

展望

線材・棒鋼製品の高強度化の現状と将来

Status and Future in The Steel Wire Rod and Bar for Higher Strength Products

隠岐保博
Yasuhiro Oki

(株)神戸製鋼所 神戸製鉄所
条鋼開発部 部長

1 はじめに

鉄鋼材料は強度や加工性などの需要家の要求にあわせて造り分けることができる。しかも安価でリサイクル性に優れるため、自動車、土木建築などさまざまな分野で使用されている。今後も鉄鋼材料は主要素材として使用されていくと思われる。しかし、社会からの要請として

- ①地球環境でのCO₂削減に寄与する材料
- ②添加元素が循環使用の中で除去可能であること
- ③産業廃棄物削減に寄与する材料の開発

が挙げられる。自動車産業では、表1に示すように排出ガス規制、燃費向上の観点からエンジン、トランスミッション、足回り部品などで高強度化、軽量化が絶えずとめられている。線材・棒鋼は伸線、鍛造、切削などの加工や熱処理を施して用いられるが、生産性を向上するため加工性に優れた鋼材の要望も強い。また、熱処理や加工を省略してコスト低減を図ることのできる鋼の要望もある。社会的には重金属をできるだけ含まないリサイクル性に優れた鋼材への移行がもと

められており、合金鋼から炭素鋼に移行する努力もなされている。

本稿では高強度高品質が要求される冷間圧造用線材、ばね用線材、硬引線用高炭素鋼線材、機械構造用棒鋼（炭素鋼、合金鋼）について現状までの研究開発状況と今後の展望について述べる。

2 線材・棒鋼の研究開発の現状と今後の課題

2.1 冷間圧造用線材

冷間圧造用線材の代表的用途としてボルトがある。これらは自動車、土木建築用締結ボルトなどさまざまな分野で使用されている。表2には強度区分4.8から12.9以上のボルトの加工工程と代表的な鋼種を示している。

強度区分4.8～6.8のボルトでは主に低炭素鋼の冷間圧造用線材（JIS SWRCH線材）が用いられている。これらのボルトでは製造工程は簡略化されており、鋼種変更等の要望は

表1 自動車棒鋼・線材の用途と市場からの要望

	主な用途と要求特性	
エンジン	主運動系	ピストン(高温強度) クランクシャフト(高剛性、焼入れ・焼戻し省略) コンロッド(高剛性化、高強度化、焼入れ・焼戻し省略) コンロッドボルト(高強度化)
	動弁系	カムシャフト(高剛性化) 弁ばね(高強度化)
	本体系	シリンダーヘッドボルト(高強度化)
	燃料供給系	燃料噴射装置用プランジャばね(高強度化)
動力伝達装置	トランスミッション用歯車(高強度化) デフレンシャル用歯車(高強度化) 等速ジョイント(高強度化) ドライブシャフト(高強度化) ベアリング(長寿命化)	
足廻り操舵装置	ホイールハブ(高強度化、焼入れ・焼戻し省略) ナックルスピンドル(高強度化、焼入れ・焼戻し省略) ロアアーム 懸架ばね(高強度化) ステアリングラック(焼入れ・焼戻し省略)	

ほとんどない。

強度区分8.8～9.8のボルトについては中炭素鋼線材のSWRCH線材が用いられてきたが、冷間圧造前に球状化焼なましが必要である。最近では低炭素ボロン鋼¹⁾(たとえばSWRCHB323など)が使用されるようになった。C量が0.20～0.30%であるため、複雑形状を除いて球状化焼なましなしでも冷間圧造することができる。このため、ここ数年で急速にボロン鋼の使用が広まった。強度区分8.8のボルトでは非調質ボルトも使用されている^{2,3)}。非調質ボルトでは焼入れ焼戻し処理も省略され、コスト低減が可能である。しかし、工具寿命の低下などの問題を抱えているため、ボルト形状は限定される。

強度区分10.9以上のボルトでは鋼中の水素による遅れ破壊が発生するため、CrやMoを添加した低合金鋼が使用されてきた。しかし、この強度区分においても、高価な合金元素を使用せず、ボロン鋼を使用して焼ならし省略によるコスト低減を図ろうとする努力がなされてきた⁴⁾。遅れ破壊特性改善のためボロン鋼にTiやNbを添加した鋼が開発され、使用されるようになった。

燃費向上を目的に自動車産業ではコンロッド、シリンダーヘッドを締結するボルトなどでさらなる高強度化が志向されている。これらのボルトでは最小引張強さ1300N/mm²以上の高強度ボルト⁵⁾が使用されはじめており、遅れ破壊防止のため、結晶粒界に偏析するP、Sを極力低減する、Ti、Nb、Vなどを微量に添加し結晶粒の微細化と拡散性水素の低減を図る、Cr、Moなどを添加し軟化抵抗性を上昇させ、焼戻し温度を上げるなどの方策がとられている。

ボルトの将来を展望する時、高強度ボルトの使用が挙げられる。MoやVを多量に添加しても、遅れ破壊強度にはおのずと限界がある。最近、最小引張強さ1600N/mm²の超高

強度ボルトが開発され、使用されはじめている⁶⁾。本ボルトでは高炭素鋼を用いており、特別な元素を添加せず、所望の特性を達成している。軟化熱処理なしで冷間加工されるため、加工性で劣るという問題があるが、ボルト形状を変えることにより解決している。超高強度を達成するための一方策として興味深い。強度区分12.9までは、できればボロン鋼で製造できることが望まれる。微量の特殊元素の添加や低C化は必要であると思われる。

高強度ボルトの遅れ破壊を低下させる要因の一つに浸りんがある。ボルト成形のための潤滑剤としてりん酸亜鉛皮膜が使用されてきたが、そのまま焼入れ焼戻しをするとりんが鋼表面に濃化し、遅れ破壊を助長する^{7,8)}。これを防ぐために、冷間圧造後の潤滑剤の除去や石灰処理による表面処理が行われている。しかし、除去費用の増加や工具寿命の低下などの問題があり、りんを含まない潤滑皮膜処理技術の開発が盛んに行われている。非りん系潤滑皮膜の開発動向もボルトの高強度化の進展に影響を及ぼすと考えられる。

2.2 ばね用線材

2.2.1 弁ばね用線材

高疲労寿命を要望するばねの代表例として、エンジンの吸排気弁に使用される弁ばねがある。1億回以上の繰り返し応力に耐えることが要求される。1970年頃まではピアノ線が使用されてきたが、現在ではSi-Cr鋼を用いたオイルテンパー線が主流になっている。SWOSC-Vが代表的な鋼種であるが、高疲労強度を得るため、高強度化が図られてきた。高強度化を図るため、V添加による結晶粒微細化により耐力比を向上させる方法^{9,10)}が用いられてきたが、焼戻し軟化抵抗増大のためSiを2%添加した鋼も開発されている^{11,12)}(表3)。現在では鋼線の引張強さが2000N/mm²を超えるばねも製造されている。

弁ばねでは数10 μmの大きさの介在物から疲労破壊が発生する。このため、シリコンキルド鋼による清浄化技術が開発された。弁ばねの折損原因になる介在物はAl₂O₃、Al₂O₃・MgO、SiO₂などの硬質介在物であり、これらの介在物は熱間圧延で非延性であるだけでなく、その後の伸線加

表2 ボルトの製造工程例と使用素材例

強度区分	最小引張強さ N/mm ²	製造工程例	使用素材例
4.8	420		
5.8	520	R→Dr→CH	SWRCH8A～22A
6.8	600		
8.8	800(d≤16) 830(d>16)	R→As→Dr→CH→H	SWRCH40K/48K
		R→Dr→CH→H	SWRCHB323
		R→Dr→CH	非調質線材
9.8	900	R→As→Dr→CH→H	SWRCH40K/48K
		R→A→Dr→As→Dr→CH→H	SCr440,SCM435
		R→Dr→CH→H	SWRCHB323,423
		R→Dr→CH	非調質線材
10.9	1040	R→A→Dr→As→Dr→CH→H	SCr440,SCM435
		R→Dr→CH→H	SWRCHB423,526
		R→(A)→Dr→CH→H	新ボロン鋼
12.9	1220	R→A→Dr→As→Dr→CH→H	SCM435
-	(1300)	R→As→Dr→As→Dr→CH→H	特殊元素添加鋼
-	(1600)	R→LP→Dr→CH→BL	SWRS82B+Cr

R: 圧延, A: 焼なまし, As: 球状化焼なまし, LP: 鉛パテンティング
H: 焼入れ焼戻し, Dr: 伸線, CH: 圧造, BL: ブルーイング
例)強度区分4.8: 最小引張強さ 420N/mm²
最小下降伏点 420×0.8≒340N/mm²

表3 代表的な高強度弁ばね用鋼

	C	Si	Mn	Ni	Cr	Mo	V	Nb
2%Si鋼	0.59	1.93	0.85	0.25	0.91	—	0.1	—
	0.63	1.95	0.77	—	0.71	—	0.08	—
	0.73	2.01	0.75	—	1.02	0.22	0.37	0.22
1.5%Si鋼	0.52	1.5	0.7	—	0.67	0	0	—
	/0.67				/1.51	/0.91	/0.41	
	0.6	1.3	0.5	—	0.5	—	0.08	—
	/0.7	/1.6	/0.7		/0.7		/0.18	

化学成分は参考文献の表示にしたがい表示

工でも細かく破壊することはない。そこで図1に示すように介在物の融点を下げ、熱間圧延で延びる介在物になるよう組成制御された¹³⁾。

弁ばねではばね高さを少しでも低減したい、軽くしたいという要望が強い。このためには高疲労強度が必要であり、将来においてもこの要望は変わることはない。また、高強度化に伴う信頼性低下を防ぐため、今後も硬質介在物の低減が不可欠である。エンジンテストなどでは数10 μm の介在物で折損しているが、最大10～20 μm の大きさまでに抑えることのできる製鋼技術が確立されればさらに高強度化が進展するものと思われる。

2.2.2 懸架ばね用鋼

自動車用サスペンションに使用される懸架ばねでも高疲労強度で耐へたり性に優れたばねの開発がもとめられている。1970年にはSUP6が使用されていたが、1980年代には耐へたり性改善のためSiを2%添加したSUP7やV添加鋼が使用されるようになった(図2)。この間ばねに負荷され最大せん断応力は900N/mm²から1100N/mm²のレベルまで向上した。大気中での疲労寿命を向上するためには、硬さをあげることが有効であるが、腐食環境下ではHRC50以上の硬さで疲労寿命が低下するという現象が見られた¹⁴⁾。破壊したばねは腐食ピットを起点とした破断であり、破面は粒界破壊の様相を呈する。Ni、Cuの添加により耐食性を高め、C量の低減とTi、Vの添加により破壊靱性や水素脆性を改善した鋼が開発され、最大せん断応力1200～1300N/mm²で使用されている¹⁴⁻¹⁷⁾。

ばね設計の高応力化の要望は依然強く、最大せん断応力

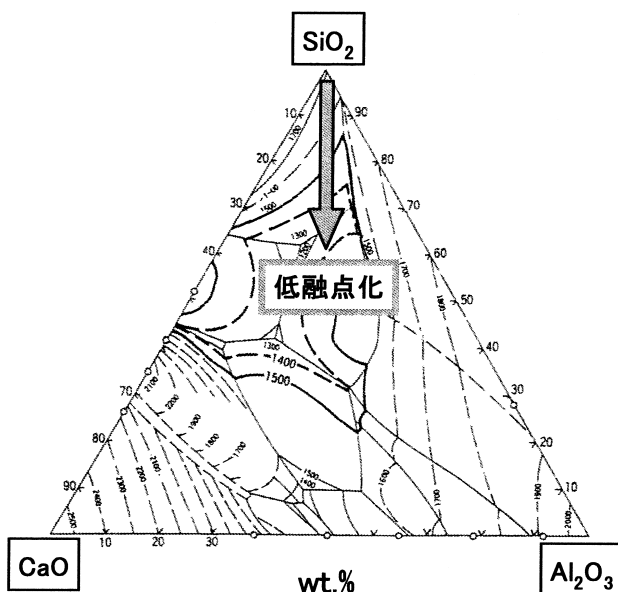


図1 介在物組成の低融点化

1300N/mm²を超える懸架ばねの開発がもとめられている。今後、腐食疲労強度がますます重要となることが予想され、高負荷応力腐食環境下での疲労破壊現象の解明、塗装技術も含めた腐食防止法などの研究が必要である。

2.3 硬鋼線材・ピアノ線材

硬鋼線材の代表的用途としてスチールタイヤコードがある。タイヤの軽量化を目的にタイヤコード用素線においても、高強度化がもとめられてきた。1970年代素線の引張強さは2800N/mm²であったが、現在では素線強度3600～4000N/mm²のスチールコードも使用されている¹⁸⁾(図3)。さらに高強度のスチールコードが今も望まれている。

スチールコードの素線径は0.15～0.35 mmと細く、素線に硬質の介在物、偏析、表面疵などの欠陥があると引抜加工やより線工程で断線が発生する。アルミナなどの硬質の介在物を低減するため、組成制御が行われている。中心偏析を低減するため、連続鋳造時鋼塊を圧下し偏析を低減する技術が

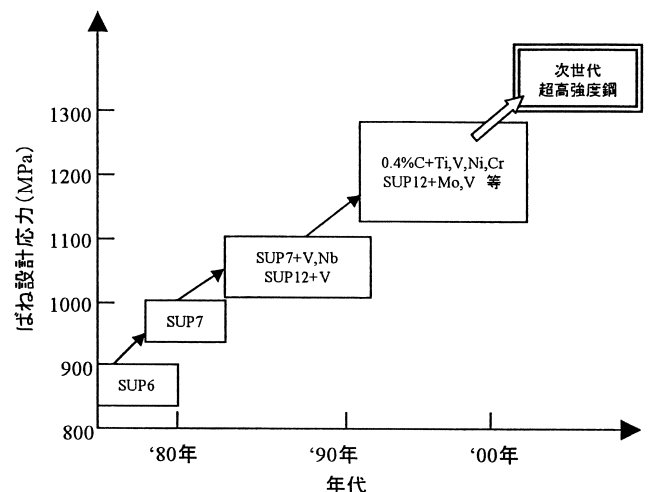


図2 懸架ばね用鋼の開発経緯

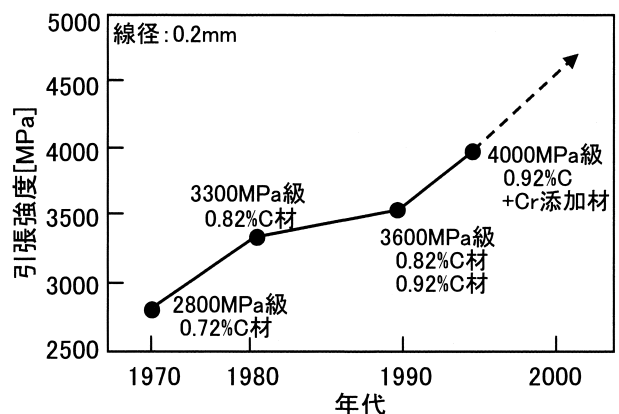


図3 スチールコードの高強度化の動向

開発された¹⁹⁾。また、表面疵についても荷扱いによるすり疵などの低減が図られ、高品質の鋼が製造されるに至っている。

スチールコードでは安価に製造できる線材がもとめられている。スチールコードの製造において約3 mm ϕ の鋼線とめっき処理前の鋼線でパテンチングが施されるが、コスト低減のため3 mm ϕ での中間パテンチングを廃止したいという要望が非常に強い。めっき前パテンチングでの最小径0.95 mm ϕ まで線材から直接伸線することができれば、中間パテンチングを完全に廃止することができる。このためには、低強度で加工硬化率の小さい線材が有利であり、研究が進めば、将来達成されるかも知れない。

土木建築分野で使用されるピアノ線材の用途として、PC鋼線、PC鋼より線と長大橋などに使用される亜鉛めっき線などがある。PC用には引張強さ1720 N/mm² ないし1860 N/mm² の鋼線が汎用されている。2000 N/mm² を越える鋼線についても研究^{20, 21)} されているが、実用化には至っていない。一方、長大橋用メインケーブルでは半世紀にわたって160キロ級鋼線(1570～1760 N/mm²) が使用されてきたが、明石海峡大橋ではじめて180キロ級鋼線(1760～1960 N/mm²) が採用された^{22, 23)}。約1%のSiの添加により溶融亜鉛めっき処理時の引張強さの低下が防止され、高強度化が達成された。現在、長大橋用鋼線は従来の5 mm ϕ から7 mm ϕ へ太径化の方向にあり、太径でかつ高強度の鋼線に関する研究が必要である。

2.4 機械構造用炭素鋼

自動車のエンジンやシャーシ部品には、特殊鋼を素材として熱間鍛造、調質処理、切削加工を施すものが多い。そこで製造工程合理化と低コスト化を目的として非調質鋼の適用が広く進んできた。通常、中炭素鋼にVを0.1%程度添加した鋼が適用されており、熱間鍛造後の冷却過程においてフェライト部にV炭窒化物を整合析出させることにより強度を確保している。最近では、部品の要求特性にあった高強度、高靱性タイプの非調質鋼の実用化も進んでおり、自動車の軽量化に結びつくと期待されている²⁴⁾。

自動車用鍛造部品で最も重いクランクシャフトは熱処理省略の効果が大きく、熱処理時の歪低減効果も期待できることから、非調質鋼が使用されている²⁵⁾。クランクシャフトでは疲労強度を向上するため、高周波焼入れ、窒化処理、ロール加工などが施されており、それぞれの表面処理に適合した鋼材開発がもとめられている。

エンジンの主運動系部品であるコンロッドは重量低減により燃費向上、静粛性向上を図ることができる。クランクシャフトと同様、非調質鋼が主に採用されているが、軽量化のた

め耐力・疲労強度が高い高強度非調質鋼も一般的となりつつある。通常のV添加非調質鋼に対して、20%程度耐力・疲労強度が高くなっている²⁶⁾。さらに、欧州では加工工程の工程数削減が図れる破断分離工法の採用が盛んである。破断分離工法はコンロッドのロッド部とキャップ部を一体鍛造し、大端部の切断箇所レーザー等で切欠き加工を施し、大端部を押し広げる荷重を加えることで脆性破断させる工法である。破面同士を再度組み合わせることで、ロッド部とキャップ部の嵌合面に実施していた加工を省略することができる。欧州ではC70S6鋼(0.7C-0.2Si-0.5Mn-0.1Cr鋼)の採用が主流である。C量や硬さが高いため被削性が悪く、耐力・疲労強度も通常のV添加非調質鋼に対して低い。最近、欧州はもとより国内でも被削性および強度を改善した鋼が開発されており、国内自動車メーカーでの採用も進むものと考えられる²⁷⁾。

機械構造用炭素鋼が主に採用されているクランク、コンロッドについて述べたが、他の部品においても高強度化の要望は強い。近年の超鉄鋼プロジェクト(STX-21)などに見られる結晶粒微細化技術の部品への展開で、従来の高強度化への取り組みが一層高まるものと期待される。

2.5 機械構造用合金鋼

自動車の変速機や作動装置に使用されている歯車の多くは、肌焼鋼を浸炭処理したものである。歯車に関しても、変速機の小型軽量化のため、歯幅・軸間距離の縮小が可能な高強度化の要望が高い。変速機の小型軽量化は燃費向上、衝突時のクラッシュプルゾーン確保など有益な面が非常に多い。さらに、エンジンの高出力化にともない、歯車への負荷は高まりつつある。

歯車に要求される強度特性は歯元曲げ疲労強度、歯元衝撃強度、歯面強度が主である。歯元曲げ疲労強度は、浸炭後のショットピーニング処理により歯底表層部へ1300 MPa程度の高い圧縮残留応力を付与することで30～50%の高強度化を実現している²⁸⁾。歯元衝撃強度については低P鋼やCr-Mo高強度鋼の採用で大幅に向上した事例もある²⁹⁾。歯面強度は主にピッチングと呼ばれる表面起点の疲労はく離現象に対する強度である。変速機の小型軽量化に対応して歯面接触応力が增大しており、ピッチング寿命向上への期待は大きい。ピッチング寿命は、駆動時に歯面温度が上昇することから、歯面表層の300℃焼戻し硬さとの相関が知られている³⁰⁾。最近、SCr420H鋼にSi、Moを添加した鋼と浸炭窒化処理を組み合わせることにより、300℃焼戻し硬さを大幅に向上させることができ、ピッチング寿命もCr-Mo高強度鋼の浸炭歯車に対して4.5倍が得られることが報告されている^{31, 32)}。

変速機では従来のMT(Manual Transmission)やAT

(Automatic Transmission) に変わる次世代の変速機として CVT (Continuously Variable Transmission) が注目されており、実用化が進んでいる。CVT プーリには耐ピーリング摩耗性、耐曲げ疲労性、耐転動疲労性が要求され、材質的には歯車と軸受の両方の特性が必要であると考えられる。したがって、CVT 用鋼では一般的に肌焼鋼に浸炭処理が施されるが、今後は生産性向上を目的として、短時間で深い浸炭深さが得られる高温浸炭用鋼³³⁾や疲労特性向上のための清浄化が必要となる。

歯車、CVT 用鋼の技術動向を考えると強度特性とともに歯車の高精度化にも注視すべきで、これらを組み合わせた技術の構築が今後の課題となるであろう (図4)。

3 線材・棒鋼の生産技術

3.1 製鋼技術

弁ばね、スチールコードのような用途では、高強度化にともない鋼材の微小な欠陥が破断の原因になることを述べた。軸受鋼でも転動疲労寿命に Al_2O_3 、 TiN などの硬質介在物が影響するので、これらの介在物は低減されなければならない。電磁攪拌による介在物の浮上分離、脱ガスによる酸素量の積極的な低減により、清浄化が図られている。中心偏析は軸受の炭化物組織に影響を与えるため、低減されている。

棒鋼・線材製品は切削加工されることが多く、長年 Pb 添加により被削性は確保されてきた。しかし、近年地球環境問題の高まりから、Pb の使用を制限する動きが活発化している。MnS は切削性を向上する介在物であり、S の増量により切削性を向上することができる。しかし、S が多いと鍛造性

や鋼の靱性を悪化させ、所望の特性が得られなくなる。このため、Ca、Mg、Ti 添加による MnS の形態制御の研究³⁴⁾が行われている。また、アルミキルド鋼から Ca 添加のシリコンキルド鋼に製造方法を変えることにより、切削性の向上が図られている。

3.2 圧延技術

Cr-B 鋼を制御圧延した後、徐冷することにより、軟質な棒鋼を製造する技術が開発されている³⁵⁾。B 添加によるオーステナイトからフェライトへの変態促進と低温圧延・徐冷により、中炭素鋼で約 $100N/mm^2$ の強度低減を図っている。また、低温圧延による組織制御技術により、高強度・高靱性の非調質鋼の製造が可能であり、中炭素鋼で $60J/cm^2$ 以上の衝撃値が得られるとの報告³⁶⁾もある。これらの鋼の使用により、棒鋼の軟化焼鈍省略や焼入れ焼戻しの省略が図られている。

線材においても制御圧延制御冷却による焼鈍省略が試みられている。線材圧延時低温圧延し、巻き取り後の線材を徐冷することにより SCM435 で $800N/mm^2$ 以下の引張強さが得られている³⁷⁾。これにより冷間圧造前の伸線や軟化焼鈍工程が省略されている。

4 むすび

21 世紀を見たとき、課題は地球環境負荷低減である。特に自動車業界では燃費向上による CO_2 排出ガス低減のため、各種部品の高強度化、軽量化が志向されており、今後変わることはない。鋼の高強度化にともない、靱性が劣化したり加工性が悪化したりする問題が発生する。これらを両立させる鋼や加工技術の研究が今後も推進されるであろう。また、部品の製造工程で実施される熱処理や機械加工を省略し、省エネルギーに貢献することも重要な研究課題である。軽量化志向の中で、今後部品の Al 化など非鉄材料の使用も増加していくと思われるが、他素材との競合という意味でも高強度鋼の研究開発は今後も継続されなければならない。資源を有効に活用するためには、地球上の稀少元素をできるだけ使用せず、多量に存在する元素を活用する努力も必要である。人に優しい、地球に優しい線材・棒鋼の研究開発が今後も続けられることを期待している。

参考文献

- 1) K.Kawazoe, H.Matsumoto, Y.Kamada and H.Ohtani : Wire Journal International, (2000), 120.
- 2) 榎藤永, 荒木正樹, 吉村隆文, 江口直記: 製鉄研究, (1980) 303, 75.

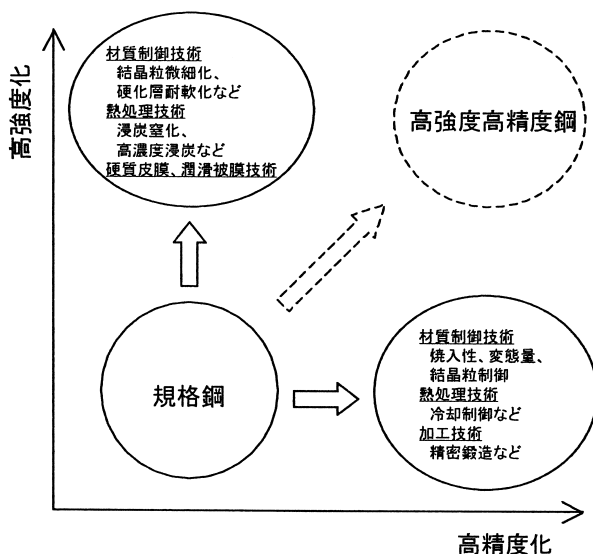


図4 歯車、CVT用鋼の主な技術動向

- 3) 川上平次郎, 加藤猛彦, 芦田真三, 小新井治朗: 神戸製鋼技報, 37 (1987) 4, 69.
- 4) 石田正雄, 萩原好敏, 村上敦: 自動車技術会学術講演会前刷集, 961 (1996) 5, 339.
- 5) 並村裕一, 茨木信彦, 長谷川豊文, 隠岐保博: 神戸製鋼技報, 50 (2000) 1, 41.
- 6) 高島光男, 飯田善次, 田中誠之助, 築山勝浩, 茨木信彦, 並村裕一: 日本機械学界第11回交通・物流部門大会講演論文集 (2002), 289.
- 7) 船見国男, 清水秀治, 谷本勝, 江藤元大: 材料, 43 (1994) 484, 29.
- 8) 田中誠之助: 日本ねじ研究協会誌, 24 (1993) 4, 107.
- 9) M.Abe, T.Taniguchi and T.Kuriki: SAE Technical Paper Series, No.890220 (1989)
- 10) 安田茂, 中野修, 井澤佳伸, 近藤覚, 小野田密光芳, 鎗田博, 子安善郎, 内田尚志: ばね論文集, (1997) 42, 1.
- 11) 隠岐保博, 茨木信彦, 吉原直: 神戸製鋼技報, 50 (2000) 1, 33.
- 12) 青木利憲, 鈴木秀和, 榊原隆之, 脇田将見, 西村泰輔: ばね論文集, (2000) 45, 25.
- 13) T.Ohshiro, T.Ikeda, H.Matsuyama, S.Okushima, Y.Oki and N.Ibaraki: Kobelco Technology Review, (1987) 2, 36.
- 14) Y.Oki, T.Nakayama, N.Ibaraki and A.Inada: ATZ Automobiltechnische Zeitschrift, 102 (2000) 11, 958.
- 15) 下津佐正貴, 茨木信彦, 中山武典, 宮内重明: ばね技術研究会1996年度春季講演会講演論文集, (1996), 33.
- 16) 阿久津忠良, 丹下彰, 佐藤保夫, 新井泰夫, 紅林豊, 高木政明: 電気製鋼, 62 (1992), 70.
- 17) 吉川英利, 榊原隆之, 脇田将見: ばね技術研究会2002年度秋季講演会講演論文集, (2002), 1.
- 18) 田代均, 西田世紀, 樽井敏三, 大橋章一, 佐々木正司, 中村謙一, 吉江淳彦, 出町仁: 新日鉄技報, (1999) 370, 39.
- 19) 萩林成章, 西原良治, 佐藤哲: 鉄と鋼, 83 (1997) 1, 36.
- 20) 茨木信彦, 鹿嶋正人, 榎井浩一, 方蘇旬春, 児玉勝: 神戸製鋼技報, 46 (1996) 3, 13.
- 21) 樽井敏三, 西田世紀, 吉江淳彦, 大羽浩, 浅野巖之, 落合征雄, 高橋稔彦: 新日鉄技報, (1999) 370, 45.
- 22) 高橋稔彦, 樽井敏三, 今野信一: 鋼構造論文集, 1 (1994) 4, 119.
- 23) 隠岐保博, 茨木信彦, 鹿嶋正人, 榎井浩一: 神戸製鋼技報, 49 (1999) 2, 8.
- 24) 池田正一, 阿南吾郎: R & D 神戸製鋼技報, 52 (2002) 3, 47.
- 25) 小島久義: 材料とプロセス, 5 (1992) 3, 772.
- 26) 石原貞男: 粉末および粉末冶金, 46 (1999) 5, 505.
- 27) 福田晋作, 後藤洋仁: 自動車技術会学術講演会前刷集, 86-00 (2000), 13.
- 28) Y.Okada, T.Matsumoto, A.Kawaguchi, T.Tanaka and K.Nishio: SAE Technical Paper series, No. 920761 (1992)
- 29) 岡田義夫: 電気製鋼, 63 (1992) 1, 41.
- 30) 吉田誠, 岡田義夫, 松本隆, 渡辺陽一: 自動車技術会論文集, 27 (1996) 2, 125.
- 31) Y.Watanabe, N.Narita, Y.Matsushima and K.Iwasaki: Proc. of 20th Heat Treating Conference, ASM International, (2000), 52.
- 32) 面圧疲れ強さに優れた浸炭窒化用高強度鋼, 素形材, 43 (2002) 1, 43.
- 33) 原田典恒, 山田雄一, 加藤和彦: 三菱自動車テクニカルレビュー, 12 (2000), 47.
- 34) 家口浩, 土田武広, 新堂陽介, 坂本浩一, 染川雅実, 鹿嶋正人: 神戸製鋼技報, 52 (2002) 3, 62.
- 35) 樽井敏三, 田代均, 佐藤洋, 高橋稔彦: CAMP-ISIJ, 2 (1989), 1760.
- 36) 今村晴幸, 天野虔一, 笹田幹雄: 32 (2002) 3, 80.
- 37) 畠英雄, 家口浩, 下津佐正貴, 外山雅雄: 神戸製鋼技報, 50 (2000) 1, 29.

(2003年4月3日受付)