

本論文は、自動車用ハイテンをはじめとする薄板難圧延材の熱間圧延を容易にし、あるいは熱間圧延の次工程である冷間圧延を容易にするための、熱間圧延プロセスにおける製造技術の適正化について論じたものであり、全五章よりなる。

第一章は緒論であり、本研究のコンセプトについて述べた。

まず、本研究の背景は以下の通りである。自動車の燃費の改善のための車体軽量化、衝突安全性向上のため、近年ますます高強度かつ薄肉の鋼板である薄板ハイテンが採用されるようになってきている。薄板ハイテンは、初期の固溶強化型や析出強化型の鋼板にはじまり、1980年代に二層組織（DP）鋼や低合金型変態誘起超塑性（TRIP）鋼に代表される複合組織型の高強度鋼板が日本で開発・実用化され、その強度もますます高い物が実用化されてきており、1470MPaを超える強度クラスのものも採用されるようになってきている。これらのハイテンは、高強度であるがゆえに、その製造工程である圧延加工時においても加工負荷が大きく、その量産化のためには、製造プロセス中の各工程においてさまざまな課題を解決する必要がある。薄板製造工程の各設備の製造条件の適正化はもちろんの事、製造プロセス全体を考慮して製造負荷の低減や製造条件ばらつきの低減策を検討する必要があることは言うまでもない。

本論文では、それらの数多くの課題のうち、特に熱間圧延工程に関わる課題とその解決策について取り上げた。

第二章では、薄板ハイテン用熱延鋼板の硬度変動による冷間圧延時の板厚変動を低減するため、冷延鋼板向けの中間製品である熱延鋼板の圧延特性を調査し、熱延完了後の冷却履歴も考慮して、適正な熱延鋼板強度分布を実現できる熱間圧延技術を検討した。

対象品種として、980-1180MPa級冷延鋼板 0.17C-1.3Si-2.0Mn (mass%)を選定した。Si, Mnを含有する本鋼種は、熱延後 550°C以上の高温で巻き取ると、特にコイル中心において粒界酸化が生じ、巻き取り後 550°C以上の温度で保持される時間が長いほど、粒界酸化層は厚くなる。そのため、500~550°Cの適切な温度で巻き取られるが、この温度で熱延コイルを巻き取ると、放冷によるコイルの冷却速度の差異により、冷却速度の大きいコイル外周・板幅方向端部に相当する部位の熱延鋼板硬度が著しく上昇する結果、熱延コイル外周部分の冷間圧延負荷を高め、板厚精度に影響を及ぼす。

そこで、熱延コイル巻き取後の温度履歴を考慮して、以下の2つの温度履歴改善策を考案し、実機試作によって効果を確認した。

まず1つめの温度履歴改善策は、熱延コイルを高温域で巻き取ってフェライト変態を促し、変態完了後速やかに水冷することで、熱延鋼板をコイル全長にわたって軟質化するとともに、スケール-地鉄界面の粒界酸化層厚みを高温巻き取後放冷する条件と比較して低減することができる。こうして得られた熱延板は、コイル全長に渡って均一な冷間圧延変形抵抗を有し、熱延コイル外周部を冷間圧延する際の板厚精度も従来条件より改善され、冷延後の鋼板の長さ方向の板厚ばらつきが半減した。

また、2つめの温度履歴改善策は、先尾端の巻き取り温度を、巻き取り後の冷却速度を考慮して定常部より高くすることで、先尾端・板幅方向端部の熱延鋼板強度上昇を低減することができる。コイル先尾端は中間部よりコイル状態での冷却速度が速いことから、コイル先尾端のみ巻き取り温度を高めた部位に、有害な粒界酸化を生じない条件が存在し、こうして得られた熱延板は、熱延コイル外周部を冷間圧延する際の板

厚精度も従来条件より改善され、冷延後の鋼板の長さ方向の板厚ばらつきが半減した。

実機試作した熱延コイル冷却時のコイル各部位の温度履歴を差分によるシミュレーションにより推定し、当該鋼種の CCT 線図と比較した。結果、熱延コイル冷却過程での温度履歴によって熱延コイル各部位の熱延板強度、および粒界酸化層厚みを説明できることが分かった。また、巻取温度の長手方向のばらつきの、冷却後の熱延鋼板強度への影響が小さいことも説明できた。

このように、980-1180MPa 級冷延鋼板 0.17C-1.3Si-2.0Mn (mass%) について、冷間圧延性の良好な熱延鋼板の製造技術を見出すことが出来た。

第三章では、仕上圧延における板クラウン制御能力を拡大する際、クラウン制御の障害となった、熱間仕上圧延中の鋼板の穴あき現象の発生メカニズムを解明し、穴あき防止策を検討した。

熱延仕上圧延時に、特定スタンドにて板クラウンを大幅に低減する条件で圧延をおこなうと、圧延材尾端のが前スタンドを抜け、後方張力が失われた状態で圧延材の板幅方向中央部に穴があく場合がある。穴あきが発生すると圧延ロールにダメージを与えるためロールを交換する必要がある、圧延作業の大きな障害となる。また、穴あき発生時には水・蒸気が圧延機入側方向に噴出する現象が見られ、水の存在が穴の発生に影響すると考えられた。

そこで、小型圧延機による圧延実験を実施し、穴あき発生要件を確認した。ロール冷却水量、圧延材板クラウン比率減少量、圧延速度を変更した穴あき再現実験を行った結果、穴あきは、ロール水量大、圧延材板クラウン比率減少量大、圧延速度大という 3 条件が揃った場合に発生することが分かった。この穴あきは圧延材形状が中伸傾向の際に発生するにもかかわらず、引張破断で生じる。また、穴あきが発生したと同条件で噛み止め実験を行った結果、ロールバイト入側で材料が余って座屈し、大きなくぼみが生じていることが確認できた。

この波形状部分に水がたまり、局所的な摩擦係数の低下、もしくは材料の温度低下が穴あきに関与すると考えられた。

このときの応力状態を検討するため、FORGE3D®による変形シミュレーションを実施した。その結果、①摩擦係数の低下のみでは圧延方向の引張応力は生じない、②温度の局所的な変化による変形抵抗の変化を考慮するとロールバイト入口近傍に圧延方向の引張り応力場が形成される、ことが確認できた。

したがって穴あき発生メカニズムは次の通りと考えられる。ロール水量大、圧延材板クラウン比率減少量大、圧延速度大の 3 条件が揃うと、ロールバイト入側板幅中央部の材料が座屈して波が生じて波形状部分に水がたまる。その水がロールバイトと圧延材との間に閉じ込められて材料の表面温度を低下させ、材料表面の降伏応力を高める。その結果、ロールバイト入口近傍の予変形領域の板表面に引張応力場を生じ、ロールバイト入側の引張応力場において材料表面にクラックが生じると、圧延によってクラックが進展して材料の板幅方向中央部分に穴があく。

このような発生メカニズムを明らかにしたことで、穴あきを防止するには圧延材入側形状の悪化を防止することが重要であることが明確となった。得られた知見から、加古川製鉄所熱延工場の仕上圧延機の前段スタンドである F1、F2 スタンドを WRS ミルに改造し、圧延材が厚く座屈が生じにくい条件での板クラウン制御性能を拡大することで、良好な板クラウンおよび板形状制御が可能となった。

その結果、軟鋼と高強度鋼を同一ロールを用いて自在に圧延できる技術を確立することができた。

第四章では、軟鋼からハイテンまで荷重レンジの広い材料を同一熱延チャンスで安定して圧延できるよ

うにするため、従来の、評価関数等により一義的に各スタンドの板厚パススケジュールを決定する仕組みとは異なるアプローチとして、オペレータが適切な仕上圧延パススケジュール、および板クラウンスケジュールを選択できるオペレータ支援システムを構築し、その効果を評価した。

仕上圧延板厚パススケジュール、および板クラウンスケジュールは圧下オペレータが手介入により調整しているが、実際のオペレータ介入を解析した結果、オペレータは熱間タンDEM圧延機のスタンド間形状が良好となるよう目視により形状を確認しながら圧下調整作業を行う結果、ある適正な範囲に実際の設定範囲が収まっていることが分かった。

この知見に基づき、本システムでは、熱延仕上圧延 7 スタンドの圧下スケジュールを、板厚と荷重の関係であるパスパターンとして視覚的に提示し、かつ過去実績のばらつき範囲を合わせて表示する。その際、パスパターンと WR ベンダ設定の過去実績のばらつき範囲は、圧延サイズ、圧延温度および圧延時の WR の状態等の圧延条件が類似しており、かつ、時系列的にも近い板材のものが用いて計算するようにした。オペレータが視覚的に圧延材の設定を把握できるようにすることで、直感的にスケジュールの適否を判断できるようにした。

本システム適用前後のパスパターンと板クラウンスケジュールを、k-means 法によるクラスタリング解析によって比較した結果、本支援システムにより、圧延オペレータが選択するパスパターンと板クラウン比率スケジュール（各圧延スタンドの WR ベンダ設定）は、通板時の板形状として耳波指向がより顕著に現れるようになり、その結果として圧下スケジュールと板クラウン比率スケジュールのばらつきが、支援システムの適用前に比べより狭い範囲に収斂したことが分かった。これにより熱間仕上圧延における板材の通板状態が安定し、板クラウンや板厚の造り込みが容易になった。その結果、軟鋼から高強度鋼板まで、幅広いレンジの圧延材が混在する熱延圧延スケジュールであっても、各々の材料にとって適正な圧延条件を圧延オペレータが容易に選択できるようになり、熱延工場での難圧延材の量産を容易にすることができた。

第五章は結論であり、本研究で得られた成果をまとめた。

これら本論文の成果を熱延鋼板の実機生産に適用した結果、薄板ハイテンを安定して量産する技術の確立に大きく寄与することができた。