



特集記事・10

構造用金属材料の新たな挑戦
ヘテロ構造制御に基づく新指導原理構築

幅拘束大圧下制御圧延による易成形高強度 バイモーダル薄鋼板の製造基盤研究

Fundamental Investigation in Manufacturing Formable High-strength Steel Strips with Bimodal Microstructure by Width-restricted Heavy-reduction Controlled Rolling Process

東京大学 生産技術研究所
教授

柳本 潤
Jun Yanagimoto

東京大学大学院
大学院生

朴 亨原
Hyung-Won Park

1 はじめに

熱間薄板圧延は、要求される寸法、要求される材質を持った製品を、高い生産性のもとで製造することを目的としており、鉄鋼材料製造での基幹技術の一つに位置づけられる。高寸法精度、高生産性であることは依然として重要であるが、材質あるいは機械的特性の造り込み・造り分けが重要度を増し続けていることが、最近の趨勢である。材質については、鉄鋼構造体の軽量化を実現するための薄板製品の高強度化が最重要視されている。一方、超軽量鉄鋼構造体の実現には成形加工が不可欠である。薄板製品の成形性は、張出し性、深絞り性、穴広げ性、といった指標で評価される。深絞り性には r 値が、穴広げ性には局部伸びが影響するが、張出し性を含めた成形性全般には加工硬化指数 n 、すなわち均一伸びの影響が大きいことが知られている^{1,2)}。

結晶粒微細化³⁾、析出制御²⁾や複層化⁴⁾など、高強度化あるいは強度延性バランスの向上を目指した、次世代高強度鋼板(AHSS)の研究は数多く行われている。これらに共通するのが、元素戦略的観点で重要なLow Alloyed Steelの積極的な利用である。しかしながら、結晶粒径分布の積極的な活用による高強度鋼板については、研究されていない状況であった。以後本稿では、結晶ヘテロ構造であるバイモーダル(Bimodal)組織を活用した易成形高強度薄板の製造基盤研究について、筆者らが着想に至った経緯と若干の研究成果を紹介する。

2 バイモーダル組織形成のための 幅拘束大圧下制御圧延

1970年代より実用化された厚板圧延における制御圧延では、再結晶域での圧延と未再結晶域での圧延、制御冷却とを

組み合わせ、結晶粒径により支配される種々の機械的特性の制御を行う。図1は制御圧延の加工-温度履歴であり、図中の②③④が制御圧延に該当する⁵⁾。工業的な利用を考えた場合、相変態ルート⁶⁾、ならびに微量添加マイクロアロイ(Nb, V等)を利用する従来型の制御圧延は合理的なプロセスであると考えられ、筆者らが研究対象としている圧延プロセスは、従来型の制御圧延プロセスを基本としている。薄板熱間圧延を対象としたスーパーメタルフェーズIIにおいて、変態点直上で強加工を与え変態核を多く含む高転位密度組織からの変態が微細化を促進することは、熱間加工シミュレータ試験(後述する高ひずみ速度付与試験設備を利用した試験)により実証されており⁷⁾、延性の付与が次なる課題であることが筆頭著者の意識として残っていた。

筆頭著者はほぼ同時期に、科学研究費にて、1パス強加工を利用した結晶粒微細化を狙い、ガラス潤滑による鋼(S20C)の熱間押出し(丸断面ビレットから丸棒への押出し)を行った。この研究の過程で、二相域に相当する温度にビレットを

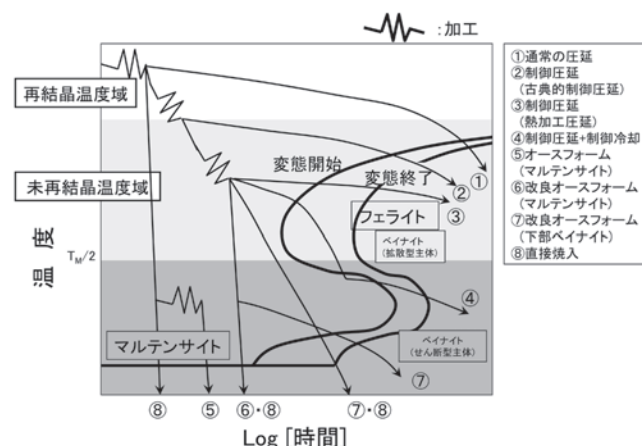


図1 種々の加工-温度履歴(模式図)

加熱し押しを行った場合には、押し後の延性が顕著に改善されることを見出した。図2は加工温度が700℃、800℃の押し材と焼鈍材との応力-ひずみ曲線の比較結果である⁸⁾。図3～図5にEBSP解析結果を示す。結晶構造は、800℃押し材では微細均一組織、600℃では展伸組織であるが、延性が顕著に改善された700℃では、微細な組織中に超微細な結晶粒が分散したヘテロ組織となっている。なおこれらの図中の温度は高周波誘導加熱炉中のビレット温度を示している。押し中は加工発熱の影響により材料温度が上昇するため、ビレット温度(押し温度)700℃の場合には押し中のS20Cが変態点近傍である800℃程度の状態にあると考えられる。

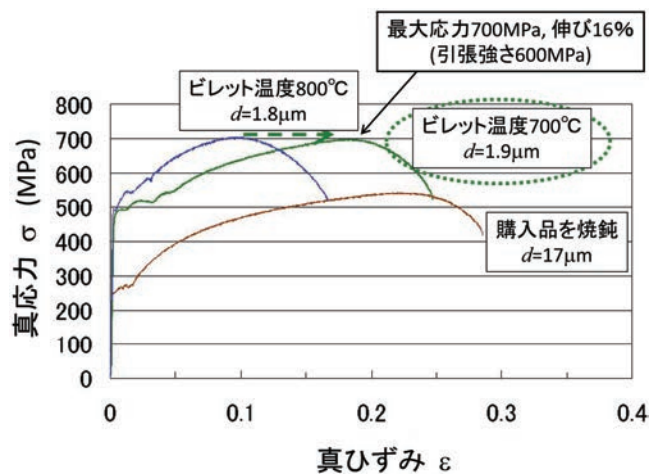


図2 応力ひずみ線図(ビレット温度700℃、800℃と焼鈍材)

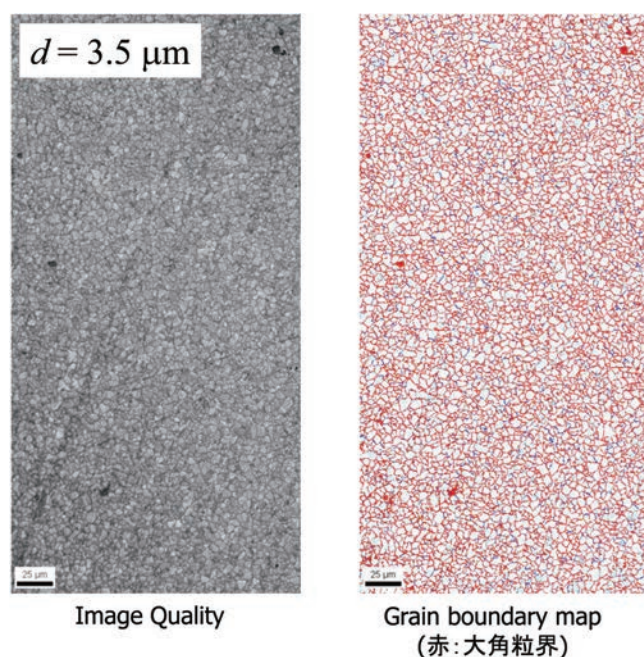


図3 EBSDによる結晶画像解析結果(ビレット温度800℃)

図4に示されているヘテロな組織は、Wangらが純銅の加工～焼鈍により得た高延性バイモーダル組織⁹⁾に類似であり、高強度を維持したままの高延性はこのヘテロ構造であるバイモーダル組織であるとの推測が成り立つ。この考えに基づき立ち上げたのが本研究である。研究を新たに立ち上げるに当たり、1) ガラス潤滑熱間押しよりはるかに生産性が優れた熱間圧延を利用すること、2) 薄板の製造を試みること、3) 薄板熱間圧延を熱間押しと類似の1パス強加工プロセスで実現するための新プロセスを開発すること、を計画した。さらに、4) バイモーダル組織が優れた特性を示す理由の探求、5) バイモーダル薄銅板を製造するための製造条件についての指導原理の探求、等のタスクが追加されているのが本

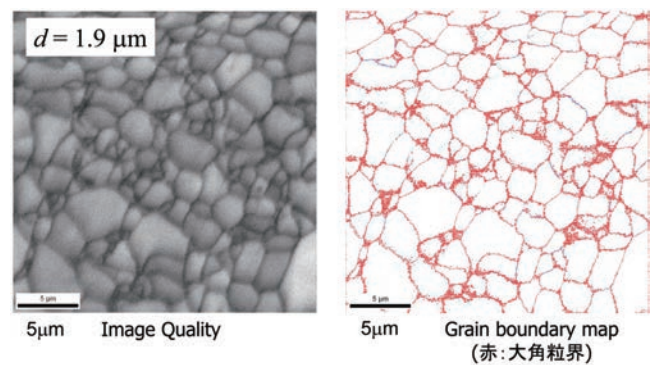


図4 EBSDによる結晶画像解析結果(ビレット温度700℃)

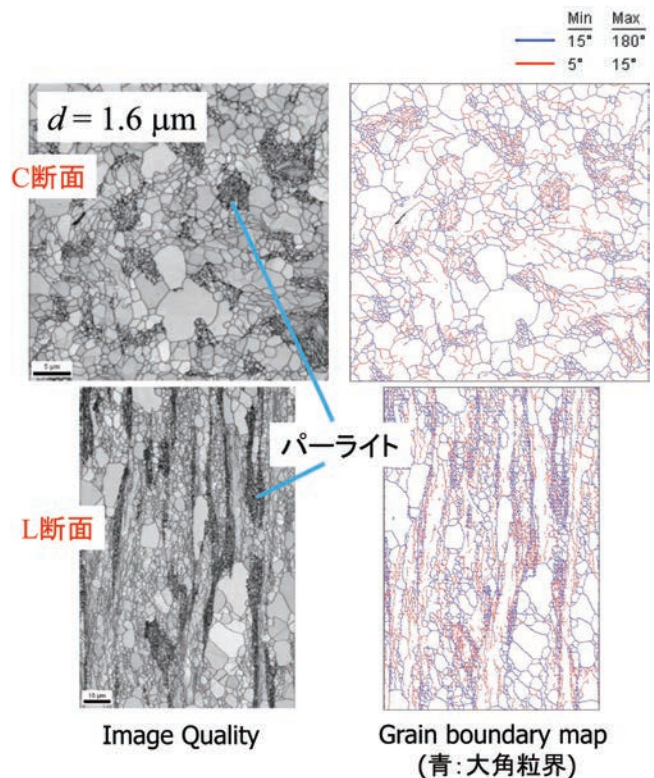


図5 EBSDによる結晶画像解析結果(ビレット温度600℃)

研究の全体像である。図6に研究の全体像を模式的に示す。

3 幅拘束大圧下制御圧延機

圧延および塑性加工、これらを含む機械加工を中心とした生産加工技術は、製品や機能を具現化するための手段である¹⁰⁾。具現化するための手段の重要性に異論を挟む余地は少ないが、大学や公的機関においては、手段の開発である生産加工技術そのものには大きな公的資金支援は期待できない。幸いにして、結晶ヘテロ構造であるバイモーダル組織を活用した易成形高強度薄板の製造については、この製品機能を具現化するために圧延機製作が不可欠であったため、圧延機的设计製作がプロジェクトに含まれている。図7は、幅拘束大圧下圧延機の模式図である。バイモーダル組織の形成は、二相域・未再結晶域・低温再結晶域圧延で起こる部分再結晶と変態速度の上昇が関わっていると想像できるので、この温度域を狙った大圧下圧延を熱間押し出しに近い幅方向の変形を拘束した状態で行うことを狙いとして、圧延試験を行う計画にしている。

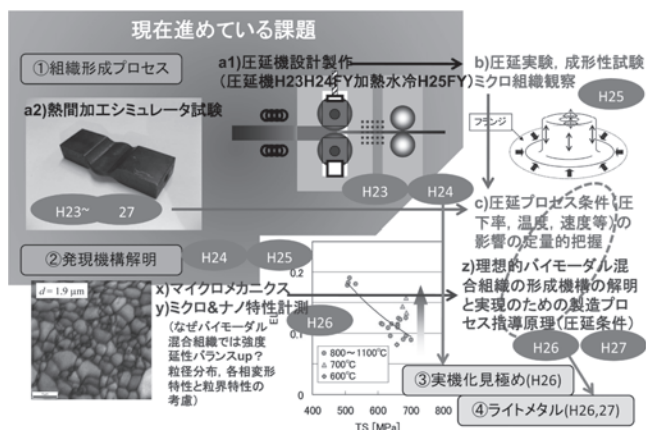


図6 研究の全体像 (模式図)

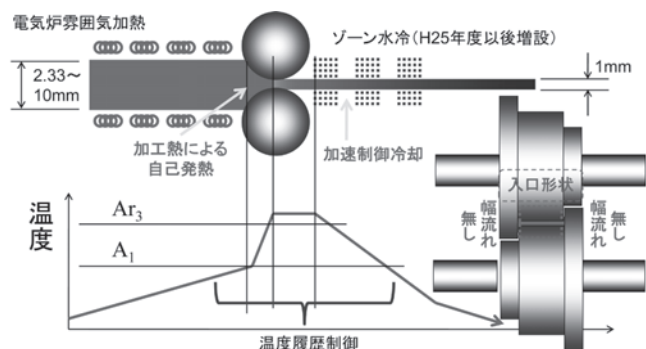


図7 幅拘束大圧下制御圧延

4 変態温度近傍での大圧下圧延を模擬した熱間圧縮試験によるC-Si-Mn鋼の内部組織変化と機械的特性の変化

図6に示した研究計画に記されている通り、最初の2年度は、熱間加工シミュレータによる圧縮試験で大圧下圧延を模擬することで、結晶ヘテロ構造であるバイモーダル組織が形成される条件を探求することが主な研究内容である。ここでは、図8に示した高ひずみ速度付与試験設備¹¹⁾を利用して試験を実施している。本試験設備では、動的荷重100kN、ラム速度は最大4m/sでの3段階圧縮試験が可能である。

供試材としては市販材S20Cを利用し、70%の1パス圧縮後の内部組織および機械的特性について調査を行った。図9は加工温度850℃、圧下率70%、加工速度10mm/s、加工後ミスト冷却20~30℃/sの条件で平面ひずみ圧縮された試料の内部組織である。組織は等軸で、粒径はナノ・サブミクロンサイズで不均一なヘテロ分布を示し、二つの結晶粒サイズ(700nm、1.4μm)を2つの極大値とするバイモーダル分布を示している。図10は平面ひずみ圧縮により製作された試料の引張試験結果を示す。800℃までの場合には、引張強度は150~200MPa程度上昇しつつも、均一伸びは4%程と低く、As received状態での市販材の均一伸びと変わらない。それにひきかえ加工温度850℃の試料の均一伸びは7%程となり、高強度を維持しながら延性が2倍程度に増加した。この試験を通して、1パス加工でバイモーダル組織を構成し、高強度・高延性を持つ鉄鋼材料を創製する可能性が確認できた。

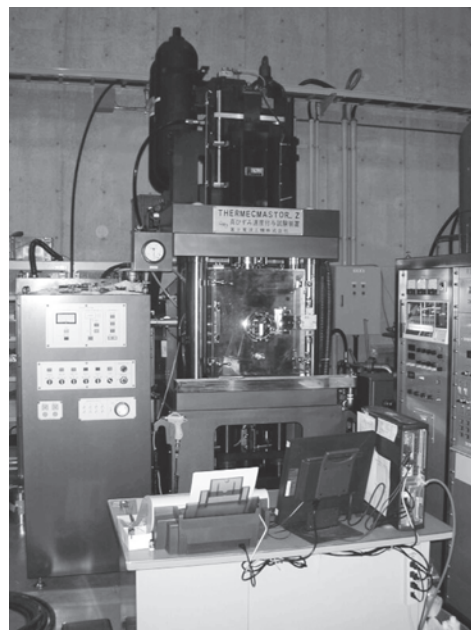


図8 高ひずみ速度付与試験設備

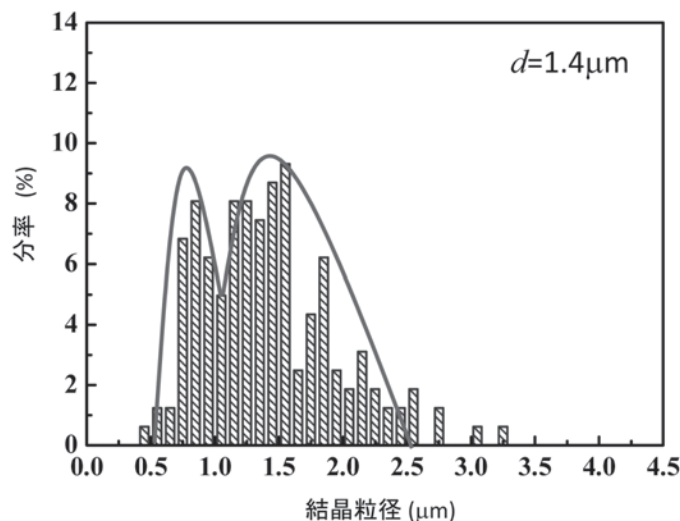
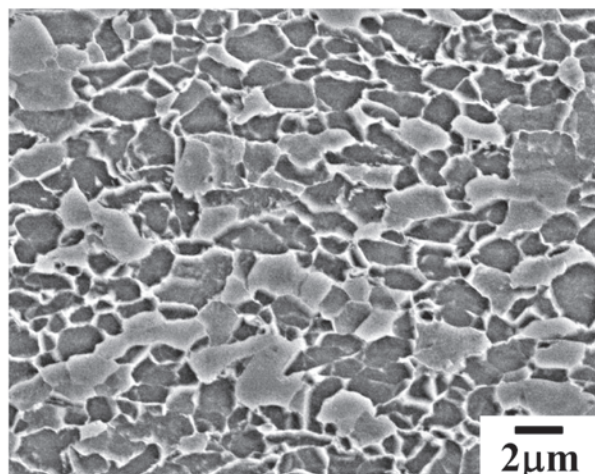
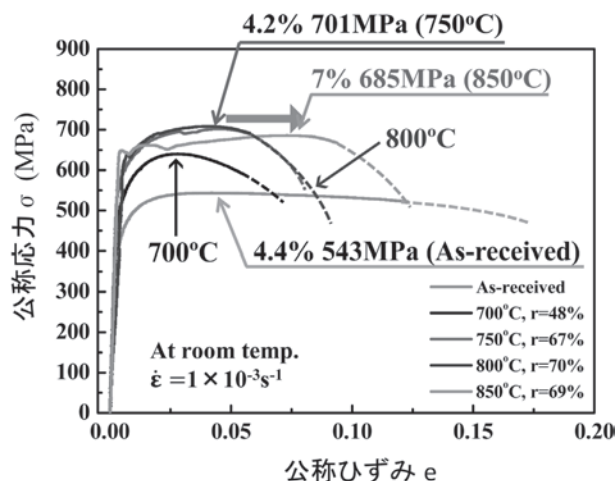
図9 結晶画像と粒径分布 (850℃圧縮、平均結晶粒径 $1.4\mu\text{m}$)

図10 圧縮試験後試験片の強度と伸び

5 まとめ

筆者らが実施している結晶ヘテロ構造であるバイモーダル (Bimodal) 組織を活用した易成形高強度薄板の製造基盤研究について、着想に行った経緯、研究計画のあらまし、および今までに得られている結果の一部を示した。

結果は今後論文等にて発表していきたい。またこの研究が、鉄鋼材料を代表とする構造材料の製造基盤研究として、技術の進展に少しでも貢献できることを目指し、今後も研究を進めていきたいと考えている。

参考文献

- 1) 林央：塑性と加工，38 (1997) 436, 441.
- 2) 野中俊樹，後藤貢一，谷口裕一，山崎一正：新日鉄技報，378 (2003)，12.
- 3) N.Tsuji, Y.Saito, S.H.Lee and Y.Minamino Y：Adv. Eng. Mater. 5 (2003) 5, 338.
- 4) 小関敏彦，井上純哉，鈴木俊夫，長井寿，谷口裕一：金属 80 (2010) 4, 3.
- 5) 日本塑性加工学会編：塑性加工便覧，コロナ社，(2006)，61.
- 6) 鳥塚史郎：ふえらむ，10 (2005) 3, 188.
- 7) J.Yanagimoto, Y.Kobayashi and A.Yanagida：Steel Res. Int., 78 (2007) 10/11, 812.
- 8) K.Nagato, S.Sugiyama, A.Yanagida and J.Yanagimoto：Mater. Sci. Eng. A, 476 (2008)，376.
- 9) Y.M.Wang, M.W.Chen, F.H.Zhou and E.Ma：Nature, 419 (2002)，912.
- 10) R.Kopp：塑性と加工，42 (2001) 491, 1178.
- 11) A.Yanagida, M.Ikeda, H.Komine and J.Yanagimoto：ISIJ Int., 52 (2012) 4, 574.

(2012年8月28日受付)