



## ボルト用鋼の動向

伊藤 篤\*

## Tendencies of Bolt Steel

Atsushi Ito

## 1. はしがき

“むかし鉄砲、いまロケット”と、枕詞をつけて呼ばれる種子島に先込め火縄銃が伝来したのが1543年(天文12年)であつて、この頃の銃の尾栓のおねじは鍛造製であつたといわれる。1579年にフランスにおいてねじ切り盤が製作されたが、1788年につくられたワットの蒸気機関にも、まだ手仕上げのおねじが刻まれた鍛造ボルトが使用されていた。1850年にアメリカにおいてボルト頭部冷間加工用のヘッダーが発明され、その翌年には英国において平ダイスを用いるねじ転造が開始された。我が国でボルトの量産が行われたのは、1901年(明治34年)に官営八幡製鉄所が開設され軌条用ボルト・ナットが製造されるようになってからのことであり、フリクションプレス(1902年、ドイツ製)、ねじ切盤(1910年、アメリカ製)等の輸入機械による国産化開始であつたり。すなわち、約50年程度の遅れがあつたが、1960年代には、ねじ部品の製造に必要なヘッダー・ねじ転造機・熱処理用連続炉等、すべて国産化されるに至り、1970年代の中頃には、ねじ部品の世界第一の輸出国となるまでに成長した。ただし近年においては、座金については中国の、またナットについては台湾等の諸国の追いあげが急である。

現在ではねじ部品生産量は年間約250万tで、金額は6200億円を超え、その中の約900億円相当分が輸出に向けられている。1980年度における圧延鋼材生産量9990万tの中の約2%がこれらのねじ部品の製造に使用されていると推定される。とくに特殊鋼に限つてみれば、総生産量1130万tの中に占めるボルト・ナット・リベット用特殊鋼の量は23.4万tである。その中で大きな割合を占める鋼構造用高力ボルトの生産量は約15万tと推定される。

ねじによる結合は、原則として、原形を損なうことなく解結することが可能であるという重要な特徴があり、これを活かすためもあつて、ねじ部品に対しては互換性を備えることについての要求がとくに強い。

1947年に発足した“国際標準化機構”(ISO)において最初にとり上げられた第1技術委員会(TC1)が「ねじ基本」を、また第2技術委員会(TC2)が「ねじ部品」を対象にしていることもこれを裏書きしている。その翌年1948年には、世界各国の経済発展のために、“関税および貿易に関する一般協定”(GATT)が、貿易に関する各種の障害を軽減することを目的とする多数国間条約として発効し、我が国は1955年にこれに加盟し、またISOにも1961年から参加した。1980年からはこのガットスタンダードコードの実施に伴い、JISとISO規格との整合性を図る作業が全般的に進められており、ねじ関係のJISでこれに該当するものの数は27に及んでいる。このような標準規格に関する世界の動向は、ボルト用鋼の動向を考える場合に見逃すことのできない重要な一つの要因である。そのほかに重要な要因として、高力ボルトの遅れ破壊の問題ならびに近年における棒鋼・線材関係の製鋼・圧延技術の進歩を挙げることができよう。

## 2. 鋼ボルトの材質規格

## 2.1 六角ボルトおよび鋼構造用高力ボルト

ねじ部品の代表例として、六角ボルトおよび鋼構造用高力ボルトを取り上げて、それらの機械的性質ならびに材料を規定したISO規格、JIS、DINおよびASTM規格の規格番号を対比してみると、表1のようになる。

## 2.1.1 日本

ねじ部品関係のJISについて、その材料に関する規定に注目してみると、とくに、高強度のボルトの場合には化学組成などは当事者間の協定に委ねられているものが多く、鋼ボルトの材料として鋼種が規定されているのは、六角穴付きボルト(B1176)、太径高温用ボルト材(G4107)、原子炉向太径高力ボルト材(G4108)等であつて、その数は少ない。その理由としては、一つには当事者間の協定による仕様書が厳格に定められている場合が多いということと、もう一つは材料・加工方法の選択を自由にして、より優れた製品の開発を期待するとい

昭和56年12月22日受付(Received Dec. 12, 1981)(依頼展望)

\* 日本鋼管(株)技術研究所(Technical Research Center, Nippon Kokan K. K., 2-1 Suehiro-cho Tsurumi-ku Yokohama 230)

表 1 六角ボルトおよび鋼構造用高力ボルトについての各国規格の比較

規 格	ISO	JIS	DIN	ASTM
六角ボルト	898/1-1978	B 1180-1974	DIN ISO 898 Teil 1 (1979年4月)	F 568-1979 [A 307 A 449 A 357 A 574]
鋼力ボルト 構造用高力ボルト	DIS <sup>1)</sup> (TC2/WG9) [ 8.8 10.9 ]	B 1186-1979 [ F 8 T F 10 T ( F 11 T ) ]	6914-1979年 3月 [10.9]	A 325 [ 8.8 8.8.3 ] A 490 [ 10.9 10.9.3 ]

- ISO 規格草案
- 小数点より上位の数字は kgf/mm<sup>2</sup> 単位で表した引張強さの下限値の約 1/10 を表わす。  
小数点下 1 位の数字は降伏点 (あるいは 0.2% 耐力) の下限値と引張強さの下限値との比の%表示値の約 1/10 を表わす。  
第 2 の小数点の後の 3 なる数字はその鋼が A 588 規格鋼と同等の耐候性を持っていることを示す。

う考え方に由来するものであろう。

2.1.2 西独

西独は ISO/TC2 の発足の当初からその活動に積極的に参加し、DIN の内容は各時点における ISO の動向をよく反映している。1967 年に施行された DIN 267 Teil 3 における鋼ボルトの強度等級および化学組成の規定は表 2 のとおりであつて、ほぼ ISO/DR 911 に準拠したものであつた。ただし、当時の ISO/DR には 14.9 級が制定されていたが、西独では一般的なもので

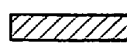
はなかつたために、表にも見られるようにこの等級は点線で示されている。化学組成については、強度等級別に低合金成分量の綱が示され、さらに、快削鋼や調質処理の適用範囲も明示されていた。なお、強度等級 5.6, 6.6, 6.9, 8.8, 10.9, 12.9, 14.9 に対してはトーマス転炉鋼の使用が禁止されていた。

その翌年に ISO 推奨規格として公布された ISO R 898/I (1968)<sup>2)</sup> の内容もほとんどこれと同じであつたが、10 年後の 1978 年に ISO 898/I が改正公布され<sup>3)</sup>、西独はこれをほとんどそのまま採用して、1979 年 4 月に DIN ISO 898 Teil 1 として公布し、それに伴つて上述の DIN 267 Teil 3 は廃止された。この強度等級および化学組成についての新しい規定を表 3 に示す。強度等級の面では、従来の 6.6, 6.9, 14.9 級が廃止され、9.8 級が新設されたが、西独ではこの級の実用化は予定されていない。化学組成ならびに熱処理に関する規定の面で特記すべきことは、まず第一に、8.8, 9.8, 10.9 級用鋼として低炭素含ボロン鋼が追加されたことである。ただしその製品に表示される強度等級を示す浮彫りや刻印の数字の下にはアンダーラインをつけて、その他の鋼種によるものとは識別できるようにしなければならないことになっている。つぎに、8.8, 9.8, 10.9, 12.9 級の製品について、最低焼もどし温度ならびにその確認試験の実施が規定された。すなわち供試の製品に対し、規定の最低焼もどし温度より 10°C 低い温度に 30 min 保

表 2 ボルト用鋼の化学組成についての DIN 267 Teil 3 (1967年10月~1979年3月) の規定の抜粋

引張強さ下限値 $\sigma_{Bmin}$ (kgf/mm <sup>2</sup> )	34	40	50	60	80	100	120	140	
7									
8									
9									
10									
12									
14									
16									
18									
20									
25									
30									
1.6									
8									
18									
24									
39									

$\Sigma = Cr + Mo + Ni + V$

 この範囲の強度等級においては快削鋼を適用してよい。

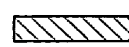
 この範囲の強度等級は調質処理によるものとする。

表 3 ボルト用鋼の化学組成についての DIN ISO 898 Teil 1 (1979年4月～) の規定の抜粋

強度等級 (記号)	材料ならびに熱処理	化学組成 (重量%) (チェック分析値)				最低焼もどし 温度 (°C)
		C min	C max	P max	S max	
3.6 <sup>1)</sup>	低炭素鋼	—	0.20	0.05	0.06	—
4.6 <sup>1)</sup>	低炭素鋼あるいは中炭素鋼	—	0.55	0.05	0.06	—
4.8 <sup>1)</sup>						
5.6	低炭素鋼あるいは中炭素鋼	—	0.55	0.05	0.06	—
5.8 <sup>1)</sup>						
6.8 <sup>1)</sup>						
8.8	低炭素鋼に、例えばボロン、マンガンあるいはクロムを添加し、焼入れ、焼もどし	0.15	0.35	0.04	0.05	425
8.8	中炭素鋼、焼入れ、焼もどし	0.25	0.55	0.04	0.05	450 <sup>2)</sup>
9.8	低炭素鋼に、例えばボロン、マンガンあるいはクロムを添加し、焼入れ、焼もどし	0.15	0.35	0.04	0.05	410
9.8	中炭素鋼、焼入れ、焼もどし	—	—	—	—	—
10.9	低炭素鋼に、例えばボロン、マンガンあるいはクロムを添加し、焼入れ、焼もどし	0.15	0.35	0.04	0.05	340
10.9	中炭素鋼、焼入れ、焼もどし	0.25	0.55	0.04	0.05	425
	あるいは 中炭素鋼に、例えばボロン、マンガンあるいはクロムを添加	0.20	0.55	—	—	—
	あるいは 合金鋼 <sup>3)</sup>	0.20	0.55	0.035	0.035	—
12.9	合金鋼 <sup>3)</sup>	0.20	0.50	0.035	0.035	380

1) 快削鋼を適用してよい。その場合には、 $S_{max}=0.34\%$ 、 $P_{max}=0.11\%$ 、 $Pb_{max}=0.35\%$

2) M20 以下のボルトの場合には、最低焼もどし温度を 425°C としてよい

3) 合金元素として、Cr, Ni, Mo, V の一種以上を含有していなければならない

持するという熱処理を施すものとし、この熱処理による硬さ(三点の平均値)の低下量が、ビッカース硬さ単位で 20 以下でなければならないと定められた。

### 2.1.3 アメリカ合衆国

アメリカ合衆国では、周知のように、従来インチ系のユニファイねじが採用されていて、メートル系の ISO ねじへの移行については数多くの難問を抱えているであろうことは、想像に難くないが、世界の大勢に従って、ASTM 規格においても、メートル系ねじ部品についての規格の数が増加している。とくに 1979 年には前述の ISO 898/1-1978 に対応して、ANSI/ASTM F 568-79 “炭素鋼製あるいは合金鋼製メートル系おねじファスナー” が制定され、また F 10T 級の鋼構造用高力ボルトについての規格 ANSI/ASTM A 490-79 においても、ボルト用鋼として低炭素含ボロン鋼が追加された。F 8T 級の鋼構造用高力ボルトについての規格 ANSI/ASTM A 325 に低炭素含ボロン鋼が採用されたのは 1971 年であるから、この間に 8 年の期間を要したことになる。

### 2.1.4 ISO 898/1-1978 と ANSI/ASTM F 568-79 の相違点

ANSI/ASTM F 568-79 (以下 ASTM と略記する) には、ISO 898/1978 (以下 ISO と略記する) の方針に従いながら、豊富な体験に基づく独自の主張も含まれていて、ボルト用鋼の動向を考える上でも興味深い。

(1) ASTM においては、化学組成を示す表に強度等級別に適用されるボルトの呼び径が併記されているほか、ISO には規定されていない耐候性鋼ボルトも規定されている。その化学組成は、従来の ANSI/ASTM A 325 に表示されていたものと全く同じである。

(2) ASTM では焼入れの種類を規定している。す

なわち、8.8、8.8.3、9.8 級のボルトは液体中に焼入れることとし、10.9、10.9.3、12.9 級用の鋼については、細粒鋼でなければならないとした上に、油焼入の後で、ボルトねじ端末から直径に等しい距離の位置の横断面の中心の組織のほぼ 90% 以上がマルテンサイトとなるような焼入性を有するものでなければならないと規定している。

(3) めつきに関して、ASTM では、10.9、12.9 級のボルトに対して溶融亜鉛めつきを施すことを禁止している。これは、10.9 級と同等の性質を有するボルトについて行われた研究の示すところにより、10.9、12.9 級の溶融亜鉛めつきボルトに水素応力腐食われの発生する可能性が認められたためである。

(4) 快削鋼に関して、ASTM では 5.8、8.8 級のスタッドに対してのみ硫黄快削鋼の使用を認めているほかは、人為的にビスマス (Bi)、セレン (Se)、テルル (Te)、鉛 (Pb) を添加された鋼種の使用は禁止している。ISO では、5.8、6.8 級における快削性向上元素含有量を次のように規定している。

いおう (S)<sub>max</sub> = 0.34%、りん (P)<sub>max</sub> = 0.1%、Pb = 0.15~0.35%

### 2.2 耐食性ボルト用鋼

耐食性あるいはまた耐酸性ボルト用鋼について体系的に規定したものとしては ISO 3506(1979)<sup>4)</sup> があり、DIN 267 Teil 11 (1980 年 1 月) も内容はこれとほとんど同じである。これらはステンレス鋼ボルトを規定した規格であるが、ボルトの実用環境は、すきま腐食機構が働く可能性もあり、そのような場合にはステンレス鋼の防食性能は必ずしも有効ではない。したがって実際環境における試用試験が各所で実施されている。たとえば

表 4 低温・高温用ボルト用鋼についての DIN 267 Teil 13 (1980年3月)の抜粋  
a)  $-10^{\circ}\text{C}$  以下の低温用ボルト用鋼

長期使用のさいの規準下限温度 ( $^{\circ}\text{C}$ )	鋼種記号
-253	X12CrNi189 X10CrTi1810
-196	X5CrNi189, X5CrNi1911 X10CrNiTi189
-140	12Ni19
-65	26CrMo4
-60	X5CrNiMo1810 X10CrNiMoTi1810

b)  $300^{\circ}\text{C}$  以上の高温用ボルト用鋼

長期使用のさいの規準上限温度 ( $^{\circ}\text{C}$ )	鋼種記号
350	CK35, Cq35
400	24CrMo5
540	21CrMoV57 40CrMoV47
580	X22CrMoV121 X19CrMoVNbN111
650	X8CrNiMoBNb1616
700	X5NiCrTi2615 NiCr20TiAl

海洋環境下で使用されるボルトについての腐食試験が本四公団によつて実施された<sup>6)</sup>。これは淡路島岩屋田之代沖において、1971年3月から1974年10月までの間にわたつて行われたもので、大型の鋼製ケーソンや海中仮設足場にはボルト接合が採用されるが、その海水中長期使用時の腐食に関する実用的データが少ないということで実施されたものである。その結果によれば、ボルトの海中腐食量は材質によつて異なり、高クロム鋼の腐食は少なく、En29B (3Cr-Mo 鋼) および SNCM 8 (2Ni-Cr-Mo 鋼) の腐食量は SS 41 の 20%~30% である。また電気防食がボルト・ナットの防食法として有効であることが確認されている。

### 2.3 低温・高温用ボルト用鋼

低温・高温用ボルト用鋼について体系的に規定した規格の中で、とくに最近改正されたものとして DIN 267 Teil 13 (1980年3月) を挙げることができよう。その適用温度範囲別鋼種記号を表4に示す。

## 3. 遅れ破壊

### 3.1 鋼構造用高力ボルト

鋼構造摩擦接合用高力ボルトについての JIS B 1186 における強度規定の変遷をふり返つてみると、本規格制定当初の 1964 年当時では、F9T, F11T, F13T の三等級によつて構成されていたが、その後 1967 年には F8T, F10T, F11T の三等級に変わつて、F13T は姿を消し、さらに 1979 年に至つては F8T, F10T, (F11T) となり、F11T はなるべく使用しないという意味で括弧書きにされた。このような動向は我国に限つたことではなく、前出の ASTM-A 490 においても、ボルト強度の上限値が 1971 年に 180 ksi (約 126 kgf/mm<sup>2</sup>)

から 170 ksi (約 119 kgf/mm<sup>2</sup>) に下げられている。

一般に鋼構造物には 50 年以上に及ぶ長寿命が期待されているが、その摩擦接合継手に使用される高力ボルトは、降伏点に近い軸力が常時作用する状態で各種の腐食環境にさらされる場合が多い。したがつて使用開始後にある程度の時間が経過した後で破断することがあり、周知のように“遅れ破壊”と呼ばれている。

上述のように高力ボルトの強度の上限値が逐次引き下げられる経過をたどつたのはこの遅れ破壊についての当面の対策としてであり、他方において、腐食環境下における高強度鋼の遅れ破壊について各方面で研究が続けられている。

我が国では昭和 30 年代の中頃から鋼製橋梁の現場継手に高力ボルトが使用されるようになり、継手剛性が高く、騒音公害がなく、施工が容易で信頼度がよい等々の長所のために、土木建築の各界においてその使用量が急激に増大した一方で、ボルト素材面では同じ頃に低炭素含ボロン鋼の開発が進められたために、この種のボルトの遅れ破壊の事例が多い。この系統の高力棒鋼の開発は、我が国もアメリカ合衆国もほぼ同じ頃であつたが、高力ボルトへの適用は我が国の方が早く、1964 年頃に F13T クラスの強度に熱処理されて橋梁に使用された例がある<sup>6)</sup>。これらのボルトに遅れ破壊が発生したことが端緒となつて、橋梁建設業界を始めとして学界に至るまで各界において高強度鋼の遅れ破壊に対する関心が高まり、高力ボルトの遅れ破壊の実態・その発生原因についての知見が深まりつつある。たとえば、橋梁建設業としての立場から考えられているボルトに関する留意点は次のとおりである<sup>7)</sup>。

- 1) 引張強さは 120 kg/mm<sup>2</sup> 以下とする。また焼もどし温度は  $400^{\circ}\text{C}$  以上であること。
- 2) 硬さは  $H_{RC}=36$  以下であること。浸炭層のないこと。
- 3) ボルト形状に、過大な応力集中の原因となる切り欠きのないこと。

周知のとおり、ピアノ線のように冷間加工によつて高強度を付与したものに比べて、焼入焼もどし処理によつて高強度を付与したものは遅れ破壊感受性が高く、他方、遅れ破壊破面には旧オーステナイト粒界面が露呈している場合の多いことに関連して、調質鋼の旧オーステナイト粒界の性質については関心の持たれるところであるが、C. L. BRIANT ら<sup>8)</sup>によれば、高強度鋼の調質熱処理にさいし、焼入前のオーステナイト状態において、P, 錫 (Sn) 等の不純物元素がオーステナイト結晶粒界に濃縮し、この状態から焼入れした後に焼もどすと、焼もどし温度が約  $400^{\circ}\text{C}$  未満の場合には、析出炭化物との相互作用により、旧オーステナイト結晶粒界は水素脆化を起こしやすい。なお、マンガン (Mn) は P 等の不純物元素のオーステナイト結晶粒界への移動を助長する。この

表 5 海洋環境における耐遅れ破壊性にすぐれた高強度ボルト用鋼

記号	化学組成 (重量%)									処 理	引張強さ (kg/mm <sup>2</sup> )
	C	Cr	Ni	Co	Fe	Mo	Ti	Al	その他		
8740 (SNCM 240)	0.40	0.50	0.55	—	bal	0.25	—	—	—	焼入れ, 焼もどし	130
A 286 (SUH 660)	0.05	15.0	26.0	—	bal	1.25	2.15	0.2	0.3V 0.004B	60%冷間加工 650°C時効	140
Maraging -200	0.03	—	18.5	8.5	bal	3.25	0.20	0.10	—	溶体化, 時効	135

ような観点より、製鋼原料として各種の屑鉄が使用される場合には、それらから持ち込まれる可能性のある Sn, ひ素 (As) 等の不純物元素に対して、十分な配慮が必要である。また成分系による炭化物析出挙動の変化を考慮しての熱処理が必要である。

低炭素含ボロン鋼は冷間圧造に適した延性を有し、ヘッディング加工が容易なために、ボルト製造業界に好まれている。また最近では 1979 年のモリブデン (Mo) 原料価格急騰が契機となつて、各種の省 Mo 鋼が開発されているが、たとえば省 Mo 滲炭鋼などは上述の低炭素含ボロン鋼とよく似た成分系のもになつている。このように、この種の鋼はますます多用される傾向にあつて、その耐久性向上のために、不純物元素の排除、最低焼もどし温度の確保さらにはまたオーステナイト結晶粒の粗大化防止等が図られている。

### 3.2 ロケット用高強度ボルト

米空軍はタイタンⅢ開発計画の途次において、そのブースターに使用された高強度ボルトの海洋環境下における遅れ破壊の発生に、6, 7 年間にわたつて悩まされた。その対策解明のための研究によつて、食塩水や海洋性大気中において耐遅れ破壊性良好と認められた材料は表 5 のとおりである<sup>9)</sup>。中でも、析出硬化型のオーステナイト系ニッケル・クロム鋼 A 286 (JIS SUH 660) を 60% 冷間加工後 650°C で時効させると、140 kgf/mm<sup>2</sup> を超える強度が得られ、かつ遅れ破壊に対する抵抗力も著しくすぐれていることが見出されて、その他の析出硬化型の鋼は、逐次、すべてこの鋼種に交換された。また可能なかぎりボルト軸力を降伏点の 40% に相当する大きさまで下げたり、あるいはまた、引張強さ 112 kgf/mm<sup>2</sup> のボルトでよいように設計上の配慮がなされた。また遅れ破壊は腐食反応によつて発生する水素に起因するものであり、これに関しては異種金属同志の接触が極めて有害であるという認識の下に、化成処理や陽極酸化処理なども検討された。

## 4. む す び

近年の鉄鋼製造技術の動向の底にあるものとして、

(1)省力, (2)省エネルギー, (3)付加価値 なる三つの要素を挙げることができよう。これらの三つの要素は、それぞれ相互間でも影響を及ぼし合つている。たとえば省力化して操業を電算機管理化することによつて、新しい手順に従つた加工を精度よく実施することが可能になつて、これが新しい付加価値産出につながる。

ボルト用棒鋼・線材および線はボルトに加工される過程において、他の鋼板や条鋼とは比較にならぬほどに、細密な材質検査を受けているとも見做されるわけであつて、その品質は製造技術の水準を敏感に反映する。

純酸素転炉の複合吹錬化による原料配合自由度の拡大、炉外精錬の実施による有害不純物量の低減・合金組成の精度向上、連続铸造による組成均一度の向上・非金属介在物の微細化、制御圧延を可能にする圧延機能力ならびに制御用機器の性能向上および制御冷却法の開発等々による後工程の熱処理省略化など、棒鋼・線材製造技術の近年の進歩にはまことに目覚ましいものがある。

ボルトはその用途に応じて、強度・耐遅れ破壊性・耐食性・耐低温性・耐高温性等要求される性能はさまざまであるので、そのおのおのについて十分な試用試験結果に基づいて最適成分系を選定して規格化し、上述の諸技術を駆使して、組成均一で有害不純物少なくなかつボルトへの成形加工容易なボルト用鋼を提供することが今後目指すべき方向であると考えられる。

## 文 献

- 1) 益田 亮: 日本機械学会誌 (1975), p. 955
- 2) JIS ハンドブック“ねじ” (1979), p. 995
- 3) JIS ハンドブック“ねじ” (1981), p. 1038
- 4) JIS ハンドブック“ねじ” (1981), p. 1111
- 5) 森本隆也: 本四技報, 1 (1977), p. 28
- 6) 福井彰一: 特殊鋼 (1968. 7), p. 18
- 7) 菅原一昌: 虹橋 (1981. 8), p. 43
- 8) C. L. BRIANT and S. K. BANERJI: Met. Trans. A. (1979), P. 123
- 9) J. K. STANLEY: AIAA PAPER No. 72-385, P. 9