論 説

UDC 621. 002. 3: 669. 14/. 15

最近の新鋼種展望

荒 木 透*

Trend of New steels in Recent Japan

Tôru Araki

Synopsis

The author classified the latest new steels, from the view point of usage, into 3 groups, high tensile steels, high strength and ultra high strength steels and steels for special uses, and described details and principles of developing new steels and also their future tendency.

As to high tensile steel, the outline of Japanese standards, recent trend towards strengthening of steels, the future of antiweathering steel and sea-water resisting steel, and super strength structural steel, PZ steel and MB steel which were recently developed are described.

In the article of high strength steel, the author stated about significance of steels standardized in JIS.

And classifying ultra high strength steel from the view point of alloy content the author firstly described the transition from 4340 steel to HP 9-4 steel with the low alloy series, and as to the medium alloy series the application of hot work die steel and matrix steel etc. for high strength use was also touched on.

As for the high alloy ultra high strength steel which is primary represented by maraging steel, the author described about strengthening mechanism and fracture toughness, and further explained about microduplex and TRIP steel as examples of a new direction of technical development.

Taking up stainless and heat-resisting steel as steels for special use, the author outlined the influence of alloying elements and microstructure to strengthening, corrosion protection, and oxidation resistance and about the direction of further development in the future.

The author also explained briefly the new trend of free-machining steel.

昭和44年11月5日受付

* 東京大学教授, 工博

1. 緒 言

まず最近の鉄鋼材料の進歩のあとを振り返ってみよう。新しい成分、組織を持った新鋼種が開発研究の結果つぎつぎに出現し、これによって鋼材料としての新しい優れた性能が漸次達成されて需要家の要望を充たしつつあることがみられる。また一面、量産製造方式の革新とともに相対的なコストダウンと品質の向上、新しい用途の拡大が行なわれて、従来の高級鋼の一般化普及が行なわれつつあり、この面でも性能と用途に関連した新しい領域の開発が進んでいる。このように自由世界第2位の生産量を誇る材料としての鉄鋼の躍進は、建設、機械、車輛、造船、化学工業などわが国工業の発展を基礎から支える役割りを果しているといえよう。さらにまた宇宙航空、原子力、海洋開発など新しい工業に要求される材料の面でも今後に向けて多くの期待を担っていると思われる。

これら新しい鋼の実状と傾向を展望するに当たり、まずその用途と冶金学的な分類によって整理して考えてみると、大別して、強度的用途の各種合金鋼（主として構造用、機械部品用、工具用など）と、特殊性能用途の高合金鋼（不銹鋼、耐熱鋼、高速度鋼、非磁性鋼など）に区別することができよう。もちろん、これらのものの中間の領域のものも存在するが、以下これらの用途によって要求される性能のうち、強度的なものを主として最近の新鋼種の動向を概観することとする。

2. 強度を高めた鋼種

2.1 高張力鋼

構造用普通鋼材＝軟鋼のもつ引張強さ $\sigma_B \sim 41 \text{ kg/mm}^2$ 、降伏強さ $\sigma_y \sim 24 \text{ kg/mm}^2$ 程度の力をさらに向上させた「高張力鋼」としては、低価格で経済性の高い非調質型「フェライト・パーライト鋼」と、高強度

Fig. 1. Strength spectrum of steel.

の調質型の「焼もどしマルテンサイト鋼」に大別して考えることができる。

2.1.1 非調質高張力鋼

非調質型としては、非鎮静鋼をも含み低炭素鋼に Nb, V 等を 0.05% 程度添加処理した細粒、析出硬化型の高張力鋼があって、その改良普及にはみるべき例が多い。要求される性能の主体は、「強度」と適当な「靱性」（切欠靱性、せん移特性）「溶接性」であって、多くのこの種のものが圧延、処理、管理技術の改善と関連して開発されてきている。

溶接技術の進歩とともに溶接構造物（橋梁、船舶、圧力容器など）の発達著しく、これに合わせて溶接性と強度の優れた新しい鋼種が多く生み出された。これらのものの内容を概説すると、

(1) $\sigma_B 50 \sim 55 \text{ kg/mm}^2$ 級の高張力鋼

大約 1.4% Mn, C $\leq 0.2\%$ の低マンガニ低炭素のキルドないしセミキルド鋼が標準であるが、JIS-50YB 相当品には Nb, V 等（その他場合によっては Al, N など）を少量（0.5~0.1% 程度）配合して、圧延状態で降伏強さを 36 kg/mm^2 以上に高めたものが開発されている。これらは溶接性と経済性の優れた量産用構造

Fig. 2. Example of schematic explanation of mechanical properties (balance between strength and transition temperature of notch impact value) of low C structural steel, fine grained or sub-hot worked (control-rolled)

圧延鋼材として将来軟鋼に代わって行くべきものと考えられる。

強度の向上とともにとくに高い切欠衝撃靱性を確保するためには、フェライト結晶粒の微細化が最も有利である。このためにはもちろん Al キルド鋼ないし積極的に Al, N の添加（IN 処理）鋼とすることが析出分散系の微粒効果として著しく有効であるし、また Ti, Zr などの窒化物の効果の利用も強靱細粒化に用いられる。さらに Nb, V などの炭窒化物〔Nb C_{0.85} N_{0.1}, V (N, C) などの形の

もの〕の析出強化系のものでも熱間仕上圧延の過程を変態点直下に至る低温にもってくる亜熱間加工によって、微細結晶粒の靱性に富んだ組成とすることができ、具体的な鋼としては製造者によって成分例が若干異なると同時に、加工および熱的な管理技術に種々の工夫をこらしたものが開発、研究されつつある (Fig. 2)。

(2) σ_B 60kg/mm² 級の高張力鋼

圧延のままあるいは焼ならしによって降伏強さ46~50kg/mm²、引張強さ60kg/mm²級のもののは実用鋼として登場しつつある。析出強化と細粒強靱化を組合せた上述の鋼種にSi、Mnを増強し、あるいはさらにまた微量のNi、Cr、Cuその他を複合した形のものもある。これらはNi、Cr、Mo、Cu、Vなどを少量複合添加し調質 (焼入れ焼もどし) によって強靱化を計る形で一足先に開発されていた60kg級以上の高張力鋼よりも経済性において優れている。

以上の各種のものの溶接性をさらに高めるためにC%を極端に下げたいわゆる無パーライト構造用鋼 (pearlite-free or-reduced steel) と称せられるものも新しく研究開発されつつある。このような鋼の生産は現在の純酸素転炉法によって経済的に可能となったものである。現在は低Mn系のC 0.05~0.07% フェライト鋼をベースに炭窒化物析出強化と微粒化を強く作用させた系統のものが英国等で報ぜられているが、さらに溶接における炭素当量が比較的低い合金元素による固溶強化や加工熱処理の工夫を複合すれば、60kg/mm²級以上の溶接性の高い鋼種の実用化も可能となるであろう。

鉄筋コンクリート用棒鋼 JIS SD35, SD50 (降伏強さ 35kg/mm²あるいは50kg/mm²級) の高張力化にも溶接構造用鋼と類似のアイディアが投入される。単にCを高めMn、Siの固溶強化とパーライト増加を主体として高降伏点とすることが行なわれていたが、さらに工法の変化により溶接、圧接などの性質をよくする必要も生じつつあるから、Cを低め炭窒化物の微細析出と細粒化が利用されるようになった。

(3) 耐候性高張力鋼、耐海水鋼等

「耐候性鋼」は鋼材の大きな弱点の一つである大気中での腐食減耗に対する耐久度を高める工夫から生れたもので、将来の一般構造用鋼材はすべてこの方向に工夫されて行くことも考えられる。JISではSMA 41, 50, 58の溶接構造用耐候性熱間圧延鋼材を最近決定した。土木、橋梁、車輛方面での今後の伸びは著しいものとみられる。この鋼種はCuおよびCrを主

要な耐候性の銹びを形成する成分として含有しており、それぞれCu 0.2~0.7%, Cr 0.3~1.2%を規定している。さらに高張力耐候性鋼のSMA 50, (58)ではMo, Nb, Ni, Ti, V, Zrのうち一種以上を添加することと定めている。これら添加元素は国内各メーカーの開発研究の結果推奨されている特殊成分であってCu, Crによる効果をさらに助長するものと認められている。

さらに一般用圧延鋼材の耐候鋼は最初U. S. SteelのCortenで開発されたように、以上の成分の他0.1%程度のPがCuと共存して耐候性に有効なことが知られている。Pが含まれることから溶接性には適しないが耐候性はさらに良好となるので、この種の鋼種も建築、車輛、産業機械方面への需要を狙って各製鋼メーカーが新製品の性能を競っている現状である。

海水による腐食にさらされる用途には「耐海水鋼」が開発されている。耐候性鋼と似たP, Cu, Crなどの有効成分の他Al, Ni, Tiなどが腐食量を減少する成分として報告され、実用鋼としては降伏強さ36~40kg/mm²級の高張力のものが各種の「パイル鋼材」として世に出ている。

その他の環境としては、燃焼ガス中のSO₂ (H₂SO₄)などを考えて耐硫酸性を向上させる試みもなされている。この場合CuとSの共存およびSb, As, Sn, Seなどが有効であることが知られている。

2.1.2 調質高張力鋼

この種の複合低合金低炭素鋼はT-1鋼以来すでにかなりの実績を経てきているが、価格面的な面からみて本質的により高い「強度」を目標とするものである。低温切欠靱性は高いが、溶接性においてはやや困難が増すのはやむを得ない。溶接用としてIN処理、析出強化を併用して引張強さ100kg/mm²級のものも実用鋼として開発されている。この種の鋼の新しい発展のためには溶接部材の低サイクル疲労強度や球形圧力容器にみられるような応力腐食割れなどの難点を克服しなければならない。

さらに高いNi量 (2%ないし5%) を含むHY系統の鋼種は米国で開発せられたものが取り入れられており、70kg/mm²より120kg/mm²に達する強度で低温靱性の優れた鋼種で、船舶のほか深海用など新しい用途にも向けられるものである。

さらに低温液化ガス類の輸送貯蔵に用いられるAlキルド系およびNi低合金系高張力鋼などは「低温用鋼」としてASTM規格に準じて開発せられており、その最高のもは-196°Cを保証する調質型9%Ni鋼

である。さらにNiをMnで置き換えた型のC 0.07%, Mn 3.5%, Ni 4%, Mo 0.2%, Cr 0.5%のAlキルドなども発表せられている。

強度の低い2%台のNiを含むものには「焼ならし」による鋼もあるが、降伏強さ40kg/mm²を越えるものには調質型のAlキルド鋼、Ni2.6~4%のNi-Cr-Mo調質鋼などが知られている。

以上調質型の高張力鋼は、古くから強靱鋼に用いられてきた技術的経験知識の上にその開発研究のベースをおいており、これを原理的にみるとつぎのようなことがいえる。

1) マルテンサイトを焼もどして得られるやや転位密度が高く回復過程にある細粒のフェライトに微粒のセメンタイトの分布した強靱な組織を利用する。AlN、微量のVは γ および α 粒度を調整する役割りを果たす。

2) したがって、良き性質を得るためには焼入性のよいことが有利であり、Mn, Ni, Cr, Mo, Cuなどの置換固溶型合金元素を有効に複合的に添加したりB処理を行なう。

3) 溶接性の要求から有害不純成分の量をおさえるとともに、炭素当量を下げる必要がある、基質は比較的強度は低いが延性に富む低炭素マルテンサイトを焼もどした組織となる。このことはまたMs点が400°C程度に高いことを意味し、微視組織の不均質性が多いことが強度をさらに高めた時の問題点となる。

以上のような観点から、さらに強度を高めるには単に従来の低合金系強靱鋼、肌焼鋼の延長ではなく、異なったアイディアの採用が望ましい。米国その他では後述の置換型合金元素の時効析出強化機構を利用した成分のものが実用高張力鋼として発表せられている。大約Ni 1.5%, Cu 1%, Mo 0.25%位の低炭素鋼で圧延状態でも60~70kg/mm²級の引張強度を得られるが、調質を行ない600°C辺の時効処理を行なえばNi-Cu系の析出強化により100kg/mm²付近までの強度上昇が得られる。圧延のままの供給材はフェライト、ベイナイトを多く含むが、これを用いて部材を加工、溶接した後時効処理を行なえば降伏強度比が著しく改善せられ、しかも延性を損なわない。これらの着想の構造用鋼は、すでに知られたFortiweld型のベイナイト鋼などとともに米国ではSuper strength structural steelとも名づけている。

高張力鋼の強力化を目指した新しい鋼種の着目される例としては、Nb炭化物の焼もどし時の析出による2次強化機構がMoの共存によって著しく増強される

現象を利用したPZ鋼や、Niを多く含んだ低炭素ベイナイト鋼が比較的低い降伏強度比を有し、延性が高いことを利用して溶接特性を高めたMB鋼などが挙げられる。ともに80~100kg/mm²レベルの溶接用高張力鋼の性能向上を目標にしており、前者は応力腐食割れに対する感受性の低下をも狙いとしている。

2.2 強靱鋼、超強力鋼

2.2.1 強靱鋼、肌焼鋼、窒化鋼

これらの鋼種はJISでは機械構造用合金鋼として用途的に分類されているものである。これらのものの成分、熱処理組織と強度靱性の関連については前節の調質型高張力鋼について述べたことが大体いえる。古くから発達した鋼種であって、用途としては兵器、自動車、機械部品などとして比較的シビアな強度的品質が要求されてきている。したがってP, Sなどの不純成分や偏析、非金属介在物などに関する限定量の管理が重要であり、この面と生産量の増大量産化に伴う製造技術面の合理化や品質管理の改良進歩は多くのものがなされているが、鋼種としてとくに新しいものは少ない。

前述のNb-Mo系の焼もどし2次強化機構の応用や、Fe-NiAl, Fe-NiCu, Fe-NiBe, Fe-NiSi, その他の系の多くの置換型合金元素の焼入れ時効強化機構の利用などが、今後の新しい品質と性能を生み出すために有望であると思われる。焼もどし2次強化と金属間化合物系の時効析出段階の強化とを同時に発効させる時の相互作用を適当に利用した鋼の開発も試みられている。

窒化鋼としては、JIS SACM1のCr-Mo-Al鋼以外にTi, Vなどの成分を窒化促進元素として有効に取り入れた鋼種が用いられている程度であろう。例えばC 0.25%, Ni 3.5%, Cr 1.2%, Mo 0.25%, Ti 2.7%, Al 0.15%のN-6鋼などが迅速窒化鋼として600°C, 10hの窒化処理を可能にしている。

肌焼鋼としては、ガス浸炭技術の進歩とともに高温浸炭による高能率化も問題になり、これに適した粗粒化温度の高い粒度調整鋼が工夫される必要があるし、また合金成分としてはC-ポテンシャルの調整上Cr%の低いMoを多く含む系統の鋼が自動車用として着目されるなど、性能と熱処理技術の関連で旧JIS鋼から新しい鋼種への転換が今後行なわれていくと思われる。

2.2.2 超強力鋼

新しい時代の鋼、超強力鋼とは大約140kg/mm²以上の強度レベルの鋼を名づけており、同時に必然的に

super-dutyであることを要求される。用途の主体は強度/密度、すなわち σ/ρ を軽合金と競うような航空機、ロケット、深海用などである。一般の純度や清浄度を有する鋼では、これ以上の強度レベルにおいては切欠強度比や疲労耐久限度比が強度とともに低下し、また環境の影響によっては遅れ破壊に対して敏感になる。すなわち強靱鋼の強度と破壊靱性とのバランスは 140kg/mm^2 辺を境にした上部ではくずれてくるために、強化鋼種としてまた別個の技術的要素が加わり、靱性の評価法も異なったものが必要となる。真空溶解や不純元素、偏析などのシビアな限定が実際面の技術として重要である。

便宜上、低合金鋼、中合金鋼、高合金鋼と3大別して考えると、それぞれが金属組織的には大体「低温焼もどしマルテンサイト」「複炭化物による焼もどし2次硬化組織」「置換型固溶元素を主とする過飽和立方マルテンサイトの時効強化組織」に対応する。

以下、わが国の実績が少ないので米国の例を主として述べ日本の開発状況についても触れる。

(1) 低合金超強力鋼

Nil.7%, Cr0.8%, Mo0.25%のAISI 4340 (JIS SNCM 8)より改良発達したもので、新しい着想としては、Siを高めて耐焼もどし性を向上させ 300°C 辺で焼もどし脆性を生じさせないようにするとともに、併せて固溶強化し 200kg/mm^2 の引張強度を実用化した300Mや、さらにC%を下げて靱性を附加したHy-Tufなどの鋼が既に多くの実績を経ている。

NiをCoで置き換えた形の4137 Co鋼 (Co1%, Cr1.1%, Mo0.25%, C $\approx$ 0.37%)は薄板のロケットチャンバ材として破壊靱性値が優れているとされて焼入れ組織の初析フェライト部やベイナイトフェライトの混在による不均質性が少ないためとされているが、このような低合金鋼を充分な冷却能で焼入れる時のCoの金属組織学的役割りについてはなお研究すべきものがある。

9Ni-4Co鋼 (HP9-4-45など)は、母質はNi, Coを多く固溶した含炭素マルテンサイトを焼もどしたもので、固体ロケットのチャンバ材として 180kg/mm^2 級の強度レベルの薄板の破壊靱性値が優れているため、実用上有用な鋼種とされている。低温用鋼にみられたように、かなりの%のNiは靱性付与の効果が大きい。これとCoとの組合せはマルテンサイト固溶体の性質が、近似的にdisorderに近い状態の低合金のものとは少し異なっているものと考えられる。

前述のPZ鋼, MB鋼などの改良変形型のものもこ

の種の鋼の下限の強度に用いられ、溶接性を発揮できる特長を有するので、わが国のロケット用材料として開発、検討がなされている。

低合金系超強力鋼の将来への可能性としては、さらに熱処理と塑性加工、もしくは繰返し急速熱変化などの組合せにより超微細粒の下部構造を得ることによって、強度の向上と靱性を確保することが研究されている。

(2) 中合金超強力鋼

熱間ダイス鋼の一種であるH11 (JIS SKD6), H13 (JIS SKD61)などの改良型の鋼種が基をなしており、Mo, Vの複炭化物析出による2次強化を利用したもので、耐熱性が高い点で低合金鋼をしのぎ、超音速機体などの材料にも用いられる。機構的にはMo1%を含むD6Aなど低合金鋼も同じ範囲に入る。

さらに高級なものとしてはMA鋼として知られる高速度鋼に近い鋼種 (Cr+W+Mo+V $\leq$ 12%, C=0.55%)が焼入れ焼もどし状態での引張強さ 240kg/mm^2 という含炭素マルテンサイトとしては極めて高い強度と7%の伸びを報じている。これらMo, V, Cを含む超強力鋼はオースフォーミングによって $50\sim 70\text{kg/mm}^2$ の強度上昇を実現することができ、しかも延性、靱性を損なわないことは特筆すべきことである。これらの現象の内容にはつぎの機構が考えられる。準安定オーステナイトの加工時に格子欠陥が多数導入されるが、これらとMo, Vなどの特殊カーバイドの核発生との間の相互作用が多く、その後の冷却変態によって生成するマルテンサイトの下部構造に受け継がれて、微小セル組織を形成して強度と靱性を高めるものとする考え方である。

オーステナイトの加工と変態、さらに歪み時効を組合せた加工熱処理により、現在鉄鋼材料としてバルクの状態でも最も強度と靱性の高い鋼種は前記MA鋼によって達成せられ、 340kg/mm^2 の引張強さとかなりの延性、靱性を有することが報告されている。

低合金系でこの鋼種に近い強化機構を有しているものにD6AC (C0.47%, Cr1%, Mo1%, V0.15%)などのものがあり、加工熱処理による強化や遅れ破壊の点で優れていることが報告されている。

(3) 高合金系超強力鋼

この鋼種は歴史的には、ステンレス鋼の変身で強度特性を生かした17-4 PHなど初期のPHステンレス鋼の強度上昇への努力から、18~25Niマルエージ鋼の誕生に結びついて画期的な飛躍へと進んだ。現状ではマルエージ鋼およびマルエージ型ステンレス鋼に各

Table 1. Examples of marage steel and marage stainless steel

Steel		Composition(%) and property	Ni	Co	Cr	Mo	Ti	Nb	Al	C	Cu	$\sigma_{0.2}$ kg/mm ²	σ_B kg/mm ²	δ %	ϕ %
Marage steel	Standard	18 Ni marage	18	8	—	5	0.5	—	0.1	≤ 0.03	—	~ 170	180	11	~ 50
		20 Ni marage	20	—	—	—	1.5	0.5	0.25	≤ 0.03	—	~ 170	180	11	50
		25 Ni marage	25	—	—	—	1.5	0.5	0.25	≤ 0.03	—	~ 170	180	11	50
		15 Ni marage	15	9	—	5	0.7	—	—	≤ 0.03	—	—	~ 200	—	50
Marage stainless steel	PH steel	MA-164	4	12	12	5	—	—	—	≤ 0.03	3	—	~ 170	—	—
		FV520	5.5	—	16	2	0.3	—	—	0.07	2	129	146	19	52
		AM367	3.5	15.5	14	2	0.5	—	—	0.03	—	172	179	14	—
		14-8 Mo	8.5	—	15	2.2	—	—	1.2	< 0.035	—	154	165	—	—
		(Experimental)	8	—	14	—	0.5	0.7	Be 0.15	—	—	170	180	11	~ 50

Table 2. Initial precipitation from super saturated B.C.C. iron

Alloying element	Precipitates	State of precipitation	Habit plane	Ratio of atomic diameter (r_1/r_2)	Note	Precipitation on dislocation or grain boundary
Au	Au-zone	Plate	100	1.14	—	—
Cu	Cu-rich zone (bcc)	Sphere	—	1.00	(Rod-like at 700°C, ϵ phase)	—
Be	Be-rich (bcc)	Plate	100	0.88	B2 ordered lattice (coherent)	On dislocation, On grain boundary
Fe	Be ₂ Fe (Laves)	—	111	—	(Aging at high temp.)	—
Mo	Mo-rich zone	—	100	1.11	$\rightarrow \gamma'$ (bcc)	—
Mo	Mo ₂ Fe ₃ (ul)	—	110	—	—	On dislocation
W	W-rich zone	—	100	1.12	$\rightarrow \gamma'$ (bcc)	—
W	W ₂ Fe ₃ (ul)	—	110	—	—	On dislocation
W	WFe ₂ (Laves)	—	?	—	(Aging at high temp.)	—
Nb	NbFe ₂ (Laves)	—	110	1.17	—	On dislocation
Ti	TiFe ₂ (Laves)	—	110	1.15	—	—
P	Fe ₃ P	—	100	—	Fe ₃ P-Fe ₃ P	On dislocation - in matrix

Precipitation on dislocation or grain boundary.

Alloying element	Precipitates	State of Precipitation	Habit plane	Ratio of atomic diameter (r_1/r_2)	Note
Ni, Al	NiAl (bcc)	(Sphere?)	—	1.0, 1.15	B2 ordered lattice (coherent)
Ni, Ti, Al	Ni ₃ AlTi	—	—	1.0, 1.18, 1.15	—
Ni, Ti	Ni ₃ Ti (γ')	(Plate?)	111	1.0, 1.18	(DO ₂ ordered $\rightarrow$ DO ₂ , plate-like)
Ni, Si	(Ni ₃ Fe) ₂ Si	—	—	1.0, 0.95	DO ₂ ordered $\rightarrow$ (DO ₂ ordered lattice (coherent)
Ni, Be	NiBe (bcc)	—	—	1.0, 0.88	—
Ni, Nb	Ni ₃ Nb (Ortho) (bcc)	Plate	—	1.0, 1.15	—
Ni, Cu	Cu-rich zone	Sphere	—	1.0, 1.00	$\rightarrow \epsilon$ (fcc)
Ni, Mn	Ni-Mn-rich (bcc)	Plate	—	1.0	—
Ni, Mo	Mo-rich zone	—	110	1.0, 1.11	Zone plate $\rightarrow$ C14 plate-like (Ni ₃ Mo)

Table 3. Examples of intermetallic compounds precipitated from iron alloy.

Name	Crystal structure (example of composition) (No. of atoms in a unit cell)	Lattice parameter a , b , or c
β (a)	B ₂ (Ni (Al, Ti)) ordered bcc	2.91 - 2.92
γ	Li ₂ (Ni, (Al, Ti)) ordered fcc	3.6
η	DO ₂ (Ni, Ti) hex	5.11 - 5.12
η	(Ni, Nb) orthorh	5.10
Laves	C14 (Fe, W) hex (12 ato.)	4.76 - 4.83
Laves	C15 (Fe, Zr) cub (24 ato.)	4.25 - 4.50
μ (r)	DB, (Fe, Mo) ₂ trigo	7.69 - 7.77
χ	B ₂ (Cr, (Ti, V, Mo)) bcc (58 ato.)	6.8 - 7.1
σ	DB, (FeCr) tetrago (30 ato.)	4.78 - 4.79
G	— (Ni, Ti, Si) ₂ fcc	8.91 - 8.94
R	R ₂ (Fe, Cr, Mo) ₂ hex (159 ato.)	8.79 - 8.84
		11.13 - 11.47
		10.90 - 10.93

種のもが研究開発され、将来の高強度鋼として発展の途にある (Table 1)。

これらの鋼種に应用される置換合金元素としてはNi, Co, Mo, Cu, Be, Ti, Nb, Al, SiなどがCを含まない立方晶マルテンサイト過飽和に含まれた場合、400~500°Cの昇温時効によって母相の強度上昇を有効に起こさせることが研究されてきている。現象としては格子欠陥の多い bcc 固溶体結晶の中で、固溶原子のクラスタもしくはゾーンのような初期の凝集、また短範囲、長範囲の規則化のような微視的变化が昇温によって生ずる段階で著しい強化が観察され、さらに電子顕微鏡に認められる金属間化合物や規則格子相の析出が成長した段階で過時効となって軟化に向う。この時逆変態によるオーステナイトの生成も強度と靱性に関連してくる (Table 2, 3)。

標準型 マルエージ 鋼は180~200kg/mm² 超強力レベルにおいて破壊靱性K_{IC}値 (平面歪みの臨界応力拡大係数) が他の鋼種に比べて優れていることが評価されて、ロケットその他の超高信頼度を要求される部材に用いられてつあるが、さらにNiを12~15%に減じたものや、Co量を特に高めた240kg/mm² レベルのものなども試みられている。Cr, MnをもってNiを置換した鋼種も多く研究されている。Crを含むステンレス型のものには、

AM367 (Cr 14%, Ni 3.5%, Co 15.5%, Mo 2%, Ti 0.5%) や、わが国で開発されている MA164 (Cr 12%, Ni 4%, Cu 3.2%, Co 12%, Mo 5%), ST 154 PH (Cr 15%, Ni 4.5%, Co 4.5%, Mo 2.5%, Nb 0.6%) など Ni-Co-Mo 系の強化機構を骨子にしているものが実用鋼として出ている。

高合金系統の強力鋼とこれにつづく PH ステンレス鋼は、その時効、熱処理挙動と強度特性に与える影響という点において非鉄合金類と似た点があるが、母質は C, N などの侵入型固溶原子の影響をうけ基礎的理論的な裏付け研究によって開発を進めるということにおいては困難な点が多い。しかし高性能のものを量産的に製造するための技術的知識や熱処理、溶接、加工などの鋼材料に対する実際面の技術には多くの蓄積と体系ができていますので、新しいアイデアによる変わった性能の鋼が実用鋼として開発されるには、既に解決されている知識が応用されて容易な面も多いと考えられる。

一つの新しい方向として、フェライト-オーステナイトあるいは時効マルテンサイト-オーステナイトの二相を有する鋼の特殊な強度と塑性、靱性が現在検討されつつある。いわゆる microduplex と称する微細な混合二相組織においては、昇温時特殊なミクロの塑性が観察される条件がある。これが常温の性質にどう結びつくかが課題である。

マルエージ鋼の或る種のものでは、若干のミクロ的に核発生した逆変態オーステナイトの存在が降伏強さなどの強度にあまり大きな影響を与えずに、マクロ的には延性を与える原因をなしているとも考えられている。

さらにオーステナイトを常温に持ち越した型の鋼種、とくに Md 点が常温直上にある合金鋼オーステナイトは、塑性変形によってマルテンサイト変態が誘起され、それによってさらに新しい塑性を生み出されることが応用されて「TRIP (Transformation induced plasticity) 鋼」が最近の話題を提供している。

Zackay によって報ぜられたものには、一例として C 0.25%, Ni 24%, Mo 4% などを基本とする含炭素合金鋼がある。例えば溶体化焼入れ状態では準安定オーステナイトであるが、常温の強加工によって多くの部分がマルテンサイト化すると同時に、残留オーステナイトは極めて多くの格子欠陥を導入されて高降伏点となる。これを焼もどすことによって Mo 複炭化物の反応析出が行なわれて母質の Mo, C 量が若干失なわれ、

残留の加工オーステナイトは不安定化してつぎの常温塑性変形によって再び変態を誘起する状態となる。

このような鋼では 200kg/mm²級の降伏強さでしかも 20% 台の伸びを観測するという驚異的な結果がえられており、まことに画期的なものと言えよう。

また太田氏によって研究されてきた Siteel と称する 5% Si に Cr, Ni, V などを主成分とする極低炭素合金鋼もオーステナイトの塑性を Si の固溶強化と Cr, Ni, Mo, Si などの時効析出強化現象などが組合された形の 2 相合金鋼と考えられるもので、とくに時効と冷間加工の組合せによって高い降伏強さと高い延性(靱性)のあるものの実験結果を得ているところは着目すべきものと考えられる。

複合型の超強力鋼板については、グリフィスキレツ発生と伝ばに対して特性の著しく異なった種類のものを複合して不安定破壊の防止に役立てようとするアイデアによるものがある。各種の試みが考えられるが、わが国においても多層の調質鋼板を可塑性の大きい fcc の Ni などをボンドとして重ね合せて強圧延して微細な層状組織を得る研究が注目される。

2. 3 工具鋼、軸受鋼、ばね鋼など

主として高炭素系の低合金鋼類として代表的なものには、軸受鋼および多くの合金工具鋼類、ばね鋼などがある。これらのものに要求せられる性能は強度、硬度に関連しているといっても特殊な転動疲労、衝撃疲労、耐摩耗性など用途によって特長が異なる。金属組織的な共通点の一つは、球状化处理材の焼入れによって生じた残留炭化物分散型のマルテンサイトが利用される点にある。

前述の中合金超強力鋼としても一部の工具鋼が利用されるが、耐摩耗性の要求から、高硬度の合金複炭化物の粒子の分散した組織に重点がおかれたものが切削やダイス関係の工具鋼である。母相のマルテンサイトの高い繰返しの圧縮、せん断応力に対する強度的応答に重点がおかれているものが軸受鋼とみられる。さらにばね鋼は母質の焼もどしマルテンサイトのばね特性や繰返し応力に対する耐久限度が重点になり C 量も比較的低いものが用いられることが多いし、一部にはオーステンバなどベイナイト処理による組織の強靱性を利用する場合やパテンティング-冷間加工による降伏点向上に重点を置くものもある。

高温ダイス鋼やばね鋼の用途にはその要求性能の類似性からマルエージ鋼やオースフォーム鋼の高強度と靱性が新しい鋼種として利用されることが多い。またこれらのものの中間的に、単に W, Mo, V などの複

炭化物反応2次硬化による昇温強度の性能のみでなく、新しい強化機構としてNi-Mo, Ni-Co-Moなどの時効(析出)強化を複合した成分の鋼種も種々のものが開発されておりこれらの用途に用いられている。しかし、この場合オースフォーム処理は後者の機構にはほとんど寄与しないことが知られている。

軸受鋼としてはとくに清浄度との関連による溶解造塊技術の進歩による品質向上が近年著しいが、さらに長年の固定した成分JIS SUJ2, 3などから新しいより合理的な成分の低合金鋼への脱皮の動きがみられる。

SUJ 2(C 1%, Cr 1.5%)を例にとれば、これより転動疲労による破壊現象に合理的に耐える母質を有する鋼としては、必要量以上の分散炭化物量をなくし、さらに強度上有効な合金成分や昇温時に焼もどし軟化に耐える成分を加えることなどが考えられている。例えばCを低めAlあるいはSiを1%程度含有せしめて耐熱軸受鋼としたものや、SiさらにはCr, Mo, Vなどを積極的に添加した耐熱軸受鋼、さらに前節のMA鋼のようなものも高級な用途にむけて考えられる。軸受に用いられる肌焼鋼についても同様のことがいえ、Ni-Cr系肌焼鋼に5%のMoを含有した耐熱肌焼鋼M 315もその浸炭部の熱処理組織は同様の主旨のものと考えられる。

3. 特殊性能の鋼

3.1 ステンレス鋼

まず、標準の18Cr, 18-8などは量産方式の確立とともに用途の拡大が計られつつある点に着目すべきものがある。大型炉溶解、連続鍛造と連続圧延方式によりより一般的な耐锈钢板としての需要に応じ得るように向っている。さらに転炉による生産にも踏み切っており、価格と生産量の点でとくに建築、家庭用、車輛、土木方面などにステンレスの普及鋼化が進んで行くであろう。

JIS 鋼としてはAISI とも対応した高級耐食鋼がある程度整備されているが、さらに応力腐食や特殊な化学工業用の耐食性などの工夫を行なった鋼種も開発されつつある。

塩化物などを含む熱溶液における応力腐食割れに関して δ フェライト-オーステナイトの2相組織が優れており、40%ものフェライトを含む2相合金でマルテンサイトを形成しないものの成分範囲として20—5系に少量のSi, Mo, Nを含む鋼がわが国でも開発されているが、さらにMoを3%程度に高めたものは優

れた特性を有することが外国で報ぜられている。

オーステナイト系統ではJIS 鋼よりMo量の高い20—25系に5% MoあるいはさらにCuを加えた系統のものは、種々の特殊な酸類に対する耐食性を要求するステンレスとして用いられる。これらはとくに炭素量を0.02%以下に抑える工夫がなされELCと称している。

タービン翼材などに用いる12Cr系のステンレス鋼にNi 6%, Co 7%, Mo 3%を加えた析出硬化型マルテンサイト鋼はとくに内部摩擦—ダンピング特性の高いことを目途としたステンレス鋼であるが、このような特殊な性能が強度の高いところまで持続することは高速回転器材として極めて望ましい。

マルテンサイト型PHステンレス鋼については超強力鋼の節でも述べたが、140kg/mm²レベル以下の強度で用いられるもので耐食性の優れたものが多く開発せられつつある。

3.2 耐熱鋼

3.2.1 フェライト、マルテンサイト系

まず、低合金系には従来ボイラー材などとして発達してきたCr-Mo低炭素鋼類があるが、V, Cu, Ti, Bなどを少量添加した鋼種が英米で開発され500°C以上へ性能の改善が試みられる。さらにガスタービン用には、3% Cr-Mo鋼が用いられているが、Ti, Bの他Nbを添加するなどして向上を計った鋼が開発されている。

耐酸化性の優れた9% Cr鋼ではMo, Cu, Wに加えてNb, V炭、窒化物の析出強化を計り、600°C辺での強度を高めつつある。

さらに10—12% Cr系の鋼については、Coの添加が新しいマルテンサイト系の強力な耐熱鋼を生み出しつつあり、Co 10%のH53やAFC-77 (14% Cr, 13% Co, 5% Mo)などがあり、時効による置換固溶元素の析出強化機構をも併せ、超強力鋼を630°C辺の耐熱鋼として用いた形の鋼種ともみられる。またBの0.2%までの添加でほう化物による強化を狙ったものもある。

18% Cr系あるいはそれ以上の% Crの鋼種、耐酸化、耐硫黄に重点がおかれるもので、結晶粒度のあれやすいフェライト相に炭、窒化物析出系としてTiなどを少量添加した鋼種が利用される。さらにAl, La, Ce, Yなどによって耐酸化性の向上を計ることも行なわれる。

Crに代わってAlを主合金とするフェライト鋼種も新しい種類の開発が着目されるもので、7% Al, 5

%Cr, 3%Zr, 2%Nb, 2%Moという複合成分のもの、あるいはさらにAlの高い鋼種などがある。

3.2.2 オーステナイト系

18—8より25—20系に至る各種のオーステナイト母相に耐酸化性を高めるためSi, Al, Be, Yなどが利用されるが、同時に時効析出現象も加わる。さらにTi, Nb, Pなどを加え、あるいはまたMo, W, Coによる母相の固溶体強化を狙った各種の新鋼種がみられる。Bは粒界強化とさらに積極的にほう化物析出による強化も利用されるものが研究されている。

MnはNiの代替元素として研究され、これとNによる窒化物析出強化が利用される。弁用鋼として多く用いられる鋼種はガソリン燃焼より来る酸化鉛に対する耐食性が問題にされるが、NiをMnに代替した系統の鋼が優れている。

3.3 快削鋼

快削性能は生産効率上重要な優れた被加工性能の一つであるが、鋼の場合は研究の歴史が古くそれだけ知識技術も多く積み上げられ、冶金的研究を近來深くなされるようになった。

新鋼種としては、軟鋼ベースの超快削鋼やダイス鋼、ステンレス鋼などの快削鋼化に多くの発表がみられる。

すでに永く利用されてきているS₂-Pb系の各基本

鋼種に、Te, Se, Biなどを如何に複合添加して効果を多くするかに開発の眼目がある。N, Pなどの富化については研究の詳細な点については興味が残されている。

とくにTeの添加鋼には、独特の構成刃先への効果によって工具寿命と仕上面に優れた性能を与える鋼種がある。超快削鋼としてはSiの極めて低いリムド・セミキルド系の鋼が常用され、とくに0.00%台の低Siのものも新たに見直されていると報ぜられている。

最近の技術開発の一つの話題はCaを脱酸に用いてシリケート系の非金属介在物を適当に調整した鋼である。

これらは超硬切削工具の摩耗に著しい改善がみられる。150~250m/minの高速切削において、シリケートを主体とする非金属介在物が工具接触面（すくい面、逃げ面）に堆積して被覆する効果によるもので、脱酸、造塊条件の調整、Al₂O₃, CaOなどを適当に含んだシリケートの分散を計ることが鋼の高速切削（この場合含Ti系工具）における快削性能を高めたものを得る。この場合、硫化物の共存や介在物の絶対量の効果など実用上への今後の課題はあるが、従来の考え方と異なった新しい方向の快削鋼が生れて行く可能性がある。