

227 アルミニウム合金ボルトの開発研究

(超微小硬さによる製品評価及びFEM解析との関係)

Development Research of the Aluminum Alloy Bolt

(Relation between FEM analysis and product evaluation by the nano-indentation hardness)

○ 久保田 義弘 (第一工業)

中村 保 (静岡大学)

小林 光男 (工学院大学)

福田 勝己 (東京大学)

Yoshihiro KUBOTA, Daiichi-Kogyo Co., Hamamatsu-city, Shizuoka

Tamotsu NAKAMURA, Shizuoka University, Hamamatsu-city, Shizuoka

Mitsuo KOBAYASHI, Kogakuin University, Hachioji-city, Tokyo

Katsumi FUKUDA, The University of Tokyo, Bunkyo-ku, Tokyo

The development of high strength aluminum alloy bolt is carried out for practical application to the Aluminum Space Frames (ASF). In this report, the hardness distribution of development bolt is examined by nano-indentation. As the result, it has been confirmed that the dispersion has little uniformly been stabilized on nano-indentation hardness of the development bolt. And the development bolt evaluated the microstructure of the bolt. And it is indicated that there is the correspondence from the FEM analysis in equivalent plastic strain and hardness.

Key words : Machine Element, Fixing Element, Aluminum Alloy Bolt, Nano-indentation Hardness, Distribution of Hardness, FEM analysis

1. 緒言

自動車の省エネルギー化を目的に車体の軽量化の研究が各分野において行われている。車体の軽量化には、現行材料の強度を高めて極限まで薄肉化を行うリミットデザイン手法と、軽量合金材料に置き換えて最適化を行う手法とが考えられるが、軽量化への効果は後者の方が大きい。また、軽量合金を使用した車体では、ASF (Aluminum Space Frames) が有望であるが、ASF の量産化の実現には、多くの技術的問題があり、中でも接合技術は重要な課題となっている¹⁾。アルミニウムの溶接には溶接割れや組織的な欠陥の信頼性に問題²⁾があるため、ASF のようなアルミニウム合金の機械構造物用接合技術のためには高強度アルミニウム合金ボルトの開発が必要となっている³⁾。

工業的に実用化されている AL6 高力アルミニウム合金ボルト (JIS B 1057) には、使用実績のある A7075+T7 をはじめ、その改良材としての A7050+T7、さらに T6 強度を維持した状態で、T73 程度まで応力腐食割れの危険性を改善させた A7050+T771 等がある。本報で使用する ASF を目的に開発された A7050+T7 の高強度アルミニウム合金ボルトは、結晶粒微細化行程によってボルト全域が一様な微細組織を有しているとされており、T7 熱処理によりボルトの延性を確保することで応力腐食割れに対処している。

一方、製品強度の評価方法として、強度と硬さの関係がよい対応を示すことから硬さ試験が利用されているが、ボルトのねじ山等の強度評価において、従来の硬さ試験での押し込み荷重では、ねじ山の試料面積に対してくぼみが大きいため測定が不可能であった。しかし、近年ねじ山などの局所的な微小部分の評価方法として超微小硬さ試験が利用され、微細なものでは結晶粒単位の超微小硬さを求めて局所的な材料学的特性を明らかにしたり⁴⁾、比較的大きいものではナットねじ山の強度特性を明らかにするなど、利用範囲が拡大して多くの研究成果を上げている⁵⁾。

本報では、ASF を目的に開発された A7050+T7 の高強度アルミニウム合金ボルトの製品評価を超微小硬さ試験

によって、従来の硬さ試験では測定不可能であったねじ山の硬さ分布をも含めて測定する。その硬さ分布から結晶粒微細化による一様な微細組織の確認を行うとともに製品の製造工程を有限要素法解析を行い、相当塑性ひずみと結晶粒度及び硬さとの対応などねじ山の評価について検討し知見を得た。

2. 実験装置及び方法

本実験で使用した装置は、超微小硬さ試験機 (エリオニクス製: ENT1100) で、この装置では、圧子 (通常ではダイヤモンド三角すい圧子) を超微小荷重で試料に押し込み、その時の押し込み深さを高分解能変位計 (分解能: 0.3nm) により、直接測定することによって、押し込み荷重と圧子の侵入深さ (押し込み深さ) との関係を連続的に測定し、試料表面の押し込み硬さ特性を評価するものである。本実験で使用した圧子は、稜間角 $\theta = 115^\circ$ のダイヤモンド三角すい圧子で、押し込み荷重は 500mgf、環境温度は室温 $25 \pm 1^\circ \text{C}$ である。

設定荷重 P と圧子の押し込み深さ h との関係から設定荷重押し込み時の三角すい圧子の最大押し込み深さを測定し、次式から超微小硬さ HN を求める。

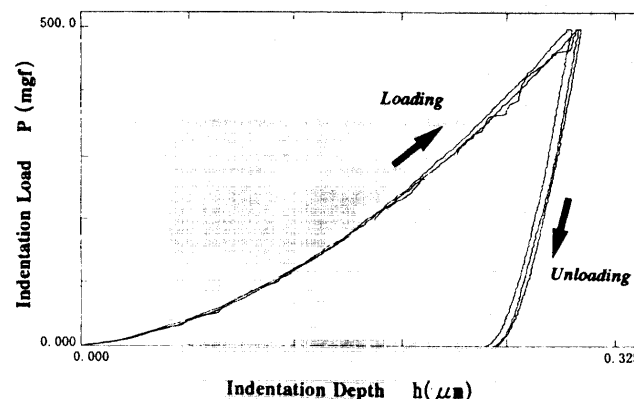


Fig.1 Example of experiment for Nano-indentation Hardness

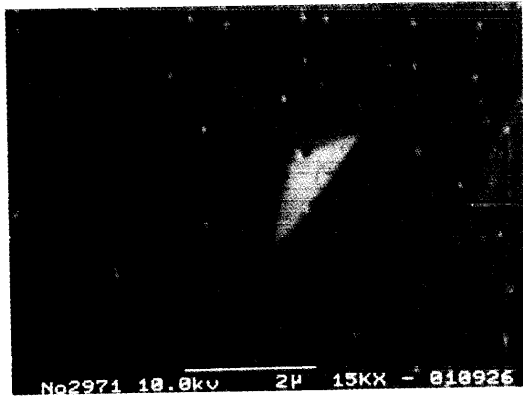


Fig.2 Photograph of the Nano-indentation

$$HN_{115} = 3.8584 P / h^2$$

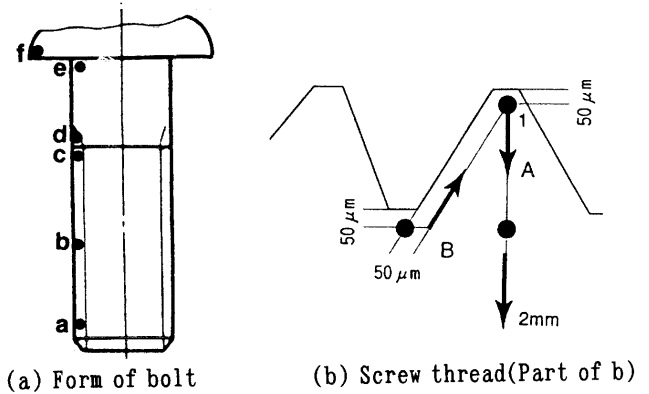
ここでPは押し込み荷重 (mN), hは最大押し込み深さ (μm)である。また、添字の115は、ダイヤモンド三角すい圧子の稜間角度が 115° である事を示している。なお、くぼみ形状の解析では、走査型電子顕微鏡 (エリオニクス製: ERA-8000) を用いた。図1に、押し込み荷重と押し込み深さとの関係の一例を、図2にくぼみのSEM写真を示す。この場合の押し込み荷重は、500mgfで、荷重・除荷荷重に対して10s、荷重保持時間は1sである。

3. 高強度アルミニウム合金ボルト

本報で使用するアルミニウム合金ボルトの素材は、半連続鋳造ピレットの熱間押し出し丸棒素材であり、熱間押し出し特有の軸方向に伸長された繊維状組織を有している。据え込みと前方押し出しによる影響を剛塑性有限要素法シミュレーションにより調べると、相当塑性ひずみ ϵ_p と平均結晶粒径 d との関係から、相当塑性ひずみ $\epsilon_p < 0.25$ では平均結晶粒径が $d = 80\mu\text{m}$ 以上に粗大化するが、相当塑性ひずみ $\epsilon_p > 0.5$ ではほぼ平均結晶粒径 $d = 10\mu\text{m}$ となり、繊維状組織の痕跡が消失することが確かめられている¹⁾。このように相当塑性ひずみ $\epsilon_p > 0.5$ の領域の相当ひずみを与えることによって平均結晶粒径 $d = 10\mu\text{m}$ 程度の均一な等軸再結晶組織にする事が出来る事が分かった。以上の検討結果から考案されたアルミニウム合金ボルトの鍛造プロセスでは、ボルト内部の相当塑性ひずみが $\epsilon_p > 0.5$ となるように設計され、ボルト全域にわたって均一な組織が得られるように製作されたものである。このことを実験で確かめるために超微小硬さによりその均一性を検討した。



Fig.3 High strength aluminum alloy bolt



(a) Form of bolt (b) Screw thread(Part of b)



(c) Extension photograph of screw thread(Part of b)
Fig.4 Measuring points of bolt

使用したボルト試験片は、図3に示すようなアルマイト処理した内トルクスのボタンヘッドボルトで、これはA7050+T7熱処理製品であり、引張強さは540MPa、降伏点は486MPa、形状寸法は呼び径: M10×1.5 (首下長さ: 30mm, ねじ部長さ: 20mm) で、精度はJIS 2級相当である。

図4の(a)はボルト全体で、(b)はねじ部の中央にあるねじ山b部を、(c)はそのSEM写真(100倍)を示す。また、図中には硬さの測定箇所を示す。図4(a)のようにボルトねじ部の先から2つ目の完全ねじ山の点a、ボルトねじ部の中間にある完全ねじ山の点b、不完全ねじ部の手前の完全ねじ山の点c、不完全ねじ山の点d、ボルト頭部直下の点e、ボルト頭部の首下先端の点fの6点、また図4(b)のように先端からA方向に50 μm の位置をA1として100 μm 置きに9点(ねじ部谷底位置まで)、さらに500 μm 毎に7点(ボルト中心位置まで)の測定を、また、ねじ山谷底の50 μm 内部からB方向にねじ山の稜線に沿って先端A1へ6点(B1~B6)である。なお、測定面は、ポリシングと9 μm シートでラッピングによって鏡面に仕上げている。

4. 実験結果及び考察

4.1 ボルトねじ山の硬さ分布

図4のねじ山の一つ(b部)について、超微小硬さ試験で求めたねじ山先端A1から中心の軸線に向かいA方向の硬さ分布を図5に示す。ここで、図の横軸1mm近辺までがねじ山に、それ以上が軸部に対応している。図より、

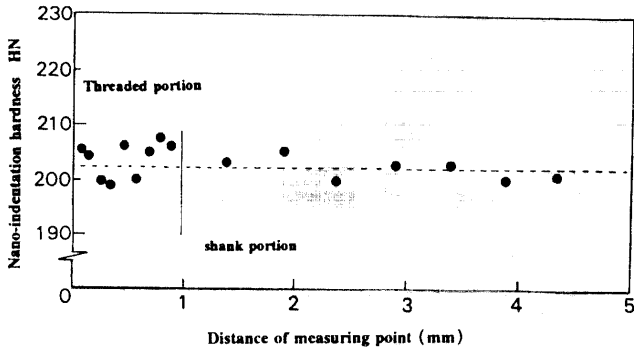


Fig. 5 Hardness distribution of the A direction

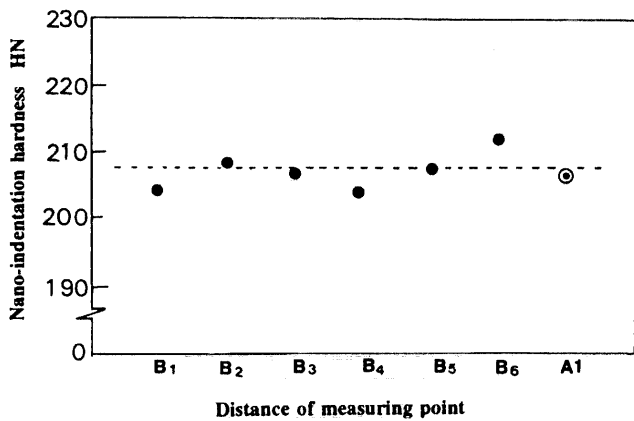


Fig. 6 Hardness distribution of the B direction

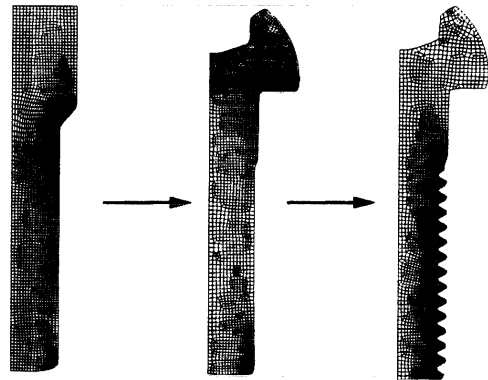
全体的に比較的ばらつきの少ない硬さ分布を示し、この場合の硬さの平均値は $HN_{115}=202$ 、標準偏差は $\sigma=4.52$ である。ねじ部と軸部の硬さを比較すると、ねじ部の硬さの平均値及び標準偏差が $HN_{115}=203.5$ 、 $\sigma=4.72$ で、軸部の硬さの平均値及び標準偏差が $HN_{115}=200.6$ 、 $\sigma=4.30$ となり、多少ねじ部の方が硬くばらつきが大きいことが分かる。

また、図6にねじ山の谷底(B1~B6の●印)からねじ山の先端(A1の◎印)までの、ねじ山の稜線に沿う超微小硬さ分布を示す。図より、硬さの平均値及び標準偏差は $NH_{115}=208.0$ 、 $\sigma=3.07$ であり、A方向のねじ山内部より表面に近い方の硬さが大きくねじ転造の影響が表れていることが分かる。

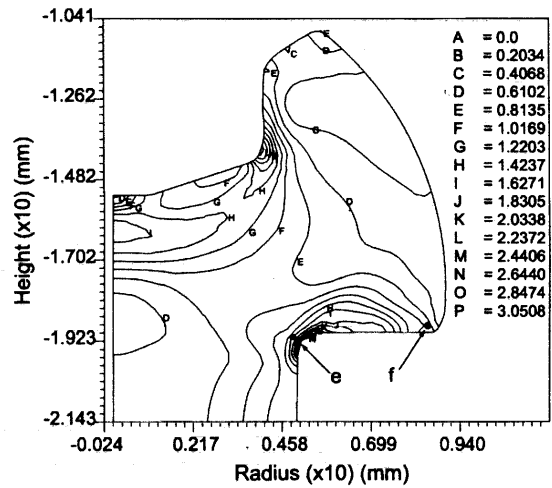
4.2 超微小硬さと有限要素法による相当塑性ひずみの対応関係

図7に、アルミニウム合金ボルトの冷間多段鍛造工程の軸対称剛塑性有限要素法によるシミュレーションモデル及び解析結果である¹⁾。図中の(a)は第1工程で、ボルト軸部の前方押し出しを、(b)は第2工程で、ボルト軸部の前方押し出しとボルト頭部の後方押し出しを、(c)は第3工程で、側方から転造ダイスの押しつけによるねじの転造である。この解析では、第1工程と第2工程における素材とダイス工具の摩擦係数は0.1、第3工程における素材とダイス工具の摩擦係数は0.05、材料定数として、 n 値を0.1、降伏点を250MPaとして計算している。

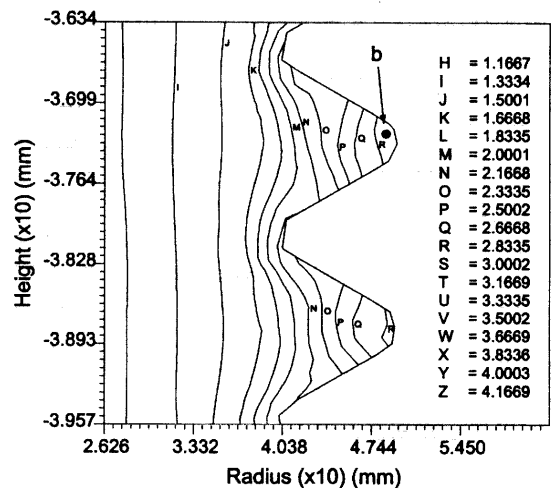
図8に(a)ボルト頭部と(b)ボルトねじ山の有限要素法解析結果の相当塑性ひずみ分布を示す。図中の記号は、



(a) Process A (b) Process B (c) Process C
Fig. 7 Cold forging process for aluminum alloy bolt



(a) Results of bolt head



(b) Results of bolt screw thread

Fig. 8 Results of FEM analysis

図4の硬さ測定位置に対応している。ボルト頭部と軸部の全域にわたり、相当塑性ひずみが $\epsilon_p > 0.5$ となっていることから、解析上は結晶粒の微細化による一様な微細組織化が実現されていることになる。

図9は図8に示すような有限要素法解析結果の相当塑

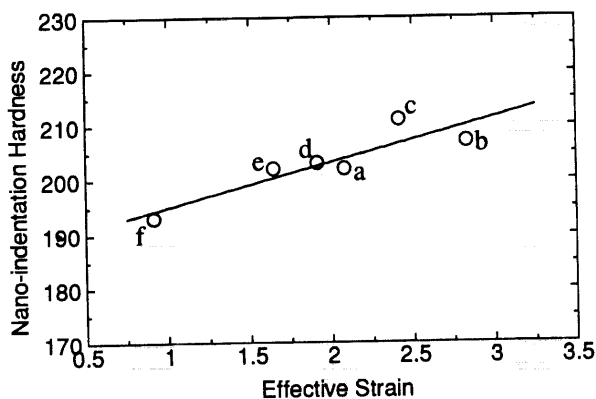


Fig.9 Relation between considerable plastic strain and nano-indentation hardness HN

性ひずみと超微小硬さの関係を示したものであるが、両者は比較的良い対応関係を示し、相当塑性ひずみが大きいと硬さが高くなっている。このことは、製造されたボルト製品の確認手法として超微小硬さ試験が有効であることを示唆している。

4.3 結晶粒組織と超微小硬さの関係

図10はねじ山b部とボルト頭部直下のe部の結晶粒組織を示す。相当塑性ひずみが大きいb部の方が平均結晶粒径は大きくなっている。図11は結晶粒径と超微小硬さを比較したものであるが、両者には明瞭な相関関係は認められない。従って、いわゆるホールベッチの法則は成り立たないことが分かる。

図12は測定点a~fにおいて、最も結晶粒が微細となったボルト頭部直下のe部の結晶粒組織と超微小硬さによる圧子のくぼみの大小関係を示している。図2中の矢印のように、圧子のくぼみ直径は2 μ mであり、ここで測定された超微小硬さは結晶粒内の硬さを示していると考えられるため、結晶粒界の変形抵抗を代表するホールベッチの法則とは無関係であるといえる。

7000系アルミニウム合金の主な強化機構は、固溶元素の析出によるものである。相当塑性ひずみと結晶粒内の超微小硬さに比例関係が認められるのは大きなひずみの堆積が結晶粒内への転移等への析出を促進させているためと考えられる。大きなひずみの堆積により、材料の強度だけでなく靱性の向上や応力腐食割れのような環境強度を改善させる可能性が期待できる。このアルミニウム合金ボルトは、座面角などのアルミニウム合金ボルトの特性を考慮した上で、ASFの車体骨格を有する高排気量のモータサイクルのリアフレームのボルト締結に使用可能であることが確認出来る。

5. 結論

本報告は、ASFを目的とした高力アルミニウム合金ボルトの開発に関連して、従来では測定が不可能であったボルトねじ山の硬さ分布を超微小硬さ試験により求め、A7050+T7の高力アルミニウム合金ボルトの製品評価を行い、有限要素法解析の結果との関係を明らかにした。

1) ボルトねじ山の硬さを超微小硬さ試験により求め、ボルト全域に対して硬さレベルが比較的安定していることを確認した。

2) 開発された高力アルミニウム合金ボルトは、開発上

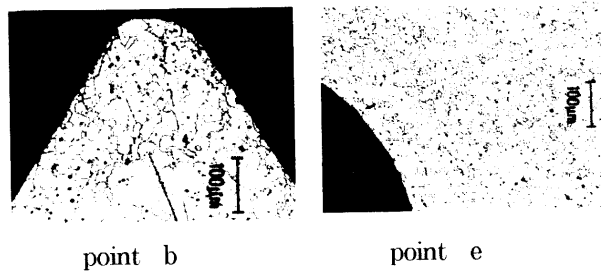


Fig.10 Optical microscopic images

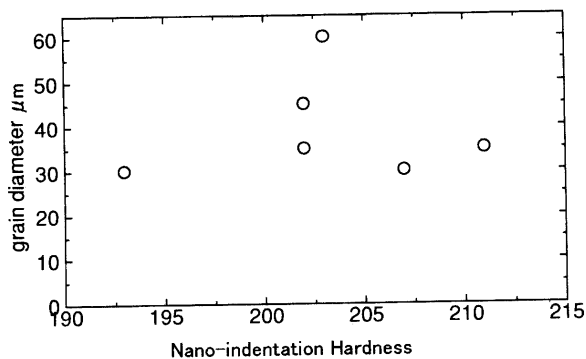


Fig.11 Relation between Grain diameter and nano-indentation hardness

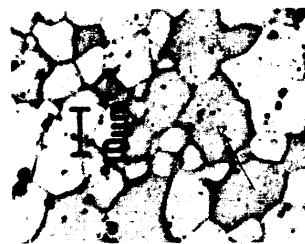


Fig.12 Photograph of Nano-indentation hardness and Optical microscopic images of point e

重要な結晶粒の微細化による一様な微細組織化が実現されていることが分かった。

3) アルミニウム合金ボルトの多段鍛造による剛塑性有限要素法の解析を行った結果、ボルト全域にわたり相当塑性ひずみ $\epsilon_p > 0.5$ となることが分かった。

4) 有限要素法解析による相当塑性ひずみと超微小硬さが比較的良い直線の対応関係を示し、超微小硬さが製品の強度評価に有効であることが確認された。

5) 相当塑性ひずみと超微小硬さが比例関係にある原因は、いわゆるホールベッチの法則とは関係が無く、大きなひずみの堆積が結晶粒内への析出を促進させるためと考えられる。

[参考文献]

- 1) 舟山義弘, 小松恭一: 材料試験技術, Vol.44, No.4(1999).
- 2) Barnees. T.A, Pashby. I.R: J.Mater.Process.Technolgy, Vol.99(2000).
- 3) 松木啓介: 日本ねじ研究協会誌, Vol.26, No.1(1995)
- 4) 坪井智昭, 阿部武治, 多田直哉, 清水一郎: 日本機械学会, 年次大会講演論文集(I), (2001).
- 5) 小林光男, 福田勝己, 佐々木武三, 植松卓彦, 北郷薫: 精密工学会誌, Voll.66, No.4(2000).
- 6) Kubota.Y, Nakamura.T: Proceeding of the 7th Asia Symposium on Precision Forging, (2000).