

マンドレルミルの偏肉制御技術

Wall Thickness Deviation Control of Mannesmann Mandrel Mill

山 根 明 仁*
Akihito YAMANE

江 越 亨
Toru EGOSHI

篠 木 健 一
Kenichi SASAKI

抄 録

継目無鋼管には製品の用途に応じて全長もしくは管端部で高い肉厚精度が求められる。一方、継目無製管の製造プロセスでは各工程において様々な形態の偏肉が生じうる。複数の工程で生じた偏肉が重なり合うと、製造された管の肉厚を測定しても各工程で生じた偏肉量を推測することは難しくなるが、これを解決するためにフーリエ解析を応用した偏肉成分の分析技術を開発した。さらにマンドレルミルで生じる偏肉については、圧下シリンダーの個別制御による偏肉防止技術を開発し、加えて肉厚計に基づくオンライン偏肉フィードバック制御技術を適用することで、高い肉厚精度を実現した。

Abstract

High wall thickness accuracy of seamless tube and pipe is demanded along the whole length or on the end according to the application. Meanwhile the circumferential wall thickness deviation may cause as various patterns corresponding to each process on seamless tube and pipe manufacturing. It is difficult to clarify each pattern deviation from the measured circumferential wall thickness deviation when various pattern wall thickness deviations are superposed. We developed a method analyzing the circumferential wall thickness deviation pattern by applying Fourier analysis. We also developed a method of compensating a circumferential wall thickness deviation pattern to mandrel mill. Pressing cylinders are controlled individually, an online circumferential wall thickness deviation feedback system based on a wall thickness meter is introduced, and the high wall thickness accuracy is achieved.

1. 緒 言

継目無鋼管の代表的な用途は、石油や天然ガスを採掘するための油井管、それらを運ぶラインパイプに加えて、シリンダー、印刷用ロール、ドライブシャフト等に用いられる機械構造用鋼管、ボイラーや化学プラント用の鋼管などがある。

これらの鋼管には一般に、特に周方向の偏肉に関して高い肉厚精度が求められる。例えば油井管では、地中や海中深くにおいて管外面から高い圧力を受けても圧壊しないよう周方向に均一な肉厚が求められる。また管の継ぎ手部のねじ加工精度の観点でも肉厚精度は重要となる。ラインパイプにおいては、管の継ぎ手の溶接部において内外面の継ぎ目合わせの観点で偏肉の小さい鋼管が求められる。機械構造用鋼管においても、回転体として用いられる場合には断面の重心の偏りがなく、シリンダー等の場合はラインパ

イプと同様に高い内径精度が求められるため、いずれの場合でも肉厚精度が重要となる。

一方、マンネスマンマンドレルミル方式では、製造プロセス中の各ミルにおいて、様々な形態の偏肉が発生しうる。ピアサーでは長手方向にねじれを伴う偏芯偏肉が、マンドレルミルでは圧延ロール数に応じた偏肉が、絞り圧延でも同様に三角張りや六角張りの偏肉が生じる。オンラインの肉厚計や試圧延品の肉厚測定の結果ではこれらの偏肉が重なり合うため個別の要因の判別が難しい。そこで著者らは、偏肉が生じているミルとその度合いを逆算する分析技術を開発した。

次に分析された偏肉のうち、マンドレルミルで生じる偏肉について、圧下シリンダーの個別制御による偏肉防止技術、加えて肉厚計に基づくオンライン偏肉フィードバック制御技術を開発し、高い肉厚精度を実現した。

* プロセス研究所 鋼管プロセス研究部 主幹研究員 兵庫県尼崎市扶桑町 1-8 〒 660-0891

2. 制御対象のプロセス

2.1 継目無鋼管の製造法^{1,2)}

本論文の偏肉制御技術を適用したマンネスマンマンドレルミルラインの概要を説明する。この製管ラインは量産に適しており、加熱炉でビレットを加熱した後にピアサーで穿孔し、マンドレルミルで所望の肉厚まで延伸し、絞り圧延機で所定の外径に仕上げる構成となっている（図1）。

肉厚を調整する主機であるマンドレルミルでは、穿孔された素管にマンドレルバーを挿入した後、複数のスタンドで連続して孔型ロールとマンドレルバーで肉厚を圧下する。1スタンドで2ロールを用いる2ロール式マンドレルミルでは、奇数スタンドと偶数スタンドで、断面内で90°交差する方向を交互に圧延する（図2）。

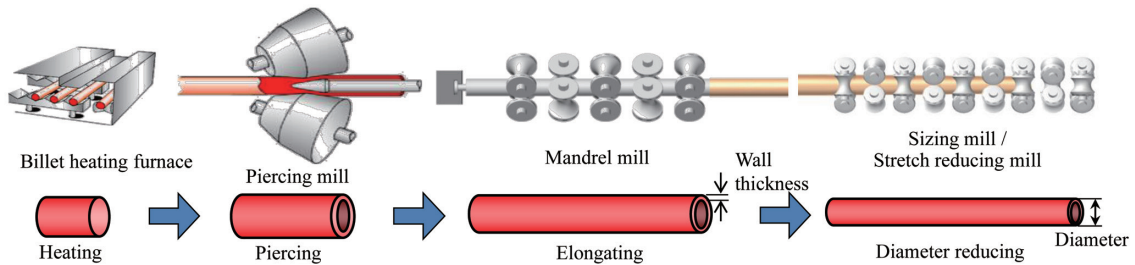


図1 マンネスマン製管法のプロセス例
Schematic of Mannesmann process

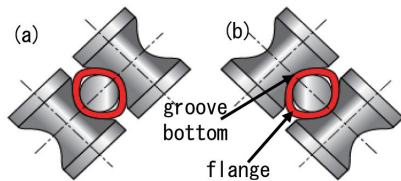


図2 マンドレルミル圧延の断面図

(a) 奇数スタンド断面図, (b) 偶数スタンド断面図
Schematic of Mandrel mill along cross-section view
(a) Odd numbered stand, (b) Even numbered stand

2.2 偏肉の発生要因

図1の製管ラインで発生しうる偏肉を図3に示した。マンドレルミルと絞り圧延機では偏肉が生じる理由はそれぞれ異なるが、どちらも孔型圧延機であり、周方向で薄い箇所が1スタンド当たりのロール数の整数倍となる偏肉が生じ得ることが知られている。一方、ピアサーは傾斜圧延機のため、生じる偏芯偏肉は管の長手方向にねじれて現れる。このうち製品まで残存する代表的な要因は加熱炉でのビレットの偏熱とミルの各工具の芯ずれの2つであり、ねじれ角は一般に偏熱による偏肉の方が芯ずれによる偏肉よりも緩やかになる。

3. 偏肉の発生要因別切り分け技術^{3,4)}

3.1 軸方向一断面における周方向の肉厚分布の分析

図3で述べた複数の偏肉成分が重なると、周方向の肉厚分布は図4のようなになる。このため重なり合った肉厚分布

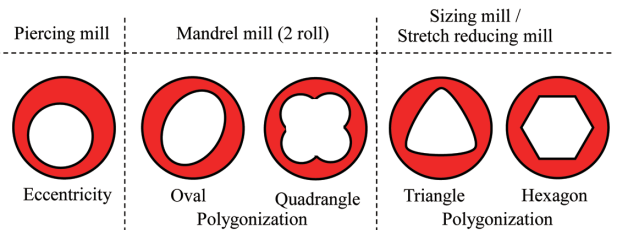


図3 マンネスマン製管ラインで生じる偏肉
Circumferential wall thickness deviation pattern on Mannesmann process (shown as emphasized)

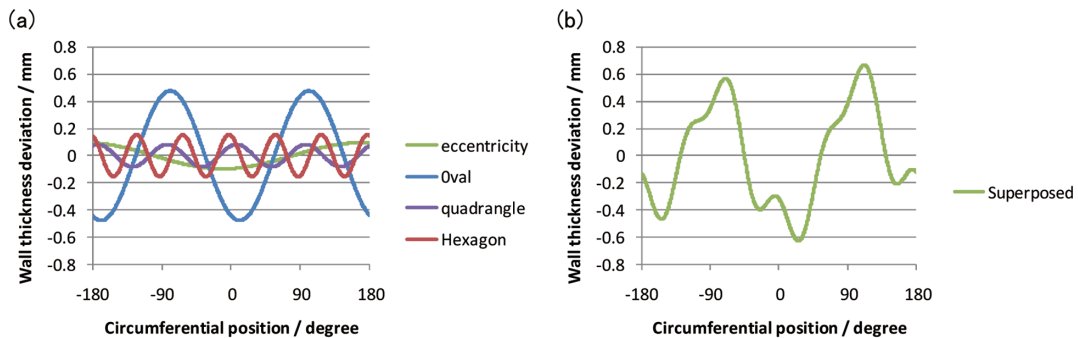


図4 複数の工程で生じた偏肉が重なり合ったときの肉厚分布例
(a) 複数の工程で生じる偏肉, (b) 重なり合ったときの肉厚分布
Circumferential wall thickness deviation example when various patterns are superposed
(a) Various patterns, (b) Superposed

から偏肉の各成分を逆算することは難しい。

ここで図3の各偏肉成分を周方向の角度に対する肉厚分布の関数としたときに、図5のようにこれらが近似的に一定の周波数を持つ正弦波になることに着目すれば、複素フーリエ解析を用いて式(1)、(2)のように、各偏肉成分を互いに一次独立で直交なフーリエ解析の基底の成分に分解することができる。

$$f(\theta) = \sum_k G_k e^{ik\theta} \quad (1)$$

$$G_k = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} f(\theta) e^{-ik\theta} d\theta \quad (2)$$

式(1)、(2)において、 $f(\theta)$ は周方向肉厚分布、 θ は周方向角度、 G_k はk次偏肉の偏肉成分である。すなわち図3の偏肉成分の偏肉量と方向を、肉厚分布の複素フーリエ解析を用いて式(3)、(4)により求めることができる。

$$g_k = 4 \|G_k\| \quad (3)$$

$$a_k = \frac{1}{k} \angle G_k \quad (4)$$

ここで g_k は k 次偏肉の偏肉量、 a_k は k 次偏肉の厚肉部の方向の角度である。

周方向の肉厚分布を連続的に測定できない場合は、離散フーリエ解析により、式(2)の代わりに式(5)を用いて同様に求めることができる。

$$G_k = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N f(i) e^{-ik \frac{2\pi(i-1)}{N}} \quad (5)$$

このように各工程で生じる偏肉量とその方向を分析できれば、それぞれの工程で偏肉を相殺するように設備の設定等を変更することにより偏肉を防止することができる。

3.2 偏芯偏肉のねじれ成分の分析

偏芯偏肉については軸方向一断面での分析技術に加えて、長手方向のねじれの角度も要因別に切り分ける必要がある。

	Pattern	Wall thickness deviation
Eccentricity (1 st order)		
Oval (2 nd order)		
Triangle (3 rd order)		
Quadrangle (4 th order)		
Hexagon (6 th order)		

図5 偏肉成分と Fourier 解析の基底との対応
Relation between circumferential wall thickness deviation pattern and basis function of Fourier analysis

ここで各要因で生じる偏芯偏肉の、長手方向 x の断面での管内径の中心の位置は、複素平面上では複素フーリエ解析の基底関数 $e^{i\omega_i x}$ を用いて式(6)と表せる。

$$-r_i e^{i(\omega_i x + \delta_i)} = (-r_i e^{i\delta_i}) e^{i\omega_i x} \quad (6)$$

r_i は各要因の偏芯偏肉量、 $\omega_i x + \delta_i$ はその偏芯偏肉の厚肉部の方向の角度で ω_i はそのねじれ角、 δ_i は初期ねじれである。

すなわち、式(1)～(5)で分析した偏芯偏肉結果を用いて、長手方向 x の各断面での管内径の中心の位置(式(7))を x の関数として複素フーリエ解析すれば、同様に長手方向のねじれも要因別に切り分けることができる。

$$-\frac{g_1(x)}{2} e^{i a_1(x)} \quad (7)$$

このように、著者らは偏肉が生じている工程とその度合いを逆算する分析技術を開発した。

4. マンドレルミルの肉厚制御技術^{3,5)}

4.1 圧下シリンダー個別制御

複素フーリエ解析により分析された2次偏肉に対して、マンドレルミルの圧下シリンダーを個別に制御して偏肉防止する技術を開発した(図6)。

各スタンドのロール溝底部が厚肉部もしくは薄肉部となる2次偏肉に対しては、図6においてロール溝底部が厚肉部となる圧延スタンドの圧下量を大きくし、逆にロール溝底部が薄肉部となる圧延スタンドの圧下量を小さくすることにより偏肉を防止できる。厚肉部がロール溝底部以外の位置にある場合についても、図6の圧下シリンダーを個別に制御することにより偏肉を防止できる⁵⁾。

4.2 オンライン偏肉フィードバック制御

図1のマンドレルミルの下流側、もしくはマンドレルミルと絞り圧延機が接続されているときは絞り圧延機の下流側に設置された熱間肉厚計を用いて、オンラインで計測された偏肉をフィードバック制御する技術を開発した(図7)。

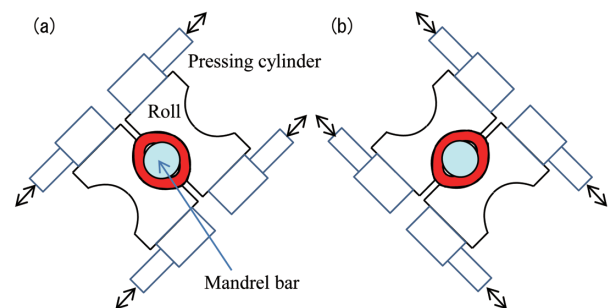


図6 マンドレルミルの圧下シリンダー個別制御による2次偏肉防止技術
(a) 奇数スタンド, (b) 偶数スタンド
Compensating 2nd ordered circumferential wall thickness deviation with pressing cylinders of mandrel mill individually controlled
(a) Odd numbered stand, (b) Even numbered stand

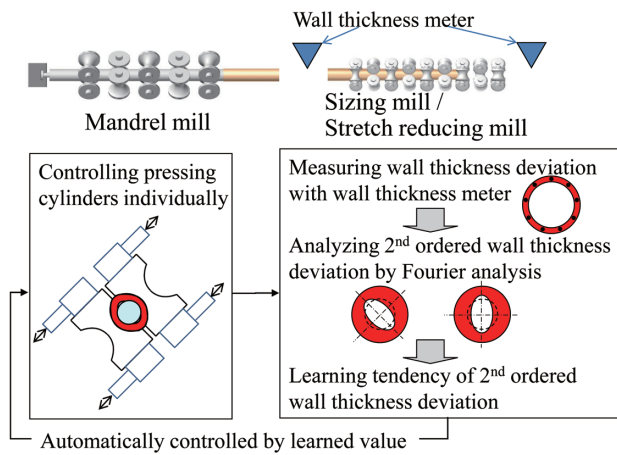


図7 マンドレルミルの偏肉フィードバック制御
Feedback control system of circumferential wall thickness deviation on mandrel mill

熱間肉厚計で周方向に複数の箇所を計測し、計測結果をフーリエ解析することにより、まず2次偏肉の偏肉量と方向を分析する。製管条件ごとにこの2次偏肉の傾向を学習し、次回の製管時にこの学習値をフィードバックしてマンドレルミルの压下シリンダーを個別に制御することで、自動的に偏肉を軽減できる。

本技術により2次偏肉をほぼ0.1mm以下とすることができ(図8)、高い肉厚精度を実現した。

5. 結 言

継目無鋼管には高い肉厚精度が求められる一方で、複数

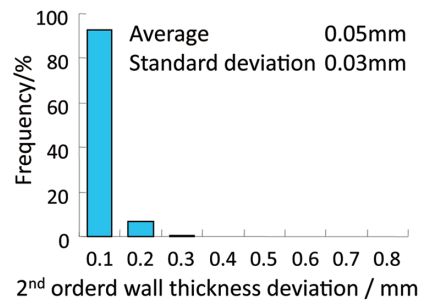


図8 偏肉フィードバック制御の効果
Result of feedback control system of circumferential wall thickness deviation

の製造工程で様々な偏肉が生じるが、複素フーリエ解析を用いてそれらの形態を分析する技術を開発した。

さらにマンドレルミルで生じる偏肉について、压下シリンダーの個別制御による偏肉防止技術を開発し、加えて肉厚計に基づくオンライン偏肉フィードバック制御技術を適用することで、高い肉厚精度を実現したことを示した。

参考文献

- 1) 林千博：鋼管の製造法. 初版. 東京, 日本鉄鋼協会, 2000, 420p
- 2) 山根明仁 ほか：新日鉄住金技報. (397), 111 (2013)
- 3) 山根明仁 ほか：材料とプロセス. 17 (5), 1042 (2004)
- 4) 日本特許特許公報 特許第 4232779 号. 2008 年 12 月 19 日
- 5) Sasaki, K. et al.: Tube Ukraine, Ukraine. 2007, ITA



山根明仁 Akihito YAMANE
プロセス研究所 鋼管プロセス研究部
主幹研究員
兵庫県尼崎市扶桑町1-8 〒660-0891



篠木健一 Kenichi SASAKI
和歌山製鉄所 鋼管部 主幹



江越 亨 Toru EGOSHI
和歌山製鉄所 鋼管部 主幹