電磁石による鋼板形状制御時の安定性に関する考察*

井 上 淳 司^{*1}, 藤 岡 宏 規^{*2}
森 井 茂 樹^{*3}, 小 森 望 充^{*4}Study on Stability of Steel Strip Under the Electromagnetic
Shape ControllerAtsushi INOUE^{*5}, Hironori FUJIOKA,
Shigeki MORII and Mochimitsu KOMORI^{*5} MITSUBISHI HEAVY INDUSTRIES, LTD., HIROSHIMA R & D CENTER,
4-6-22 Kan-on-shin-machi, Nishi-ku, Hiroshima-shi, Hiroshima, 733-8553 Japan

In a steel process line, shape controller of steel strip which use an electromagnet are important devices which improve strip quality and line speed. It is confirmed that the devices are beneficial when these are applied to continuous galvanizing line (CGL). However, it is necessary to avoid a static instability phenomenon by the negative spring of the electromagnet, and a spill-over phenomenon to be caused by the high gain of the control system in this device. We proposed the analysis model combining the control system with the steel strip. The model was applied to a real machine to confirm the availabilities. Moreover, this paper discusses the static instability phenomenon and the spill-over phenomenon.

Key Words: Flexible Structure, Vibration Control Device, Electromagnetic Induce Vibration

1. 結 言

製鉄プロセスラインでは、熱処理による鋼板強度の向上や亜鉛メッキ等の表面処理を行い、鋼板の付加価値を高める。そこでは、品質の向上と共に操業効率の向上が望まれている。

例えば図1に示す連続溶融亜鉛メッキライン(CGL: Continuous Galvanizing Line)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、鋼板にそり等の板幅方向の変形及び振動があると亜鉛付着量にバラツキが生じ、表面処理の品質が低下する⁽¹⁾⁽²⁾。また、品質(目付量)を確保するため厚めに目付を行い、無駄な亜鉛を消費している。このため付着量均一化による亜鉛消費量の低減も望まれている。しかしながら、メ

ッキ直後の鋼板は亜鉛が凝固していないためロールで支持することが出来ず、かつ品質向上を図る様々な処理を行うため、搬送ロールの間隔が大きくなり、鋼板のそりが発生しやすい状況にある。

そこで、亜鉛メッキ鋼板の目付量を調整するワイピングノズル近傍で、そり量を低減する鋼板形状制御装置を開発した⁽³⁾。電磁石をアクチュエータとする本装置は、磁気軸受や磁気浮上装置で用いた非接触位置決めおよび振動制御技術が適用されている。電磁石の使用により、電磁石の負のばねによる静的不安定現象、あるいは制御系の高ゲインに起因するスピルオーバー現象を回避する必要がある。これまでに、磁気軸受の弾性ロータ⁽⁴⁾や鋼板の磁気浮上⁽⁵⁾⁽⁶⁾については不安定現象の回避方法が研究されている。本報では、実際のCGLに本装置を設置し、張力を与えた鋼板を電磁石で位置決め制御を行う際の不安定現象を対象とする。張力を与えた鋼板と電磁石をアクチュエータとする制御系を連成させた解析モデルを作成し、静的不安定およびスピ

* 原稿受付 2008 年 1 月 7 日。

^{*1} 正員, 三菱重工業(株)広島研究所(〒733-8553 広島市西区観音新町4-6-22)。^{*2} 三菱日立製鉄機械(株)(〒733-8553 広島市西区観音新町4-6-22)。^{*3} 正員, MHI ソリューションテクノロジーズ(株)(〒733-8553 広島市西区観音新町4-6-22)。^{*4} 正員, 九州工業大学工学研究科(〒804-8550 北九州市戸畑区仙水町1-1)。

E-mail: atsushi_inoue@mhi.co.jp

ルオーバー現象を解析し、かつ回避方法について考察した結果を報告する。

Fig. 1 Device arrangement in CGL

2. 製鉄プロセスラインに於ける装置構成

ワイピングノズルでは、亜鉛が付着した鋼板に向かって高速にエアを吹き付けることで余分な亜鉛を掻き落とす。そこで、ワイピングノズル位置で鋼板のそりを抑えることによって亜鉛の付着量均一化を図るため、図2に示すようにワイピングノズル付近に本装置を設置した。本解析に用いた装置の仕様を表1に示す。

本装置は鋼板の変位をセンサで計測し、目標値との偏差信号を制御部に送り、鋼板を目標位置に追従させるため、鋼板の両面に設置した電磁石を駆動させる。この装置を板幅方向に複数台設置し、板幅方向全般に於いてそりを低減することが出来る。

Fig. 2 Device for CGL

Table 1 Specifications of shape control & vibration absorber

Device	Specifications
Displacement sensor	Range/volt : 25mm / 5V
Control circuit	DSP computing speed : 0.4msec
Amplifier	Rated output current : 7.2A
Electromagnet	Magnetic force : 49N/each at 3.9A Distance between Steel and Magnet : 15mm

3. 安定性限界の解析

3・1 解析モデル 鋼板を安定に位置決め制御するため、制御系と鋼板を連成させた解析を行い、安定限界の把握および、不安定現象の回避を行う。図3はCGLに本装置を設置し、張力を与えた鋼板と制御系を連成させたモデルである。通常板幅は900~1800mmに対し、ロール間の長さが14~50m程度あるため、板幅方向を無視し、張力の作用した弦モデルとして取り扱う。電磁石を用いたフィードバック制御系の鋼板への作用は、周波数特性を有するばねおよび減衰器としてモデル化する。また、実際の製鉄ラインにおける鋼板は100 m/min程度の速さで搬送されるが、鋼板の振動特性への影響を無視出来る搬送速度であり、鋼板は静止状態でモデル化した。

Fig. 3 Strip model

まず、張力作用させた鋼板を一様弾性棒として有限要素の定式化を行う。図4は要素の長さ l 、両端の節点番号を1, 2とし、両端に作用する張力を T 、両端のたわみ量および回転角を $u_1, u_2, \varphi_1, \varphi_2$ 、要素の両端に作用する外力とモーメントを V_1, V_2, T_1, T_2 で表すと、本要素の運動方程式は式(1)のように与えられる⁷⁾。

$$[m] \{\dot{\xi}\} + [c] \{\xi\} + [k] \{\xi\} = \{f_\xi\} \quad (1)$$

ここで

$$\{\xi\} = (u_1, \varphi_1, u_2, \varphi_2)^T$$

$$\{f_\xi\} = (V_1, T_1, V_2, T_2)^T$$

ただし、 $[m]$ は質量行列、 $[c]$ は減衰行列、 $[k]$ は剛性行列を表し、それぞれ式(2)～式(4)示す対称行列となる。張力を与えた鋼板では、式(4)に示す剛性行列において弾性棒の持つ材料力学的な剛性に、第2項に示す張力 T が作用することで発生する剛性を加える。

Fig. 4 Uniform flexible beam

$$[m] = \frac{\rho A l}{(1+\varepsilon)^2} \begin{pmatrix} \frac{13}{35} + \frac{7}{10}\varepsilon + \frac{1}{3}\varepsilon^2 & \left(\frac{11}{210} + \frac{11}{120}\varepsilon + \frac{1}{24}\varepsilon^2\right)l & \left(\frac{13}{105} + \frac{1}{60}\varepsilon + \frac{1}{120}\varepsilon^2\right)l^2 & \frac{13}{35} + \frac{7}{10}\varepsilon + \frac{1}{3}\varepsilon^2 \\ \left(\frac{11}{210} + \frac{11}{120}\varepsilon + \frac{1}{24}\varepsilon^2\right)l & \frac{9}{70} + \frac{3}{10}\varepsilon + \frac{1}{6}\varepsilon^2 & \left(\frac{13}{420} + \frac{3}{40}\varepsilon + \frac{1}{24}\varepsilon^2\right)l & -\left(\frac{11}{210} + \frac{11}{120}\varepsilon + \frac{1}{24}\varepsilon^2\right)l \\ -\left(\frac{13}{420} + \frac{3}{40}\varepsilon + \frac{1}{24}\varepsilon^2\right)l & -\left(\frac{13}{420} + \frac{3}{40}\varepsilon + \frac{1}{24}\varepsilon^2\right)l & -\left(\frac{1}{140} + \frac{1}{60}\varepsilon + \frac{1}{120}\varepsilon^2\right)l^2 & \left(\frac{13}{105} + \frac{1}{60}\varepsilon + \frac{1}{120}\varepsilon^2\right)l^2 \end{pmatrix}$$

$$+ \frac{\rho l}{(1+\varepsilon)^2} \begin{pmatrix} \frac{6}{5} & \left(\frac{1}{10} - \frac{1}{2}\varepsilon\right)l & \left(\frac{2}{15} + \frac{1}{6}\varepsilon + \frac{1}{3}\varepsilon^2\right)l^2 & \frac{6}{5} \\ \left(\frac{1}{10} - \frac{1}{2}\varepsilon\right)l & -\frac{6}{5} & \left(-\frac{1}{10} + \frac{1}{2}\varepsilon\right)l & \left(\frac{1}{10} - \frac{1}{2}\varepsilon\right)l \\ \left(\frac{2}{15} + \frac{1}{6}\varepsilon + \frac{1}{3}\varepsilon^2\right)l^2 & \left(-\frac{1}{10} + \frac{1}{2}\varepsilon\right)l & \left(-\frac{1}{30} - \frac{1}{6}\varepsilon + \frac{1}{6}\varepsilon^2\right)l^2 & \left(\frac{2}{15} + \frac{1}{6}\varepsilon + \frac{1}{3}\varepsilon^2\right)l^2 \end{pmatrix} \quad (2)$$

$$[C] = \beta [k] \quad (3)$$

$$[k] = \frac{EI}{(1+\varepsilon)^3} \begin{pmatrix} 12 & 6l & -12 & 6l \\ 6l & (4+\varepsilon)l^2 & -6l & (2-\varepsilon)l^2 \\ -12 & -6l & 12 & -6l \\ 6l & (2-\varepsilon)l^2 & -6l & (4+\varepsilon)l^2 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \frac{T}{l} & 0 & -\frac{T}{l} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{T}{l} & 0 & \frac{T}{l} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad (4)$$

ここで、 ρ は密度、 A は断面積、 I は断面二次モーメント、 E は縦弾性係数、 ε はひずみ量、 β は材料減衰係数を表す。

各要素の運動方程式を用いることで、有限要素法の手順に従い、鋼板全体の運動方程式が式(5)の通り組み立てられる⁷⁾。

$$[M] \{\ddot{X}\} + [C] \{\dot{X}\} + [K] \{X\} = \{F\} \quad (5)$$

ここで

$$\{X\} = (u_1, \varphi_1, u_2, \varphi_2, \dots)^T$$

式(5)の右辺は外力の作用を表し、本装置の場合電磁石をアクチュエータとする鋼板変位に応じた吸引力が働く。

3・2 制御特性のモデル化 鋼板の位置決め制御は、鋼板の変位信号と目標値の差分を取り、制御回路を通して鋼板の両側設置した電磁石を駆動させることで実施する。制御のブロック線図を図5に示す。

Fig. 5 System and block diagram

制御方式はP（比例）、I（積分）と位相補償回路の直列結合である。センサと電磁石は遅れ系であり、減衰性を作用させるため位相補償回路を設けている。鋼板に作用する吸引力を表すため、ラプラス変換後の鋼板の変位 $U(s)$ と吸引力 $F(s)$ との伝達関数 $B(s)$ を式(6)の通り表し、制御系の動特性を考える。

$$B(s) = \frac{F(s)}{U(s)} \quad (6)$$

鋼板の変位 $U(s)$ に対して、電磁石を含む制御系は次の受動部特性と能動部特性を持つ。受動部特性 $F_M(s)$ は式(7)で表され、制御特性に関係なく変位に応じて電磁石に鋼板が吸引される力である。

$$F_M(s) = K_M \cdot U(s) \quad (7)$$

ここで、 K_M [N/m] は電磁石の受動特性を表す。これは図2に示すように鋼板の両側に電磁石を配置し、バイアス電流を印加する。磁気軸受と同様に、この状態

から鋼板が変位した際に、変位方向へ鋼板を吸引する力が発生し、式(8)に示すようにばね定数として表す。

$$K_M = -4K_T \frac{i_B^2}{\delta_g^3} \quad (8)$$

K_T [N(m/A)²] は電磁石定数、 i_B [A] はバイアス電流、 δ_g [m] は鋼板と電磁石の距離を表す。

また能動部特性 $F_A(s)$ は鋼板の変位に応じた制御系を介して鋼板に作用する吸引力で、図5のセンサから電磁石までの伝達特性として式(9)で表すことが出来る。

$$F_A(s) = \frac{K_s}{1 + T_s \cdot s} \cdot K_F \cdot \left(K_P + \frac{K_I}{s} \right) \cdot \frac{1 + T_{z1} \cdot s}{1 + T_{p1} \cdot s} \cdot \frac{1 + T_{z2} \cdot s}{1 + T_{p2} \cdot s} \cdot \frac{1 + T_{z3} \cdot s}{1 + T_{p3} \cdot s} \cdot \frac{K_A}{1 + T_M \cdot s} \quad (9)$$

ここで、 K は各要素のゲイン、 T は時定数を表す。なお K_A [N/A] は電磁石の能動特性であり式(10)で表す。電磁石の能動特性 K_A は、受動特性 K_M と同様にバイアス電流を印加した電磁石を鋼板の両側に配置し、鋼板が変位した際、目標位置へ鋼板を戻すために電磁石に制御電流が流れ、この電流で発生する吸引力を表したものである。

$$K_A = 4K_T \frac{i_B}{\delta_g^2} \quad (10)$$

以上が図5に示す制御ブロック線図の動特性である。

次に式(6)へ $s = j2\pi f$ を代入すると、周波数 f に依存した制御系の複素動剛性が式(11)で表せる。

$$b(f) = B(j2\pi f) = b_R(f) + jb_I(f) \quad (11)$$

ここで、添字の R は実部を I は虚部を示し、これをナイキスト線図に描いたものを図6に示す。これは鋼板変位に応じた電磁石の吸引力特性でもあり、式(6)を介して鋼板への外力として鋼板の運動方程式(5)へ代入し次の通り表すことが出来る。

$$[M] \{\ddot{X}\} + \left[C + \frac{1}{2\pi f} b_I(f) \right] \{\dot{X}\} + [K + b_R(f)] \{X\} = 0 \quad (12)$$

鋼板への作用は図6のナイキスト線図で示すように、0.1Hz 以下の低周波数域では電磁石の受動的特性に起因する静的不安定現象が発生する。0.1~20Hz の

領域は減衰性を有し制振効果を有する領域であり、この領域に鋼板の固有振動数の1次成分を入れるようにする。また外乱による鋼板の振動成分もカバーさせる。20Hz以上の高周波数域では再び不安定域となる。この領域の励振力は比例と位相補償によって決まり、無数の固有振動数が存在することでそれらが励起され、スピルオーバー現象が発生する可能性がある。

さらに電磁石が有限の幅を持つために、電磁石位置に於いて鋼板の回転角に対して式(13)で表せる受動的な回転ばね K_θ [Nm/rad]が発生する。これは制御時の安定性に影響を与えるものであり、式(12)の剛性行列に加える。

$$K_s = -\frac{1}{12} K_M \cdot d^2 \quad (13)$$

ここで、 d [m] は電磁石の鋼板長手方向の幅を表す。

Fig. 6 Nyquist plot (Frequency character of feedback system)

3・3 静的安定性解析結果 本装置に於ける静的不安定現象は、図6で示した低周波数の領域で、「張力を与えた鋼板の剛性+制御で与える剛性」 < 「電磁石の負剛性」の条件が成り立つ際に発生する。そこで鋼板と制御系を連成させた有限要素法にて鋼板に与えた張力と図5に示す制御系のフィードバックゲインをパラメータに式(12)を用いて固有値解析を行った⁸⁾。図7は鋼板の長さ14.9 m、板幅1250 mm、板厚0.8 mmの条件で板幅方向に6軸の電磁石を配置し、表1に示す装置仕様で解析した振動モードの一例である。フィードバックゲイン0.2は減衰比が正で安定であり、マグネット位置で節となるモードを示す。これに対しフィードバックゲインを低くした0.025では静的不安定となり、電磁石に鋼板が吸い付くモード

を示し、減衰比も負となり不安定であることを示している。

Fig. 7 Modal analysis results static instability

鋼板に与えた張力と制御系のフィードバックゲインをパラメータとした解析結果を図8に示す。正常に制御し安定な状態では、式(14)に示す張力を与えた弦の固有振動数にほぼ等しい値となる。

$$f = \frac{n}{2L} \sqrt{\frac{\sigma}{\rho}} \quad (14)$$

ここで、 σ [Pa] は鋼板に作用するユニット張力、 ρ [kg/m³] は鋼板の材料密度、 L [m] は両端を支持された鋼板の長さ、 n は固有振動数の次数を表す。

正常な制御の状態からフィードバックゲインを低くすると、図7に示す安定状態の振動モードから、電磁石に鋼板が吸い付くモードに移行し、固有振動数がほぼ0Hzとなり、減衰比も負の値を示す。これ以下のフィードバックゲインでは、電磁石の負剛性が、鋼板と制御系の剛性に勝り、静的不安定を起こす。また薄板鋼板の剛性は張力で決まるため、張力が高いほど低いフィードバックゲインでも安定となる。

静的不安定の一例として実際のCGLに適用した際の実験結果を図9に示す。板幅方向に6軸の電磁石で制御しておりCh1～Ch6は各軸のセンサで計測した鋼板の変位である。制御のフィードバックゲインを低くしたことによって、目標位置へ鋼板が移動するが、安定に位置決めできず電磁石に鋼板が吸い付けられる。吸い付けられ目標値から外れたことで、制御系が作用し反対側の電磁石へ電流が流れ反対側の電磁石に鋼板が吸い付けられる。この動作を繰り返す不安定現象で

ある。安定化のためには、図8に示すように、各張力に対する安定限界を解析にて把握し、フィードバックゲインの最低値を設定する必要がある。

Fig. 8 Static instability analytical result

Fig. 9 Static instability phenomena

3・4 動的安定性(スピルオーバー)解析結果

図3に示す解析モデルを使い、制御系のフィードバックゲインを過度に高くすることで発生するスピルオーバー現象を解析した。スピルオーバー現象は図6の周波数特性で位相補償領域より高い周波数域(図6の場合20Hz

以上)で鋼板の固有振動数成分が制御系によって励起される現象である。静的安定限界と同じ鋼板条件で行ったスピルオーバーの解析結果を図10に示す。鋼板の最も低い固有振動数を1次とし、これから33次(33番目)の固有振動数40.2Hzが負の減衰比(-0.275%)を持ち不安定であり外乱によって発振すること、すなわちスピルオーバー現象が発生することを示している。位相補償領域を越えた周波数域では、全ての固有振動数が電磁石位置と鋼板の振動モード比により励振効果に差があるが、必ず負減衰をとりスピルオーバーとなることを示す。そこで、各フィードバックゲインに於いて、全固有振動数の負減衰最大値をプロットした結果を図11に示す。フィードバックゲインを上げていくことで、負の減衰が増しよりスピルオーバー現象が発生しやすことが判る。実際の製鉄プロセスラインでは、鋼板や付属機器により減衰が作用し、解析上負減衰となっても必ずスピルオーバーが発生することはない。しかし図11のようにフィードバックゲインと負減衰の関係を定量的に把握出来ることで、実測の限界値を1点把握すれば、新たな設備における発生限界を予測することが出来る。

Fig. 10 Modal analysis results High-frequency instability

Fig. 11 High-frequency instability analytical result

図 12 は実際の製鉄ラインで過度にフィードバックゲインを上げ、フィードバックゲイン 0.2 でスピルオーバー現象を起こした例である。制御が ON とほぼ同時に鋼板の振動が発散的に増加する。その際に周波数分析結果を見ると、位相補償領域を越えた周波数 27~60Hz 付近の固有振動成分が制御系により励起されていることが判る。また、実際の製鉄ラインでは機器類の減衰があるために、解析上負減衰となっても必ずスピルオーバーが発生することではなく、フィードバックゲインを 0.2 まで上げることで初めて発生することも判った。

Fig. 12 High-frequency instability phenomena

4. CGLへの適用事例

実際の製鉄ラインへ本装置を適用する際、静的不安定やスピルオーバーといった不安定現象を起こさずに稼働させる必要がある。そのために、3章で示した解析を行い、静的不安定によるフィードバックゲインの下限、スピルオーバーによるフィードバックゲインの上限を設定する。また、設計段階で安定な制御定数が設定出来るため、実機適用時に安定限界を見極めながら制御定数を調整する必要がなく、不安定現象（振動）を発生させることによる鋼板と周辺機器との接触を防ぐことが出来る。

実際のラインへ本装置を適用した際の操業条件と使

用したフィードバックゲインを表2に示す。安定に使用出来るフィードバックゲインの範囲を拡げるため、減衰性を有し制振効果のある領域を約100Hzまで拡大し、3章で示した解析方法でフィードバックゲインの下限値と上限値を求めた。また、図11で示したように減衰比が-0.8%を越えるとスピルオーバー現象が発生するので、その値を取るフィードバックゲインを上限値とした。さらに、実際に使用するフィードバックゲインは下限値と上限値のほぼ中間値とした。

図13は本装置を適用した際、本装置のセンサで計測した鋼板の振動である。OFFの状態では本装置を使用しておらず、0.1~5Hzの周波数帯に最大200 μ mの振動が発生している。これに対しONの状態は本装置を使用しており、不安定現象は発生しておらず、かつOFFの状態で発生していた振動を十分に抑える結果も得られた⁽⁹⁾。

Table 2 Operational provision & feedback gain

Roll span	15 m
Steel strip width	908 mm
Steel strip thickness	0.9 mm
Unit tension	1.3×10^{-7} Pa
Feedback gain lower limit	0.2
Feedback gain upper limit	3.0
Applied feedback gain	1.0

Fig. 13 Effect of application test in CGL

5. まとめ

電磁石を用いた鋼板の非接触形状制御装置において、制御特性により発生する不安定現象について、次の通り解析的に予測した。

- (1) 張力を与えた鋼板と電磁石をアクチュエータとする制御系の連成解析モデルを作成した。
- (2) 同解析モデルを使い、電磁石に起因する受動部特性と制御系の能動部特性を考慮し、静的不安定の発生限界を解析し、鋼板に与えた張力と発生限界の関係を明らかにした。

- (3) 制御系のゲインを過度に高くすることで発生するスピルオーバー現象も同解析モデルで解析を行い、スピルオーバー現象を表す負の減衰量とゲインの関係を明らかにした。
- (4) 解析モデルで求めた静的不安定とスピルオーバーの発生限界を基に制御定数を設定し、実際の製鉄ラインで不安定現象を起こさず安定に稼働出来ることを確認した。

また製鉄ラインには厚さや幅の異なる鋼板が流れ、それに与える張力も変化する。各鋼板の振動特性は異なり、それに応じた最適な制御定数の設定と安定限界の評価方法の確立が今後の課題である。

文 献

- (1) Andoh, A. et al., Recent Advance in Coated Steel Sheets, *Tetsu-Hagane*, Vol. 89, No.1, (2003), pp. 3-17.
- (2) Tobiyama, Y. Abotani, K. Hot-Dip Galvanized Steel Sheet with Excellent Surface Quality for Automotive Outer Panels, *JFE Technical report*, No.4, (Nov. 2004), pp. 55-60.
- (3) Morii, S. et al., Study on Shape Control and Vibration Absorber of Strip in Steel Process Line, *Mitsubishi Heavy Industries Ltd. Technical Review*, Vol. 32, No. 2 (May, 1995), pp. 128-131.
- (4) Nonami, K. et al., Vibration and Control of a Flexible Rotor Supported by Magnetic Bearings, *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series C*, Vol. 54, No. 507(1988), pp. 2661-2688.
- (5) Oshinoya, Y. et al., Electromagnetic Levitation Control of a Traveling Steel Belt, *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series C*, Vol. 57, No. 536(1991), pp. 1246-1253.
- (6) Hasegawa, S. Oshinoya, Y. Ishibashi, K. Basic Examination on Elastic Vibration Control of an Electromagnetic Levitation System for Thin Steel Plate, *Proceeding of the Faculty of Engineering of Tokai University*, Vol. 43 No. 2 (2003), pp. 59-64.
- (7) Kawashima, M. et al., Vibration Analysis of Rotor-Bearing Systems by Finite Element Method, *Mitsubishi Heavy Industries Ltd. Technical Review* Vol. 20, No. 4 (July, 1983), pp. 377 - 383.
- (8) Katayama, K. et al., Development of Rotor Dynamics Analysis System Considering Control System, *Mitsubishi Heavy Industries Ltd. Technical Review*, Vol. 26, No. 3 (May, 1989), pp. 253 - 256.
- (9) Morii, S. et al., Study on Shape Control and Vibration Absorber of Strip in Steel Process Line, *LDIA 2005* (Kobe-Awaji, Japan, Sept. 25-28, 2005), pp. 516-519.