

## 棒・線材圧延の変形・負荷特性

Deformation and Force Characteristics in Wire and Rod Rolling Processes

柳 本 潤\*  
Jun YANAGIMOTO

棒・線材圧延において工程の設計・工程の最適化および自動形状制御を行うためには、圧延加工中の被加工材の変形・負荷特性の把握が重要な課題である。本解説では、棒・線材圧延加工の変形・負荷特性に関する各種のモデル式・実験式ならびに 3 次元剛塑性有限要素法による数値解析結果について概説する。

## 1. 緒 言

棒・線材圧延における被圧延材は複雑な 3 次元変形を呈するため、これを解明し変形・負荷特性を定量的に把握することは容易ではない。しかしながら、本圧延プロセスにおける工程の設計・工程の最適化および自動形状制御を行うためには、3 次元塑性変形の解明が必須の条件である。

従来、棒・線材圧延加工について、被圧延材の塑性変形特性を実験的に解明し、それを体系的な知識あるいは実験式として整理し利用することが試みられてきた。斉藤ら<sup>1)</sup>は、2 ロールミルによるラウンド～オーバルパス・スクエア～ダイヤモンドパス・スクエア～オーバルパスの幅広がり・延伸・先進・圧延荷重・圧延トルクを統一的に予測し得る実験式の開発を試みた。また篠倉ら<sup>2)</sup>、柳本<sup>3)</sup>は、それぞれ幅広がり特性の実験結果の数式化を試みている。しかしながら上述の研究により検討の対象とされた圧延条件範囲はかならずしも十分ではなく、広範囲な圧延条件にわたり、変形・負荷特性を高精度に予測し得る実験式の開発に必ずしも成功したとは言えない。また、連続圧延における工程の設計・工程の最適化および自動形状制御には、スタンド間張力と各パスの塑性変形特性との関係を系統的に解明することが重要であるが、張力付与時の棒線材圧延における変形・負荷特性に関する研究は必ずしも多くはなく<sup>4), 5)</sup>、さらに、近年各所にて盛んに導入がはかられている 3 ロールミルについての研究は非常に少ない<sup>6), 7)</sup>。

また、板材の圧延加工と比較して棒・線材の圧延加工の理論解析事例は少なく、従来スラブ法<sup>8)</sup>、エネルギー法<sup>9)</sup>などの適用が試みられているに過ぎない。

近年、素形材加工の各分野において、3 次元剛塑性有

限要素法（以下 FEM）の適用が盛んに試みられている。筆者は、薄板材、棒・線材、型材などの圧延加工における 3 次元塑性変形の統一的な解明に供し得る解析システム CORMILL System の開発および応用に関する一連の研究を行ってきた<sup>10), 11)</sup>。棒・線材圧延加工の変形・負荷特性を解明するに当たって、CORMILL System のごとき理論解析技術は、いわゆる数値実験装置としての役割を期待し得る。これらの理論解析技術は、圧延後の製品断面形状、圧延荷重・圧延トルク等の巨視的特性値に加え、応力・ひずみ分布などの微視的特性値をも短時間かつ組織的に解明し獲得することを可能とし、さまざまな問題の検討のために有用な情報を提供し得る。

本解説では、まず棒・線材圧延加工の変形・負荷特性に関する従来の実験的研究について述べ、ついで 3 次元剛塑性有限要素法による理論解析事例について説明する。

## 2. 棒・線材の変形・負荷特性に関する実験的研究

## 2.1 矩形換算法

矩形換算法は、棒・線材圧延加工を帯板の圧延に置き換え、幅広がり・圧延荷重を予測しようとするものであり、後述する各種の実験式の基礎となる考え方である。すなわち図 1 に示すように、被圧延材の初期断面プロフィールとロール直下での孔型プロフィールとの交点 a-a 間の距離を（等価）板幅  $B_c$  と考え、次式により圧延前後の（等価）板厚  $\overline{H}_0$ ,  $\overline{H}_1$  を定義する。

$$\overline{H}_0 = \frac{2}{B_c} \int_{-B_c/2}^{B_c/2} h_0(x) dx \quad (1)$$

$$\overline{H}_1 = \frac{2}{B_c} \int_{-B_c/2}^{B_c/2} h_c(x) dx \quad (2)$$

この式をもとに、たとえば帯板圧延の幅広がりに関する、Siebel の式

\*東京大学生産技術研究所 第 2 部

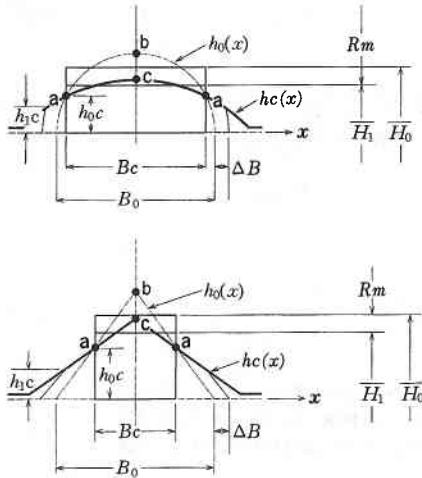


図1 矩形換算法

$$\Delta B = 0.35L_d \left( \sqrt{\frac{H_0}{H_1}} - 1 \right) \quad (3)$$

等を用いて幅広がりを予測することができる。ただし、 $L_d$ は接触弧長であり、たとえば図1に示す平均ワークロール半径  $R_m$  を用いて、

$$L_d \doteq \sqrt{R_m(H_0 - H_1)} \quad (4)$$

と与えられる。言うまでもなく、このような方法では孔型圧延特有の圧延方向横断面内の不均一変形を無視しているため、汎用性および精度の点で問題があるとされている<sup>12)</sup>。

2.2 幅広がり式

前節にて述べたように、帯板圧延における幅広がり式を棒・綿材圧延に適用するには問題があるため、各種の幅広がり式が提案された。本節では、篠倉ら<sup>2)</sup>、および柳本<sup>3)</sup>により提案されたものについて説明する。まず、篠倉ら<sup>2)</sup>により提案された式は、

$$\Delta B = \alpha \frac{B_0}{2} s \cdot q \quad (5)$$

ただし、 $s$ は形状係数  $\left( = \frac{2L_d}{2B_0 + H_0} \right)$ 、 $q$ は排除断面積率であり、

$$q = \frac{\int_{-B_0/2}^{B_0/2} (h_0(x) - h_c(x)) dx}{\int_{-B_0/2}^{B_0/2} h_0(x) dx} \quad (6)$$

で与えられる。 $\alpha$ は実験定数であり、斎藤ら<sup>1)</sup>の研究によれば、ラウンド～オーバルパスでは $\alpha=0.97$ 、オーバル～スクエアパスでは $\alpha=1.06$ 、スクエア～ダイア、

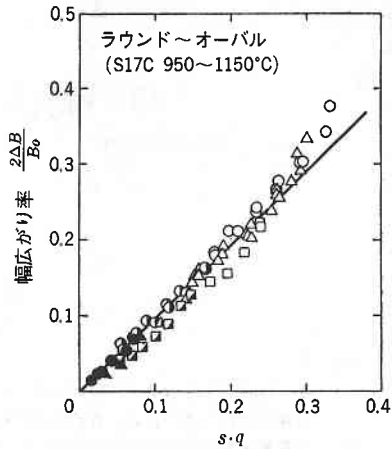


図2 幅広がりと  $s \cdot q$  との関係<sup>1)</sup>

スクエア～オーバル、ダイア～スクエア、オーバル～ラウンドパスでは $\alpha=0.83$ であるとされている。斎藤ら<sup>1)</sup>の実験結果を図2に示すが、式(5)により幅広がり精度良く予測できることがわかる。

柳本により提案された式は、以下の通り表される<sup>3)</sup>。

$$\Delta B = C_1 \frac{B_c}{2} \left[ \frac{1 - C_2 \left\{ \frac{\eta_m}{1 - \eta_m} \right\} \tan \theta}{1 - \eta_m} \right]^\kappa + C_3 \frac{B_0 - B_c}{2} \frac{h_{1c}}{h_{0c}} \frac{1}{1 - \eta_m} - \frac{B_0}{2} \quad (7)$$

ただし、

$$\kappa = \omega^s + \mu S - 1, \quad S = \frac{\sqrt{4 \frac{R_m}{H_0} \eta_m}}{1 + 2 \frac{B_c}{H_0}}, \quad \eta_m = 1 - \frac{H_1}{H_0}$$

であり、 $\omega$ は材料の種類により定まる実験定数、 $C_1$ 、 $C_2$ 、 $C_3$ は圧延方式・孔型形状により定まる実験定数、 $\mu$ は摩擦係数、 $\theta$ は孔型の平均勾配である。柳本<sup>3)</sup>は一連の実験により、軟鋼 ( $C=0.2\%$ ) の熱間圧延では $\omega=1.02$ 、ウランド～オーバルパスでは $C_1=1.02$ 、 $C_2=0$ 、 $C_3=0.80$ 、スクエア～ダイアパスでは $C_1=0.98$ 、 $C_2=0.2$ 、 $C_3=0.90$ を得ている。

その他にも各種の幅広がり式が提案されたが、篠倉らにより提案された式(5)は唯一の実験定数  $\alpha$  を含み、種々の圧延条件における幅広がりを精度よく説明できるため、棒・綿材圧延の工程設計および自動形状制御モデルには、式(5)が多く用いられている。

2.3 負荷特性

圧延荷重  $P$  を表現する実験式の一般形は、以下のごとく与えられる。

$$P = Q \cdot F_d \cdot K_{fm} \quad (8)$$

ただし、 $F_d$  は投影接触面積であり種々の求め方が考案されているが、篠倉の解説<sup>12)</sup>に詳しく述べられているのでここでは省略する。 $K_{fm}$  は平均変形抵抗であり、志田<sup>13)</sup> および美坂ら<sup>14)</sup> の式により求める。たとえば美坂らの式<sup>14)</sup> は、炭素含有率  $C$  [%] および温度  $T$  [°C] をパラメータとした以下の形で与えられる。

$$K_{fm} = exp \left( a + \frac{b}{T+273} \right) \bar{\epsilon}^{0.21} \dot{\bar{\epsilon}}^{0.13} \quad (9)$$

$$a = 0.126 - 1.75C + 0.594C^2,$$

$$b = 2851 + 2968C - 1120C^2$$

$Q$  は圧下力関数であり、各種の実験式が提案されている。その一例として、斎藤らにより提案された式<sup>1)</sup>を示す。

$$Q = A + \frac{Q_0 - a'}{2} \left( \frac{m}{m_0} + \frac{m_0}{m} \right), \quad m_0 = D_1 \delta' + D_2,$$

$$Q_0 = D_3 \delta' + D_4 \quad (10)$$

ただし  $m$  はロール間隙比  $m = \frac{3L_d}{H_0 + 2H_1}$ ,  $\delta' = \frac{\text{(ロール溝底でのロール径)}}{\text{(被圧延材の延長高さ)}}$  である。 $a'$ ,  $A$ ,  $D_1$ ,  $D_2$ ,

$D_3$ ,  $D_4$  は実験定数であり、斎藤ら<sup>1)</sup> が志田の変形抵抗式<sup>13)</sup> をもとに実験的に求めた結果は、ラウンド～オーバルパスでは  $A = 0.554$ ,  $D_1 = 0$ ,  $D_2 = 1.30$ ,  $D_3 = 0.022$ ,  $D_4 = 1.31$ , スクエア～ダイアパスでは  $A = -0.020$ ,  $D_1 = 0.0$ ,  $D_2 = 1.30$ ,  $D_3 = 0.069$ ,  $D_4 = 1.21$  である。しかしこの式には、被圧延材とロール表面との摩擦の影響がパラメータとして含まれておらず、汎用性および精度の点で問題がある。

圧延トルク  $G$  を表現する式の一般形は、次式により与えられる。

$$G = P \cdot L_d \cdot \psi \quad (11)$$

$\psi$  はトルクアーム係数であり、種々の実験式から考案されている。たとえば、斎藤らの研究<sup>1)</sup> によれば、

$$\psi = E_1 m + \frac{E_2}{m} + E_3 \quad (12)$$

のように与えられる。 $E_1$ ,  $E_2$ ,  $E_3$  は実験定数であり、ラウンド～オーバルパスについては  $E_1 = -0.065$ ,  $E_2 = 0.063$ ,  $E_3 = 0.557$ , スクエア～ダイアパスについては  $E_1 = -0.067$ ,  $E_2 = 0.130$ ,  $E_3 = 0.535$  と与えられている。

### 3. 剛塑性 FEM による 3 次元理論解析

本章では、筆者らにより行われた、ラウンド～フラットパス、ラウンド～オーバルパスによる棒線材圧延加工を対象とした一連の数値解析結果について述べる。圧延

方式としては、前章にてのべた 2 ロール方式に加え、3 ロール方式をも対象としている。以後、孔型半径・圧下率・ロール径等の圧延条件因子が、圧延荷重・幅広がり・実減面率に及ぼす影響を系統的に調査した結果を示す。本章では、前後方張力を付与しない場合についての解析結果をとりあげるが、張力を付与した場合の結果については別報<sup>10), 11)</sup> を参照されたい。

### 3.1 計算条件

図 3 に対象とした 2 ロールおよび 3 ロール方式でのロール配置を、表 1 に計算条件を示す。公称圧下率  $R$  を 10%～30% までの 3 水準、孔型半径  $r_g = 40, 50, 60, 120, \infty$  (フラット) mm の 5 水準、ロール径を  $D = 500, 300$  mm の 2 水準に変化させて解析を行い、それぞれの方式による圧延時の被加工材の変形・負荷特性につき検

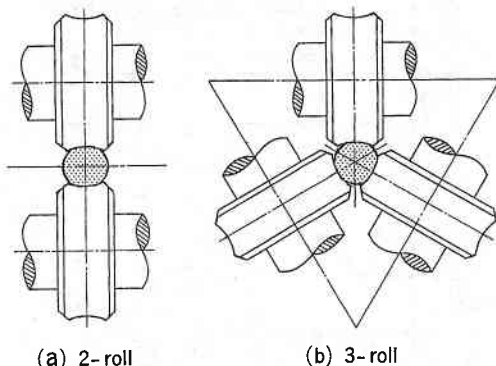


図 3 ロール配置

表 1 計算条件

Roll diameter $D$ /mm	300.0, 500.0
Rolling speed $V$ /MPM	180.0
Roll barrel length $L$ /mm	200.0
Initial bar radius $r_0$ /mm	25.0
Groove radius $r_g$ /mm	40, 50, 60, 120, $\infty$ (Flat)
Nominal reduction in height $R$ /%	10, (15), 20, (25), 30
Flow stress /MPa	$\bar{\sigma} = 4.5(1+2\bar{\epsilon})^{0.21} \dot{\bar{\epsilon}}^{0.13}$
Friction coefficient $\mu$	0.25
Front & back tensions /kN	0.0, 0.0
Mesh system $N_x \times N_y \times N_z$	2-roll: $11 \times 4 \times (4+8+2)$ 3-roll: $8 \times 4 \times (4+8+2)$

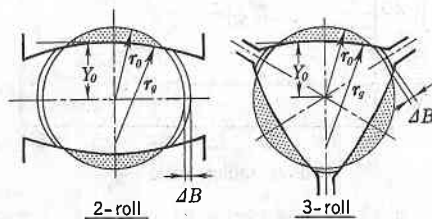


図 4 記号の定義

討を行った結果について述べる。解析結果を図・表にまとめるに際し導入した記号ならびにその定義は、以下に示すとおりである (図 4 参照)。

- 素線半径 /mm :  $r_0$
- 孔型半径 /mm :  $r_g$
- 素線中心よりロール表面までの距離 /mm :  $Y_0$
- 孔型比 :  $r_0/r_g$
- 公称圧下率 /% :  $R = (1 - Y_0/r_0) \times 100$
- 幅広がり量 /mm :  $\Delta B$
- 幅広がり率 /% :  $\beta = (\Delta B/r_0) \times 100$

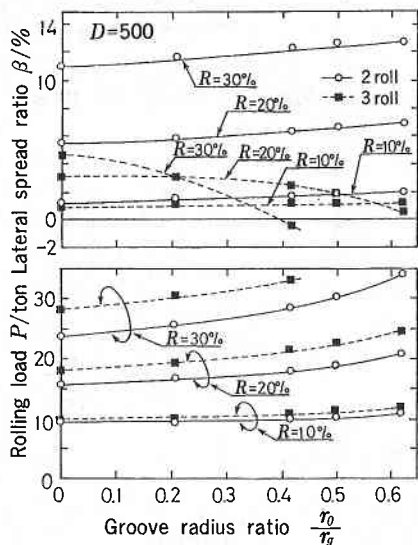


図 5 孔型半径  $r_g$  と幅広がり率  $\beta$ ・圧延荷重  $P$  との関係 (ロール径  $D=500\text{mm}$ )

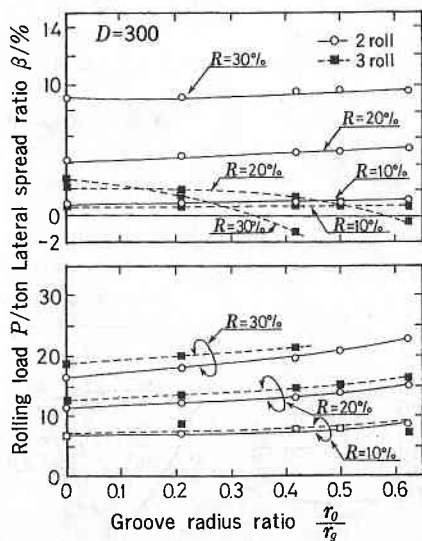


図 6 孔型半径  $r_g$  と幅広がり率  $\beta$ ・圧延荷重  $P$  との関係 (ロール径  $D=300\text{mm}$ )

- 圧延荷重 /ton :  $P$
- 実減面率 /% :  $R_e$  (圧延後の製品断面積と素線断面積から求めた減面率)

### 3.2 幅広がり率および圧延荷重についての 3 次元剛塑性 FEM 解析結果

(1) 孔型比  $r_0/r_g$  の影響 図 5 および図 6 に、公称圧下率  $R$  一定の条件の下での、孔型比  $r_0/r_g$  の変化に対する幅広がり率  $\beta$  及び圧延荷重  $P$  の変化を示す。2 ロール圧延では、孔型比が増加する (孔型半径  $r_g$  が減少する) につれて被圧延材の受ける束縛が大きくなるため、幅広がり率・圧延荷重ともに増加する。ただし、この場合、公称圧下率  $R$  一定の下で孔型比を増加させているため、実減面率は孔型比の増加とともに増加していることに注意されたい。

これに対し 3 ロール圧延の場合の幅広がり率は、公称圧下率  $R=20\%$  以上では孔型比の増加に伴い減少する傾向にある。これは、2 ロール圧延に比較して被圧延材の受ける束縛が大きいに起因しており、実験により得られている傾向と一致している。

図 7 に、2 ロールおよび 3 ロール圧延時の、孔型比  $r_0/r_g$  の変化に対する実減面率  $R_e$  の変化を示す。2 ロール圧延および 3 ロール圧延の場合とも、孔型半径  $r_g$  の減少に伴う実減面率の増加の割合はほぼ等しい。

(2) 実減面率の影響 以後、実減面率  $R_e$  の変化に対する幅広がり率  $\beta$ ・圧延荷重  $P$  の変化につき検討を加える。

図 8 に、実減面率の変化に対する幅広がり率の変化を示す。3 ロール圧延では、幅広がり率が微小であるために、排除断面積率  $q$  (幅広がりがないものとして求めた減面率) と実減面率とはほぼ一致しているので、図 8 より公称圧下率に対する最大幅広がり率を直接読みとるこ

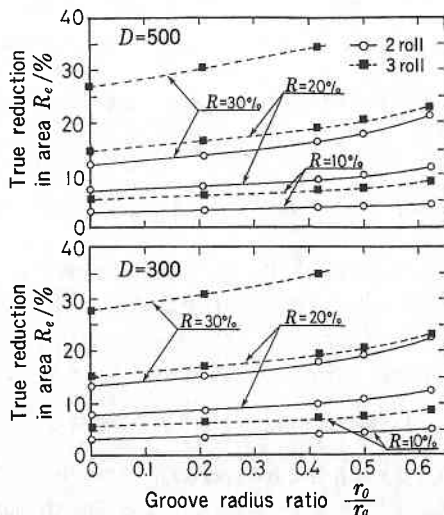


図 7 孔型半径  $r_g$  と実減面率  $R_e$  との関係

とができる。また、図9、図10には、実減面率の変化に対する圧延荷重の変化を示す。特に3ロール圧延の場合の圧延荷重は、本報にて取り扱った計算条件の範囲で、ロール径と実減面率を変数とする一義的な関係により表せることがわかる。

4. 結 言

本解説では、棒・綿材圧延の変形・負荷特性に関する各種の実験式ならびに筆者らにより行われた3次元剛塑性FEM解析結果を述べた。第3章にて述べた3次元剛塑性FEMによる解析に要する時間は、エンジニアリングワークステーション(NSSUN SP/10 model 30)で約1時間程度であり、実用的な数値実験装置として利用が可能な状況に至りつつある。

しかしながら3次元剛塑性FEMには、実際の孔型設計および形状制御用のオンラインモデルとして利用するには計算時間がかかりすぎるという問題が、依然として残っている。したがって、

- 1) 3次元剛塑性FEMそのものをより一層高速化すること、
- 2) 3次元剛塑性FEMにより得られた結果をもとに、各種の実験式の高精度化に関する検討をすすめること、あるいは、3次元剛塑性FEMにより得られる解析結果をデータベースとして整備すること、

が今後の重要な課題となろう。(1993年3月23日受理)

参 考 文 献

- 1) 斎藤好弘・高橋洋一・森賀幹夫・加藤健三：塑性と加工，24-273 (1983)，1070.
- 2) 篠倉恒樹・勝山昭史：29回塑加連講論，(1978)，109.
- 3) 柳本左門：塑性と加工，5-40 (1964)，315.
- 4) 野口幸雄・青柳幸四郎・川並高雄：35回塑加連講論，(1985)，45.
- 5) 黒川知明・山川富雄：塑性と加工，22-242 (1981)，264.
- 6) 藤田米章・佐々木健人：33回塑加連講論，(1982)，151.
- 7) 堀端眞彦・本村 貢：塑性と加工，34-384 (1993)，49.
- 8) 柳本左門・青木 至：機論，33-249 (1967)，826.
- 9) 小森和武・加藤和典：機論A，53-494 (1987)，1983.
- 10) 柳本 潤・佐々木保・木内 学・河野輝雄：塑性と加工，33-383 (1992)，1406.
- 11) 柳本 潤：生産研究，43-11 (1991)，512.
- 12) 篠倉恒樹：塑性と加工，34-384 (1993)，18.
- 13) 美坂佳助・吉本友吉：塑性と加工，8-79 (1967)，414.
- 14) 志田 茂：日立評論，52 (1970)，731.
- 15) 柳本 潤・木内 学・井上幸雄：塑性と加工，34-384 (1993)，81.

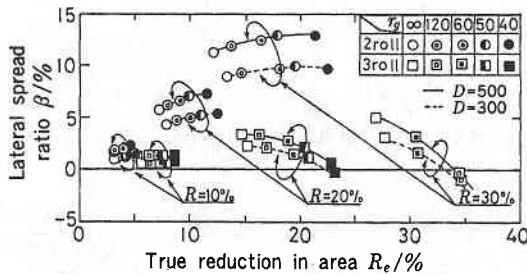


図8 実減面率  $R_e$  と幅広がり率  $\beta$  との関係

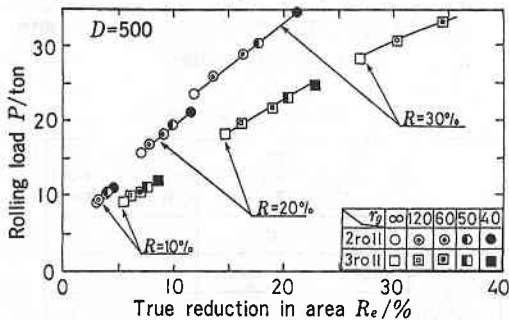


図9 実減面率  $R_e$  と圧延荷重  $P$  との関係 (ロール径  $D=500\text{mm}$ )

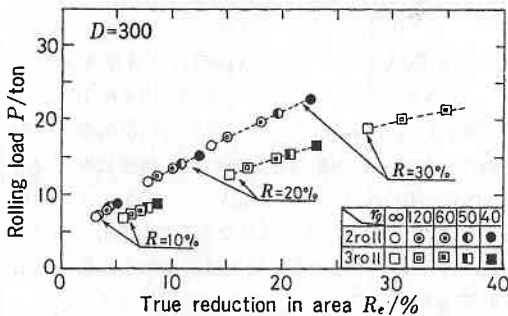


図10 実減面率  $R_e$  と圧延荷重  $P$  との関係 (ロール径  $D=300\text{mm}$ )