

技術報告

ホットストリップミル仕上後段作業ロールに
生じるスポーリングの統計的解析佐 野 義 一*・木 村 和 夫*²Statistical Analysis about Crack and Spalling on Work Roll for Hot Strip
Mill Finishing Rear Stands

Yoshikazu SANO and Kazuo KIMURA

Synopsis:

Concerning cracks and spallings of high alloy grain cast iron roll for hot strip mill finishing rear stands, we have been trying to clarify their originating processes by the field data of rolls. From the analysis of reports about types of failure, roll operating and maintenance conditions for 80 pieces of damaged rolls, the followings became clear relating to the mechanism of crack and spalling.

When a crack is introduced on a roll body by cobble, quick roll change will result in a small damage. However, when the cracked roll is used continuously for rolling, we will get a heavy damage such as a large spalling, which is over 100 mm in width and over 50 mm in root depth. Sometimes, a breaking short on a roll body took place by the propagation of crack by cobble.

It is important to find out the crack quickly after cobble to avoid the heavy damage of the roll. The roll material with higher resistance to thermal shock and load caused by cobble has to be manufactured. Introducing an eddy current testing method to find out a small crack, gives rise to effective decrease in roll damage.

Key words: rolling; fracture; cast iron; roll; hot strip mill; spalling; crack.

1. 緒 言

ホットストリップミルの高性能化, 圧延製品の高級化にともない使用されるロールに対する要求水準はますます高くなつてきている¹⁾. 本稿でとり上げた後段用作業ロール (以下 FHW ロールと略す) に高合金グレンが用いられているのは, 耐摩耗性, 圧延異常時における破壊抵抗 (以下, 耐事故性と略す) ならびに圧延製品肌を劣化させない肌の美麗さに優れているからである. しかしながら, 最新ミルが有する高度な機能を満足させるためには耐摩耗性の大幅な向上が必要とされる²⁾. 一方で耐摩耗性と耐事故性とは相容れぬ点が多いので, 耐摩耗性を向上させる際には耐事故性を損なわぬ配慮が不可欠である. この点に対するロール製造者, 使用者双方の認識を深めたい. そのため本稿では, まず FHW ロール胴部に生じる破壊事故について概説する. そして FHW ロールに特徴的なクラックとスポーリングに対して試みた現象論的な解析結果についてとりまとめ, その

発生機構と対策につき考察を行った.

2. 仕上後段作業ロールの破壊事故

FHW ロールは, 圧延摩耗で約 50%, クラックなどのロール疵の除去に要する研削で 15~20%, 残りが通常研削で消耗される. FHW ロール胴部に生じるさまざまな破壊事故を Fig. 1 に, またそれぞれの破壊事故とロール性質, 圧延条件との関連を Table 1 に示す. Fig. 1 に示した破壊事故のうちでロール内部起点の破壊事故は, ロール冷却不足などの操業異常のある場合を除いて, 多くの場合ロールの鑄造欠陥, 強度不足あるいは過大な残留応力等による原因がある. これに対して絞りなどの圧延異常の際にも, 正常圧延時と類似な破壊形態がみられることがあり Fig. 1 の e と f はその例である. このように, 一見して破壊現象が似通っている場合に, その主原因がロール, 圧延条件のいずれ側にあるか等の見方を含めて, いくつかの破壊事例について触れておく.

昭和 60 年 10 月 4 日 本会講演大会にて発表 昭和 61 年 7 月 23 日受付 (Received July 23, 1986)

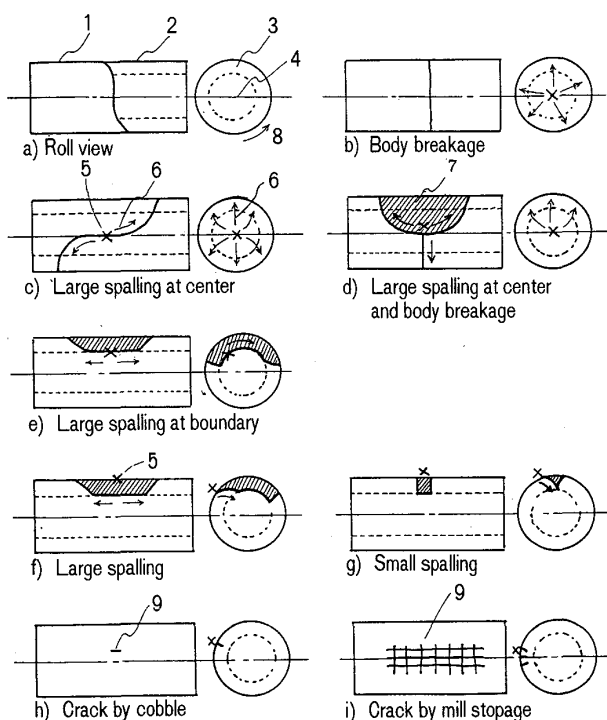
* 日立金属(株)若松工場 (Wakamatsu Works, Hitachi Metals Ltd., 1-9-1 Kitahama Wakamatsu-ku Kitakyushu 808)

*² 新日本製鉄(株)プラント事業部 (Plant and Machinery, Nippon Steel Corp.)

Table 1. Relation between breakage of roll body and its source.

Rolling condition	Breakage	Source of breakage					Reference
		Roll material			Rolling condition		
		Defect	Strength	Residual stress	Thermal stress	Rolling stress	
Normal	Body breakage	○	○	○	○	—	Fig. 1 b) Fig. 1 c) d) Fig. 1 e) Fig. 1 f) Fig. 1 g)
	Large spalling at center	○	○	○	△	○	
	Large spalling at boundary	○	○	○	△	○	
	Large spalling from surface	○	—	—	—	△	
	Small spalling at surface	○	—	—	—	△	
Abnormal	Large spalling*	—	—	—	○	○	Fig. 1 f) Fig. 1 g) Fig. 1 h) Fig. 1 i)
	Small spalling	—	—	—	○	○	
	Crack by cobble	—	—	—	○	○	
	Crack by mill stopage	—	—	—	○	—	

Remarks : ○ Strong effect, △ Small effect, — Little or no effect, * Accompanied with body breakage, sometimes, Photo. 1



1 Outer view, 2 Sectional view, 3 Shell, 4 Core, 5 Crack origin, 6 Crack propagation, 7 Spalled part, 8 Roll rotation, 9 Surface crack

Fig. 1. Schematic pattern of breakage in a roll body for rear stands of hot strip finishing mill.

2.1 胴折れ

胴折れとも呼ばれ、ロール中心から外周にかけての破面模様で特徴づけられる。しかし Photo. 1 に示される例は表面クラックが内部に進んで胴折れしたもので、このほかに大スポーリングが起きて、ついで2次的に胴折れを起こすこともある (Fig. 1d)。

2.2 大スポーリング

破面の幅が 100 mm をこえるようなスポーリングで、主因がロール材にある場合には内部から表面に向かうピーチマークが破面にみられ、その一例を Photo. 2 に示す。しかし Photo. 3 に示されるような表面の casting

欠陥が原因の場合には破壊は表面欠陥から内部へ向かう。また、一見して内部起点形とみられる大スポーリングでも、破面の中に表面からの進展経路が含まれる場合は表面に起点があり、この例を Photo. 4 で示す。

2.3 小スポーリング

起点は表面にあつて、その付近に casting 欠陥がなければ後述の絞りによるクラックが、圧延負荷のくり返しによりスポーリングへ進展していくものと考えられている²⁾。ここでは幅が 100 mm 以下のスポーリングを小スポーリングと呼ぶ。

2.4 クラック

咬止めクラックは Fig. 1i) に示すようにその特徴的なパターンから、他のクラックと判別できる。これがスポーリングに進展していく例はまれにしかない。スポーリングの初期状態とみなされるクラックの例を Photo. 5 に示す。

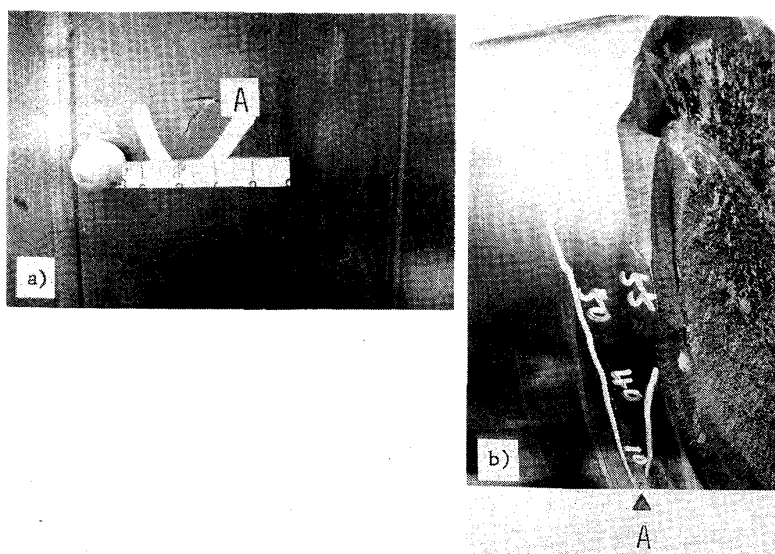
3. スポーリング、クラックの統計的解析

解析の対象は昭和 51 年 1 月から 58 年 12 月の 8 年間に事故調査された高合金グレンロール 80 本である。これらは原因や損傷程度に関する究明をロールメーカーへ要請されたものである。したがって、圧延上の原因が明らかでない場合などメーカー調査の対象外になった事故は多いと思われるが、ここでは含まれない。またロール欠陥が原因と判定された 3 例も対象外とした。以下の解析結果においては、これらの点に対する考慮を要する。なお解析に際して、開口量がおよそ 1 mm 以下のものをクラック、それ以上のものを小スポーリングとした。そしてスポーリングの軸方向の最大投影長 100 mm 以上を大スポーリング、それ未満を小スポーリングと定義して区別した。

3.1 破壊の形態および特徴

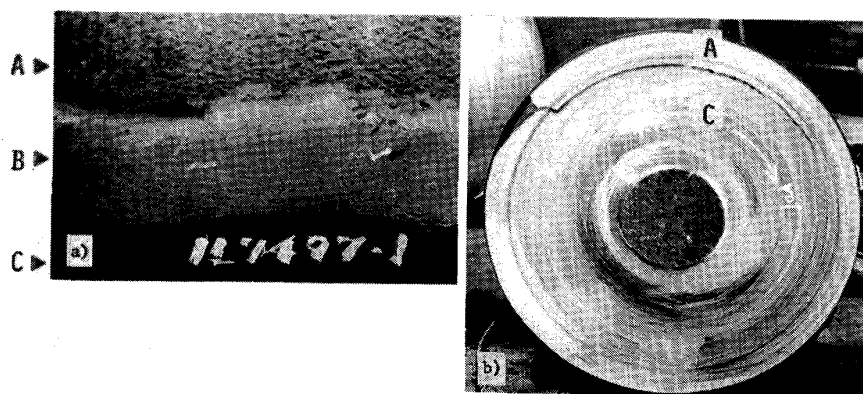
3.1.1 外観上の形態

Fig. 2 にこれらの模式図を示す。Fig. 3 によれば、



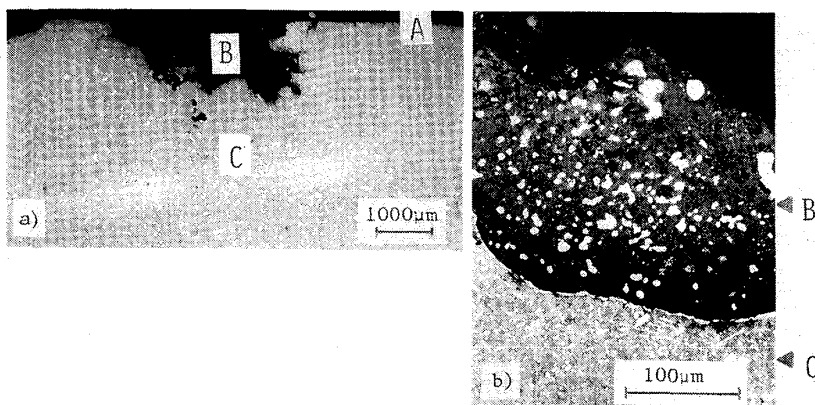
a) Origin crack (crack A)
b) Body breakage by spalling starting from crack A

Photo. 1. Body breakage resulting from spalling.



a) Spalled face
A: Core, B: Shell with beach mark, C: Roll surface
b) Axial view of spalling crack

Photo. 2. Large spalling at boundary separating shell from core of roll.

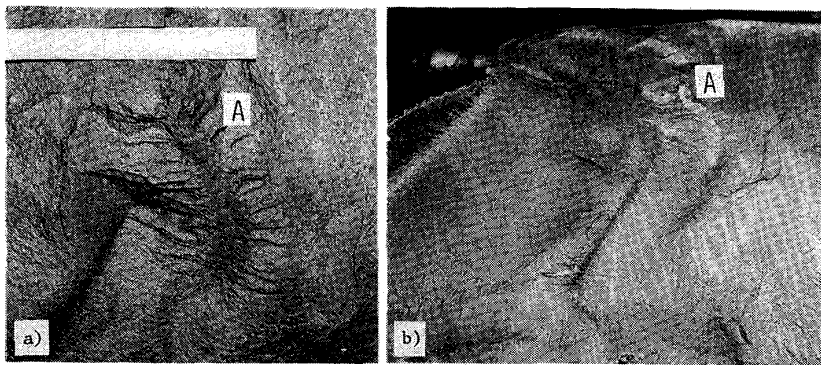


a) Casting defect of spalling origin by axial view (picral etching)
b) Magnified view of casting defect (picral etching)
A: Roll surface
B: Defect (Al, Si etc.)
C: Roll material

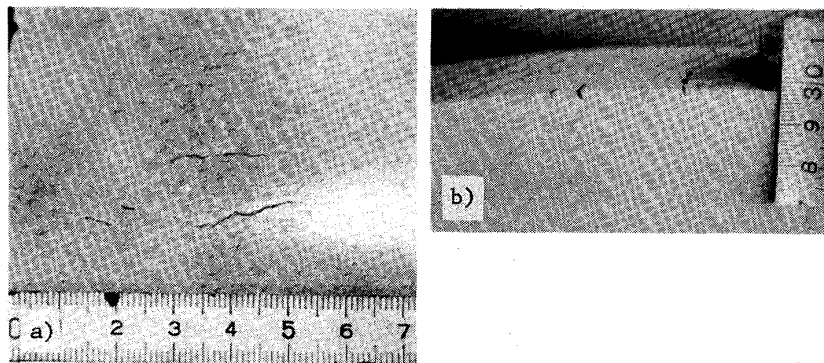
Photo. 3. Casting defects of spalling origin consisting of molding materials and others.

FHW ロールの疵が発見された時の外見は、クラック>小スポーリング>大スポーリングの順に多い。発見時の外観でクラックと小スポーリングの比率は、Fig. 4に示すように最終スタンドではクラックが圧倒的に多いが、その前のスタンドではほぼ同程度である。圧延中にコイルの点検によつてロール疵が検出される機会は最終

スタンドのロールで多いのは当然であるが、その前のスタンドでは半数以上の疵は圧延後のロール点検時に発見される。すなわち、最終スタンドのロール疵はそれがコイル肌に直接影響を残すために、圧延中のコイル肌点検により疵の発生初期にしかもクラックの状態で見えやすい。しかし、最終前スタンドのロール疵は、その後



a) Crack A propagating from surface
b) Spalled face starting from crack A
Photo. 4. Large spalling originating from surface crack.



a) Surface view
b) Axial view
Photo. 5. Crack by rolling trouble called cobble.

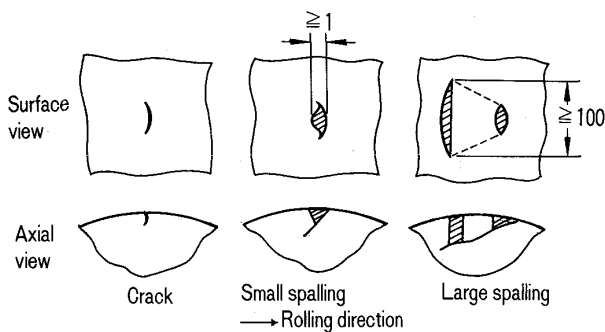


Fig. 2. Patterns of failure found at surface of roll body.

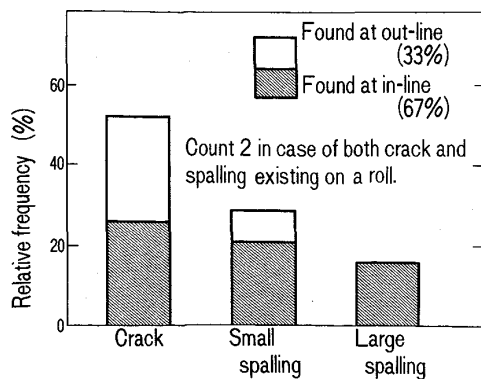


Fig. 3. Outer view of breakage at found.

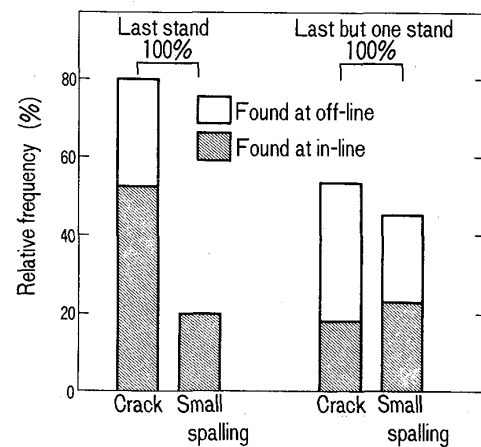


Fig. 4. Outer view of crack and small spalling.

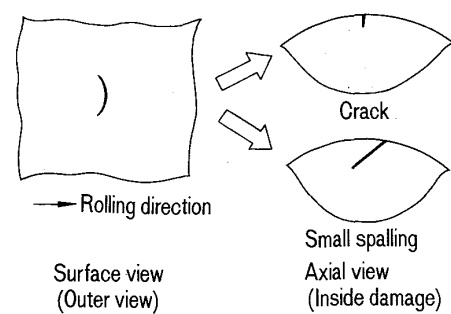


Fig. 5. Relation between outer view of crack and two types of inside damage.

に最終スタンドで圧延されるためにコイル表面疵として検出されにくい。このため最終前スタンドのロール疵は発生後にそのまま見すごされて圧延が継続されるために疵は伝播拡大し、ついにはスポーリングに成長する危険をはらんでいる。

3.1.2 内在形態

Fig. 5 のように外見上クラックと認められたものが、内部でもクラックとして止まっているものと、ロール回転と逆方向に進展しスポーリングに発展しはじめているものとがある。クラックとみられたもので内部で小スポーリング状に進展していない割合は、Fig. 6 に示されるように最終スタンドでは 73% を占めるが、最終前スタンドではわずかに 15% しかない。これは前項で述べたと同じ理由で説明される。

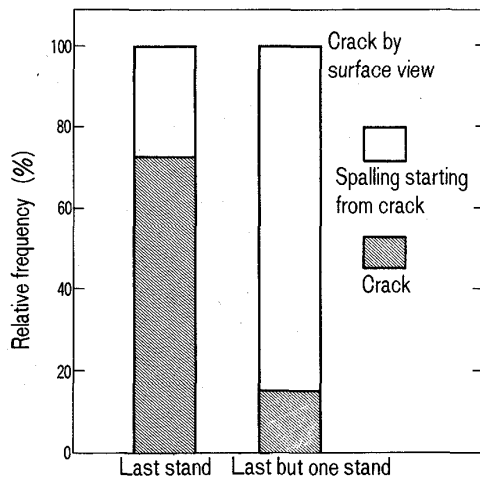


Fig. 6. Relation between surface crack and its inside damage pattern.

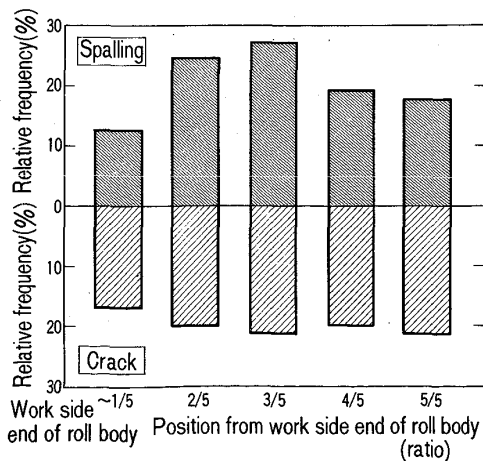


Fig. 7. Roll axial distribution of occurring position of crack and spalling.

3.1.3 進行方向

25 件中の 23 件のスポーリングがロール回転と逆方向、1 件は両方向、残り 1 件のみ同方向に進んでいる。このようなロール回転方向に対するクラックの進展方向の関係については、その理論的な解析が現在進められている³⁾。

3.2 破壊の位置

Fig. 7 のごとく、FHW ロールのクラックや大スポーリングがロール軸方向、ほぼ中央部をピークにした分布状態で発生しており、補強ロールのように胴端部に集中して発生する形をとらない⁴⁾。このことは両ロールの損傷機構が異なることを示唆しており、FHW ロールのスポーリングは接触疲労が主原因ではないと考えてよいであろう。

3.3 破壊の大きさ

スポーリングの軸方向の大きさは Fig. 8 のように幅 100 mm 未満の小スポーリングが過半数を占めるが 500 mm 以上のものもある。一方クラックは Fig. 9 に示されるように長さ 5~14 mm のものが 60% 以上を占め、最小 3 mm であった。このようにクラックの長さに対してスポーリング幅が大きいのは、クラックが伝播、拡大してスポーリングに発展すると考えらるうなづける。

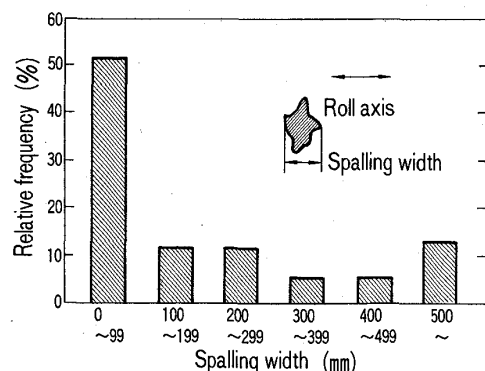


Fig. 8. Distribution of spalling width.

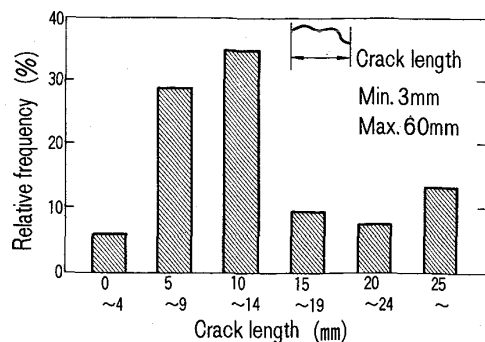


Fig. 9. Distribution of crack length.

3.4 破壊の到達深さ

クラックやスポーリングの到達深さは表面でみえるクラック長さにはほとんど無関係であり、このことは Fig. 10 から明らかである。たとえば表面で 5 mm 長さのものが深さ 40 mm 近くまで伝播した例があり、クラック

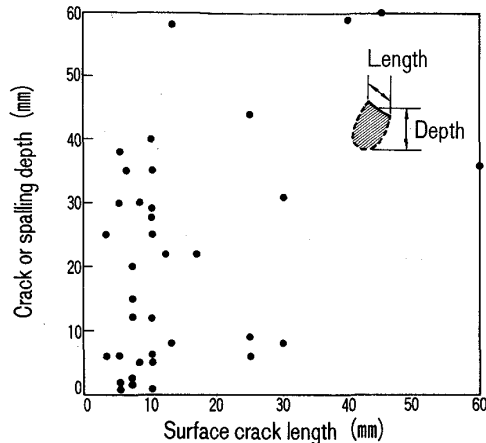


Fig. 10. Relation between surface crack length and its maximum depth.

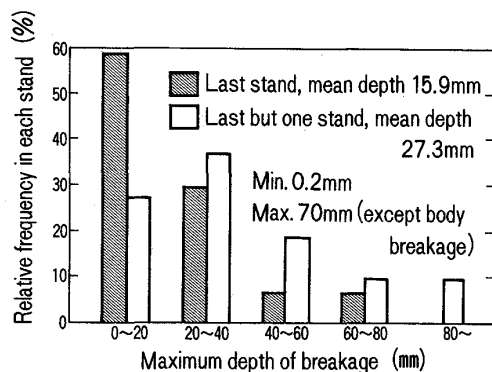


Fig. 11. Distribution of maximum depth of breakage including body breakage.

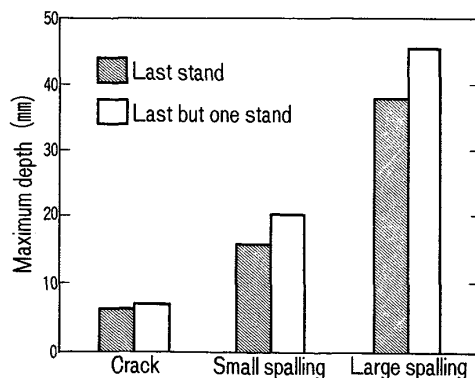


Fig. 12. Each maximum depth of crack, small spalling and large spalling.

長さから内部への到達深さを推定するのは危険である。

Fig. 11 に示されるように最終前スタンドで損傷が深いのは前述のように、最終スタンドにくらべてロール疵のコイル肌への影響が検出されにくいのでクラック発生状態で継続使用される可能性が高く、しかも圧延負荷が大きいためであろう。またクラックの深さおよそ 7 mm に対して、小スポーリングは約 3 倍、大スポーリングでは 6 倍にもなることが Fig. 12 から知られる。これらは疵の早期発見の重要性を示唆している。

3.5 破壊発生スタンド

Fig. 13 によれば最終前スタンドの事故が最多と示されているが、圧延工場内部で処理されたものを含めると最終スタンドでの事故が最も多いと考えられ、下流スタンドほど絞り事故の多い傾向²⁾との関連が推察される。同じく、Fig. 13 から上下間の差は明確でない。

3.6 破壊発生ロール径

Fig. 14 によればロール有効径の 60% までに大半の事故が発生している。通常 FHW ロールは下流から上

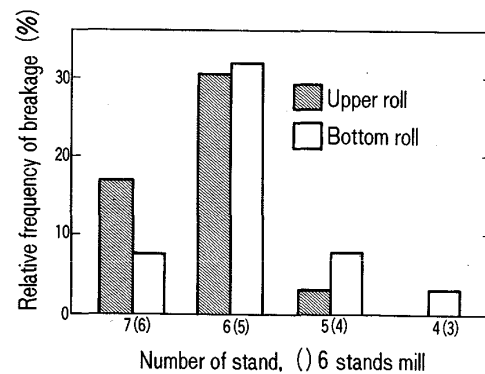


Fig. 13. Relation between relative frequency of breakage and number of stand.

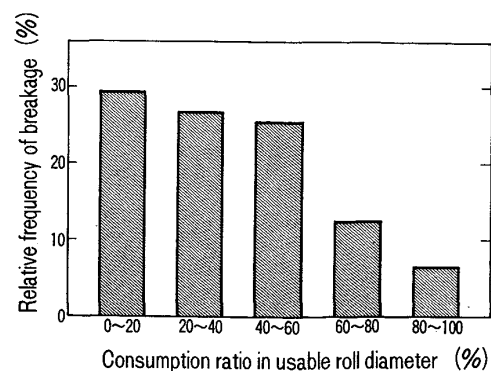


Fig. 14. Relation between relative frequency of breakage and consumption ratio in usable roll diameter.

流に移行して使用される。このことは、結果的に有効径の大きな状態で事故の多い下流スタンドに使われることになり、ロール径よりもむしろ使用スタンドの影響がでているのであろう。しかし、ロール材質に関していえば使用開始径の方が耐事故性に不利な炭化物が多いことなどがあつて⁵⁾ この影響も無視できないであろう。

3.7 絞りとの関連

操業記録から破壊原因を絞りと確認できたものは Fig. 15 に示されるように 27% で、推定を含めても半数にみえない。しかし、圧延操業中に絞りが発生しても、絞りの内容や程度によつては操業員が検知できぬ場合が多く、また絞り発生をすべて記録する慣行になつてない場合もあるので、これらがロール損傷の原因究明を困難にしている一つの隘路と考えられる。

4. 解析結果の考察

4.1 スポーリングの生成機構

前章で明らかにされたスポーリングの特徴をまとめて Table 2 に示す。スポーリング生成の主因と想定されるロール欠陥、絞り、接触疲労と、解析によつて明らかにされたスポーリングの特徴とを照合して、想定した三要

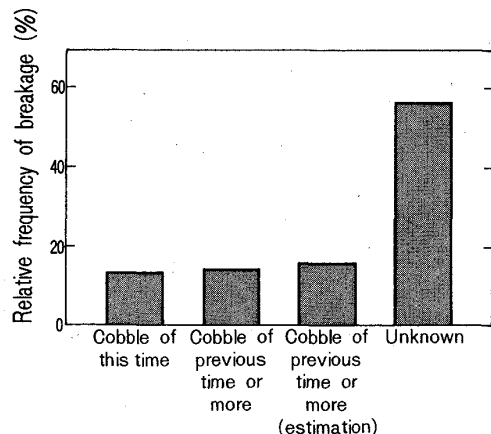


Fig. 15. Relation between relative frequency of breakage and chance of cobble occurrence.

因の妥当性についての検定を行つた。そこで Table 2 の見方について以下に説明する。例えば、Table 2 において、損傷状態の外観の特徴としてスポーリングよりも、クラックとしてより多く観察されることが示されている (Fig. 3, 4). (i) ここでまずロール材料欠陥のスポーリングへの発展過程について考えてみると Fig. 16 のように整理できる。表面に存在する欠陥や表面直下の欠陥を応力集中源にしてクラックが表面に生じることは容易に理解できよう。内部に存在する欠陥からのクラックは、ヘルツ圧による接触幅 ($2b$) において最大剪断応力深さ $0.5b$ (最大 τ_{xy}) または $0.786b$ (最大 τ_{45}) 付近の欠陥から発生して表面に沿った方向に進み、表面に向かう形をとるであろう。微小欠陥を内在する鋳鋼材のスポーリング実験により、これらの事柄が実証されている⁹⁾。このように材料欠陥に起因するスポーリングがロール表面で観察される場合にはクラックの状態が多いと判断されるので Table 2 で○印を与えた。(ii) ついでクラック、スポーリングの原因として絞り込みを想定してみる。絞り込みによつてロール表面に異常に高い熱的、機械的負荷が生じ、その結果クラックが生じることは多くの経験で認められており、さらに関本²⁾ は絞り込み時の前、後進フローにともなう応力解析を行い表層の引張応力をクラックの原因としている。このクラックが圧延

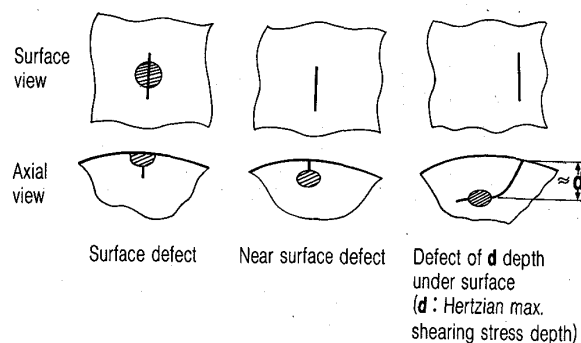


Fig. 16. Crack propagating pattern from casting defect of various subsurface depth.

Table 2. Characters of crack and spalling and the factors of their mechanisms.

Character of breakage		Factor of crack and spalling mechanism			Reference
Item	Result	Defect	Cobble	Contact fatigue	
Outer view	Crack > Spalling	○	○	—	Fig. 3, 4 Fig. 6
Inside damage	Spalling > Crack	○	○	○	
Propagating direction of spalling	Opposition to rolling direction	○	○	○	Fig. 7 Fig. 7
Position of spalling	Uniform distribution along axis	○	○	×	
Position of crack	Uniform distribution along axis	○	○	×	Fig. 8, 9
Size of spalling and crack	Spalling: < 100 mm most Crack: 10~14 mm most	—	—	—	
Max. depth of breakage	< 20 mm most	—	—	—	Fig. 11 Fig. 13
Number of stand	6 > 7 > 5 > 4 st in 7 st mill	—	△	×	
Upper/bottom in stand	Equal	○	○	×	Fig. 13 Fig. 14
Roll diameter	Large > Small	—	○	×	

Remarks: ○ Strong connection, △ Small connection, × Counter connection, — Nonconnection

中にロール反回転方向に伝播し、その過程でスポーリングが生じると考えれば、外観上クラックとして検知される機会が多いと思われる。すなわちスポーリングの原因を絞り込みとすれば、ロール外観上で認められた事実と矛盾しないので○印とした。(iii)さらに接触疲労が原因でスポーリングが生じる場合を考えると、(i)で述べたと同様に表面下 $0.5b \sim 0.786b$ 付近でクラックが生じこれが表面に現れる過程をとるものと考えられる。一方では摩擦力の作用下では表面でピッチング(小さいスポーリング)が先行するという報告もある¹⁰⁾。したがって接触疲労を想定すれば外観上クラック、スポーリングのいずれが多いともいえないので一印を与えた。

同じく Table 2 において、スポーリングの特徴として発生位置 (Fig. 7) が、軸方向におおむね均一に分布していることが示されている。(i)ところで、主原因が欠陥や絞りであれば、それらの発生位置の特徴からスポーリングはロール軸方向のどこに生じても構わないことになるので検定は○となる。(ii)しかし、接触疲労であれば、ロール摩耗の少ない胴端部に高接触圧力が作用し、そこにスポーリング損傷が多く生成するはずである。これは軸方向にほぼ均一に分布する FHW ロールのスポーリングの特徴に対して矛盾しており検定は×となる。このような考え方で検定した結果をまとめた Table 2 において、四つの×がある接触疲労説はスポーリング現象の説明には不適当であることが分かる。

つぎに、ロール製造過程で生じた欠陥で、クラックやスポーリングの起点になりうる数 mm のマクロ欠陥は、出荷検査で阻止されるか損傷発生後の染色探傷やミクロ観察を用いて比較的容易に検出する。本報では欠陥に起因する事例を除いており、原因となるような欠陥がないという前提であればスポーリングは絞りに起因するクラックとその進展によつて生成するとみるべきであろう。

4.2 スポーリングの防止

圧延において絞りをなくすことが困難である以上、これを前提にした対応をとる必要がある。

4.2.1 ロール材質

クラックが生じ難いか、クラックを浅く止めることを志向したロール材質の研究が行われている。具体的には FHW ロールに生じるクラックはその大部分が絞り込み

にともなう表層部への過大応力に起因する瞬時破壊であるとの考え方に立つて、破壊靱性値 K1C を耐クラック性の評価尺度として用い、ロール製造組織が K1C に与える影響について調べられている⁵⁾。また、ロール疵取り量に対する合金グレンロール中の黒鉛の影響について調べ、黒鉛分布の良いものが疵取りが少ないと報告されている⁶⁾。さらに、ロール欠陥の排除とその検出精度の向上もなされている⁷⁾。

4.2.2 ロールの保守管理

クラックを確実に、しかも早期に検出し、排除してしまふことが基本である。この目的で検出精度の優れた渦流探傷を用い、ロール研削ごとに検査することにより成果がえられつつある⁸⁾。

5. 結 言

FHW ロールに生じるクラックやスポーリングの生成機構解明の手法として、疵の形態を整理するとともに、ロール使用条件、操業記録を手がかりに現象論的な解析を行つた。スポーリングの有力な原因とみなされてきた圧延材絞り説を本報の解析結果からも裏づけできたと思う。今後は、絞りを前提にロール材質のあり方や、絞りによる損傷を軽微に止めるための高精度非破壊疵検出法の進歩と定着化が必要と考える。ロール製造者と使用者の相互理解と協力のもとでの推進が望まれる。

文 献

- 1) 佐野義一: 第 81 回塑性加工シンポジウム, 塑性加工学会 (1982 年 10 月), p. 1
- 2) Y. SEKIMOTO: Trans. Iron Steel Inst. Jpn., 10 (1970), p. 341
- 3) 兼田楨宏, 八塚裕彦, 村上敬宣: 機構論, (1984) 840-15, p. 101
- 4) K. N. TONG and M. K. CHAKKO: Iron Steel Eng. (1964) July, p. 143
- 5) 福沢 宏, 佐野義一, 芳賀道穂: 鉄と鋼, 72 (1986), S306
- 6) 矢中棟二, 外山 弘, 綾垣昌俊, 松田輝雄, 斉藤弘道, 木村和夫, 岡野 勲: 製鉄研究, (1982) 308, p. 104
- 7) 佐野義一, 杉村幸彦, 枝 徹也, 平田一雄: 日立評論, 67 (1985), p. 303
- 8) 宮沢和義, 長屋雅人: NDI 資料, No. 3682 (1981 年 8 月)
- 9) 佐野義一, 西村 豊, 後藤末弘, 藤井 定: 機構論 (1975) 750-19, p. 233
- 10) 三田 久: 機構論, (1978) 780-17, p. 247