

特別講演

□学術功績賞受賞記念

超強力鋼研究の歩みに思う

河部義邦

千葉工業大学 金属工学科 非常勤講師

Yoshikuni Kawabe

Some Aspects on the Progress of Research Activities in Ultra High Strength Steels

1 はじめに

著者はこの度学術功績賞を受賞する栄誉に浴した。その対象になった私共の超強力鋼の研究¹⁻³⁾は、約四半世紀前から十数年間にわたって行われた古い仕事ではあるが、その後も引き続き考察を発展させ強度を座標軸にした各種特性の把握を自分のライフワークに課して来たので、高強度化のための組織制御を中心にすえ講演内容をまとめることとする。

私共の研究は、最初は固体燃料ロケットモーターケース用材料、次にウラン濃縮遠心分離機用材料への実用化を視点に置き、要求特性の必要性から多くの超強力鋼の中からマルエージ鋼を選定し、機械的諸性質と組織との関連性を明確にすることを基本として、その高強度化を図ることを目的として行った。なお本研究は、冶金的手法を活用して組織制御を施し、引張試験と破壊靱性試験を行い、強度、延性、靱性を同時に評価して両者の関連性を広範に検討した点に特徴があり、材料開発に破壊靱性評価を取り入れた点に先駆性があったと考えている。

2 引張試験における特異事象

引張試験によって得られる“応力-歪み曲線”は、材料の変形挙動を明確に表す指標である。その曲線の形態が、低強度材料の場合と大きく異なることを思い知らされたのが、高強度化に伴う最初の知見であった。加工硬化が小さくなり、降伏後直ちに局部変形が始まる変形挙動、すなわち特性としては降伏比が極度に高く、一様伸びが著しく小さいことである。さらに、平滑引張試験においても降伏点以下での低応力不安定破壊が容易に発生し、しかもその破面が必ずしも脆性破面を呈しないことなどである。この低応力破壊の発生は主として結晶粒の粗粒化に起因すること

を明らかにして、高強度化のための組織制御における結晶粒微細化の重要性と、絞りによる延性評価の有効性を指摘した。

3 強度-延性バランス

強度水準と組織を広範に調整した試料を用い、強度-延性バランス向上の指針を検討した。その結果、延性は組織制御の状況に応じて大きなばらつきを示すが、強度-延性バランスは組織制御により大きく改善可能な特性であること、また延性向上のための組織制御の指針としては、1)非整合な析出物の均一微細分散、2)微細な結晶粒、の両者が特に重要であることを明確にした。さらに、延性に及ぼす結晶粒径の影響を同一時効条件下で検討し、図1⁵⁾に模式図として示すように、細粒側(臨界粒径Aより細粒)では粒径に依存せず高く、中間粒径域では粗粒化に伴い低下し、粗粒側(臨界粒径Bより粗粒)では零になる、3領域に大別される延性の粒径依存性の全体像を掌握して、延性向上の

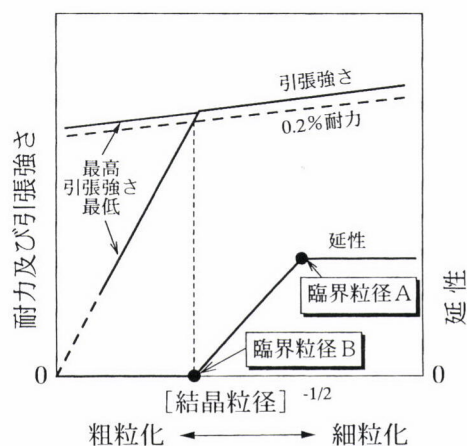


図1 一定時効条件下における強度、延性と結晶粒径との関係を示す模式図

基本指針は結晶粒微細化にあることを強調した。

図2に示すように、この強度－延性バランスの上限は強度上昇に伴いゆるやかな減少傾向を示す。しかし、通常の高熱処理を施した状態では、約3300MPa以上の強度水準から急減する。この延性の強度遷移挙動は、粒界破壊を呈する破面遷移に起因する現象であることを解明し、加工熱処理適用による結晶粒の超微細化により図中の点線に沿った黒印の關係に改善できることを実証した。その際、実現可能な強度水準と細粒化の必要性との關係を具体的に予測した。この予測は、マルエージ鋼では析出硬化により硬度を高め得る可能性は高いが、延性が零になる低応力破壊の発生により硬度に見合った強度が得られなく現象が生じ、高強度化が制限されるという考えに基づいている。図3の臨界粒径Bの直線が上記の關係を示し、低強度側では実測値が示されているが、高強度側では単に直線外挿した値である。この予測は、強度水準が上昇するほど益々細粒化する

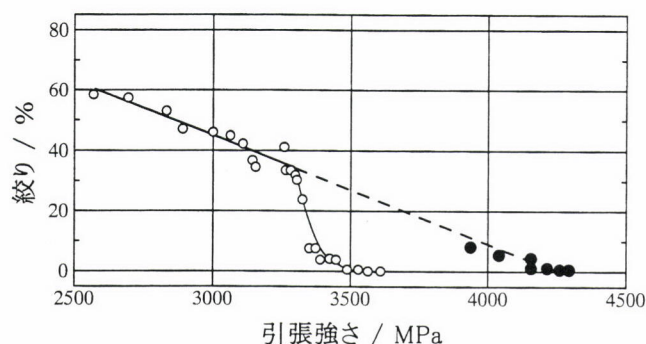


図2 マルエージ鋼における強度－延性バランスの最高値
白印：溶体化時効処理材
黒印：加工熱処理＋時効処理材

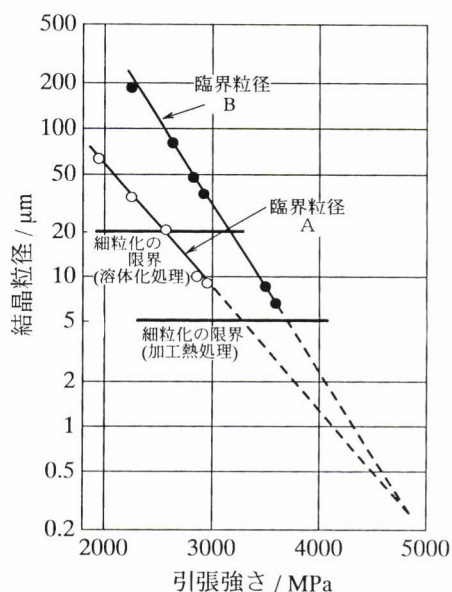


図3 マルエージ鋼における臨界粒径A、Bと強度水準との關係

組織制御が必要不可欠になることを意味し、例えば5000 MPaの引張強さを得るためには約0.2μmまでの結晶粒の細粒化が必要になる⁴⁾ことを示している。

以上のように、強度－延性バランス向上のためには結晶粒微細化が必須の条件であることを明らかにし、細粒化の目標を具体的に提示して組織制御指針の大筋を確立した。

4 強度－靱性バランス

上記のように、強度－延性バランスはめざましい向上が得られ、強度－靱性バランスも組織制御により当然改善されるはずであると考えていた。そのため、延性向上を試みた場合と同様に広範な組織制御を施し、強度－靱性バランスを評価した。その結果、破壊靱性 K_{IC} は結晶粒微細化によっては改善されないこと、また靱性の強度遷移挙動は破面遷移に起因する現象ではなく、しかもその挙動を抑制することもできないことが明確にされた。そこで、近年の強度－靱性バランスの向上推移を調べると、図4⁶⁾に示すように、60年代から70年にかけては溶解法の進展により、不純物が低減して強度－靱性バランスは大きく改善されている。この向上は強度水準の低い領域で著しい。また、この図では74年までしか示されていないが、現在も靱性の上限はほぼこの位置に留まり、強度－靱性バランスの上限はこの四半世紀ほとんど向上していないことが解った。

また、靱化機構の点からも結晶粒微細化は低強度域では一般に有効に機能するが、高強度域では無効になり、逆に有害に機能する場合が多くなることも明らかにされて来た。

上記のように、強度－靱性バランスの向上は手詰まりの状況にあり、若干の向上が得られた場合も、図4から読み

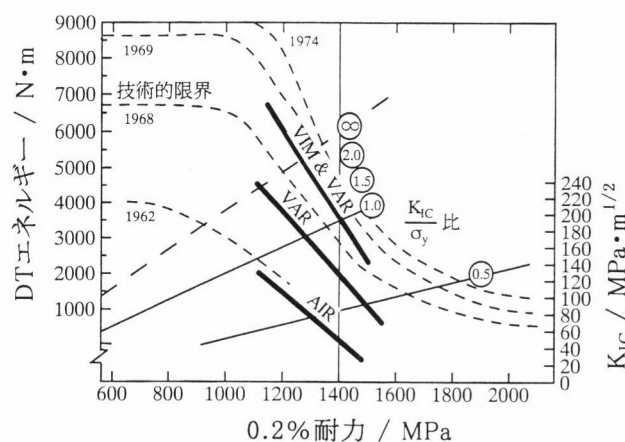


図4 鉄鋼材料における強度－靱性バランス向上の推移
DT: Dynamic tear
AIR: 大気溶解
VAR: 真空溶解
VIM&VAR: 真空二重溶解
○中の数字は K_{IC}/σ_y 比

取れるように強度遷移挙動を助長する方向での改善に過ぎない。そのため、靱性によって制限される最高使用強度もほとんど上昇していない⁵⁾のが現状である。当然、靱性向上のための組織制御指針もまだ無いと言えよう。

5 組織制御による特性向上の可能性

今まで述べたように、組織制御により強度-延性バランスは大きく改善されたのに対して、強度-靱性バランスはほとんど改善されないことが明らかにされた。組織制御は、特性向上の切り札ではあるが、当然全能ではなくその可能性には限界がある。そこで、上記の対照的な影響を手掛かりとして、その違いが何に起因するかを考察する⁵⁾。

延性の強度遷移は破面遷移に起因している。そのため、破面遷移を引き起こす要因を排除する組織制御を施すと改善される。一方、靱性の強度遷移は破面遷移に起因するのではなく、き裂先端での歪み場の局在化に起因する現象である。臨界条件下におけるき裂先端での塑性域の大きさは $A(K_{IC}/\sigma_y)^2$ (A : 定数、 K_{IC} : 破壊靱性、 σ_y : 降伏強さ) で表され、強度水準の上昇に伴い急激に減少する。そのため、靱化機構がき裂先端での塑性域内の応力緩和に期待する限りは、靱性の強度遷移挙動は避けられないとともに、組織制御のみでは対応出来ない現象でもある。したがって、その強度遷移挙動が破面遷移に起因するか否かが、組織制御が有効に機能するか否かを振り分けると考えている。

強度遷移挙動により高強度化が制限されているものとして、さらに疲労強度と遅れ破壊強度の問題がある。両者は、いずれも組織制御による対応が大変苦戦を強いられている分野である。前者は変動応力を介在とし、後者は水素元素を介在としていずれも歪みの局在化に起因する制限で、上記の靱性の場合と共通するのがあると感じている。そのため、組織制御による対応には限界があり、いわゆる組織制御以外での対応が極めて重要になる分野であると認識している。

6 わが国におけるマルエージ鋼研究の成果

わが国は、1970年代から80年代の初頭にかけて、マルエージ鋼の高強度化研究が活発に展開された国のひとつである。多くの成果が得られたが、対象とした強度水準がかなり高かったため、多くの方に注目される機会が少なかったように思える。そこで、代表例として次の3氏の成果を簡単に紹介する。

添野浩(日立製作所)⁷⁾は、高強度マルエージ鋼の組成、組

織を広範に制御し、大気中で平滑引張試験を行い、延性の歪み速度依存性を利用して遅れ破壊感受性を評価し、多くの指針を提示した。岡田康孝(住友金属)⁸⁾は、切欠引張強さにより靱性を評価し、組成、組織と強靱性との関係を系統的に明確にした。栗林一彦(宇宙研)⁹⁾は、未再結晶溶体化処理を利用した靱化処理を開発し、高強度水準化での靱性を改善した。その成果をまとめたのが、図5である。この効果は、一種の組織微細化による向上であるが、強度-靱性バランスが強度遷移を助長する方向で改善され、強度水準が高くなると改善効果が減少する、の2点は上記した著者の考察を裏付けるものとして、特に興味深いものがある。

7 おわりに一チタンに学ぶー

私共は、その後研究対象をチタン合金に変えたが、目的と手法はほとんど変わらない研究を続けてきた。その結果、マルエージ鋼の長所が鮮明に見えるようになると共に、その長所の認識を通して鉄鋼材料の可能性を具体的に掌握できるようになって来たと感じている。チタン合金と対比させる立場からマルエージ鋼の長所を指摘すると、次の諸点が上げられる。

- 1) マルテンサイト変態を利用した析出強化のための基質調整能力の高さ
- 2) 析出物の均一微細分散による高い析出強化能力
- 3) 金属間化合物の有効利用
- 4) 細粒化組織制御の広い有効性

これらの長所は、鉄鋼のみを対象としている限りには、当然のこととして受け止めていたものに過ぎない。しかし、チタン合金の研究において、析出物を微細均一に分散させることの困難さ、金属間化合物の析出による著しい脆化、

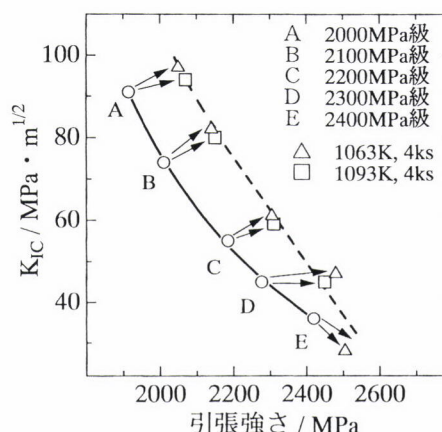


図5 マルエージ鋼における引張強さと破壊靱性との関係
丸印: 通常溶体化処理材の関係
→: 未再結晶溶体化処理による変化を示す

一般に細粒化による靱性劣化、などに触れると、上記の様な事柄は当然なことではなく鉄をベースとする合金での長所であることに気づかされた。その反面、鉄鋼の欠点も実感され、比重が大きいことは高比強度材料としては著しく不利であることを重く受け止めてもいる。

最後に、高比強度材料の高度化に長年関心を持ち続けた一員として、高強度化研究全般を対象に次の4点を強調して、本稿を終わりたい。

- 1) 最近の高強度化は、すべて阻害因子による限界への挑戦という性格のものであることを認識する。
- 2) 過去の推移を、データの価値を重視して学ぶ。
- 3) 限界があるという感覚を大切にすること。
- 4) 上記を踏まえて、限界を乗り越える方策を模索すること。

引用文献

- 1) 河部義邦, 中澤興三, 萩原益夫, 宗木政一, 津谷和男: 超強力材料に関する研究, 金属材料技術研究所研究報告集, 2 (1981), 138.
- 2) 河部義邦, 藤田充苗, 中澤興三, 萩原益夫, 宗木政一, 高橋順次, 深町正利, 稲垣道夫, 入江宏定, 福富勝夫: 超強力鋼の開発に関する研究, 金属材料技術研究所研究報告集, 5 (1984), 42.
- 3) 河部義邦, 藤田充苗, 萩原益夫, 宗木政一, 高橋順次, 中澤興三, 貝沼紀夫, 入江宏定, 深町正利, 福富勝夫: 超強力合金の強靱性向上に関する研究, 金属材料技術研究所研究報告集, 8 (1987), 65.
- 4) 河部義邦: 鉄と鋼, 68 (1982), 2595.
- 5) 河部義邦: 鉄鋼の高強度化と信頼性向上, 日本鉄鋼協会 材料の組織と特性部会鉄鋼の高強度化研究会編, (1997), 132.
- 6) S. T. Rolf and J. M. Barsom: Fracture and Fatigue Control in Structure, Prentice-Hall, (1977), 407.
- 7) 添野 浩, 田口和夫: 鉄と鋼, 66 (1980), 677.
- 8) 岡田康孝, 邦武立郎: 鉄と鋼, 67 (1981), 791.
- 9) 安野拓也, 栗林一彦, 堀内 良, 大塚正久: 鉄と鋼, 77 (1991), 1725.

(1999年6月21日受付)