

船舶用低合金鋼の強度特性に及ぼす Ni, Cr の影響

輸送高度化研究領域 *高橋 千織、村上 健児
神戸製鋼所 深谷 莊吾、藤綱 宣之

1. はじめに

船舶用ディーゼル機関では、燃費効率の向上を目的とした機関のロングストローク化や船内空間を有効利用するための機関のコンパクト化など、経済性向上のための対策が進められている。現在、クランク軸等に用いられる大型鍛鋼品用低合金鋼としては、DIN規格の 34CrNiMo6 や 42CrMo4 などが広く使われているが、これらの材料についても経済性、信頼性の向上が求められており、高強度化、高靱性化のため、研究が行われている^{1),2)}。一般に鋼の靱性改善にはNiの添加が有効であることが知られているが、Niは非常に高価な合金元素である。このため、Ni添加による強度特性への効果を明らかにして、強化メカニズムを解明することは、なるべく少ないNi添加で大きな効果を得るための基礎データとなり、材料の信頼性と経済性の向上に非常に重要であると考えられる。

本研究では、低合金鋼の機械的特性を向上させるために、主要元素である Ni, Cr の添加量を系統的に変えて低合金鋼を試作し、材料の組織や強度特性に及ぼす Ni, Cr の影響について検討した。

2. 実験方法

40kg 大気溶解炉を用いて Table 1 に示す鑄塊を作製した。Ni, Cr 以外の組成を固定し、Ni, Cr のみを大きく変えて、その影響を検討した。これらの作製した鑄塊を 1230℃に加熱後、鍛錬比 7S の鍛造を加え、室温に放冷した。鍛造材は切断後に 870℃から焼入れし、580℃, 600℃, 620℃の3つの温度で焼戻し処理を施して引張試験とシャルピー衝撃試験に供した。また、鍛造方向に平行な面において光学顕微鏡 (OM) および高分解能走査電子顕微鏡 (FE-SEM) による組織観察を行い、粒径測定を行った。OM による旧オーステナイト粒径の測定はASTMの粒度測定法に則った。また、

Table 1 鑄塊の化学組成 (mass%)

Steel type	Cr	Ni	Other elements
A	3	0.2	0.35C-0.2Si-1Mn -0.5Mo-0.15V-0.02Al
B		0.75	
C		1.6	
D	1.6	0.2	
E		0.75	
F		1.6	
G		3	
H	0.2	3	

これとは別に FE-SEM に付属した結晶方位解析装置(EBSP)を用いた粒径測定も行った。結晶粒の大きさは個々の結晶粒の面積で表している。

3. 実験結果および考察

Fig.1 に試験結果を示す。組成が異なる試料では最適な熱処理条件が異なる可能性があるが、個々の試料に対して熱処理の最適条件を決定するための予備実験は行わなかった。その代わり、3つの焼戻し温度で処理を行った各試料の引張試験とシャルピー衝撃試験の結果から、引張強さ 1000MPa 時のシャルピー吸収エネルギーを算出し (規格化靱性値と表すことにする)、強度特性値として用いることとした。Fig.1 では各試料の規格化靱性値の Ni 量に対する変化を示している。これより、3%Cr のシリーズは、0.2~1.6%Ni の範囲で Ni 量の増加に伴って靱性は向上するものの、その影響はあまり小さくなく、他の Cr 量シリーズに比べて平均的に高靱性を示すことがわかる。これに対し、Cr1.6%のシリーズでは、Ni 添加による強度特性へ

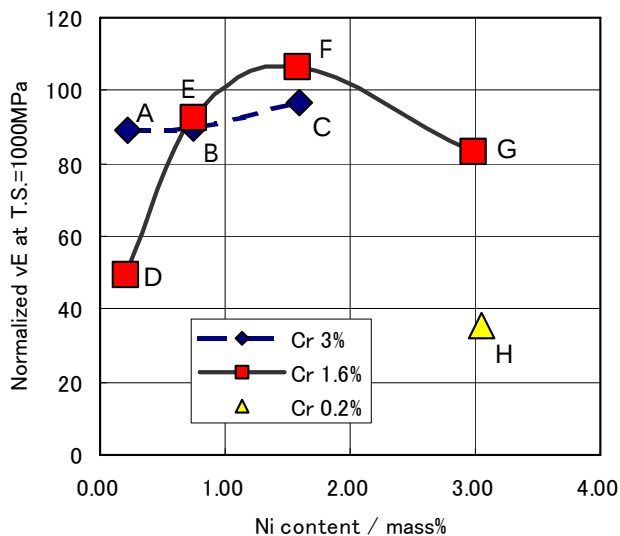


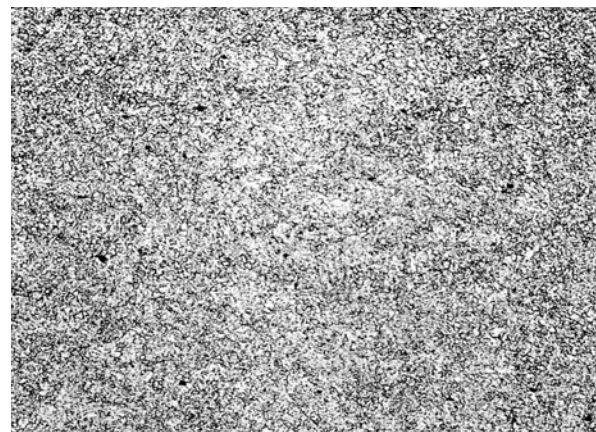
Fig. 1 規格化靱性値の Ni 量依存性

の影響は非常に大きい。0.2%Ni と 1.6%Ni の間では規格化靱性値は倍以上の改善が見られる。本研究の範囲内では 1.6%Cr、1.6%Ni で最大値を示した (Steel F)。このときの引張強度とシャルピー吸収エネルギーは焼戻し温度 600℃のとき、それぞれ 1105MPa、55J となり、現行材に比べて引張強度、靱性値ともに 10%以上向上した。この組成から更に Ni 添加量を増やすと規格化靱性値は減少する。このことから、1.6%Cr のシリーズでは Ni 添加量の最適値が存在することがわかった。

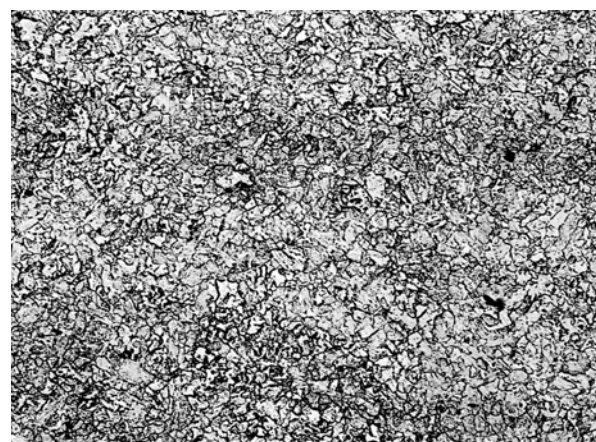
一方、Steel H(0.2%Cr)では同じ Ni 量で 1.6%Cr の Steel G に対して半分程度の規格化靱性値しかない。このことから、低 Ni 量域での Steel A(3 %Cr) と Steel D(1.6%Cr) の関係と同じく、Cr 量の増加によって靱性値が改善されていることがわかる。一般に Cr の添加は組織の微細化による強度向上への寄与があることが知られており、低 Ni 域と高 Ni 域ではこの効果が現れているものと思われる。

これに対し、Niは靱性値を向上させるのに有効である。しかしながら、同時に旧オーステナイト粒の粗大化を助長する効果のあることが報告されており³⁾、1.6%Crの靱性値がNi量の増加とともに向上した後、低下するのはNiによるこれらの二つの効果のバランスによるものと考えられる。

これらの強化メカニズムを検討するため、組織



(a)Steel E



(b)Steel H

200μm

Fig.2 旧オーステナイト結晶粒界エッチング写真

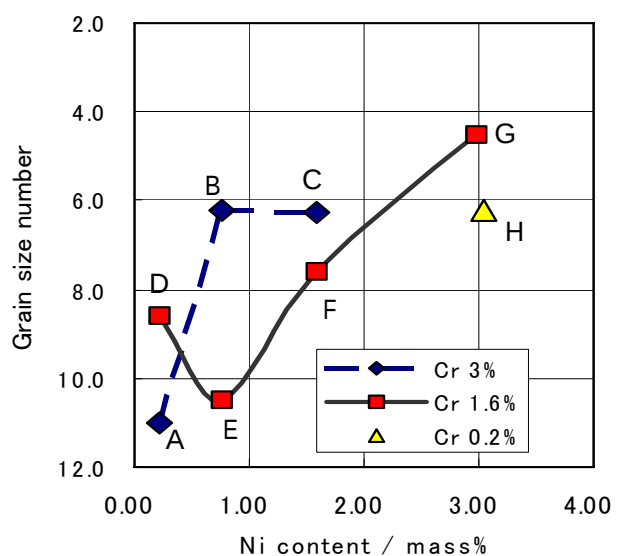


Fig.3 旧オーステナイト粒径の Ni 量依存性

観察を行った。光学顕微鏡によるマイクロ組織観察の結果、Steel H(0.2%Cr)以外はすべてベイナイトを主体とする組織で、Steel Hのみ初析フェライトに近い組織を呈していた。Fig.2 に旧オーステナイト粒を現出させた OM 観察結果の例を、Fig.3 にその結晶粒度の Ni 量依存性を示す。結晶粒度は基準視野内の観察される結晶粒の個数から算出するもので、結晶粒度が大きくなると、結晶粒径は小さ

くなる。このため、Fig.3 の縦軸は結晶粒度を逆にとっている。これらの結果から、傾向として Ni には旧オーステナイト粒を粗大化させる効果のことが確認できた。しかしながら、Fig.1 と比較すると結晶粒の大きさと靱性値の関係は結晶粒径の小さいほど破壊靱性も向上するというものではないことがわかる。このため、さらに詳細な組織の検討を行った。

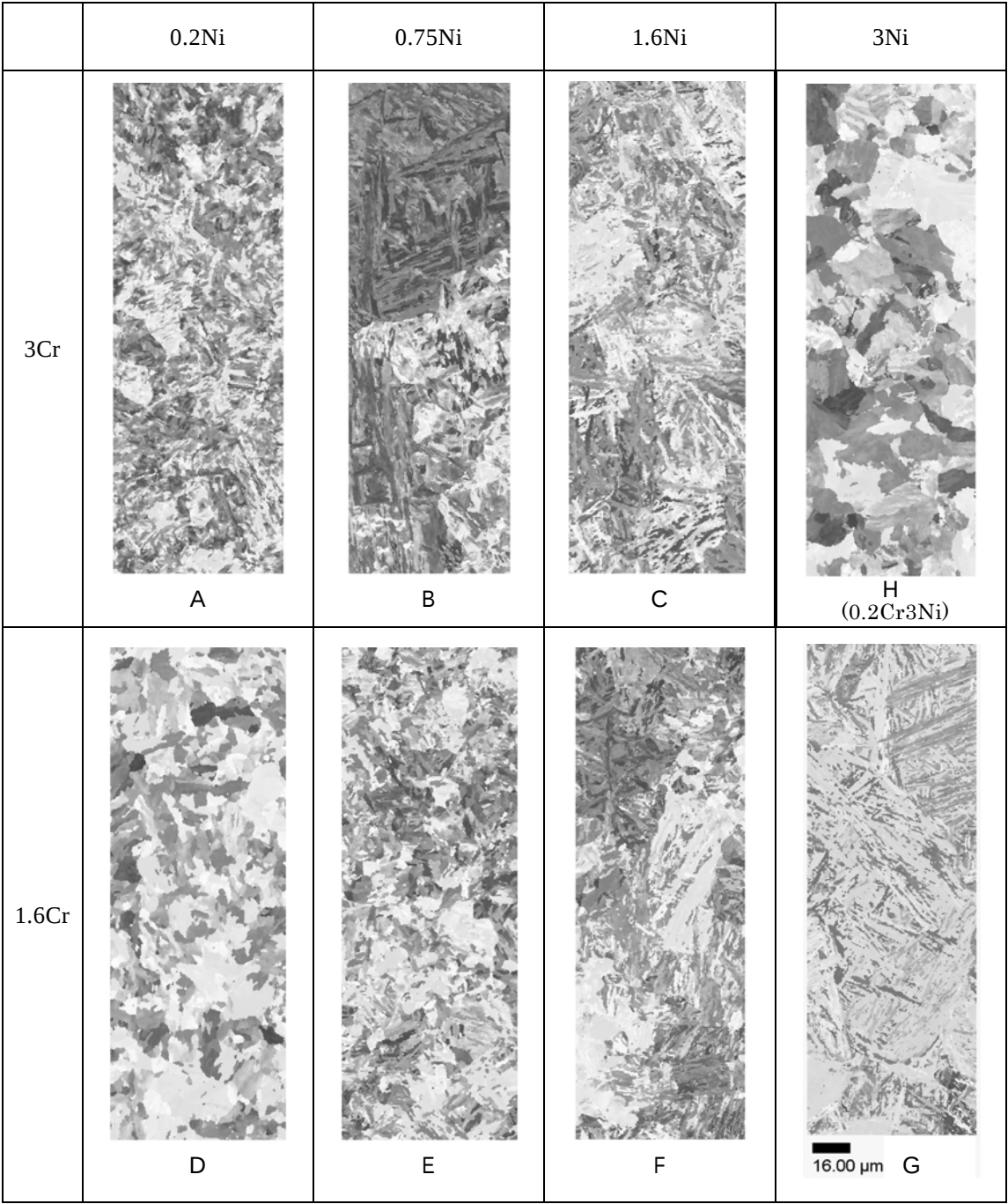


Fig.4 各試料の EBSD 解析結果

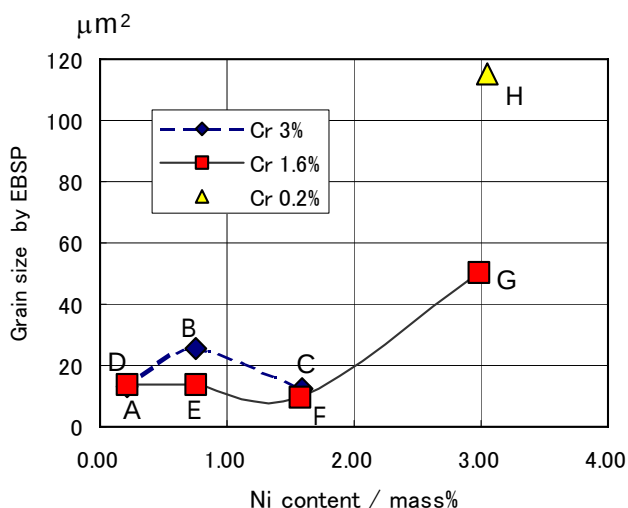


Fig.5 粒内下部組織サイズの Ni 量依存性

Fig.4 に各試料のEBSP解析結果を示す。これより、規格化靱性値が高かった試料については、旧オーステナイト粒内の下部組織（ベイナイトのポケット）が微細で、針状であることがわかる。また、Steel H以外のシリーズではNiの添加量とともに粒内の組織が粒状から針状になっていく。これに対し、規格化靱性値があまり良くなかったSteel D, G, Hのうち、D, Hの試料については下部組織が他に比べ、粗大で粒状になっている。一方、Steel Gについては、下部組織は針状であるものの、旧オーステナイト粒が粗大化していることがわかる。これらの結果を定量的に示したものがFig.5 である。EBSPでは隣接する解析点の結晶方位が 15° 以上異なると別の結晶であると識別するが、Fig.4 の各試料の解析結果から下部組織（粒内のポケット）の結晶粒サイズを面積 (μm^2) で表している。グラフより、Crの添加が組織の微細化に寄与すること、また、今回の合金組成の範囲内ではNiを3%以上添加すると下部組織の結晶粒を粗大化させることがわかる。また、Fig.1、Fig.3 およびFig.5 より、Steel GはHに比べて、旧オーステナイト粒径が大きい、下部組織のポケットサイズは約 1/2 となっている。これに対応するようにSteel Gの規格化靱性値はSteel Hに比べてほぼ倍近く向上していることから、この合金系の靱性は下部組織のポケットサイズに関係しているものと考えられる。

4. まとめ

低合金鋼の機械的特性を向上させるために、主要元素である Ni, Cr の添加量を系統的に変えて低合金鋼を試作し、材料の組織や強度特性に及ぼす Ni, Cr の影響について検討した。その結果、以下のことが明らかとなった。

- 1) 本合金系は Ni および Cr の添加量によって組織が大きく変化し、それに伴って機械的特性も変化する。
- 2) これらの影響は旧オーステナイト粒径よりもその内部のポケットサイズにより強く現れる。
- 3) Cr は組織の微細化に寄与して、合金鋼の機械的特性を向上させる。
- 4) Ni は粒内下部組織を微細化、針状化することで靱性を向上させているものと考えられる。ただし、Ni を過剰に添加することによって、旧オーステナイト結晶粒の粗大化が起こる。このため、粗大化がある程度以上進むと、内部組織に関わらず、強度特性は低下する。

本研究で行った組成範囲では 1.6Cr-1.6Ni のとき、最大値が得られた。このときの引張強度とシャルピー吸収エネルギーは、焼戻し温度 600°C で、それぞれ 1105MPa と 55J となり、現行材の機械特性に比べて 10%以上向上させることができた。

参考文献

- 1) 香川、深谷他：低合金鋼の強度に及ぼす固溶 N とその強化に及ぼす合金成分の影響、材料とプロセス、Vol.16(2003)-1535.
- 2) 深谷、藤綱他：大型鍛鋼品用低合金鋼の靱性に及ぼす Ni および Cr の影響、材料とプロセス、Vol.17(2004)-1420.
- 3) 本間：Ni-CR-Mo-V 鋼のオーステナイト結晶粒の挙動におよぼす Ni の影響、鉄と鋼、58(1972), 119-127.