

# 熱間帯板圧延用作業ロールの概況

木原 諄二\*

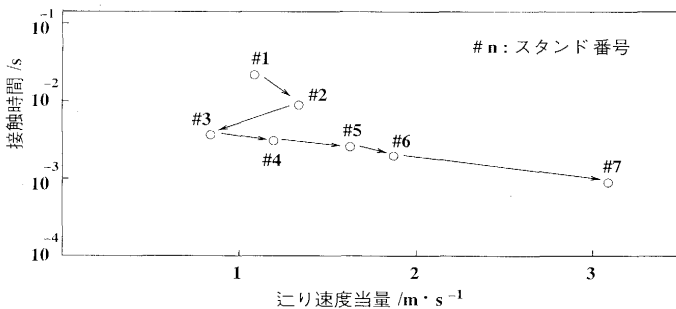
Junji KIHARA

Outlook of Work Rolls in Hot Strip Finisher for Steel Rolling

## 1 赤熱した帯鋼と接するロール

熱間連続帯鋼圧延機の仕上スタンドのロールに用いられる材質について概説を試みたい。

仕上圧延機の作業ロールは約900°Cから1,100°Cの赤熱した帯鋼と圧力200~500MPaのもとで相対すべりする。ロール表面の温度は上記の圧力のもとでの接触では、帯鋼の表面温度に近いものと推定されるが、モデルによる解析結果の一例によれば、仕上前段スタンドにおいて、900°C程度になると考えられる<sup>1)</sup>。仕上スタンド出側の速度を25m/s(1,500m/min)として、厚さを30mmのトランスファーバーから7スタンドの仕上圧延機で30-16-10-8-6.4-5-4-3(mm)のパススケジュールにより3mmの帯板を製造する場合の、仕上各スタンドにおけるロールと板との接触時間とすべり速度当量との関係を図1に示す。このすべり速度当量は今回便宜的にスタンド出側速度から入側速度を差し引いた差の1/2とした。また、作業ロール径として700mmを用いた。



パススケジュール  
30mm - #1 → 16mm - #2 → 10mm - #4 → 6.4mm  
- #5 → 5mm - #6 → 4mm - #7 → 3mm (1500m/min)

図1 想定したパススケジュールにおける、ロールと板との接触時間とすべり速度当量とのマップ

ロールとくに作業ロールはこの接触時間の中に80°C程度の温度から前述のように900°C程度まで加熱され一周の間にもとの80°Cに冷却というサイクルが熱負荷として与えられる。また仕上スタンドは4段あるいは6段圧延機であるので作業ロールは一回転ごとに補強ロールと冷間ではあるが2~3GPaの圧力で接触する。

このような荷重と熱負荷を受ける作業ロールに適用される材質とその特性について概説を試みたい。

## 2 赤熱した帯鋼を圧延する作業ロールの条件

日本において熱間連続圧延により製造される鋼材は、一ヶ月あたり300ktを越える<sup>2)</sup>。仮に板厚3mm、板幅1,200mmとすると10万km以上の長さになる。仕上スタンド最終段の作業ロール径を700mmとして、ロールの一ヶ月あたりの回転数を求めると約5,000万回に及ぶ。熱間連続帯鋼圧延機は日本に約15あるので、平均一ヶ月300万回回転することになる。また、一ロットの単位として15tスラブとすると3mm厚、1,200mm幅の帯板の長さは500m程度となる。そして作業ロールの回転数は約250回にのぼる。前章で明らかにした負荷条件に対して数十ロットは表面状態に変化が生じることが無いことが期待できよう。それだけの表面近くの材質の特性の安定性が求められる。

ロール材質としては、耐熱性と経済的合理性のバランスと、強度と靱性のバランスの良さから、鉄基材料から選ばれてきた。

## 3 作業ロール材質の変遷

日本における熱間連続帯鋼圧延機の仕上スタンド用作業ロールの材質の変遷を図2に示す。図1により明らかにしたように、仕上スタンドの前段3スタンドと後段4スタン

平成5年10月29日受付 平成6年1月14日受理 (Received on Oct. 29, 1993; Accepted on Jan. 14, 1994) (依頼解説)

\*東京大学工学部教授 (Faculty of Engineering, The University of Tokyo, 7-3-1 Hongo Bunkyo-ku, Tokyo 113)

Key words: hot strip mill; finisher; work roll; materials; properties; adamite; high chromium cast iron; high nickel grain cast iron; cast high speed steel.

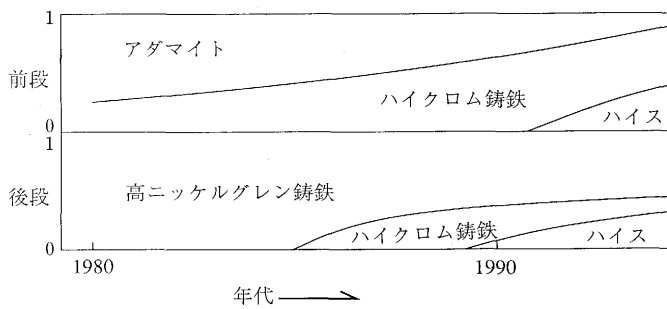


図2 熱間帯鋼圧延の仕上圧延機用作業ロール材質の変遷

ドとでは負荷の状況に変化があり、実機ではこれらを前段、後段と呼んでそれぞれ区別している。

前段でははじめアダマイトロールが使用されていたが、次第にハイクロム鑄鉄ロールが進出し、最近ではハイスロールが使用される傾向にある<sup>3)</sup>。後段では高ニッケルグレン鑄鉄ロールが全面的に使用されていたが、ハイクロム鑄鉄ロール(含黒鉛晶出ハイクロム鑄鉄ロール)の使用が伸び、最近では前段同様ハイスロールの使用も伸びている。次第に全仕上スタンドにおいてハイスロールの使用が実現することになるかもしれない。

この材質の変遷を、鋼系機械工作用工具材質の変遷と比較することは興味深い。1900年代初頭にハイスすなわち高速度鋼が切削工具材質として実用化された。高速度鋼が開発されるまでの工具鋼の材質の変遷は、ロール材質が低クロム材質から高クロム材質に変わりさらに低クロム硬質の材質であるハイスに変わったのに対応している。

工具材料とくに切削工具材料や小型塑性加工工具材料の材質の変遷を見ると、普通鋼の焼入れ焼戻し組織の硬さを利用することから、クロム炭化物の硬さを利用し炭化物被覆率を高めて硬質化した高クロム高炭素系の材質が選ばれるようになった。さらに鉄基工具材料として耐熱性と硬度とを追求した高速度鋼が高速重切削工具材質として開発された。

表1に、鉄の炭化物、セメントイトをはじめ、鋼中に晶出あるいは析出し得る各種金属炭化物の硬さを示す<sup>3)</sup>。高速度鋼はタングステンやバナジウムの炭化物の硬さを利用し、さらに高温焼戻しにおいてこれらの炭化物がマトリックスに微細に析出することによる二次硬化によりマトリックスの耐熱性を向上させたものである。開発当初は靱性に有害な網目状の炭化物組織が晶出することを避けるため、例えば昭和30年代のSKH 9の規格では炭素量が1.0%以下であったが、現在では溶湯の微量不純物の濃度制御技術が進歩し

表1 鋼中に析出し得る各種炭化物のビッカース硬さ(kgf/mm<sup>2</sup>)

炭化物	Fe <sub>3</sub> C	(Fe,Cr) <sub>7</sub> C <sub>3</sub>	Mo <sub>2</sub> C	WC	VC	TiC	B <sub>4</sub> C
ビッカース硬さ	~1000	~1400	1500	2400	2800	3200	3700

たので、表2に例として挙げたSKH53の規格に見るようにそれが倍増している。

表2にはこの他アダマイトロール、高ニッケルグレン鑄鉄ロール、ハイクロム鑄鉄ロールおよびハイスロールの化学成分例を示した。また併せてハイクロム鑄鉄ロールから派生した黒鉛晶出ハイクロム鑄鉄ロールと参考のために前述のSKH53さらに高クロム系工具鋼のSKD11の化学成分例および化学成分規格を示してある。

SKD11の標準の調質状態での炭化物被覆率は15%程度、SKH53では8%程度といわれているが、鑄鉄系のロールでは20~40%になる。

ハイスロールの成分はSKH53と類似している。従って、作業ロールとしての特性の面ではマトリックスの焼戻し軟化抵抗や高温強度の向上による炭化物の脱落阻止の効果も期待できよう。鑄鉄系の材質に比べて炭化物被覆率が低いことが特徴であり、これが炭化物の形態とあいまって摩擦係数が高いという問題と関連するかもしれない。低クロム高バナジウム系の材質について鑄鉄の領域になる炭素量までの範囲で組織形成の研究<sup>4)</sup>も始まっており、高炭化物被覆率/耐熱マトリックス/トライボロジーフレンドリーを目指した低クロム高バナジウム系鑄鉄ロール材質の設計が可能になる日も近いかも知れない。

## 4 材質の変遷とそのニーズ

ロールの材質が仕上前段と後段とでどのような変遷があったかを、鉄鋼工具材質の展開と比較しながら紹介した。さらに、このような変遷がどのようなニーズに応じて生じてきたのかを考えてみたい。

まず、アダマイトロールを仕上前段で使用すると、マグネタイトの薄層が黒皮として表面に形成される。黒皮の良好な状態での形成は、ロールの寿命にとって重要な条件であった。しかし、ロールの摩耗は表層を上から削るアブレッシブ摩耗によって生じるばかりでなく、表層直下の相当応力の高い位置<sup>5)</sup>で疲労が起こり剝離する疲労摩耗も生じる。これは、表層の硬質層による被覆によっては防止できない。さらに、帯板には端があるので、この部分の温度低下やロールにとっての荷重特異位置になり、ここに黒皮が形成しにくい。もし同一幅の帯板を続けて圧延すると「猫の耳」型の摩耗分布が顕著になり板のクラウンや形状の制御ができなくなる。ロールの研削の間隔を広げるために、板幅のスケジュールを最適化しなければならない。作業ロールをシフトすることによって、板幅のスケジュールの最適化条件を緩和することも行なわれている。

図2に示したように、仕上前段でもまた後段においても、アダマイトロールや高ニッケルグレンロールに代わって、ハイクロム鑄鉄ロールが使用されるようになり、全スタンドへの適用も見られるようになった。この最大の理由は後

表2 各種ロール材質の化学成分例

材質	化学成分 (質量%)									
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	W	V	Ni
アダマイトロール	~1.6	~0.6	~0.8	~0.020	~0.005	~1.3	~0.6	—	—	~0.6
高ニッケルグレン	~3.4	~0.8	~0.8	<0.020	<0.005	~2.0	~0.5	—	—	~4.4
鑄鉄ロールハイクロム	~2.8	~0.6	~1.0	<0.030	<0.020	~1.3	~2.3	—	—	~1.3
鑄鉄ロール黒鉛晶出	~3.1	~2.5	~0.8	<0.030	<0.020	~10	~1.0	—	—	~6
ハイクロム鑄鉄ロール	~2.5	—	—	—	—	2.0/7.0	2.0/9.0	<10	>3.0	—
SKH53	1.10/1.25	<0.40	<0.40	<0.030	<0.030	3.80/4.50	4.50/5.50	5.30/6.50	3.00/4.50	—
SKD11	1.40/1.60	<0.40	<0.50	<0.020	<0.020	11/13	0.8/1.2	—	0.20/0.50	—

述するようにハイクロム鑄鉄ロールが高ニッケルグレンロールに対しても高い耐摩耗性を有していることによる。

仕上後段では黒皮形成はほとんど起こらず、アダマイトロールでは摩耗の面で不十分であり、早くからより硬質の高ニッケルグレン鑄鉄ロールが使用された。仕上後段の圧延条件の特徴は図1に示したように高すべり速度にある。この状況では圧延材とロールとの焼付きを防止することが重要な課題となる。高ニッケルグレン鑄鉄ロールは黒鉛が晶出していることである。この材質の代替材として開発された黒鉛晶出ハイクロム鑄鉄ロールも表2に示した化学成分例にみるように、高ニッケルグレン鑄鉄ロールに多量のクロムを加えた上にニッケル量を増した材質で、ニッケルグレンの特性に耐摩耗性を賦与するために高クロム化したものと見なされる。焼付きを晶出した黒鉛で防止するのである。黒鉛による防止の機構は焼付きの成長が晶出黒鉛の位置で食い止められ、脱落することによる<sup>6)</sup>。

耐摩耗性に優れた材質としてハイスロールが開発され、初め仕上げ後段スタンドで使用され、ハイクロム鑄鉄ロールを追って全スタンドへの適用が行なわれるようになった。すでに述べたようにこの材質は高い焼戻し温度と二次硬化によって、炭化物被覆率は低いが、晶出あるいは析出炭化物と強度の高いマトリックスの効果によって、やや摩擦係数が高いものの、優れた耐摩耗性を有している。また製造技術の進歩による耐事故性の向上<sup>3)7)</sup>も図られて実用に堪えるロールの製造が可能になった。

## 5 ロール材質に求められる性質

最後に、熱間連続帯板圧延の仕上スタンド用作業ロールに用いられる材質に求められる性質に関して、日本鉄鋼協会基礎研究会圧延ロール研究部会で調査した結果を紹介したい<sup>8)</sup>。本研究部会は熱間圧延ロール材質WGを組織し、その中で現在使用ロール材質の基本特性に関する文献調査を以下の各社(各担当者)のグループが行なった。すなわち、川崎製鉄(片岡義弘, リーダー)、住友金属工業(後藤邦男)、神戸製鋼所(西村啓五)、日本製鋼所(大橋秀三)、関東特殊製鋼(工藤利弘)、日立金属(大畑拓巳)、淀川製鋼所(西村修)のグループが、1975年から1992年の間にJICSTに登録された和文と英文の文献66件から重要と思われる要点を抽出し整理した。以下にまとめて代えてこの調査結果の概略を圧延ロール研究部会の了解を得て紹介したい。

グループが用いた文献の検索式は以下の通りである。

熱間圧延\*圧延ロール\*(摩耗+耐摩耗性+熱疲れ+熱衝撃+焼付き+表面亀裂+表面性状+表面欠陥+スポーリング)

この式の( )内の各項が現象や特性として重要視されている。これらの現象に関連する特性としては耐摩耗性、耐肌荒れ性、耐焼付き性および耐事故性に集約されるようである。耐肌荒れ性には二通り考えられる。一つは摩耗に付随する表面性状変化が生じにくいことであり、その例としてアダマイトロールの場合では黒皮の付着とその異常な

表3 各種ロール材料の使用特性比較

使用圧延スタンド	特 性			
	耐摩耗性	耐肌荒れ性	耐事故性	耐焼付き性
仕上げ前段	ハイクロム鑄鉄:黒鉛晶出 ハイクロム鑄鉄:アダマイト=1.3:1.2:1.0 ハイス≥2~3×ハイクロム鑄鉄	ハイス≥ハイクロム鑄鉄	ハイス≥ハイクロム鑄鉄	高ニッケルグレン鑄鉄 >アダマイト ハイクロム鑄鉄=アダマイト 黒鉛晶出ハイクロム鑄鉄 >ハイクロム鑄鉄
仕上げ後段	ハイス≥3×ハイクロム鑄鉄 ハイス≥5×高ニッケルグレン鑄鉄	ハイス≥2~3×高ニッケルグレン鑄鉄	高ニッケルグレン≥ハイス	

剥離が起こらないことである。他の一つは、焼付きに伴う肌荒れで、例えばステンレス帯板の圧延時の焼付きが起こりにくいことと対応する性質である。つまり、耐肌荒れ性は、ある場合は耐摩耗性と密接に関連し、他の場合は耐焼付き性と関連する。耐事故性は比較的硬質で新登場の材質であるハイスロールの特性として重視されている。

ハイスロールの耐事故性として検討されている項目は①転動疲労特性、②熱疲労特性、③耐熱亀裂性、④耐絞りクラック性、である。圧延における絞りとは、仕上後段の板厚が小さくなったスタンドにおいて、形状的に好ましくない圧延条件によって板が幅方向に絞れて一部が重なって圧延されることを言う。圧延機を急停止し全スタンドを急冷してこの事故の影響の波及を最小限に留めなければならない。絞りが起こったスタンドの作業ロールは板が重なった位置での急激な圧力上昇、摩擦の急増による温度の上昇の後、急冷される。この後、表面に生じているクラックを完全に除去して使用しないと、圧延中の割損事故が起こりやすいと言われている。

表3は、この文献調査を行なったグループが各仕上スタンドにおいて使用される作業ロール材質の使用特性の現況をまとめたものである。原表に少し加工を加えて紹介する。

## 6 まとめ

本概説では、①熱間連続帯鋼圧延機仕上スタンドの圧延

条件（面圧、温度、接触時間、すべり速度）と②使用される材質の変遷、とに関連して、材質の特性として要求されるニーズの考察を行なってみた。今後のロール材質として、ハイスロールを越えるものとしてより炭化物被覆率の高い低クロム硬質ロールの開発がサーメット（超合金を含む）ロールやセラミックロールの開発の前に検討する価値があるのではないかという考えが、執筆の途中で生まれてきたことを付記して終わることにしたい。

最後に、特性関係で圧延ロール研究会とくに現在使用ロール材質の基本特性に関する文献調査に当たったグループの成果の紹介が可能となったことについて関係者各位に感謝したい。

## 文 献

- 1) P.D.Hodgson, D.McFarlane and R.K.Gibbs: Proc. of 1'st Int. Conf. on Modelling of Metal Rolling Processes, 21-23 Sept. (1993) IOM, p.2 [London, UK]
- 2) 細木繁郎：鉄と鋼，79 (1993), N6
- 3) 原 千里：第148・149回西山記念技術講座（日本鉄鋼協会編），(1993), p.131
- 4) 浜田貴成，周 宏，村井典子，小野幸徳，大城桂作：材料とプロセス，6 (1993), p.1367
- 5) 例えば，S.Timoshneko and J.N.Goodieer: "Theory of Elasticity 27nd and Asian Students' Edition", McGraw-Hill Book Co. New York Tronto London and Kogakusha Co. Tokyo, (1951), p.372-382
- 6) 加藤 治：東京大学学位論文「鉄鋼材料の熱間圧延におけるロールの表面損傷に関する研究」，(1993), p.113
- 7) 佐野義一：第148・149回西山記念技術講座（日本鉄鋼協会編），(1993), p.195
- 8) 圧延ロール研究会：私信