

実測データの信号解析による圧延パラメータの推定

近藤 勝也*・久保 俊真*²

Estimation of Rolling Parameters by Signal Processing of Measured Data

Katsuya KONDO and Toshimasa KUBO

Synopsis : Mill modulus and plastic modulus of material are important parameters for operating automatic gage control stably. In this paper, estimation of the parameters by processing actual rolling data is studied. The parameters are calculated according to amplitudes of rolling force change and exit thickness change which synchronize with a frequency of roll eccentricity. Discrete Fourier Transform (DFT) is used for analyzing amplitudes of the waves, but spectrums by DFT are affected by a cutting-off period from sampled time-base waves. A method that filters the spectrums and inverts them is proposed to improve accuracy of amplitude analysis. The effect of the method is confirmed by simulation with a sinusoidal wave. Secondly, the optimum cutting-off period is selected to maximize signal-to-noise ratio by calculating actual measured data during rolling. Finally using the above method, mill modulus and plastic modulus are estimated on three coil data rolled with a reversing cold mill. As a result, it has been shown that amount of scatter of estimated values is small.

Key words: cold rolling; automatic gage control; mill modulus; estimation of parameter; frequency analysis; DFT; signal-to-noise ratio.

1. 緒言

冷間圧延機の板厚制御の操作要素はロール圧下とモータ回転数またはリール張力であり、厚み計の計測信号に基づいてこれらの要素を操作する自動板厚制御(Automatic Gage Control: AGC)がいろいろと開発されている^{1,2)}。このようなAGCにおいて、残された問題の一つは安定した制御の維持である。AGCの最適なゲインは圧延材料の寸法、材質あるいは圧延機の条件などによって変わるので、これらの条件で決まる圧延パラメータの値に応じてゲインを細かく調整することが必要である。本論文では、各種圧延パラメータのうち、圧下AGCのゲイン決定に重要な³⁾圧延機のミル剛性係数と材料の塑性係数を研究対象としてとり上げた。

従来、これら2つのパラメータは次のように推定されている。まず、圧延機のミル剛性係数の測定方法⁴⁾には圧延法と締め込み法がある。前者は実際に切り板を圧延して圧下力と圧延後の板厚を測定する方法で、後者は圧延していないときに圧下ねじを締め込んで締め込み量と圧下力を測定する方法である。しかし、いずれも測定の間は圧延を停止せざるを得ないので、圧延条件が変わるごとに測定するのは容易でない。次に、材料の塑性係数の推定には圧延荷重式⁵⁾が用いられる。圧延荷重は材料の変形抵抗、板厚や圧下量、ロールと材料間の摩擦係数、入・出側張力、ロール半径などによって定まるので、圧延に先だって圧延荷重を精度良く予測するために、圧延荷重式の学習制御が行わ

れる。しかし、変形抵抗や摩擦係数の実験値が必要であるし、学習制御のための計算機システムが大がかりで複雑になる。

そこで、圧延中に計測される板厚や圧延荷重の実測データだけでAGCゲインの決定に必要な圧延パラメータが推定できれば、AGCの制御精度の向上と維持に有用である。本論文では、圧延機のミル剛性係数と材料の塑性係数を実測データの信号解析によって推定する方法を検討した。

この分野の研究では、圧延中にサンプリングした板厚、圧延荷重、圧下位置などの実測データを最小二乗法などの手法で圧延理論式にあてはめて、圧延パラメータを推定する方法⁶⁾が提案されている。しかし、この方法では実測データに含まれるノイズの影響を受けやすく、サンプリングされたデータの中に大きな板厚変化や圧下位置変化が含まれていないと、精度の良いパラメータ推定が難しいと思われる。また、圧延荷重は前述したように入口板厚、変形抵抗、摩擦係数、入・出側張力などによって変化し、同時に出口板厚も変化するので、変化原因を分離しないで圧延荷重と入・出口板厚の変化データをそのまま用いると、推定精度が悪化すると考えられる。

そこで著者らは、ロール偏心による変動成分に注目して圧延パラメータを推定する方法^{7,8)}を検討した。圧延機のロール偏心を皆無にすることは難しいので、わずかではあるがロール偏心に起因した板厚変化や荷重変化が測定信号に含まれている。また、上流のパス、もしくはスタンドの圧延で生じたロール偏心による板厚変化は、現パスの入口

平成13年10月4日受付 平成14年2月27日受理 (Received on Oct. 4, 2001; Accepted on Feb. 27, 2002)

* 奈良工業高等専門学校 (Nara National College of Technology, 22 Yata-cho Yamatokoriyama 639-1080)

* 2 (株) NTTドコモ関西 (NTT DoCoMo Kansai, Inc.)

板厚変動になる。これらの変動は周波数成分が異なるということに注目すると、出口板厚と圧延荷重の変動を、入口板厚変化に起因した変動と（現パスのロール偏心による）圧下位置変化に起因した変動に分離することができる。周波数解析で各変動の振幅を精度良く分析できれば、圧延パラメータの推定ができると考えた。

次に、サンプリングデータの周波数解析に使われる離散フーリエ変換(Discrete Fourier Transform: DFT)には、その周波数スペクトルがサンプリングデータの切り取り区間長の影響を受けるという本質的な問題^{9,10)}があるので、この影響を小さくする方法を検討した。すなわち、DFTの周波数スペクトルの中から抽出した複数個のスペクトルを逆DFTして時間波形を求め、その時間波形の振幅を読み取る。そのための条件を検討するとともに、実測データにはノイズが含まれているので、信号雑音比(S/N)を改善するための検討を行った。

最後に、提案した方法を適用し、実測データを用いた圧延パラメータの推定を行って、良好な結果を得た。以下にその内容を説明する。

2. 圧延パラメータ推定の考え方

2.1 圧延パラメータの推定方法

圧下AGCに関する物理モデルはFig. 1の簡略化した線図で表される。図の①は圧延機のミル剛性曲線、②は材料の塑性曲線で、2つの曲線の交点が圧延時の圧延荷重と出口板厚を表す。AGCに使われる圧延パラメータは図の交点における各曲線の勾配であり、ここでは次の記号を用いる。

M : ミル剛性係数 (ミル剛性曲線の勾配)

Q : 材料の塑性係数 (塑性曲線の勾配)

次に圧延パラメータ M, Q の推定方法⁷⁾を説明する。

図の(a)は、ミル剛性曲線はそのまま、塑性曲線のみが入口板厚の変化によって②から②'に変化した様子を示す。このときの圧延荷重変化分を ΔP_H 、出口板厚変化分を Δh_H とすると、図から M は次式で表される。

$$M = \frac{\Delta P_H}{\Delta h_H} \dots\dots\dots(1)$$

この式が精度良く計算できるほどの大きな板厚変化を圧延中の材料に与えることは難しいので、ロール偏心による板厚変化に注目する。すなわち上流パス（レバースミル）や上流スタンド（タンデムミル）のロール偏心によってプリントされた板厚変化に注目する。また、ホットコイルの圧延時にプリントされた板厚変化でもよい。このような周期的変動をもつ材料を圧延すると、これに起因した入口板厚変化、圧延荷重変化および出口板厚変化はすべて同じ周波数成分をもつ。したがって、入口板厚、圧延荷重、出口板

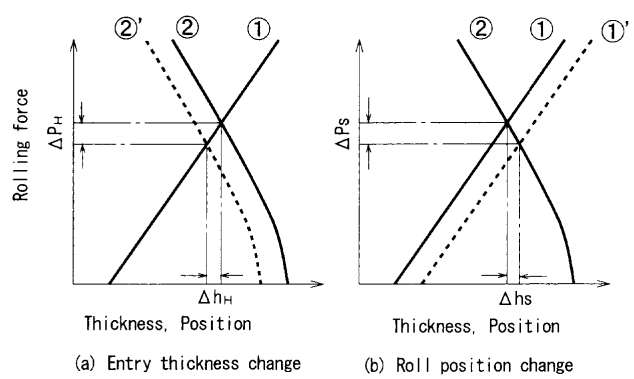


Fig. 1. Estimation of rolling parameters.

厚の実測データを周波数解析し、3者に共通する周波数の振幅成分、すなわちスペクトルを用いて(1)式の M を計算することができる。

図の(b)は、塑性曲線がそのまま、ミル剛性曲線のみが現スタンドのロール偏心によって①から①'に変化した様子を示す。このときの圧延荷重変化分を ΔP_S 、出口板厚変化分を Δh_S とすると、 Q は次式で表される。

$$Q = \frac{\Delta P_S}{\Delta h_S} \dots\dots\dots(2)$$

この変動の周波数成分は、先と同様の周波数解析を行うと、圧延荷重と出口板厚のみに現れて入口板厚には現れないことで見分けがつく。

以上のように実測データを周波数解析して特定の周波数成分に注目すれば、ロール偏心のような小さな変動を用いても精度の良い圧延パラメータ推定ができると考えられる。

2.2 DFTの問題点と対策

周波数解析では、測定された時間波形 $x(t)$ を τ [s] ごとにサンプリングした離散データから T [s] 間のデータ x_n を切り取ってDFTすることで、結果として周波数スペクトル(振幅スペクトル) X_k が得られる。このとき、DFTの条件は、データ数 $N=T/\tau$ 、周波数スペクトルの基本周波数 $f_0=1/T$ 、 k は f_0 の k 倍の高調波となる。

DFTは時間波形 $x(t)$ が切り取り区間長 T の周期で繰り返されることを前提にしているため、周期の終わりと始めの波形が連続しないと、時間波形の振幅と周波数スペクトルの値が一致しないという問題^{9,10)}がある。この問題を、Fig. 2に示した時間波形とDFT結果の具体例を用いて詳しく説明する。なお、時間波形は次式を用いた。

$$x(t) = \sin(2\pi ft) \dots\dots\dots(3)$$

図の計算条件は、 $\tau=0.01$ s、 $T=2$ s、 $N=200$ 、 $f_0=0.5$ Hzで、 $f=4.0$ Hzと4.25 Hzの2つのケースについて、 x_n と X_k のグラフが示されている。図(a)の $f=4.0$ Hzは切り取り区間の終わりと始めが連続し、図(b)の $f=4.25$ Hzは連続しないケー

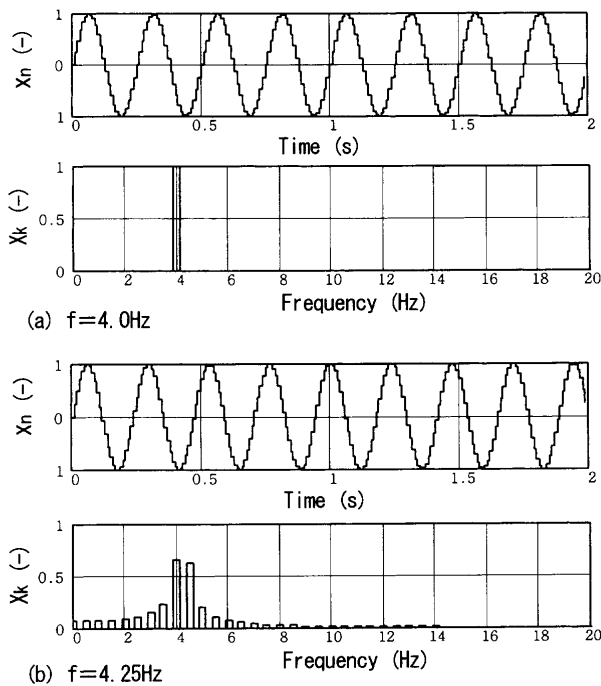


Fig. 2. Original waves and those frequency spectrums by DFT.

スである。前者のスペクトルは該当する単一の周波数のみに現れ、その大きさは時間波形の振幅(=1.0)に等しい。一方、後者のスペクトルは複数の周波数に分散し、かつスペクトルの大きさが小さくなっている。これを周波数でいうと、スペクトルは $f_0=0.5$ Hzの整数倍周波数に現れるので、4.25 Hzでは前後の整数倍周波数に分散してスペクトルが現れることになる。

このような切り取り区間長によるDFTスペクトルの変化は、前節で説明した圧延パラメータ推定の誤差になる。この対策として従来から提案⁹⁾されている時間窓は、時間データ x_n に窓関数と呼ばれる重み関数をかけて切り取り区間の始めと終わりの値をゼロに近づけることによって、波形に連続性をもたせる。しかし、窓関数をかけることによってもとの波形とそのスペクトルが変わってしまうため、時間波形の振幅を精度良く推定するという点では、完全な解決にはならないことが報告¹⁰⁾されている。

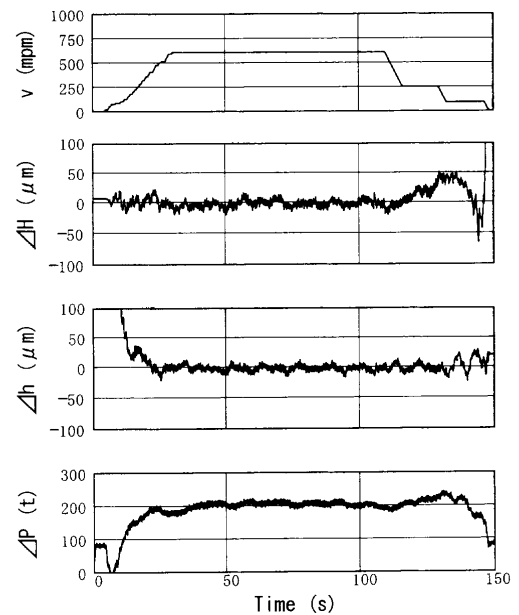
以上のことから、本論文ではDFTのスペクトルの中から複数の周波数を抽出して逆DFTし、再変換された時間波形の振幅を読み取る方法を検討した。検討項目は、抽出するスペクトルの個数と波形の再現精度の関係、ノイズの影響などである。

2.3 実測データ

本論文の検討のためにデータを採取したレバースミルの仕様をTable 1に示す。普通鋼用の一般的な圧延機で、圧延機の左右に厚み計が設置されているので、各パスごとに入口板厚、出口板厚および圧延荷重が測定できる。0.01 sごとにサンプリングした実測データの一部をFig. 3に示

Table 1. Cold reversing mill to measure rolling data.

Thickness	0.03~3.0mm
Width	600~1100mm
Coil weight	Max. 17.2t
Rolling speed	Max. 1400rpm
Rolling force	Max. 2000t
Motor capacity	4000kW(total)



ΔH and Δh : Entry and Exit thickness deviation
 ΔP : Rolling force deviation, v : Rolling speed

Fig. 3. Measured data on a cold reversing mill. Entry thickness: 1.58 mm, exit thickness: 1.24 mm, width: 1015 mm.

す。図は3パス仕上げの第2パスの圧延データであり、各データの分解能は符号を含む12 bitである。図の入口板厚 ΔH 、出口板厚 Δh 、圧延荷重 ΔP の各信号とも変動幅は小さいが、そのなかで周波数の高い成分がロール偏心に起因した変動である。

3. 推定精度の検討と実験結果

3.1 周波数解析の検討

データ切り取り区間長の影響を小さくする周波数解析方法について詳細に検討した。Fig. 4は提案した解析方法の計算手順を示す。図は(3)式において、振幅2、周波数 $f=25.03$ Hzとし、 $\tau=0.01$ s、 $T=10$ s、 $N=1000$ の条件で計算した結果である。最上段のグラフは(3)式を離散化した時間波形 x_n で、上から2段目はそのDFT結果のスペクトル X_k である。 $f_0=0.5$ Hzなので、スペクトルが分散している。3段目の X'_k は X_k のなかでいちばん大きいスペクトルとその両側のスペクトルのみを抽出した結果である。これはデジタルフィルタのバンドパスに相当するので、抽出幅はフィル

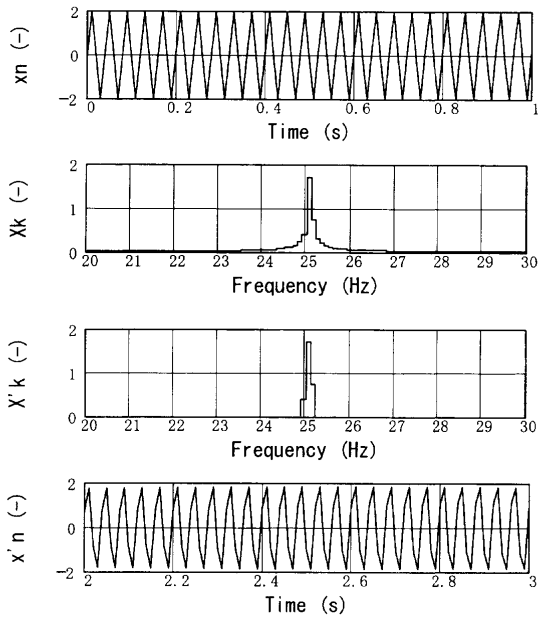


Fig. 4. Signal processing for frequency analysis.

フィルタ幅で、この場合は3である。最下段の x'_n は X'_k を逆DFTして時間波形に再変換した結果である。最後に時間波形 x'_n の振幅を読み取って周波数解析の振幅とする。ここで、近接周波数をもつ正弦波の和である x'_n はうなり波形になるので、振幅はうなり波形の最大値を読み取る。なお、上記の図では時間軸、周波数軸ともに一部分のみを拡大して示し、 x_n と x'_n のグラフはサンプル点間を直線で結んでいる。

周波数解析による振幅の推定精度は、 $x(t)$ の振幅と比較した x'_n の振幅の相対誤差で表すことができる。振幅推定の調整変数はバンドパスのフィルタ幅である。最大スペクトルのみを抽出するフィルタ幅1から、その両側の周波数にフィルタ幅を3, 5...と順次広げながら推定精度を計算した結果をFig. 5に示す。図の縦軸は上記相対誤差[%]で表した振幅の推定誤差で、横軸はフィルタ幅である。図中のパラメータは $x(t)$ の周波数 f を25.0 Hzから0.01 Hz刻みで、 f_0 の半分である0.05 Hzまで変えたときの結果である。 $f=25$ Hzのときはもともとスペクトルが分散しないので誤差はゼロである。それ以外のスペクトルが分散する周波数では次のことが言える。すなわち、フィルタ幅1のときには最大で40%近い誤差が生じるが、フィルタ幅を3または5にすると誤差が10%以下に小さくなる。圧延パラメータは、(1)および(2)式に示したように、2つの振幅推定値の比をとるので、このような推定精度で十分と考えられる。さらに図から、フィルタ幅が7より大きくなるとかえって推定精度が悪くなり、フィルタ幅に最適値があることがわかる。

また、上下のロール径に差がある場合のロール偏心は、周波数が近接しているためにうなり波形になる。そこで、このような2つの正弦波の和で表される時間波形について、先に説明したと同じ内容の検討を行った⁷⁾が、その結

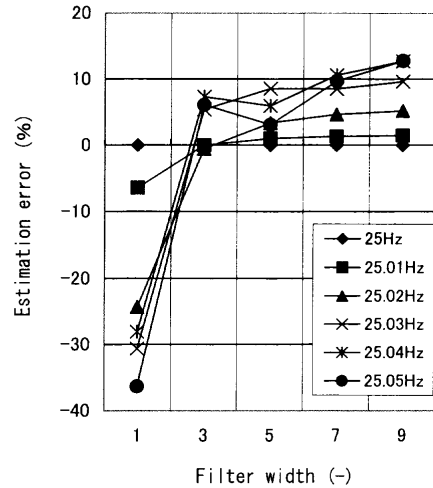


Fig. 5. Estimated result by frequency analysis.

果はFig. 5と同様であった。すなわち、フィルタ幅1のときは最大60%近い推定誤差が生じたが、フィルタ幅3もしくは5で10%以下の推定精度が得られた。さらにフィルタ幅を7より大きくすると誤差が大きくなることも同じであった。

以上のことから、ここで提案した周波数解析の振幅推定方法はフィルタ幅を3または5で使用すればよいことがわかった。

3.2 切り取り区間長の検討

測定データに含まれるノイズによって周波数解析のS/Nが決まるが、このS/Nはデータ切り取り区間長を長くすることにより改善されると考えられる。ここでは、提案した圧延パラメータ推定の計算方法を具体的に説明しながら、データ切り取り区間長の決め方について検討した。以下の計算ではフィルタ幅を3とした。

Fig. 3の定常圧延中から20秒間のデータを切り取ってDFTした結果をFig. 6に示す。データは図の上から順に、入口板厚 ΔH 、出口板厚 Δh 、圧延荷重 ΔP のスペクトルである。図中に矢印で示した周波数 f_H は入り側板厚の変化による周波数で、すべての信号にこの周波数のスペクトルが現れていることで特定できる。なお、板厚スケジュールと現パスのロール回転周波数から計算すると、 f_H は直前パスのロール偏心周波数と一致した。図中の f_s は、スペクトルが Δh と ΔP のみに現れているので、現パスのロール偏心周波数である。ミル剛性係数 M の計算は、周波数 f_H に関して圧延荷重変化の振幅 ΔP_H と出口板厚変化の振幅 Δh_H を先に述べた方法で計算して(1)式に代入する。同様に材料の塑性係数 Q は、 f_s に関して ΔP_s と Δh_s を計算し(2)式に代入する。

一方、Fig. 6の測定データを見ると、ノイズと思われる小さいスペクトルが多く存在する。ノイズが周波数解析の精度に及ぼす影響を、同じデータの切り取り区間長 T をいろいろと変えて調べた。 T を大きくすると f_0 が小さくなっ

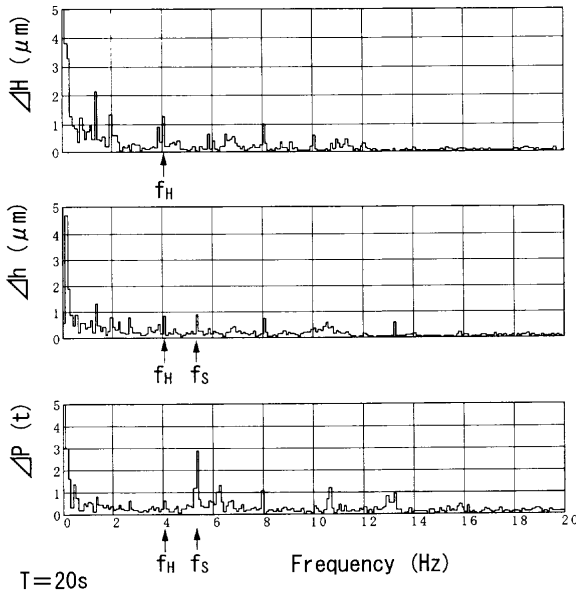


Fig. 6. Frequency spectrum of waves with cutting-off period of 20 s.

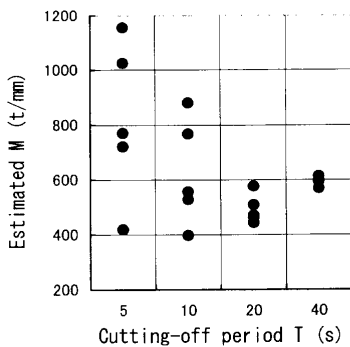


Fig. 7. Relation between estimated M and cutting-off period T .

て周波数分解能が向上する。同時に、 T を大きくするとS/Nの改善にも効果があると予想されるが、ノイズを含む実際の信号に対する検討はあまり報告されていない¹¹⁾ようである。

定常圧延中のミル剛性係数 M はほとんど変化しないと考えてよい。したがって、定常圧延データの複数箇所計算した M のばらつきはノイズの影響と考えられる。切り取り区間長 T を変えたときの M の計算結果のばらつきを Fig. 7 に示す。横軸は切り取り区間長 T で、各 T ごとに定常圧延の5箇所 M を計算した。ただし、 $T=40$ s のデータを5箇所切り取るには定常圧延時間が足りないため、隣の区間とオーバーラップさせて20%ずつシフトながらデータを切り取った。また、他の T についても同じ条件でオーバーラップさせた。サンプリング周期 τ はすべて0.01 s である。図から T を長くすると顕著にデータのばらつきが小さくなり、 $T=40$ s でほぼ極限に達するとともに十分な再現性が得られることがわかった。

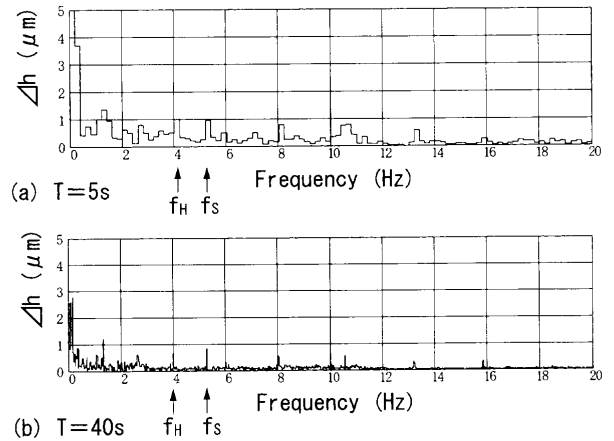


Fig. 8. Frequency spectrum of wave with different cutting-off period T .

最後に T を長くするとばらつきが小さくなることを考察する。Fig. 8 は $T=5$ s と $T=40$ s における出口板厚 Δh のスペクトルを示し、 $T=20$ s の図は Fig. 6 である。これらを比較すると、 f_H, f_s のように周期的な信号のスペクトルは T にかかわらずほぼ同じ値になるが、ノイズのスペクトルは T が大きくなるにしたがって小さくなり、概略 \sqrt{T} に反比例している。このことをDFTの計算式である次式^{9,11)}を用いて説明する。

$$X_k = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} x_n \exp(-j2\pi k n / N) \dots\dots\dots (4)$$

ただし、記号はすべていままでの説明と同じである。つまり、 T が大きくなると(4)式の N が大きくなるが、周期をもつ信号は T 全体に含まれるのでスペクトル X_k の大きさは変わらない。しかし、周期が不規則なノイズ成分は T が大きくなっても比例して増えないので、スペクトル値が小さくなる。これは時間波形の積算平均化の考え方と同じなので、ランダムノイズの積算平均化の式¹²⁾を適用するとS/Nが \sqrt{T} に比例して良くなるといえる。

3.3 実測データの解析

Fig. 3 は母材板厚2.01 mm、仕上げ板厚1.0 mmの普通鋼の3パス圧延である。圧延機は4段ミルで、圧延時のワークロール径は約400 mm、バックアップロール径は約1200 mmであった。同じ圧延条件の3コイル分のデータを測定し、先に述べた条件（フィルタ幅3、切り取り区間長40 s）で M と Q を解析した結果を Table 2 と 3 に示す。それぞれ定常圧延中の複数箇所からデータを切り取って解析し、そのデータ数、平均値および標準偏差（平均値に対する%相対値）を表に示す。

Table 2 のミル剛性係数 M の推定結果を見ると、2 ケースを除いて標準偏差が9%以下であり、ばらつきの少ない推定ができたといえる。第3パスの推定値が他に比べてやや大きいのは、材料が硬くて出口板厚の変化が小さくなったため、解析精度が低下したことが理由の一つと思われる。

Table 2. Estimated result of mill modulus M .

Coil	Pass	1st	2nd	3rd
	1	\bar{M}	633	578
σ / N		3.5 / 6	7.4 / 7	12 / 7
2	\bar{M}	551	609	710
	σ / N	4.5 / 7	3.8 / 7	9 / 7
3	\bar{M}	544	580	794
	σ / N	6.1 / 7	13.6 / 7	6.8 / 7

\bar{M} : The mean value of mill modulus M (t/mm)
 σ : Standard deviation / mean (%), N : Number

Table 3. Estimated result of plastic modulus Q .

Coil	Pass	1st	2nd	3rd
	1	\bar{Q}	3057	3674
σ / N		6.8 / 6	9.8 / 7	6.9 / 7
2	\bar{Q}	4060	3226	7585
	σ / N	6.3 / 7	1.2 / 7	25.4 / 7
3	\bar{Q}	3253	3059	11901
	σ / N	1.4 / 7	3.7 / 7	6.8 / 7

\bar{Q} : The mean value of plastic modulus Q (t/mm)
 σ : Standard deviation / mean (%), N : Number

第3パスを除いた1, 2パスの平均値全体の平均は582 t/mm, 標準偏差は約5%である。今回はロール締め込み法による M の測定をしていないので、絶対値の評価はできないが、再現性のある推定ができたといえる。

次に Table 3 の材料の塑性係数 Q を見ると、第1, 2パスでは M と同様に標準偏差が小さくばらつきの小さい推定値が得られた。材料硬化の影響を受ける第3パスは、このパスのロール偏心による出口板厚変化が特に小さくなって、解析精度の低下がみられた。 Q はコイルごと、パスごとに変わるので、平均値全体の平均や標準偏差の議論は意味がないが、傾向としては Q の値は M よりかなり大きく、また1, 2パスに比べ3パスが大きくなっている。

以上の実験結果をまとめると、ここで提案した実測データの信号処理による M と Q の推定方法は、再現性のある

有用な方法であると判断される。ただし、材料が硬くなって圧延荷重や出口板厚の変化が小さい場合は、解析精度の低下がみられた。

4. 結言

圧延機のミル剛性係数と材料の塑性係数という AGC に重要なパラメータを、実測データのロール偏心による周波数成分に着目して解析する方法を検討した。このため、圧延荷重と出口板厚の変動のなかからロール偏心による変化の振幅を推定する。これらの小さな変化成分を精度良く分析するために、離散フーリエ変換の問題点を改善する信号処理方法を提案し、数値計算によって十分な精度が得られることを確認した。さらに、実測データに含まれるノイズ成分によって周波数解析の S/N が悪化するので、解析精度を良くするためのデータ切り取り区間長の決め方について検討した。最後に、この結果に基づいて実測データを解析し、ばらつきが小さく再現性のある推定が行えることを示した。

文 献

- 1) K.Kondo, Y.Misaka, M.Okamoto, Y.Matsumori and T.Miyagi: *Trans. Iron Steel Inst. Jpn.*, **28** (1988), 507.
- 2) Y.Washikita, M.Okamoto, T.Ooi, Y.Mori and E.Hitotsumatsu: *ISIJ Int.*, **38** (1998), 977.
- 3) 板圧延の理論と実際, 日本鉄鋼協会共同研究会圧延理論部会編, 日本鉄鋼協会, 東京, (1984), 300.
- 4) 板圧延の理論と実際, 日本鉄鋼協会共同研究会圧延理論部会編, 日本鉄鋼協会, 東京, (1984), 223.
- 5) Y.Kadoya and Y.Nakagawa: *CAMP-ISIJ*, **12** (1999), 292.
- 6) 特許第2538942号, (1996).
- 7) T.Kubo and K.Kondo: *CAMP-ISIJ*, **14** (2001), 257.
- 8) K.Fujimoto and K.Kondo: *CAMP-ISIJ*, **14** (2001), 258.
- 9) 城戸健一: デジタル信号処理入門, 丸善, 東京, (1985), 120.
- 10) K.Kondo: *Res. Rep. Nara National College Technol.*, **35** (1999), 81.
- 11) 安居院猛, 中嶋正之: FFTの使い方, 産報出版, 東京, (1981), 123.
- 12) 南 茂夫: 科学計算のための波形データ処理, CQ出版, 東京, (1986), 105.