

冷間圧造性に優れた線材の開発

阿南吾郎・並村裕一・長谷川豊文・隠岐保博

神戸製鉄所・糸鋼技術部

Development of Wire Rods with Improved Cold Headability

Goro Anan・Yuichi Namimura・Toyofumi Hasegawa・Yasuhiro Oki

Kobe Steel's alloy designs for steel wire rods with improved cold headability are presented in this paper. The influence of chemical compositions, rolling conditions, and drawing conditions on the cold headability are explained first. Following this some examples of newly developed steels for bolts utilizing this newly-developed concept are explained. The first example uses heat-treatment-free wire rods with improved cold headability. The second example uses B bearing steels with improved anti-delayed failure properties.

まえがき = 鋼の冷間圧造加工は、現在では、自動車・電気機器、その他の機械部品の生産に欠くことのできない製造方式となっている。これは、従来、熱間鍛造または切削加工によって成形されていた製品に広く適用され、生産性の向上、コスト低減、省エネルギー化に寄与してきた。冷間圧造加工により線材から製造される機械部品の大部分は機械要素としてのボルトやナットである。これらにもちいられる冷間圧造用線材は、球状化焼なまし処理や焼入れ焼戻し処理など多くの熱処理工程を経てボルトやナットに加工されている。このため、これら工程の簡略・省略への関心は、非常に高まっている。

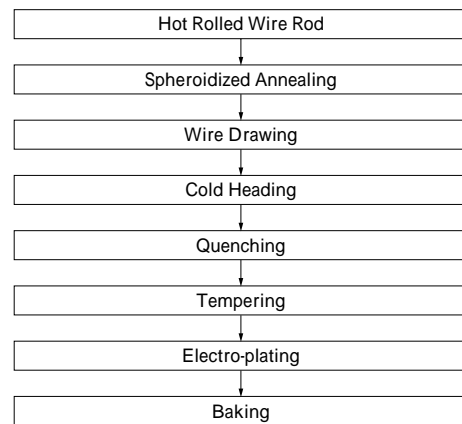
いっぽう、地球環境対策のため自動車の燃費向上が求められており、ボルトの高強度化や高品質化（靱性向上や耐遅れ破壊特性の向上など）への関心も以前にも増して高い。このような要望に対応するために弊社では新しい特性を備えた冷間圧造用線材を開発している。ここでは、弊社の冷間圧造用線材設計の考え方と最近のユーザーニーズに対応し新しく開発した非調質ボルト用線材およびボロン鋼について解説する。

1. 冷間圧造用線材の動向

第1表にボルトの製造工程例と使用素材例を強度区分別に示す¹⁾。強度区分4.8~6.8のボルトでは低炭素鋼（約0.25mass%以下）ベースの冷間圧造用炭素鋼線材（JIS SWRCH線材）がもちいられている。この

強度クラスでは、ユーザによるボルト製造工程の指定など特別な場合を除きもともと製造工程が簡略化されているので、工程省略の要望は少ない。

強度区分8.8~9.8のボルトでは中炭素鋼系（0.40mass%程度）のSWRCH線材がもちいられている。この場合、第1図に示したような工程で製造されるが、工程省略によるコストダウンを目的に軟化処理、焼入れ焼戻しを一気に省略した非調質ボルト用KNCH線材が開発されている²⁾。KNCHシリーズは、ユーザからの高強度化・高品質化の要望に対応し、基本型のKNCH8に



第1図 一般的なボルトの製造工程
Fig. 1 The typical production process of cold heading bolts

第1表 ボルトの製造工程例と使用素材例

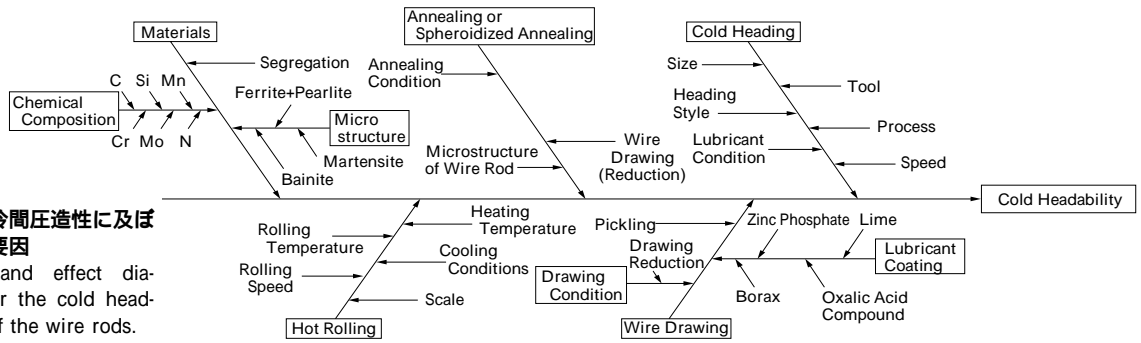
Table 1 Example of process and wire for cold heading bolt

Symbol of JIS Class	Tensile Strength N/mm ²	Example of Process	Example of Wire Rod Used	
			Specified in JIS	Development by Kobe Steel
4.8	min. 420	(R) Dr CH	SWRCH8A	KCH8A
5.8	min. 520	(R) Dr CH	SWRCH18A	KCH18A
6.8	min. 600	(R) Dr CH	SWRCH22A	KCH22A
8.8	min. 800(M16) min. 830(> M16)	(R) Dr CH	—	KNCH8/8P/8S
		(R) (A) Dr CH (H)	SWRCH38K/43K	KCH38K/43K
		(R) Dr CH (H)	SWRCHB435	KCH21BTA
9.8	min. 900	(R) Dr CH	—	KNCH9
		(R) (A) Dr CH (H)	SWRCH41K	KCH41K
		(R) (A) Dr (As) Dr CH (H)	SCr440, SCM435	—
		(R) Dr CH (H)	SWRCHB526	1023B-M
10.9	min. 1 040	(R) Dr CH	—	KNCH9
		(R) (A) Dr (As) Dr CH (H)	SCr440, SCM435	—
		(R) Dr CH (H)	SWRCHB526	1035B
12.9	min. 1 220	(R) (A) Dr (As) Dr CH (H)	SCM440	KNDS2
—	min. 1 300	(R) (As) Dr (As) Dr CH (H)	—	KNDS3, KNDS4

(R) : Hot Rolled Wire Rod, (A) : Annealing, (As) : Spheroidized Annealing
(H) : Quenching and Tempering, Dr : Wire Drawing, CH : Cold Heading

第2図 材料の冷間圧造性に及ぼす各種要因

Fig. 2 Cause and effect diagram for the cold headability of the wire rods.



加え強度区分9.8用のKNCH9や靱性を高めたKNCH8 P³⁾, さらにボルト圧造時の工具寿命を改善したKNCH8 S(本号p.87参照)などメニュー拡張を進めている。

強度区分10.9~12.9のボルトでは、焼入れ焼戻し処理を前提としたが、クロム鋼、クロムモリブデン鋼などの低合金強靱鋼が主となる。しかし、素材の低廉化とボルト製造工程の簡略化を目的に、高価なクロムやモリブデンに替えてボロンを添加したボロン鋼をもちいる動きが活発化している。これまで強度区分10.9のボルト用素材としてボロン鋼が普及しなかった理由としては遅れ破壊の問題があげられる⁴⁾。しかし、現在ではすでに遅れ破壊問題に対処可能で、かつ大幅な工程省略を達成した新しい強度区分10.9クラスのボルト用ボロン鋼が開発されている⁵⁾。

強度区分12.9を超えるボルトでは、通常の低合金鋼では遅れ破壊を起こしやすい。遅れ破壊を改善するためには特別な工夫をした鋼をもちいる必要がある⁶⁾。

2. 冷間圧造用線材設計の考え方

冷間圧造用線材には、割れにくいこと、加工しやすいこと(圧造工具寿命が長持ちすること)が望まれる。その冷間圧造性の良否を判断する方法として、変形抵抗および変形能などの評価がもちいられる。変形抵抗とは、材料を変形させるために必要な応力のことで、これが大きいと成形時の加工力が高くなる。つまり金型の摩耗や塑性変形・破壊が起こりやすくなることを意味する^{7)β)}。また、変形能とは、破壊することなしにどの程度変形しようかを表す材料の性質で、通常、圧造加工時の割れ発生限度の大小で評価される^{7)β)}。

第2図に示すように冷間圧造性には、素材のみに限らず、冷間圧造するまでの各工程も影響を及ぼしている。本稿では素材、圧延条件および圧造前加工の影響について述べる。

2.1 冷間圧造性に及ぼす素材と影響

2.1.1 化学成分の影響

第2表に示すように変形能へ悪影響を及ぼす化学成分としてC, S, N, Oなどが挙げられる⁹⁾。また変形抵抗に対しては、第2表、および第3図に示すように主要元素を増加させると高くなる傾向にあり、とくにCの影響がもっとも大きく、次いでSiの影響が大きい¹⁰⁾。

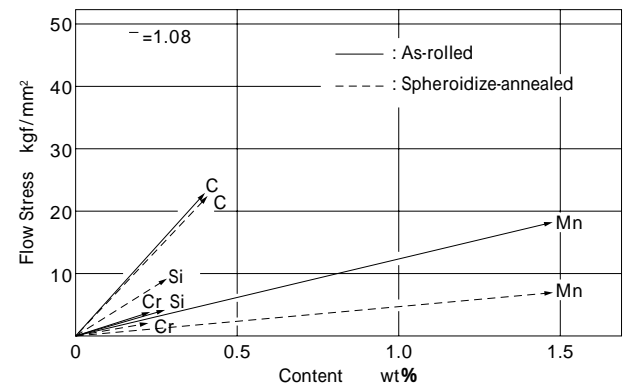
2.1.2 前組織の影響

第4図に限界据込み率と炭素当量 $\{C_{eq}=C+1/5(Si+Mn)\}$ との関係式を示す¹¹⁾。球状化焼なまし材は圧延ま

第2表 冷間加工性と機械的性質に及ぼす化学成分の影響

Table 2 Influence of chemical composition on cold formabilities and mechanical properties

Alloy (Range, mass%)	Flow Stress	Formability	Tensile Strength	Hardenability	Note
C (0.05~0.50)					
Si (0.05~0.35)		—	—	—	This should be few.
Mn (0.50~1.60)		—			
P (0.03~0.005)	—	—	—	—	
S (0.005~0.065)	—	—	—	—	
Cr (0.004~1.50)		—			This is effective also to toughness.
Mo (0.005~0.50)		—			This is effective also to toughness.
Al (0.020~0.10)	—	—	—	—	This is effective to grain size.
N (0.001~0.013)	—	—	—	—	Coarse grain generates when this is extremely few.
O (0.0006~0.015)	—	—	—	—	This should be few.
	Large Increase	Increase	No Effect	Decrease	Large Decrease



第3図 据え込み加工性に及ぼす合金元素の影響

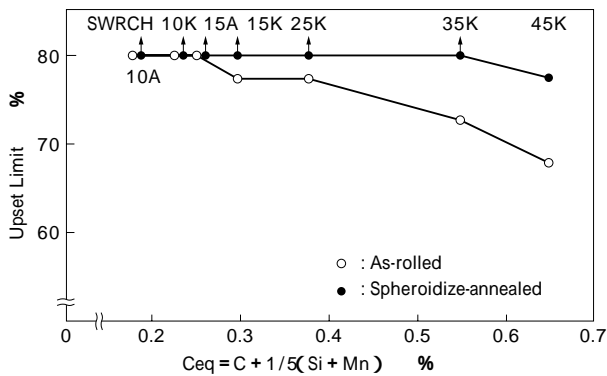
Fig. 3 Effect of alloying element on upsettability

また、素材よりも限界据込み率が高く、 C_{eq} が0.55以下の材料では据え込み率80%でも割れを生じない。

2.2 冷間圧造性に及ぼす圧延条件の影響

近年工程省略の観点から、ボルト圧造前の軟化処理工程を省略する動きが活発である。そのため圧延材の諸特性(コイル間、コイル内の強度ばらつきなど)が、そのまま冷間圧造性や最終製品の特性に影響を及ぼすことになる。つまり圧延条件を適切に管理し、品質ばらつきの少ない圧延材を生産することが要求される。

圧延材の強度ばらつきを抑制するには、圧延後の制御冷却により素材全体の冷却速度をできるだけ均一にする方法が採用されている。また、製品焼入れ後の結晶粒粗大化を抑制するには、成分調整および制御圧延により鋼



第4図 限界据え込み率と炭素等量の関係
Fig. 4 Relationship between Upset limit and Carbon equivalent

中に微細な化合物を析出させることが有効な手段である。

2.3 冷間圧造性に及ぼす圧造前加工の影響

圧延まま材では、冷間圧造時に要求される表面性状や寸法精度を満足しないため、皮膜潤滑処理および伸線加工がおこなわれている。

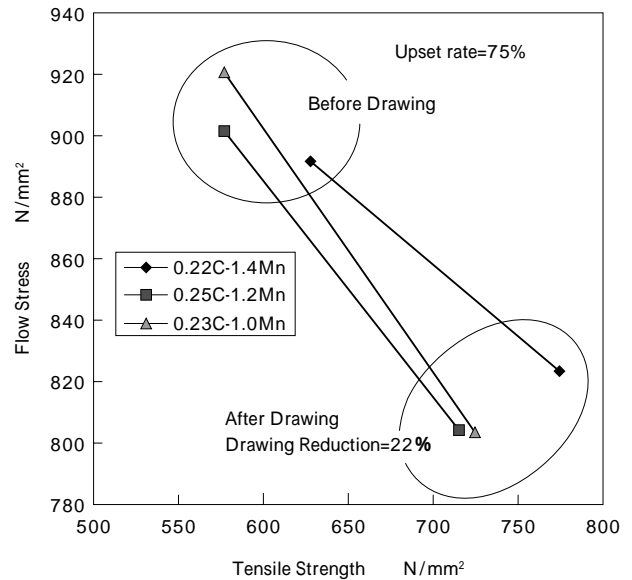
皮膜潤滑処理は伸線および冷間圧造時に金型と材料が直接接触するのを避け、焼付きを防止するとともに、摩擦係数を小さくさせるためにおこなわれる。皮膜処理の方法は、反応型と非反応型に分けられ、一般によく使用されるりん酸亜鉛皮膜は反応型であり、石灰皮膜は非反応型である。複雑形状部品の冷間圧造には、主に付着性の良好なりん酸亜鉛皮膜が使用されている。しかし、この皮膜剤中に含まれているりんが、焼入れ加熱時に鋼材表面より鋼中に浸入する“浸りん”現象が問題視されている¹²⁾。“浸りん”は高強度部品が突然脆性的に破断する遅れ破壊を促進する原因となるといわれており、高強度ボルトにおいてはりんを含まない皮膜潤滑剤を使用することが望まれている。

また非調質線材では、伸線加工により変形抵抗を低減する方法が採用されている。第5図に示すように圧延材と伸線材を比較すると、伸線材のほうが強度は高いにもかかわらず、変形抵抗が低い結果がえられている。この原因は、一種のパウシンガー効果によるものと考えられているが¹³⁾、写真1の伸線ワイヤの圧造前後における透過電顕像により詳細に説明できる。圧造前では転位が亜粒界の周辺に偏在している。圧造後は亜粒界の周辺に転位はほとんどみられない。この結果から、圧造にともなう伸線と逆方向の加工が、伸線によって生じた転位が消失する方向に動くことで進むと考えれば、伸線による変形抵抗の低下を説明できる。ただ、冷間加工率がきわめて高くなると亜粒界が多くなり転位が少なくなるとの報告もあるので¹⁴⁾、今後のより詳しい調査が望まれる。

3. 具体例

3.1 非調質ボルト用線材

非調質ボルト用線材は、従来の球状化焼きなましを施した線材に比較すると線材強度が高いため工具寿命が短くなる傾向は避けられない。そこで、工具寿命改善のために新しい非調質ボルト用線材を開発したので以下に紹介する。



第5図 線材の変形抵抗と引張強さに及ぼす伸線の影響
Fig. 5 Effect of wire drawing on flow stress and tensile strength of wire rod.

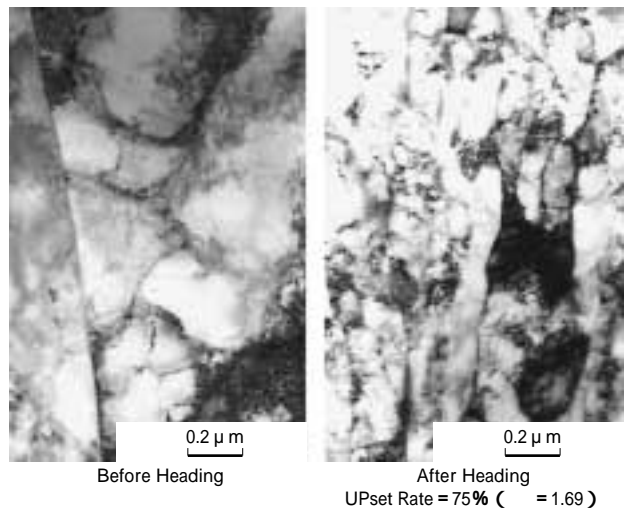


写真1 圧造前後のワイヤのTEM像
伸線率 = 23% ($\epsilon = 0.26$) 0.3C-1.5Mn-0.1Cr 鋼
Photo.1 TEM photograph of drawn wire before and after cold heading
drawing reduction = 23% ($\epsilon = 0.26$) 0.3C-1.5Mn-0.1Cr steel

1) 冷間圧造性

従来鋼にくらべSiや固溶Nを低減し、加工硬化や動的歪み時効による強度上昇を抑制することで、圧造時の変形抵抗を低減している。また、伸線による、一種のパウシンガー効果を利用することでも、変形抵抗を低減している。

第6図は非調質ボルト用線材のボルト圧造時の工具寿命である。従来鋼にくらべ開発鋼は工具寿命に優れており、比較としてもちいたS45Cの球状化焼きなまし材に迫る工具寿命を有する。

2) 線材の強度ばらつき

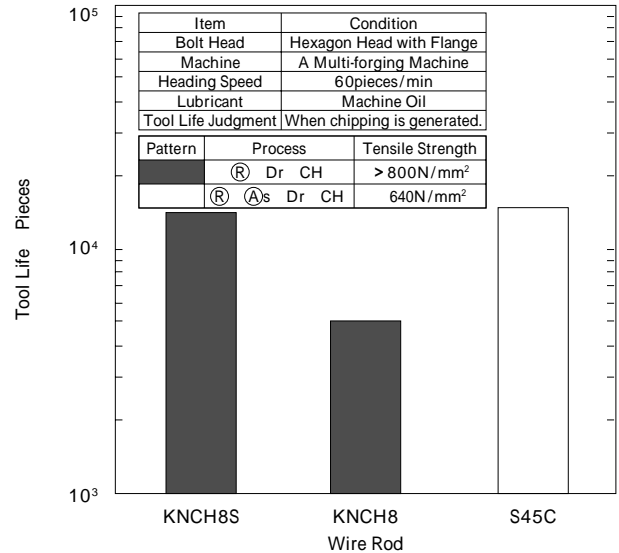
非調質線材では、圧延後の線材の強度が最終製品の強度に直接影響を及ぼすので、圧延後の線材の強度ばらつきを抑える必要がある。そこで化学成分の調整とともに、圧延後の冷却をコントロールすることにより、線材の強度ばらつきを抑えつつ所定の強度を確保している。さらに、成分範囲の狭幅管理を実施し、制御冷却をおこなうことにより、強度ばらつきを低減している。

3.2 10.9 級ボルト用ボロン鋼

従来の10.9級ボルトにはSCr440やSCM435などの低合金鋼が使用され、冷間圧造性を確保するため、ボルト成形前に軟化工程が付与されていた。いっぽう、優れた焼入性を確保することが可能なボロン鋼を使用した場合、低C化および合金添加量の低減が可能である。つまり、素材の冷間圧造性が向上し、製造工程を短縮できる。しかし従来のボロン鋼では、ボルトとしての品質面で耐遅れ破壊特性の低下およびオーステナイト結晶粒粗大化による靱性低下の問題があった。そこでこれらの問題点を改良した新しい10.9級ボルト用ボロン鋼を開発したので以下に紹介する¹⁰⁾。

1) 冷間圧造性

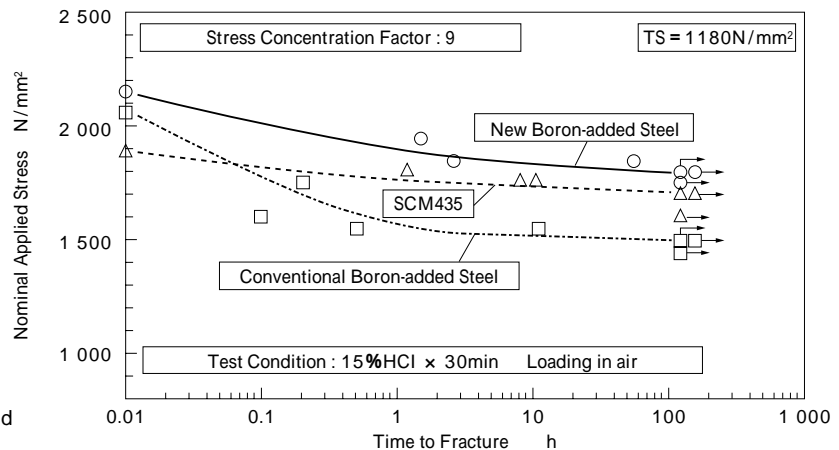
SCM435に対し、C, Si, Cr, Moなどの添加量を抑制することにより優れた冷間圧造性がえられ、軟化工程



第6図 ボルト圧造時の工具寿命

Fig. 6 Life of tool used for cold heading with drawn wires

Steels	Symbol	Chemical Composition mass%								
		C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ti	B
New Boron-added Steel	○	0.25	0.08	1.07	0.009	0.006	0.27	-	Optimum Amount	Added
SCM435	△	0.35	0.24	0.79	0.015	0.022	1.03	0.16	-	-
Conventional Boron-added Steel	□	0.26	0.20	1.04	0.017	0.010	0.16	-	Conventional Amount	Added



第7図 酸大気方式遅れ破壊結果

Fig. 7 Results of delayed failure in acid immersion and atmosphere test

の省略、簡略化が可能である。

2) 結晶粒粗大化防止特性

従来のボロン鋼よりTi添加量を増加させ、制御圧延することにより、鋼中に微細なTi化合物を析出させる。その析出した化合物が、製品焼入れ時の結晶粒粗大化を防止する。

3) 耐遅れ破壊性

C, P, S低減, Ti添加により耐遅れ破壊性の改善を図った。第7図に示すように従来のボロン鋼およびSCM435にくらべ、耐遅れ破壊性が優れている。

むすび = 冷間圧造用線材の鋼種設計の考え方について解説し、最近の非調質ボルト用線材やボロン鋼の開発鋼について紹介した。これらの冷間圧造用線材は今後のニーズに応えるため、さらなる高強度化や高品質化が進められている。

参考文献

- 1) 阿南吾郎ほか：機械設計, Vol.41, No.15 (1997), p.52.
- 2) 中村芳美ほか：R&D 神戸製鋼技報, Vol.31, No.4 (1981), p.34.
- 3) H. Kawakami: Wire Industry, May 1987, p.309.
- 4) 松山晋作：日経メカニカル, No.512 (1997), p.51.
- 5) 並村裕一：特殊鋼, Vol.46, No.1, (1987), p.46.
- 6) 並村裕一ほか：材料とプロセス (鉄鋼協会), Vol.9 (1996), p.1496.
- 7) 古澤貞良ほか：プレス技術, Vol.27, No.8 (1989), p.41.
- 8) 染川雅実ほか：素形材, Vol.38, No.3 (1997), p.1.
- 9) 南 俊弘ほか：R&D 神戸製鋼技報, Vol.23, No.3 (1973), p.68.
- 10) 並村裕一：R&D 神戸製鋼技報, Vol.46, No.2 (1996), p.79.
- 11) 塩崎 武ほか：塑性と加工, Vol.27, No.304 (1986), p.568.
- 12) CH 懇談会：線材とその製品, Vol.33, No.6 (1995), p.22.
- 13) 蟹澤秀雄ほか：金属学会会報, Vol.30, No.6 (1991), p.557.
- 14) L. P. Kubin et al.: Proc. of ICSSMA 8th (1986), p.35.