

矯正ロールの理論解析

Theoretical Analyses of Straightening Roll



CPC技術開発室
沼 和宏
Kazuhiro Numa

CPC技術開発室長
尾崎 健一
Ken-ichi Ozaki

技術開発部部長
斉藤 弘道
Hiromichi Saito

東京大学生産技術研究所教授
木内 学
Manabu Kiuchi

要 旨

棒鋼の安定した矯正作業を行う上で、重要な役割を担っている矯正ロールに関して、矯正時の棒鋼との位置関係（ロールギャップ）を明確にするための計算方法を構築した。この方法は、被矯正材である棒鋼の中心線を基準軸とし、その線上からロール表面までの距離を三次元幾何的に求め、ロール周方向の位置に対してこの距離の最小値を求めるものである。この方法を、実機矯正時の条件に適用して、ロール軸方向のロールギャップの推移を数値的に表した。

Synopsis:

The straightening roll plays an important role in stable steel bar straightening work. We have established a method to calculate and determine the geometric relation (roll gap) between the steel bar and straightening roll during a straightening operation.

In this method, with the axis of the steel bar being straightened made a reference axis, the distance from the axis to the roll surface is obtained three-dimensionally, and the minimum value of this distance against the circumferential direction of the roll is obtained. By applying the method to the actual straightening condition, we expressed numerically the transitive change of roll gap in the roll axial direction.

1 緒言

現在、当社では、独自に創出した連続注入クラッド法(CPC法)¹⁾によって、棒鋼矯正機用ハイスロールを製造しており、製鉄所において適用拡大中である。

近年、棒鋼の製造技術への要求が高まりつつあり、棒鋼の断面寸法の高精度化、真円度の高度化、表面の高品質化などが強く求められている。それらの要求を満足するためには、棒鋼の圧延加工技術の高度化のみならず、矯正加工機の機械精度やロールの形状、設定位置および動作精度、耐久性などの補佐的な技術について、十分検討していく必要がある²⁾。

棒鋼矯正機としては、一般的につづみ形ローラ式が用いられている。この矯正方式において、矯正ロールは、安定した矯正作業を行う上で、重要な役割を担っており、矯正ロールの性能（形状、強度、耐摩耗性など）によっては、

矯正機の性能を著しく低下させ、製品精度、表面性状の不具合を発生させてしまう場合がある。しかしながら、これまでに矯正ロールの性能、特に矯正時の性能についての十分な検討はなされていない。

今後、様々な矯正条件に対して適正なロール性能を的確に確保していくためには、矯正ロールと材料（棒鋼）の接触状況、接触面の状態を定量的に把握する必要がある。そこで、その第一歩として、矯正時の棒鋼と矯正ロールとの位置関係（ロールギャップ）を求める方法について検討した。本稿では、そのロールギャップの基本的な計算方法、また、それをもとに得られた計算結果について報告する。

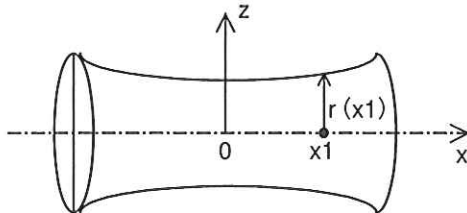
2 矯正加工時の問題点

棒鋼の矯正方法として、現在最も広く用いられている方法は、回転繰り返し曲げ矯正法である。Fig.1に、この方法

で使用される上・下矯正ロールのロールプロフィールを、Fig.2に、矯正時のロールと棒鋼との関係およびロールに働く軸力を示す。

回転繰り返し曲げ矯正法は、被矯正材すなわち棒鋼をロール表面に沿って長手方向に曲げると同時に、長手方向軸周りに回転させることで、棒鋼に加える曲げ作用面を規則的に変化させ、変形（矯正）する方法である。

(a) Top straightening roll



(b) Bottom straightening roll

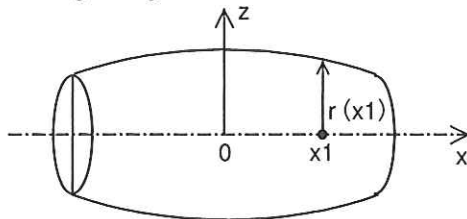


Fig.1 Profiles of straightening rolls

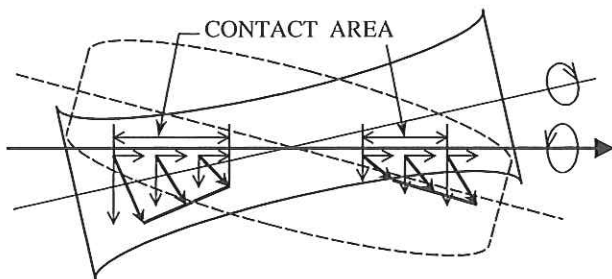


Fig.2 Geometrical relationship between top straightening roll and steel bar in straightening process

Fig.1からも判るように、矯正ロールの回転径は、軸方向の各位置で異なっている。すなわち、Fig.2に示すように、ロール・被矯正材間で発生する接触面圧、摩擦力、相対滑り速度およびそれらより定まる軸力は、ロール表面上で一様ではない。

矯正ロールの性能、例えば、剛性、形状などに変化が生じると、安定した矯正時に得られる軸力のバランスが崩れ、有効な矯正が出来ない状況に陥る結果となる。

したがって、回転繰り返し曲げ矯正法を有効に実行して行くためには、ロールと被矯正材との幾何学的な位置関係が被矯正材に与える影響のシミュレーションを実施し、ロールによって被矯正材に加えられる曲がりの程度、曲がり

の順序、経路を正確に把握した上で、状況に適したロール設計、ロール設置を行うことが必要不可欠である。

3 ロールギャップの計算

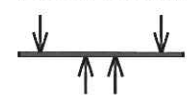
回転繰り返し曲げ矯正法で使用される上・下矯正ロールは、所定の隙間と棒鋼に対して所定の交差角度を付けた状態で設置される。棒鋼は、この上・下矯正ロール間の隙間を通過する過程で、各々のロールと接触し、繰り返し曲げを受ける。矯正時の変形としては、主に3点曲げが加わるが、その概略図を、圧延時の条件と併せてFig.3に示す。矯正時間の経過により、ロールは少なからず摩耗するが、その摩耗が増大すると、3点曲げができない状態、例えば2点曲げ（圧延条件）へ変化してしまい、矯正条件を十分満足出来ないことになる。

① Straightening

(3-point bending)



(4-point bending)



② Rolling

(2-point bending)



Fig.3 Straightening conditions

3点曲げの状態で矯正が実施されている場合、当然、棒鋼は、矯正ロール表面の3カ所で接触していることになるが、その時、接触点は棒鋼と上・下矯正ロール表面各々との距離が最も近い位置になると考えられる。

この最短距離を呈する位置、すなわち接触位置が明確になれば、矯正時の棒鋼と矯正ロールとの位置関係を把握することができ、棒鋼に加わる曲げ変形について知り、任意の矯正環境（隙間、交差角度といったロール設置条件）に適した矯正ロールを製造、適用する事も可能となる。

以上の考え方にに基づき、棒鋼とロール表面間の最短距離を呈する位置を算出するための基本的な計算方法を構築した。なお、以下、棒鋼が矯正ロール間の隙間をまっすぐ通過する場合を想定して説明しているが、これは上に述べた上・下矯正ロールのロールギャップそのものを計算していることに相当する。

3.1 矯正ロールと棒鋼との幾何学的関係

3.1.1 ロール横断面上でのロール表面から棒鋼の軸心までの距離

ロール表面から棒鋼軸心までの最短距離を算出するに当

たり、まず、ロール軸心に垂直な横断面上のロール表面から棒鋼軸心までの距離の計算方法を検討した。Fig.4に、ロール軸心に垂直な任意の面におけるロール横断面と棒鋼軸心との位置関係を示す。ここで、ロール表面上の点から棒鋼軸心までの距離（図中L）は、線分QrQの長さで表すことが出来る。この時の点Qr、点Qの座標は、Table 1に示す通りである。したがって、距離Lは、右式で与えられる。なお、図中の α は矯正ロールと棒鋼との交差角度、hは矯正ロールと棒鋼の軸間距離である。(1)式のと看、 L^2 すなわちLは最小値をとる。なお、(1)式が成立する場合は、点Pr、Qr、Qが、Fig.5に示すように、一直線上に並んだ場合に相当する。

Table 1 Coordinates

	Y	Z
Qr	$r(x) \cdot \sin \theta$	$h - r(x) \cdot \cos \theta$
Q	$x \cdot \tan \alpha$	0

$$\begin{aligned}
 L^2 &= \left\{ h - r(x) \cdot \cos \theta \right\}^2 + \left\{ r(x) \cdot \sin \theta - x \cdot \tan \alpha \right\}^2 \\
 &= h^2 - 2h \cdot r(x) \cdot \cos \theta + r(x)^2 \cdot \cos^2 \theta + r(x)^2 \cdot \sin^2 \theta - \\
 &\quad 2x \cdot \tan \alpha \cdot r(x) \cdot \sin \theta - x^2 \cdot \tan^2 \alpha \\
 &= h^2 + r(x)^2 + x^2 \tan^2 \alpha - 2h \cdot r(x) \cdot \cos \theta - 2x \cdot \tan \alpha \cdot \\
 &\quad r(x) \cdot \sin \theta
 \end{aligned}$$

最小条件より

$$\partial(L^2) / \partial \theta = 0$$

$$2h \cdot r(x) \cdot \sin \theta - 2x \cdot r(x) \cdot \tan \alpha \cdot \cos \theta = 0$$

故に

$$\tan \theta = \frac{2x \cdot \tan \alpha \cdot r(x)}{2h \cdot r(x)} = \frac{x \cdot \tan \alpha}{h} \dots \dots \dots (1)$$

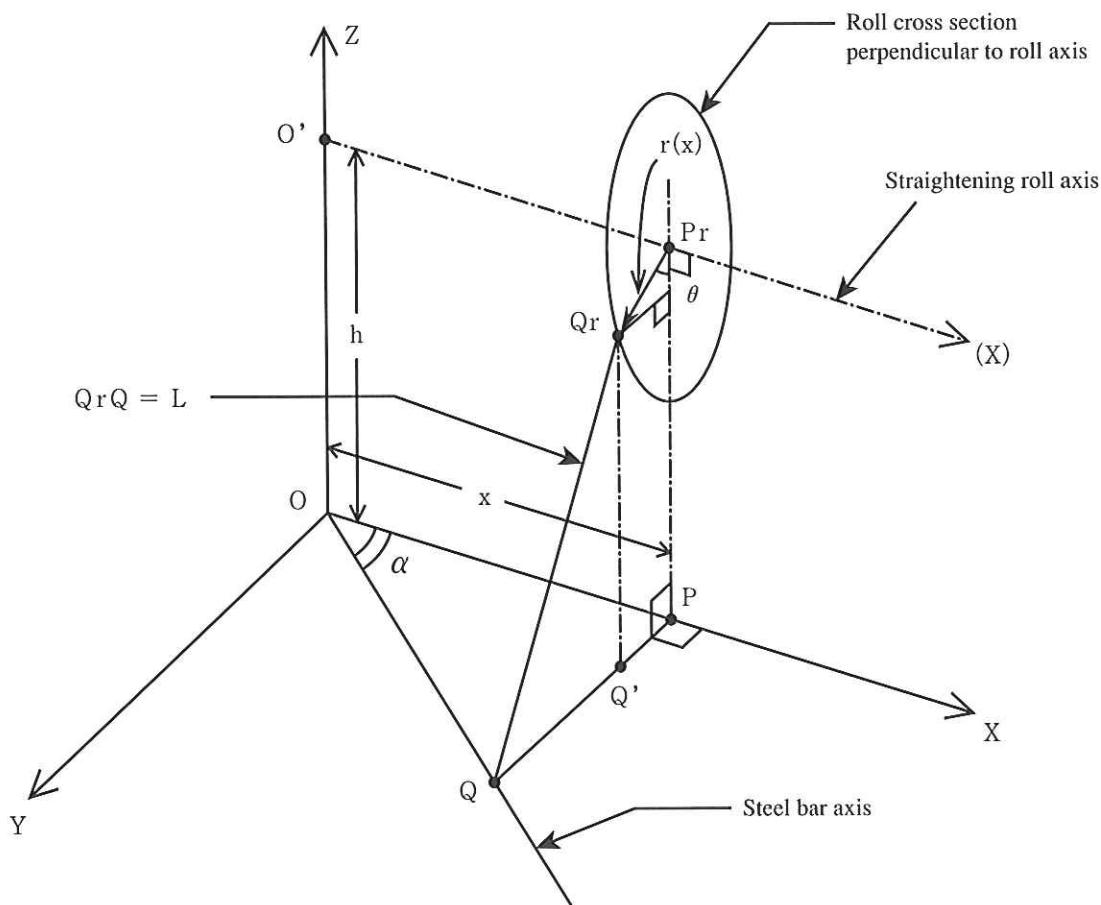


Fig.4 Geometry of roll cross section and steel bar axis

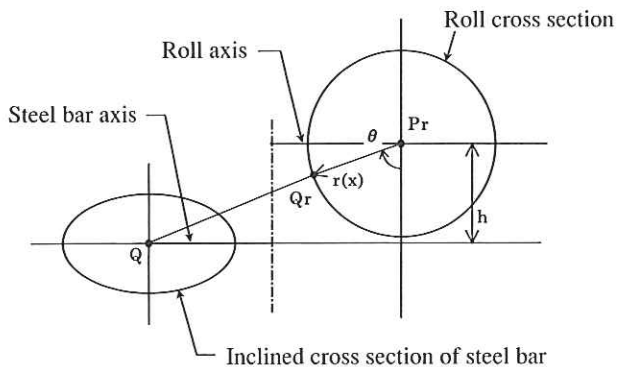


Fig.5 Cross sections perpendicular to roll axis

3.1.2 ロール表面から棒鋼の軸心までの最短距離の計算
 先にも述べたように、実機における矯正ロールは、棒鋼に対して、ある交差角度を付けて設置されている。つまり、ロール表面と棒鋼軸心は、Fig.6に示すような位置関係となる。Fig.6から、ロール表面上の任意の点 Q_r から棒鋼軸心へ垂直に降ろした時の距離 L_0 （線分 $Q_r Q_0$ ）が、ロール表面から棒鋼軸心までの最短距離となる。ここで、点 Q_0 の座標および各線分の長さを求めると、次式のように表すことができる。

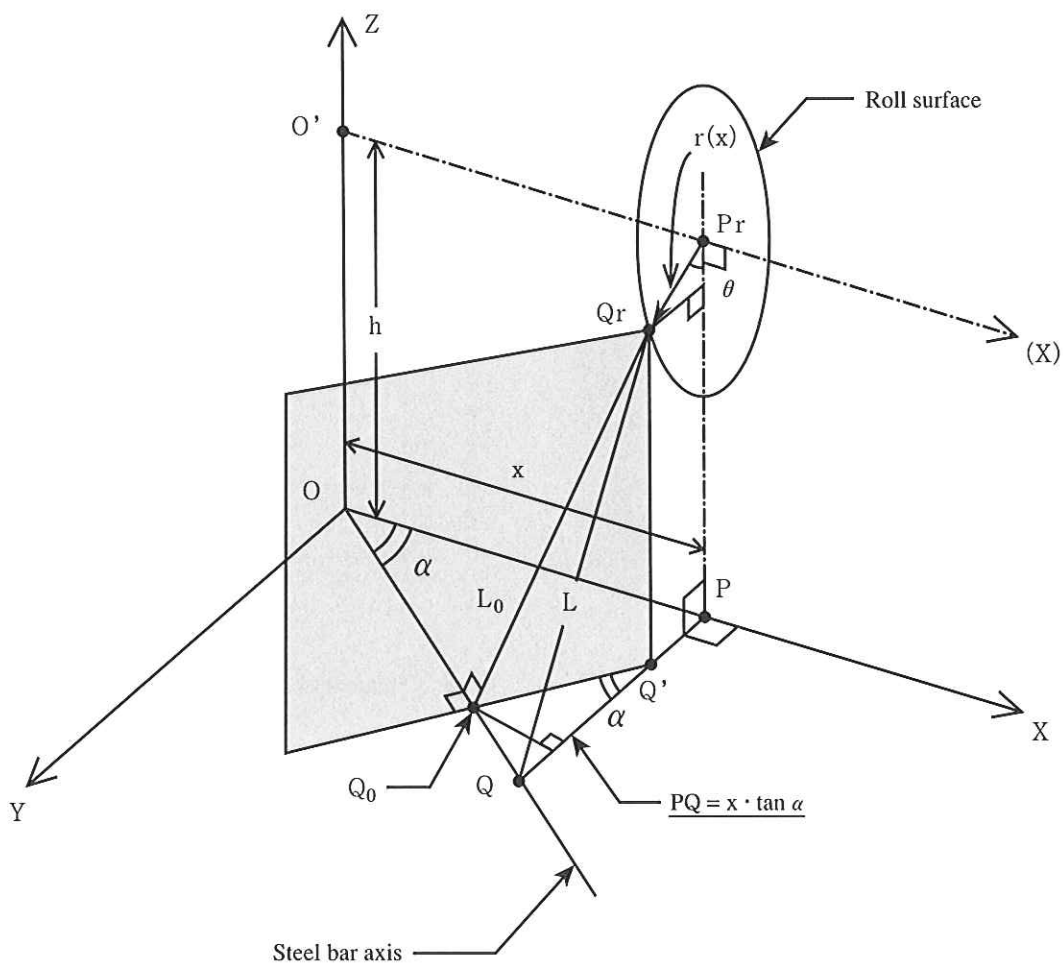


Fig.6 The shortest distance from roll surface to steel bar axis

$$\overline{OQ} = \sqrt{x^2 + (x \cdot \tan \alpha)^2} = x \cdot \frac{1}{\cos \alpha}$$

$$\overline{OQ} = \overline{PQ} - \overline{PQ'} = x \tan \alpha - r(x) \cdot \sin \theta$$

$$\overline{Q_0Q'} = \overline{OQ'} \cdot \cos \alpha = (x \cdot \tan \alpha - r(x) \cdot \sin \theta) \cdot \cos \alpha$$

点 Q_0 のx座標 $= x - \overline{Q_0Q'} \cdot \sin \alpha$

点 Q_0 のy座標 $= \overline{PQ'} + \overline{Q_0Q'} \cdot \cos \alpha$

上式および3.1.1で求めた点 Q_r の座標から、距離 L_0 の2乗は次式で得られる。

$$(L_0)^2 = \left\{ x - (x - \overline{Q_0Q'} \cdot \sin \alpha) \right\}^2 + \left\{ \overline{PQ'} + \overline{Q_0Q'} \cdot \cos \alpha - \overline{PQ} \right\}^2 + \left\{ h - r(x) \cdot \cos \theta \right\}^2$$

$$= (\overline{Q_0Q'})^2 + \left\{ h - r(x) \cdot \cos \theta \right\}^2$$

すなわち

$$(L_0)^2 = \left\{ x \cdot \tan \alpha - r(x) \cdot \sin \theta \right\}^2 \cdot \cos^2 \alpha + \left\{ h - r(x) \cdot \cos \theta \right\}^2$$

$$= x^2 \cdot \tan^2 \alpha \cdot \cos^2 \alpha - 2x \cdot \tan \alpha \cdot \cos^2 \alpha \cdot r(x) \cdot \sin \theta + x^2(x) \cdot \cos^2 \alpha \cdot \sin^2 \theta + h^2 - 2h \cdot r(x) \cdot \cos \theta + r^2(x) \cdot \cos^2 \theta$$

$$= x^2 \cdot \sin^2 \alpha + h^2 + r^2(x) - x \cdot \sin 2\alpha \cdot r(x) \cdot \sin \theta - r^2(x) \cdot \sin^2 \alpha \cdot \sin^2 \theta - 2h \cdot r(x) \cdot \cos \theta \dots \dots \dots (2)$$

最小条件より

$$\partial L_0^2 / \partial \theta = 0 \dots \dots \dots (3)$$

(2)(3)より

$$-x \cdot r(x) \cdot \sin 2\alpha \cdot \cos \theta - 2r^2(x) \cdot \sin^2 \alpha \cdot \sin \theta \cdot \cos \theta + 2h \cdot r(x) \cdot \sin \theta = 0$$

$$\therefore [2h \cdot r(x)] \cdot \sin \theta = [x \cdot r(x) \cdot \sin 2\alpha] \cdot \cos \theta + [r(x)^2 \cdot \sin 2\alpha] \cdot \cos \theta + [r(x)^2 \cdot \sin^2 \alpha] \cdot \sin 2\theta \dots \dots \dots (4)$$

上式(4)を満足する角度 θ を $\theta = \theta^*$ とすると、この時、ロール軸方向 X における距離 L_0 は最小となる。この(4)式に、矯正ロールの形状、棒鋼の形状、交差角度、軸間距離といった矯正条件(数値)を代入し、ロール軸方向の任意の位置 X について計算をすることにより、ロール軸方向のロールと棒鋼との最短距離、すなわち接触位置を判断することが可能となる。

4 ロールギャップの計算結果

(4)式により、実機で使用されている上・下矯正ロールを想定して、棒鋼軸心とロール表面との最短距離の計算を行った。Fig.7は、本計算で適用した上・下矯正ロールのロールプロフィール(モデル)である。また、Table 2は矯正時

の条件であるが、これは、現在某製鉄所における実機の矯正条件である。なお、計算は、ロール中心から380Lの範囲(ロールの半胴長)について実施した。

Fig.8、Fig.9に、それぞれ棒鋼軸心から上矯正ロールおよび下矯正ロールまでの距離の計算結果を示す。上矯正ロールについてはロール中心から350mm、下矯正ロールについてはロール中心が最短距離であった。

この結果は、棒鋼軸心との距離を示したものであるが、更に棒鋼の径を考慮に入れば、矯正ロールとの接触位置を明確にする事が可能である。

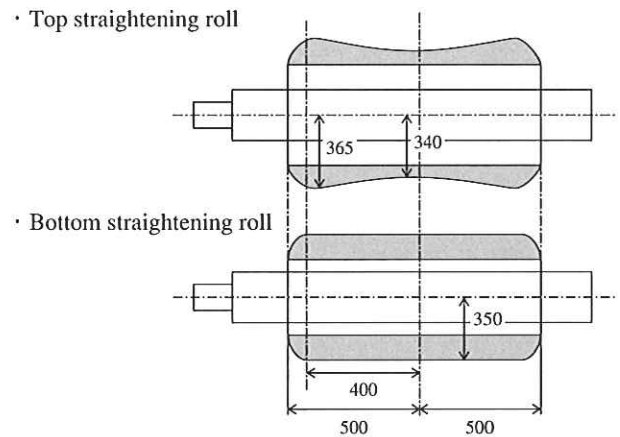


Fig.7 Straightening rolls for calculation

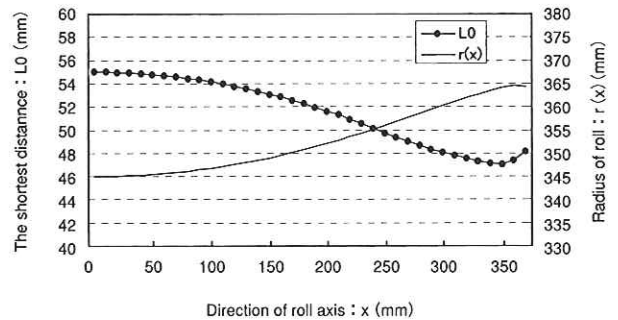


Fig.8 Distance from top straightening roll to steel bar axis

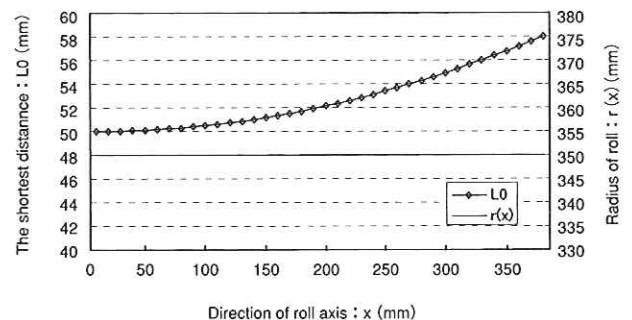


Fig.9 Distance from bottom straightening roll to steel bar axis

Table 2 Calculation condition

	Top roll	Bottom roll
Crossing angle : (α)	15.3°	12.3°
Distance from roll axis to steel bar axis : (h)	400mm	400mm

5 結言

矯正ロールの理論解析と題して、矯正時の棒鋼と矯正ロールとの位置関係の把握を目的に、ロールと棒鋼軸心間の距離（ロールギャップ）の基本的な計算方法について構築した。さらに、実機矯正加工時の条件に適用することによって、矯正時のロールギャップの推移を数値的に表すことが出来た。

本報告では、上・下矯正ロール間を棒鋼がまっすぐ通過

することを想定しているが、実質はあくまでロールギャップの計算について示したものであり、ロールギャップが適確に把握できれば、矯正時の棒鋼に加えられる曲がりや、その経路について検討できる。

したがって、今後は、その棒鋼の曲がりについての計算を加えながら、計算結果の信頼性を高めていくとともに、矯正ロールまたは矯正機の設計に利用していきたいと考えている。

参考文献

- 1) 坂本 眞一、斉藤 弘道：フジコー技報, No 1 (1993), p16
- 2) 木内 学：棒・線材の矯正技術, 生産研究, 48. No 4 (1996.4), p226

