同時発表：
筑波研究学園都市記者会（資料配布）
文部科学記者会（資料配布）
科学記者会（資料配布）

# 1800 メガパスカル級超高強度ボルトの開発に成功

－ 超高強度で壊れにくい －

平成２１年１０月５日
独立行政法人物質・材料研究機構

## 概　要

１．独立行政法人物質・材料研究機構（理事長：潮田 資勝）の新構造材料センター（センター長：津﨑 兼彰）の木村 勇次 主幹研究員と材料信頼性萌芽ラボ（ラボ長：原田 幸明）の井上 忠信 主幹研究員は、株式会社共和工業所、扶桑機工株式会社と共同で、強くてかつ壊れにくい超高強度ボルトの開発に成功した。

２．構造材料で要求される基本性能は大きな荷重を支えること（強度）と粘り強く壊れにくいこと(靭性)[1)]である。これまで、物質・材料研究機構では、少量の合金元素を添加した鋼材の金属組織を制御することで、低温でも壊れにくい超高強度鋼を開発してきた。（Science, **320** (2008), p.1057, 2008 年 5 月 23 日付けプレスリリース）

３．今回、先に開発した低温でも壊れにくい超高強度鋼材を用いて、従来のボルトの冷間成形（室温近傍）よりも高い温度域（500～700℃）で鋼材をボルトに成形する、いわゆる温間成形技術を確立することで従来にない概念の超高強度ボルトを実現した。1800 メガパスカル（MPa/1MPa=断面積 1㎜$^2$あたり 1N（およそ 0.102kgf））の超高強度において、従来法で作製されたボルトは引張試験で図１(b)のように容易に破断してしまうのに対し、開発したボルトは図１(a)のように木を引きちぎった時のような破壊形態を示して容易には壊れない。すなわち、1800MPa 級の超高強度でボルトの安全性を大幅に高めた。

これまで、ボルトの強度特性は頭部からネジ部にかけて均一であった。これに対し、開発ボルトは、首下円頭部から頭部にかけて強度（硬さ）が傾斜的に低くなる分布を持っている。(図 2)。日本独自の優れた鉄つくりの技術を凝縮した強くて折れにくい日本刀は，炭素量の多い硬い鋼が炭素量の少ない軟らかくて粘りのある鋼を包み込んだ複合組織構造からなる、一種の傾斜機能材料であり、一見、開発ボルトと類似した傾斜機能を有する（図 2)。ところが、日本刀の刃先は硬くてもろいが、開発したボルトのネジ部は開発鋼を素材としているため、硬くても壊れにくい。すなわち、従来とはまったく異なる設計思想によってボルトは創製された。

４．近年、省資源化、省エネルギー化、そして $CO_2$ 排出量削減を目的とした輸送機の更なる軽量化や次世代鋼構造物の実現を目指し、鉄鋼材料のより一層の高強度化が求められている。その中で、鋼板や形鋼の高強度化と同時に、高強度鋼材の接合に用いられるボルトの高強度化も切望されている。強くて壊れにくいボルトの実現は、高強度鋼材の利用域拡大に大きく貢献するものと期待する。

## 研究の背景

鋼構造物の柱と梁などの部材を接合させるうえで、高力ボルト接合は溶接とともに重要な接合法である。溶接と比べて、高力ボルト接合では高度な技能を必要とせず容易に所定の品質が確保できる利点がある。例えば、土木建築分野では引張強さ[2]が 1000MPa 級の高強度ボルトが用いられている。最近では、超高層建築物をはじめとする部材の厚肉化や高強度化に対してより一層のボルトの高強度化が求められており、建築分野では引張強さ1400MPa 級超高強度ボルトが製品化されその利用実績が増えている。さらに、超高強度のボルトが実用化されれば、接合部の更なるコンパクト化が可能となり、鋼構造物のデザインも変革できる。

ボルトの素材に要求される機械的特性は、①成形・加工が容易であること、②耐遅れ破壊性[3]に優れていること、③環境などの影響により材質劣化のないこと、④耐衝撃性に優れていることなどがあげられる。しかし、これらの特性は強度上昇と相反関係にある。引張強さが1200 MPaを超える鋼材では特に遅れ破壊が深刻な問題であり、高力ボルト高強度化の大きな妨げとなっている。遅れ破壊とは、大気腐食によって水素が発生し、鋼材中に侵入して鋼材が脆化する結果、起こる破壊で、時間遅れ破壊の略称である。室温において鋼中で拡散集積する水素が遅れ破壊の原因である。この遅れ破壊のため、1990年代後半に1400 MPaの超高強度ボルトが開発されるまでの約30年間、土木建築用高力ボルトの高強度化は引張強さが1100 MPaまでで頭打ち状態であった。

当機構では、強度２倍・寿命２倍の超鉄鋼材料の実現を目指し、超鉄鋼プロジェクト[4]を 1997 年度から 2005 年度まで推進した。その中の研究テーマのひとつとして耐遅れ破壊性、疲労特性に優れた 1500 MPa 超級低合金鋼[5]の開発、および低合金鋼を用いた超高強度ボルトの創製を試行した。しかし本プロジェクトで開発した 1700MPa 級超高強度ボルトの靭性は極めて低く、大気環境における遅れ破壊も未だ克服できていなかった。

## 研究成果の内容

従来、高力ボルトなどの高強度部品は、成形前に素材を熱処理によって軟らかく(焼なまし)した後に冷間(室温近傍)で部品形状に圧造成形し、その後、焼入および焼戻しするという加工熱処理によって作製される。これに対して、開発したボルトは、先に開発した超微細結晶粒組織を有する鋼を素材にして、圧造が困難な頭部を 700℃付近の高温で成形後、ネジ部を 500℃付近で転造するという焼なまし処理省略型の新しい製造方法を開発した。なお、ボルトの成形は既存の圧造設備で行い、形状は JIS 規格の六角ボルトに準じる。ボルトの破壊で最弱点となるねじ部には開発鋼の超微細結晶粒組織を維持することで高強度高靭性を維持し、ボルト首下円筒部から頭部にかけては傾斜的に強度を低くすることで靭性の低下を抑制した(図 2)。首下円頭部から頭部にかけて強度が低くなるが、ボルト断面の有効径はねじ部より首下円頭部と頭部で大きいことから、ボルト全体としては強度のバランスが保たれている。その結果、1800MPa 級の強度でも健全にねじ部で破断し、しかも従来ボルトよりも壊れにくいボルトが作製できた。

## 今後の展開

耐力[6)]が 1500MPa 以上の超高強度を達成できる鉄鋼材料では、素材の冷間鍛造、焼入れおよび焼戻しなどの従来プロセスで“複雑な形状をした部品”に所定の特性を持たせることの難しさがシーズの発掘と実用化を阻んできた。本成果は、金属組織制御と同時に複雑形状の部品への成形法のブレークスルーを達成したもので、超高強度材料とその部材の実用化に道を拓くものと考える。今後は、ボルトの量産性を念頭に置いたプロセス開発研究へと展開して行く予定である。


## 問い合わせ先：

**（報道担当）**

〒305-0047　茨城県つくば市千現１－２－１
独立行政法人物質・材料研究機構
広報室　TEL:029-859-2026
　　FAX:029-859-2017

**（研究内容に関すること）**

独立行政法人物質・材料研究機構
新構造材料センター　金相グループ
主幹研究員　木村　勇次（きむら　ゆうじ）
TEL：029-859-2123
E-Mail：KIMURA.Yuuji@nims.go.jp

独立行政法人物質・材料研究機構
材料信頼性萌芽ラボ　インテンス研究グループ
主幹研究員　井上　忠信（いのうえ　ただのぶ）
TEL：029-859-2148
E-Mail：INOUE.Tadanobu@nims.go.jp

## 【用語解説】

### １）靭性

粘り強くて、衝撃破壊を起こしにくいかどうかの程度。工業的にはシャルピー衝撃試験などで評価される。シャルピー衝撃試験では、シャルピー衝撃試験機を用い、試験片を 40 ㎜ 隔たっている二つの支持台で支え、かつ切欠き部を支持台間の中央において切欠き部の背面をハンマによって 1 回だけ衝撃荷重を与えて試験片を破断して、衝撃吸収エネルギー、脆性破面率、延性脆性遷移温度などを測定する試験。

### ２）引張強さ

引張試験の経過中、試験片の耐えた最大荷重を試験片の平行部の原断面積で除した値。

### ３）遅れ破壊

工業的には、大気、川水、海水などの比較的腐食性の弱い自然環境下で、高強度合金が引張強さ以下の負荷応力のもとで、ある時間後に破壊される現象。

### ４）研究プロジェクト

●「新世紀構造材料（超鉄鋼材料）プロジェクト」

希少合金元素を使わずに、普通の合金元素の組成だけで、強さ２倍かつ寿命２倍という卓越した性能を持つ超鉄鋼材料を開発することを目的として、1997 年度から開始された。

●「安全で安心な社会・都市新基盤実現のための超鉄鋼研究プロジェクト」

新世紀構造材料（超鉄鋼材料）プロジェクト」の第Ⅱ期に当たり、2002 年度から 2005 年まで行われた。第Ⅰ期で得られた超鉄鋼に関する基礎基盤技術を応用展開させ、超鉄鋼材料の大型化、構造体化技術の開発、さらに設計・構造関係者との連携を深め超鉄鋼材料を利用した革新的構造物の提案を行っている。

●「ナノーミクロ組織制御による構造材料の高性能化技術の構築プロジェクト（新構造材用プロジェクト)」

新構造材料センターが 2006 年度より開始した研究プロジェクト。結晶方位配向制御や結晶粒超微細化などのナノーミクロの階層的な金属組織制御によって、金属系構造材料やその継ぎ手の高性能化（高耐久性・高成形性・高靭性）を達成することを目標としている。これによって、メンテナンスフリーの耐食材料、従来よりも高温で長時間使用できる耐熱材料、さらなる軽量化を達成する高比強度材料など、輸送機器の小型軽量化やプラントの長寿命化を可能とする構造材料や部材の開発を目指している。

## ５）低合金鋼

鋼の性質を改善、向上させるため、又は所定の性質をもたせるために合金元素を 1 種または 2 種以上含有させた鋼。それぞれの元素添加量については下限が定められており、Fe と C 以外の元素いずれもがその下限に満たないものは、合金鋼と呼ばない。このような鋼は炭素鋼と呼ぶ。

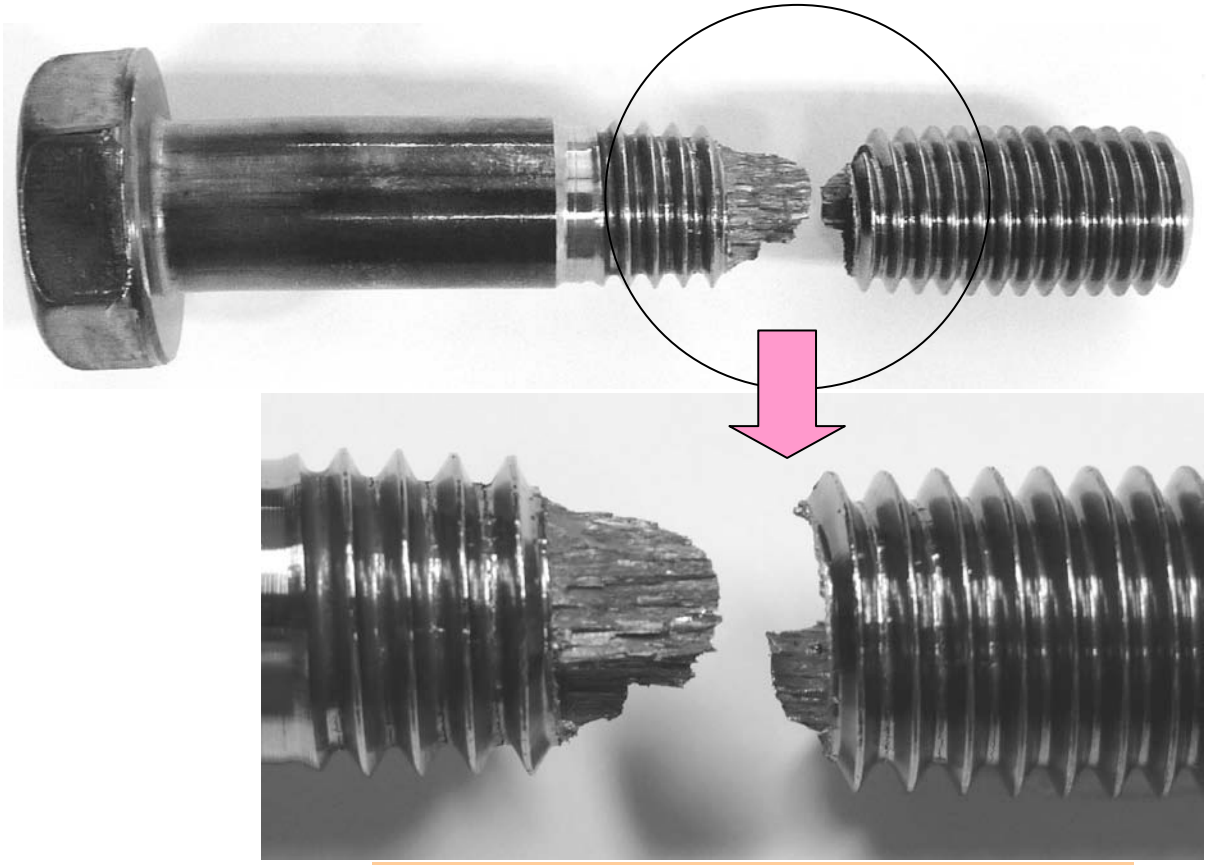
ISO での下限は、次のようになっている。

Al:0.1、B:0.0008、Co:0.1、Cr:0.3、Cu:0.4La:0.05、Mo:0.08、Nb:0.06、Ni:0.3、Pb:0.4Se:0.1、Te:0.1、Ti:0.05、V :0.1、W:0.1、Zr:0.05 [mass%]

これらの合金元素の合計量が 5[mass%]以下ならば低合金鋼、5～10[mass%]ならば中合金鋼、10[mass%]以上ならば高合金鋼と呼ぶ。

## ６）耐力

引張試験において、規定された永久伸びを生じるときの荷重を平行部の原断面積で除した値。ＪＩＳでは、とくに規定のない場合は、永久伸びの値を 0.2%とする。



破断箇所（き裂が伝播しにくい壊れ方）

**図１(a)** 開発した六角ボルト（M12）
ボルト製品の引張強度=1848MPa

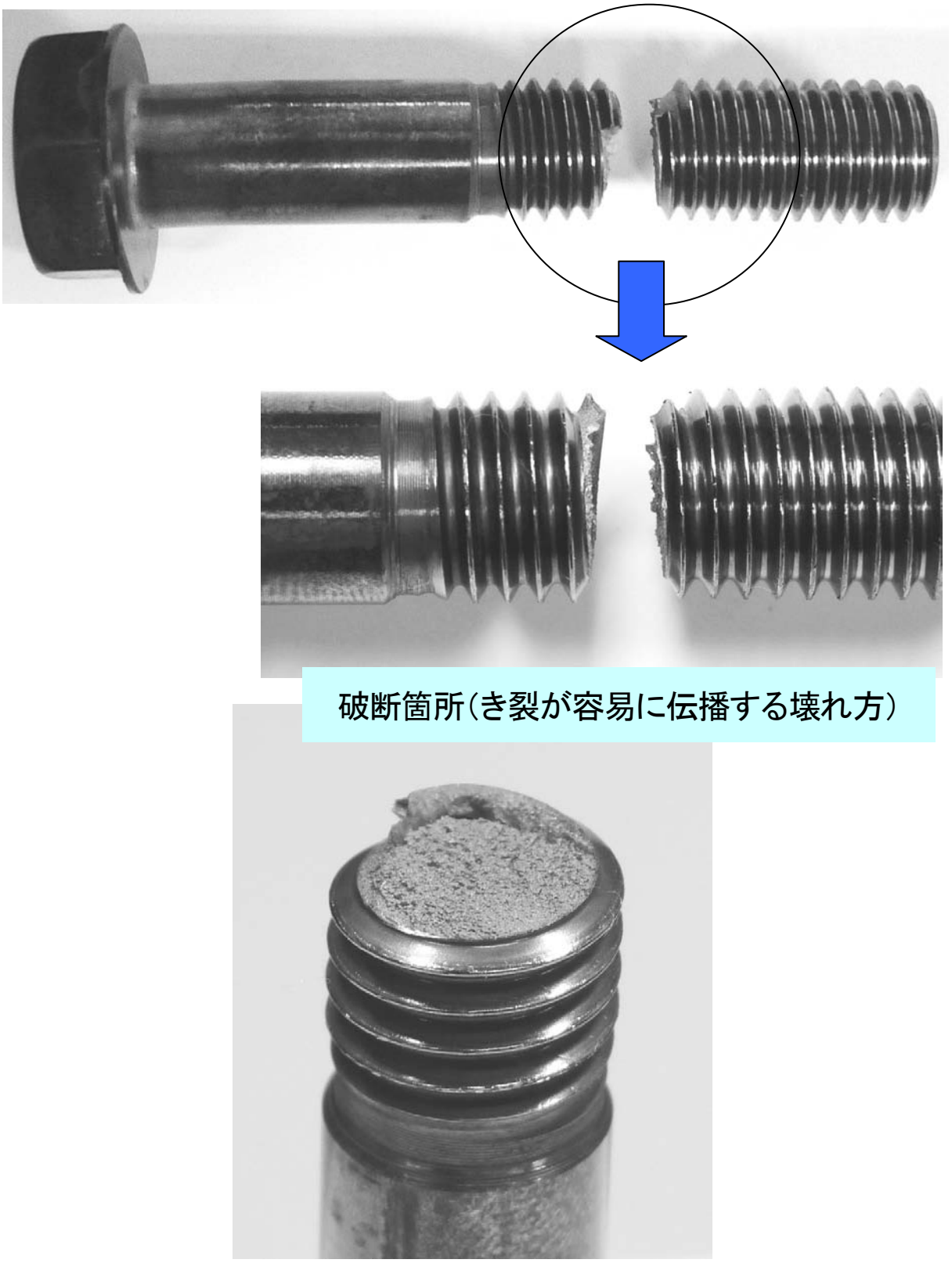



**図１(b)** 従来法（焼入れおよび焼戻し処理）で作製した六角ボルト(M12)
ボルト製品の引張強度=1833MPa

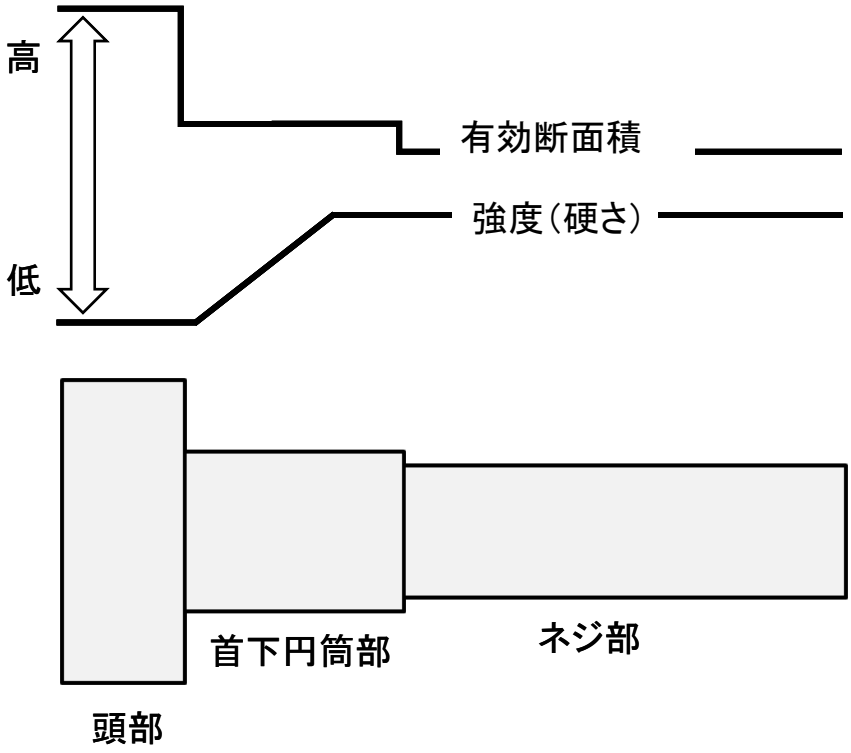



**図2** 開発したボルトの強度（硬さ）分布の模式図