

冷間圧延製品のチャタマークの解明と対策

井上 紀明*

Analyzing Chatter Marks on Cold Rolling Strips and Countermeasure

Noriaki INOUE

Synopsis : Recently, higher quality of the surface of cold rolling strip has been demanded. As a result, the quality level which was satisfactory before is not now. In particular, we need higher quality flat plate in order to produce a better gloss and mirror pattern for the outside plate of the car and wall plate.

Therefore, we investigated a relation between the vibration of machine and that of steel sheet in order to explain the source of chatter marks, which can be found only by skilled inspector. As a result it is confirmed that chatter marks which are generated by skin pass mill and tension leveler are resonance phenomena which arises due to the natural frequencies of the roll and the roll drive system as well as that of the transverse oscillation of steel sheet. To suppress the chatter marks, it is necessary to control the vibration of the roll and the side walls.

Key words : Cold Rolling ; Skin Pass Mill ; Tension Leveler ; Chatter Mark ; Vibration ; Fast Fourier Transform ; Vibration Analysis.

1. 緒言

冷延鋼板に要求される表面品質は近年ますます厳しくなり、従来では問題視されなかった欠陥が顕在化することがある。特に、自動車用外板材および建築用壁面材の光沢と写像性に代表されるように表面品質の要求レベルは厳しく、コンプレーンのほか歩留りの低下を招くことがある。

ここでは、最近の厳格材で問題視されたチャタマークは、熟練の検査員にしか発見できなく、チャタマークも鮮明ではなくチャタマークピッチを正確に測定して判定できるほどではない軽微なチャタマークに関して、発生原因の解明と対策事例を述べる。従来、冷間圧延設備で発生するチャタマークの要因としては、圧延機の強圧下条件における圧延機本体と主駆動系およびワークロールの振動解析、ならびにロールの表面傷に関するものが多数報告されている^{1)~3)}。一方、ミルスピンドルが関与するという文献⁴⁾もある。しかし、ここで対象にしたチャタマークは、スキnpasミルという軽圧下条件およびテンションレベラのように板厚圧下を行わない冷間圧延設備で発生したものであり、従来問題視された要因とは異なっていた。

なお、ここで問題視したチャタマークは、一般材の場合に厳格材と同じ操業条件下と検査基準では発見できないという特異性があった。このため、操業中の設備の振動解析と板面の横振動の関係の調査を行い、チャタマークの発生要因を解明して発生防止の対策を行った。

2. スキンパスミルにおけるチャタマーク

2.1 チャタマークの発生状況

Fig. 1 に示すスキnpasミルでチャタマークが発生し、品質と歩留りを低下させていた。このチャタマークは、一般材では発見できず厳格材のみに発見されるもので、300mpm以下の圧延速度では発生しないので300mpm以下の圧延を余儀なくされていた。しかし、生産性の観点から700mpmの圧延速度が要求されていた。なお、チャタマークピッチはワークロール周長の1/1あるいは1/2に相当しており、発生部位は板幅の両端部に限られており中央部では認められず、操作側よりも駆動側の方が顕著で発生確率も高かった。このため、ワークロール駆動系のアンバランスが要因として挙げられていた。

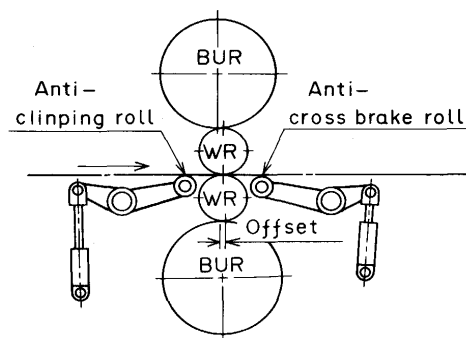


Fig.1. Schematic view of skin pass mill.

次にスキンプασミルの主仕様を示す。

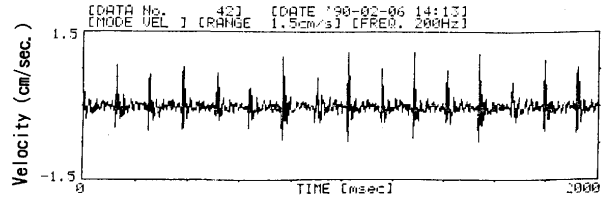
- WR径：φ585/525
- BUR径：φ1520/1370
- バレル長：1730mm
- 駆動方式：上下WR駆動
- 主電動機：DC-800KW, 272/544rpm
- 対象板厚：0.4～3.2mm
- 対象板幅：600～1600mm
- 圧延速度：最大1000mpm
- 圧下率：最大5%

2・2 振動解析による原因調査

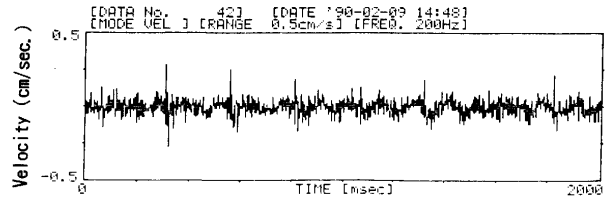
チャタマークの発生状況に鑑み、ワークロールチョックとロール駆動系のピニオンスタンド軸受の振動を速度 (VEL) モードおよび変位 (DISP) モードで、垂直方向と水平方向を測定し周波数解析を行った。また、ワークロール駆動用スピンドルについては、渦流式非接触変位計を用いてスピンドルの振れも測定した。この結果、ワークロールの回転周波数 (fr) に対応して、frあるいは 2frの周波数が顕著であった。Fig. 2 にワークロールチョックの振動測定結果の代表例を示す。ワークロールの回転に対応したfrあるいは 2frが顕著で、チャタマークピッチと一致しているので、ワークロール駆動系の動的バランス不良が影響していると考えられる。

2・3 スピンドルの動的バランスの修正

スピンドルの動的バランスの修正を行い、frあるいは2frの振動成分を軽減することを試みた。釣合い良さの等級は、上スピンドルをG20からG1以下、下スピンドルはG30からG1.4以下 (JIS-B0905 回転機器の釣合い良さ 参照) に



(a) Before modification for dynamic balance of spindle.



(b) After modification for dynamic balance of spindle.

Fig.3. Vibration of work roll chock at bottom driving side. (Horizontal direction, DISP mode, Rolling Speed ; 500mpm)

バランスを付けて修正を行った。

この結果、Fig. 3 に示したように動的バランス修正前に比べて修正後はワークロールチョックの振動が大幅に軽減して500mpmまでの圧延は可能になったが、700mpmではチャタマークの発生率は低いが時々発生するので、初期の目標は達成できず完全解決には至らなかった。

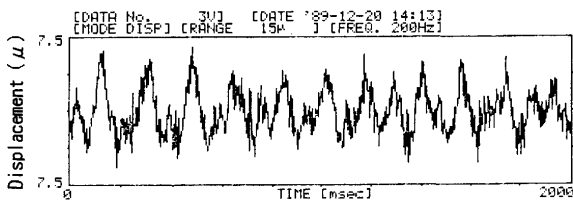
2・4 板面振動の抑制

チャタマークの要因は、先に報告したテンションレベラと同様に板面振動に起因している⁵⁾と考えられるが、スキンプασミルにもこの考え方が適用できるかどうかを確認する目的で、板面振動を観察した。この測定は、非接触式レーザー式距離計を用い、板面の挙動を解析した。測定位置はワークロールとアンチクロスブレイキロール間で、板面の上方にレーザー式距離計を設置し、その信号の周波数解析を行った。この結果をFig. 4 に示すが、ワークロールの回転周波数に一致した数Hzの成分と回転数に依存しない12.4 Hzの成分が高い。この回転数に依存しない12.4Hzの振動は、次に示すようにアンチクロスブレイキロールとブライドルロール間の板面の固有振動数 (15～16.5Hz) とほぼ一致していることと回転周波数の約2倍であり、板面の固有振動数と回転周波数の共振現象と推察できる。

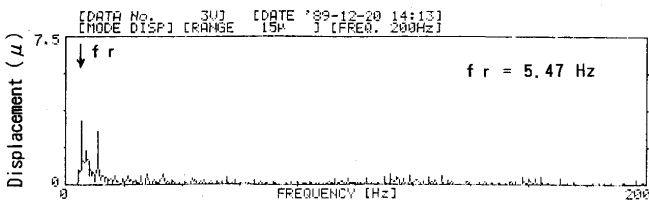
次に板面の横振動の固有振動数²⁾の計算結果を示す。

$$\text{固有振動数 } f = \frac{1}{2\ell} \sqrt{\frac{Tg}{q}} \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 ℓ : 支点間距離 (mm), g : 加速度 (mm/sec²)
 T : 総張力 (kgf) (板厚×ユニット張力)

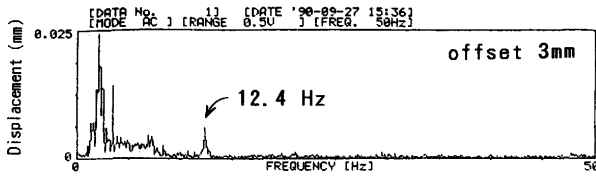


(a) Vibration wave (DISP mode).

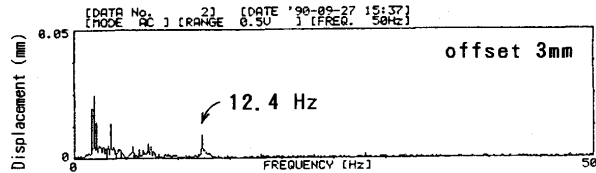


(b) Frequency analysis.

Fig.2. Vibration of work roll chock at upper driving side. (Vertical direction, Rolling speed ; 700mpm)



(a) Rolling speed;500mpm.



(b) Rolling speed;700mpm.

Fig.4. Frequency analysis for the vibration of strip surface.

q: 単位長さ当りの板重量(kg/mm³) (板厚×比重)

(1) ワークロール～アンチクロスブレイキロール間

$$f = \frac{1}{2 \times 420} \sqrt{\frac{(5.6 \sim 6.8) \times 9800}{7.85 \times 10^{-6}}} = 99.5 \sim 110 \text{ Hz}$$

(2) アンチクロスブレイキロール～ブライドルロール間

$$f = \frac{1}{2 \times 2800} \sqrt{\frac{(5.6 \sim 6.8) \times 9800}{7.85 \times 10^{-6}}} = 15 \sim 16.5 \text{ Hz}$$

チャターマークの発生は、板面が横振動を起こし、そのロール群内の小径ロール部 (スキンプスミルにおいてはアンチクロスブレイキロール) で微小の腰折れ現象が発生するためと考えられる。この対策として板面振動を拘束するための抑制ロール設置案が出たが、設備スペース上困難なことから、別の方策が必要となった。このため、ワークロールチョックの振動を安定させる目的で、ワークロールとバックアップロールのオフセット量を増加させることにした。水島製鉄所で稼動している主要圧延機のワークロール直径とオフセット量の関係をFig. 5に示すが、対象の圧延機は図中⑥の圧延機でオフセット量は3mmでありオフセット量が小さいと判断しオフセット量を6mmに増やすことにした。この設備改造はワークロールチョックの入側のライナ厚さを厚くし出側のライナ厚さを薄くするという安価な方法で実現させた。オフセット量を増やす目的は、圧下力によるWRの水平分力を増やすことにより、WRチョックの水平方向の振動を抑制して安定化させるものである。

ワークロールチョックの挙動安定化による板面振動の抑制効果を調べるためレーザー式距離計で板面の挙動を測定した。Fig. 6にワークロールのオフセットが3mmの場合と6mmの場合を比較してレーザー式距離計の出力信号を示すが、オフセットを増やすと板面変位が1/2.5に減少した。こ

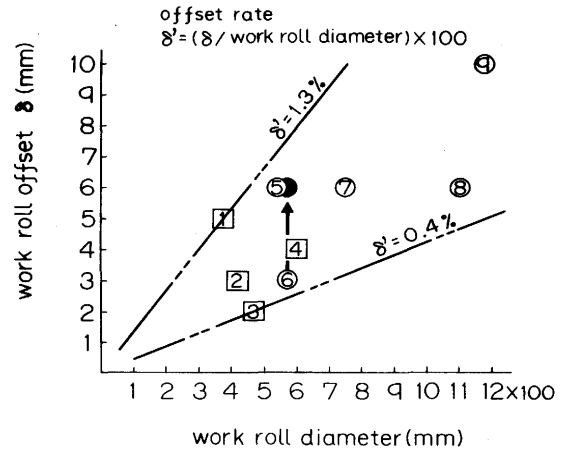
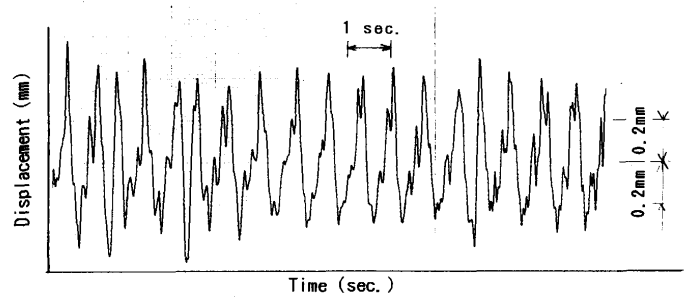
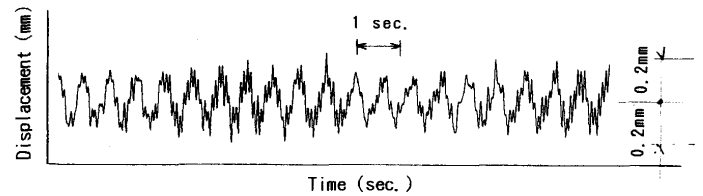


Fig.5. Relation between work roll diameter and offset.



(a) Work roll offset; 3mm.



(b) Work roll offset; 6mm.

Fig.6. Displacement of strip surface (Rolling speed; 700mpm).

の結果、700mpmの圧延時においてもチャターマークの発生が認められなくなった。

3. テンションレベラにおけるチャターマーク

3.1 チャターマークの発生状況

カラー鋼板ラインのテンションレベラにおいて、白色系のカラー鋼板で検査員でないと発見できない程度の、チャターマークが問題視された。チャターマークピッチは、30mm～50mmでライン速度に依存しないことが確認されていた。なお、対象材の標準圧延速度は120mpmであり、チャターマークを周波数fchに換算すると、

$$f_{ch} = \frac{1000 \times V}{60 \times P} = \frac{1000 \times 120}{60 \times (30 \sim 50)} = 40 \sim 67 \text{ Hz}$$

ここで、V：ライン速度 (mpm)

P：チャタマークピッチ (mm)

であり、この周波数と設備振動および板面振動の関係を調査する必要がある。

3・2 振動解析による原因調査

Fig. 7に示すテンションレベラのロール配列において、矢印で示す位置の設備振動と板面振動を測定し、周波数解析を行い、Table 1に示す各部位の特性周波数の計算値と比較した。周波数解析結果の一例をFig. 8に示すが、(a)の上ワークロールの伸率制御時に見られる54.25Hzはピニオンスタンドの歯車かみ合い周波数と一致していた。つまり、歯車のかみ合いの影響を板面が受けて、上ワークロールに振動が伝播したものと考えられ、歯車のかみ合いがチャタマークの要因になっていると推察できる。一方、(b)の張力制御時は、歯車のかみ合い周波数に一致した周波数が認められず、チャタマークが発生しない現象と一致していた。(c)には入側ブライドルロールを示すが、設備の質量が高く歯車のかみ合い周波数が現れていない。つまり、板面の固有振動数と歯車のかみ合い周波数の共振現象で、設備の質量の低いテンションレベラのワークロールでは、歯車のか

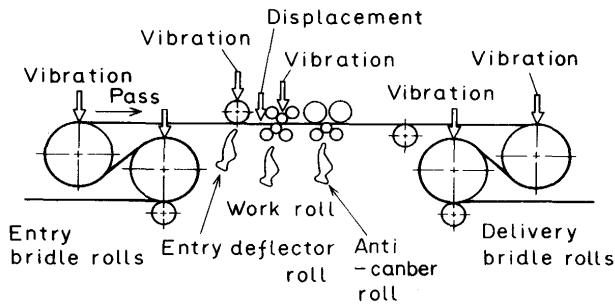


Fig.7. Alignment of tension leveler roll.

Table 1. Calculated value of characteristic frequencies for each part (120mpm).

		fr	fi	fo	fb	fz
Bridle roll		1.1	15.7	12.8	10.8	—
Tension leveler	Radial	16.0	135.8	104.1	117.9	—
work roll	Thrust	16.0	77.5	50.4	71.6	—
Pinion stand		1.1	13.5	10.6	7.8	54.0
Reduction gear	Entry side	2.8	58.2	50.9	48	280
	Middle	3.9	43.2	32.7	27.4	276.9
	Delivery side	2.8	30.2	22.9	18.6	277.2

Unit(Hz)

fr : rotation frequency

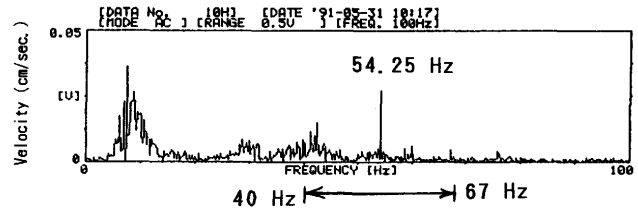
fi : frequency of the contact between one point of inner race and a rolling element

fo : frequency of the contact between one point of outer race and a rolling element

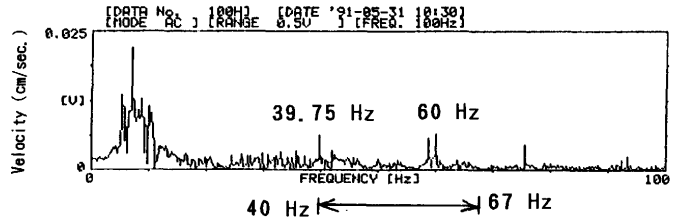
fb : rotation frequency of rolling element

fz : contact frequency of gear

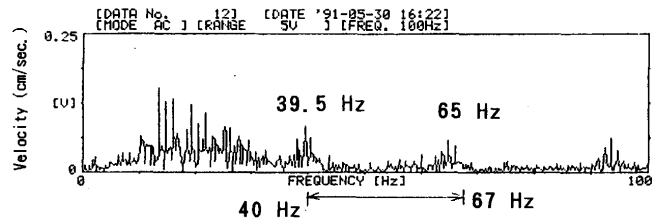
○(mark) : Frequency (40~67Hz) corresponding with chatter mark pitch (30~50mm)



(a) Upper work roll (Controlled extension ratio).



(b) Upper work roll (Controlled tensile force).



(c) Entry bridle roll.

Fig.8. Frequency analysis for the vibration of tension leveler.

み合い周波数に一致した周波数が顕著に現れると解釈できる。このことから、チャタマークの発生部位は、入側ブライドルロールではなくテンションレベラのワークロールであることが推察できた。なお、Table 1では、減速機の軸受の特性周波数はチャタマークの換算周波数とほぼ一致しているが、振動測定結果の振動振幅値は低く、要因から除外できる。

3・3 チャタマークの発生抑止

チャタマークの発生プロセスを、次のように考察した。ブライドルロールの駆動歯車のかみ合い振動が、ブライドルロールを介して鋼板に縦振動を与える。この結果、ブライドルロールとワークロール間の鋼板に横振動を誘起する。この状態において、テンションレベラのワークロール間で塑性歪が付与されるが、下ワークロールで鋼板に与えられた曲率による正の塑性歪が、次に上ワークロールで負の塑性歪を与えられる。この場合、鋼板が横振動を発生しているので、鋼板のある一点に着目すれば最大の正の塑性歪と負の塑性歪に差異が生じる。この塑性歪の差異が鋼板の微小歪として残留し、チャタマークとして現れる (Fig. 9 参照)。

なお、入側デフレクタロールと下ワークロール間の板面の横振動の固有振動数を(1)式で求めると、

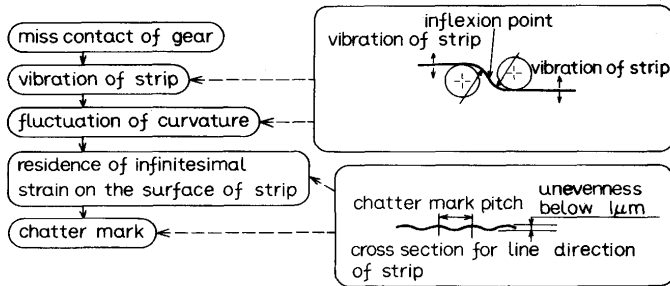
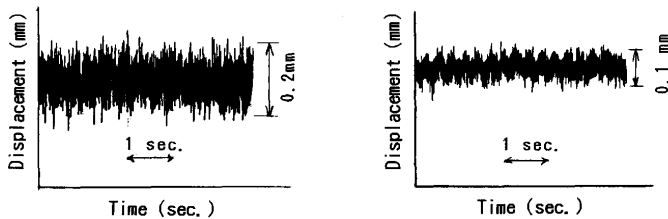


Fig.9. Generation process of chatter mark in tension leveler.

$$f = \frac{1}{2 \times 361} \sqrt{\frac{(0.72 \sim 2.0) \times 9800}{7.85 \times 10^{-6}}} = 41.5 \sim 69.2 \text{ Hz}$$

となり、チャターマークピッチ換算周波数 f_{ch} とよく一致していることが確認でき、歯車のかみ合い振動数と板面の固有振動数の共振現象により、チャターマークを誘起しているといえる。

このため、ピニオンスタンドの歯面観察を行ったが歯面損傷は認められず、正常であった。そこで、板面振動を抑制すれば、チャターマークの発生を防止できると考えて、入側デフレクタロールのパスラインを下げて板面の挙動を拘束することを試みた。まず最初にパスラインを20mm下げ



(a) Entry deflector roll is lowered by 20mm. (b) Lower the Entry deflector roll is lowered by 25mm.

Fig.10. Comparison of displacement of strip surface.

た結果、チャターマークが軽減した。しかし、効果が十分でなかったため、さらに5mm下げてパスラインより25mm下げた。この結果、Fig.10に示したように、板面の振動変位は半減してチャターマークの発生が認められなくなった。

4. 結言

スキンプスミルとテンションレベラのように板厚の強圧下を行わない設備において、厳格材で問題視されたチャターマークの要因解析と対策を行ったが得られた結果をまとめると次のようになる。

- (1) 最近の厳格材において問題視されるチャターマークは、検査能力の向上により発見が可能になる。
- (2) 設備の固有振動数と鋼板の横振動固有振動数の共振現象で、板面の振動変位が大きくなり、ロール群内の小径ロール部で微小な腰折れ現象が発生して、チャターマークが現われる。
- (3) チャターマークの発生抑止は、板面の振動変位を抑制することが有効である。スキンプスミルにおいては、スピンドルの動的バランスの改善とロールのオフセット量の増加により、ロールの振動変位を安定させることが効果的である。
- (4) 設備の固有振動数と板面のロールスパン間の横方向の固有振動数の共振現象を避けるように、設備設計を行うのが望ましい。

文 献

- 1) 御園生一長：塑性と加工，21 (1980), p.1006
- 2) 古川九州男，鏑田征雄，清野芳一，滝本高史，中里嘉夫，中川吉左衛門，福永一郎：川崎製鉄技報，8 (1976), p.60
- 3) 本城 恒，新谷定彦，豊田武司：石川島播磨技報，17 (1977), p.588
- 4) Norman L.Keller：Iron and Steel Engineer，69 (1992) 8, p.79
- 5) 井上紀明：第35回圧延設備分科会-圧設35-II-10, (1986), [日本鉄鋼協会]