

帯鋼搬送用低慣性ロールの開発

Development of Low Inertia Roll for Steel Strip

技術本部 平井悦郎*¹ 川水 努*¹
谷崎桂二*² 新谷幸司*²
広島製作所 和田宏三*³

製鉄用表面処理プロセスラインでは、帯鋼の処理量増大の要求から帯鋼の搬送速度の高速化が進んでいる。帯鋼表面に発生する擦り傷防止のために急加速・急減速に対応可能な低慣性ロールの開発が求められている。当社では帯鋼の非接触搬送装置としてフロータを開発しており、このたび、フロータによる帯鋼搬送技術を利用した低慣性ロールの開発に着手した。低慣性ロールは、薄肉の中空ロール（薄肉スリーブ）と加圧空気供給を行うためのスリーブ軸から構成される。薄肉スリーブに作用する荷重を空気圧支持することでスリーブの薄肉化が可能となった。ロールの慣性モーメントとして、従来のロールの1/20以下を目標とし、パイロット試験によりその性能を確認した。

Recently, in steel processing lines, for example, in continuous annealing lines (CAL), the traveling speed of the steel strip has increased for the enhancement of productivity. In such a high speed processing line, the traveling speed must be quickly accelerated and decelerated without tension fluctuation and development of surface scratches. In order to eliminate these problems, we have developed the low inertia roll, which consists of a sleeve and a sleeve shaft. The sleeve with a cylindrical shell structure is supported by an air cushion on the rigid sleeve shaft. The shell thickness of the sleeve is so thin that the inertia moment of low inertia rolls is much lower than that of conventional rigid rolls. In this paper, the principle of this revolutionary low inertia roll is theoretically introduced, and, then, the performance of this roll is experimentally demonstrated. As a result, it was confirmed that performance is excellent and that the roll will contribute to design of high speed process lines.

1. ま え が き

近年、連続焼鈍設備等の薄物（厚さ0.5 mm以下）の帯鋼を扱う製鉄用表面処理プロセスは、処理量増大の要求から高速化の傾向にある。これらのラインでは、従来、帯鋼の搬送・方向転換に中空円筒のロール（以下、従来ロールと称する）を使用しているが、この従来ロールは、帯鋼の張力によるロールのたわみ変形防止のために剛性が高くロール肉厚が厚い。その結果、ロールの重量及び慣性モーメントが大きく、帯鋼の急加速・急減速操業の際にロールの角速度が追従せず、帯鋼表面の擦り傷発生等の問題が生じている。

このような背景の下、帯鋼の搬送・方向転換用ロールの低慣性化は薄物高速ライン向け技術として必須の技術となっている。当社は、同様のニーズに対応するために、ロールを全く用いない帯鋼の方向転換装置としてフロータを開発⁽¹⁾⁽²⁾しているが、フロータ技術ではフロータと帯鋼の直接接触を避けるために、10 mm以上の浮上量を設定するので、ルーパ部などロールが多数存在する部位のロール代替技術としては空気動力が大きい点で不向きな技術である。そこで当社は、低慣性かつ、低動力を実現するために、加圧空気供給を行うプレナム室と円孔ノズルを有する“スリーブ軸”と、帯鋼を巻付ける薄肉の中空円筒ロール（以下、薄肉スリーブと称する）から構成される低慣性ロールを開発した。帯鋼の張力は、薄肉スリーブを介して、スリーブ軸上で空気圧によって支持される。

本報では、低慣性ロールの薄肉スリーブの浮上理論及び当社広島研究所の製鉄プロセス汎（はん）用テストライン⁽³⁾において実機大の低慣性ロールパイロット機を用いて実施したパイロット試験結果について述べる。

2. 低慣性ロール構造

2.1 薄肉スリーブ空気圧支持方式の検討

低慣性ロールには、薄肉スリーブを空気圧支持することによってスリーブ肉厚を薄くし、ロールの慣性モーメントを小さくできるという特徴がある。スリーブ軸のプレナム室から供給される加圧空気は、円孔ノズルを通してスリーブ軸と薄肉スリーブの隙間（すきま）空間（以下、受圧面と称する）に供給され、受圧面上に空気圧を発生する。

これらの基本概念を実現するために、当社で開発した帯鋼浮上搬送用装置⁽¹⁾⁽²⁾（ベンドフロータ）の技術を応用し、図1に概念的に示される低慣性ロールを考案した。帯鋼の張力が荷重として作用する薄肉スリーブを円弧上固定スリーブ軸上の受圧面に発生する空気圧により支持する。薄肉スリーブの慣性モーメントは小さいので、帯鋼の走行に追従し薄肉スリーブが浮上しながら回転する。ベンドフロータ技術を適用する利点は、受圧面圧とプレナム圧をほぼ等しく設計するので、プレナム圧を極小化することが可能であり、浮上空気動力を極小化できる点にある。

2.2 低慣性ロールの製作精度と半径隙間

低慣性ロールでは半径隙間（スリーブ軸と薄肉スリーブの半径差）をなるべく小さくすることによって、薄肉スリーブを非接触浮上支持するために必要な空気の流量を抑え、空気供給用ブロワの動力を小さくすることができる。しかし一方で、慣性を小さくする必要性から薄肉スリーブの肉厚が薄くなり剛性が下るので、張力による薄肉スリーブの変形を考慮しつつ、非接触浮上状態を確保するための半径隙間を選定しなければならない。その際には、薄肉スリーブに対し、スリーブ軸との接触を防止するための真円度、平行度、さらに回転時の不釣合いによる振動防止のための肉厚の均一性を実現できる薄肉スリーブ加工法も考慮に入れる必要

*¹ 広島研究所機械プラント研究推進室

*² 広島研究所実験課

*³ 製鉄機械設計部プロセスプラント課

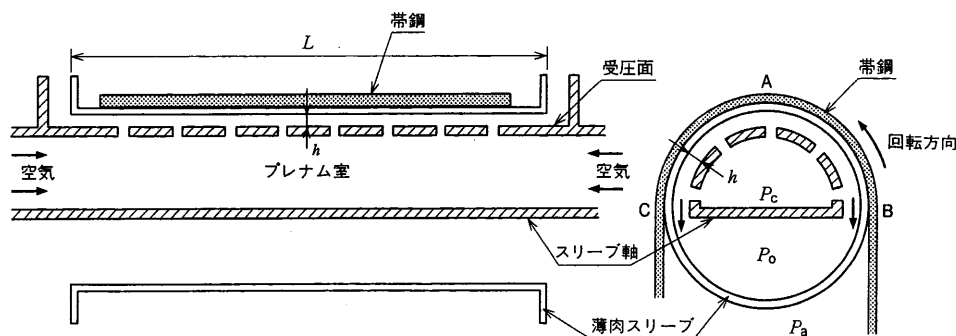


図1 低慣性ロール構造図 低慣性ロールの構造を示す断面図。
Structure of low inertia roll

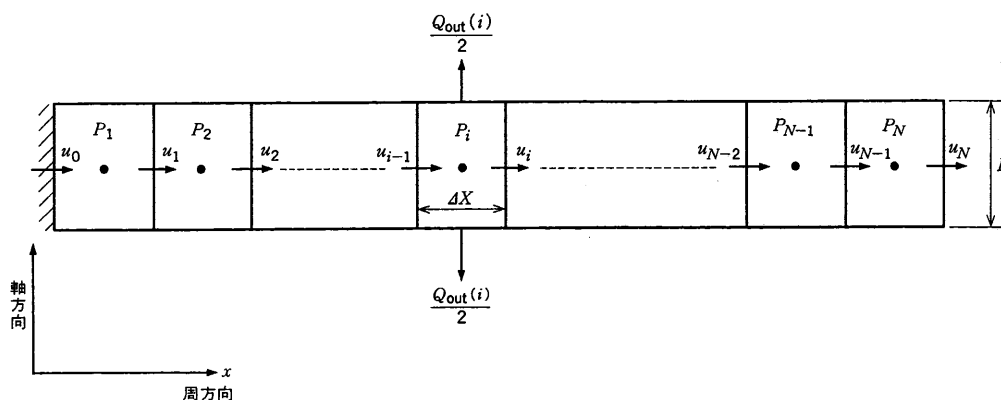


図2 薄肉スリーブ浮上計算モデル 薄肉スリーブとスリーブ軸の間に形成される隙間流路内流れを示す。
Calculation model of sleeve floating

がある。本報で用いた低慣性ロールパイロット機では、薄肉スリーブ及びスリーブ軸共に、シームレスパイプを切削加工して製作されている。その際の加工精度を考慮して半径隙間を $550 \mu\text{m}$ と決定した。

2.3 薄肉スリーブの浮上原理

薄肉スリーブは、スリーブ軸から供給される空気によって生ずる空気圧で浮上する。浮上量は、帯鋼の張力と空気圧がバランスした状態で受圧面流路（図1中 h 部）を通過する空気の流量によって決まる。低慣性ロールの浮上理論は、フロータの浮上理論と類似しているが下記の点で異なっている。

- (1) 低慣性ロールでは浮上量が小さいので、薄肉スリーブとスリーブ軸との間の平行平板間状受圧面流路を流れる流れに対し、壁面（薄肉スリーブ内面、スリーブ軸外面）の存在による圧力損失効果が強く生じる。したがって、従来のフロータに比べ静圧を保持しやすく浮上しやすい傾向となる。
- (2) 低慣性ロールでは薄肉スリーブ内面上の空気境界層と同一オーダーの小さい浮上量であるので、薄肉スリーブの回転運動の影響が、薄肉スリーブとスリーブ軸との間の流れに影響する。したがって、薄肉スリーブの速度によって浮上量が変化する。
- (3) 低慣性ロールのプレナム圧がベンドフロータの場合のそれに比べ高いので、流体の圧縮性の効果が生じる可能性がある。

これらの点を簡易的に表現し、かつ、低慣性ロールの基本設計式としても適用できる浮上性能式を以下に導いてみる。まず、低慣性ロールにおける薄肉スリーブとスリーブ軸との間の空気流れの層に対し次の仮定を設置する。

- 流れは周方向に一次元とする。
- 流れは周方向にケット流⁽⁴⁾とする。
- 圧縮性を考慮したベルヌーイの式が適用できる。

●薄肉スリーブの速度は帯鋼の速度に等しい。

図2に示すように、受圧面流路を周方向に N 分割し、関係式を導く。

圧力バランスの式：

$$F_i = \frac{1}{2} u_{i+1}^2 + \Lambda \frac{1}{2} \left(u_{i+1} - \frac{U}{2} \right)^2 + \frac{m}{m-1} \cdot \frac{P_i}{\rho_i} \left(\frac{P_{i+1}}{P_i} \right)^{\frac{m-1}{m}} - \frac{1}{2} u_i^2 - \frac{m}{m-1} \cdot \frac{P_i}{\rho_i} \quad (i=1, 2, \dots, N) \quad (1)$$

マスバランスの式：

$$G_i = \rho_{i-1} h_{i-1} W_s u_{i-1} + Q_{in}(i) - \rho_i h_i W_s u_i - Q_{out}(i) \quad (i=1, 2, \dots, N) \quad (2)$$

荷重バランスの式：

$$H = W_s \sum_{i=1}^N \left[(P_i - P_a) \Delta X_i \cos \left(\frac{X_i}{r_o} \right) \right] + W_s r_o P_o - T_{total} - G_s g \quad (3)$$

圧損の式：

$$\Lambda = \begin{cases} \frac{96}{Re^*} \cdot \frac{\Delta X_i}{2h_i} & (Re^* < 2300) \\ 0.3164 Re^{*-1/4} \cdot \frac{\Delta X_i}{2h_i} & (Re^* > 2300) \end{cases} \quad (4)$$

$$Re^* = \frac{2h_i \rho_i (u_i - U/2)}{\mu} \quad (5)$$

ここで、

u ：受圧面周方向速度 (m/s)

P ：受圧面圧力 (Pa)

U ：薄肉スリーブの速度（帯鋼の速度） (m/s)

Λ ：圧損係数

表1 低慣性ロールパイロット機仕様
Specification of low inertia roll

薄肉スリーブ	内 径	300 mm
	外 径	306 mm
	スリーブ長	1200 mm
	慣性モーメント	0.66 kg・m ²
スリーブ軸	内 径	260 mm
	外 径	298.9 mm
	円孔ノズル径	φ 10 mm

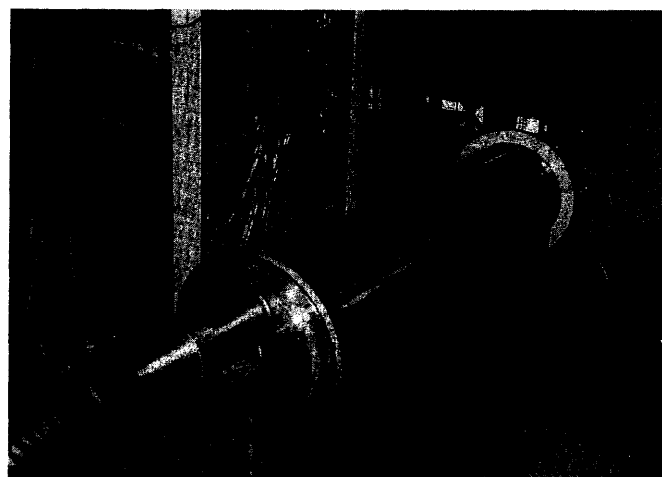


図3 低慣性ロールパイロット機 薄肉スリーブの浮上特性を調べるために試作したパイロット機の外観を示す。
Out view of low inertia roll

m : ポリトロップ指数

ρ : 密度 (kg/m³)

μ : 粘性係数 (Pa・s)

h : 薄肉スリーブとスリーブ軸の間の隙間 (m)

W_s : スリーブ軸幅 (m)

Q_{in} : 供給流量 (kg/s)

Q_{out} : スリーブ軸方向流出流量 (kg/s)

r_0 : 薄肉スリーブ半径 (m)

P_c : スリーブ軸内のプレナム圧 (Pa)

P_a : 大気圧 (Pa)

P_0 : 低慣性ロール下半分の圧力 (Pa)

ΔX : セル長 (m)

Re^* : 修正レイノルズ数 (-)

G_s : 薄肉スリーブ質量 (kg)

T_{total} : トータルテンション (N)

g : 重力加速度 (m/s²)

式(1), (2)をNewton-Raphson法による繰返し計算によって,
 $F_i=0$, $G_i=0$, $H=0$ を満足するように受圧面上の圧力及び速度
を計算する。

計算結果は、次章のパイロット試験結果と比較する。

3. パイロット試験

3.1 パイロット試験装置

低慣性ロールパイロット機の仕様を表1に、外観を図3に示す。
慣性モーメントは同寸法の従来ロールの1/20を目安に設計した。
このパイロット機を当社広島研究所の製鉄プロセス汎用テストラ
インに設置(図4参照)して、パイロット試験を実施した。パイ

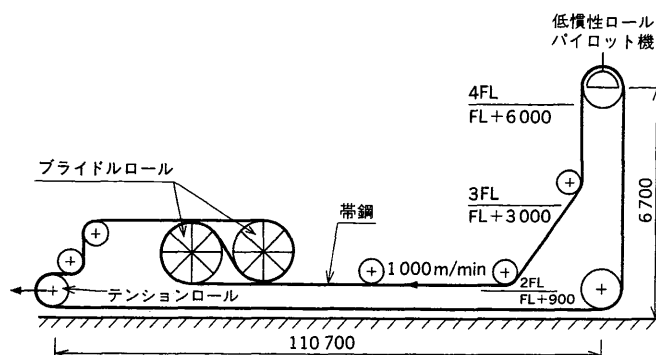


図4 低慣性ロールパイロットテスト用帯鋼走行ライン 広島研究所
の製鉄プロセス汎用テストラインを用い、エンドレスループで試験を行
った。
Pilot test line for low inertia roll.

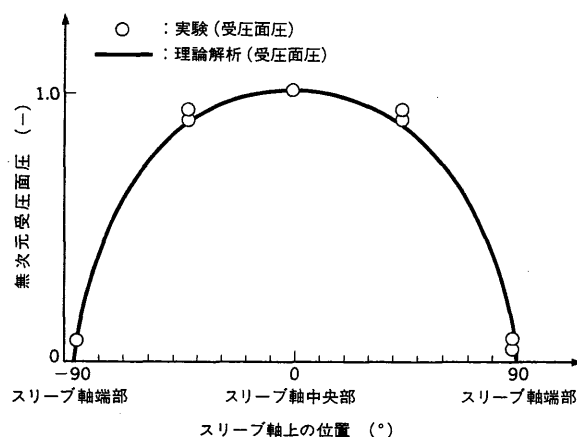


図5 受圧面圧周方向分布 受圧面圧はスリーブ軸の中央部で
高く、スリーブ軸端部に向かって低下する。
Circumferential pressure distribution

ロット試験には、幅1000 mm、厚さ0.3 mmの帯鋼を用い、試験
条件としてユニットテンションを 4.9×10^8 Pa、帯鋼の最高速度を
1000 m/minに設定して、パイロット試験を実施した。

パイロット機のスリーブ軸表面に薄肉スリーブの浮上量測定用
の渦電流センサと受圧面圧測定用のマノメータを取付けた。

3.2 パイロット試験結果

(1) 受圧面圧力分布

図5に受圧面の周方向圧力分布を最大受圧面圧で無次元化し
て示す。図中には、式(1)~(5)を用いて計算した理論解析結果
を合せて示した。図5で示した実験値については、低慣性ロー
ルの受圧面の周方向圧力分布形状は、スリーブ軸方向のどの任
意の輪切り断面においてもほぼ同じになることを確認している。
周方向圧力分布は疑似放物線状分布となっており、スリーブ軸
の中央部(図1A点)で高く端部(図1B点)に行くほど圧力
は低くなっている。この傾向は理論解析と実験において定性的
かつ定量的に良く一致している。端部で圧力が低くなる理由は、
受圧面流路内の流体が中央部から端部に向かって流れる際に流
体が加速し静圧が低下すると同時に、壁面との流体摩擦によ
る圧力損失が生じるためである。図中には現れていないが、中
央部の受圧面圧はプレナム圧とほぼ等しくなっており、プレナ
ム室圧をほぼ極小化できている。

(2) 薄肉スリーブの浮上量

図6に薄肉スリーブの速度が0 m/minの場合における供給空
気流量と薄肉スリーブの周方向の平均浮上量との関係を示す。

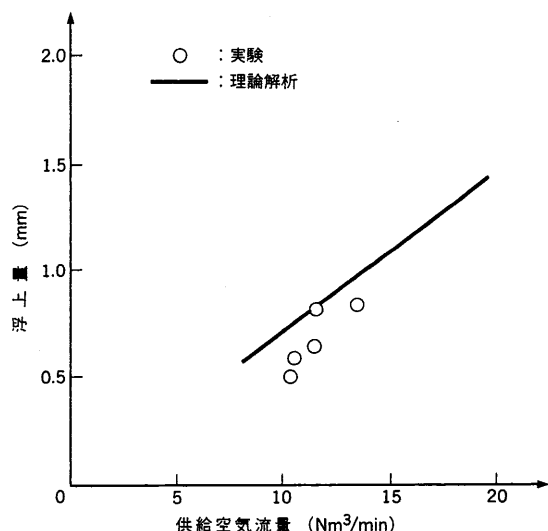


図6 供給空気流量と薄肉スリーブの浮上量（帯鋼の速度 0 m/min） 供給空気流量の増加に伴い薄肉スリーブの浮上量が増加する。
Relation between flow rate of air and floating gap

供給空気流量の増加は薄肉スリーブの浮上量増加に結び付くことが確認できた。供給空気流量を増加することにより、薄肉スリーブとスリーブ軸の間の受圧面流路を通過する空気流量が増加し、薄肉スリーブの浮上量が増加することが理論解析並びに実験結果から示されている。

同一流量において、実験での浮上量が理論解析での浮上量よりも少なくなっているのは、受圧面流路の圧損係数が理論式(4)で正しく表現されていないこと、あるいは薄肉スリーブの変形による浮上量分布があることなどが考えられる。

図7には、薄肉スリーブの浮上量に及ぼす帯鋼の速度の影響を示す。薄肉スリーブが回転した場合には、受圧面流路の空気の流れにジェット流の影響〔式(1)右辺第2項の影響〕が現れる。薄肉スリーブの回転によって図1中B点では受圧面流路内への空気の流入が、また、図1中C点では受圧面流路内から空気の流出が促進される。帯鋼の速度が速い場合ほど浮上量が低下するという実験結果から、この流入及び流出の効果は等しくなく、流出効果が勝っているものと判断される。理論解析でもこのことを考慮し計算を行った。帯鋼の速度が速くなるほどジェット流の影響により薄肉スリーブの浮上量が低下する現象が現れている。

ただし、帯鋼の速度が1000 m/minの場合においても0 m/minの場合と同様に薄肉スリーブは安定浮上しており、ジェット流

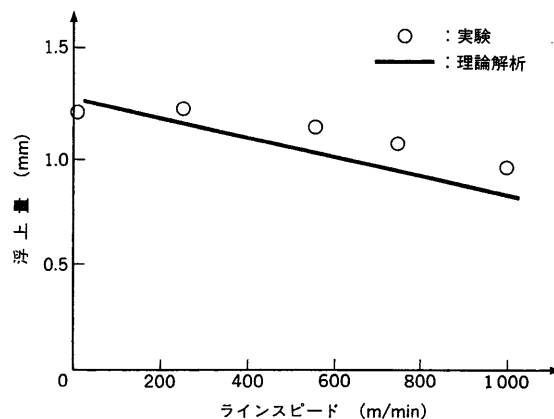


図7 薄肉スリーブの浮上量に及ぼす帯鋼の速度の影響
ライン速度が増加することで薄肉スリーブの浮上量が若干減少する。
Effect of line speed on floating gap

の影響で浮上量が低下してもスリーブ軸との接触は発生していない。

以上のパイロット試験により、低慣性ロールが最大1000 m/minの帯鋼速度まで安定浮上することが分かった。さらに、低慣性ロールの浮上原理を表現する基本式(1)～(5)が設計式として実用可能であることが確認できた。

4. あ と が き

帯鋼の薄物高速ラインでの帯鋼表面の擦り傷防止のために、ロールの慣性モーメントを低減化し、急加速・急減速に追従可能な低慣性ロールの開発を行った。

本低慣性ロールは帯鋼から薄肉スリーブに作用する荷重を空気圧によって支持し、薄肉スリーブをスリーブ軸から浮上させ回転自由としたことに特徴を有する。

本低慣性ロールが製鉄用表面処理プロセスの薄物高速ラインはもとより、紙、プラスチックフィルム等の薄物高速ラインに適用されることを期待する。

参 考 文 献

- (1) 高原, 平井ほか, 製鉄プロセスライン用帯鋼浮上搬送装置の開発, 三菱重工技報 Vol.29 No.1 (1992) p.36
- (2) 平井, 三原, 進, 連続亜鉛めっき浴中フロートの開発, 三菱重工技報 Vol.32 No.6 (1995) p.437
- (3) 柳, 田口, 平井, 製鉄プロセスライン用汎用テストライン, 三菱重工技報 Vol.25 No.4 (1988) p.311
- (4) Schlichting, H., Boundary Layer Theory, McGRAW-HILL BOOK Co. (1979) p.84~85