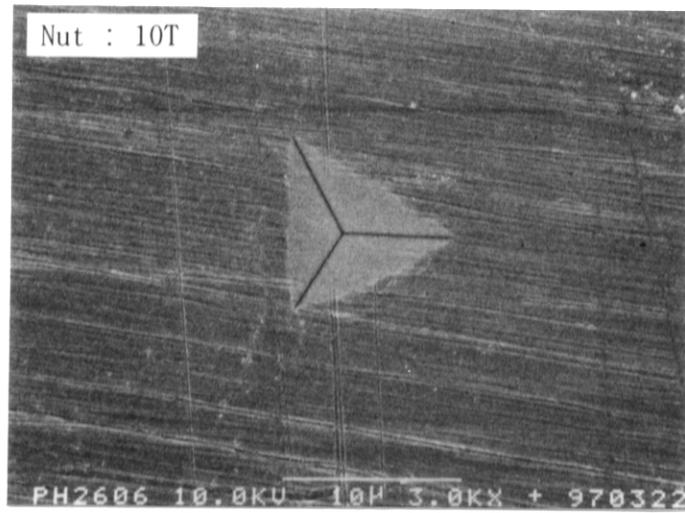


図 5-56 ナットのねじ山断面の先端部から950  $\mu\text{m}$ の位置のくぼみのSEM写真 強度区分：10Tの場合

## 5.2.5 まとめ

ナットの超微小硬さの測定結果をまとめると以下のようなになる。

- (1) ナットの超微小硬さ値は、ねじ山の断面等の硬さ値と従来から実施されている座面の硬さ値とは大きく異なる。
- (2) ナットの超微小硬さ値は、ねじ山の断面等の測定箇所によって大きく異なる。その値は、熱処理の有無に関係し、熱処理を施してある場合と比較して熱処理を施してない場合の方がより影響を受けている。
- (3) ナットのねじ山の内側の硬さ値が従来から実施されている座面等の表面の硬さ値と比較して低い硬さ値を示すことから、強度については実際の強度よりも大きく見積もっていることになるので、設計および使用時には注意を要する。
- (4) ねじ山の破壊強度とねじ山の内側の硬さ値とは、非常に良い相関関係がある。
- (5) ナットの熱処理を施してある場合には、座面等の表面の硬さ値とねじ山の内側の硬さ値とは比較的良い対応関係を示すが、熱処理を施してない場合には、その関係は大きく異なる。

## 参考文献

- (1) 福田勝己, 加藤孝久: TiN膜の超微小硬さ: 日本機械学会機素潤滑設計部門100周年記念講演会講演論文集, (1997) 656.
- (2) 福田勝己, 加藤孝久: TiN膜/鋼基材の超微小硬さに及ぼす膜厚さの影響: 日本機械学会創立100周年・九州支部創立50周年記念講演会講演論文集, 978-2 (1997) 356.
- (3) 福田勝己, 加藤孝久: TiN膜の超微小硬さに及ぼす圧子先端形状の影響: 日本機械学会第76期全国大会講演論文集(V), 98-3 (1998) 187.
- (4) 榎本祐嗣, 三宅正二郎: 薄膜トライボロジー, 東京大学出版会(1994)
- (5) 氏平祐輔編著: 固体表面/微小領域の解析・評価技術, リアライズ社(1991)
- (6) 小林光男, 福田勝己, 佐々木武三, 坂口雅昭, 丹羽直毅, 北郷 薫: 超微小硬さによるナットの強度評価: 日本機械学会創立100周年・九州支部創立50周年記念講演会講演論文集, 978-2 (1997) 354.
- (7) 辻 裕一: ねじおよびねじ締結体の強度特性: 機械設計, 43-5, 日刊工業新聞社 (1999)

## 第6章 結論

本研究では、超微小硬さにおいて、試料面の表面粗さや圧子先端の形状が硬さ値に及ぼす影響について実験的ならびに解析的に検討を行った。また、特に実用面への応用について事例を示し、超微小硬さの重要性を示すことに重点を置いた。これによって、超微小荷重領域における硬さ値に及ぼす因子（表面粗さおよび圧子先端形状）についてその影響を明らかにした。

本研究において得られた結論は、以下の通りである。

1. 超微小硬さ試験において、表面粗さ（算術平均粗さ）が増加しても超微小硬さ値はほぼ一定の安定した値を示す。ただし、押し込み荷重が10mgfの場合には硬さ値は大きく変動することから、現時点で安定した測定が可能な超微小硬さ試験の押し込み荷重について限界があることを見出した。また、表面粗さの増加とともに超微小硬さの値の変動幅が大きくなる。同じ表面粗さの場合、押し込み荷重が小さくなるに従って硬さ値は大きな値を示す。
2. 超微小硬さ試験において、より高精度に再現性のあるデータを測定するための一般的な留意点について以下の点を示した。即ち、測定時には雰囲気環境（特に、温度や湿度）を制御するとともに、外的な振動についても極力避ける方策をとること、また、評価時には、圧子先端の形状をSEM等によって精確に把握し、この先端形状と圧子の押し込み深さとから接触面積を求めて硬さ値を算出することが望ましいこと等を提案した。
3. 1項の結論についてGWモデルを適用して超微小な荷重領域における2面間の接触状態を推定した。その結果、表面粗さが変わっても真実接触面積と見かけの接触面積との比はほとんど変わらない、即ち2面間の接触状態がほとんど変わらないこと、また、押し込み荷重が小さい領域では見かけの接触面積が小さくなるために硬さの値が大きな値を示すことが明らかになった。
4. 本解析結果からミクロな接触状態においては、本実験条件の範囲内においては、押し込み荷重の減少とともに真実接触面積の割合は多少増加し、約

2~6%の範囲内の値を示すこと、また、真実接触部の平均圧力は約2000~4500 (kgf/mm<sup>2</sup>) の範囲内の高い面圧の値を示すことが明らかになった。

5. 圧子の先端形状が違う場合には、超微小硬さの値に影響を及ぼし、圧子先端形状が sharp な場合の方が round な場合と比較して、より深く押込まれることから超微小硬さの値は小さな値を示す。本実験結果の範囲内では、圧子先端が摩耗している場合の方が理想的な圧子の場合と比較して約 1.5 倍の超微小硬さ値を示す場合があることが明らかになった。

さらに、超微小硬さの実用面への応用について、TiN膜とナットの事例を示し、以下の結論を得た。

TiN膜の超微小硬さについては、

6. TiN膜の超微小硬さの値は、TiN膜厚さが2 μ m以下の場合には、押込み荷重の減少に伴って増加する傾向にあるが、TiN膜厚さが2 μ m以上の場合には、それ以下の膜厚さと比較して超微小硬さの値の押込み荷重依存性はあまり認められないことから、TiN膜の超微小硬さを精確に測定できる最小の膜厚さ(本研究の場合には膜厚さが2 μ m以上)が存在することを見出した。

ナットの超微小硬さ値については、

7. ナットの超微小硬さについて、従来からの硬さ試験では測定が不可能であったねじ山の断面と表面の硬さを測定し、その値は従来から実施されている座面の硬さ値とは大きく異なることを示した。また、ねじ山の断面の箇所によって超微小硬さ値は大きく異なり、その値は熱処理の有無に関係し、熱処理を施してある場合と比較して熱処理を施してない場合の方がより影響を受けていることを明らかにした。

## 謝 辞

本研究を遂行するにあたり、懇切丁寧なご指導を頂きました酒井信介博士(東京大学教授大学院工学系研究科機械工学専攻)に心より感謝申し上げます。本論文をまとめるにあたり非常に有益なご助言を頂きました。重ねてお礼申し上げます。また、本研究をまとめるにあたり、有益なご助言を頂きました渡邊勝彦博士(東京大学教授生産技術研究所)、加藤孝久博士(東京大学助教授大学院工学系研究科機械工学専攻(併任)、現通商産業省工業技術院機械技術研究所機械量子分子工学特別研究室室長)、吉川暢宏博士(東京大学助教授生産技術研究所)、中村俊哉博士(東京大学助教授大学院工学系研究科機械工学専攻)に心よりお礼申し上げます。特に加藤孝久博士には常日頃より長期間にわたり非常に有益なご助言を頂きました。心より感謝申し上げます。本研究がこのように学位論文としてまとめることができたのも貴兄のお陰であります。公私に渡って、特に私の部分において支えて頂きました。重ねてお礼申し上げます。

本研究を遂行、まとめるにあたり非常に多くの方々にお世話になりました。

株式会社エリオニクス植松卓彦、吉田三知世、田口佳男、佐々木 亮の各氏には一方ならぬご尽力を、本目精吾社長には一方ならぬご理解を頂きました。心より感謝申し上げます。

株式会社ニコン道本隆裕氏にはTiN膜の成膜において厳しい状況の中で一方ならぬご尽力を頂きました。心より感謝申し上げます。

東京電機大学工学部一瀬謙輔教授、電気通信大学電気通信学部黒田成昭教授、工学院大学工学部小林光男専任講師、東京商船大学商船学部岩本勝美助教授の各貴兄には公私に渡り、特に私ごとの部分において小生を支えて頂きました。心より感謝申し上げます。この信頼関係は現在も進行中であります。

新潟大学工学部石橋達弥教授、日本工業大学工学部佐藤茂夫助教授には超微小硬さに関して常日頃より積極的にディスカッションを頂きました。心より感謝申し上げます。

日本精工株式会社野木 高氏には本研究の解析面で一方ならぬご尽力を頂きました。心より感謝申し上げます。

鳥取大学工学部松岡広成専任講師には小生の非常に多い無知な部分を補って頂

きました。心より感謝申し上げます。

明治大学理工学部富永敏文講師には本研究をまとめるにあたり、重要かつ適切なご助言を数多く頂きました。また、私の部分において常日頃より心の支えとなっていて頂きました。心より感謝申し上げます。

東京都立産業技術研究所佐々木武三副参事研究員には試料作成において貴重な時間を割いて頂きました。心より感謝申し上げます。

石川島播磨重工業株式会社君島孝尚、尾形秀樹の各氏、株式会社東芝服部仁志氏には論文執筆中に叱咤激励を頂きました。心より感謝申し上げます。

金沢工業大学堀 幸夫副学長には小生が1971年に東京大学工学部に任官して以来、常に心暖まるお言葉を頂き、また、接して頂きました。心より感謝申し上げます。

有馬朗人前文部大臣には東京大学長時代に「がんばってください」とのお言葉を頂きました。この一言は小生の短い人生の中でも非常に重い一言であり、常に研究を遂行する上での支えとなっております。心より感謝申し上げます。

修士課程の清水雄司君には、膨大なデータの整理を行う際にご尽力頂きました。心より感謝申し上げます。また、博士課程の崔 竣豪君、田中健太郎君、修士課程の太田泰輔君には、常日頃から研究以外の話の相手になって頂きました。この時間が無ければもっと早く学位論文が完成したものと思います。

機械系図書室の井上喜美子事務官（現 宇宙科学研究所）には、参考文献の検索等で多大なご迷惑をお掛け致しました。この場をお借りして心より感謝申し上げます。

最後になりましたが、何と云っても常日頃より一番の支えになったのが家族の存在です。妻恵子、長男健太、次男真也、愛猫芽々は物理的・精神的な面で支えてくれました。心より感謝申し上げます。義父儀一、義母絹子には常日頃より暖かく見守って頂きました。心より感謝申し上げます。また、一昨年病に倒れて闘病生活を送っている父一郎と支えになっている母静子、妹恵美子、弟英雄、明に対して心より感謝申し上げます。

2000年2月 10日

福田 勝己