

製鉄プロセスラインの ストリップ形状制御・制振装置の開発

Study on Shape Control and Vibration Absorber
of Strip in Steel Process Line

技 術 本 部 森 井 茂 樹^{*1} 川 田 則 幸^{*1}
井 上 淳 司^{*2}
広 島 製 作 所 末 盛 秀 明^{*3} 佃 和 弘^{*4}

製鉄プロセスラインにおいて、ストリップ（帯状の鋼板）の表面処理品質の向上、操業速度のアップには、プロセス中のストリップ形状を適切に制御し、かつ振動を低減させることが重要となる。このため、電磁石の吸引力を利用した、非接触のストリップ位置決め制御装置を開発した。本装置は板幅方向に3軸以上の多軸吸引制御を行うことで、ストリップのCぞり（板断面内の変形）を弾性変形範囲内でフラットに保ち、同時に制振効果も発生させる。要素試験で十分な矯正・制振能力があることを確認するとともに、連続亜鉛めっきラインの試験でも亜鉛付着量を調整するワイピングノズル直上に本位置決め制御装置を設置することで、実用上有効な効果を確認した。

In a steel process line, the shape controller and vibration absorber are important devices which improve strip quality and line speed. Here, we report on the application of an electromagnetic method of absorbing vibrations and correcting the deformation of strips. We confirmed that the device is beneficial when used in a continuous galvanizing line.

1. 緒 言

製鉄プロセスラインにおいて、表面処理材の品質及び操業速度の向上を行う際、プロセス部でのストリップ（帯状の鋼板）の形状を制御し振動を抑えることが重要な課題となる。例えばCGL（連続亜鉛めっきライン）においては、亜鉛付着量を調整するワイピングノズル位置で、ストリップにCぞり等の板幅方向の変形及び振動があると付着量にばらつきが生じ、表面処理の品質が低下する。また、振動振幅やCぞり等の変形が大きいとプロセス機器との接触頻度が増すため、操業速度向上の妨げとなる。

さらに化粧鋼板や表面処理鋼板などの高級鋼板の増加に伴い、搬送ロールとの接触を極力なくす無傷化傾向が強くなっている。そのためのロールレス化により、ロール間隔が長くなりストリップにCぞりと振動が発生しやすい状況にある。

そこで、これらの課題を解決する手法として、当社が有する磁気軸受⁽¹⁾や磁気浮上装置⁽²⁾に用いられる非接触位置決め技術及び振動制御技術を適用したストリップ形状制御・制振装置を開発した。本報では要素試験及び実ライン適用例としてCGLでの試験結果を述べる。

2. ストリップの形状制御・制振方法

製鉄プロセスラインにおいて、対象とするストリップは板幅600~1800 mm、板厚0.3~6 mm程度である。ライン中で焼鈍やメッキを行い、ライン長さは数kmに及ぶ、その間ブライドルロールでストリップに張力を掛けロールで支持しているが、ロール間隔は長いところでは50 mにも及ぶ。このように張力下でロール支持されたストリップは、両端支持の弦とみなされ、その固有振動数は以下の式で表せる。

$$f = \frac{n}{2L} \sqrt{\frac{\sigma}{\rho}} \quad n=1, 2, \dots \quad (1)$$

ここで、

L : ロールスパン (m)

σ : ユニット張力 (N/m²)

ρ : ストリップの密度 (kg/m³)

f : 固有振動数 (Hz)

これらの固有振動数のうち振動として問題になる固有値に対して減衰及び剛性を与え、振動振幅を低減することが制振の目標である。

また、ストリップは幅方向に対して、両端が同相、中心部が逆相になるC型形状に変形しやすい。これをフラットに制御するには幅方向3組の電磁石配置が基本的に必要となる。しかし、幅方向の形状がより複雑になったW型の変形にも対応するためには、幅方向に5組以上の電磁石を配置する必要がある。

実際の制御は図1(a)に示すように、ストリップを挟んで対向する1組の電磁石とストリップの変位を計測するセンサの組を1軸とし、これらをストリップの幅方向に複数軸配置することで形状制御及び制振を行う。また制御回路は図1(b)に示すブロック線図のように、変位信号に対しPI制御と位相補償の直列回路を用い、ストリップの形状制御、すなわち位置決めを行いながら、剛性と減衰を作用させる。その際、静的不安定及びスピルオーバー（高次モードに対する制御干渉）が生じないように制御定数を決定する必要がある。静的不安定については、電磁石が本来持っている不安定力（電磁石に近づくほど吸引力が大きくなる特性）に対し、張力をかけたストリップの剛性と制御によって生じる復元力で安定になることを数値解析により確認している。スピルオーバーについては実験で限界値を求め、そのデータを基に定数を設定している。伝達特性の一例として、後から述べる要素試験時のストリップの変位から電磁石の吸引力までの伝達特性を図1(c)に併せて示す。

^{*1} 広島研究所応用・振動研究室主務 ^{*3} 製鉄機械設計部プロセスプラント課
^{*2} 広島研究所応用・振動研究室 ^{*4} 製鉄機械設計部制御装置課

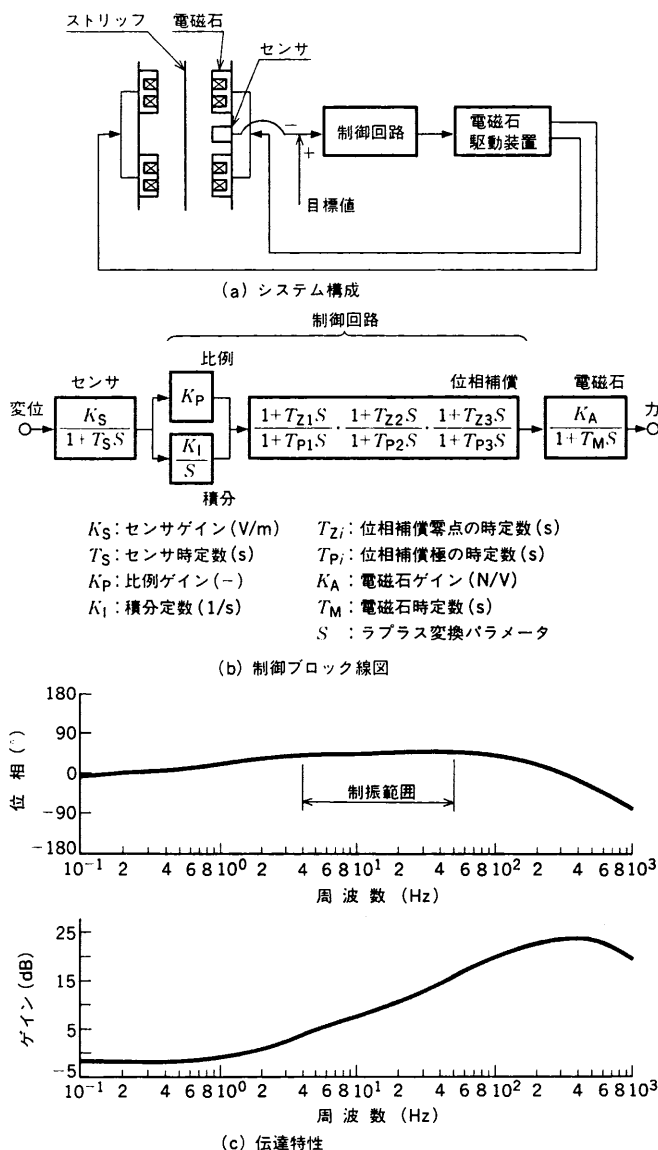


図1 装置構成及び伝達特性 装置1軸分の構成とそのブロック線図、さらに伝達特性の一例を示す。
System and transfer characteristics

3. 所内試験結果

3.1 制振効果の確認結果

停止時のストリップに対する制振効果を確認するための試験装置を図2に示す。板厚0.5mm、幅1000mmのストリップをロール間隔約4.1mに張り、ほぼ中央に幅方向3軸、走行方向に2列の形状制御・制振装置を設置した。試験はユニット張力 $9.8 \times 10^6 \text{ N/m}^2$ の状態、制御定数（比例ゲイン、積分ゲイン）を変え、制振効果を確認した。その制御定数の一例を伝達特性で図1(c)に示した。なお図1(c)の特性は1~10次の固有値に対し位相を進ませ減衰を与えることをねらって設計してものである。また、上記試験において、ハンマリングで測定した1次の固有振動数と減衰比 ξ を図3(a), (b)に示す。固有振動数は3.2Hzが4.5~5.0Hzに上がっており、剛性が2倍になっていることを示している。または減衰比は2%が6~15%に上がっており、1/(2 ξ)で表せる共振倍率が最大1/7に低減している。これらから、適切なパラメータを選択することで、共振時の振幅を最高1/14に低減できることが分かる。

図3(a), (b)には数値解析で計算した値も併せて示している。1

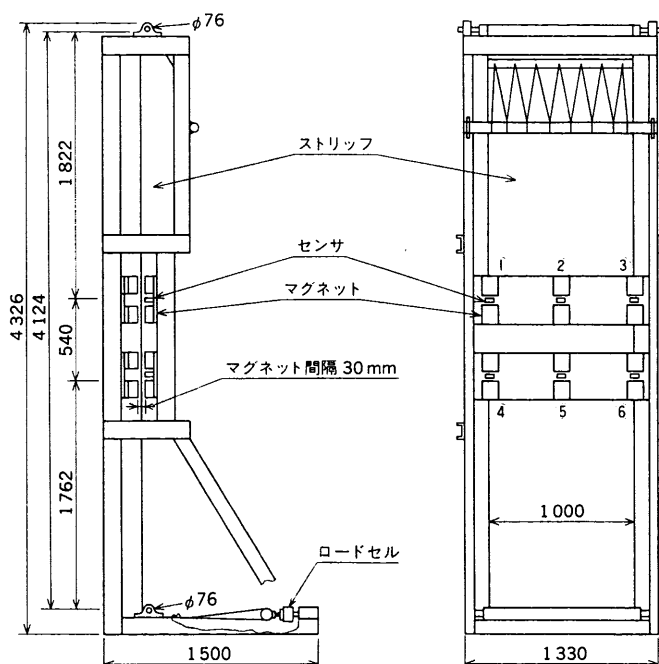


図2 ストリップ停止状態の試験装置 要素試験で使用したロールスパン約4.1mの試験装置。
Test device of suspended strip

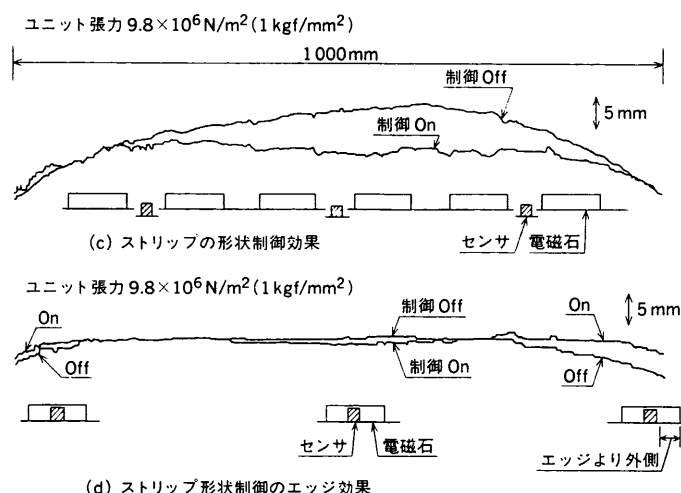
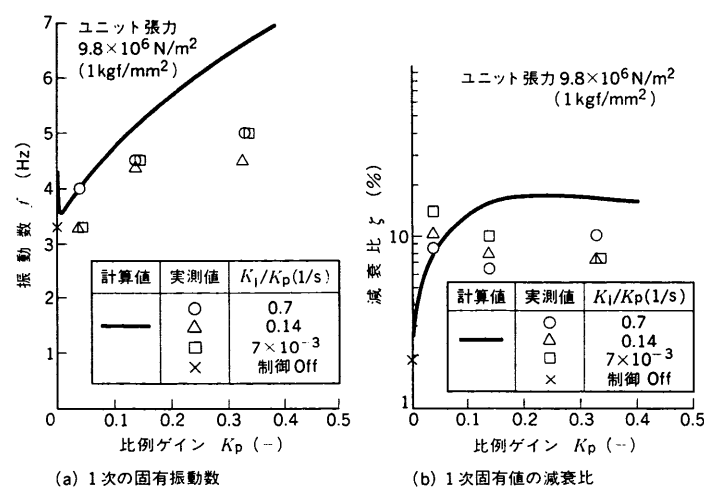


図3 ストリップ停止状態の試験結果 ストリップが停止した状態での、1次固有振動数及び減衰比、さらに形状制御結果を示す。
Natural frequency and damping ratio, and shape control

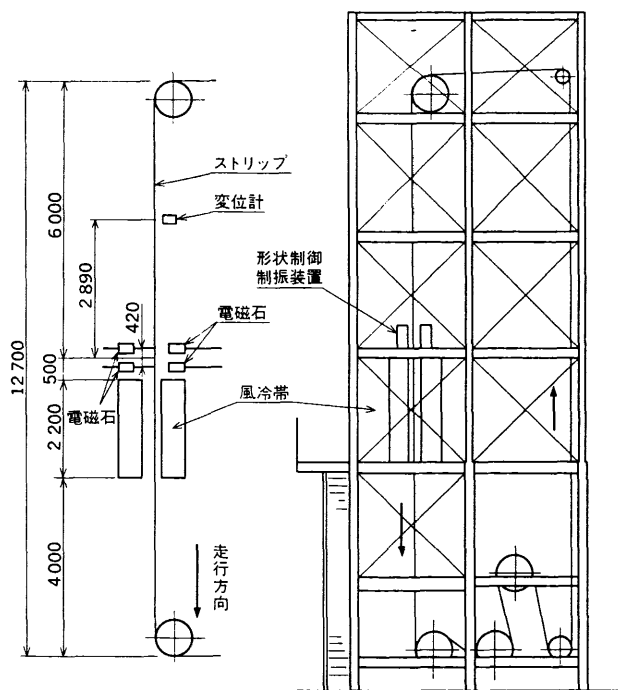


図4 プロセスライン試験装置 ストリップを走行させた試験を行ったロールスパン 12.7m の試験装置。
Test device in process test line

次の固有振動数は制御 Off の状態で、実測値に対し計算値が 1.3 倍程度高めであり、制御 On の状態でもその傾向を示している。これは縦方向に張ったストリップの両端を固定端で計算しており、実際より剛性を高く見積もったものと考えられる。ゲインアップと共に固有振動数が高くなる傾向は実験値と一致しているので、実ラインのようにロール径が大きく剛性の高いものに対しては十分予測可能と考えられる。また固有振動数の計算値で制御 Off の値に対しゲイン 0 付近の値が低いのは、電磁石の不安定力が制御で生じる復元力に対して大きいためと考えられる。つぎに減衰比の計算値はオーダ的に実測値と近く、制御定数設定の際に減衰の大きさを概算するには十分有効であると考えられる。

3.2 形状制御効果の確認

電磁石とセンサの配置を変えた形状制御の効果を図 3(c), (d) に示す。まず図 3(c) に示した電磁石とセンサ配置では、15 mm 程度の反りが両エッジのセンサ間では 2 mm 程度に低減できている。しかし両端のセンサの外側では電磁石の吸引力により反りが増大する。そこで図 3(d) に示すように、1 軸の構成を電磁石 2 個を縦に置き、その間にセンサを配置 (図 2 の電磁石とセンサの配置) し、センサがストリップのエッジ部に来るよう幅方向の位置を広げた。この配置ではエッジ部まで形状制御が可能となり、エッジ部にセンサを置くことの有効性が確認できた。

3.3 プロセスライン試験結果

走行するストリップに対する制振効果を確認するため、当社の製鉄プロセスラインに形状制御・制振装置を設置し走行時の試験を行った。テストラインの状況を図 4 に示す。試験に使用したストリップは停止状態の試験と同一仕様であるが、ロールスパンが 12.7 m と長くなっている。このため制御定数は弦の固有振動数の式(1)に基づき変更を行った。

制振効果を調べるため、本装置の位置でハンマリングを行い、停止時と走行時の比較を行った。その結果を表 1 に示す。1 次固有値の減衰比は停止時約 3 倍になったものが、走行時でも約

表 1 1 次固有値減衰比
Damping ratio of 1st modal

ラインスピード 制 振	15.5 m/min	44.6 m/min	0 m/min
Off	3.3%	2.9%	1.9%
On	11%	11%	5.5%

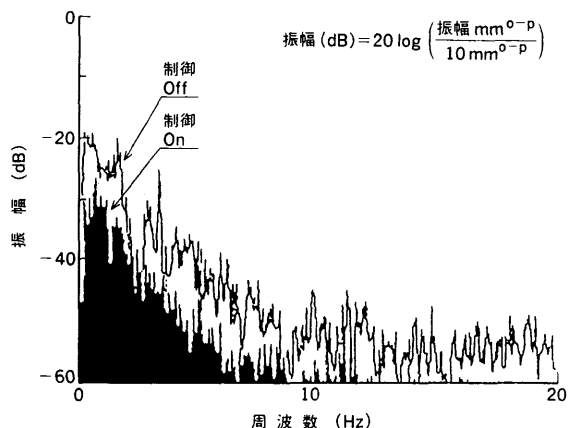


図5 風冷帯による加振試験の周波数スペクトル 風冷帯のエアーストリップを加振した試験、約 10 dB 振幅が低減する効果が確認できた。
Frequency spectrum of exciter test by cooling air

3~4 倍になり、走行時の制振効果が確認された。

さらに製鉄プロセスラインでの加振源の代表例である風冷帯の外乱に対する制振効果を確認した。その結果を図 5 に示す。オーバオールでの振動振幅が約 10 dB すなわち 1/3 に低減しており、強制振動に対しても剛性アップ分にはほぼ見合った効果が確認された。また高次の周波数に対しても効果があることが図 5 から分かる。

4. 実ライン試験

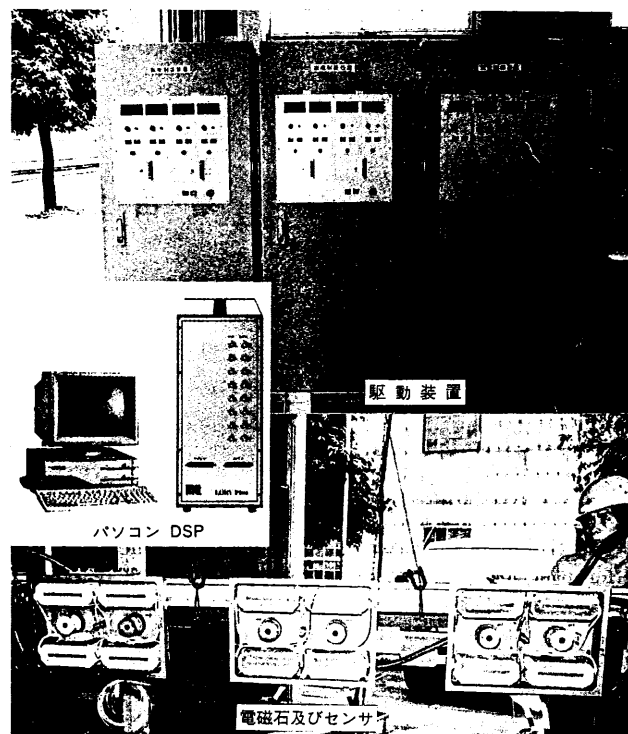
4.1 実ライン用の装置

実ライン用 6 軸制御の装置構成を図 6(a) に示す。制御部にデジタル方式の DSP (Digital Signal Processor) を使用し、板厚や張力などのライン条件に応じて、最適な制御定数に自動変更する機能を持たせることができた。電磁石の駆動装置は PWM 制御で 6 軸を独立に駆動する。ストリップの片面に設置するケーシング内の電磁石とセンサの配置は、1 軸当たり 2 個の電磁石を上下に配置し、その間にセンサを設置している。また電磁石は板厚の薄い鋼板に対しても十分な吸引力が得られるように設計した。ストリップのように板厚の薄い鋼板に吸引力を作用させる際、鋼板内部で磁束密度が飽和しやすく、十分な吸引力が得られない場合がある。吸引力の特性を図 6(b) に示す。0.58~0.98 mm の薄い板に対し 10 kgf/軸 以上の吸引力を出している。

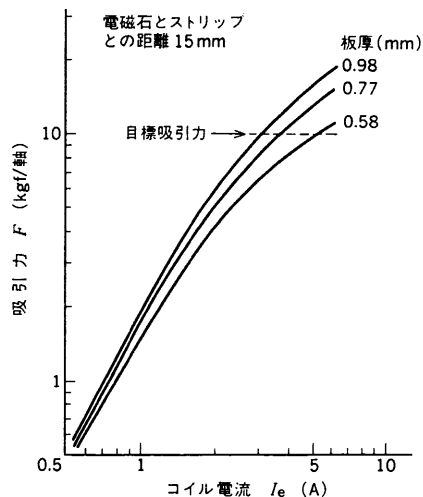
4.2 実ライン試験結果

新日本製鐵(株)八幡製鐵所 4 CGL に本試験装置を設置し実験を行った。

形状制御と制振の試験結果を板厚 0.8 mm、板幅 1700 mm のストリップを例に示す。まず形状制御の結果を図 7(a) に示す。制御 Off の状態でストリップを幅方向に傾いて走行させ、両エッジ間の変位が 3.5 mm の状態を作った。このときの垂鉛付着量のばらつきは幅方向に 20 g/m² 程度である。これに形状制御を行い幅方向の形状をフラットにし、その後ストリップを後面側から



(a) 装置構成



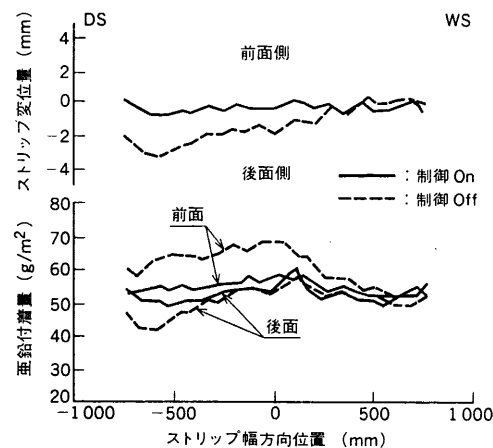
(b) 電磁石の吸引力特性

図6 実ライン用装置 CGLに適用する際の装置と電磁石の吸引力特性を示す。
Devices for CGL

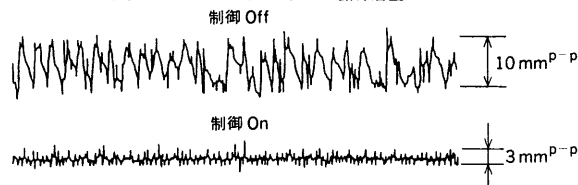
前面側へ平行移動させた。この操作でストリップの幅方向の変位を1 mm以内に収めることができ、幅方向の付着量のばらつきが10 g/m²に半減した。さらに表・裏の付着量も等しくできた。

制振の結果を図7(b)に示す。振動振幅は図7(a)の制御OnとOffに対応しており、板のエッジ付近の振動である。この図からも明らかなように、オーバーオールで振幅は10 mm^{P-P}から3 mm^{P-P}に低減していることが分かる。他のデータも総合すると6~18 mm^{P-P}の振動を3 mm^{P-P}程度までに低減できる効果を確認できた。

なお、本装置上方のサポートロールを閉から開にして、長ロールスパンでの試験も実施した。形状制御は長ロールスパンでも良好な結果が得られた。しかし、ロールスパンに比べ本装置の位置は浴中サポートロールに近く、振動モード上、節近辺となり、制



(a) ストリップの断面形状と垂鉛付着量



(b) ストリップの振動振幅

図7 実ラインでの実験結果 CGLラインに適用した結果の一例、付着量のばらつきを10 g/m²までに低減。
Effect of application test in CGL

御効果は上述ほど効果はなかった。

5. 結 言

非接触でストリップの形状を制御し振動を低減する装置を開発し、その性能を確認する試験を行い、以下の結論が得られた。

- (1) 制振効果は要素試験で共振振幅を最高1/14に低減でき、風冷帯による外乱に対しても振幅を1/3に低減できる効果を確認できた。
- (2) 形状制御は要素試験で1000 mmの板幅に対し、C型に15 mm反ったストリップを2 mm程度に低減する効果を確認できた。
- (3) CGLの実ラインで試験した結果、幅方向の付着量のばらつきを20 g/m²から10 g/m²に低減し表・裏の付着量も等しくできた。制振も6~18 mm^{P-P}の振動を3 mm^{P-P}程度に低減でき、その効果を確認できた。

上記により、本装置は実用化のレベルに達したと考えられる。今後は、操業条件に応じた自動パラメータ変更機能などの装置化上の充実を図っていきたい。

最後に、本装置の実ライン試験の機会を与えていただくと同時に、試験に際し適切な御助言をいただきました、新日本製鐵(株)八幡製鐵所表面処理技術室 末永 真 掛長、機械技術室 飯田 寛 掛長に対し深く感謝の意を表します。

参 考 文 献

- (1) 片山ほか、能動型磁気軸受の開発、三菱重工技報 Vol.25 No.3 (1988) p.274
- (2) 川田ほか、薄板鋼板の磁気浮上特性、第2回電磁力関連のダイナミックスシンポジウム講演論文集 (1990) p.59
- (3) 森井ほか、電磁石によるストリップの制振・形状制御、第4回電磁力関連のダイナミックスシンポジウム講演論文集、(1992) p.429