

討20 オースフォーム鋼の強度と靱性

東京大学工学部
金属材料技術研究所

荒木 透
○渡辺 敏, 宮地博文

1 緒言

オースフォーム鋼の強度上昇については従来から多くの説が提唱されているが、靱性を含めた総合的な観点からその強化機構について考察した研究は少ない。本研究では^{1,2)} as quench (通常処理)ならびに as ausformの状態における両組織間の明瞭な差異を透過電子顕微鏡観察によって示し、機械的性質における特徴がこれらの差異にもとずいて矛盾なく説明できることを明らかにした。すなわち、オースフォーム鋼では as ausformの状態ではマルテンサイトマトリクス中に明瞭なセル組織が存在し、これらのセルがそれぞれ通常の独立した結晶粒と同等であるとみなすことにより、定性的にはあるが、強度の上昇、加工硬化指数 n 値の変化、伸びや絞りの挙動ならびにシャルピー衝撃靱性の向上を加工度の関数として統一的に説明することができた。

上述の強化機構においては、セル壁の強度ならびにその安定性が特に重要な役割りを演ずることになる。すでに報告されたように、オースフォームを行なうと加エオーステナイト中にセル組織が形成され、しかもその際セル壁に微細な合金炭化物が析出する。従って、セル壁の強度とその空間的な安定性はこれら析出炭化物の効果にもとづくものと考えなければならぬ。本研究ではこの点を同時に明らかにするため、炭化物形成傾向の異なるCrとNiを別々に含む鋼を溶解し、それらについてオースフォームの効果と比較した。

2 実験方法

実験に用いた試料の化学成分を表1に示す。鋼種は

表1 試料の化学成分

鋼種	C	Cr	Ni	Mo	Mn	Si	P	S	N
5Cr-1	0.17	4.87	—	2.02	0.12	0.092	0.001	0.004	0.0012
-2	0.19	4.95	—	1.89	0.17	0.086	0.001	0.004	0.0014
5Ni	0.17	—	5.27	1.97	0.10	0.084	0.001	0.003	0.0012

5Cr鋼と5Ni鋼の2種類であるが、試料の都合上5Cr鋼は2溶解とした。

原材料は電解鉄のほか、電解クロム、電解ニッケル、金属モリブデンなどを用い、高周波真空溶解炉によって7kgインゴットに鑄造した。これらのインゴットは1,100°Cで鍛造、圧延後、1,250°C×24hrの拡散焼なましを行なって素材とした。

オースフォームに際しては、あらかじめ石英管中に真空封入して1100°C×1hrオーステナイト化処理した

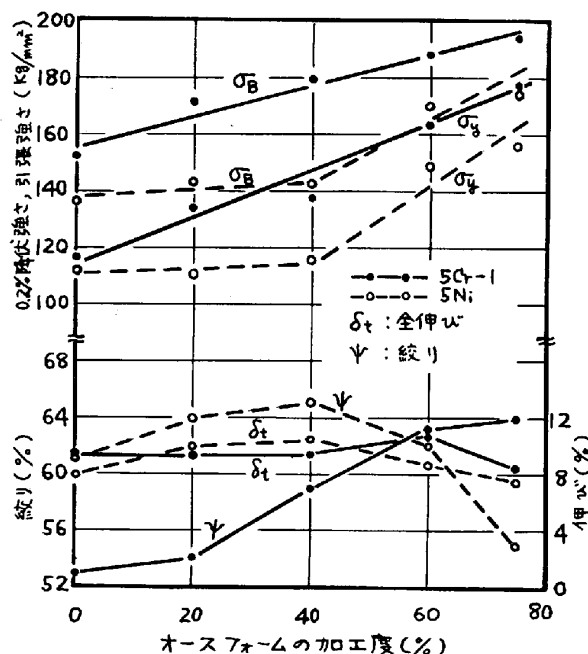


図1 5Cr-2Mo-0.2C鋼および5Ni-2Mo-0.2C鋼の引張性質に及ぼすオースフォームの加工度の影響 (600°Cでオースフォーム, 200°C×2hr焼なまし)

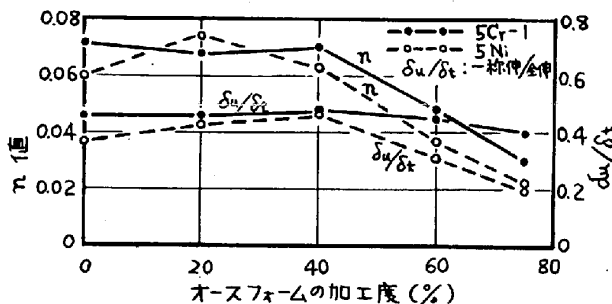


図2 5Cr-2Mo-0.2C鋼および5Ni-2Mo-0.2C鋼の加工硬化指数(n 値)と一様伸/全伸比(δ_u/δ_t)に及ぼすオースフォームの加工度の影響 (600°Cでオースフォーム, 200°C×2hr焼なまし)

素材を石英管を割って取出し、600°Cに急冷して5min保持してから加工を加えた。5Cr-1と5Niは種々の断面を有する素材から、圧延によって最終的に10mmφまでオースフォームされた。5Cr-2はシャルピー試験片を作製するために600°Cで11×11mm角に鍛造された。これらの試料はすべて200°C×1hrの焼もどしを行ない、機械加工後、水素せい性を防止するためにさらに200°C×1hrの真空焼もどしを行なった。常温引張試験は10Tonインストロン引張試験機により、ひずみ速度0.5mm/minで行なった。試験片は直径3.5mmφ、標尺距離25mmの丸棒試験片である。0~196°Cの範囲の低温引張試験も同時に行なったが、試験片の形状や焼もどしの条件は同じである。シャルピー試験片はJIS 4号Vノッチとした。

電顕観察用薄膜の作製に当り、as ausform組織を電解する際は、電解中における試料の焼もどしを避けるために電解液としてクロム酸+醋酸溶液を用い、液温8~10°Cで電解した。

3 結果と考察

5Cr-1鋼と5Ni鋼の常温引張性質とオースフォームの加工度との関係を図1に示す。降伏強さと引張強さは、5Cr鋼では加工度の増加と共に増大し、また前者は後者よりやや急速に増大する。このような結果は従来の報告と基本的に一致している。しかし5Ni鋼ではかなり異なった傾向を示し、40%までの低加工度側で明らかに強化の停滞が認められる。ただし、それ以上の加工度では5Cr鋼より急速に強化する。なお全般に5Cr鋼の強度は5Ni鋼より優れているが、このような差異は直接焼入鋼においてすでに存在しているものである。

靱性値についても両鋼間に差異が認められる。すなわち、全伸びは5Cr鋼で10%前後の値を有し、加工度の全範囲にわたって実質的な変化を示さぬが、5Ni鋼では40%以下の低加工度側で5Cr鋼よりやや優れた値を有するものの、それ以上では逆に低下の傾向が認められる。絞りの値には、さらに対照的な変化が現われている。5Cr鋼では強化に伴って絞りの値が増大し、約52%から64%まで大幅に変化する。これに対し、5Ni鋼では40%の加工度まで多少増加するけれども、それ以上では急速に減少することが分る。

さらに、オースフォーム鋼の靱性を解明する試みの一つとして、75%オースフォーム試料に対する低温引張試験を行なって直接焼入鋼の結果と比較した。5Cr鋼も5Ni鋼も、降伏強さの温度依存性は75%オースフォーム試料と直接焼入試料でほとんど差がなく、平行的に変化した。また伸びの値は、両鋼とも温度の低下によって強度が増加するにもかかわらず増加した。しかし、-196°C

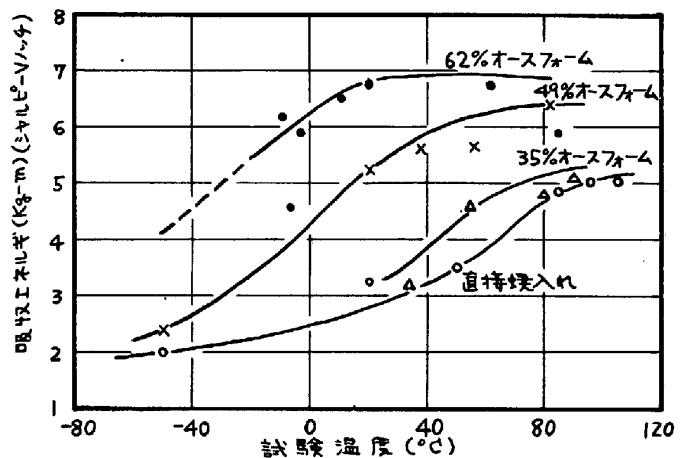


図3 600°Cでオースフォームした5Cr-2Mo-0.2C鋼のシャルピー衝撃遷移曲線(200°C×2hr焼もどし)

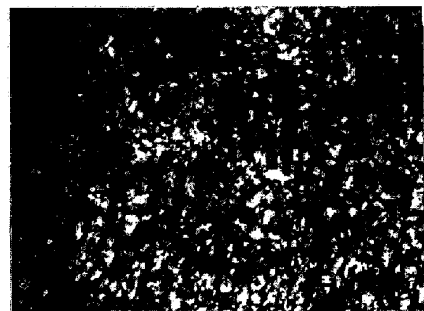


写真1 5Cr-1鋼の40% as ausform組織 X5,000

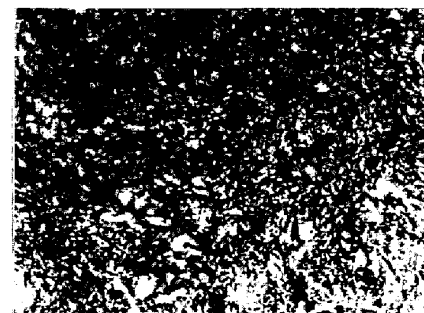


写真2 同上75% as ausform組織 X5,000

において5Cr鋼の直接焼入試料は降伏直後にせい性破断したのに対し、オースフォーム試料では良好な伸びを示した。低温における靱性は、全般に5Ni鋼の方が5Cr鋼より良好であった。

シャルピー試験は5Cr鋼についてのみ行なった。図3にその結果を示す。直接焼入鋼に比べてオースフォーム鋼は衝撃靱性が著しく向上し、遷移温度の低下は、推定ではあるが35%の加工度で約20℃、49%の加工度で約70℃、62%の加工度では実に110℃に達している。しかも、単にエネルギー曲線が低温側に移行するばかりでなく、shelf energyの値も顕著に増大している。走査電顕による破面観察において、延性破面領域ではオースフォーム鋼と直接焼入鋼の間に相違は認められないが、せい性破面領域では著しく異なっていた。すなわち、後者では各所にマルテンサイトラス(lath)に対応した大きなfacetが混在するのに対し、前者ではfacetの単位が微細でしかも複雑に入り組んでいた。

写真1に40%加工した5Cr鋼のas annealにおける透過電顕組織を示す。マトリクスはマルテンサイトで、全体的に転位密度は高くなっているが、ラスの内部に多数のセルが形成され、また場所によってはマルテンサイトの成長がセル壁によって阻止されているように見受けられる。写真2は同じく5Cr鋼の75%オースフォーム組織である。加工度の増加に伴って組織はさらに微細になり、場所によってはセル組織が識別されるが、全体的には結晶粒が微細化され、その内部においてマルテンサイト変態が起っているように見受けられる。電顕観察の結果では、やや大きなセルと微細なセルが混在している個所が多く、写真2はそれらのうちもっとも代表的な部分と考えられる組織を示したものである。また塑性流動にそって微細なセルが帯状に連なっている個所も観察された。これらの組織は直接焼入鋼の組織とは全く異なっており、強化の本質がこのようなセル構造に依存することを強く示唆している。さらにこれを裏付けるものとして、オースフォーム鋼の回折像には常に特有のリング状パターンが存在する事実を挙げる事ができる。しかもリングは加工度の増加に比例して完全さを増し、上述のセルがあたかも独立した結晶粒のようにランダム方位を有することを示していた。5Cr鋼におけるこれらの回折像を、写真3、4に示す。200℃の焼もどし後、これらのリングパターンにはやや回復の徴候が生じたが、リングとしての形状は変わらず、またそれに対応するセルサイズもオースフォームしたまゝのものに比べて特に変化は認められなかった。

以上の事実から、オースフォーム鋼に存在するセル向の方位差は冷向圧延などで生ずるものより相対的に大きな値を有し、通常の結晶粒に類似した性質を有するものと考えられる。透過電顕観察から求めたセルサイズ d_s の $1/2$ 乗と降伏強さの間には、図4に示すようにほぼ直線的な関係が存在する。この関係からHall-Petchの式における k_y 値を求めると、5Cr鋼では $1.89 \text{ kg/mm}^{3/2}$ 、5Ni鋼では $1.62 \text{ kg/mm}^{3/2}$ になる。Grange⁴⁾が低合金構造用鋼などのオーステナイト粒径について求めた k_y 値は $2.11 \text{ kg/mm}^{3/2}$ であって、5Cr鋼の値に近い。これらの数値は、5Cr鋼のセル壁が非常に強固であることを示している。一般に軟鋼などの冷向圧延によって形成されるセル壁は比較的容易に転位の通過を許すが、これはセル壁内部に引張応力場が存在するためと考えられる⁵⁾。オースフォーム鋼のセル壁は高温で形成されるために微細な炭化物を伴っ

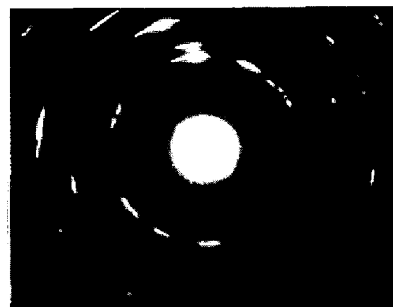


写真3 5Cr-1鋼の40% as anneal組織の回折像

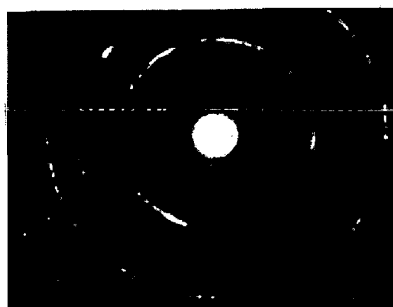


写真4 同じ75% as anneal組織の回折像

てあり、これらとの相互作用によってセル壁が安定していれば転位の通過は困難になることが期待される。しかし、図4からも明らかのように、オースフォーム鋼の強度を dsF^2 で整理することはできない。5Ni鋼の引張挙動を説明するためには、マトリクスにおける析出強化も同時に考慮する必要がある。すなわち、 k_1 値が低いことはセル壁の強度が5Cr鋼に比べて不十分であることを意味し、これはオースフォームの際にセル壁上における炭化物の形成が不十分であったことを示唆するものである。Niはフェライト中における炭素の活量係数を高め、マトリクス中での炭化物析出を促進すると考えられるので、相対的にセル壁上への析出は抑制される。図1において、低加工度側における5Ni鋼の強化に停滞が認められるのは、セル壁上への析出が極めて不完全でオースフォームの効果がほとんど現われなかったものと考えられることができる。一方40%以上の加工度で強化が急速に進行するのは、恐らくセルの形成とセル内部における析出炭化物との合成効果によるものと推定される。

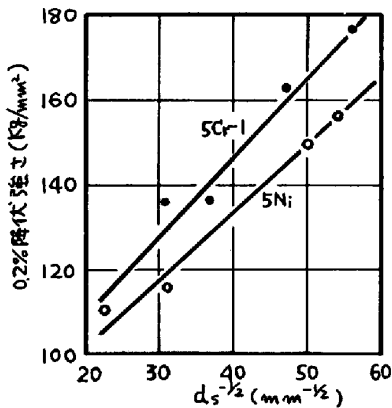


図4 セルの寸法と降伏強さの関係

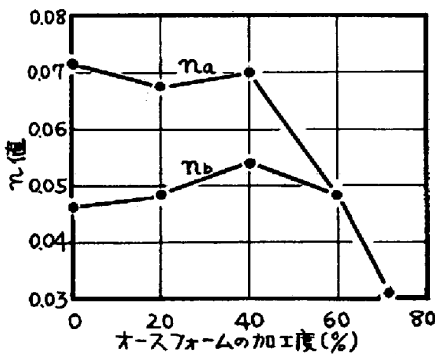


図5 5Cr-2Mo-0.2C鋼の加工硬化特性とオースフォームの加工度との関係

5Cr鋼と5Ni鋼におけるこのような強化機構の相違は、伸びや絞りの挙動に強く現われている。すなわち5Cr鋼ではセル内部における転位の移動は比較的容易であり、結晶粒微細化とほぼ同じ機構で強化される。そのため障壁に集積する転位の数は少なくなり、破断時におけるポイド形成のための応力は上昇する。これに対し、5Ni鋼ではセル内部の析出炭化物によって転位の移動が拘束されやすく、靱性の低下が生ずるものと考えられる。図1に示すような5Cr鋼の絞り値の上昇は、図3におけるエネルギー曲線の shelf energy の上昇とよく一致している。

オースフォーム鋼に存在するセルが結晶粒と同等の役割を演ずると考えられる別の根拠は、図5の結果によって与えられる。 n_a と n_b はそれぞれ引張初期段階および後期(ネッキング近傍)における加工硬化指数を表わし、図はこれらの値がオースフォームの進行に伴って一つの値になってしまうことを示している。一般に、フェライトパーライト鋼の n 値は、結晶粒径が小さい場合はlog-logプロットが直線となって一義的に定まるが、粒径が大きくなると変形後期における加工硬化性が減少していわゆる"double n"現象を示すことが知られている⁶⁾。粒径が大きいものほど変形後期において組織中にセルを形成しやすく、セル壁を構成する転位は正負の符号を併ったものが混在するため一団となって移動することは比較的容易であり、"double n"現象を示すものと考えられる。Morrisonの観察によれば、粒径の小さいものほど引張変形の際のセル形成は少なく、"single n"を示すが、図5の結果はオース

フォームによって粒径が小さくなることを示せば説明することができる。なお、結晶粒が小さくなるにつれて n 値が減少するのは、フェライトパーライト鋼では一般的に現象である。この結果を焼もどしマルテンサイト鋼に適用することは問題があるが、図5の結果は本研究における主張と一致している。

文 献

- 1) J.C. Shyne, V.F. Zackay, D.J. Schmatz: Trans. Amer. Soc. Met., 52(1960), p.346
- 2) A.J. McEvily Jr, R.H. Bush, F.W. Schaller, D.J. Schmatz: ASM Trans. Quart., 56(1963), p.153
- 3) 渡辺, 荒木, 宮地: 鉄と鋼, 55(1969), p.797
- 4) R.A. Grange: Trans. Amer. Soc. Met., 59(1966), p.26
- 5) T. Takeuchi: J. Phys. Soc. Japan, 28(1970), p.955
- 6) W.B. Morrison: Trans. Amer. Soc. Met., 59(1966), p.824