
ドラム形クロップシャー剪断能力限界の解明

Explanation of Limit in Shearing Capacity of Drum Type Crop Shear

仲田 卓史(Takushi Nakada) 高木 清(Kiyoshi Takagi) 浜田 一明(Kazuaki Hamada) 豊川 明(Akira Toyokawa) 伊藤 康道(Yasumichi Ito) 三宅 祐史(Yushi Miyake)

要旨：

ホットストリップミルにおける、粗圧延後のシートバー厚を増大させることによる低温抽出を目的として、千葉、水島両製鉄所のドラム形クロップシャーの能力調査を実施し、従来から用いられていた剪断抵抗値を見直した。さらに、実機での各種調査から、①ドラム形クロップシャーにおける剪断抵抗値、②ドラムネック部に発生する曲げモーメント、③剪断スピードと剪断時のスピードドロップの関係、④駆動系に及ぼす TAF の影響、を定量化し、省エネルギー操業に則した能力限界を明らかにした。そしてその結果から実測値に基づいたクロップシャーの改造を行った。クロップシャー増強後、粗ミル圧延後のシートバー厚の増大を図り、加熱炉燃料原単位で $8 \times 10^3 \text{ kcal/t}$ の削減、歩留で 0.12% 向上の効果が得られている。

Synopsis：

Recently low temperature rolling is adopted at the hot strip mills for saving energy and increasing product yield. Therefore, sheet bars rolled by rough rolling mills have become thicker in size and an increase in the capacity of the crop shear is demanded. The authors have studied from many kinds of tests on the drum type crop shears at Chiba and Mizushima Works, corrected the shearing stress value which has been used so far, and reinforced their capacity and also make clear the limit in shearing capacity of the drum the shear for the operation. As the result, the following have been clarified. (1) Shearing stress at the drum type crop shear (2) Bending moment of the drum necks (3) Relation between shearing speed and the speed drop rate (4) Influences of TAF on the drives. Through this increase in the capacity of the shear fuel consumption has been reduced by $8 \times 10^3 \text{ kcal/t}$ and product yield has been increased 0.12%.

(c)JFE Steel Corporation, 2003

仲田 卓史^{*2} 高木 清^{*3} 浜田 一明^{*4} 豊川 明^{*5} 伊藤 康道^{*6} 三宅 祐史^{*7}

Explanation of Limit in Shearing Capacity of Drum Type Crop Shear

Takushi Nakada, Kiyoshi Takagi, Kazuaki Hamada, Akira Toyokawa, Yasumichi Ito, Yushi Miyake

要旨

ホットストリップミルにおける、粗圧延後のシートバー厚を増大させることによる低温抽出を目的として、千葉、水島両製鉄所のドラム形クロップシャーの能力調査を実施し、従来から用いられていた剪断抵抗値を見直した。さらに、実機での各種調査から、①ドラム形クロップシャーにおける剪断抵抗値、②ドラムネック部に発生する曲げモーメント、③剪断スピードと剪断時のスピードドロップの関係、④駆動系に及ぼすTAFの影響、を定量化し、省エネルギー操業に則した能力限界を明らかにした。そしてその結果から実測値に基づいたクロップシャーの改造を行った。クロップシャー増強後、粗ミル圧延後のシートバー厚の増大を図り、加熱炉燃料原単位で 8×10^3 kcal/tの削減、歩留で0.12%向上の効果が得られている。

Synopsis:

Recently low temperature rolling is adopted at the hot strip mills for saving energy and increasing product yield.

Therefore, sheet bars rolled by rough rolling mills have become thicker in size and an increase in the capacity of the crop shear is demanded. The authors have studied from many kinds of tests on the drum type crop shears at Chiba and Mizushima Works, corrected the shearing stress value which has been used so far, and reinforced their capacity and also make clear the limit in shearing capacity of the drum type shear for the operation.

As the result, the following have been clarified.

- (1) Shearing stress at the drum type crop shear
- (2) Bending moment of the drum necks
- (3) Relation between shearing speed and the speed drop rate
- (4) Influences of TAF on the drives

Through this increase in the capacity of the shear fuel consumption has been reduced by 8×10^3 kcal/t and product yield has been increased 0.12%.

1. 緒 言

当社は、ホットストリップミルを、千葉製鉄所に2ライン、水島製鉄所に1ラインと計3ライン有している。

近年、鉄鋼業における、省エネルギー操業が、叫ばれる中で、ホットストリップミルの、省エネルギーの核となるのは、加熱炉燃料原単位低減であり、当社のミルにおいても、廃熱回収強化¹⁻³⁾、低温抽出等、種々対策を実施し、効果をあげてきている。その中であって、粗ミル圧延後の、シートバー厚を増大し、①シートバー熱放散の削減、②仕上圧延での塑性加工熱の活用、により、加熱炉からの、スラブ抽出温度を下げる、いわゆる、低温抽出の拡大は、温片装入の拡大とともに、今後の省エネルギー対策の代表格であり、それから得られる炉内スケール減少による歩留向上効果も大きい。

筆者らは、この低温抽出拡大の、設備上および操業上の律速条件について検討した結果、

- (1) クロップシャーの剪断能力によって、制限を受けること
- (2) 仕上圧延機前段(F1～F3)ロールの肌荒れが、懸念されること

が、わかり、後者については、油圧延の有効利用と、ロール

クーラント増強により、解決可能と考え、クロップシャーの増強を56年中に、3ミルとも、実施した。

本稿では、増強計画に際し実施した、千葉、水島両製鉄所のドラム形クロップシャーの能力検討結果、実機データから得た、能力限界の考え方および新クロップシャー稼動後の成果について紹介する。特に、従来のドラム形クロップシャーに関する報告は、メーカー側から^{4,5)}が主であるが、ここでは、ユーザーとしての利点を活かし、実機データを基にまとめた。

2. 増強検討の基本方針

ホットストリップミルのクロップシャーの形式には、ドラム形、4-クランク形、2-クランク形、ペンデュラム形があるが、ドラム形が主流であり、当社の従来のシャーも全てドラム形を採用していた。

増強検討は、各種シャーの比較検討を行い、機構が単純で、かつ保守性にも優れ投資額も少ないドラム形を進めることにした。

また、増強検討の基本方針として、下記を設定した。

- (1) 従来のクロップシャーの能力検討を行い、そこから得られ

*1 昭和58年4月27日原稿受付
*2 千葉製鉄所保全全部保全技術室
*3 水島製鉄所保全全部保全技術室
*4 水島製鉄所保全全部保全技術室主任(掛長)

*5 千葉製鉄所保全全部保全技術室主任(掛長)
*6 千葉製鉄所熱延部熱延技術室主任(課長)
*7 水島製鉄所薄板圧延部薄板技術室主任(課長)

た知見を、新シャー設計に織り込む。

- (2) 各ミルの生産量、鋼種に合わせて、増強範囲を極力縮小する。
- (3) 設置スペースを考慮し、できる限りコンパクト化を図るため限界設計を行い、投資額を削減する。

3. 増強検討

3.1 従来のシャーの能力検討

従来のクロップシャーの概要を Fig. 1 に、公称仕様を Table 1 に示す。

増強検討に先立ち、従来のシャーの能力調査を実施した。そのフローチャートを Fig. 2 に示す。

3.1.1 理論上の検討

従来から、ギロチンシャーの場合に用いられている剪断抵抗値を基に、ドラム形シャーの慣性エネルギー限界、および機械

強度上の限界を求めた。

3.1.2 剪断力と剪断トルクの関係

Fig. 3 にドラム形シャーにおけるシャードラムと板の関係を示す。剪断力と剪断トルクの関係は、この図から(1)式のようになる。

$$P = \frac{T}{D \sin U_c} \quad \dots\dots\dots (1)$$

P : 剪断力 (kgf)

T : 剪断トルク (kgf・m)

(1)式によって得られる剪断力の最大値を $P_{\max}$ とすると、剪断抵抗は(2)式で求められる。

$$\tau = \frac{P_{\max}}{BH} \quad \dots\dots\dots (2)$$

τ : 剪断抵抗 (kgf/mm²)

B : 板幅 (mm)

H : 板厚 (mm)

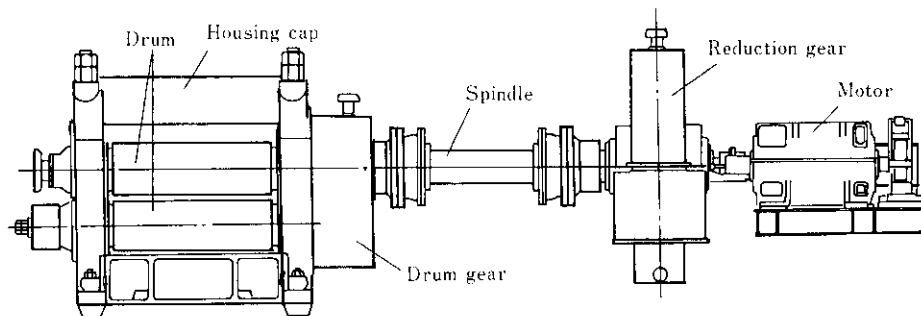


Fig. 1 Schema of conventional crop shear (Chiba No.1 Hot)

Table 1 Specification of conventional shears at hot strip mill line

Item \ Works		Chiba No.1	Chiba No.2	Mizushima
Sheet bar	Type	Drum (Single knife)	Drum (Double knife)	Drum (Double knife)
	Thickness (mm)	25	32	35
	Width (mm)	1 270	1 900	2 200
	Drum dia. (mm)	609.6	711.2	815
Motor		150 kW × 1	205 kW / 410 kW × 1	250 kW / 500 kW × 2

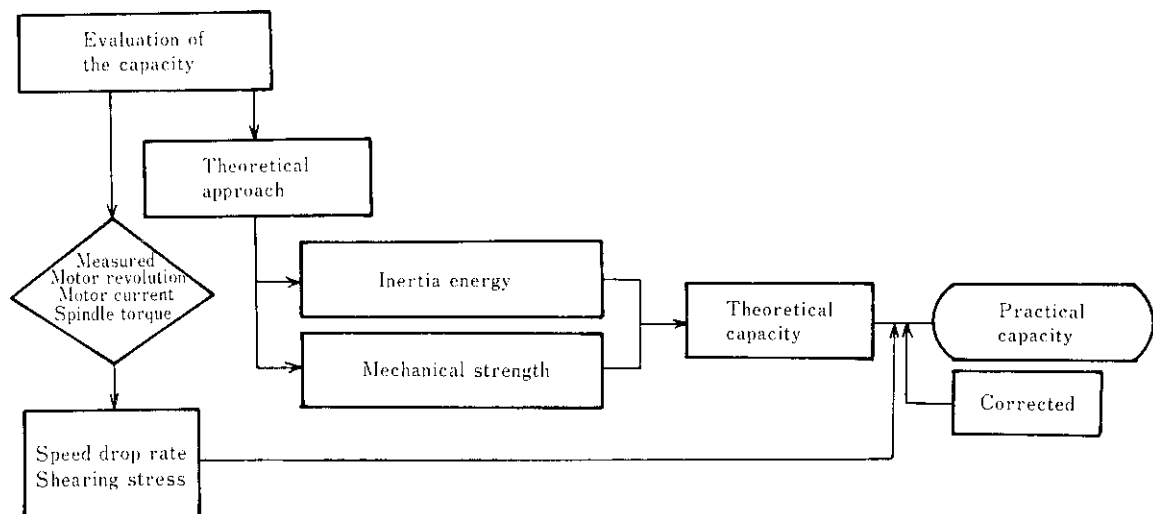


Fig. 2 Flow chart for examining conventional shear capacity

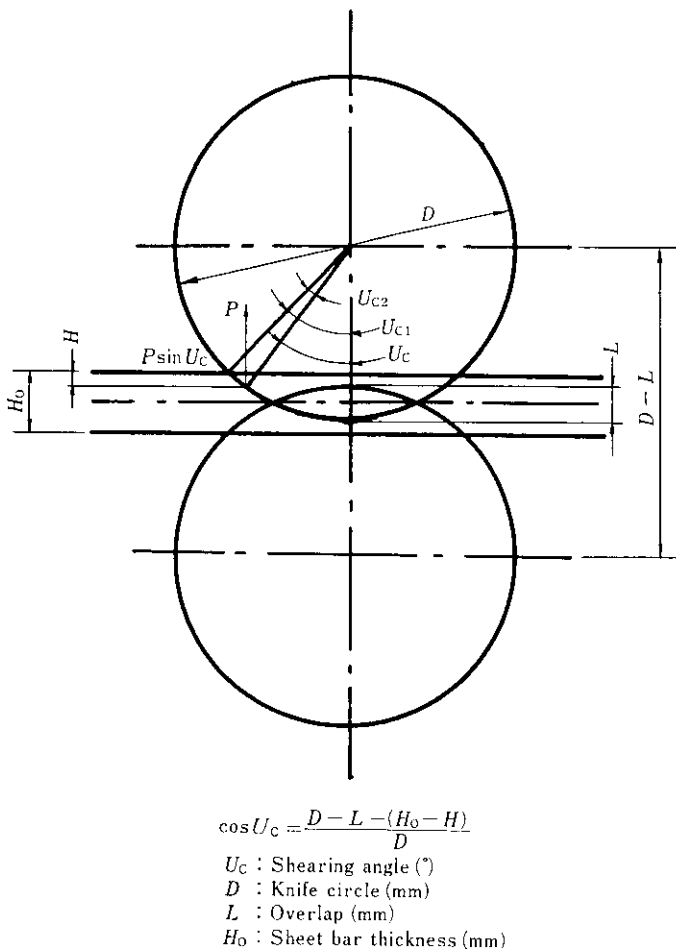


Fig. 3 Relation between drum shear and plate

3-1-3 スピンドルトルクの測定

剪断時のスピンドルトルク実測値から、(1)、(2)式を用いて求めた剪断抵抗と剪断温度の関係と、従来からドラム形クロップシャーの設計に用いられていたギロチン型シャーの剪断抵抗値とを、比較して、Fig. 4に示すが、前者の値の方が明らかに大きいことがわかった。

3-1-4 機械精度の測定

クロップシャーの能力、特に切れ味に対しては、剪断時の刃先ギャップの開き等、機械剛性、機械精度が与える影響は大き

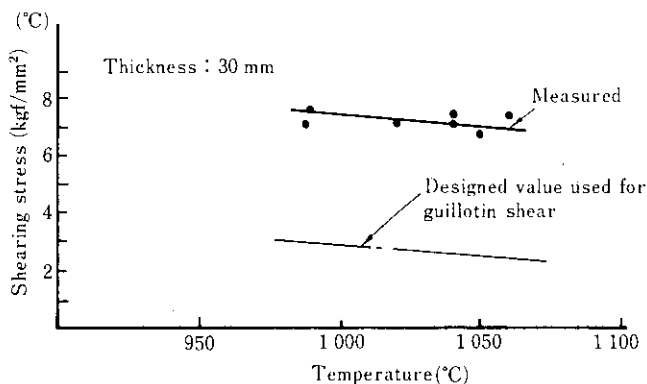


Fig. 4 Shearing stress measured from spindle torque of conventional shear

い。従来のクロップシャーでは、剪断面のひげ、かえりが大きく、切れ残りのトラブルが発生していたため、機械精度の調査を行った。

刃先ギャップの開き要因毎のギャップ計算値と実測値をFig. 5に示す。計算値の方が実測値より大きい、傾向は合っており、刃先ギャップの開きを防止するには、ドラムのねじれ防止と軸箱の倒れ防止が重要であることが、明らかになった。

3-1-5 従来のシャーの実能力

以上の測定結果から、公称最大仕様材剪断時の主要部の疲労限度に対する安全率を求めたものを、Table 2に示す。この安全率から求めた従来のシャーの実能力をTable 3に示すが、各々公称値を満足していないことがわかった。この主原因は、設計

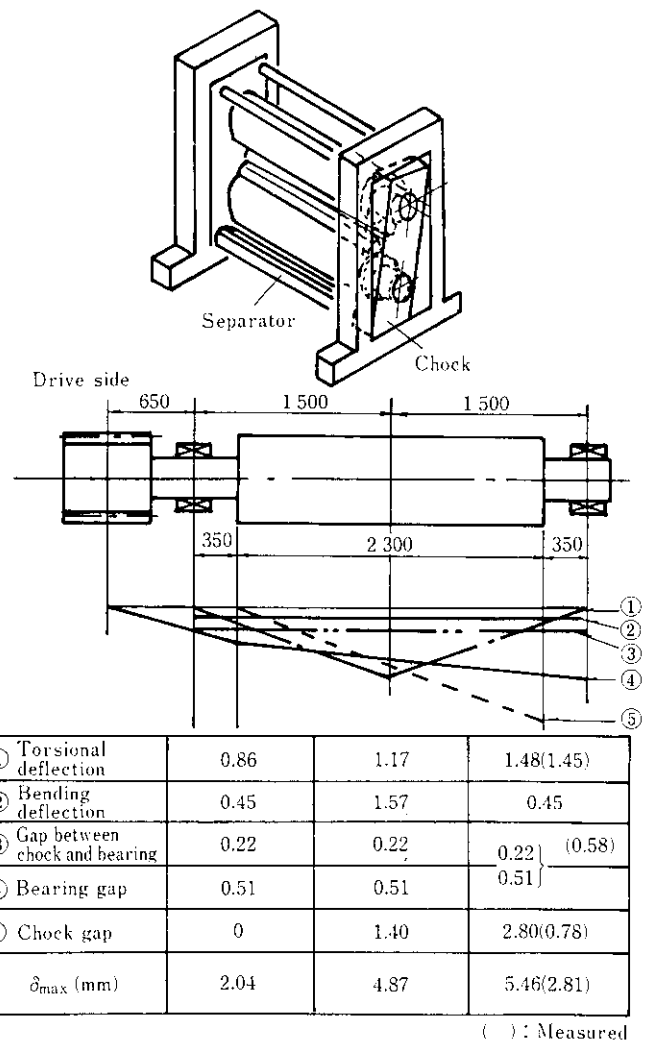


Fig. 5 Calculation of knife gap

Table 2 Safety factors for fatigue limit when nominal maximum plate sheared

Item	Works	Chiba No.1	Chiba No.2	Mizushima
Drum		1.07	0.65	0.79
Drum gear		1.38	1.50	0.68
Spindle		0.94	0.65	1.07
Reduction gear		0.94	0.74	0.86

Table 3 Practical capacity of conventional crop shear

Works		Chiba No.1	Chiba No.2	Mizushima
Sheet bar	Thickness (mm)	25 (23)	32 (26)	35 (23)
	Width (mm)	1 170 (1 270)	1 544 (1 900)	1 457 (2 200)
①	The portion of minimum strength	Drive shaft	Drive shaft	Drum gear
②	Material to be sheared	SS41	SS41	SS41
③	Temperature (°C) at shearing	900	900	900

() at maximum width

剪断抵抗値と実測値との大きな違いであり、従来から機械系には、かなりの負担がかかっていたと考えられた。

3.2 剪断能力限界の検討

3.2.1 ドラムひずみの測定

シャードラムは、両端を軸受で支持され、自由支持構造に近いものと考えられるが、完全な自由支持構造ではないと判断し、ドラム軸端に発生する固定モーメントを求めるために実験を行った。実験概要および結果を、Fig. 6 に示す。これからわかるように、軸受部にも固定モーメントが発生している。この現象がドラムネック強度に与える影響は大きく、今回の増強に際しての、ドラム軸強度検討上の1つのポイントとなった。

3.2.2 スピンドルトルクと剪断面積の関係

実測スピンドルトルクと、剪断面積の関係を、Fig. 7 に示す。(a)は、板厚を一定にして整理したもの、(b)は板厚を変化させたものである。前者は、剪断面積とはほぼ比例し、面積0でトルクも0に収束するが、後者は、0に収束しない。この原因としては、下記のことが考えられる。Fig. 3 と、(1)式の関係より、剪断力 P と、剪断トルク T の関係は、(3)式で与えられる。

$$T = \sqrt{1 - \left[\frac{D - L - (H_0 - H)}{D} \right]^2} \cdot D \cdot P \quad (3)$$

最大剪断力発生点を、板厚の半分切り込んだ点と仮定し、

$$\phi = \sqrt{1 - \left[\frac{D - L - 0.5H_0}{D} \right]^2} \cdot D \quad (4)$$

とて、水島シャーでの各値を代入すると ϕ と H_0 の関係は、Fig. 8 のようになり、 ϕ は0に収束しない。ドラム形シャーでは、刃先にオーバーラップがあり、板厚によって剪断力の刃先円接線方向成分が変化するため、スピンドルトルクと剪断面積は比例せず、トルクも0に収束しないと言える。したがって、スピンドルトルクから剪断抵抗を求めると、同一剪断面積であっても板厚の薄いものの方が大きくなる。ギロチンシャーとドラム形シャーとの大きな相違点はこの点であり、筆者らが、新シャー設計に剪断力ではなくスピンドルトルクを用いたのも、この理由による。

3.2.3 剪断力とスピンドルトルクの関係

従来、ドラム形クロップシャーの剪断力は、ドラム本体にひずみゲージをとりつけて測定されていた。筆者らは、千葉製鉄所のNo.1 ホットストリップミルラインのシャーが、セバレート

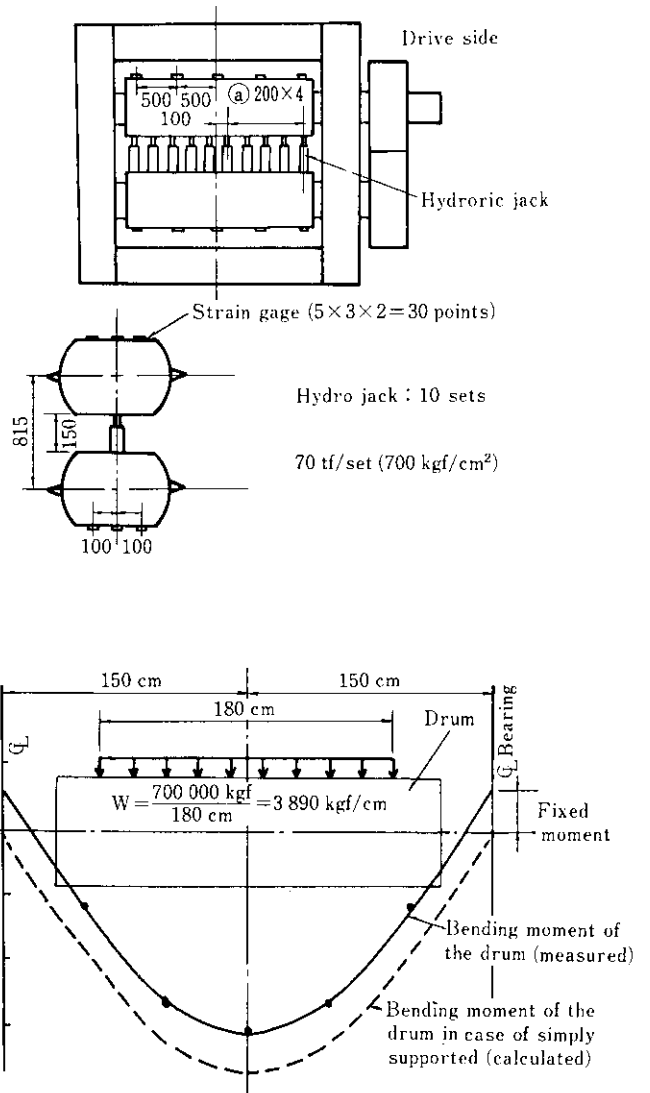


Fig. 6 Measurement of the drum moment

チョックであるという特徴を利用して、Fig. 9 の要領で、ハウジングとハウジングキャップ間に発生するひずみを測定し、その値を、上ドラム重量、チョック重量、ギヤー反力で補正して剪断力を求める簡便法で測定した。測定値の校正は、上下ドラム間に、油圧ジャッキを入れて行った。

この方法で得られた剪断力から求めた剪断抵抗値を、スピンドルトルクから求めたものと比較して、Fig. 10 に示す。スピンドルトルクから求めた値は、Fig. 4 に示した値と、ほぼ同等の値

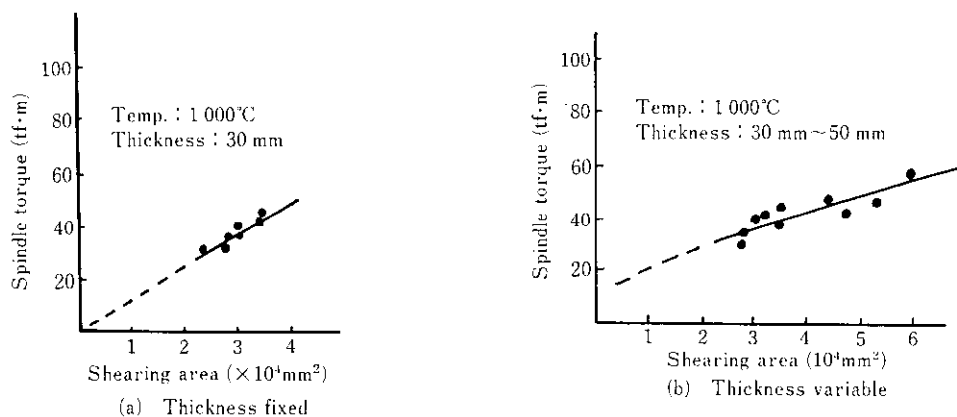


Fig. 7 Relation between the spindle torque and the shearing area

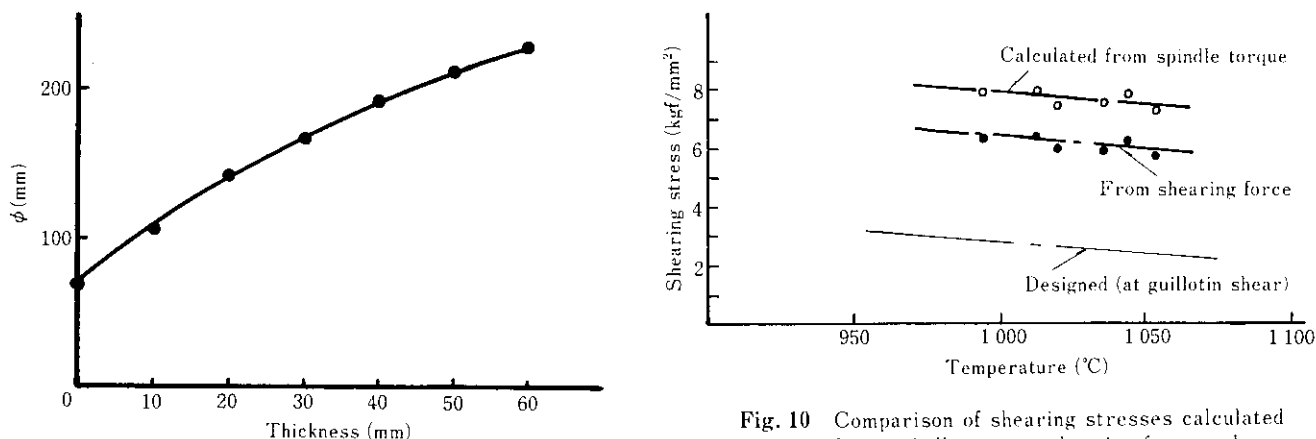


Fig. 8 Relation between torque factor, ϕ , and plate thickness

Fig. 10 Comparison of shearing stresses calculated from spindle torque, shearing force and designed at guillotin shear

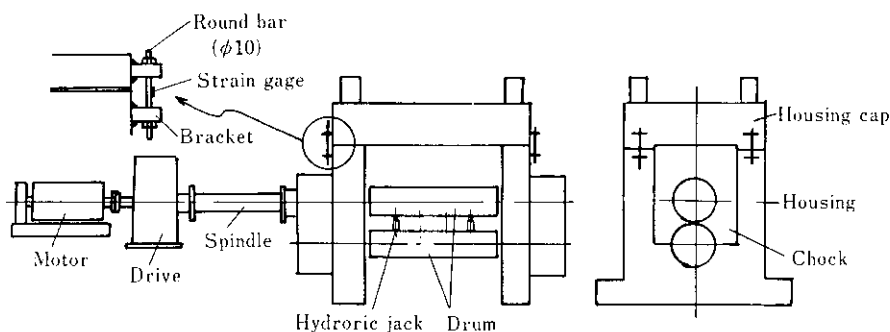


Fig. 9 Schema of the shearing force measurement

であるが、剪断力から求めたものは、20~30%程度低い値となった。

3.2.4 スピードドロップ

ドラム形クロップシャーでは、剪断に要するエネルギーの大半は、慣性エネルギーであり、剪断時のドラム回転速度も剪断能力決定の際の大きなポイントになる。また、材料とドラムとの速度同調も良好な剪断を得るための条件であるため、剪断時のスピードドロップを調査した。Fig. 11 に測定結果を示す。(a)は先端剪断時、(b)は後端剪断時である。また、同時に、剪断ス

ピードと、スピンドルトルクの関係も示す。先端剪断時は、剪断スピードが小さくなると、スピードドロップは大きくなり、走間カット時より停止カット時の方がスピードドロップは大きい。これは、停止している材料を加速するためのエネルギーロスによるものである。後端剪断時は、材料が仕上ミルに噛んでいるため、F1 ミルによる張力の影響で、剪断スピードが大きくなるほどスピードドロップも大きくなる。

また、スピンドルトルクは、先、後端とも、剪断スピード上昇とともに増大しており、ドラム形クロップシャーでは、材料と剪断スピードとの非同調がスピンドルトルクの値に大きく影

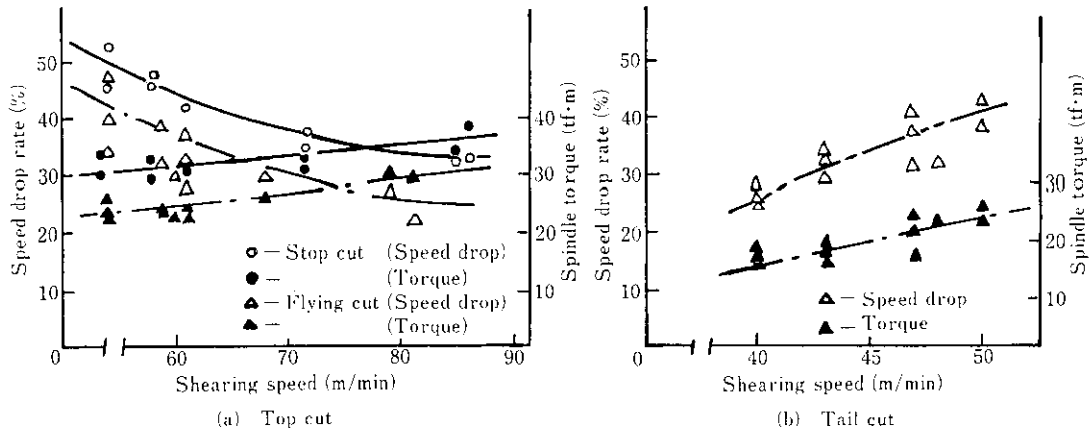


Fig. 11 Relation between speed drop and shearing speed

響することがわかった。

3・2・5 ドラム形クロップシャーにおける TAF

一般に、慣性の大きい機械では空転から急に負荷を受けた場合には軸類に急激にねじりが起こり、定常トルクと比べて高いピークトルクが発生することが知られている。その代表的な例を仕上圧延機およびクロップシャーについて、Fig. 12 に示す。ピークトルクと定常トルクとの比を、TAF (Torque Amplification Factor) と呼んでいるが、トルク波形から見て、クロップシャーのスピンデルにもピークトルクが発生する。その TAF は、次のようにして求められる。

クロップシャーを、Fig. 13 のようにモデル化すると⁶⁾、(5)、(6)式が成り立つ。

$$I_D \ddot{\theta}_D = K(\theta_C - \theta_D) + T_D \quad \text{.....(5)}$$

$$I_C \ddot{\theta}_C = -K(\theta_C - \theta_D) \quad \text{.....(6)}$$

上式を解き、Fig. 10 に示した剪断力から求めた剪断トルクを

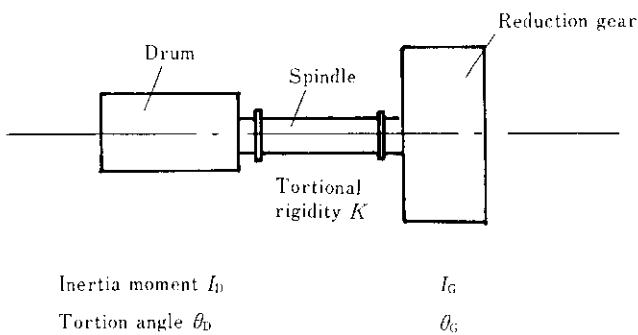


Fig. 13 Calculation model for TAF

代入して、TAF を求めると、 $TAF = 1.2 \sim 1.3$ となる。この結果から、前述の剪断力から求めた剪形抵抗値と、スピンドルトルクから求めたものとの差は、ピークトルクの影響であると考えられる。

3・2・6 ドラム形クロップシャーの総合的能力限界

以上、各種測定結果について述べてきたが、それらから、実操業での使用条件も加味したドラム形クロップシャーの能力限界を求めた。能力限界算出フローを Fig. 14 に、下記にその考え方の特徴を示す。

- (1) スピンドルトルクには TAF の影響があると考え、スピンドル及び駆動系の強度検討に用いるトルク値と、剪断トルク値を区分している。
- (2) ドラム軸強度検討には、軸受部にかかるモーメントを加味している。
- (3) 実測値を基に強度検討を行っているため、各部の強度安全率は疲労限度に対し 1.0~1.2 と低くしている。
- (4) 剪断スピードが、スピードドロップ、スピンドルトルクに及ぼす影響を考慮している。

これらの考え方を基に作成した能力限界曲線の例を Fig. 15 に示す。実操業では、プロセスコンピュータとクロップシャー制御用マイクロコントローラと併用し、材料毎に、最適な剪断スピードが設定できそれによって良好な剪断が得られる⁷⁾。

3・3 新シャーの検討

3・3・1 増強内容

以上の調査に基づき各ラインのシャーの増強を計画した。増強の骨子としては下記項目を検討し、前述の能力限界の考えか

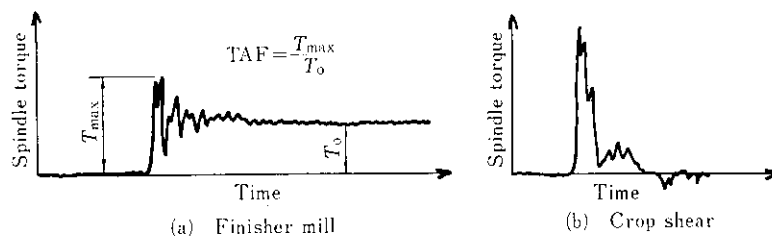


Fig. 12 Schema of peak torque

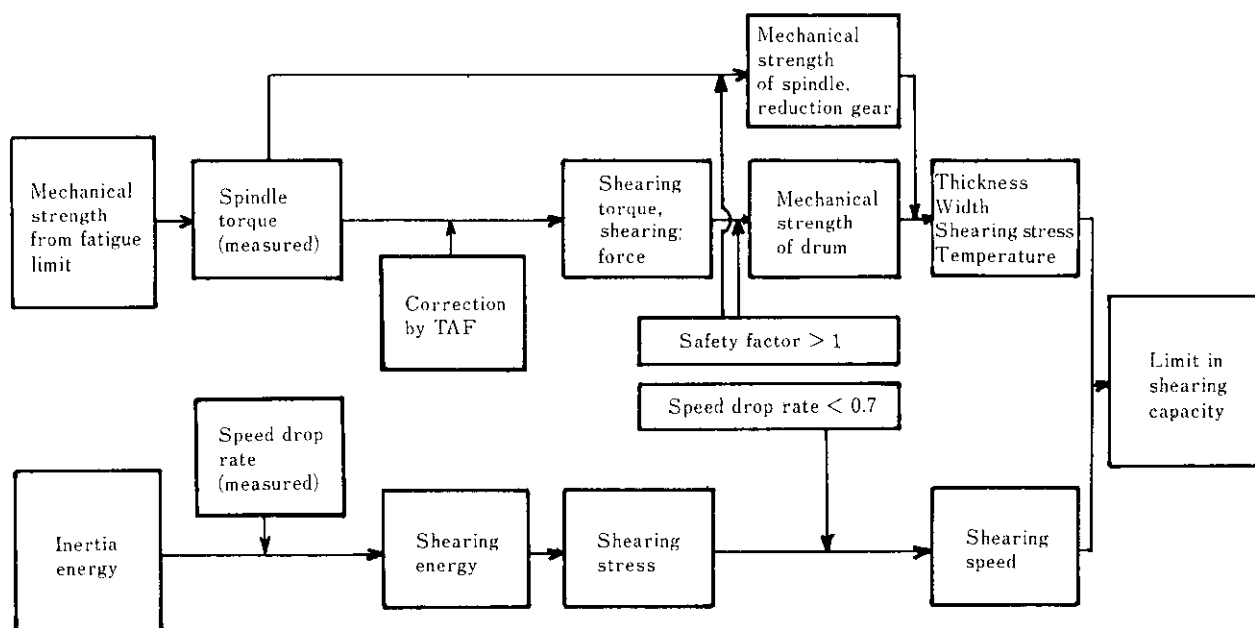


Fig.14 Flow chart for calculating the limit in shearing capacity

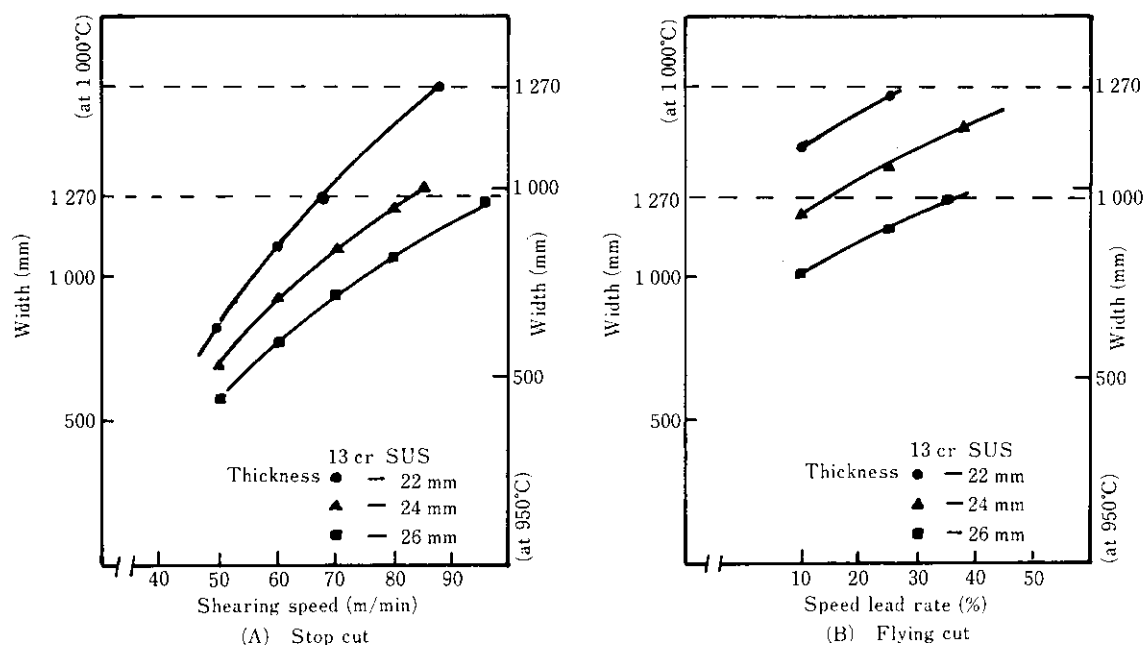


Fig. 15 An example of limit curve of the crop shear (Chiha No.1 Hot)

ら仕様を決定した。

- (1) ドラム剛性, 材質向上
- (2) オペレータ側, ドライブ側チョックセパレータ剛性向上
- (3) 刃物押え強度増大
- (4) オペレータ側への, タイミングギヤー追設

増強概要を Fig. 16 に, 増強後の仕様を, Table 4 に示す。

3・3・2 新シャーの設計トルク

水島製鉄所ホットストリップミルラインの新シャーは, 従来のシャーの実測トルクを基に設計した。また, 千葉製鉄所のNo.1 およびNo.2 ホットストリップミルラインのシャーは従来の実測トルク, および前者の新シャーでの実測値から決定した。それらの値を Fig. 17 に示す。

4. 増強効果

増強工事は, 56年中に3ミルとも実施し, シートバー厚の増大を図った。その結果, 3ミル平均で, 8×10^3 kcal/t の燃料原単位低減, 0.12%の歩留向上効果が得られた。

5. 結 言

ホットストリップミル, 粗圧延後のシートバー厚増大による低温抽出を目的として, ドラム形クロップシャーの各種調査を実施した。これにより, ① ドラム形クロップシャーにおける剪断抵抗値, ② ドラムに発生するモーメント, ③ 剪断スピード

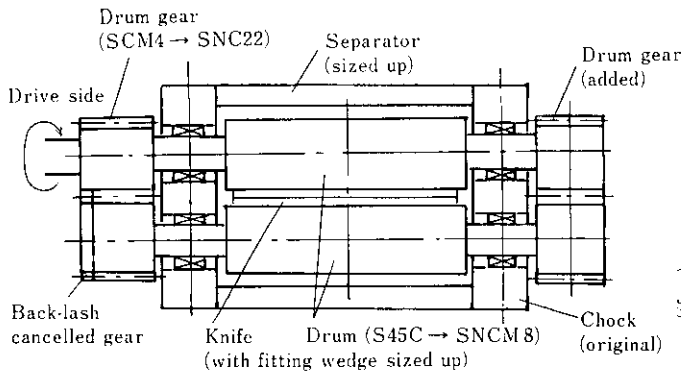


Fig. 16 Schema of the new shear (Mizushima)

と剪断時のスピードドロップの関係, ④ 駆動系におよぼすTAFの影響, を定量化することにより, 操業に則した能力限界を明らかにし, その結果に基づきコンパクトで, 厚物剪断可能なクロップシャーへの改造を行った。

今後も設備増強に際し, 詳細な能力検討を行うことにより, 設備投資の効率化を図り, 操業改善に努力して行く所存である。

最後に, 本検討に際し, 多大な御協力を頂いた, 石川島播磨重工業㈱の関係者の方々に深謝申し上げます。

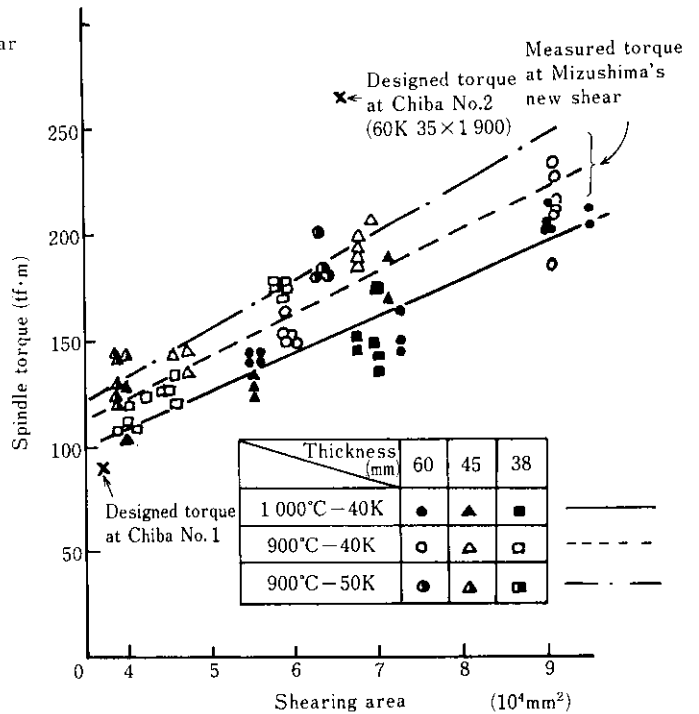


Fig. 17 Designed torque

Table 4 Specification of the new shear

Works		Chiba No.1 Hot	Chiba No.2 Hot	Mizushima Hot
Item				
Type		Drum (Double knife)	Drum (Double knife)	Drum (Double knife)
Sheet bar	Thickness (mm)	30 (SS41 900°C) Max. 35	48 (SS41 900°C) Max. 60	45 (SS41 900°C) Max. 60
	Width (mm)	1 270	1 900	2 200
Drum dia		609.6	815	815
Motor		205 kW × 1	280 kW / 560 kW × 2	250 kW / 500 kW × 2
Type of automatic shearing control		Analogue control	Digital control	Digital control

参 考 文 献

- 1) 君島ら: 「5 帯式連続加熱炉の6 帯化」, 川崎製鉄技報, 13(1981) 3, 154
- 2) 高木ら: 「高負荷型連続鋼片加熱炉の廃熱回収の強化」, 川崎製鉄技報, 14(1982) 4, 137
- 3) 高木ら: 「連続式加熱炉における廃熱回収強化による省エネルギー」, 鉄と鋼, 68(1982) 12, S 1186
- 4) 柳ら: 「ホットストリップミル用ヘビークロップシャーの研究」, 三菱重工技報, 15(1978) 5, 86
- 5) 大久保ら: 「ホットストリップミル用ドラム形クロップシャー剪断機構の研究」, 石川島播磨重工業技報, 18(1978) 1, 68
- 6) 本城ら: 「圧延機主駆動系の振動と衝撃特性の検討」, 石川島播磨重工業技報, 17(1977) 6, 588
- 7) 実開: 昭57-131218