

ホットストリップミルにおける極厚板用 ペンジュラム形フライングシヤーの開発

Heavy Duty Pendulum Type Flying Shear for Hot Strip Mill

ホットストリップミルの省エネルギーの一環として、仕上ミル入側でのバー厚の増大及び低温圧延のニーズから、超極厚板を低温でクロップカットできるフライングシヤーの要望が大きいものがあった。しかし、従来のドラム形及び4-リンク形のフライングシヤーはいずれもその構造上の制約から今後の大容量化の要求に対し限界があり、日立製作所は、独自の構想に基づく日立ペンジュラム形シヤーを開発し、このたびバー厚80mm、剪断力2,000t/fに及び前例のない大容量機を新日本製鐵株式会社君津製鐵所に納入し、現在所期どおりの成果を発揮している。本機は切断と速度同調の二つの機能を分離できるペンジュラム方式の利点を最大限に活用した新機構の開発により、超極厚大容量フライングシヤーに最適な性能をもつものである。この論文は、その原理、機能及び構造について紹介する。

福井嘉吉* *Fukui Kakichi*
 中西恒夫* *Nakanishi Tsuneo*
 大竹幸雄* *Ōtake Ukio*
 中島正明** *Nakajima Masaaki*

1 緒 言

近年、省エネルギーは鉄鋼業でも最大の関心事であり、特に、ホットストリップミル(図1)での省エネルギー対策としては、

- (1) 直送圧延
- (2) ホットチャージ
- (3) 低温出炉
- (4) 最適炉温制御による加熱効率の向上

が採用されつつある。いずれも、圧延設備での圧延中材料の熱損失を最小限にする方策と合わせて、最大の効果が期待される。

ホットストリップ圧延ラインで、被圧延材からの熱放散が

最も大きい箇所として、仕上ミル入口のデレーテーブル上のバー材表面及び仕上ミル後段のスタンド間のストリップ表面からの熱放散があり、この熱放散を抑止して仕上ミル最終スタンドの冶金上必要な温度をいかに確保するかが必要条件である。熱放散の抑止法で最も効果的なことは、圧延材の圧延中の合計表面積を最小にし、かつ圧延時間を最短にすることであり、その主要な手段として図2に示すように、

- (1) バー厚の増大
- (2) 仕上ミルでの高圧下
- (3) 仕上ミルの高速化

がある。この中でも(1)バー厚の増大は、有効な手段の一つで

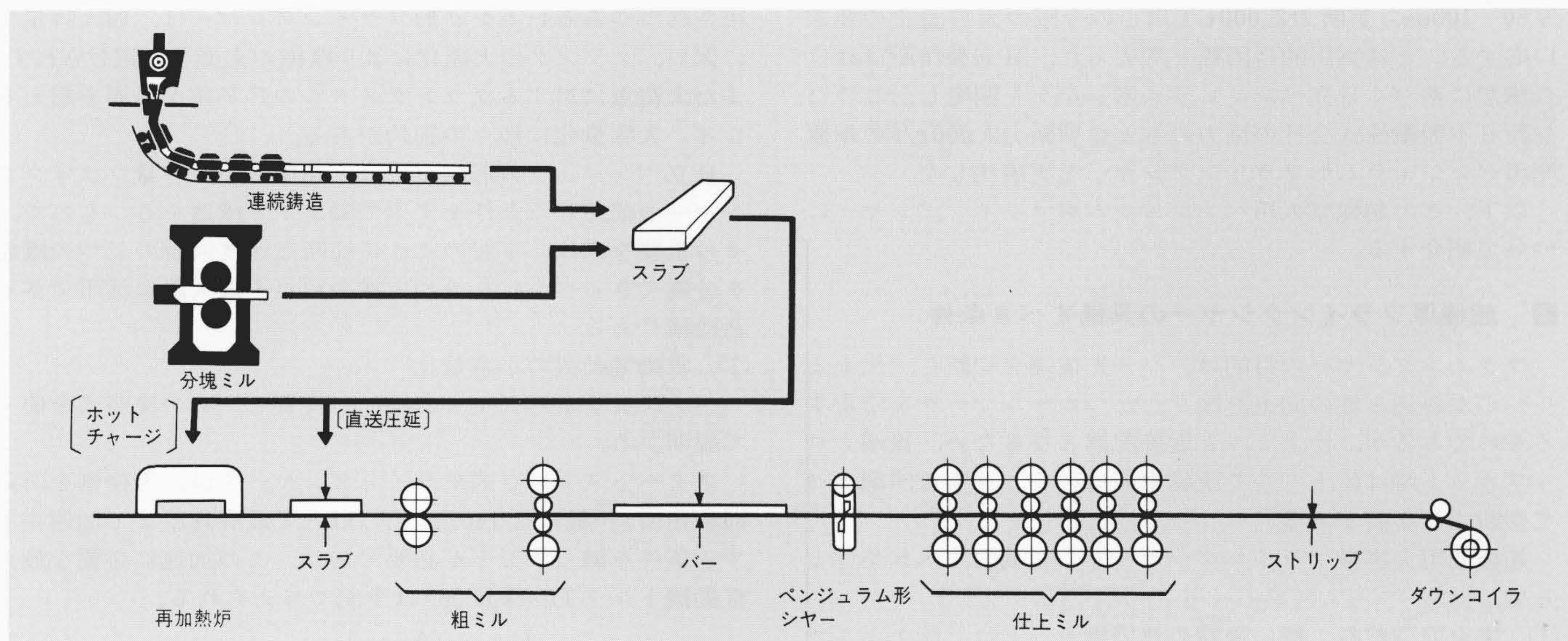


図1 ホットストリップミルの配置 ホットストリップミルの配置の一例を示す。直送圧延では、連続鋳造又は分塊ミルで作られたスラブを、冷却せず再加熱炉を通さず直接粗ミルにかみ込ませ、加熱炉の燃料消費を大幅に減らす。

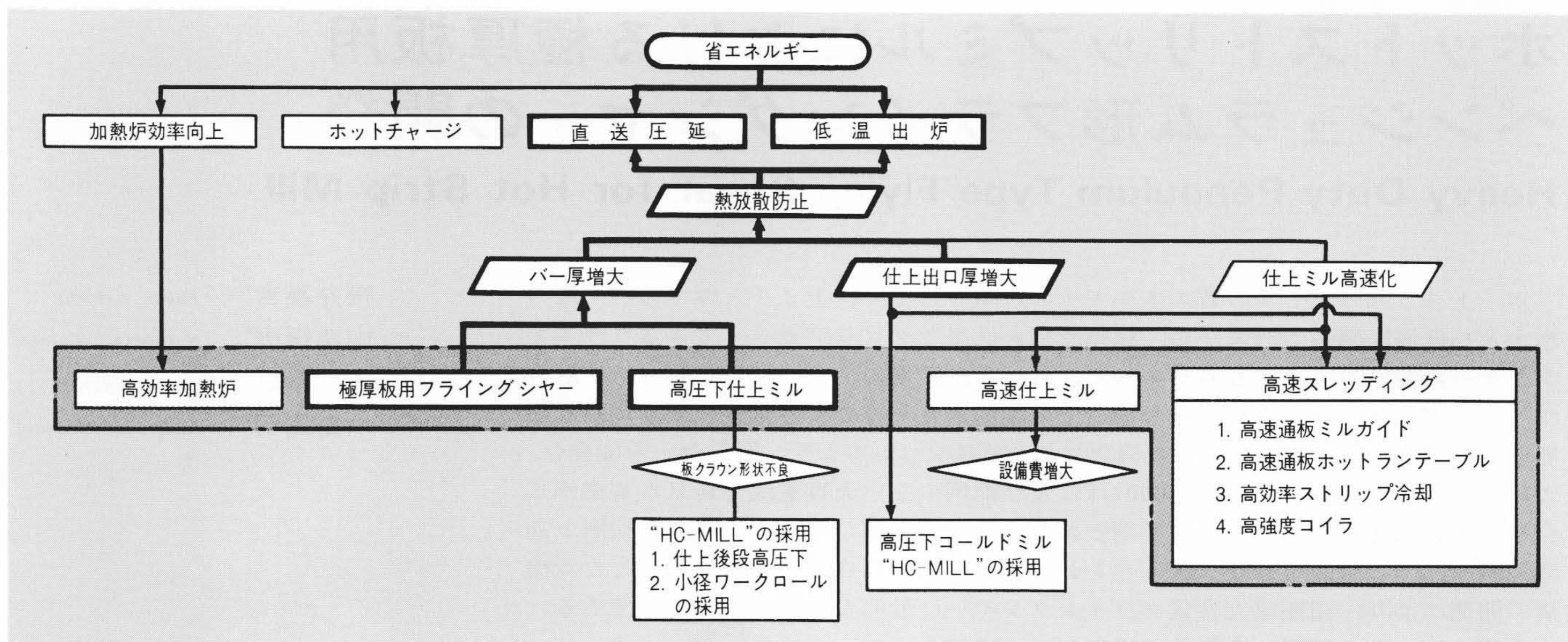


図2 今後のホットストリップミルにおける省エネルギー対策 省エネルギー対策として直送圧延—バー厚増大が行なわれ、この実現には極厚板用フライングシヤー及び高圧下仕上ミルが必須条件である。

あり、その効果はバー厚30～40mmを60mm程度に増大することにより粗圧延機での温度降下量を半減させ、燃料原単位にして約10%の削減を図ることができる。

この目的を達成するためには、極厚で、かつ低温のバーを仕上ミルの入口でクロープカットする大容量フライングシヤーが必要となる。このような省エネルギーの志向以外にCR (Controlled Rolling) 圧延と呼ばれる低温圧延の要求から、今後ますますフライングシヤー大容量化の要求が高まると考えられる。

しかし、従来のドラム形フライングシヤー、及び4-リンク形フライングシヤーは、いずれもその構造上の制約からバー厚80～100mm、剪断力2,000t/f以上の今後の大容量化の要求に応ずることは実用的に困難と考えられ、日立製作所は独自の構想に基づく日立ペンジュラム形シヤーを開発し、このたび新日本製鐵株式会社の協力のもとに剪断力2,000t/fの超極厚用ペンジュラム形フライングシヤーを実用化した。

以下、この超極厚板用ペンジュラム形フライングシヤーについて紹介する。

2 超極厚フライングシヤーの具備すべき条件

フライングシヤーの目的は、バー先後端を切断し、仕上ミルへのかみ込み性の向上を図り、かつロールマークを防止するものであるが、仕上ミルと近接配置となるため、後端クロープカット時は仕上ミルで圧延中の材料を、速度を同調させて切断する必要がある。

超極厚用大容量フライングシヤーとして具備すべき条件として、

- (1) 完全同調剪断：特に後端の非同調カットは、仕上ミルでの製品精度への悪影響、及び機械損耗の原因となるので完全同調切断が可能なこと。
- (2) 広範囲切断速度切断：バー厚の増大により超低速切断が可能であること。
- (3) 刃物寿命の確保：超厚物低温切断でも十分な刃物寿命を確保できること。

(4) 設備費の低減：大容量化に伴う機械の大形化、及び電動機容量の増大を極力抑え得る機能。

(5) 信頼性の向上：極厚切断に伴い、仕上ミルとの非同調切断は異常な過負荷を生ずる。そのため、機械強度の余裕率確保と合わせて、復帰が迅速な過負荷しゃ断のメカニズムの採用。などを考慮しなければならない。これらの条件に対し、従来形のフライングシヤーでは、表1に示すようにドラム形フライングシヤーは、回転刃物切断の構造の制約上、上下刃物ラップ量が少なく、かつ剪断中刃先の角度が変化することから、極厚板切断及び特に低温材切断に対し刃物寿命を長期間安定して確保することが基本的に困難である。その対策として採用されつつある4-リンク形フライングシヤーは、超大容量化に伴い、クランクの大径化により機械の大形化が避けられず、また大荷重に対するクランクメタルのPV値が限界を超えるなど、大容量化に種々の制約がある。

日立ペンジュラム形シヤーは、超極厚用大容量フライングシヤーの前述した条件をすべて満足する構造をもつもので、その重要な点は、下記のように切断と速度同調の二つの機能を分離できるペンジュラム方式の利点を最大限に活用できる新機構にある。

(1) 駆動電動機の小容量化

ペンジュラム形シヤーの優れた特質を、次の簡略式を使って説明する。

スタートストップ式フライングシヤーでは、刃物軸を所定回転角度(一般には140度以下)以内で最高速度まで加速完了する条件を満たすことが必要であり、この加速に必要な最大電動機トルク T_{M1} (kgf・m) は下記で与えられる。

$$T_{M1} = \alpha \frac{I \cdot v_{max} \cdot N_{max}}{\theta_s \cdot R_s} \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここに α : 定数

I : フライングシヤー慣性二次モーメント
(kgf・m・s²/rad)

v_{max} : 切断最高速度 (m/min)

N_{max} : 電動機最高回転数 (rpm)

表1 フライングシヤーの形式比較 日立製作所が開発したペンジュラム形シヤーは、剪断と速度同調を分離したことにより、(1)電動機パワー小、(2)極厚板剪断可能、(3)広範囲速度に対応可能となった。

シヤー形式	ドラム形	4-リンク形	ペンジュラム形
刃先軌跡及び態様			
運動形式	回転	並進曲線	並進曲線+回転
刃先速度	$V = \pi \cdot D \cdot N_s$ max. $N_s \approx 32\text{rpm}$ (at 150m/min)	$V = \pi \cdot D \cdot N_s$ max. $N_s \approx 70\text{rpm}$ (at 150m/min)	$V = \pi \cdot D \cdot N_s$ max. $N_s \approx 25\text{rpm}$ (at 150m/min)
速度同期	$N_s = \frac{V}{\pi \cdot D}$ 電動機の回転数を変え、材料速度との同調を図る(電動機電圧制御)。	$N_s = \frac{V}{\pi \cdot D}$ 電動機回転数を変え、材料速度との同調を図る(電動機電圧制御)。	$D = \frac{V}{\pi \cdot N_s}$ クランク半径変更により、振幅Dを変え、材料速度との同調を図る(電動機回転数一定)。
主な特質	1. ドラム径が大きくなる。 $D \approx (17 \sim 20) \times t$ したがって、 2. 刃物ギャップ管理重要 3. 電動機パワー大	1. 高速高荷重でのクランク軸メタルPV値が問題 2. 水平慣性力大 3. 電動機パワー大	1. 電動機パワー小 2. 剪断はギョチンカットであり、确实剪断可能。 3. 高剪断荷重に適す。 4. 広範囲速度に対応可。

R_s : 速度用クランク半径(m)

一方、フライングシヤーの切断に必要な電動機トルク T_{M2} (kgf・m) は、下記概略式で与えられる。

$$T_{M2} = T_c - \beta \cdot \frac{I \cdot v_{min} \cdot N_{min}}{\sqrt{R_c \cdot h}} \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここに、 T_c : 全切断トルク (kgf・m)

β : 定数

v_{min} : 切断最低速度 (m/min)

N_{min} : 切断速度 v_{min} を与える電動機回転数 (rpm)

h : 切断材板厚 (m)

R_c : 切断用刃物刃先半径 (m)

(1), (2)式で $T_M = T_{M1} = T_{M2}$ とおくことにより、必要最小な電動機トルク T_M (kgf・m) が得られる。

$$T_M = \frac{T_c}{1 + \frac{\beta \cdot \theta_s \cdot v_{min} \cdot R_s \cdot N_{min}}{\alpha \cdot \sqrt{h} \cdot v_{max} \cdot \sqrt{R_c} \cdot N_{max}}} \quad \dots\dots\dots (3)$$

(3)式で、 T_c , h , v_{max} , v_{min} は設備仕様諸元として与えられ、 θ_s は常にほぼ一定となる。したがって、必要電動機トルク T_M は R_s , R_c , N_{min} 及び N_{max} により決まる。以下、日立ペンジュラム形シヤーの優れた特性を(3)式を用いて説明する。

(a) R_c を小とし R_s を大と選定できる。

従来形フライングシヤーはその構造上、 $R_s = R_c \approx 400\text{mm}$ であるが、ペンジュラム形シヤーは $R_c = 170\text{mm}$, $R_s = 1,100\text{mm}$ (最大速度時) のようにできることから、 T_M すなわち電動機容量を、小容量化できる。また、 R_c を小さくできるために PV 値限界の制約を受けることなく大容量ペンジュラム形シヤーが実現可能となる。

(b) 切断速度の変更にかかわらず $N_{min} = N_{max}$ である。

従来形シヤーでは、電動機回転数と切断速度とが比例の関係になり、例えば、速度範囲 $20 \sim 150\text{m/min}$ の条件では、 $N_{min}/N_{max} = 0.133$ となる。一方、日立ペンジュラム形シヤーは、常に $N_{min}/N_{max} = 1$ とできる画期的なもので図3に示すように最小の GD^2 (慣性モーメント) で切断トルク T_c の大部分を慣性トルク T_{GD^2} でまかなうことが可能であり、電動容量の大幅な小容量化が可能である。

(2) 広範囲速度完全同調切断

上記特質は日立ペンジュラム形シヤーが、速度範囲の拡大による電動機容量の増加が少なく小容量電動機で広範囲速度完全同調切断が可能であることを示している(停止切断も可能)。

(3) 信頼性の向上

日立ペンジュラム形シヤーは、仕上ミルとの非同調切断時の非常過負荷の発生に対しても、高荷重に対し高剛性を必要とする切断機構と、低荷重を受け持つために低剛性とできる速度同調機構とに2分できることにより、非同調切断の過負荷を緩衝できる機能をもたせるだけでなく、迅速復帰可能な過負荷しゃ断メカニズムも設置が可能であり、信頼性の高い設備を提供することができる。

3 日立ペンジュラム形フライングシヤーの構造

上述した日立ペンジュラム形シヤーの優れた特性が、具体的にどのように実現されているかについて次に説明する。

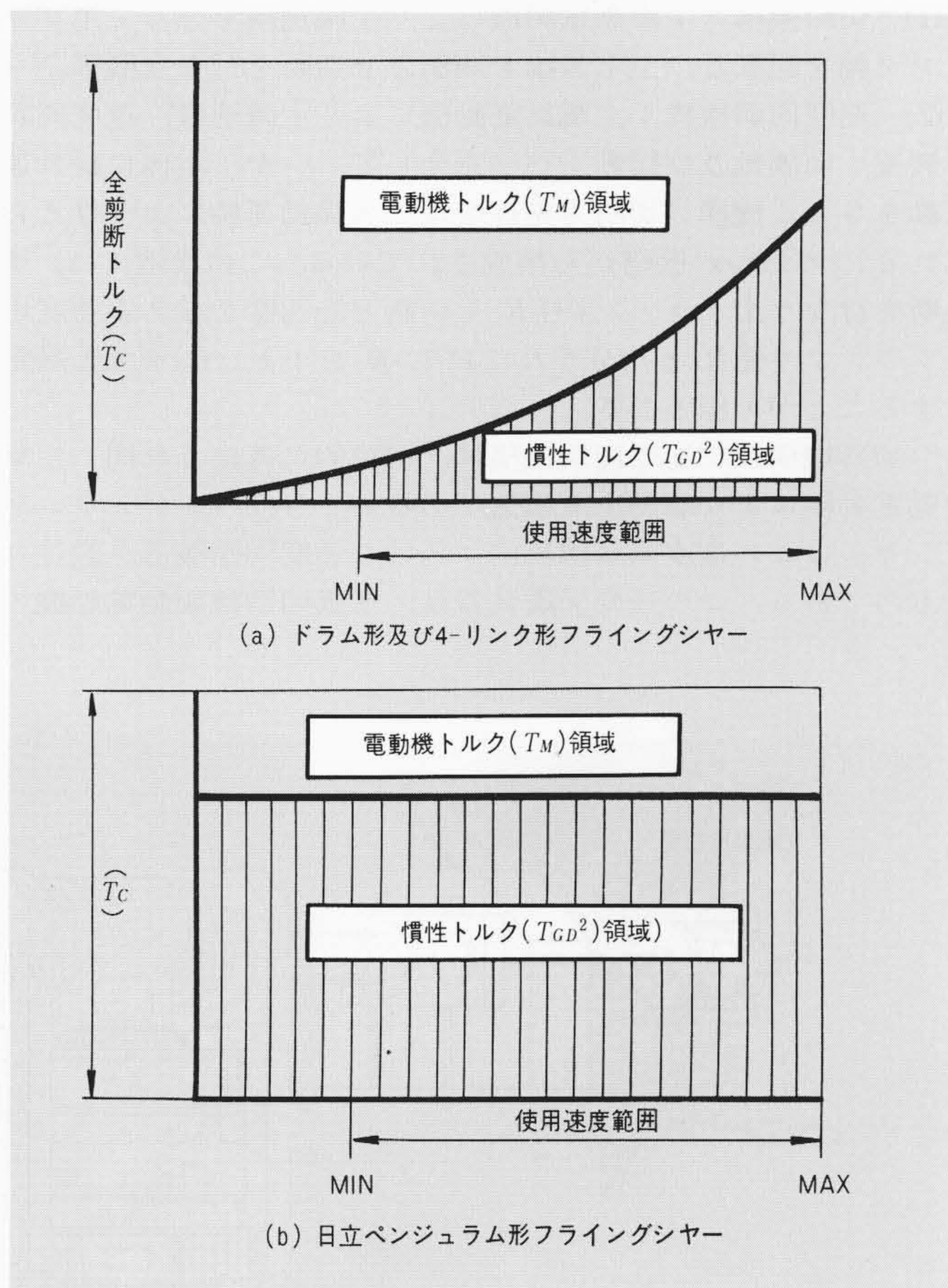


図3 電動機所要トルク比較 日立ペンジュラム形シヤーでは、電動機を材料速度にかかわらず最高回転数で使うことができ、したがって、容量をドラム形及び4-リンク形の約 $\frac{1}{10}$ にできる。

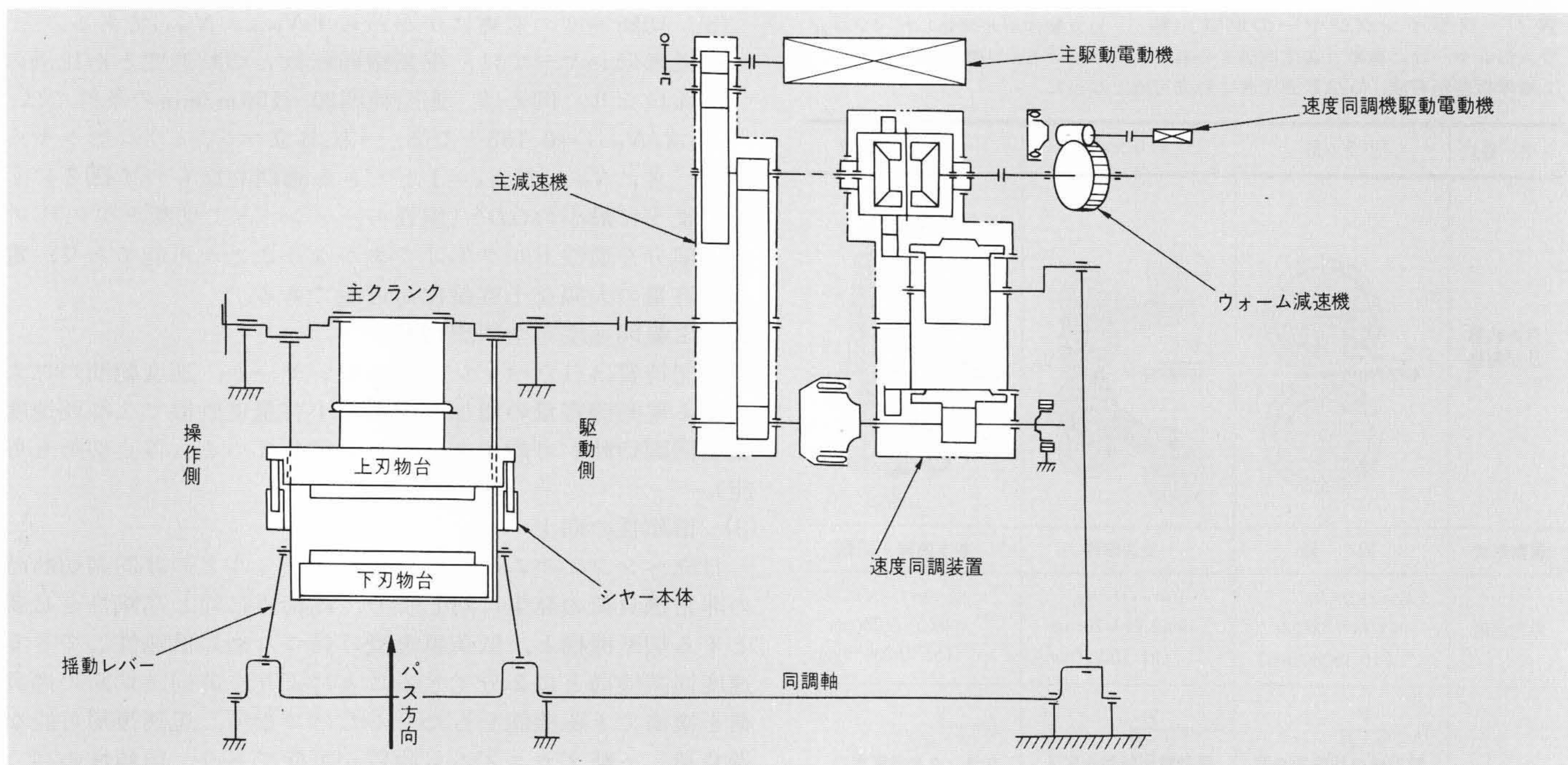


図4 日立ペンジュラム形シヤー全体構成図 主駆動電動機は、主クランクを介して上下刃物を上下に駆動し、更に速度同調装置一同調軸を介してシヤーフレームを揺動する。

3.1 構造

日立ペンジュラム形フライングシーアの駆動機構は、図4～6に示すように、

- (1) 切断機構：主駆動電動機により主減速機を介して主クラ
ンク軸を回転し、上下刃物を開閉させ切断を行なう機構。
- (2) 速度同調機構：主駆動電動機により主減速機、速度同調
装置、同調軸及び揺動レバーを介して、シャー本体に揺動運
動を与える機構（切断刃先速度はこの揺動運動により与えら
れる）。の二つの機構から構成されている。この構造では、切
断を行なう主クラック半径 R_c と切断刃先速度を与える速度用
クラック半径 R_s とが分かれており、 R_c を小とし R_s を大と選定
することが可能となる。

切断機構及び速度同調機構は、機械的に連結され同一主駆動電動機により駆動する構造であるが、日立ペンジュラム形シヤーはこの速度同調機構内に巧妙な速度同調装置を設けたものである。この速度同調装置は、速度同調機駆動電動機の

動作により R_1 偏心量を無段階に増減設定できるもので、これを使って R_1 偏心量を変更すれば、図 6 に示すようにシャー本体に異なる振幅の揺動運動が与えられ、その結果、主駆動電動機の回転数を一定に保ち、しかも任意の切断刃先速度が得られる(図 7 参照)。この構造により日立ペンジュラム形シャーは、切断速度の変更にかかわらず $N_{max} = N_{min}$ とすることを可能としたものである。

図8に速度同調装置の構造を示す。ウォームギヤを電動機で回転させることにより、インターナルギヤとピニオンとのかみ合位置を変化させ、 R_1 偏心量を無段階に変更設定ができる。

3.2 制御方式

図9に制御システムを示す。

- (1) 速度同調制御：速度同調のため、 R_1 偏心量を変化させるが、 R_1 偏心量は、ライン速度 v_L をメジャリングローラによって測定し、

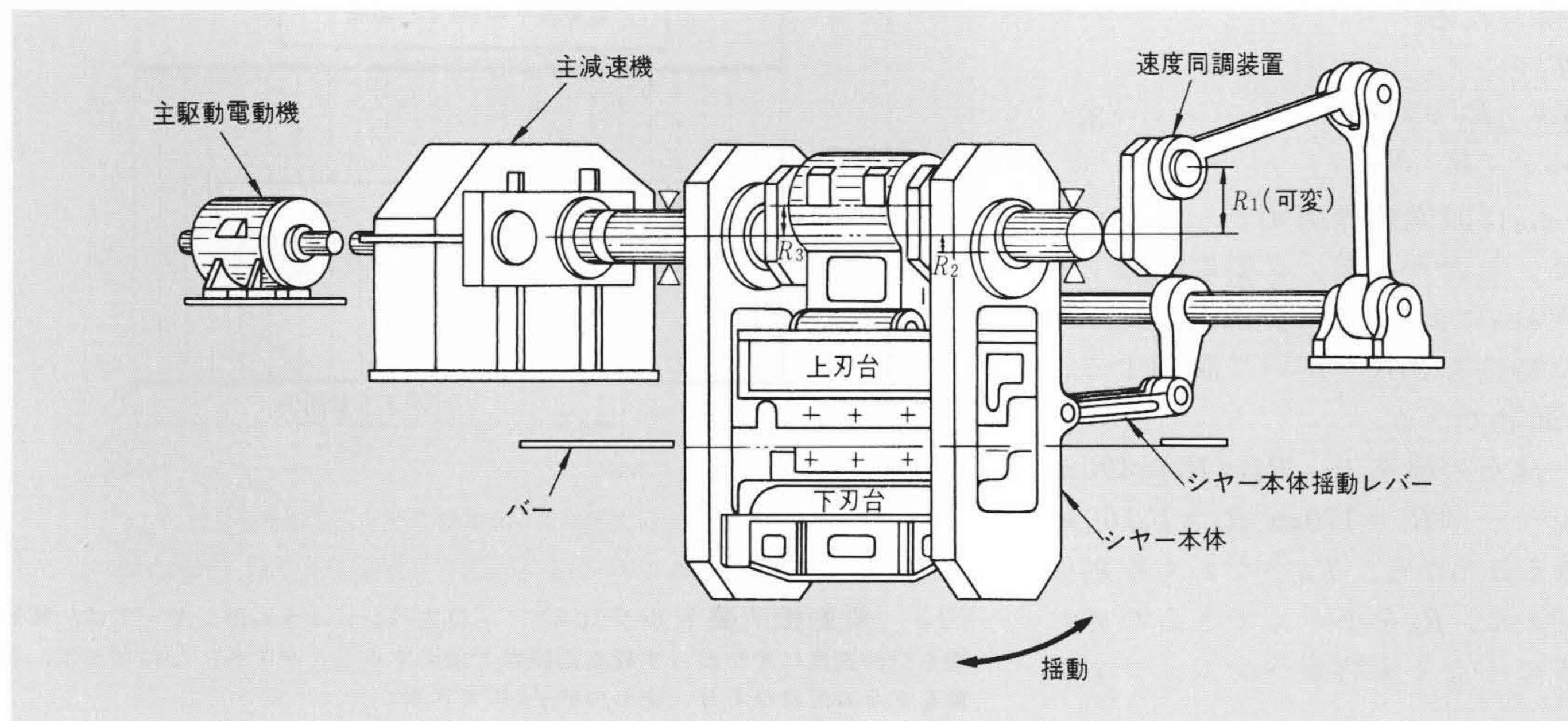


図5 日立ペンジュラム形
フライングシャー全体図
ペンジュラム形シャーは、(1)シャ
ー本体、(2)駆動装置、(3)速度同調
装置の三つの部分に分けられる。

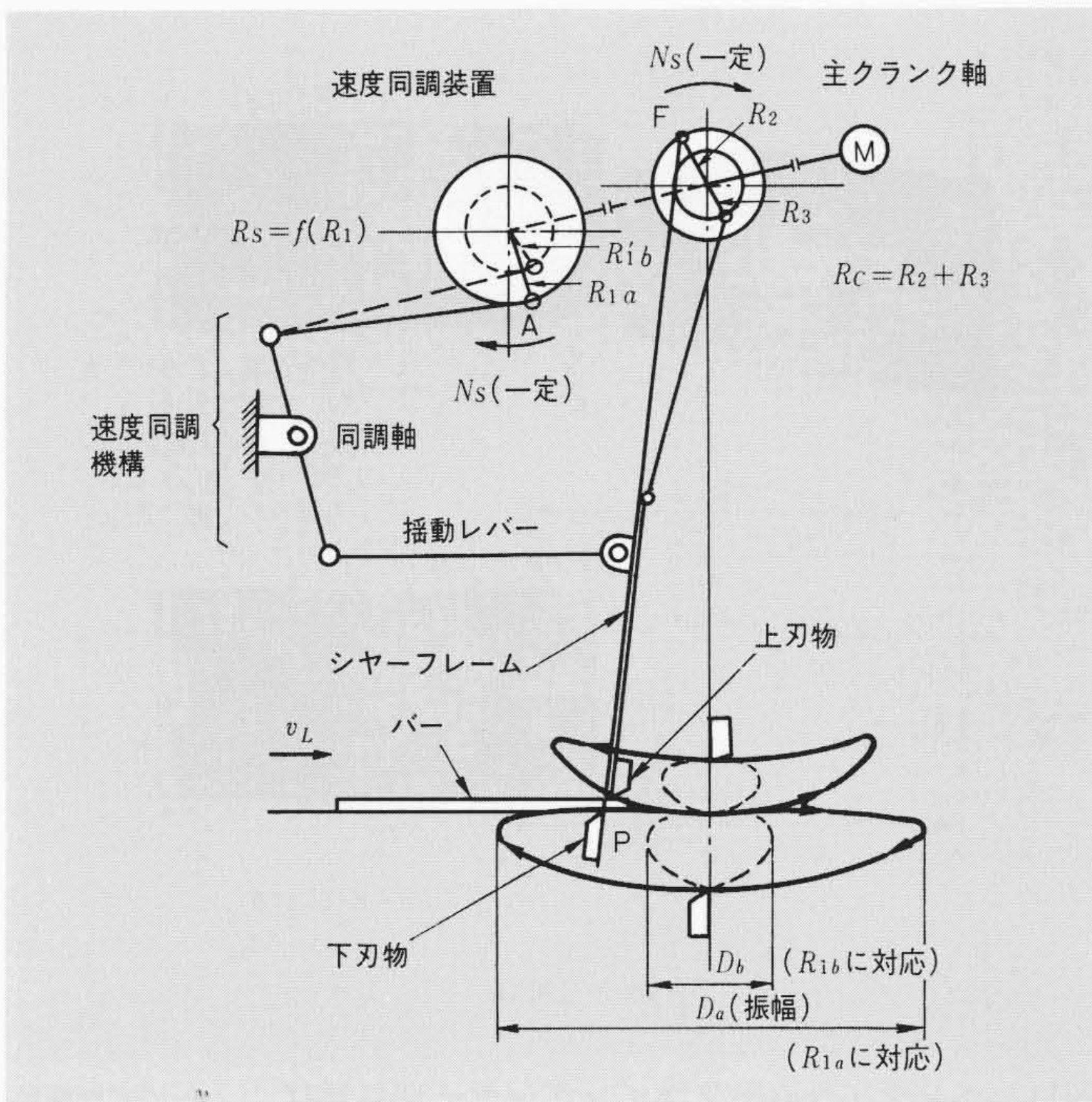


図6 日立 ペンジュラム形フライングシヤー機構図 速度同調装置で回転半径 R_1 を変化することにより、上・下刃物の揺動振幅が変化する。

$$R_1 = A_1 + A_2 \cdot v_L + A_3 \cdot v_L^2 \dots\dots\dots(4)$$

(4)式により演算され、この値を指令値として、APC (Automatic Position Control) 制御を行ない、所定の R_1 値に調整する。

(2) 主剪断制御：(1)項で決定された R_1 値及び板厚から剪断位置(x_c)の演算を行ない、ライン速度(v_L)を考慮しシヤースタート位置を決定する。また、刃先追跡制御としてかみ込角(θ_P)を演算し、実際的主クランク軸回転角と理想的回転角との差を修正制御しながら剪断を行なうものである。

4 特 長

以上述べたように日立ペンジュラム形シヤーは、超極厚物、低温高荷重切断に最適な機能を持ち、その主な特長は、

- (1) 所要電動機が小さいこと(従来形式の約 $\frac{1}{4}$ 以下)。
- (2) 広範囲切断速度で完全な同調切断(小容量電動機で広範囲速度同調切断が可能であり、停止切断も可)ができること。

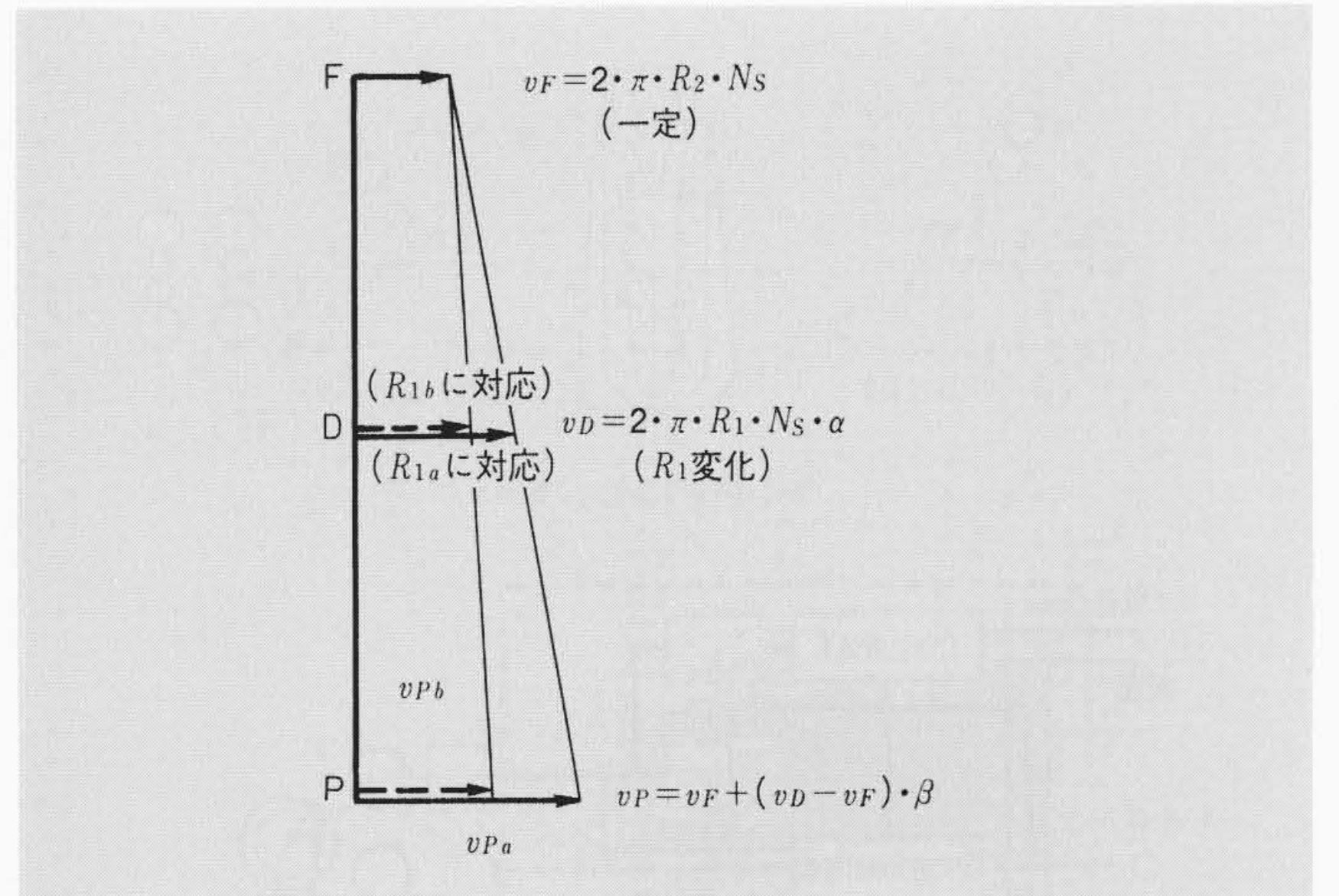


図7 シヤーフレーム各点の速度線図(かみ込時) F点の速度 v_F は常に一定、D点の速度 v_D は R_1 の大きさに比例し、刃先速度 v_P は v_F と v_D から決定される。

- (3) 仕上ミルとの非同調切断による非常過負荷に対しても、緩衝機能を持ち、迅速復帰が可能な過負荷しゃ断機構を採用し信頼性が大きいこと。
- (4) 刃物寿命が長く、かつ切口形状が良好であること。すなわち、図10に示すように、かみ込時の刃物動きにより切口形状は良好(図11)であり、ラップ量が十分取れることから刃物寿命も永くなる。
- (5) カートリッジ方式により刃物交換が迅速に行なえること。
- (6) クランク軸のPV値限界などの制約もなく、信頼性の高い大容量フライングシヤーであること。
- (7) 水平方向加速度が最大 $0.6g$ 程度で、4-リンク形の $1.8 \sim 2.5g$ に比較し、機体や基礎への影響が少ないことである。

5 2,000t/f日立ペンジュラム形シヤーの仕様

新日本製鐵株式会社君津製鐵所熱延工場に納入した、2,000t/f日立ペンジュラム形シヤーは、昭和54年1月に完成し、調整試運転を実施の上、同年2月1日から営業運転が開始され、現在順調に稼動中である(図12)。

主な仕様は以下のとおりである。

- 剪断力：2,000t/f
- 剪断板幅：700～2,180mm
- 剪断板厚：20～80mm

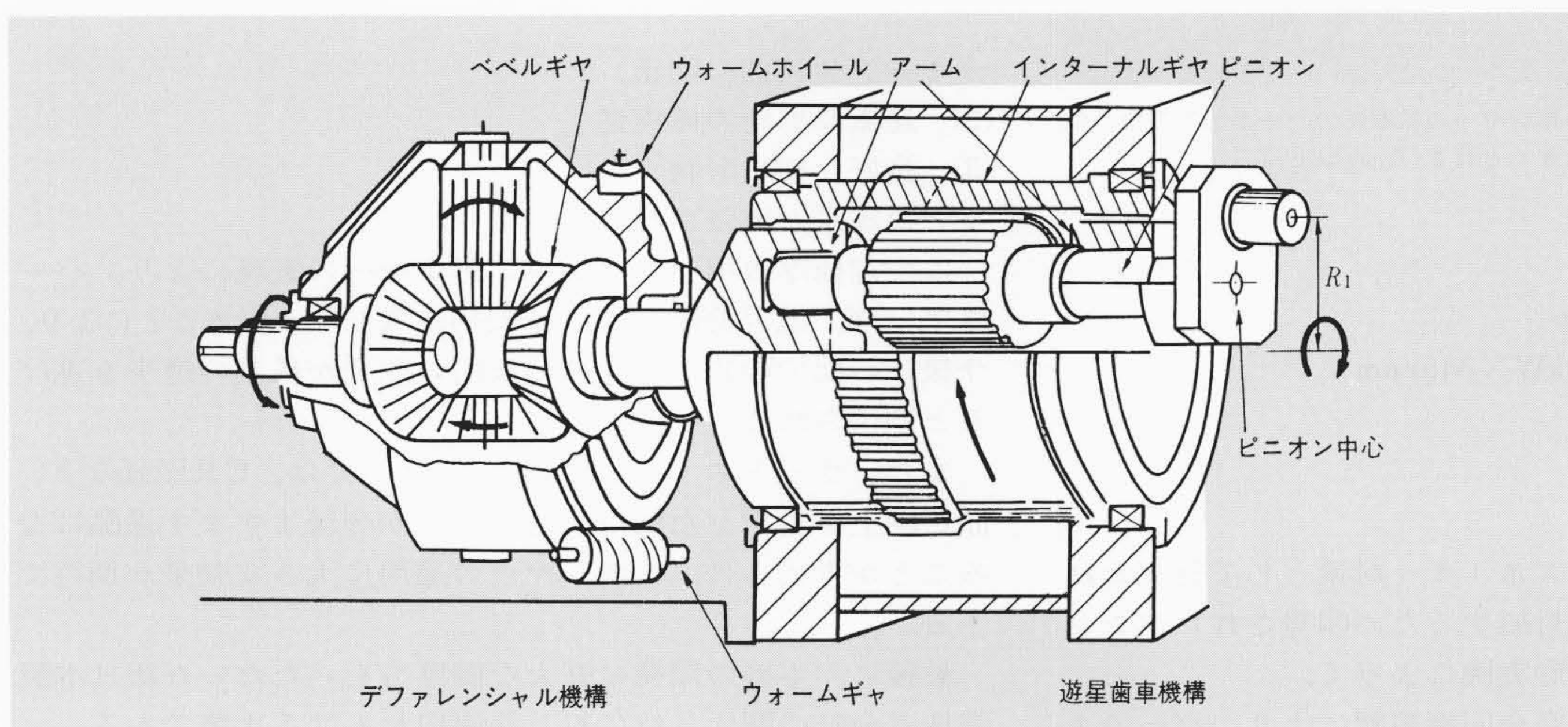


図8 速度同調メカニズム 速度同調装置は、デファレンシャルギヤと遊星歯車との組合せで構成されている。

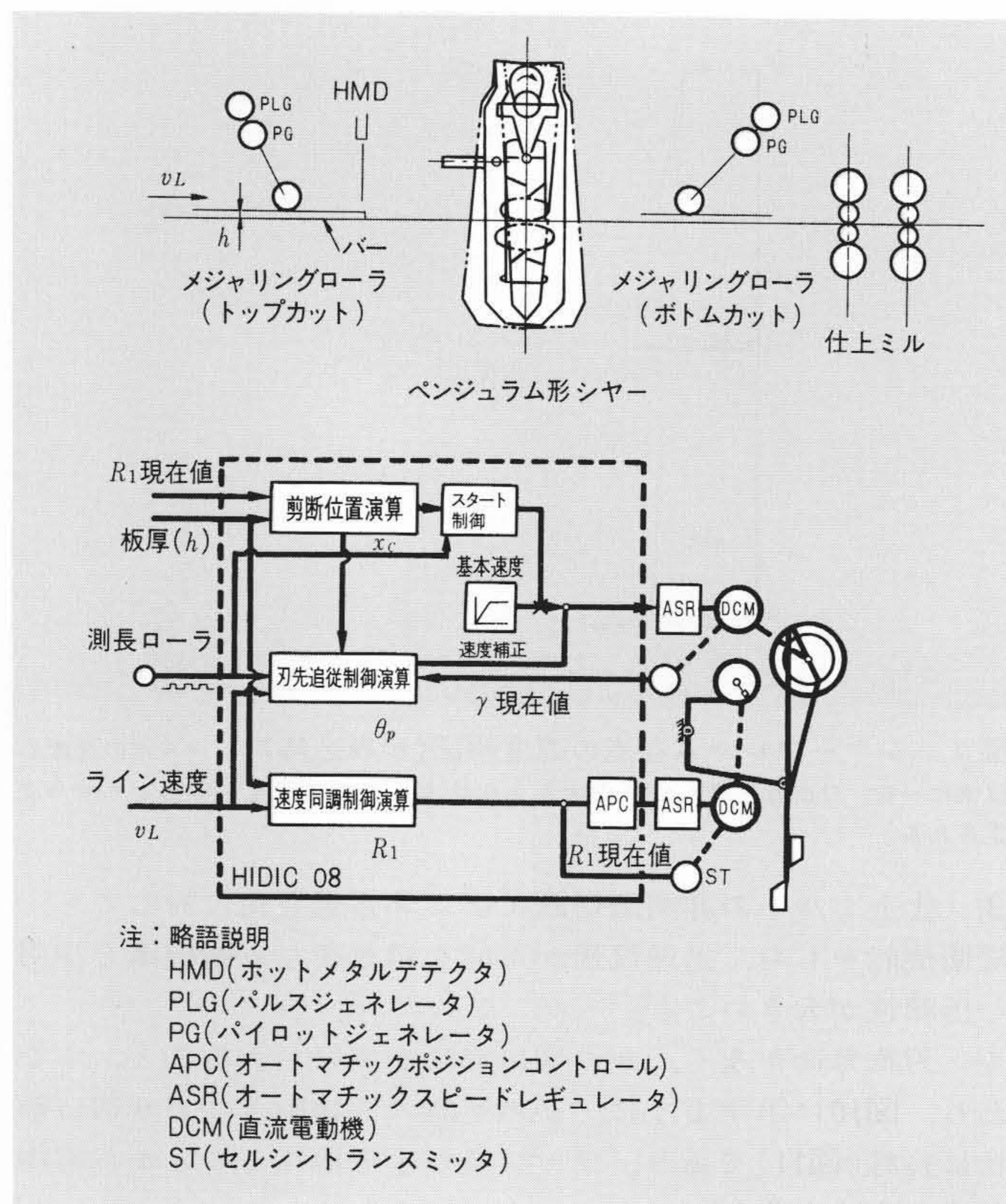


図9 制御システム R_1 の偏心量は、ライン速度 v_L をメジャリングローラで測定し決定する。 R_1 と板厚 h から剪断位置 x_c の演算を行ない、 v_L を考慮してシヤースタート点も決定する。

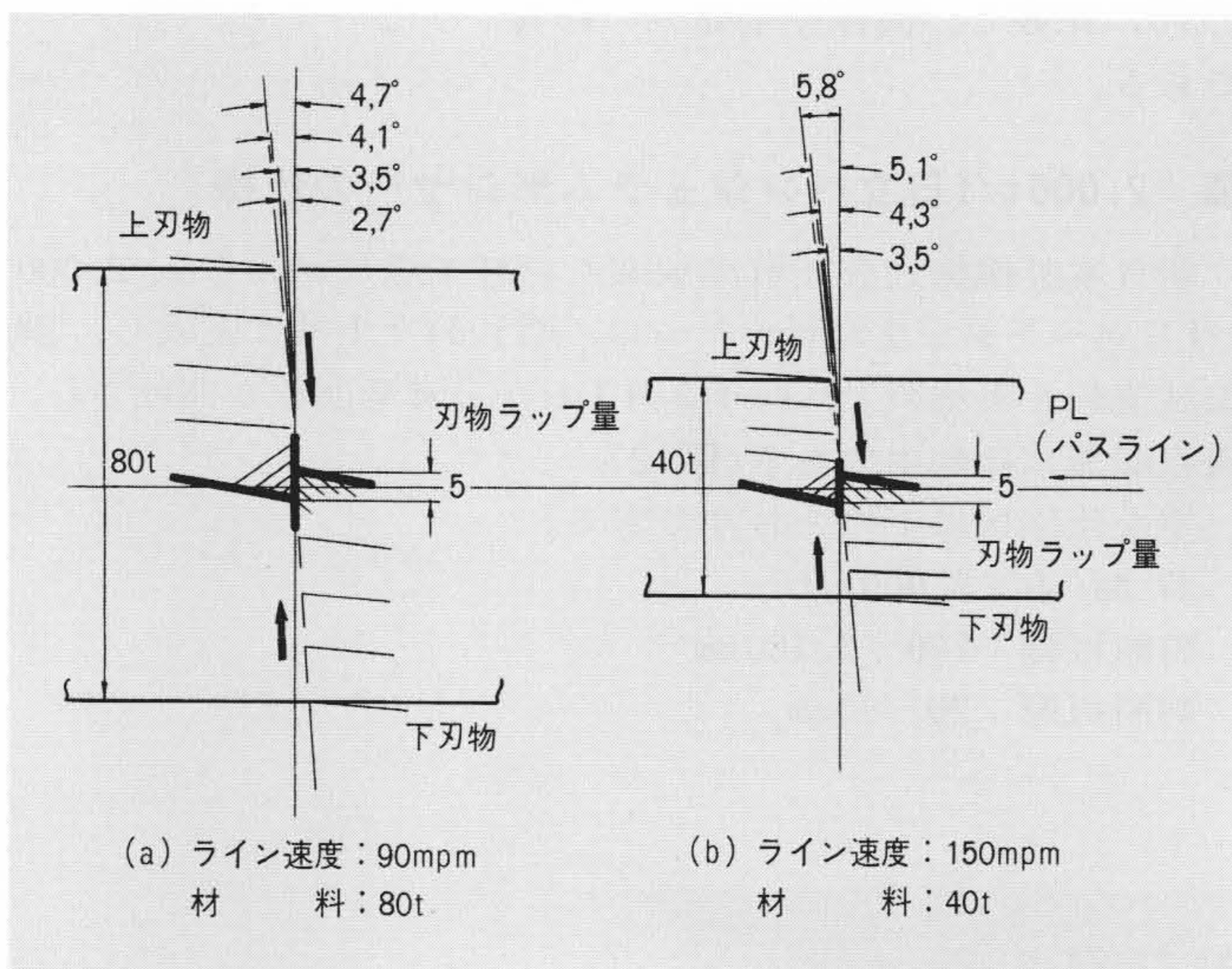


図10 刃先の動き ペンジュラム形シヤアの剪断時のバーと上下刃物の位置関係を示し、刃物ラップ量は十分大きくとれる(5mm以上)。

ライン速度：20～150m/min

主駆動電動機：DC 2 × 870kW × 845rpm

剪断精度：±20mm

6 結 言

ホットストリップミルの省エネルギー対策として行なわれる直送圧延—バー厚アップに対処するため開発されたペンジュラム形シヤアは、既に超大形実機によって、

(1) 広範な速度範囲に対して完全同調剪断により、バーのネ

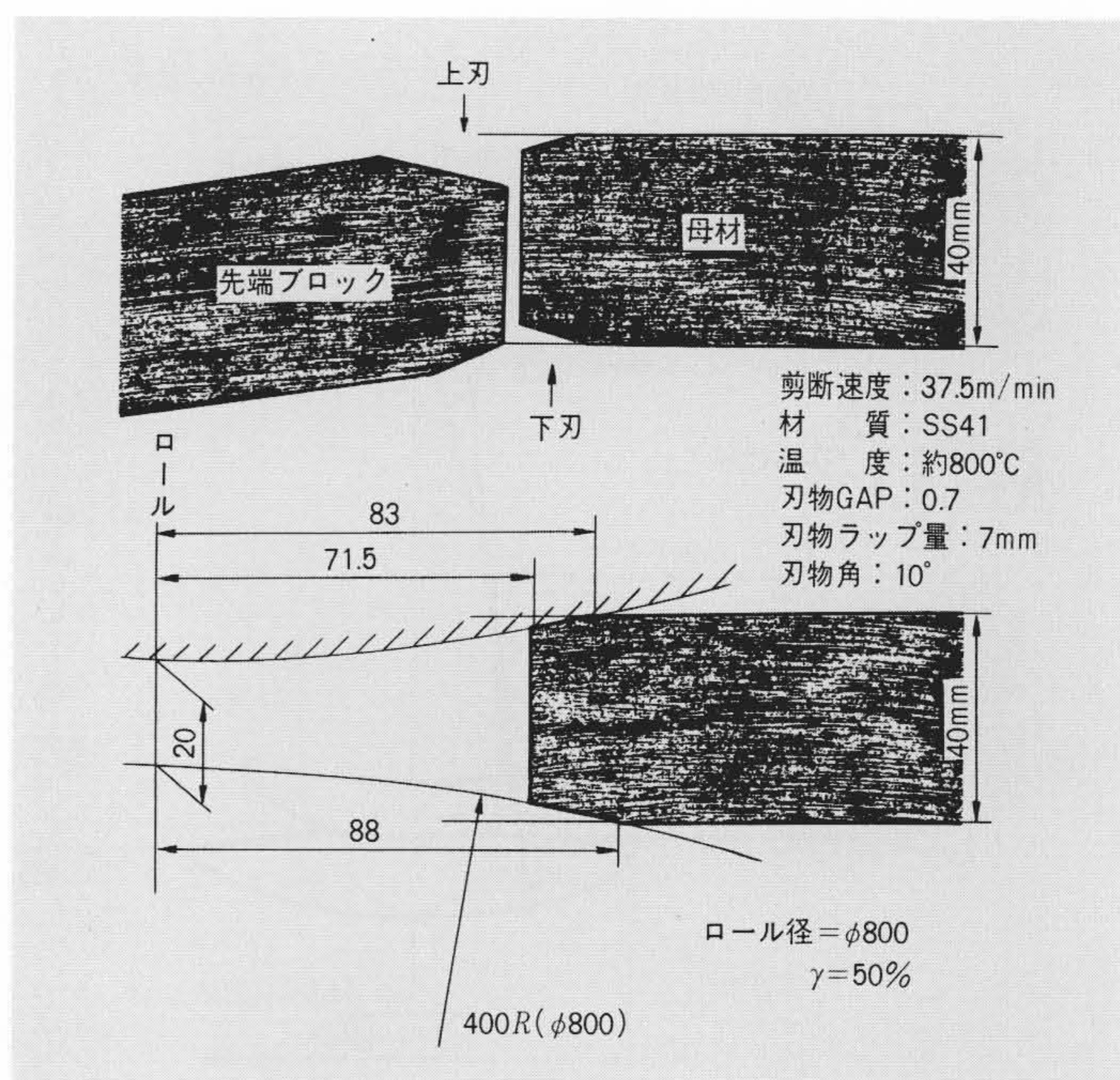


図11 ペンジュラム形フライングシヤア切口形状 バーの切口形状は良好で、仕上ミルロールへのかみ込に問題もなく、ドラム形の場合に発生した「ひげ」もなくなっている。

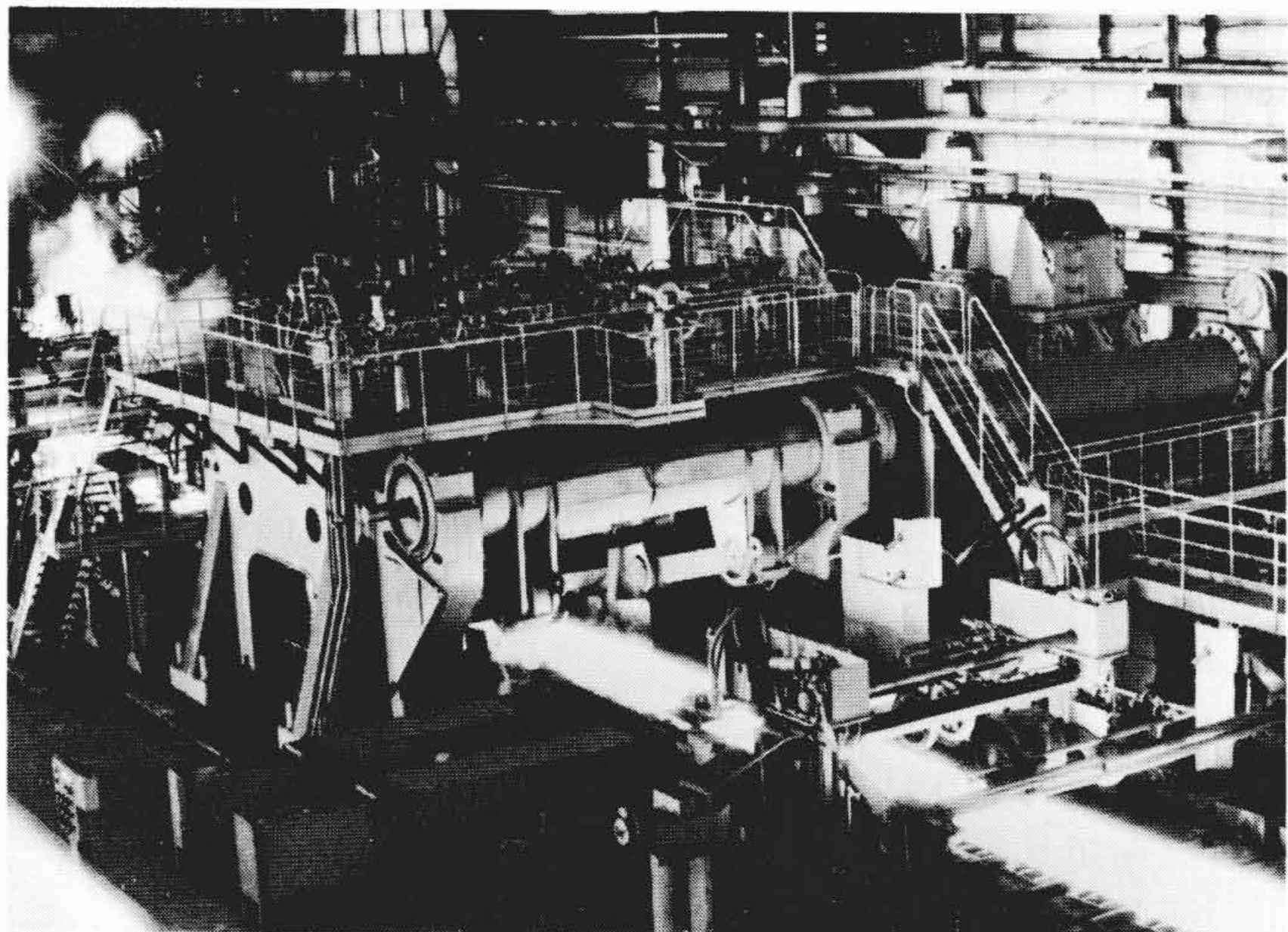


図12 日立ペンジュラム形フライングシヤアの全景 新日本製鐵株式会社君津製鐵所納め超大形日立ペンジュラム形フライングシヤアは、昭和54年2月1日から営業運転を開始し、現在順調に稼動中である。

ッキングや湾曲の防止

(2) 超極厚剪断の確実性

(3) 良好な切口形状

などの成果が実証された。

この超極厚板用ペンジュラム形シヤアの実現により、バー厚アップ、低温剪断に関する制約が取り除かれることにより、今後この面での省エネルギー技術の開発が長足の進歩を遂げると期待される。

また、ホットストリップミルにとっては、CR圧延など、品質向上を目指した低温圧延の要求が今後ますます過酷になることが考えられ、このシヤアの適用に大きな効果が期待できる。

最後に、本機の開発に甚大な御協力をいただいた新日本製鐵株式会社の関係各位に対し深謝申しあげる次第である。