

高機能 LP 鋼板の製造技術

Development of Manufacturing Technologies of High Performance Longitudinally Profiled Steel Plates

井原 健滋 IHARA Kenji JFE スチール 西日本製鉄所（倉敷地区） 厚板部厚板・鍛造技術室 主任部員（課長）
弓削 佳徳 YUGE Yoshinori JFE スチール 西日本製鉄所（倉敷地区） 厚板部厚板・鍛造技術室長
松永 直己 MATSUNAGA Naoki JFE スチール 西日本製鉄所（倉敷地区） 鋼材商品技術部厚板・鍛造室 主任部員（課長）

要旨

LP (longitudinally profiled) 鋼板の需要家での適用効果および製造技術を紹介する。LP 鋼板は、板厚を長手方向に連続的に変化させた鋼板で、負荷応力の変化に応じて使用することにより、構造物の重量削減や板継ぎ工数削減などの利点が挙げられる。LP 鋼板の製造技術として圧延制御技術、制御冷却技術、自動製品採取技術を導入した。これにより、使用用途に応じたさまざまな要求に応え得る形状及び材質の LP 鋼板を精度よく製造する技術を確立した。

Abstract:

Applied stress to structural materials often varies in longitudinal directions. LP plates, which stand for longitudinally profiled steel plates, are plates whose thickness varies continuously along the length within a plate. They are used for shipbuilding and bridges in order to correspond to change of the stresses without joining of plates of different thicknesses, and enable cost savings by reducing steel weights and welded joints. In this paper, various special technologies for LP plates are shown, for example, rolling, accelerated cooling and shearing. By developing such technologies, manufacturing of LP plates became substantially automated to perform mass production. And the production of LP plates is increasing year by year.

1. はじめに

船舶などの大型構造物では、低層部の板厚が厚く、高層部に行くに従って板厚が薄くなる構造が一般的である。このような構造物は (1) 使用鋼材重量削減、軽量化を図るためには板厚の異なる多数の鋼板を溶接などで板継ぎする必要がある、(2) 軽量化を図るため多くの板厚の鋼板を使用するほど溶接などの板継ぎ施工工数が増加するといった問題があった。このような問題を解決する手段として、板長手方向に板厚を変化させた鋼板を用いれば、溶接などの板継ぎなしで必要最小限の重量の構造物とすることができる (図 1)。そこで、船舶輸送などでの省エネルギー、CO₂ 排出量削減ニーズ、造船をはじめとする各業界でのコスト削減ニーズの高まりとともに、鋼構造物の軽量化、施工工数削減に繋がる LP 鋼板の提供が強く要望されていた。しかし、LP 鋼板は、(1) 熱間圧延で長手方向に板厚を変化させる特殊な圧延が必要で板厚精度、平坦度の確保が困難である、(2) 水冷による材質造り込み時に長手方向の板厚差に起因して材質が不均一になる、(3) 鋼板を製品切断ラインからオフラインして長手方向の板厚を手測定して製品を切出す位置を探す必要があるなど、製造技術、生産性の面で課題が多く、工業

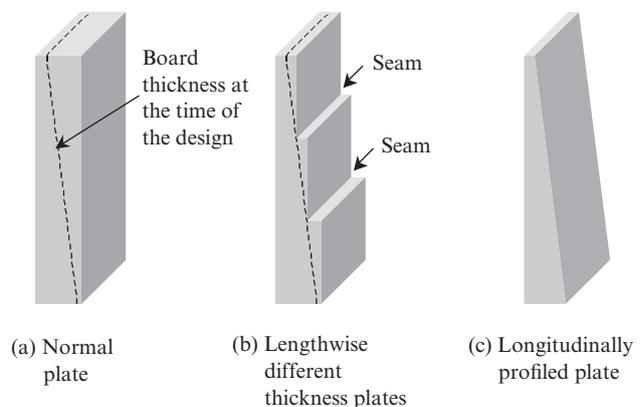


図 1 LP 鋼板適用による軽量化、溶接線削減概念

Fig. 1 Example of an omission of seams and reduction of weight by using LP plate

的に量産する技術が確立されていなかった。そこで、前述した課題を解決すべくさまざまな技術開発に取り組み、様々な板厚プロフィールを有する高精度、高品質な LP 鋼板を工業的に量産できる体制を確立した。

2. LP 鋼板の適用事例

図 2 に JFE スチールが製造可能な LP 鋼板の形状について示す。設計板厚の変化に合わせて多種のプロフィールに

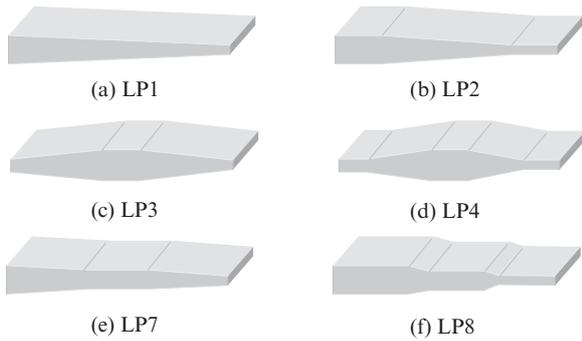


図2 製造可能な LP 鋼板の形状

Fig. 2 Various thickness profiles of LP plates

対応し、製造可能寸法は板厚は 0.01 mm、板幅および板長さは 1 mm の単位である。寸法精度は等厚材と同一の規格公差で製造可能である。材質は、引張強さ 400 N/mm² 級から 570 N/mm² 級まで製造可能であり、全長にわたり均質な強度分布を実現した。造船用および橋梁用のほとんどの鋼種に対応可能で、図 2 に示すさまざまな形状の LP 鋼板を高精度、高品質で高効率に生産する技術を開発し、安定的に月間 1 万トン以上供給可能となった。

2.1 造船分野での LP 鋼板の適用効果¹⁻³⁾

図 3 に造船への LP 鋼板適用箇所例を示す。たとえば、トランスバルクヘッドにおいては、船底から上部に向かって板厚を薄くする必要がある。従来は、軽量化を図るべく、応力が小さくなるにつれ板厚が薄くなるように、板厚の異なる多数の鋼板を溶接で板継ぎして施工していた。この部分に LP 鋼板を適用することにより、さらなる鋼材重量の削減と板継ぎ箇所数の減少が可能となった。トランスバルクヘッド以外に、アッパーデッキ、ボトムプレートなど多くの箇所に使用されている。17 万トン級バルクキャリアに LP 鋼板を約 2 500 トン使用し、700 m の溶接長削減と 218 トンの鋼材使用重量削減を達成した事例がある。LP 鋼板はこれまでに 250 隻以上の船舶に適用されている。

2.2 橋梁分野での LP 鋼板の適用効果⁴⁾

橋梁分野のニーズに関して、橋梁桁フランジ材を例に示す。橋梁桁フランジ材は、必要応力が長手方向で変化する。したがって、図 4 (a) に示すように必要応力に合わせて板厚の異なる鋼材をボルトで接合する場合、部材間の板継ぎ部での板厚差を埋め合わせるために、フィラープレートが必要になる。LP 鋼板を適用することにより、図 4 (b) に示すように、接合箇所数の削減、ボルト接合部のフィラープレート省略を図ることができる。このように LP 鋼板を適用することにより外観も美しい構造物とすることができる。LP 鋼板はこれまでに 10 橋以上の橋梁に適用されている。

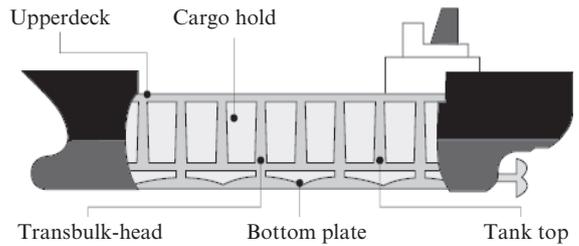


図3 バルクキャリアのトランスバルクヘッドへの LP 鋼板の適用例

Fig. 3 Examples of typical application LP plate for ship-building

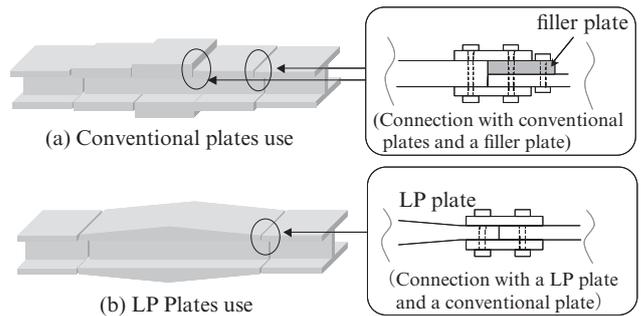


図4 橋梁桁フランジへの LP 鋼板の適用例

Fig. 4 Example of typical application LP plate for bridge figure flange

3. LP 鋼板の製造技術

図 5 に厚板の製造プロセス概要を示す。厚板の製造は、スラブを加熱炉で約 1 150°C まで加熱した後、厚板圧延機の上下圧延ロールの隙間に鋼板を通し板厚を薄くしていく。通常は十数段階的に分けて上下圧延ロールの隙間を狭くしながら、鋼板を往復させて製品厚さになるまで圧延していく。上下圧延ロールの隙間に鋼板を通すことを圧延パス、圧延パスごとに板厚が薄くなる量を圧下量と呼び、スラブ厚から製品厚にするまでのパス数および各パスの圧下量を決定するプロセスを圧延パススケジュールと呼んでいる。通常の厚板(等厚)の場合、圧延パス中は上下圧延ロールの隙間が変化しないようにコントロールし全長にわたり板厚が同じになる

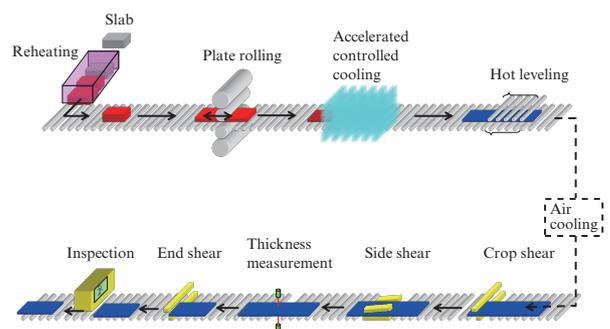


図5 LP 鋼板の製造工程

Fig. 5 Manufacturing process for LP plate

ようにする。厚板圧延後は、鋼板を強靱なものにするため水冷する制御冷却、鋼板を平坦にする熱間矯正を経て、製品切断ラインに送られる。製品切断ラインでは、圧延ままの鋼板から製品を切出すために、幅および長さを切断していく。

上記厚板の製造プロセスをベースとして、厚板圧延、制御冷却、熱間矯正、製品切断の各プロセスで LP 鋼板製造対応のための技術開発を行なった。次にそれぞれの開発技術について述べる。

3.1 LP 鋼板の圧延パススケジュール計算の開発

厚板圧延機は、上下圧延ロールをモータで回し、ロールの間隙に鋼板を通して圧延する。圧延ロールを回すモータの力の限界、熱間圧延機の強度の面から 1 回の圧延パスで板厚を薄くできる圧下量には限界がある。また、圧延では圧延反力により圧延ロールが幅方向に撓み、鋼板幅方向に板厚差が発生する。圧延パス入側の幅方向板厚差と、圧延により新たに生じる板厚差が大きく変化すると幅方向センターと幅エッジとで長手方向の伸び量に差が発生し、その差が許容範囲を超えると鋼板が座屈し平坦度が乱れてしまう。圧延パススケジュールは、能率の面から最小限のパス数で製品厚まで圧延できるよう各パスの圧下量を、前述した圧延機モータの力、圧延機の機械強度で制約される最大圧下量となるよう志向しつつ、平坦度が乱れないように各パスの圧下量を決定する必要がある。

LP 鋼板は、等厚鋼板と異なりパス内で大きく板厚を変化させていくためパス内で圧下量が変化する。前述した圧延機モータの力、圧延機の機械強度で制約、平坦度確保の面から 1 パスで製品に要求される板厚差を付与することはできないため、数パスで徐々に板厚差を付与していく必要がある。LP 鋼板の圧延パススケジュール計算では、まず、最薄部板厚を目標として通常材（等厚鋼板）と同様のロジックで圧延パススケジュールを作成する。次に、最厚部の圧延パススケジュールを計算するが、圧延開始時の板厚は、最厚部、最薄部ともに同じ板厚であり、圧延パス数も同じであるため、最厚部の各パスの圧下量は最薄部の圧下量よりも

小さくしていかなければならない。そこで、最薄部の各パス圧下量をもとに、平坦度、板内板幅方向板厚差変動、パス内の上下圧延ロール隙間変更可能速度を考慮して最薄部の圧下量を減らしながら、最厚部の各パスの圧下量を決定していく。図 6 に LP 鋼板の圧延パススケジュールの例を示す。

3.2 LP 鋼板の板厚プロフィール付与制御^{5,6)}

図 7 に LP 鋼板の板厚制御システム概要を示す。圧延パススケジュール計算、各パスで付与する板厚プロフィール（長手方向の板厚変化形状）などを決定するプロセスコンピュータ、長手方向位置をトラッキングしながら目標の板厚プロフィールを付与するための上下圧延ロール隙間変更量を決定する圧下 DDC（direct digital controller）、油圧圧下シリンダ位置を制御しパス内で上下圧延ロール隙間を変更する AGC（automatic gauge control）コントローラにより構成されている。圧延中は、数千トンの力（圧延反力）で圧延ロールを押す力が働き圧延ロールが変形し、また圧延ロールを支えている厚板圧延機の機械部品も変形するため上下圧延ロール隙間は、圧延前に比べ数ミリメートルのオーダーで広がってしまう。そのため、圧延前の上下圧延ロール隙間は、圧延反力による上下圧延ロール隙間変化を予測して狭く設定しておく。板厚プロフィールを付与するパスでは、プロセスコンピュータが決定した板厚プロフィールにならって、油圧 AGC シリンダにより上下圧延ロール隙間を変更していくが、それに伴いパス内圧下量、圧延反力が変化しその分上下圧延ロール隙間が変化する。また、鋼板内の温度偏差などから生じる圧延反力変動に起因する上下圧延ロール隙間変動も加わり、目標どおりの板厚プロフィールを付与することができない。そこで、圧延前に予測した圧延反力と実際の圧延反力の差から圧延ロール、圧延機の変形による上下圧延ロール隙間変化をリアルタイムで計算し、油圧 AGC シリンダにより上下圧延ロール隙間変化を補正する。すなわち、付与する板厚プロフィールにそった上下圧延ロール隙間変

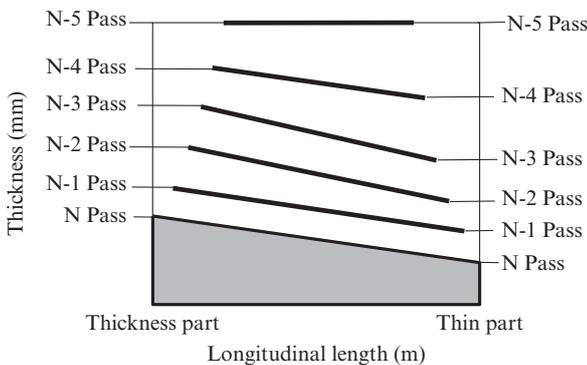


図 6 LP 鋼板の圧延パススケジュール概要

Fig. 6 Example of a rolling pass schedule for LP plate

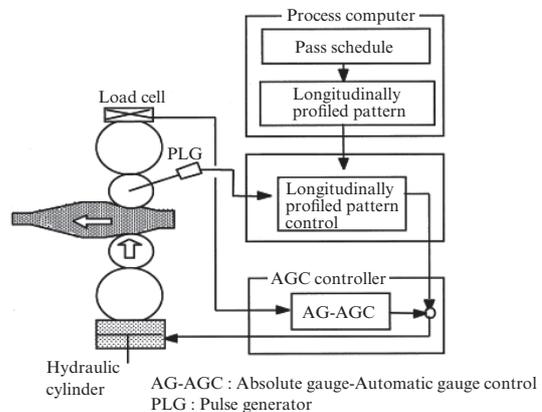


図 7 LP 鋼板の板厚制御システム概要

Fig. 7 Automatic gauge control system configuration for LP plate

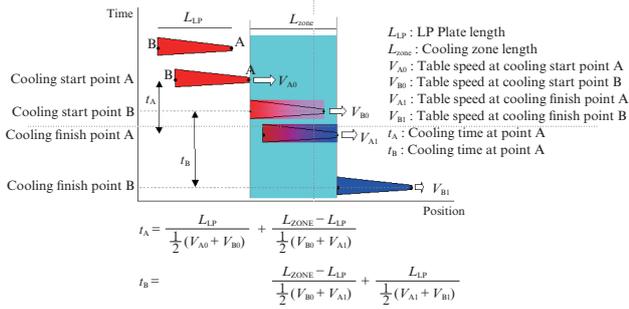


図 8 LP 鋼板の制御冷却概要

Fig. 8 Accelerated controlled cooling system for LP plate

更量以外の外乱で上下圧延ロール隙間が変化する分を常に補正することにより、目標どりの板厚プロフィールが得られるようにしている。

3.3 LP 鋼板の制御冷却

引張強度 490 N/mm² 以上の LP 鋼板の製造では溶接性を考慮して、通常材と同様に制御圧延や制御冷却：TMCP (thermo-mechanical control process) が適用される場合がある。制御冷却を適用する場合は、等厚鋼材と同様な水冷制御を行なうと、板厚の違いによる冷却速度差に起因して厚部と薄部の冷却停止温度に差が生じ材質のパラツキが発生する。それを防止するために、冷却中に移送速度、加減速率を適切に制御することにより、長手方向に連続的な冷却時間差を生じさせる制御冷却方法を開発した。すなわち冷却ゾーン内の搬送速度を厚部ほど遅くすることで厚部の冷却時間を長くする。図 8 にその概要を示す。厚部、薄部それぞれの冷却開始温度、目標冷却停止温度から決まるそれぞれの必要冷却時間について、それを満足するような搬送速度で水冷ゾーンを通過させる。

3.4 LP 鋼板の熱間矯正

LP 鋼板の熱間矯正は、鋼板の形状にならって上下矯正ロールの隙間を変更しながら行なう。基本的には、熱間圧延のパス内板厚プロフィール付与制御と同様に、熱間圧延完了後測定した長手方向の板厚形状に基づいて、長手方向位置をトラッキングしながら上下矯正ロールの隙間をコントロールし、全長にわたり均一な矯正効果が得られるような制御を開発した。

3.5 LP 鋼板の製品切出位置自動検出

LP 鋼板の場合、長手方向に板厚勾配を有しているため、所定の板厚を確保するためには圧延ままの鋼板の適切な位置から製品を切出さなければならない。たとえば、4/1000 の勾配を持つ LP 鋼板では、製品切出位置が適切な位置から 100 mm ずれば、板厚にして 0.4 mm ずれることになり板厚公差外れが発生する。そこで、製品切断ラインに設置している厚さ計による板厚測定値に基づいて、最適な製品切

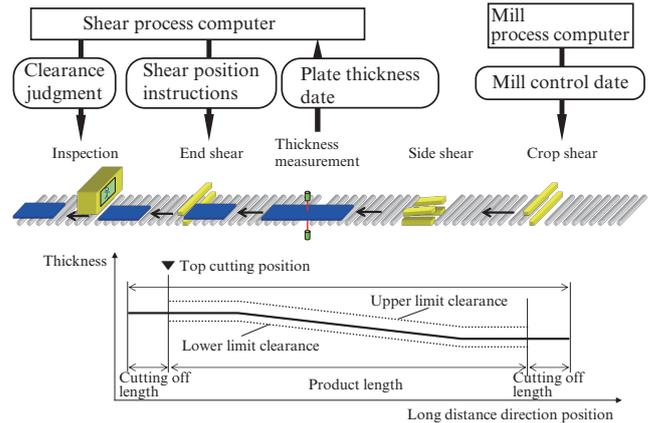


図 9 LP 鋼板の製品切出し位置決定システム概要

Fig. 9 Summary of the automatic measuring system using the thickness measurement for LP plate

出し位置を決めるシステムを開発した。図 9 に板厚計を用いた自動採寸システムの概要を示す。

4. LP 鋼板の製造実績

4.1 LP 鋼板の板厚実績

当社では、LP 鋼板製造に関するさまざまな技術開発を行ない、需要家の多様な要求を満たす高精度、高品質 LP 鋼板を高効率で生産できる体制を整えた。図 10 に当社の製造した LP 鋼板板厚実績（製品切断ライン厚さ計実測値）代表例を示す。図 10 (a) は、造船のトランスバークヘッド用で、板厚差 3.5 mm の一方向 LP 鋼板である。図 10 (b), (c) は、いずれも橋梁のフランジ部用である。図 10 (b) は、板厚差 30 mm、勾配 3/1000、厚部に 2.4 m、薄部に 4.0 m の等厚部を有している一方向等厚部付き LP 鋼板である。図 10 (d) は、1 方向に 2 段階に板厚が変化する LP 鋼板で造船分野に適用されている。

4.2 LP 鋼板の材質実績

図 11 (a), (b) に TMCP 型の降伏点 460 MPa 級一方向

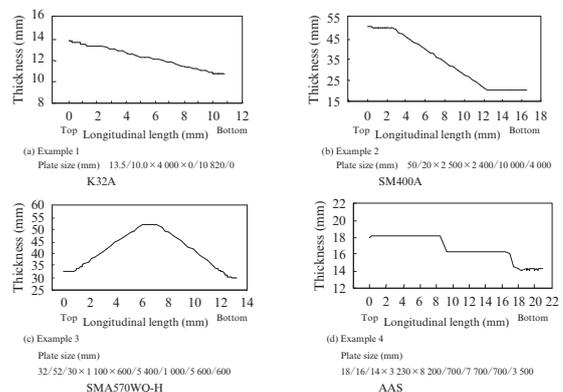


図 10 LP 鋼板板厚実績（製品切断ライン厚さ計実測値）

Fig. 10 Examples of longitudinal profiles of actual thickness

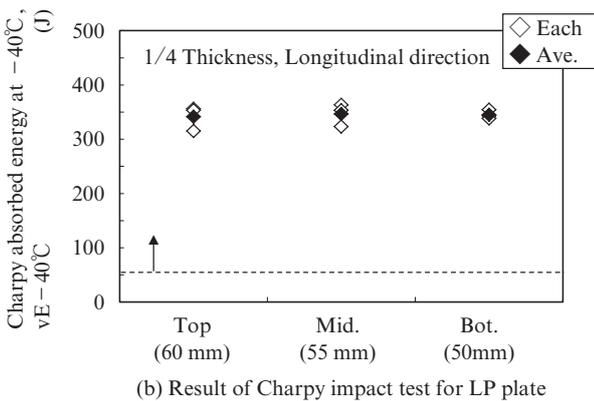
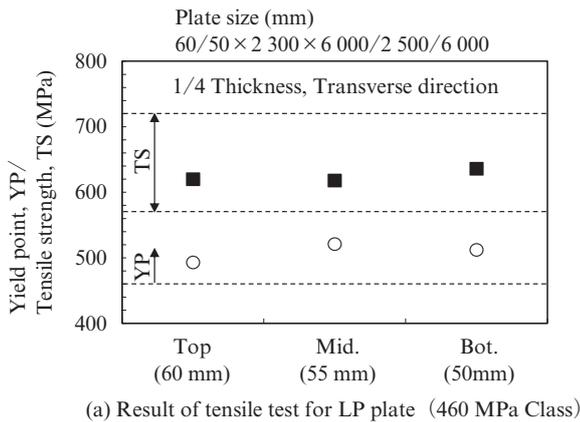


図 11 一方向 LP 鋼板の材質実績

Fig. 11 Result of materials test for LP plate

LP 鋼板の引張試験実績および衝撃試験実績を示す。板厚の異なる Top (t60 mm), Mid. (t55 mm), Bot. (t50 mm) で、強度、靱性ともに規格値を満足する値が得られている。

LP 鋼板は、長手方向に板厚が変化するという特徴を有しているがゆえに、TMCP 鋼では材質造り込みにおいて工夫が必要である。当社では、Super-OLAC[®]を用いた制御冷却法の開発を行なったのをはじめ、成分設計および製造条件設定の最適化を行ない、長手方向の機械的性質の均質化を図った。

4.3 LP 鋼板の受注実績

LP 鋼板は 1993 年に造船用鋼板として初適用されて以来、着実にその使用実績を増やしている。LP 鋼板は 2 章で述べたとおり、これまでに 250 隻以上の船舶、10 橋以上の橋梁に適用されている。図 12 に LP 鋼板の累計受注トン数を示す。2012 年現在で累計受注 60 万トンに達した。

5. おわりに

LP 鋼板の需要家での適用事例、JFE スチールにおける製造技術および製造実績について紹介した。

(1) LP 鋼板は、板厚を長手方向に変化させた鋼板で、造船用や橋梁用鋼材として適用されており、構造物の重量

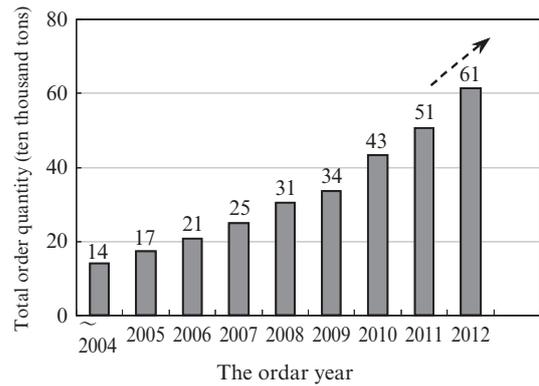


図 12 LP 鋼板受注量累計

Fig. 12 Supply record of LP plates

削減や板継ぎ工程の省略に寄与している。

(2) 以下に示す技術開発を行ない、さまざまな形状の LP 鋼板を安定的に大量に製造する技術を確認し、月間 1 万トン以上の製造を可能にした。

(a) 熱間圧延で上下圧延ロールの隙間を精度よくコントロールし長手方向に正確な板厚変化を付ける技術

(b) 水冷による材質造り込み工程で長手方向板厚差に関係なく材質を均質化させる技術

(c) 熱間矯正で上下矯正ロールの隙間を精度よくコントロールし長手方向に均一な矯正を行う技術

(d) 製品切断ライン上で製品を切出す位置を自動で見つけて切出す技術

(3) LP 鋼板は 1993 年に造船用鋼板として初適用されて以来、着実にその使用実績を増やしており、2012 年現在で累計受注 60 万トンに達した。

参考文献

- 1) 鋼材倶楽部 鉄鋼製品普及委員会. 造船と鋼材. 1993.
- 2) 楠原祐司. 新しい時代を創造する高性能厚板. 第 159・160 回西山記念技術講座. 1996, p. 1-17.
- 3) 鈴木伸一, 小日向忠ほか. JFE 技報. 2003, no. 2, p. 37-44.
- 4) 西川和廣. 新しい時代を創造する高性能厚板. 第 159・160 回西山記念技術講座. 1996, p. 231-244.
- 5) 弓削佳徳, 堀紀文, 西田俊一. 川崎製鉄技報. 1998, vol. 30, no. 3, p. 137-141.
- 6) 西田俊一, 松岡俊夫, 和田典己. JFE 技報. 2004, no. 5, p. 1-7.



井原 健滋



弓削 佳徳



松永 直己