

# 自動車用特殊鋼の動向と材料開発

佐藤 紀男\*

## 1. はじめに

図1に通産統計による特殊鋼熱延鋼材生産高と国内自動車生産台数の推移を示す。自動車生産台数は1990年の1400万台をピークに現在約1000万台レベルに迄減少している。一方、国内向け特殊鋼の約45%が自動車用である事から特殊鋼生産高もほぼこれに対応する推移を示している。

なお図1で特殊鋼と称しているのは、機械構造用鋼、特殊用途鋼および高抗張力鋼を含めたものであるが、通常“特殊鋼”は高抗張力鋼を除いた純特殊鋼を指す場合が多いので、以下、“特殊鋼”は純特殊鋼を意味するものとする。

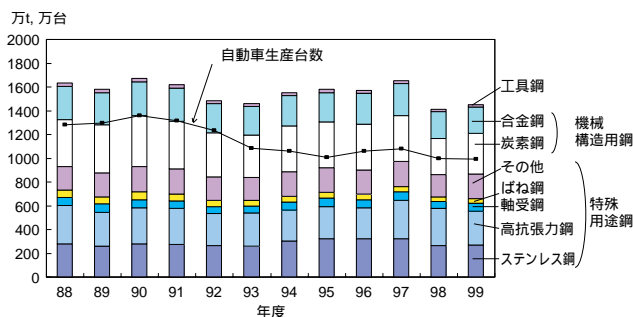


図1 国内自動車生産台数と特殊鋼熱延鋼材生産高推移

図2は自動車工業会が3年間隔位で実施している乗用車の材料構成比調査結果の推移を示す。排気量別に5グループに分類し、各グループの代表車種3~5モデル計約20台を選定して、車総重量に対する各材料の構成比率を調査したものである。ここで明らかなのは、軽量化指向を反映して、普通鋼の比率が減少し、アルミを主体とする非鉄金属および樹脂を主体とする非金属がそれに代わっている。一方、特殊鋼は‘80年以降構成比率約15%が維持されており、‘90年以降はむしろ上昇に転じている。

このように、自動車用特殊鋼は、自動車生産の海外移行に伴い、総量的には(国内向けについて)減少傾向にあるものの、環境問題対応、軽量化およびコストダウンの潮流

の中でその有用性はいささかも失われていないと見られる。これは特殊鋼が本来的に自動車を構成する材料として不可欠の特性を持っている事に併せて、多様化するニーズに弛まず、的確に対応してきた結果と思われる。今後ともこれを維持・発展させるにあたり、特殊鋼はどうあるべきかの答えは、その多くがこの対応状況の中に在ると考えられる。

今自動車の抱える課題と、そこからもたらされる特殊鋼へのニーズとの関連を整理し、併せて、材料の対応について考察する。

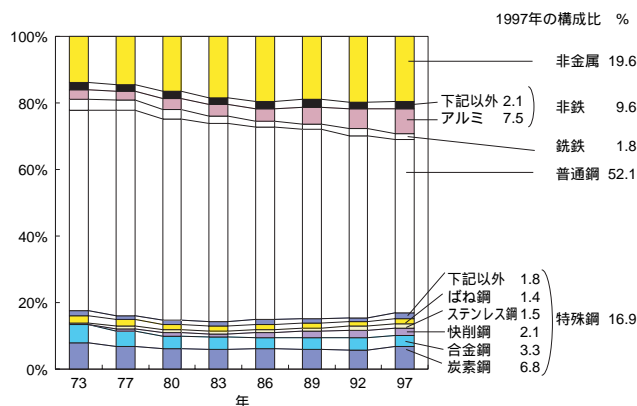


図2 普通・小型乗用車の材料構成推移

## 2. 自動車を取り巻く環境変化と自動車への課題

特に近年、世界的に各種産業と社会との調和の重要性がクローズアップされており、地球環境・都市環境保護および消費者保護に関わる安全性向上等が最重要課題となっている。何れも自動車と密接に関わる問題であり、多くの課題を生じている。

### 1) 環境問題

地球温暖化防止 CO<sub>2</sub>排出量低減 燃費向上, クリーンエネルギー車

1997年COP3(温暖化防止京都会議)で先進国諸国は2008~2012年の温暖化ガスの総排出量を1990年比5%削

\* 顧問

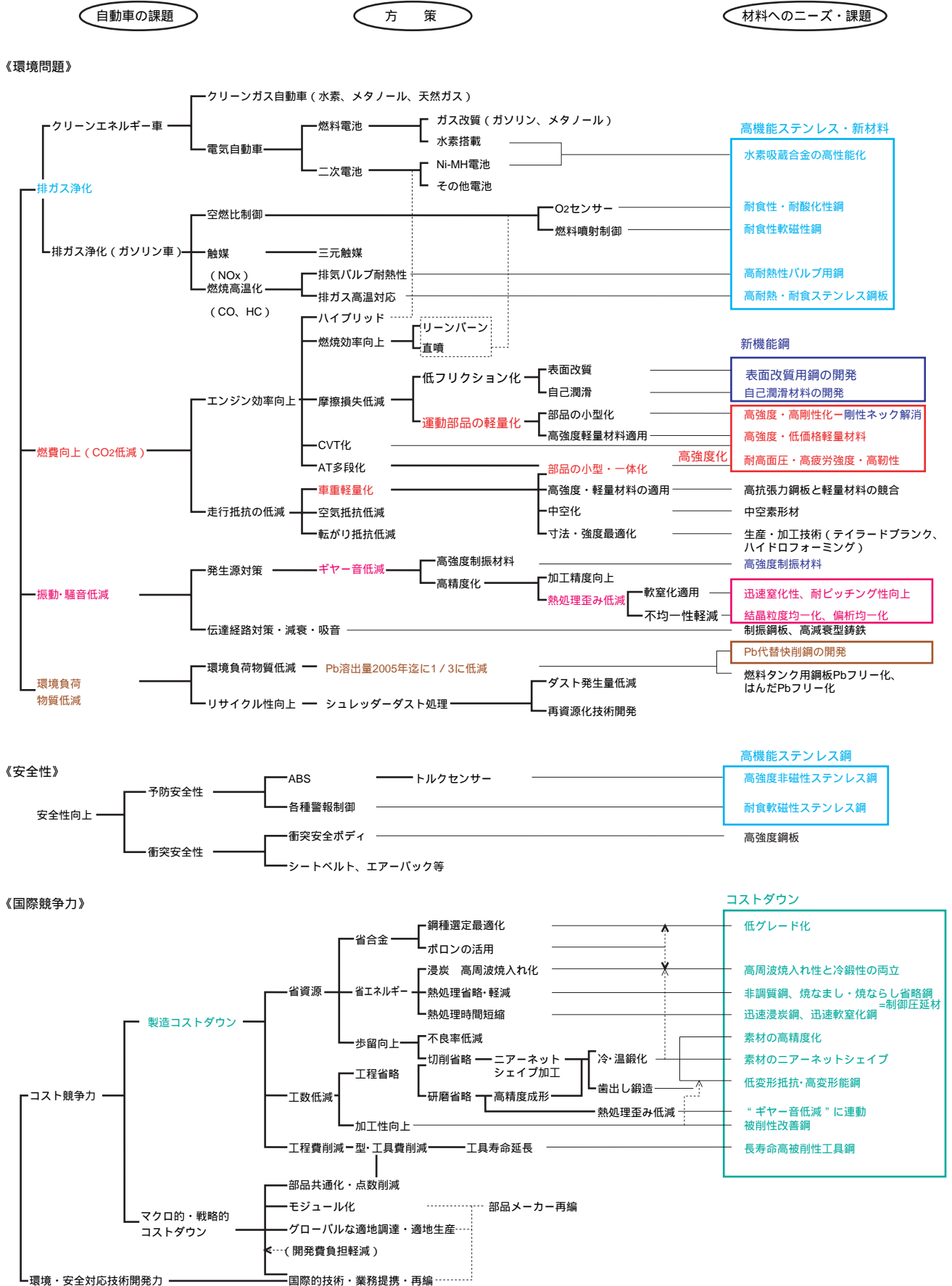


図3 自動車の課題と材料へのニーズ・課題

減（日本は6%）する事に合意した。世界的に具体的な目標が設定されるに至り、全産業の総CO<sub>2</sub>排出量の20%を担う自動車にとっても緊急の課題となってきた。ガソリン車におけるCO<sub>2</sub>低減は、とりもなおさず燃費向上であり、欧米を中心とした3リッターカー（燃費100km/3ℓの意味）やハイブリッド車はこれへの対応である。勿論、燃料電池車を代表とするクリーンエネルギー車も排出ガス規制への対応を含めて、CO<sub>2</sub>低減に寄与しようとするものである。

排出ガス規制 LEV, ULEV 排ガス浄化

都市環境保護に関わる自動車の排ガス規制は順次厳しさを増しており、特に米国加州では2003年モデルイヤーで販売車全体の10%をZEV（ゼロエミッションヴィークル）とせねばならない極めて厳しい規制がある。日本車では既に2社各1モデルがガソリン車でこのZEV認定を得ている。2004年に施行される更に厳しいLEVⅡに対応するSULEV（極超低公害車）認定を目指してハイブリッド車の準備が進められているとの報道もある。

リサイクル性の向上

大気環境と並んで問題に取り上げられるのは、廃車重量の25%にあたるシュレッダーダストの処理である。環境負荷物質の溶出基準を外れる懸念があるため、現在は管理型埋め立てが適用されている。次項の自動車構成材料中の環境負荷物質低減と併せて、シュレッダーダスト発生量の低減および再資源化等リサイクル性の向上が推進されている。

環境負荷物質低減

リサイクル率の向上をもってしてもなおシュレッダーダスト中に残る規制物質の低減については、アスベスト、カドミウムは対応済みであり<sup>(1)</sup>、現在、鉛溶出量を2005年には1997年比1/3以下にすべく対策が進められている。塗料、燃料タンク用鋼板、はんだなどの鉛フリー化が着々と進行している。実質的にはこの溶出基準に何ら関わるものではないが、有害物質は使わないという気運にのって鉛に代替可能な快削鋼の開発が望まれている。

振動・騒音

これは環境問題からくる騒音規制への対応と自動車本来の商品性の1要素である静粛性の追求との両方に関連する。現在、伝達経路対策ないし遮音・吸音の面では、制振鋼板の開発等が主体となって改善が進んでいる。特に特殊鋼が関連するところでは、発生源としてのギアノイズ低減が残る課題と言われている。

## 2) 安全性

もとより、人との関わりが密である自動車にとって安全性は最も重要な要素であるが、特に近年の消費者保護、製造物責任（PL）思考の高まりによって一層その重要性が増している。自動車の安全対策としては、予防安全と衝突安

全の両面から徹底した追及がなされている。特に後者において、衝突安全ボディは重量増を招く事になるので、

1) - 項の燃費向上に関わる軽量化が益々重要になる。

## 3) 国際競争力強化

これまで述べた環境および安全性への対応は、今後、自動車の商品性にとっても重要な要素になりつつある。コスト競争力と共に、その技術開発をめくり、グローバル規模での生き残りをかけた競争が激化している。コスト競争力については、材料技術が関与するところの従来型の製造費用に関するコストダウン、およびグローバル競争下における適地調達・適地生産、モジュール化および国際的技術提携・業務提携など、より広い視野からの戦略的コストダウン施策がとられている。後者については、自動車業界自体の国際的な再編ひいては部品メーカーの再編につながるものであり、国内特殊鋼業の在り方に対しても、極めて大きな課題を投げかけている。

## 3. 自動車の課題に対応する特殊鋼の課題

「自動車業界、環境が素材を決める時代に！」と言った見出しに象徴されるように、上述の自動車における各課題が素材の動向にも大きく影響してくる。図3にその関連を整理して示す。そこから抽出される特殊鋼へのニーズ・課題を以下6項目に集約した。その内、特に機械構造用鋼分野における主要課題とそれに対応する材料の考え方について考察する。

### 3・1 新機能材料・高機能ステンレス鋼の開発

クリーンエネルギー車の実用化にあたっては2004年頃を目処に各社技術開発にしのぎを削っている。パリエイションも多様で未だ何れの方式になるか極めて流動的であるが既に実用化されているハイブリッド車のニッケル-水素電池、水素燃料自動車および水素搭載方式の燃料電池車では、水素吸蔵合金がキイテクノロジーとなる可能性がある。

特殊鋼ではないが、特殊鋼メーカーの手の届く分野への新しいニーズが生まれている。

ガソリン車の排ガス浄化および燃費向上につながる燃焼効率向上に関しては、空燃比制御の精密化、燃焼高温化に対応して、O<sub>2</sub>センサー、燃料噴射制御機器、および排気系に耐食・耐酸化鋼、耐食軟磁性鋼、高耐熱・耐食鋼など高機能ステンレス鋼へのニーズが増しており、材料開発も活発である<sup>(2)(3)</sup>など。

### 3・2 軽量化への対応 高強度化、軽量材料との競合

燃費向上にはエンジン効率向上と走行抵抗低減（負荷低減）の両面からの方策がとられる。前者で材料が関与するのは、エンジン周り動力伝達系の摩擦損失低減のため、運動部品（ピストン、コンロッド、クランクシャフト等）の小型・軽量化が第一の課題となる。後者では、車総重量の軽量化であり、特にその70%以上を占めるホワイトボディ

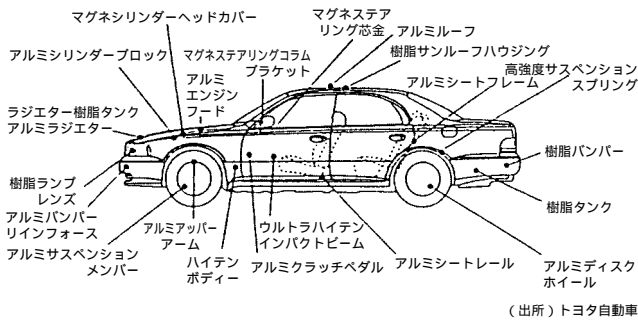


図4 自動車の軽量化事例

シャーシおよび内・外装など、従来普通鋼鋼板主体の分野で、図4に1例を示すようにアルミニウム、樹脂など軽量材料への移行および鋼板の高強度化が大いに進展した。図2における自動車材料構成比の推移はこの経緯を示していると思われる。

目下ULSAB（超軽量鉄鋼構造車体）やULSAS（スチール製超軽量サスペンション）など鉄の巻き返りで、軽量材料との競合が行われている。一方、車総重量の約15%を維持し続けている特殊鋼の大部分は機械構造用鋼・特殊用途鋼であり、エンジンから車輪およびステアリングから車輪の動力伝達系部品、懸架部品など、引張強さで表示するとすれば、少なくとも普通鋼板の2倍以上の強度を必要とする機能部品に使用されている。この分野における軽量化に対しても、高強度化および軽量材料との競合が重要な課題となる。その他、最適エンジン効率に連動する変速機構としてCVT（無段変速機）ないし多段変速化が挙げられているが何れも負荷の増大、コンパクト化が必須であり、ここからも高強度化ニーズがある。

3・2・1 動力伝達系部品における軽量材料との競合

表1に特殊鋼と競合軽量材料との特性比較を示す。部品群を所要材料特性との関連で大きく2区分すると、直接接

触による動力伝達部品と部品間を連結する動力伝達ないし荷重支持部品に分けられる。前者は更に、特に耐摩耗性・耐高面圧かつ高靱性を要し、浸炭焼入れするもの、耐摩耗性・耐高面圧性を要し高炭素鋼の焼入れを適用するものに3区分される。後者は強度と靱性のバランスを適正に調整出来る、所謂強靱鋼の適用分野で、所要の強度レベルあるいは部品の質量に応じた焼入れ性により、炭素鋼（およびB添加鋼）、合金鋼（SCR, SCM, SNCM）が選定される。表1には代表的なSCM鋼のみ挙げているが、ばね鋼等もこの範疇に入る。又コストダウン指向の非調質鋼の対象もここである。

以上の夫々の区分に対して、代表的な軽量材料による軽量化の可能性を見ると、まず直接接触動力伝達のため浸炭ないし高周波焼入れで700HV以上の高表面硬度と心部の靱性を必要とするものに対しては、適応可能な軽量材料はない。軸受鋼に代表される高炭素鋼のズブ焼入用途には、窒化珪素などセラミックスが靱性に劣るものの、硬さおよび剛性に優れ、代替可能である。しかし、現状はコストがネックであり、採用例としては、超高速回転用や特殊環境用など機能上不可欠なものに限られている。

調質鋼（非調質鋼）分野に対しては、比強度・比弾性率・比疲労限（何が律則かによる）で評価できるので、Ti合金やCFRP（炭素繊維強化樹脂）は合金鋼レベルにも代替して軽量化可能である。Al合金は、所要強度によっては炭素鋼レベルには代替可能な場合もありそうである。しかしながら当分野では非調質鋼化を主体にコストダウンが徹底されており、これら軽量材料はコスト面から、実用・量産化は未だ極く一部に限られていると思われる。当面の課題はまず、非調質鋼での高強度化、なお不足であれば調質への復帰、さらに鋼種グレードアップ、の順を踏むのではないか。この過程で剛性がネックとなった時点で軽量材料

表1 主要な特殊鋼と軽量材料の特性比較

	特殊鋼						軽量材料			
	浸炭焼入	高周波		調質			Al合金	Ti合金	CFRP	セラミック 窒化珪素
	SCR420	S53C	S45C	SCM440	SUJ2					
密度	g/cm <sup>3</sup>	7.8	7.8	7.8	7.8	7.8	2.8	4.4	1.4	3.2
比弾性率	× 10 <sup>6</sup> mm	26	26	26	26	26	26	26	31	94
比強度	× 10 <sup>6</sup> mm	22	21	10	17	23	14	25	35	-
比疲労限	× 10 <sup>6</sup> mm	11	9	6	10	11	4	12	15	-
表面硬さ	Hv	700以上	700以上	250	400	700以上	200	350	120	1000以上
製品コスト	円/g	2~6	2~6	2~6	2~6	2~6	10	20~100	100~1000	80~800
適用部品		ピストンピン ギヤー CVT プーリー ディスク ローラー CVJインナー ステアリングギヤー	クランクシャフト CVJアウトター ドライブシャフト ステアリングラック ハブユニット	コンロッド プロペラシャフト アーム類 ホイールハブ	ナックルスビルドル 高負荷アーム類 タイロッド スタビライザー ばね	ベアリング アッパーアーム	コンロッド バルブスプリング リテナー バルブ	プロペラシャフト	ベアリングボール	

浸炭ギヤーの高強度化要因  
(材料・熱処理)

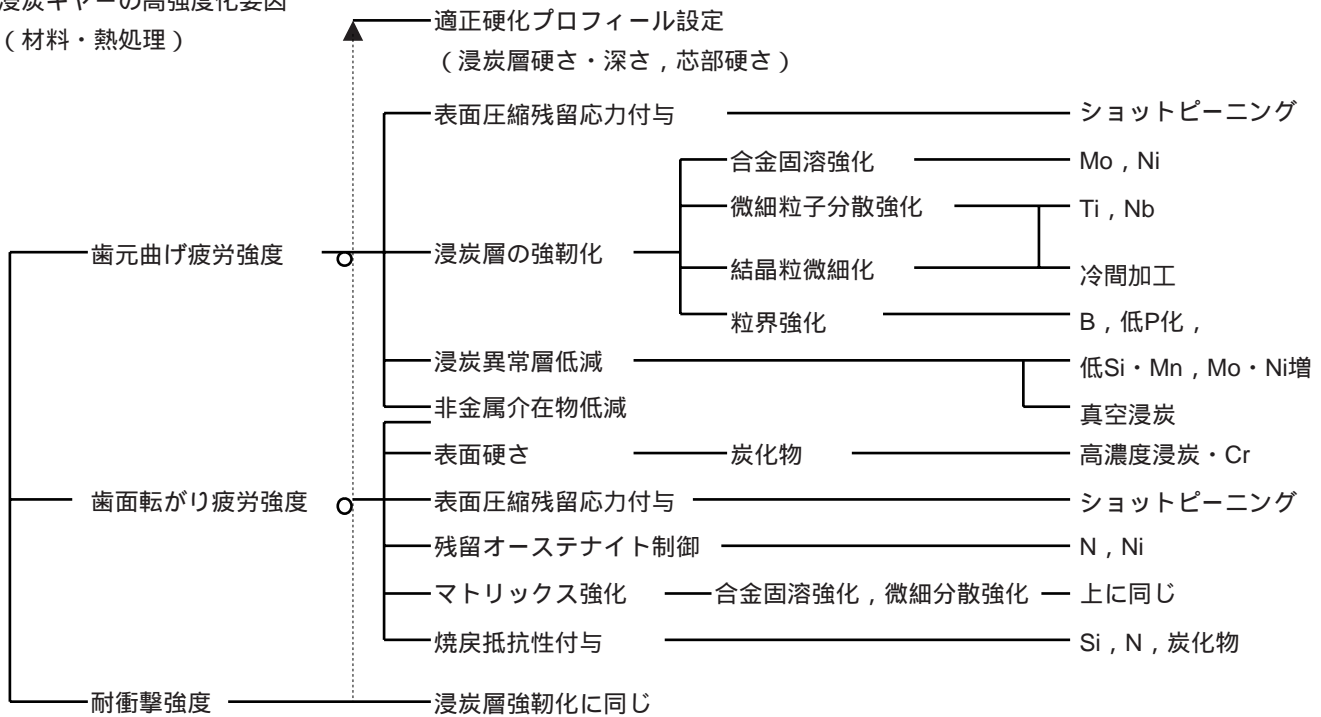


図5 浸炭ギヤー用鋼の高強度化要因

との競合が本格化すると思われる。

以上、「Ti合金の表面硬化法の開発あるいはコストダウンなど、軽量材料自体の課題解決如何」ではあるが、これまでの所、車重の15%を担ってきた特殊鋼については軽量材料に代われる余地は少なく、当該部品の軽量化にあたっては、特殊鋼自身の高強度化しか残されていないと認識する。

3・2・2 高強度ギヤー用鋼

代表的動力伝達系部品であるギヤー用鋼の高強度化対応状況について見る。接触動力伝達部品であるギヤーでは、耐面圧強度、歯元曲げ強度および耐衝撃性を必要とされるため、通常、SCR420、SCM420などは焼鋼が用いられる。CVJインナーレース、CVTプリー（ベルト式）やディスク（トロイダル式）なども同様であり、浸炭用鋼に共通の課題である。図5に材料が関与する高強度化要因とその方策を示す。まず、歯元曲げ疲労強度や面疲労強度に対応する適正な硬化プロフィール（表面硬さ、硬化層深さ、心部硬さ）の設定がなされた上で、更に高強度化に寄与するものとして、圧縮残留応力の付与（上記適正プロフィール設定には適正残留応力の要素も含まれている）、浸炭層自身の強化およびマイナス要因の低減（浸炭異常層、非金属介在物）等が挙げられる。

1) 歯元曲げ疲労強度

従来のアロイングデザインを基本とした高強度化  
これまでの“高強度ギヤー用鋼”の主体をなすのは、浸炭異常層低減を狙いとした合金設計によるものである。

通常のガス浸炭では、粒界酸化によりその近傍のSi, Mn, Crなどが優先的に酸化されて、焼入性が損なわれるため不完全焼入組織を生ずる。これが浸炭異常層と呼ばれ、一つの表面欠陥として曲げ疲労強度を低下させると考えられている。この防止策として特に酸化されやすいSi, Mnを低減し、その焼入性低下分を、酸化されにくいNi, Moで置換すると言う考え方がとられる。Ni, Moは浸炭層の強靱化にも有効なため、これまでに提案されている高強度ギヤー用鋼の基本組成は、低Si 低Mn 0.5~1% Cr 高Mo (0.4%以上) 1~2%Niであり、これらの元素を積極的に活用したのものとなっている。表2に公表されている具体的な鋼種を示す<sup>(4)</sup>。一部には結晶粒微細化効果を加味したのも見られる。図6および図7にほぼ表2の高強度鋼および規格鋼の組成範囲をカバーした供試材による小野式回転曲げ疲労試験の結果を示す<sup>(5)</sup>。高強度化要因の内Moの効果は心部硬さに重複して分離出来ていないが、異常層低減、細粒化およびNiの効果認められる。全ての要因を取り込んでいるK鋼ではSCM420比約30%の疲労限向上となっている。又、ショットピーニングを施すことによりこれにほぼ同等の効果が得られる。この場合、K鋼の対SCM420比向上率は十数%であり、ショットピーニングは浸炭異常層の影響を相殺する効果もあると見られる。

高強度ギヤー用鋼の実用化の状況を見ると、2%Ni - 高Moベースの最高強度鋼は、コストもさりながら、特に切削加工に問題があり極く限られたものに留まっている

表2 高強度ギヤー用鋼の化学成分例

鋼種(仮名)	鋼材メーカー	化学成分(代表値)(mass%)								
		C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	その他
A	A社	0.21	0.03	1.09	0.022	0.009	—	1.02	0.25	特殊元素添加
B	B社, C社, D社	0.20	<0.15	0.70	<0.015	<0.015	—	1.00	0.40	
C	C社, D社	0.14	<0.15	0.75	—	—	—	1.05	0.40	
D	E社	0.20	0.10	0.50	—	—	—	1.00	0.50	V添加
E	C社, E社	0.20	<0.15	0.75	—	—	—	1.05	0.80	
F	E社	0.24	0.10	0.50	—	—	0.50	0.50	0.50	Nb添加
G	E社	0.20	0.10	0.50	—	—	1.00	0.50	0.50	
H	B社	0.20	<0.15	0.60	<0.015	<0.015	1.00	0.80	0.30	
I	E社	0.20	0.10	0.50	—	—	1.80	0.50	0.50	
J	B社	0.20	<0.15	0.30	<0.015	<0.015	2.00	0.30	0.75	
K	E社	0.20	0.10	0.30	—	—	2.25	0.50	0.50	Nb, V添加
L	B社	0.17	0.50	0.30	—	—	—	2.25	0.40	高濃度浸炭鋼

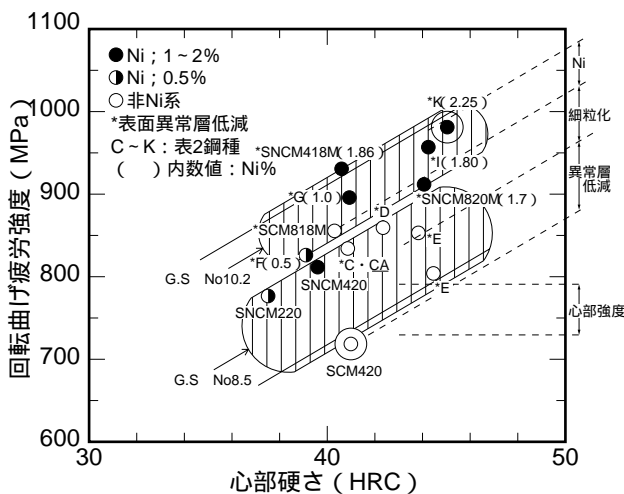


図6 回転曲げ疲労強度に対する強化要因の影響 (浸炭まま)

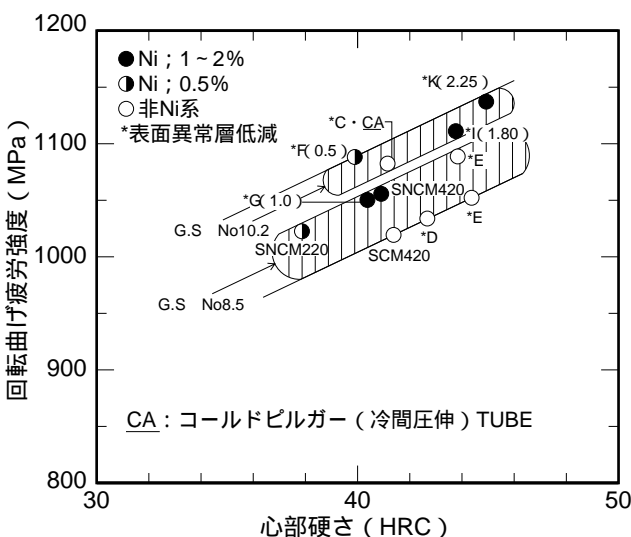


図7 回転曲げ疲労強度に対する強化要因の影響 (ショットピーニング)

ようである。比較的多用されているのは、表2で言えばSCM822の低Si版とも言えるB鋼相当材や、J鋼の加工性改善鋼と見られる0.20C-0.08Si-0.40Mn-0.50Ni-0.60Cr-0.80Mo-Nb<sup>(6)</sup>等と思われる。特に後者はユーザーと鋼材メーカーの協力により、所要特性と加工性の折り合いを追求したものであり、最近の材料開発の在り方を示唆するものとして貴重である。又、自動車用材料については、高強度化と言えども経済性を無視しては実用にならない事も認識される。その意味で合金元素の固溶強化による高強度化には一定の限度があると思われる。

ボロンによる粒界強化、Ti又はNb微細析出物による分散強化など、微量元素活用による高強度化。先に述べた合金固溶強化による限界を解消する可能性があるものとして、最近、ボロンによる粒界強化およびTiあるいはNb微細炭化物分散強化を活用した浸炭鋼が検討されている。鋼組成および材料特性の1例を表3<sup>(7)</sup>および図8<sup>(8)</sup>に示す。各鋼共、曲げ疲労強度、面疲労強度、静的曲げ強度および衝撃値などギヤー用鋼の所要特性は

表3 Nb, Ti複合添加B浸炭鋼の特性

開発鋼の化学成分 (mass%)						
C	Si	Mn	Cr	Nb	Ti	B
0.18	0.28	1.20	0.47	添加	添加	添加

開発鋼とJIS-SCM420H 鋼の材料強度比較		
試験項目	開発鋼	JIS-SCM420H 鋼
シャルピー衝撃試験 <sup>1)</sup>		
衝撃値 (J/cm <sup>2</sup> )	13.4	7.5
3点曲げ試験 <sup>2)</sup>		
曲げ強度 (N/mm <sup>2</sup> )	264	153
小野式回転曲げ疲労試験 <sup>3)</sup>		
疲労限 (N/mm <sup>2</sup> )	696	666
ローラピッチング試験 <sup>4)</sup>		
10'h強度 (N/mm <sup>2</sup> )	2695	2450

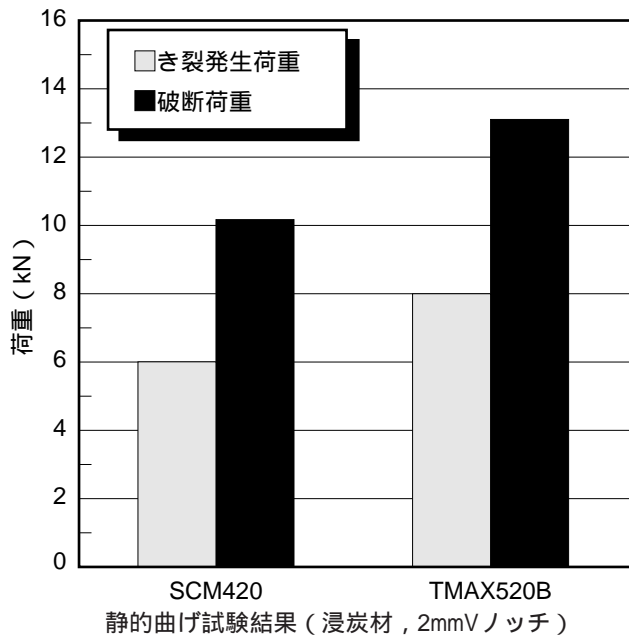
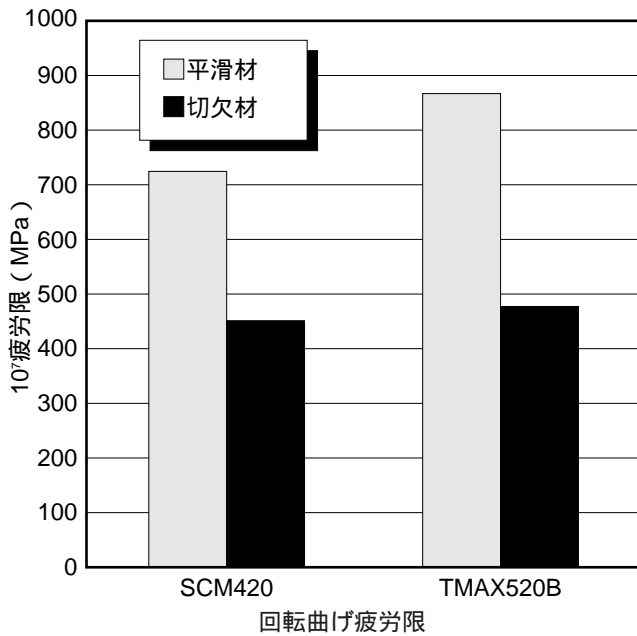


図8 Ti添加Cr-B浸炭鋼の特性

SCM420鋼に比べて高い。ボロンは焼入性向上元素であり、相当する合金元素の低減がなされているため、冷間鍛造性はむしろSCM420同等以上と見られる。またTi添加鋼については、十分なTiC量を保持させ、高温浸炭も可能となっている。高強度に加えてコストダウン要素も加味されている材料として着目したい。

冷間加工との組み合わせによる高強度化

標準的なはだ焼鋼は低炭素CrないしCrMo鋼であり、優れた冷間鍛造用鋼でもある。ギヤーにおいても歯出し鍛造との組み合わせで冷間成形の適用が広がってくるものと考えられる。冷鍛材の浸炭において、オーステナイト結晶粒の異常成長を生じ易い事は良く知られている。この

一番の原因は加熱時に再結晶過程を経るために極めて微細なオーステナイト結晶粒が形成されることによる。逆に言えば、冷鍛材ではこの異常成長さえ防止すれば極微細粒を得ることが出来る。この方策としては、上記のTi、Nb添加鋼もその一つであるが、通常の結晶粒成長阻止粒子(ピンニング作用)AINに加え(あるいは代替して)、それと同等以上に微細・安定な析出粒子を導入して、粒子数総量を増やすのが有効である。この点については熱処理歪みに関連する結晶粒度均一化の項で少し詳しく述べたい。

図9にSCR420鋼およびSCR420Nb・高N鋼の浸炭材の回転曲げ疲労試験結果を示す<sup>(9)</sup>。供試材は共に約60%の減面率で冷間圧伸(コールドピルガー)した鋼管から削出したものである。前者では混粒が発生しているため平均粒度No7.2、後者はNo11.2の極微細粒である。疲労限で約25%の向上率となっている。コストダウン施策に沿った高強度化手段として活用していきたいものである。

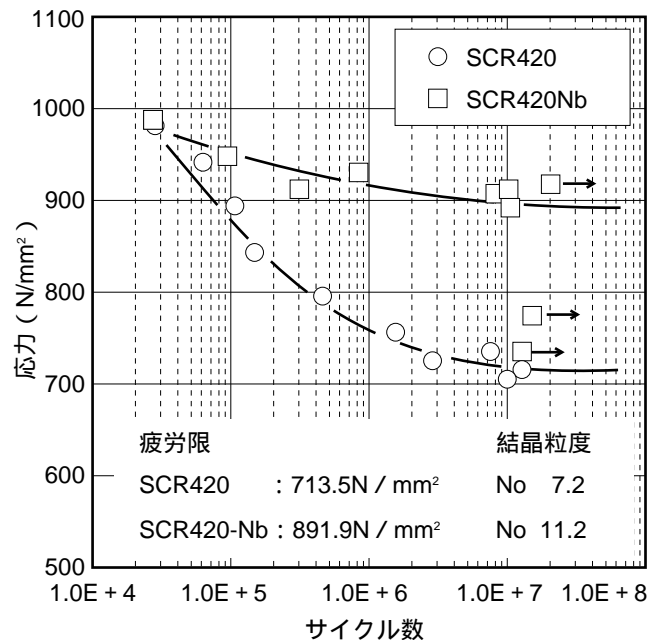


図9 冷間加工したSCR420Nb鋼の回転曲げ疲労強度

疲労破壊起点としての非金属介在物の低減およびその影響の定量化による高強度化

高硬度材の疲労破面には起点部にフィッシュアイと呼ばれる円形の模様が見られ、その中心に非金属介在物(多くは氧化物介在物)が認められることが多い。したがって鋼中の非金属介在物の量を減らす事によって疲労強度が向上することは良く知られている。1例として、鋼中の酸素量(氧化物介在物の量に対応する)と強靱鋼の疲労限の関係を示す(図10)<sup>(10)</sup>。

最近では更に定量的に非金属介在物と疲労強度の関係が解

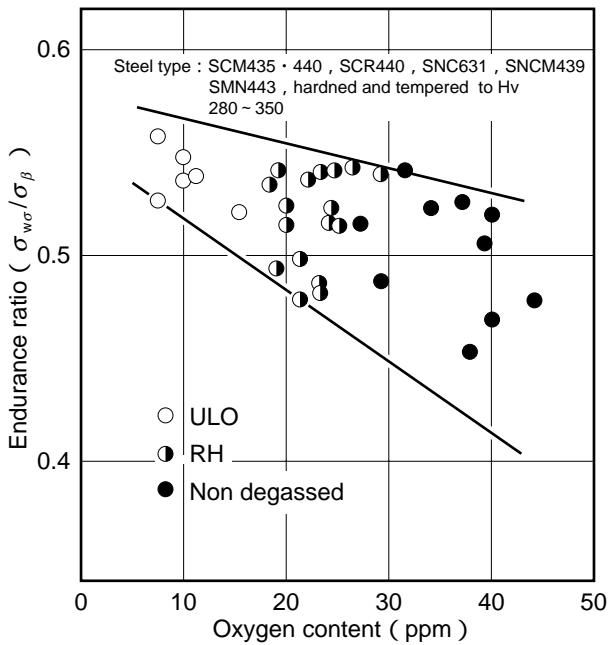


図10 強靱鋼の疲労強度に対する鋼中酸素量の影響

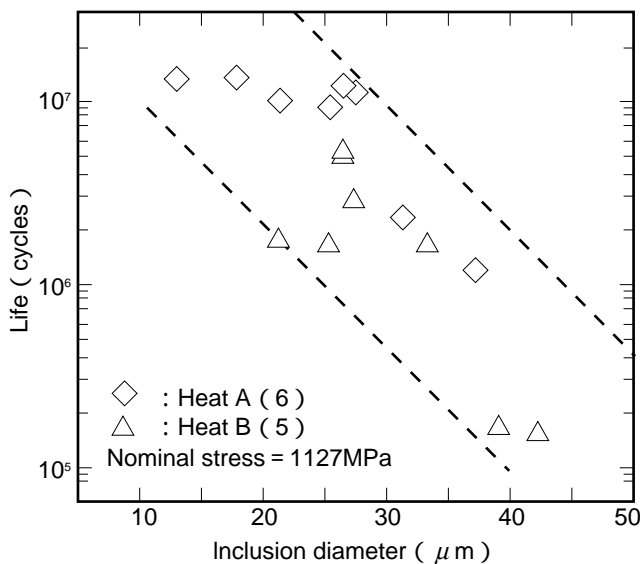


図11 疲労起点非金属介在物径と寿命の関係

明されている。図11<sup>(11)</sup>に、浸炭鋼における一定応力下での回転曲げ疲労試験結果、破断面起点に認められる介在物の粒径と破断寿命との関係を示す。明らかな相関が認められる。九州大学の村上教授は、非金属介在物の大きさに着目され、その疲労限への影響は、材料力学的な応力集中係数の概念ではなく、破壊力学の微小亀裂として扱うのが妥当であることを立証して、実験式との組み合わせにより、式(1)を提案している<sup>(12)</sup>。

$$\sigma_w = C (HV + 120) / (\sqrt{\text{area}})^{1/6} \quad (1)$$

C = 1.43 (表面欠陥, 表面介在物),  
 = 1.56 (内部欠陥, 内部介在物),

= 1.41 (表面に接する欠陥・介在物)

$\sigma_w$ : 疲労限,  $\sqrt{\text{area}}$ : 非金属介在物の応力方向への投影面積, HV: ヴィッカーズ硬さ

$\sigma_w = (HV + 120)$  の部分は経験式  $\sigma_w \propto 1/2 \cdot$  (引張強さ) に相当するものであり、均一断面硬さの場合に適用されるべきものである。

浸炭材の曲げ疲労では断面硬さに勾配があり、かつ応力勾配があるので、その相互の関係が複雑にからむ。又、 $\sim$  の強化要因も介在してくるので、疲労限が硬さで一義的に決まるとは言い難い。したがって、この部分は絶対値にこだわらず、一定条件下において本来あるべき疲労限と捉え、それに  $(\sqrt{\text{area}})^{1/6}$  が反比例的に効いて疲労限を決めるとする関係が重要である。

これを実用に生かすにあたり、危険体積中に存在する最大介在物の大きさ ( $\sqrt{\text{area}}$ ) をいかにして見出すかが問題となるが、村上教授は併せて極値統計により、鋼材のある容量中に存在する最大介在物径を推定する方法を提唱された<sup>(12)</sup>。測定法の詳細は割愛するが、これによって測定される予測最大介在物径は  $\sqrt{\text{area}}_{\text{max}}$  と表示され、疲労強度などに、より直接的に関係する非金属介在物評価指標になっている。

図12に  $\sqrt{\text{area}}_{\text{max}}$  と回転曲げ疲労限との関係の1例を示す<sup>(13)</sup>。SPと表示しているのは、 $\sqrt{\text{area}}_{\text{max}}$  を小さくする(実質としては大きな介在物を減らす)事を意図した製鋼操業を実施したものであり、これによりさらに疲労限を向上出来ることを示している。又、より重要と思われるのは、 $\sqrt{\text{area}}_{\text{max}}$  値を一定値以下に規定すれば、疲労限の下限を抑えられるという事である。さらに予測精度を上げて、介在物粒径の上限保証が出来れば、疲労強度を保証することにつながる。鋼材としての品質レベルの保証から、部品機能の保証へと転換するキーになると思

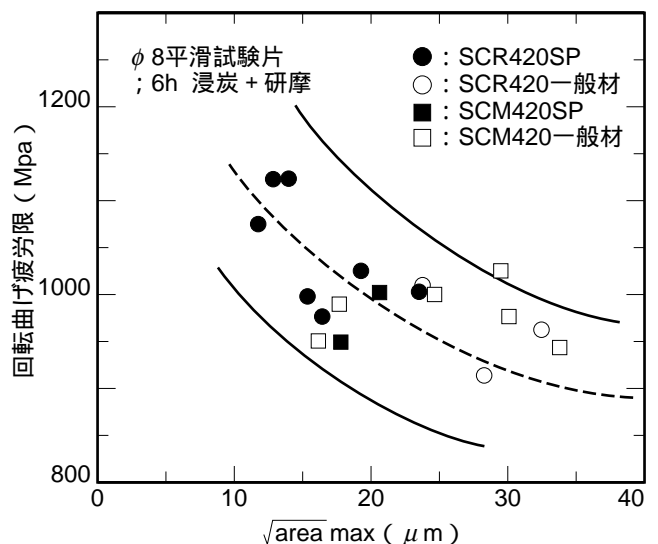


図12 回転曲げ疲労限に対する  $\sqrt{\text{area}}_{\text{max}}$  の影響



われる。

～ の高強度化策が軽量化にまで反映されるには、設計許容応力のレベルアップにまでつながらねばならない。ここには下限保証の考え方が不可欠と考える。最近実用化されたハーフトロイダル式CVTのディスクに採用されている材料は、この概念に一歩近づくものである。

2) 歯面転がり疲労強度

歯元疲労強度が解決すると、軽量化ネック特性は耐ピッチング性に移行する(図13)<sup>(14)</sup>。

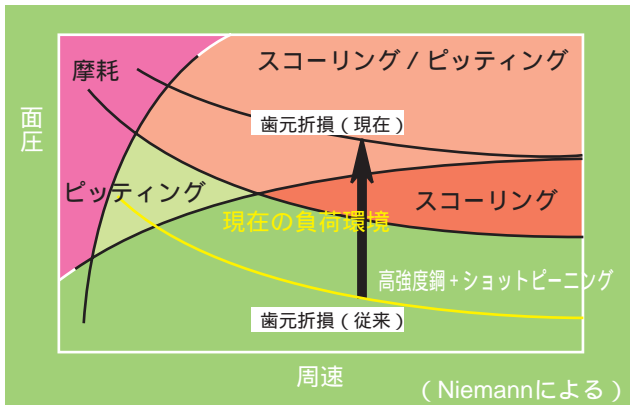


図13 歯車の軽量化ネック特性

歯車の耐ピッチング性を決定するのは、歯面のすべりを伴う転がり疲労強度である。設計値としては許容面圧に反映されるべきものである。歯元疲労強度に対応する材料強度試験には、曲げ疲労試験あるいは回転曲げ疲労試験があり、疲労限、時間強度を指標として、一応汎用性ある材料特性評価が可能である。歯面転がり疲労強度について、これに相当するのがローラーピッチング試験と考えられるが、材料の耐面圧強度を評価出来るデータはほとんど見当たらない。したがって強化要因の寄与度の評価も、定性的・相対的で、未だ十分に見極めされていない所も多いが、同じ疲労現象である事と、すべりによる昇温を加味すると以下の要因が考えられる。

- 合金 (Ni, Cr, Mo) によるマトリックス強化
- 炭 (窒) 化物による分散強化: TiC (N)・NbC (N) 微細分散, 高濃度浸炭
- 準高温 (max300 ) 硬さないし焼戻抵抗性: Si増, 炭化物分散強化
- 浸炭異常層低減
- 非金属介在物の低減

合金強化によると思われる事例を図14<sup>(15)</sup>に示す。歯元強度の項にも挙げた典型的な高強度ギヤ用鋼である。ローラーピッチング寿命はSNCM420鋼との比較で、2倍以上になっている。特に高Moの効果と見られる。

炭化物による表面硬さ向上およびSi, Crによる焼き戻し

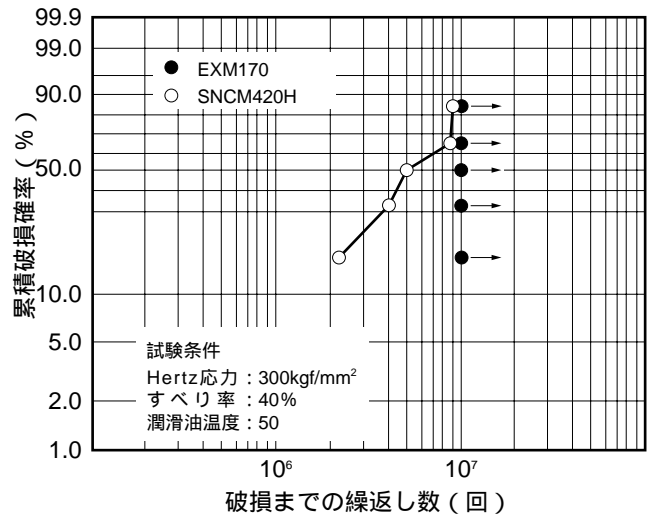


図14 1%Ni-0.5Cr-0.75Mo鋼のローラーピッチング試験結果

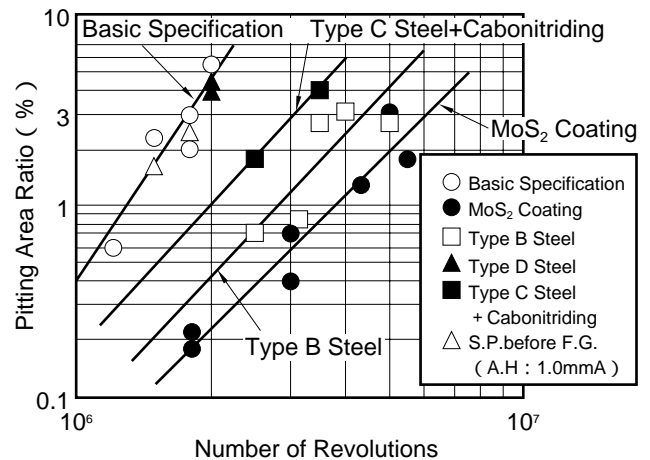


図15 B鋼のギヤピッチング寿命試験結果

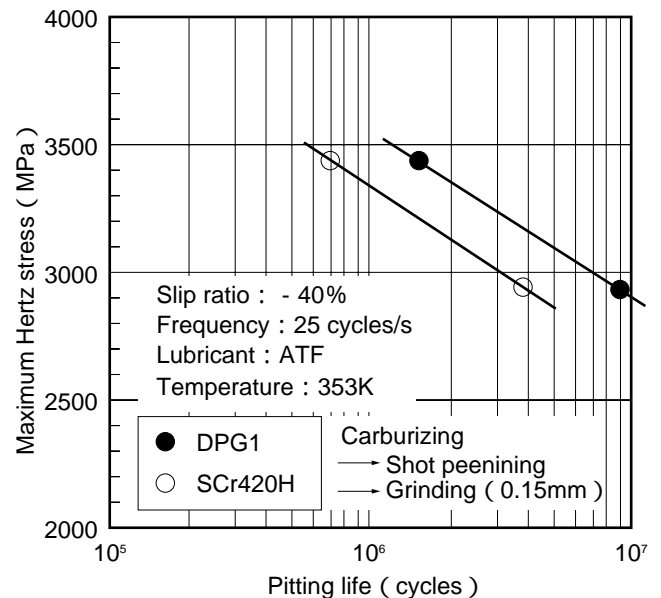


図16 B鋼のローラーピッチング試験結果

抵抗性付与の効果とされているピッチング寿命向上例を図15<sup>(16)</sup>に示す。同図中のB鋼がそれに相当するものであり、主成分は0.18C-0.5Si-0.4Mn-2.75Crである。ベース材SCr420鋼に比べて、約2倍のギヤーピッチング寿命を示す。当材料のローラーピッチング試験結果(図16)<sup>(17)</sup>とも良く対応していると思われる。

又、TiまたはNbの微細析出物の効果は、歯面曲げ疲労以上に、転がり疲労強度に対して有効と見られる。(表3、図

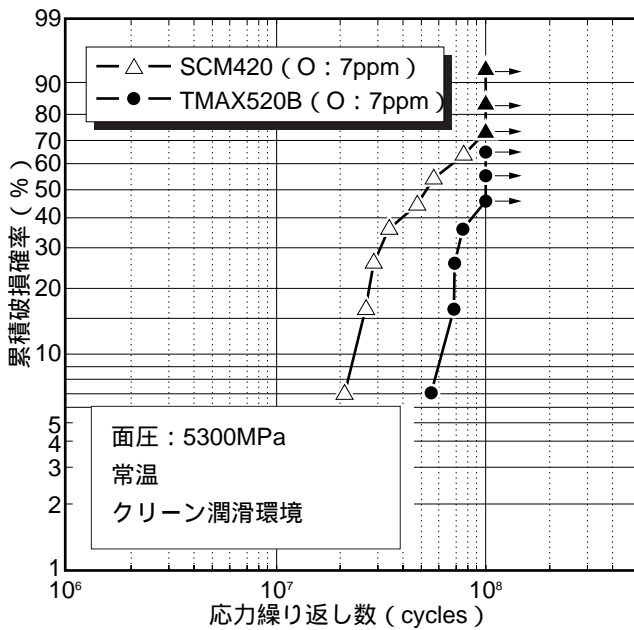


図17 Cr-Ti-B鋼の転がり疲労寿命

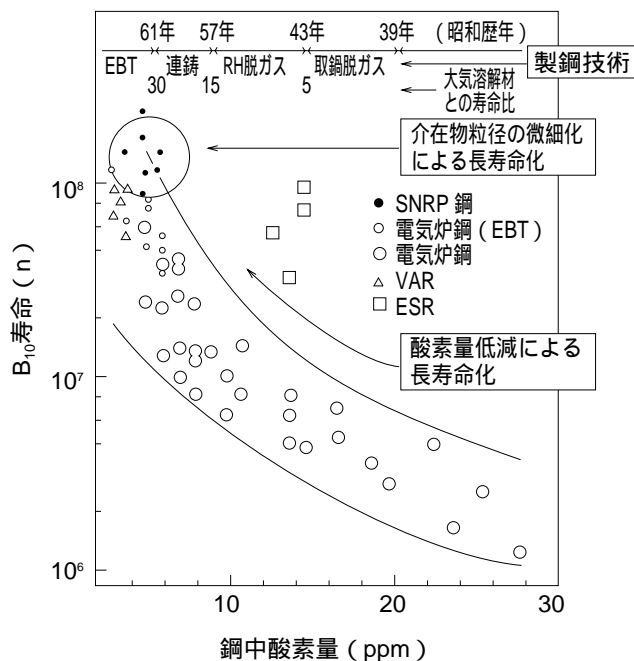


図18 軸受鋼の転がり疲労寿命に及ぼす鋼中酸素量(酸化物介在物量)の影響

17<sup>(18)</sup>)

すべりを伴う転がり疲労は、通常表面起点であるため非金属介在物の影響が現れにくいと言われているが、表面には非金属介在物以上に影響の大きい欠陥が生じ易い事を意味していると思われる。これが解消されれば、非金属介在物の影響は必ず出てくると考えたい。内部起点(最大せん断応力位置)である純転がり疲労の場合には、酸化物介在物量の低減およびその小径化により、寿命向上が達成されてきた経緯がある(図18)<sup>(19)</sup>など。

### 3・2・3 CVJアウターレース、ハブユニットの高強度化 - 高周波焼入鋼の高強度化

ギヤーに同じく接触応力伝達であるが、それほど靱性を必要としないもの、面圧負荷がやや軽微なもの、および接触部が部分的でバルクの強度が主体となるもの(スプライン付シャフトなど)等には高周波焼入れが適用されている。材料としては、所要の硬化層硬さを得るため、0.45~0.58%炭素鋼およびその合金鋼が使用される。心部の適度な強度と靱性のバランスをとるには、本来、調質(焼入れ-高温焼戻し)が望ましいが、この部品群は特にコストダウンニーズが強いものの一つであり、非調質鋼、鍛造まま強度の活用、あるいは冷間加工硬化の活用等、ほとんどが、何らかの調質省略に移行している。その他、切削・ドリル加工のための軟化熱処理省略や、はだ焼鋼並みの冷間鍛造性を具備するもの等、コストダウン要素を加味している場合が多い。

高周波焼入鋼における高強度化要因は、浸炭異常層や高濃度浸炭と言った浸炭特有の項目以外は、浸炭鋼に全く同じである。その内、高強度化-軽量化に実績を示しているものに高浄度炭素鋼がある。ハブを外輪としてベアリングの内輪と一体化したのが第2世代ハブユニットであるが、ハブにはS53C~S58C鋼が使われている。軸受鋼に代替して機能を果たしているのは、軸受鋼並みの高浄度鋼(酸化物介在物低減)である事による。

これ以外の高強度化要因については、現時点積極的な高強度化施策と言うよりは、上記のコストダウン要素を生かし、かつ現行機能を維持するのに活用されている。その意味で有用な材料として、微量元素ボロンを活用した高冷鍛性高周波焼入れ用鋼があるが、コストダウンに寄与する代表的材料でもあるので、非調質鋼と併せて、その項で取り上げたい。今後、当分野では軽量化を指向した一層広範囲のユニット化が趨勢である。この場合、更なる高強度化が必須となる。コストダウン要素を殺さず、ここに対応するには、材料メーカーとユーザーの密接な協力により問題解決にあたるという取組みが必要と思われる。ここで生ずる課題に対し、既成の開発材料で解決出来るものは極希である。設計(部品機能)、生産技術、材料技術が一体となった、所謂コンカレントエンジニアリングが必要な段階にきていると感ずる。

### 3・3 ギヤ音低減への対応—熱処理歪みの低減

ギヤ音低減には噛み合いの精度を上げねばならないが、これを全て研磨で対応しようとすればコスト増加となるため、熱処理歪み低減のニーズが生ずる。現行ギヤの熱処理として主流の浸炭を前提として、“予定研磨代内に歪みを押さえる”レベルの低歪み化には、焼入性の狭幅管理、結晶粒度の均一化、偏析の均一化などバラツキ低減策が必要となる。さらにコストダウンにつなげる研磨省略の域を目指すには、変態歪みのない表面硬化法—軟窒化で浸炭同等の特性を出せる鋼（迅速窒化性・耐高面圧窒化鋼）の開発や、輪郭高周波焼入の開発が望まれる。

#### 3・3・1 浸炭焼入熱処理歪みの低減

ここで言う“歪み”には二つの意味が混在している。一つは、鋼の焼入れ（マルテンサイト変態）には不可避な体積膨張による寸法変化量であり、もう一つは、この寸法変化量が不均一であることにより生ずる形状のゆがみである。特に浸炭材では寸法変化量の大きく異なる浸炭層と心部で構成されているので、形状によってはゆがみも不可避である場合が多い。両者が合算された、ある定位置からの変位を“歪み”と称している。

不可避の“歪み”に対してはバラツキが問題であり、ゆがみに対しては寸法変化量の不均一性が問題となる。

##### 1) 焼入性の狭幅管理

浸炭ギヤにおいても、直径など全体に関わる寸法変化は容量の大きい心部の体積膨張量に影響されると考えられている（歯部では浸炭層の影響大と思われるが）。心部の体積膨張量はマルテンサイトへの変態比率とC%によって決まる。ジョミニー焼入性試験値（焼入れ端から一定距離における硬さで表示）はこの両者の効果を併せた指標と言える。

ギヤの歯元曲げ疲労強度には適正な心部硬さがあり、それに対応してジョミニー値をある幅に規定する必要がある。JISのH鋼規格では、標準的な位置でこの幅は±5～6HRC程度となっているが、これを所要硬さの下限側で狭い幅（例えば±2HRC）に管理する事により、心部硬さのばらつき減少は勿論、低歪み・定歪み化に寄与するのが焼入性（ジョミニー値）の狭幅管理である。焼入性は、炭素量・合金成分、および結晶粒度でほぼ一義的に決まるものであり、製鋼における精密な成分コントロール技術が必要となる。一時は“我が社の低（定）歪み鋼”として、その技術が競われたが、二次精練設備（LF、脱ガスなど）が必須となっている現在では当然の技術として定着していると思われる。ここは、“鋼成分によって決まる不可避の寸法変化量”のロット間ばらつきに関わる部分である。

##### 2) 焼入性（ひいては寸法変化量）の不均一性の軽減

主として形状のゆがみに関わる部分である。同一鋼材内における、焼入れ性の不均一性が問題となる。その一つは、浸炭焼入れ時のオーステナイト結晶粒度が局部的に粗大化

する、所謂結晶粒の異常成長の問題がある。又、最近では、鑄型の形状による、マクロ偏析パターンの等方性の影響も検討されつつある。

##### 結晶粒度の均一化

浸炭鋼では、AlとNにより、オーステナイト結晶粒の成長を阻止する機能を持つ微細分散粒子AINが適量生成するように調整されているので、ある一定温度まで（通常は浸炭温度より高い）は整細粒が維持されるが、成長阻止条件が外れると急激に粒成長を起こすという挙動を示す（図19）。この限界温度（以下、粗大化温度とする）は、Al、N量で一義的に決まるものでなく、条件によっては、浸炭温度に迄下がるのが問題である。冷間加工材の浸炭がこれにあてはまる。この現象は局部的に起こる場合が多く、かつ異常粒成長と呼ばれるように、粒度調整をしていないものよりも粗大な粒が生成するので、焼入性に大きく影響して、歪発生原因の一つになっている。浸炭鋼の結晶粒度の問題に関しては古くから膨大な数の報告がなされており、それを例証して、結論を提示するのは不可能に近い。粗大化温度に関する一つの考え方にに基づき、それに影響する要因を整理し、対応策を述べる。粗大化温度を決定している直接的要因はGladman等の式<sup>(20)</sup>に集約されていると考えられる。

$$r_{crit} = 6Rof / \pi (3/2 - 2/Z) \quad (2)$$

$r_{crit}$ : 臨界析出粒子系,  $R_o$ : マトリックスの結晶粒半径,  $f$ : 析出粒子の体積分率,  $Z$ : 成長結晶粒の径とマトリックス結晶粒径との比

$$r = ko t^{1/3} \exp(-Q/RT) \quad (3)$$

$r$ : 析出粒子径,  $ko$ : 定数,  $Q$ : 活性化エネルギー,  $R$ : ガス定数,  $T$ : 絶対温度

平均結晶粒径 $R_o$ のマトリックス中に、周囲との粒径比 $Z$ の結晶粒がある場合にその結晶粒の成長を阻止出来るか否かの、成長阻止粒子の臨界粒径が $r_{crit}$ である。

(2)式は、結晶粒成長の駆動力は大が小を食う事による粒界エネルギーの減少分であり、それと析出粒子のピ

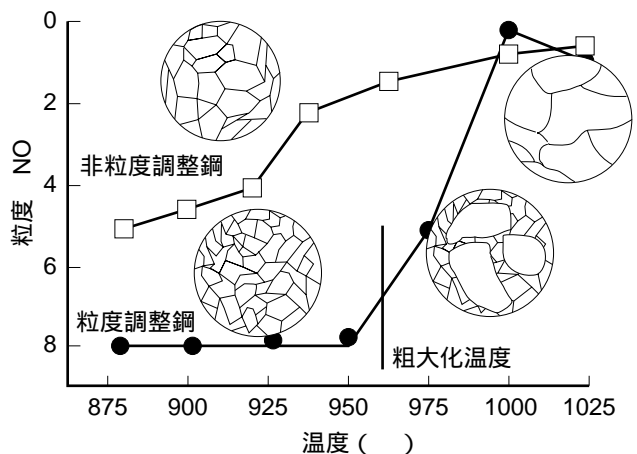


図19 粒度調整鋼の粒成長特性

ンニング力のつりあいから導かれる。成長駆動力が大きいほど（Z大，Ro小），成長を止めるには析出粒子径は小さく，数が多くなければならない事を示している。一方式（3）で析出粒子径はオストワルド成長により，温度が高いほど大きくなることを示している。したがって， $r_{crit}$ を越えぬためには温度の上限があり（粗大化温度），その温度は $r_{crit}$ が小さいほど低くなることになる。

図20<sup>(21)</sup>は，Al0.025%，N0.015%の場合に，（2），（3）式およびAIN固溶度曲線（各温度でのfを求める）を用いて算出した粗大化温度を示す。併せて，上記Al，N量を含むSCM420鋼で種々の前熱処理および冷間加工を施した材料（Roが変化する）の粗大化温度実測結果をプロットしている。両者は良く一致していると見られる。これより，現状適量と見られているAINを保持している場合でも，オーステナイト化時に形成される粒径がNo.11を越える細粒であると，粗大化温度が浸炭温度付近に迄低下して，偏在型の混粒を発生することが確認される。

Roを決定するのは，オーステナイト変態核の数の多少であり，加熱速度と変態前組織の細粗が影響する。実際製造過程でここに関わる要因は，熱履歴と冷間加工である。図21<sup>(21)</sup>は種々前熱処理の影響を示すものであるが初期に形成されるオーステナイト粒度（1123Kに相当）は前組織の細粗に影響されている。ここで粗大化温度低下を回避する方策としては，細粒の範囲内で粒度を粗くすることがある。同じ焼なましでも，球状化焼なまし（SA）に替えて，サイクルアニーリング（CA）や完全焼なまし（A）が適用されている例もある。又前組織の影響としては，Z（粒径の不均一性の指標とも言える）に関わるところも重要である。鍛造あるいは圧延組織に不均一部分（粒径の偏在，ベーナイトとフェライト - パーライトの混在）が持ち込まれるとZを大として粗大化温度低下をもたらす。焼ならし省略検討の場合には留意すべき点である。

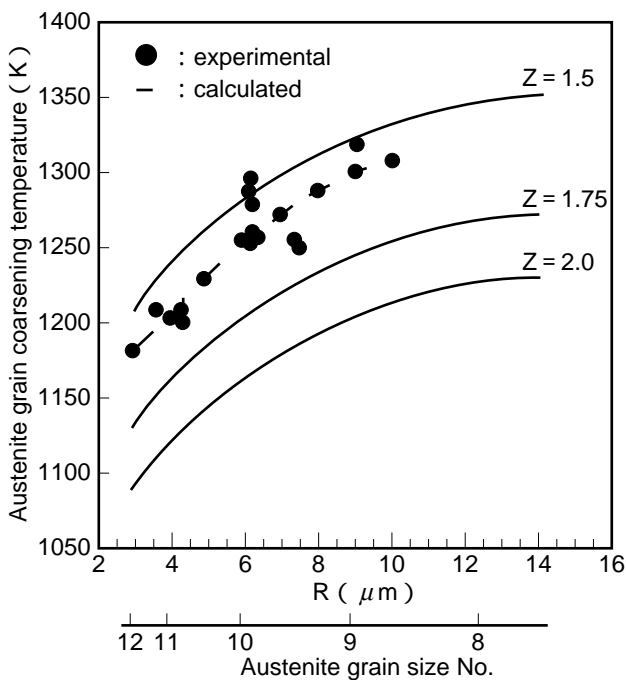


図20 オーステナイト結晶粒粗大化温度におよぼすマトリックス結晶粒径の影響

し（A）が適用されている例もある。又前組織の影響としては，Z（粒径の不均一性の指標とも言える）に関わるところも重要である。鍛造あるいは圧延組織に不均一部分（粒径の偏在，ベーナイトとフェライト - パーライトの混在）が持ち込まれるとZを大として粗大化温度低下をもたらす。焼ならし省略検討の場合には留意すべき点である。

図22<sup>(21)</sup>は冷間加工材の後熱処理および対策材による粗大化温度低下対策例を示す。冷間加工材では，加熱過程で再結晶を生じ，微細なフェライト（ないし微細な炭化物）の生成を経てオーステナイト化されるため極細粒が

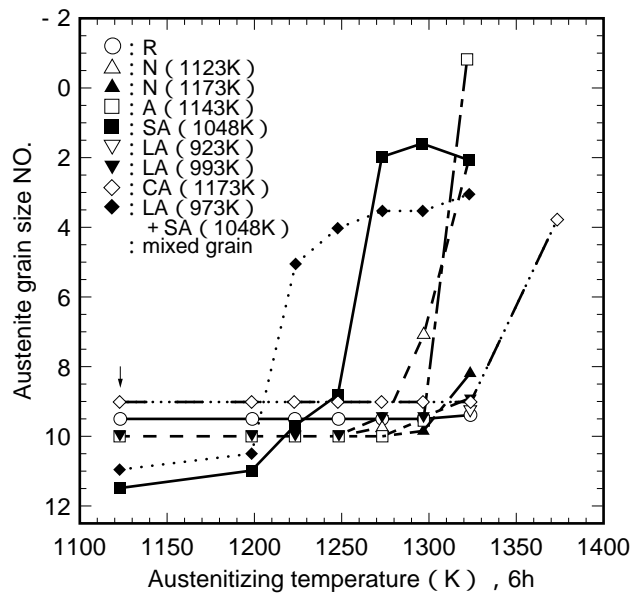


図21 種々の前熱処理によるRoの変化およびそれによる粗大化温度の変化

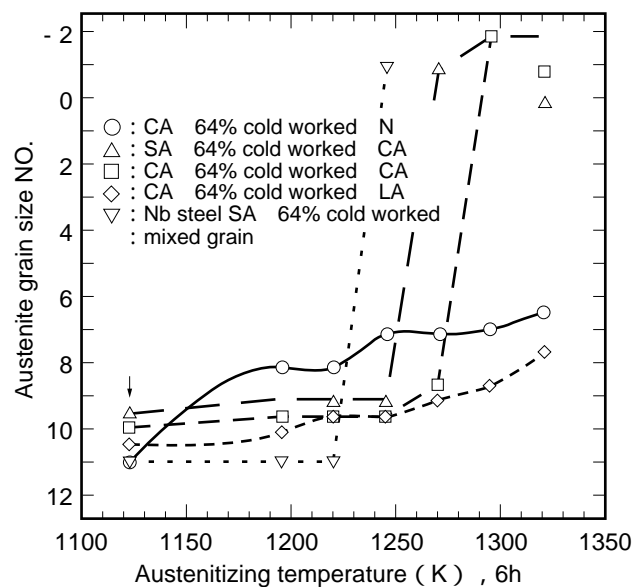


図22 冷間加工材の後熱処理およびNb添加鋼による粗大化防止

生成して粗大化温度が低下する。この回避策の一つは、先に同じく冷間加工後にサイクルアニリングを入れるのが有効であるが、折角の極細粒を生かすには、式(2)で言うところの、析出物の容量比 $f$ を増やすか、高温でも $r_{crit}$ を維持できる析出粒子を導入することが考えられる。

その両方を加味しているものが、冷間鍛造用結晶粒度調整鋼と呼ばれているもので、若干Nを増量したNb添加鋼が主体となっている。浸炭温度で十分、No.11の整細粒が維持される。又先に高強度化の項で述べた、Ti、Nbの微細炭化物を活用する材料もこの機能を持っている。

熱処理歪に対する鋼塊形状の影響の検討

熱処理歪の低減に関しては、先に述べたように焼入性の製鋼チャージ間バラツキの減少さらには連続鑄造による鋼塊部位間ばらつき減少および結晶粒度の均一化などにより、それなりの成果があったと思われるが、最近、環境問題がからむギヤ音低減ニーズあるいはコストダウン追求の面からも、さらに高度な低減策が望まれており、鋼塊形状の影響までも検討されつつある。浸炭鋼に関しては、1991年にGunnarson<sup>(22)</sup>が、385×265mm角鋼塊 120mm角ピレット、140mmφ連鑄ピレットそれぞれからクラウンギヤ（外径297mmφ）を鍛造で製造し、浸炭焼入歪を比較した結果、歪（偏径差）は連鑄丸ピレットの方が少ないと報告している。但しプレスクエンチである。

続いて、1995年、欧州の自動車メーカー、ベアリングメーカーおよび製鋼メーカー協同による調査結果が報告されている<sup>(23)</sup>。ここでは同一ヒートから、160mmφ丸連鑄片、140mm角連鑄片および中間541mm角インゴット（4.2t）を鑄込み、それぞれ90mm角、および100mmφに圧延して計8水準（鋼塊はトップとミドルに分けている）の鋼材からギヤブランク、クラッチスリーブおよびベアリングインナーリングに加工している。

結論は、鑄片形状、圧延形状ともに、歪に対する明確な影響は見出せないとされている。

国内では、木村等が<sup>(24)</sup>、350mmφの垂直丸連鑄材と480×370mm角全湾曲連鑄材の比較において、リング試験片および平歯車の浸炭焼入歪を検討している。何れも丸鑄片の方が歪が少なく、それは凝固パターンの形状に対応するものとされている。鋼材断面をマクロエッチングすると鑄片形状にほぼ相似の凝固模様が認められ、丸鑄片によるものは長径51短径48mmのやや楕円、角鑄片によるものは50×32mmの矩形であるので内径35mmの両試験片において、前者は模様の内側（筆者は芯部と呼んでいる）がほぼ均一に試験片内径側に残るのに対して、後者では長径側しか残らない。この芯部は外部に比べCが低いことが判明しており、直径方向の変態膨張量に偏りを生ずるためと解析されている。この報告に示唆されているように、鑄型形状の影響の仕方は、その凝固組織（マクロ偏析の分散状態）と部品形状（および塑性加工によるフローの状況）との関係あるいは歪を惹起する寸法変化方向との関係で大いに変わると考えられるので、汎用的に低歪の鑄型形状が定まるとは思われないが、この追求過程では熱処理歪の発生機構にも立ち入ることによって、鑄型形状のみならず、さらに新たな着眼点を見出す可能性を持った取組み課題として重要と思う。

3・4 環境負荷物質低減への対応－鉛代替被削性改善鋼の開発

特殊鋼へのニーズとしては、機械構造用鋼の鉛快削鋼（被削性優先のSUM系快削鋼ではない）の鉛フリー化がある。鉛添加快削鋼約70万t/年の内、60%以上が機械構造用鋼と見られるので、鋼材メカにとっても重要課題である。

3・4・1 鉛快削鋼の特長および既存鉛フリー快削鋼による代替の可能性

表4<sup>(25)</sup>に主要な快削鋼の特性比較を示す。既存の快削鋼

表4 既存快削鋼の特性比較

区 分	通常鋼	Ca-S	Ca-S-Pb	S	Pb
被削性	超硬合金（旋削）	×		×	
	工具寿命 高速度鋼（旋削）	×			
	高速度鋼（穿孔）	×			
	仕上面あらさ	×			
	切りくず破碎性	×			
機械的性質	強度				
	延性				
	じん性				
異方性	強度				
	延性		×	×	×
	じん性		×	×	×
優れている	良い	やや劣る	×	劣る	

は、基本となる鉛快削鋼、硫黄快削鋼、Ca快削鋼、およびその複合快削鋼である。なお、表中のCa-S鋼、Ca-S-Pb鋼は従来のCa鋼（Ca脱酸による低融点酸化物を利用する）との複合快削鋼である。

### 1) 被削性の特長

鉛快削鋼の特長は、ハイスによる旋削やドリル穿孔など、低速切削域で極めて優れた被削性を有することにある。特に切り屑の破碎性については、既存の快削鋼でこれに追従出来るものはない（図23）<sup>(26)</sup>。鉛フリー化の第一のポイントはここにある。

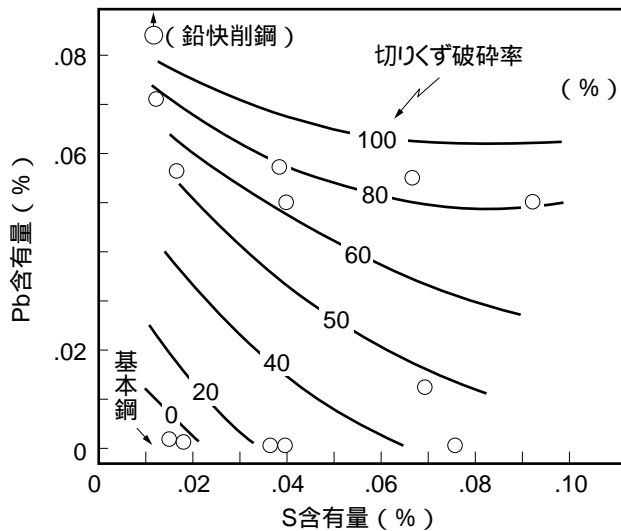


図23 PbおよびS含有量と切り屑破碎率の関係（SCM420鋼）

### 2) 機械的性質の特長

機械構造用鋼としての機械的性質は基本鋼とほとんど変わる所はない。規格鋼にそのまま使えるのが大きな特長である。他の快削鋼との比較では、特に延性・靱性の異方性の面で、鉛鋼に代替出来るものはない。ここが第二のポイントになる。

#### 3・4・2 鉛代替鋼の取組み

##### 1) 鉛の物性に近い快削物質の適用・探索

低融点（327℃）かつ鉄には固溶度を持たず、ミクロンオーダーの微細粒子で分散するなど、鉛の物性に近い快削物質を見出す。

ビスマス（Bi）快削鋼：金属でこれに相当するのはBi（m.p.271℃）しかない。快削鋼として実用された例もあり、ほぼ鉛鋼同等の特性を有する。毒性ありとの情報は全くないが、きわめてPb類似の重金属である事、コストが上がる事、および資源的に不安がある事などから、まだ評価は一定してない。

低融点酸化物： $B_2O_3$ （m.p.460℃）が見出せるが、通常の製鋼で鋼中に生成させるのに問題があり、実用化に結び付ける検討は進んでいない。

##### 2) 鉛鋼の特長である切屑破碎性の追求

鉛鋼とは別の被削性改善機構により、鉛鋼並みの切屑破碎性を得ようとするものに黒鉛快削鋼<sup>(27)</sup>、BN（ボロン窒化物）快削鋼<sup>(28)</sup>等がある。鋼組成の制約を伴うため、目下のところ汎用的な鉛代替鋼とは考えにくいだが、有用な着眼点として期待される。

##### 3) 硫黄快削鋼の異方性の改善

最も現実的な鉛フリー化の手段は硫黄快削鋼の活用である。そのためには、異方性の改善が重要課題となる。硫黄快削鋼における機械的性質の異方性は、圧延で延伸された硫化物（MnS）により助長される。延びにくい硫化物への形態制御ないしは微細分散する新たな硫化物（TiSなど）の導入等が考えられる。MnSの形態制御元素として、従来からCa<sup>(29)(30)</sup>など、Zr<sup>(31)</sup>、Te<sup>(32)</sup>、REM等が有効とされている。図24、図25<sup>(33)</sup>にCaによる異方性改善例を示す。MnS中のCa濃度が増すとアスペクト比（短径/長径）が減少することにより、特に延性（図25の絞り%）の異方性が著しく軽減されている。機械的性質の面では、鉛鋼に代替し得ると見られる。被削性についても、切屑破碎性を除いては、十分対応可能であり、実用性・経済性からして、鉛代替快削鋼への最短距離にあるものと思われる。

#### 3・5 新機能特殊鋼の開発

3・2~3・3への対応の内、目下の所願望の域を出るものではないが、潜在的ニーズとして着目しておくべきものに以下がある。

動力伝達部品の低フリクション化を直接部材で達成出来る自己潤滑性鋼（ないし表面改質との組み合わせ）の開発

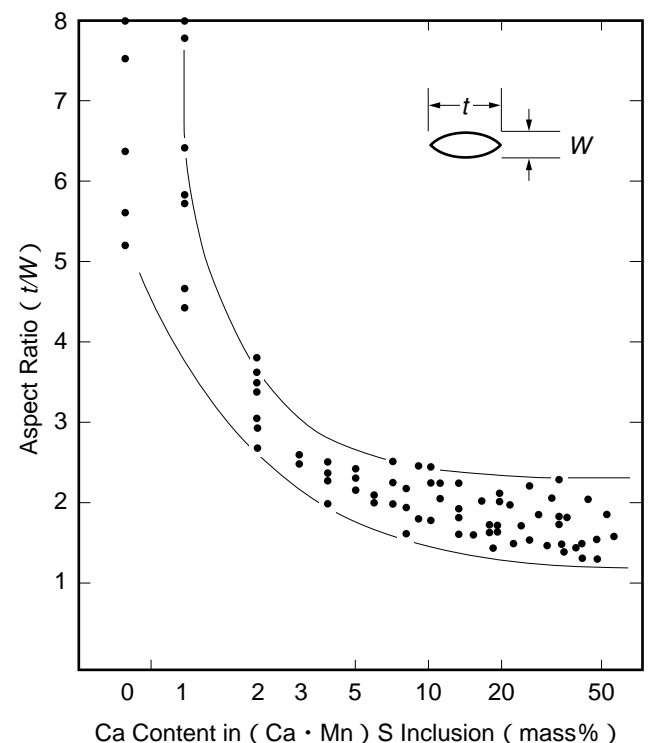


図24 硫化物介在物のアスペクト比（ $t/w$ ）とCa濃度

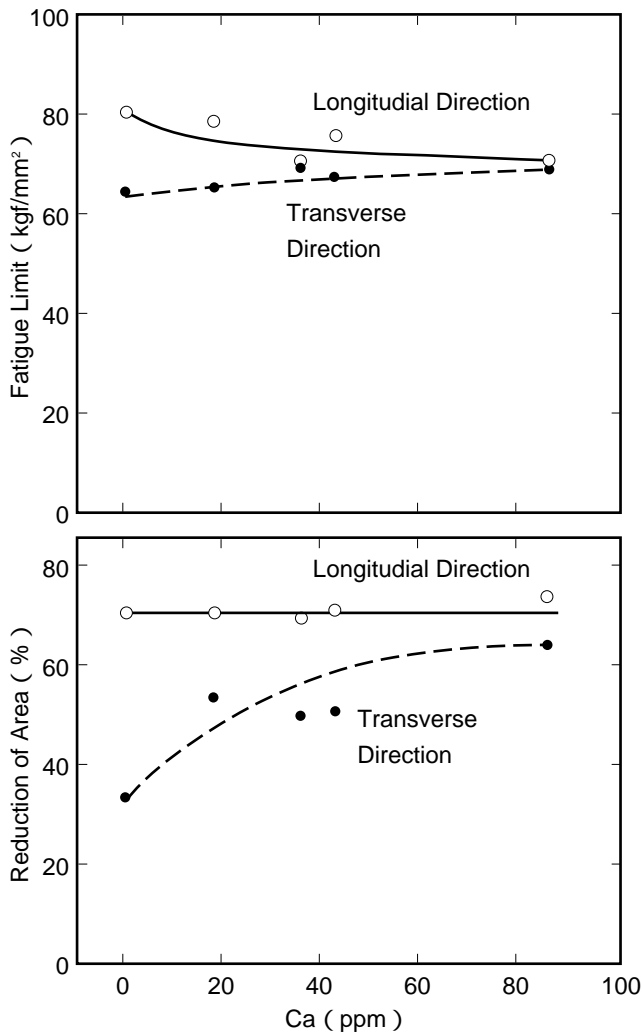


図25 鋼中のCa量と機械的性質の関係

軽量化のネックを解消できる高剛性鋼の開発  
 ギャー音低減に対応する高強度制振材の開発  
 それぞれに、高強度化とは相容れない特性であったり、鋼では限界の見えるものであるが、シーズ皆無ではないと思われるので、新たな発想による取組みが望まれる。

3・6 製造コストダウンへの対応

図3では特殊鋼が関わることに限って、自動車部品の製造コストダウン要素と材料の対応を列挙した。

3・6・1 素材価格に関わるコストダウン対応

価格低減：素材メーカー自身のトータルコストダウンにて対応

低グレード化：高価合金の低廉合金への置換（省Ni，省Mo鋼，ボロン鋼等）

素材熱処理省略：制御圧延による、焼なましあるいは焼ならし省略。直接切削用非調質鋼

素材冷間加工省略：精密圧延棒鋼・線材（ピーリング省略，引抜き省略）

3・6・2 部品製造費に関わるコストダウン対応

浸炭 高周波焼入化（エネルギーコスト，合金鋼 炭素鋼，はだ焼鋼並み冷鍛性維持）：高冷鍛性高周波焼入用

鋼-ボロンの活用により高周波焼入性と冷鍛性両立  
 熱処理（焼入れ焼戻し）省略：鍛造用途非調質鋼  
 浸炭，窒化時間短縮：迅速浸炭鋼，迅速窒化鋼，高温浸炭用鋼

ネットシェイプ成形（歩留り向上，切削省略，研磨省略）  
 対応：高冷鍛性鋼，ニアネットシェイプ素形材，精密圧延棒鋼，熱処理歪み低減方策

工具費削減：長寿命・高被削性冷間金型用工具鋼

3・6・3 コストダウンと機能の両立

先に、高強度化においてもコストへの配慮が不可欠であることにふれたが、逆に上記のコストダウン対応においては、所要機能との両立が重要な課題である。その典型的な事例に、非調質鋼と高冷鍛性高周波焼入用鋼の取組みがある。コストダウンへの寄与度から見ても代表的なものと思われる。

非調質鋼

従来の強靱鋼は調質（焼入れ・焼戻し）をする事により所定の強度・靱性を発揮するものであるが、非調質鋼は圧延まま，鍛造まま，あるいはそれに冷間加工した状態で調質に同等の特性が得られるよう工夫されており，熱処理費削減およびリードタイム短縮に寄与するものである。対応する調質鋼同等の強度と靱性を得る事が目標となる。

1) 強度（硬さ，引張強さ，耐力，疲労強度）

硬さ，引張強さ，疲労強度

非調質鋼の強度は，空冷材の硬さにより決まる。非調質鋼の空冷硬さは，V炭化物の析出硬化を主体として，Cその他合金元素による硬化作用を合算した指標である“C当量”によって決まる。図26は，表5に示す成分範囲の非調質鋼によるC当量と硬さの関係を示す<sup>(34)</sup>。ここに

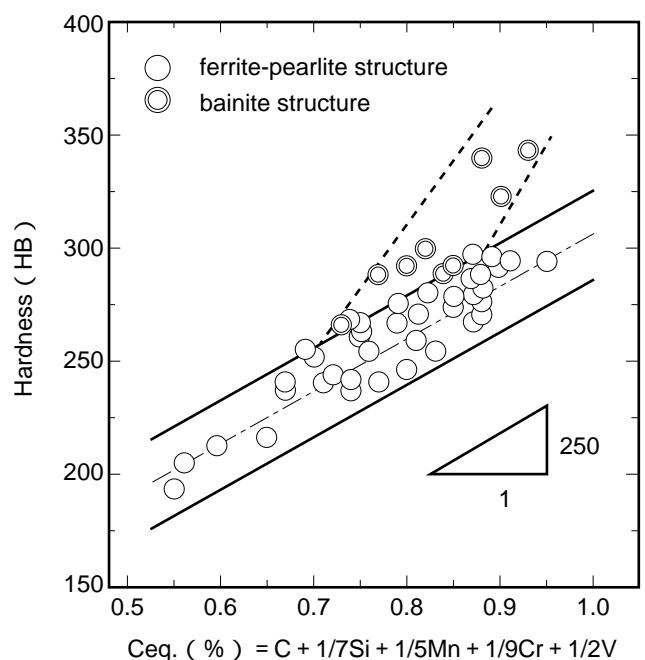


図26 炭素当量 (Ceq) と硬さの関係

表5 図25～28の特性に対応する材料の化学成分

Steel	(mass%)					
	C	Si	Mn	Cr	V	Note
S35C～75C	0.35～0.75	0.25	0.75	0.05	-	Q uench and temper
SMn35～60	0.35～0.60	0.25	1.25	0.05	-	
SC-V	0.35～0.55	0.25	0.75	0.05	0.10	
SMn-V	0.35～0.55	0.25	1.25	0.05	0.10	Conventional
SMn-Si-V	0.35～0.55	0.80	1.25	0.05	0.10	
SMn( high )-Cr-V	0.10～0.20	0.25	2.00～2.20	1.00	0.10～0.20	High strength and toughness
	0.28～0.40	0.25	1.50～2.00	0.50～0.75	0.10	

用いたC当量は、本来フェライト - パーライト組織（以下F - Pとする）における炭素と合金元素の強化作用をベースとしたものなので、ペーナイト鋼では直線から偏奇するが、何れにしても、適当な鋼成分を選定すれば、所要の硬さを得る事が可能である。図27から<sup>(34)</sup>、硬さと引張強さの関係は、調質鋼に全く同じであるから、非調質鋼で引張強さ1200Mpaレベルは如何様にも達成可能である。疲労強度も、調質鋼の疲労比（疲労限 / 引張強さ）同等と見られる。

#### 耐力

図27にも示されるように、通常非調質鋼では耐力比が調質鋼に比べて低い。F - P鋼（引張強さ900Mpa以下）では、Si, Mnによるフェライト強化, Vの増量, 等による耐力比の改善, あるいはより高い引張強さに設定することで対応可能であるが、耐力800MPa以上を要する高強度域になると、引張強さ1200MPa以上の設定が必要となり、衝撃値との両立, あるいは加工性が問題になる場合がある。

この回避策としては、引張強さ900MPa以上の低炭素ペーナイト鋼（0.13C-0.25Si-2.20Mn-1.00Cr-0.20Mo-0.15V）の時効処理（550～600℃）により降伏比0.8以上とした例がある。加工性もSCR440調質に同等であり、

ロアーアームで実用化したとされている<sup>(35)</sup>。

#### 2) 靱性（特に衝撃値）

図28に<sup>(34)</sup>、表5の非調質鋼における硬さおよび成分系と衝撃値の関係を示す。

F - P型非調質鋼（SC-V, SMn-V, SMn-高Si-V）では、調質鋼に比べて同一硬さ（強度）で衝撃値が低い。あまり衝撃値が問題にならないエンジン周り部品では一気に非調質鋼化が進んだが、足回り部品で時間を要したのはここに原因する。

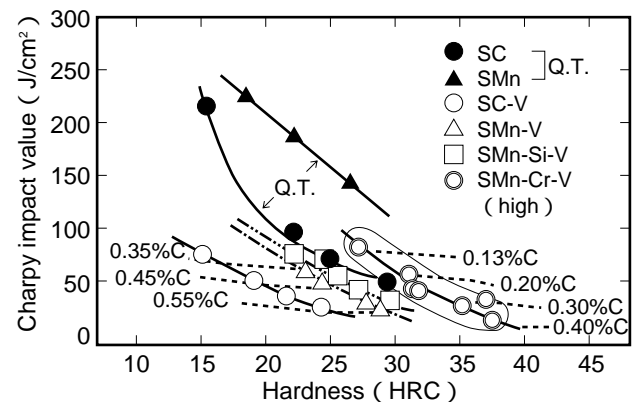


図28 衝撃値に対する硬さおよび鋼組成の影響

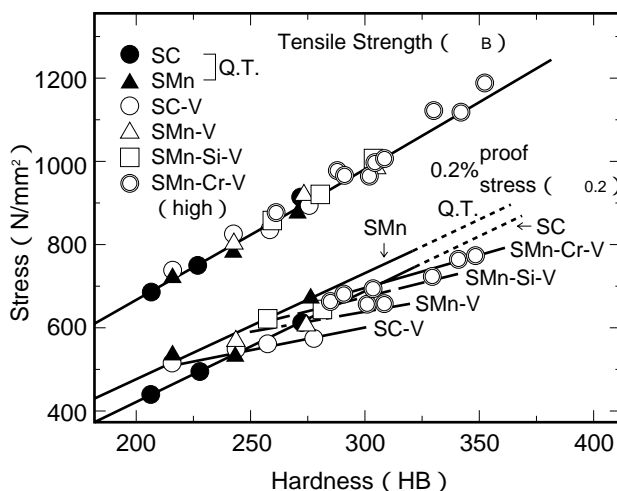


図27 硬さと引張り強さ・耐力との関係

#### 鋼組成（ひいては鋼組織）による靱性改善

図28で衝撃値は、硬さと、鋼組成、特にC量に大きく影響されることが窺える。これを、C量 - 合金成分系 - 引張り強さの関係の中に衝撃値をマップ化して表示したのが図29<sup>(34)</sup>である。強度を維持して衝撃値を上げようとするれば、低Cかつ合金量を増す方向になる事が分かる。高強度・高靱性・低炭素ペーナイト系非調質鋼はこれに当てはまるものである。しかし、先の高降伏比非調質鋼の事例にも示されるように、1000MPaレベルにおいてSCR440調質並みの衝撃値（60J/cm<sup>2</sup>）を得ようとするれば、0.15% C以下にする必要があり、C当量から、対応する合金鋼以上の高合金鋼になる。あらためて、調質の意味が認識されるが、折衷的な考え方として、鍛造後水冷を前



提のマルテンサイト系非調質鋼がある。同じ特性を得るのに、ベーナイト鋼より低合金にする事が可能である。又、より低Cで同一強度が得られるので、より高靱性化が可能である。

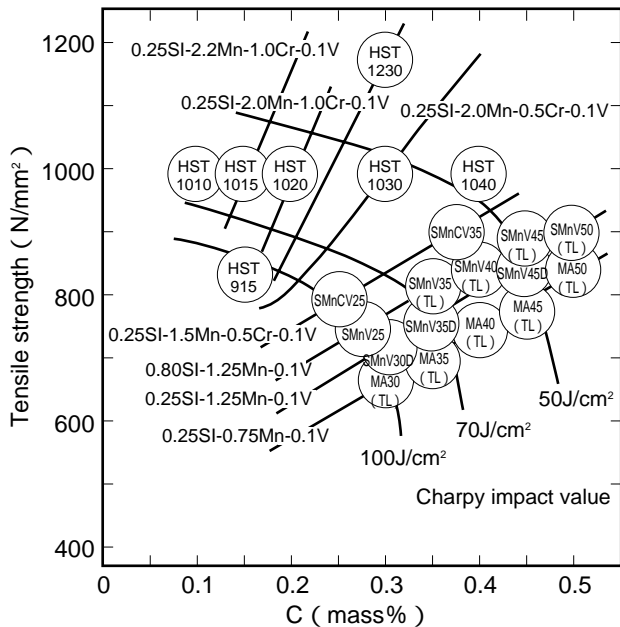


図29 C量－合金成分系と引張り強さおよび衝撃値との関係

結晶粒の微細化による靱性改善

900MPa以下の強度域はF - P非調質鋼が適用される。F - P鋼の靱性は熱間加工時の旧オーステナイト結晶粒度（ひいてはF - Pの粒度）による影響が大きく、加工終止温度を下げることによって細粒が得られることは良く知られている。

直接切削用途（納入鋼材をそのまま切削加工する）では、制御圧延技術により対応可能であるが、熱間鍛造用途では、種々の制約により、加工温度を大きく変えるのは困難である。1200 前後でも結晶粒粗大化を防止出来る、あるいはF - P変態時に細粒化を促進させるなど材料側の対応が必要となる。ここについては多くの取組みがなされてきたが、オキサイドメタラジーによるMnSの微細分散で高温加熱時の結晶粒粗大化を防止すると共に粒内フェライト生成核として働き、微細なF - P組織を実現出来るとする考え方<sup>(36)</sup>に集約される。足回り部品に要求される靱性を十分満足するとされている（図30）。

今後の課題

先の靱性改善は においても、0.3%以下の低炭素鋼がベースになっている。高周波焼入れを必要とするものには、対象となる調質鋼と同等のC%（0.35～0.50）を保持する必要がある。目下のところ、900MPa以上の強度域で、これに対応出来るものは見当たらない。非調質鋼に残されている課題と思われる。

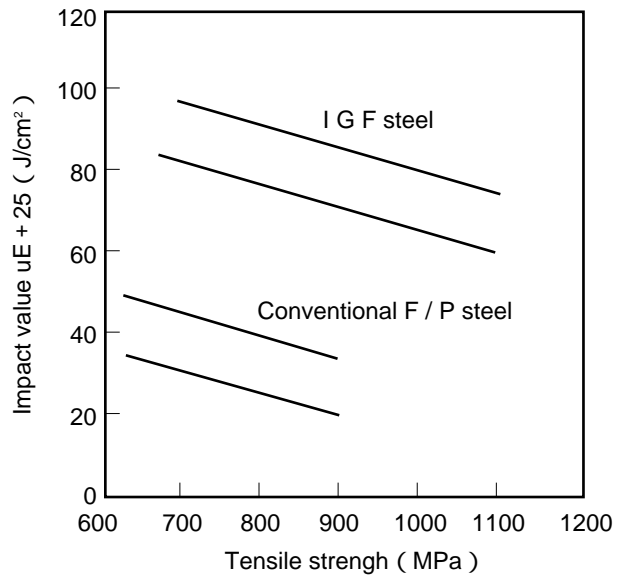


図30 硫化物分散型F-P非調質鋼による衝撃値改善

一つのシーズとして、図31<sup>(37)</sup>を示す。中炭素鋼・合金鋼において、650～750 域の鍛造では調質鋼と同等の強度 - 靱性バランスが実現される。所謂ネットシェイプ加工の一つである温間鍛造との組み合わせによる、加工熱処理と言える。現在、温鍛（この温度域での）の普及度はあまり高くないと思われるが、切削しにくいあるいは冷鍛出来ないことが実用化のネックとなっている高強度鋼にも道を開く加工法として有用である。今後の加工法の動向と相俟って検討を進めるべき課題と考える。

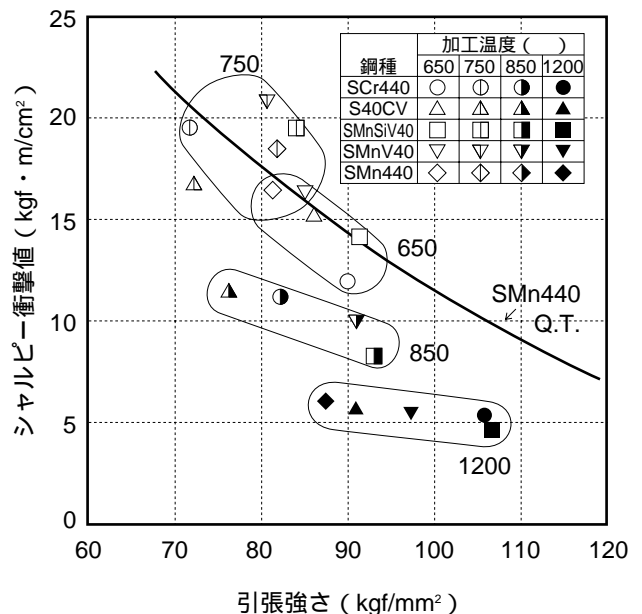


図31 強度－靱性バランスに対する加工温度の影響

高冷鍛性高周波焼入れ用鋼

場内環境改善およびコストダウン（熱処理コスト、リー

ドタイム短縮，材料コスト，冷鍛化）を指向して，浸炭焼入れ 高周波焼入れのニーズがある。高周波焼入れには，通常S45C以上が必要であり，冷鍛は非の限界組成であるため，はだ焼鋼のコストダウンにおける一つの柱である冷鍛化が難しくなる。ここをも克服しようとするのが，高冷鍛性高周波焼入れ用鋼である。冷鍛性と高周波焼入れ性の両立が課題となる。

### 1) 基本的な考え方

#### 高周波焼入れ性

高周波焼入れにおける硬化層の硬さを決定するのは，炭素量と合金元素である。通常炭素量は0.45%以上必要とされる。合金元素の役割はそれ自身が硬さに寄与するものでなく，焼入れてマルテンサイトを生成し易くする（マルテンサイトの硬さはC量で決まる）もので，その効果の大きさを，各元素の焼入れ性倍数と呼ぶ（図32）<sup>(38)</sup>。ここで重要なのがB（ボロン）であり，10～20ppmの微量で（これ以上入れても意味がない）Mo，Mn0.4%，あるいはSi1.2%に相当する効果を示す。

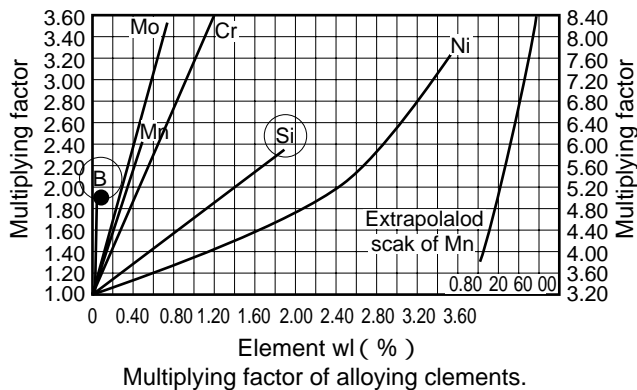


図32 焼入れ性倍数

#### 冷間加工性

中炭素鋼の冷間鍛造では球状化焼なましが行われる。フェライトの地に炭化物の分散した組織であり，その硬さは炭化物の量（炭素量に対応）とフェライトの硬さで決まる。フェライトの硬さに影響する各合金元素の固溶強化の程度を図33<sup>(39)</sup>に示す。特にSiの影響が顕著であり，Mnがこれに次ぐ。Bは微量であるので硬さには影響しない。

#### 焼入れ性と冷間加工性の両立

以上より，焼入れ硬化と焼なまし材の硬さに対する合金元素の効果には違いがあり，焼入れ硬化には寄与するが焼なまし硬さへの影響が少ない元素を選定する余地が生まれる。中炭素鋼の高周波焼入れでは， $B > Mo > Mn > Si > Cr$ の順に優先使用することによって，高周波焼入れ性と冷鍛性を両立する鋼組成の設定が可能である。図32，図33によればCrはBに次いで有効な元素であり，はだ焼鋼

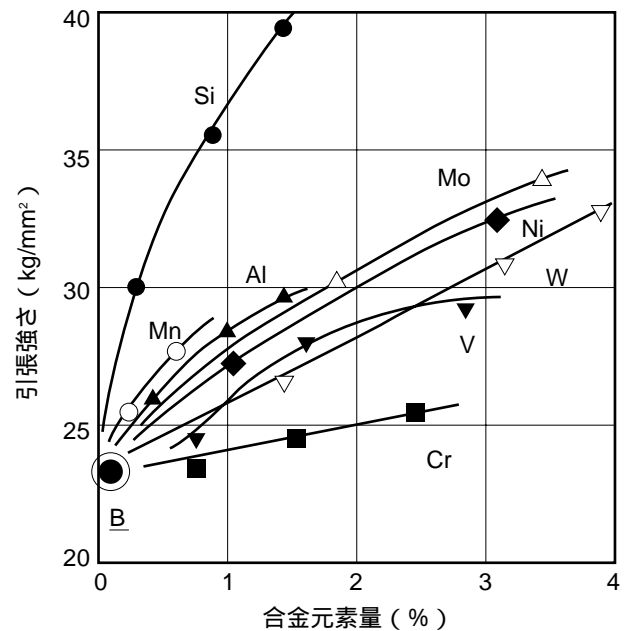


図33 フェライトの強さに対する合金元素の影響

（低炭素である）ではこの通りの効果を発揮するが，中炭素鋼の高周波焼入れの場合には少し事情が異なる。Crは炭化物中の固溶度が大きく，球状化焼なましで生成する炭化物を微細化するため，それによる強化の影響が特に中炭素鋼では大きい。又Crを含む炭化物は，短時間加熱では固溶しにくく，焼入れ性に対しては本来の効果が発揮しない。実用鋼では，これらの総合効果が検討されており，上記の優先順位を確認している。具体化したものとしては，0.48C～0.53C - 低Si 低Mn - B鋼<sup>(40)</sup>，や0.48C - 低Si - 低Mn - Mo鋼<sup>(41)</sup>等がある。

### 2) 特性事例

図34～図36に<sup>(42)</sup>，S45C鋼（一部SCM415鋼）との比較において，同等C%高冷鍛性鋼の冷間鍛造性および高周波焼入れ性を示す。

はだ焼鋼にほぼ同等の冷鍛性を示す鋼組成でも（S45CB2），S45C同等以上の高周波焼入れ性を有する。又本組成では，圧延まま（R）の状態でもS45C球状化焼なまし（SA）に同等，あるいは，簡易焼なまし（LA）でS45C・SA以上の冷鍛性を示す。さらなるコストダウンの要素を持っている。

S45Cに同等以上の冷鍛性を示す鋼組成（S45CB1）では，S45Cに比べて高周波焼入れ性は大きく向上する（有効硬化深さで，20%）。冷間加工性を阻害せず，高強度化を図る道を示すものと思われる。

### 3) 高周波焼入れ鋼の高強度化における本材料の意味

高周波焼入れ鋼における高強度化要因は，本質的に浸炭鋼と同じである。

有効硬化層深さを大とすることによる高強度化に対しては，前項に示したように現用鋼の加工性を阻害することなく，対応可能である。

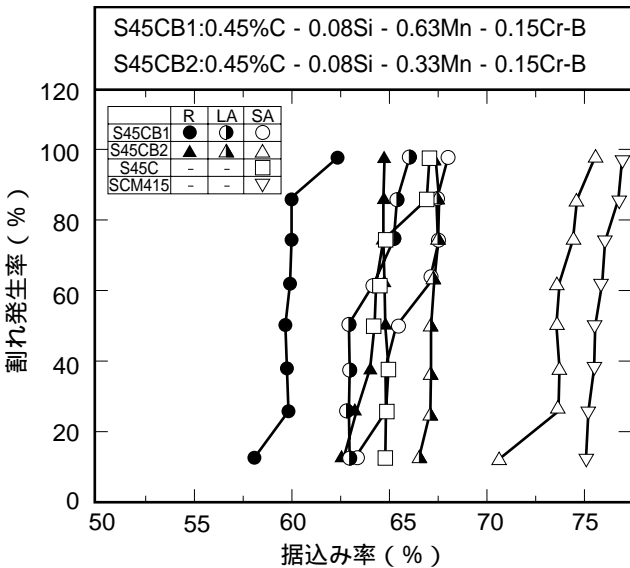


図34 圧縮限界据込み率

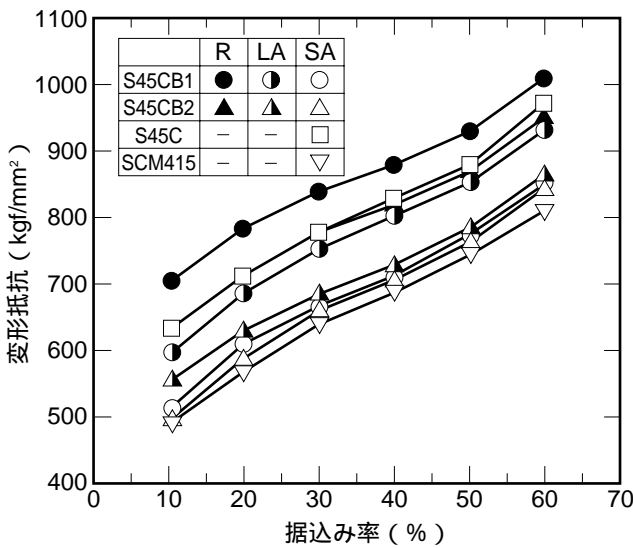


図35 冷間変形抵抗

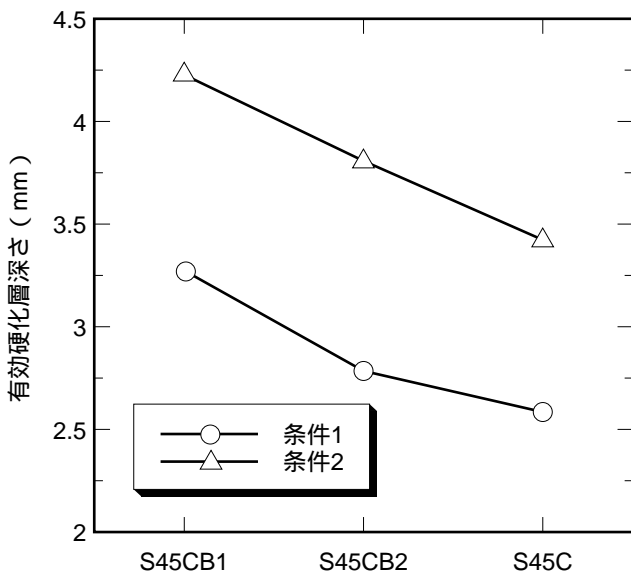


図36 高周波焼入性

硬化層硬さを上げることによる高強度化にはC%増が必須であるが、これによる加工性阻害は本材料の考え方で軽減出来る。又、Bは粒界強度を上げる効果があるので、静ねじりなどで、不安定破壊に移行するC%の上限を上げる。積極的高強度化要素を持っている。

耐面圧強度で、特にSiなどを積極的に使わねばならない時には本材料の本質が損なわれることになるが、Bの効果を活用すれば、他元素の低減によって、加工性阻害を軽減出来ることに変わりはない。

以上、強度と冷間加工性の両立と言う、一見矛盾した命題においても、それぞれを律する要因と合金元素の役割を的確に把握していけば、未だ解決の余地が残されていた例である。高強度ギヤ用鋼の加工性、快削鋼の被削性と機械的性質の両立、高強度非調質鋼の靱性など、今特殊鋼に残される課題の多くはこの問題に直面していると思われる。考え方として大いに参考にすべきである。

#### 4. 今後の課題

1) 長期的には、ハイブリッド車を経由して燃料電池自動車へ移行する方向が予測されている。その場合、モーターから車輪への動力伝達機構、特に変速機構は簡素化され、その主要材料である特殊鋼の所要量は大幅に減少と言われる。

無くなるものは如何ともし難く、そこから生ずる新たなニーズへの対応を模索する必要がある。

2) さりながら、これまでに積み上げてきたガソリン車の商品性を生かして、環境問題に対処しようとする取組みも、上記以上にめざましいものがある。本稿で取り上げた特殊鋼の課題は一層重要になるとと思われる。ここに残されている課題は以下と考える。

高強度 軽量化における剛性ネックのブレイクスルー。  
軽量材料にいく前に、少なくとも鉄ベース材料での解決策はないか。

特に直接接触動力伝達系部品の高強度化においては、加工性ネック、コスト等実用化に向けての課題は多い。新たな視点からの取組みが必要である。

- ・ 塑性加工との組み合わせによる高強度化
- ・ 表面処理（表面硬化も含む）の活用 特に面疲労に対する高濃度浸炭など。
- ・ 歯車などすべりを伴う転がり疲労については機構解明されていない所も多い。

その追求と新たな強化因子の探索。

疲労強度に対する非金属介在物の影響の定量化とその下限保証。

種々の高強度化策が軽量化に反映されるには、設計許容応力につながる必要がある。ここには平均レベル向上と併せて、下限保証の要素が不可欠と思われる。疲労強度

に関して、そのキーは非金属介在物の影響の定量化にあると思われる。

### 3) 今後の課題推進にあたって

今後コストダウン指向は一層強まり、軽量化との両立を果たすにはユーザーと素材メーカーとのより緊密な協同が必要とされる。個別的にならざるをえないと思われるが、一方でグローバル化の進展に伴い、どこでも調達・生産可能な材料を望まれている。この折り合いをどう考えるのか、これまで独自性を求められ、それを競ってきた素材メーカーにとって難問がひかえている。

## 5. おわりに

以上、今自動車が抱える課題と、特殊鋼へのニーズを整理し、そこに関わる材料の対応状況について考察した。後半は“技術解説”を逸脱して、多々意見を含む内容になりました事、お許しいただきたい。特に材料開発に関わる方々の議論の糸口にしていただければ幸いです。

## 文 献

- 1) 近田敏弘：1997自動車技術会材料フォーラム，9735448．
- 2) 富士川尚男：同上，9735484．
- 3) 柳谷彰彦他：まてりあ，34（1995），632．
- 4) 特殊鋼，38（1989），55-72．
- 5) 山陽特殊製鋼社内資料
- 6) 水野孝樹他：電気製鋼，65，（1993），13．
- 7) 黒川八寿男他：まてりあ，34（1995），552．
- 8) 山陽特殊製鋼社内資料．
- 9) 同上
- 10) 斎藤 他：電気製鋼，51（1980）．
- 11) 林亮二他：山陽特殊製鋼技報，2，（1995），22．
- 12) 村上敬宜：金属疲労「微小欠陥と介在物の影響」，養賢堂，（1993）．
- 13) 山陽特殊製鋼社内資料．
- 14) 尾谷敬造他：まてりあ，39（2000），864．
- 15) 坂本和夫：特殊鋼，40，（1991），47．
- 16) 吉田 誠他：自動車技術会論文集，27（1996），125．
- 17) 羽生田智紀他：電気製鋼，71（2000），59．
- 18) 山陽特殊製鋼社内資料．
- 19) 瀬戸浩蔵：「軸受用鋼」，日本鉄鋼協会発行，（1999），150．
- 20) Gladman, et al: J.I.S.I., 205（1960），1791．
- 21) 千葉貴世他：山陽特殊製鋼技報，2，（1994），24．
- 22) S.Gunarson:H.T.M., 46（1991），216．
- 23) S. Gunarson, et al: J.M.E.P.E.G（1995），259．
- 24) 木村利光他：CAMP-ISIJ.13（2000），764．
- 25) 大野 鐵：第96，97回西山記念講座（1984），157．
- 26) T.Ito, et al: ASM（1975），189．
- 27) 富樫房夫他：材料とプロセス，2（1989），1820．
- 28) 中村貞行他：電気製鋼，65（1994），4．
- 29) 宮下，他：鉄と鋼，58（1972），1458．
- 30) 岡村，他：同上，（1979），A33．
- 31) 成田貴一：鉄と鋼，62（1976），885．
- 32) 加藤哲夫，他：電気製鋼，53（1982），196．
- 33) 小川兼広，他：神戸製鋼技報，41（1991），65．
- 34) 千葉貴世，他：山陽特殊製鋼技報，1（1995），24．
- 35) 森 元秀，他：自動車技術会学術講演会前刷集，941（1994），81．
- 36) 高田啓督，他：CAMP.ISIJ，5（1992），777．
- 37) 池下庄三，他：材料とプロセス，4（1991），888．
- 38) ASM:Metals Handbook，（1948），ed.484．
- 39) R.Jorck:Revue de Metallurgie，59（1962）41．
- 40) 瓜田龍実，他：電気製鋼，63（1992），59．
- 41) 星野俊幸，他：川崎製鉄技報，23（1991），105．
- 42) 佐藤紀男：第23回鍛造実務講座，1．