

学 位 論 文 題 名

冷延鋼板の深絞り性向上に関する研究

学位論文内容の要旨

鉄鋼製品の10%をしめる冷間圧延（冷延）鋼板は、自動車産業発展に伴い品質特性および製造技術の両面で著しい進歩を遂げた。自動車の大量生産に向けた高品質鋼板の安定供給，設計の自由度を高めるためのプレス成形性向上，安全性や車体軽量化に適した高強度高靱性鋼種の新開発などのニーズに対応するため，鉄鋼各社は炉外精錬技術や連続焼鈍技術を新たに生みだし，これを用いて高品質の軟質冷延鋼板や高張力冷延鋼板の開発を行ってきた。主として自動車ボディに使われる冷延鋼板の最も重要な品質特性はプレス成形性である。プレス成形性は深絞り性，張り出し性，伸びフランジ性，曲げ性などの諸材質特性，表面潤滑性などからなる総合性状であるが，このうち特に材料の深絞り性が基本的な成形特性であると考えられている。したがって，最近20年間における冷延鋼板製造技術に関する研究の力点は深絞り性の向上に注がれてきたといっても過言ではない。

本研究は冷延鋼板の深絞り性に影響をおよぼす諸因子のうち，特に添加元素に注目し，侵入型溶質元素であるCと置換型溶質元素であるMn，Cr，P，Siの組み合わせを変えてその効果を検討した。すなわち，自動車ボディの成形に適した深絞り性を有する軟質冷延鋼板については，実工程の箱焼鈍および連続焼鈍をシミュレートした加熱速度で冷延加工材の再結晶焼鈍を行い深絞り性試験と金属学的考察から基礎的検討を加えるとともに，結果の製造技術への応用を図った。また，自動車の安全性や軽量化に対処するための高張力冷延鋼板については，良好なプレス成形性を実現するための深絞り性や他の機械的特性に関する基礎的知見とあわせ，連続焼鈍工程にマッチしたマイクロ組織の制御方法について金属学的に検討した。本論文は以下のようにまとめられる。

第1章は，本研究の背景をなす冷延鋼板開発の歴史，自動車用冷延鋼板に要求される諸特性および製造技術について概括した。そして，本研究が主要目的とする，深絞り性に優れた冷延鋼板製造のための工学研究の意義について論述した。

第2章は，冷延鋼板の基本合金元素であるCとMnについて，冷延－焼鈍後の深絞り性を，ランクホード値と呼ばれる塑性異方性比(r 値)と金属学的因子である再結晶集合組織で評価し，

その添加効果について調べた。まず、低炭素鋼および極低炭素鋼に Mn を0.03~0.80%添加した後、湿 H_2 中で脱炭処理を行いC濃度を0.001~0.10%の間で5段階に調整し、微細パーライトから粗大セメントイトまで、さまざまな炭化物形態を有する鋼をつくる。これを一定圧延率で冷延したのち、箱焼鈍および連続焼鈍を模擬した加熱速度で再結晶化焼鈍を行った。深絞り性は調質圧延後に引張試験を行い、圧延方向に対し 0° 、 45° 、 90° の3方向に対する r 値の加重平均値（平均 r 値）で評価した。低炭素冷延鋼板の深絞り性はMnの増加とともに、また、一定Mn濃度ではCの増加とともに著しく低下した。すなわち、 r 値はCとMn両元素が固溶かつ共存下で低下すること、そして低下傾向は極低C濃度域で顕著になることが明らかとなった。一方、X線積分反射強度で評価した再結晶組織の集合度は、 r 値に対応してC、Mnの固溶共存下で低下し再結晶組織がランダム化した。すなわち、Mnの回復抑制効果が減退し、回復・再結晶過程における再結晶核の方位選択性が小さくなったためにランダム化が進行した。このとき、固溶Cはフェライト中で固溶Mnとなんらかの相互作用（C-Mn相互作用）を有し、このため、再結晶集合組織のランダム化→鋼板圧延面における $\{111\}$ 面の発達抑制→ r 値低下、にいたったものと考えられた。以上より、冷延鋼板の深絞り性を高める方策として、①鋼中S量などを考慮に入れてCとMnの添加バランスを設計し、②CとMnの固溶量を適度に保持すべく冷延前の炭化物形態を加工、熱処理により制御し、かつ、③冷延後の焼鈍温度と加熱速度を最適化することにより、回復・再結晶時のC-Mn相互作用を抑制することが重要であることを明らかにした。

第3章は、第2章で侵入型溶質元素Cと置換型溶質元素Mn間の相互作用が冷延鋼板の深絞り性に重大な影響をおよぼすことが明らかになったことから、Mn以外の置換型溶質元素であるCr、Si、PとCの組み合わせがどのように深絞り性に影響をおよぼすかについて同様な手法により実験した。

CrはMn以上に回復過程の抑制効果がある。再結晶に際して $\{111\}$ 面方位の選択的核発生が顕在化する結果、Cr添加により r 値が高く維持される。しかし、固溶Cが共存するとMnと同様な相互作用が生じ、冷延鋼板の深絞り性が急激に低下する。SiとPの場合は、冷延鋼板の深絞り性への影響は小さく、Cとの相互作用も見られない。また、PはC-Mn相互作用を軽減するように働く。以上の実験事実は、同じ置換型溶質元素でもMn、CrなどCと親和力の大きい炭化物形成型の元素は相互作用を有し、黒鉛安定化型のSiやPは相互作用しないことを示唆している。そして、C-Mn相互作用やC-Cr相互作用は回復・再結晶時に再結晶集合組織のランダム化を促進し、 $\{111\}$ 集合組織の発達を阻害する、として体系的に考察できた。相互作用の金属学的メカニズムは回復・再結晶時に形成されると推定される置換型溶質原子（M）と侵入型溶質原子（I）のMI-dipoleまたはMI-complexと考えられ、これが回復時に転位の上昇運動

を拘束し、再結晶挙動を変化させるものと推測された。dipole が転位の運動を阻害する効果を検証するため、再結晶温度付近の500℃で引張強度を測定した結果、Cを固溶させた場合は著しく強度が増加した。これは間接的ながら C-Mn dipole の存在を証明するものである。

これらの成果を基に、深絞り性に優れた軟質および高張力冷延鋼板を製造するための溶質成分設計の指針が得られた。

第4章では、前章までに得られた、冷延鋼板の深絞り性および再結晶集合組織に影響する、①溶質成分、②冷延前のフェライトおよび炭化物組織、③焼鈍条件など製造工程上の要因、に関する基礎的知見を製造技術に適用し、箱焼鈍法および連続焼鈍法で深絞り性に優れた自動車用冷延鋼板を製造するための開発研究についてのべた。

箱焼鈍法による軟質冷延鋼板および高張力冷延鋼板の製造においては、前者ではCとMnの深絞り性改善効果、後者ではSi、Mn、Pなどの深絞り性と強度の改善効果を考慮した溶質成分の設計とそれにマッチした熱処理プログラムを開発した。一方、連続焼鈍法では急速加熱が特徴であり、圧延加工工程との組み合わせが重要である。すなわち、軟質冷延鋼板の製造においては、急速加熱焼鈍下でC-Mn相互作用が小さくなるように成分を調整した鋼について、熱延および巻取り条件を最適化して炭化物組織の制御をはかり深絞り性を向上させた。また、高張力冷延鋼板の製造では、連続焼鈍水焼入れ法を新しく開発した。すなわち、焼鈍後の水焼入れ条件を種々変化させてミクロ組織と機械的性質の制御に関する基礎的な検討を行い、これに基づき、引張強さ35～150kg f/mm²の広い強度範囲の種々の鋼板について、深絞り性、高延性低降伏比など優れたプレス成形性と強度を有する製品の製造方法の開発を行った。自動車用鋼板は、最近これら連続焼鈍法による製品へと移行し、自動車の性能向上に寄与している。

第5章は、本論文で得られた結果を要約し、総括したものである。

学位論文審査の要旨

主査	教授	石井邦宜
副査	教授	成田敏夫
副査	教授	高橋平七郎

主として自動車ボディに使われる冷延鋼板の最も重要な品質特性はプレス成形性である。プレス成形性は深絞り性、張り出し性、伸びフランジ性、曲げ性などの諸材質特性、表面潤滑性など、

からなる総合性状であるが、このうち特に材料の深絞り性が基本的な成形特性であると考えられている。

本研究は冷延鋼板の深絞り性に影響をおよぼす諸因子のうち、特に添加元素に注目し、侵入型溶質元素であるCと置換型溶質元素であるMn, Cr, P, Siの組み合わせを変えてその効果を検討した。すなわち、実工程の箱焼鈍法および連続焼鈍法を模擬した加熱速度で冷延加工材の熱処理を行い、深絞り性試験と金属学的考察から基礎的検討を加えるとともに、結果を製造技術へ応用した。本論文の成果は以下のようにまとめられる。

第1章は、本研究の背景をなす冷延鋼板開発の歴史、自動車用冷延鋼板に要求される諸特性および製造技術について論述した。

第2章は、冷延鋼板の基本合金元素であるCとMnについて、その添加効果を塑性異方性比（ r 値）と再結晶集合組織で評価した。

まず、低炭素鋼および極低炭素鋼にMnを添加した後、C濃度を調整して、微細パーライトから粗大セメントイトまで、さまざまな炭化物形態を有する鋼をつくった。これを一定圧延率で冷延したのち、箱焼鈍および連続焼鈍を模擬した加熱速度で再結晶化焼鈍を行った。深絞り性は調質圧延後に r 値を測定して比較した。低炭素冷延鋼板の深絞り性はMnの増加とともに、また、一定Mn濃度ではCの増加とともに著しく低下した。すなわち、 r 値はCとMn両元素が固溶かつ共存下で低下すること、その低下傾向は極低C濃度域で顕著になることを明らかにした。一方、X線積分反射強度としてもとめた再結晶組織の集合度もC, Mnの固溶共存下で低下した。すなわち、Mnの回復抑制効果が減退し、回復・再結晶過程における再結晶核の方位選択性が小さくなったためにランダム化が進行したものと考えられた。このとき、固溶Cはフェライト中で固溶Mnとなんらかの相互作用（C-Mn相互作用）を有し、このため、再結晶集合組織のランダム化→鋼板圧延面における{111}面の発達抑制→ r 値低下、に至ったものと推測された。

第3章では、Mn以外の置換型溶質元素であるCr, Si, PとCの組み合わせがどのように深絞り性に影響をおよぼすかについて検討した。

CrはMn以上に回復過程の抑制効果があり、再結晶に際して{111}面方位の選択的核発生が顕在化する結果、Cr添加により r 値が高く維持される。しかし、固溶Cが共存するとMnと同様な相互作用が生じ、冷延鋼板の深絞り性が急激に低下した。SiとPの場合は、深絞り性への影響は小さく、Cとの相互作用も見られない。また、PはC-Mn相互作用を軽減するように働く。以上の実験事実は、同じ置換型溶質元素でも、Mn, CrなどCと親和力の大きい炭化物形成型の元素は相互作用を有し、黒鉛安定化型のSiやPは相互作用しないことを示唆している。

C-Mn相互作用の金属学的メカニズムは、回復・再結晶時に形成される置換型溶質原子（M）

と侵入型溶質原子（I）の MI-dipole, または MI-complex と考えられ, これが回復時に転位の上昇運動を拘束し, 再結晶挙動を変化させるものと推測された。

第4章では, 冷延鋼板の深絞り性および再結晶集合組織に影響する, ①溶質成分, ②冷延前のフェライトおよび炭化物組織, に関する基礎的知見を製造技術に適用し, 箱焼鈍法および連続焼鈍法で深絞り性に優れた自動車用冷延鋼板を製造するための開発研究についてのべた。

箱焼鈍法による軟質冷延鋼板および高張力冷延鋼板の製造においては, 前者ではCとMnの深絞り性改善効果, 後者ではSi, Mn, Pなどの深絞り性と強度の改善効果を考慮して溶質成分の設計を行うと同時に, その成分に適合した熱処理プログラムを開発した。

一方, 連続焼鈍法では急速加熱が特徴であり, 圧延加工工程との組み合わせが重要である。すなわち, 軟質冷延鋼板の製造においては, 熱延および巻取り条件を最適化して炭化物組織の制御をはかり深絞り性を向上させた。また, 高張力冷延鋼板の製造では, 連続焼鈍水焼入れ法を新しく開発し, 引張強さ $35\sim 150\text{ kg f/mm}^2$ の広い強度範囲の種々の鋼板について, 深絞り性, 高延性, 低降伏比など優れたプレス成形性を有する製品の製造方法を確立した。

第5章は, 本論文で得られた結果を要約し, 総括したものである。

これを要するに, 本論文は, 冷延鋼板の深絞り性向上に関して金属組織学的検討を加え, 高いプレス成形性を有する冷延鋼板の製造法を確立したものであり, 鉄鋼材料製造学の進歩に寄与するところ大である。よって著者は, 博士（工学）の学位を授与される資格あるものと認める。