



受賞技術-14

ナノ炭化物制御による 自動車用高加工性新高強度鋼板の開発

Development of New High Strength Sheet Steel by Controlling Nanometer-sized Carbides with Excellent Press Formability for Automobile Use

船川義正

JFEスチール (株) スチール研究所
研究企画部 主任部員

Yoshimasa Funakawa

1 はじめに

走行時に排出されるCO₂量削減を目的とした自動車シャシー部品の高強度薄肉化は、プレス加工の難しさより主として440MPa～590MPa級までにとどまっておられ自動車の車体軽量化の課題となっている。従来鋼の組織設計を踏襲しながら加工性を維持したまま高強度化することが試みられてきたが、望まれる780MPa級の高強度と加工性とを実現するには至っていなかった。そこで、シャシー部品の高強度化を推し進めるため従来の組織設計から脱却し、新たな組織設計として加工性の富んだ鋼の組織フェライトを超微細炭化物で強化することで、伸びフランジ加工に優れた780MPa級高強度熱延鋼板を開発した。

従来鋼の組織設計では、加工性を担う軟質なフェライトとマルテンサイトおよびベイナイトのような硬質相とを複合することで高強度化が図られてきた。この複合組織を有する鋼板では高強度化に対して硬質相体積を増やさなければならず、フェライト/硬質相界面の面積の増加が避けられない。このため、フェライト/硬質相界面からの破壊で加工性の決まる加工法においては、高強度化に対して加工性を維持するには限界が生じていた。そこで、破壊の基点となるフェライト/硬質相界面を無くすため、フェライトそのものを強化することに着想した。フェライトの強化には大きさ約3nmの均一な炭化物を微細分散する技術を開発し、440MPa級鋼板と同等の加工性を維持したまま780MPa級への高強度化を達成した。技術課題は微細炭化物の微細析出と成長抑制であったが、これを相界面析出現象の初めての工業利用と過去に例のない炭化物 (Ti, Mo) Cを用いることで実現した。

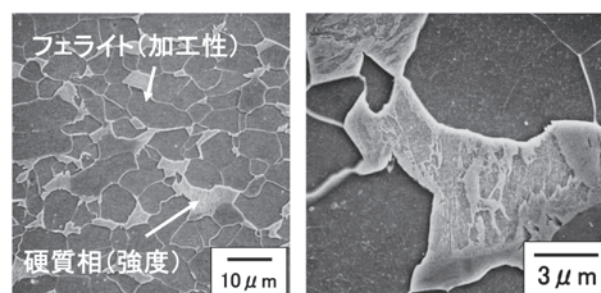
本稿では、このナノ炭化物制御による自動車用新高強度鋼板について述べる。

2 自動車用高強度鋼板の従来の組織設計思想と伸びフランジ加工性

かつて鋳造品や板厚の厚い熱延鋼板が主として用いられていたシャシー部品には、現在では引張強さ440～590MPa級の熱延鋼板が主に用いられている。そして、近年のCO₂排出量削減量厳格化により、現在ではさらなる軽量化が指向されるようになり、780MPa級熱延鋼板のシャシー部品への適用が検討されるようになってきた。

この自動車のシャシー部品には、厳しい伸びフランジ加工が行われる。伸びフランジ加工とは剪断で引きちぎられたブランク (プレス形成しやすいように剪断で打ち抜いた板) の縁を伸ばす加工を指し、剪断時の鋼板マイクロ組織中での空隙 (ボイド) 発生抑制が伸びフランジ加工性向上のポイント¹⁾となる。

一方、従来の自動車シャシー部品用高強度熱延鋼板では図1のように加工性を担うフェライトと強度を担う硬質相との複合組織 (大きき数ミクロンの組織の混合) 化で強度が高められてきた^{2,3)}。すなわち、強度は硬質相の分率の増加で調整



(a) 従来鋼組織

(b) 硬質相拡大

図1 従来鋼の複合組織

される。フェライトと数ミクロンの大きさの硬質相との混合を主とする従来鋼の組織設計では、ブランクを打ち抜いた時に変形しにくい硬質相と変形しやすいフェライトとの間に歪みが集中して、図2に示すように硬質相の周囲で優先的に破壊が進行する⁴⁾。すなわち、この複合組織鋼板では剪断でブランクを作製する際にフェライトと硬質相の界面から破壊が起こりやすい。打ち抜いた時点で硬質相の周囲にボイドが発生しているため、打ち抜きに引き続き行われる伸びフランジ加工ではこのボイドが容易に成長や合体を繰り返し、板厚を貫通する大きな亀裂に発展する。

上述のメカニズムにより780MPa級の引張強さを得るために硬質相の分率を増加させると、この硬質相分率の増加が打ち抜き時のフェライトと硬質相界面でのボイドの発生頻度を著しく高めてしまうため、440MPa級鋼板と比べて伸びフランジ加工性が急激に低下する。

3 開発鋼の組織設計思想とキー技術

前章において述べた伸びフランジ性の低下を回避しつつ780MPa級への高強度化を達成するため、フェライト組織そのものを高強度化する技術を探索し、超微細炭化物をフェライト中に分散することでフェライト組織そのものを高強度化することに成功した。この新たな組織設計思想の元でフェライト中への炭化物の超微細分散技術をもって開発された開発鋼⁵⁾は、440MPa級と同等の伸びフランジ加工性を維持しながら780MPa級の強度を実現した。

(1) 開発鋼の組織設計思想

フェライト粒中の転位が炭化物によりピン止めされることで、高強度が発現される。転位をピン止めする炭化物の平均

間隔が狭いほど強力に転位がピン止めされる。すなわち、鋼中の炭化物体積率が一定であれば、フェライト中の炭化物が微細なほどフェライトは高強度化できる。図3に、体積率一定の条件で計算したフェライト中の炭化物径と析出強化量($\Delta\sigma$)⁶⁾の模式図を示す。ここでは、降伏比を0.9と仮定して引張強さを見積もった。また、Pickeringの式⁷⁾より計算した地鉄強度、固溶強化量、結晶粒微細化強化量をベースとして、析出強化量を変化させた場合について示している。炭化物径が微細になると析出強化量が急激に上昇し、鋼は効率的に高強度化される。図3より見積もった場合、780MPa級の引張強さを得るには大きさ3nmの超微細炭化物径を実現する必要がある。従来鋼中に析出するTiCの大きさは約20～30nmであることが知られていることから、目標は従来鋼中のTiCの1/10の大きさであり、析出強化量も従来鋼の3倍にも及ぶことになる。

以上より、新組織設計における克服すべき技術課題は、炭化物の微細析出と成長の抑制であることが明らかとなった。

(2) 炭化物の微細分散技術

熱間圧延工程のスラブ加熱でオーステナイトに溶解した炭化物は、圧延後の冷却段階でオーステナイトから変態したフェライト中に析出する。変態したフェライト中に過飽和に溶解している炭化物が時効析出する場合、炭化物の核生成時間に分散が生じるため、先に析出した炭化物が成長しやすい。また、析出位置の制御ができない。そこで、開発に際して析出物の微細分散方法として相界面析出現象に着目した。相界面析出では図4に示すように移動しているオーステナイト-フェライト界面に炭化物が生成するため、析出するタイミングを界面の移動で律することができる。そして、低温で相界面析出させることで炭化物を微細化することができる。こ

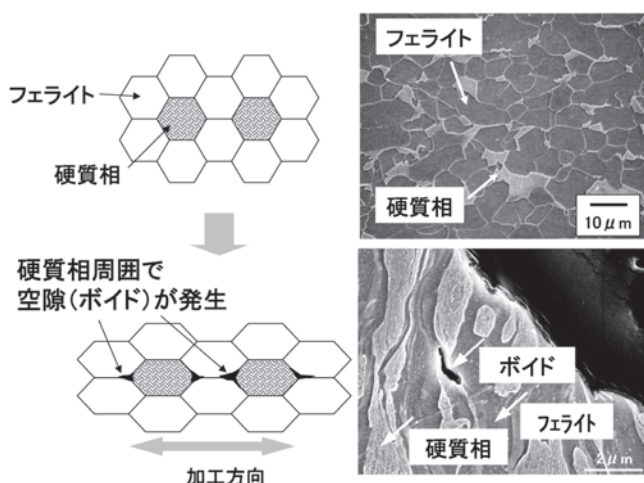


図2 加工時の硬質相周りのボイド発生

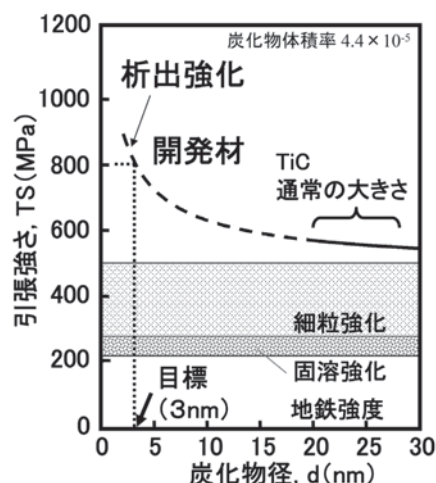


図3 炭化物径と鋼板強度

の相界面析出の利用で均一な大きさの超微細炭化物を鋼中に均一に分散することに成功した。相界面析出では、図5のような列状の特異な炭化物分散が観察される⁵⁾。相界面析出は古くより知られていた⁸⁻¹¹⁾が、工業的利用はなされておらず本開発が相界面析出現象の初めての工業利用となる。

(3) 微細炭化物粗大化防止技術

本開発では、比較的高強度を得やすいとされるTiの炭化物を活用することとした。しかしながら、炭化物は鋼中に存在する炭化物構成元素の量が多いほど粗大化しやすい。このため、炭化物析出後のフェライト中の固溶Ti量を低減することでTiC粗大化を抑制することに着想した。このフェライト中の固溶Ti量低減のためMoを添加し、(Ti, Mo)Cを析出させることに成功した。この(Ti, Mo)Cを用いることで、粗大化しにくい微細炭化物を実現した。フェライト中に(Ti, Mo)Cを微細分散させた加工用高強度鋼板について前例はない。TiCと(Ti, Mo)Cの粗大化しやすさを実験結果で示す。

図6に実験室においてTiCおよび(Ti, Mo)Cをそれぞれ600℃で微細析出させた鋼を作製し、析出温度よりも高い

650℃で加熱した時の硬さ変化と24時間保持後の炭化物の透過型電子顕微鏡写真を示す。TiCは保持時間に対して急激に硬さが低下(炭化物粗大化)するのにに対し開発鋼の(Ti, Mo)Cは650℃での24時間の加熱に対しても硬さは維持された。これは、炭化物が加熱に対して極めて安定であることを示している¹²⁾。

(4) 開発鋼の加工性

開発鋼の加工性を引張試験と穴抜き試験で評価した結果を図7に示す。開発鋼は、従来の組織設計で製造された組織強化鋼と比べて優れた伸びフランジ加工性を示すことが示された。

(5) さらに高強度化

開発鋼の組織設計思想では、炭化物量を増加させることでフェライトをさらに高強度化することが可能であり、980MPa級と1180MPa級の強度を得ることができる。

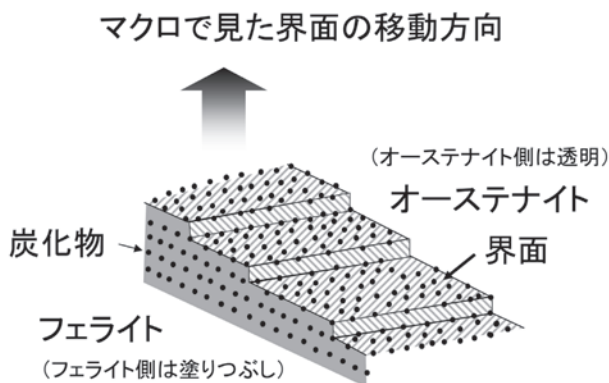


図4 相界面析出の模式図

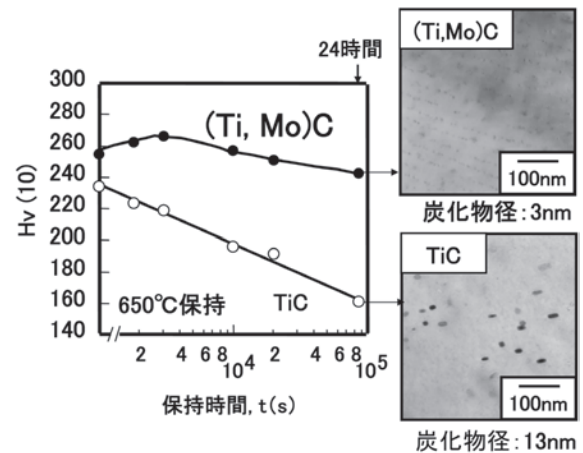


図6 650℃保持時間と硬さの変化および保持後の炭化物の透過型電子顕微鏡写真

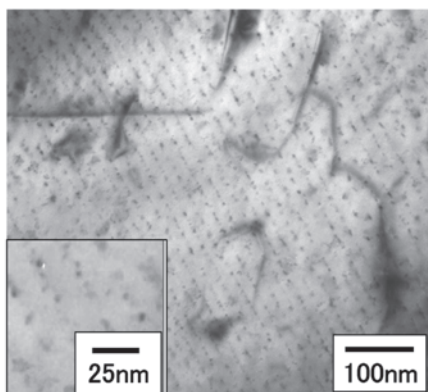


図5 開発鋼の超微細炭化物

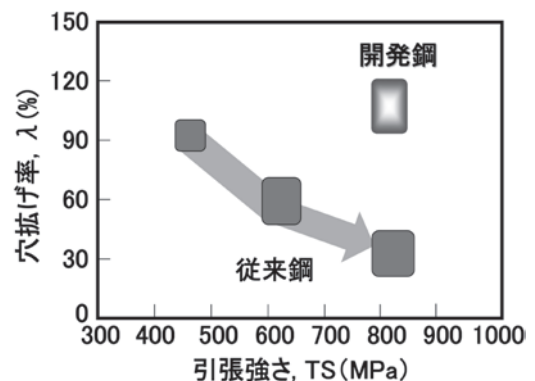


図7 開発鋼の伸びフランジ加工性

4 おわりに

従来の組織設計にとらわれず大胆に新たな理想組織を考えて、これを実現することで従来にない加工性を有する高強度熱延鋼板の開発に成功した。本稿は自動車に適用されることで、車体重量の軽量化を通じてCO₂削減に寄与している。

本鋼の開発で示した新たな思想や新たな価値観の創造こそが現在の日本の物づくりに必要であると感じるとともに、過去にとらわれない開発が今後数多く日本より発信できることを祈って、まとめの言葉としたい。

参考文献

- 1) H.Kimura, T.Ogura, M.Kinoshita, T.Okita and K.Osawa : SAE THECHNICAL PAPER, 930283.
- 2) A.P.Coldren and G.Tither : J.Metals, April, (1978) , 6.
- 3) 栗原孝雄, 逢坂忍, 岩瀬耕二, 大沢紘一 : 鉄と鋼, 68 (1982) , 9, 1270.
- 4) K.Hasegawa, K.Kawamura, T.Urabe and Y.Hosoya : ISIJ Int., 44 (2004) , 3, 603.
- 5) Y.Funakawa, T.Shiozaki, K.Tomita, T.Yamamoto and E.Maeda : ISIJ Int., 44 (2004) , 11, 1945.
- 6) T.Gladman, D.Dulieu and I.D.McIvor : Proc. of Symp. on Microalloying'75, Union Carbide Corp., New York, (1976) , 32.
- 7) F.B.Pickering : Physical Metakurgy and The Design of Steels, APPLIED SCIENCE PUBLISHERS LTD., London, (1978) , 63.
- 8) W.B.Morrison : J. Iron Steel Inst., 201 (1963) , 317.
- 9) M.Krochynsky and H.Stuart : Proc. of Symp. On Low Alloy High Strength Steels, The Metallurgy Companies, Dusseldorf, (1970) , 17.
- 10) A.T.Davenport and R.W.K.Honeycombe : Proc Roy. Soc. (London) , 322 (1971) , 191.
- 11) F.G.Berry and R.B.G.Yeo : Trans. ASM, 61 (1968) , 255.
- 12) 船川義正, 瀬戸一洋 : 鉄と鋼, 93 (2007) , 49.

(2012年6月26日受付)