

スラブの大型化にともなう帯鋼厚の変動について*

愛 甲 五 郎**・平 本 武 紀**

Gauge Variations of Strips Caused by Rolling Larger Slabs.

Gorō AIKŌ and Takenori HIRAMOTO

Synopsis:

Slabs tend to become larger and larger for improving the rolling capacity and the yield. In parallel therewith, the gauge and quality of the strip coil are susceptible to variations and would give rise to discussions on the equipment.

Gauge variations alone are discussed here. There are many factors which cause gauge variations. When larger slabs are rolled, however, it is the variation of deformation resistance due to a temperature difference that mainly causes gauge variations.

As the thickness of a bar leaving the rougher is $3/4 \sim 1$ inch, the larger slab becomes the longer bar on the delay table. The temperature difference between the top and the tail of the bar is larger and causes the gauge variations owing to the mill spring. These gauge variations are due to a difference of rolling speed between the rougher and the finisher.

If the roughers are composed of two stands and the rolling speed of the last roughers is controlled in proportion to the finisher, the temperature difference is reduced without spoiling the rolling capacity.

Skid marks too tend to become larger. In order to reduce the skid marks, it is effective both for design and operation of a furnace to make the heat-liberating distribution as higher as possible on the charging side of the slab-reheating furnace.

I. 緒 言

帯鋼を圧延するホットストリップミルは1923年に American Rolling Mill Co. が Ashland に電動機駆動の連続圧延機を建設したのが最初と伝えられるが、1926年に Columbia Steel Co. の Butler 工場に設置された 36in ホットストリップミルはすでに現在と同じ体裁のものであった。

その後、簿板の需要は特にいちじるしく拡大して生産量の増大を迫られ、ホットストリップミルは次第に大型化、高能力化してきた。しかしここ 20 数年来、圧延機の配置方式はほとんど定形化し、全連続式では粗圧延機 4 基、仕上圧延機 6 基、半連続式では逆転式粗圧延機 1 基、仕上圧延機 6 基という例が多く、ともに仕上圧速度 10m/s 程度が標準となつている。

にもかかわらずストリップミルの生産能力は近年予期以上のいちじるしい伸長を示している。仕上圧延速度は 10m/s でほとんど変つていないにもかかわらず、このような伸長を示したことの要因はスラブ重量の増加とミルモーターの強化化に帰することができよう。スラブは成品歩留りの向上と生産能力増大のために、あるいは後続工程の能率向上のために絶えず大型化する必要に迫ら

れてきたが、今後なお、さらに大型化する趨勢にある。

大型スラブを使用する場合、圧延動力、パス回数、ロール径、テーブル長さなどの圧延上の問題だけでなく、スラブおよびコイルの取扱い設備、加熱炉、捲取機など種々考慮しなければならない問題が生ずる。これらが解決されて圧延が可能となつても、寸法精度および品質両面におけるコイル内変動が問題となる。

品質上でも深絞り性、高抗張力、溶接性その他多方面の新しい要求に絶えず当面しており、これら諸般の要求に対処し得る大型、精密、高速ホットストリップミルが待望されている。

扱スラブが大きくなるにつれてコイル内寸法変動が大きくなるが、本報ではこの内、頭尾部の温度差とスキッドマークとによる厚みの変動について述べる。

II. スラブの大型化

大抵のホットストリップミルは窮極の生産目標に対処し得るようレイアウトおよび機械能力が設計されていて、低い生産量から操業を始め徐々に生産量を増大して

* 昭和36年10月本会講演大会にて発表

** 日新製鋼株式会社呉工場、工

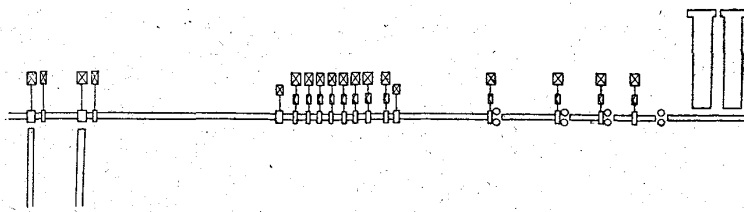


Fig. 1. Layout of a hot strip mill at Kuré works (Nisshin Steel Works Co., Ltd.)

行くが、薄板需要の急速な拡大のため、当初の窮極目標を越えた生産量が要求されることも稀でない。この場合仕上速度を 10m/s 以上にするると薄い板がランアウトテーブル上を通過することが困難になるので、仕上圧延速度は現状の儘にしてミルモーターの強化とスラブの大型化によって生産量の増大に対処するのが現状である。とはいえ、これらだけでは生産能力上限度があるので、一方では益々大型化するスラブを処理するためにパス回数と圧延機の配置について新しい工夫を、他方では愈々仕上速度 10m/s の壁を破る試みが計画される気運にある。

設計目標を越えてスラブを大型化すると色々支障が出てきて、工場設備各部の改造を必要とするが、さらにスラブが大きくなると遂にはミルモーターで圧延し得る限界を越えることになり、あるいは圧延機、カムワルツ、減速機などの限界強度を越えることになったり、嚙込み角に抑えられて所定のパス回数に納らないとか、万一圧延出来てもローラーテーブルの長さが足りないなど、要するに現設のラインでは扱えないという状態が発生する。

呉工場ホットストリップミルは全連続式で Fig. 1 に示すレイアウトであるが、現在以上の厚いスラブを圧延するにはミルモーターの能力が足りないので仕上圧延機入口の圧延バー厚みを 3/4 in 程度に抑えるためには粗圧延機をもう 1 基増設しなければならない訳であるが、現在すでに圧延バーの長さがローラーテーブルの長さ一杯になつて居り、現在のラインではこれ以上スラブを大型化することは出来ない。なお全連続式の粗圧延機は低速であるから、粗圧延パス回数を増すと相当温度降下が大きくなるのでこの点好ましくない。

仕上圧延機をその儘にしてスラブを大型化するためには、全連続式から半連続式に変えるという必要も出てくる訳であつて、連続式粗圧延機 4 基を逆転式粗圧延機 1 基に変え、大径ロールを使用し、大容量のミルモーターを設置すればスラブを大型化した割合にはパス回数を増さずに圧延ができ、また前後面ローラーテーブルが長くなるのでこの面からの制約も緩和される。

しかし全連続式には色々の利点があつて、圧延能力の面でも全連続式粗圧延機では各スタンドとも 1 パスずつ圧延を行なうだけであるから、1 パス終ればすぐ次のスラブを圧延できるのでに対し、半連続式では 5 パス終つてはじめて次のスラブの圧延に掛れる訳であるから粗圧延機が生産能率上の隘路となり、粗圧延速度を上げない限り、折角スラブを大型

化しても反つて生産能力が落ちる懸念がある。この辺の事情を図示すると Fig. 2 ~ Fig. 4 の通りである。

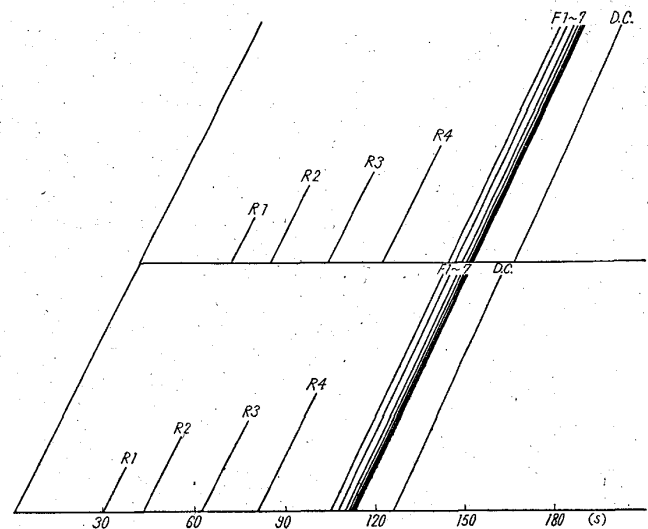


Fig. 2. Time study for a full-continuous hot strip mill.

すなわち Fig. 2 は全連続式の場合のタイムスタディで、粗圧延速度は第 1, 2 パスが 0.92 m/s, 第 3 パス 1.22 m/s, 第 4 パス 1.53 m/s の場合であるが、この場合の圧延ピッチを規定するものは捲取機であることが図から分る。1 号捲取機と 2 号捲取機の切替え、すなわちピンチロール上げ、デフレクタゲイト下げおよび 1 号 ~ 2 号捲取機間のローラーテーブル通過時間の所要合計時間がコイル間のピッチを決めている訳で、これが短縮されれば圧延ピッチが短縮され、圧延能力が上ることになるが、粗圧延速度をこれ以上上げて圧延ピッチには影響しないから圧延能力 t/h は増加しない。つまり仕上圧延速度 10m/s に対し粗圧延最終パス速度 1.5 m/s は十分均衡している訳である。

Fig. 3 は Table 1 のスラブを全連続式ミルで圧延するときのミル圧延能力を成品中別に図示したものである。ミルモーター容量の関係から巾の広いスラブは Table 1 の通り厚みを薄くするか、あるいは圧延速度を低くする必要があるが、仕上圧延機のスピードコーンの関係から厚みに応じて圧延速度が制約され、大巾な変更は実際

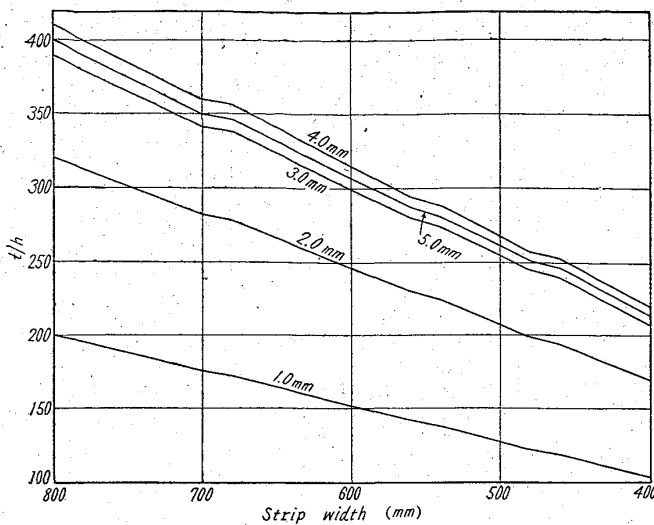


Fig. 3. Strip width versus t/h.

Table 1. Size of slabs.

Width mm	Thickness mm	Length mm	Weight kg
800	90	5000	2820
700	"	"	2470
680	100	"	2660
560	"	"	2200
540	110	"	2330
480	"	"	2070
460	130	"	2340
300	"	"	1530

上困難であるから前者が実用されることが多く、したがって例えば Table 1 の場合ローラーテーブルの長さが不足するのは巾狭スラブ圧延時であつて、広巾スラブの場合には余裕があるからミルモーターを増強すれば広巾のスラブも 130mm にすることができる。

Fig. 4 は同じ成品 2・0×800mm を半連続式圧延機で圧延する場合の圧延ピッチを示したものであるが、全連続式の 2 倍すなわち 3・0 m/s の粗圧延終速でもなお粗圧延が生産隘路となつており、仕上圧延機と粗圧機の圧延能力がバランスするまで粗圧延速度を引上げておく必要がある。

さて 11 パスでホットストリップに経済的に圧延されるスラブの最大実際厚は 10 in であるが、Table 2 に示す色々の厚みのスラブを半連続式圧延機で圧延する場合の粗圧延と仕上圧延の所要時間を見ると Table 3~5 のようになる。この表から粗圧延速度が同一でもスラブが大型化するほど、粗圧延機の圧延能力が仕上圧延機の圧延能力に近づき、ついには凌駕することが分る。したがつて粗圧延機が生産隘路である間はスラブをできるだけ大きくし、そして粗圧延速度を上げることが必要である。これに伴つて粗圧延終了時の鋼材温度は高くなり、加熱

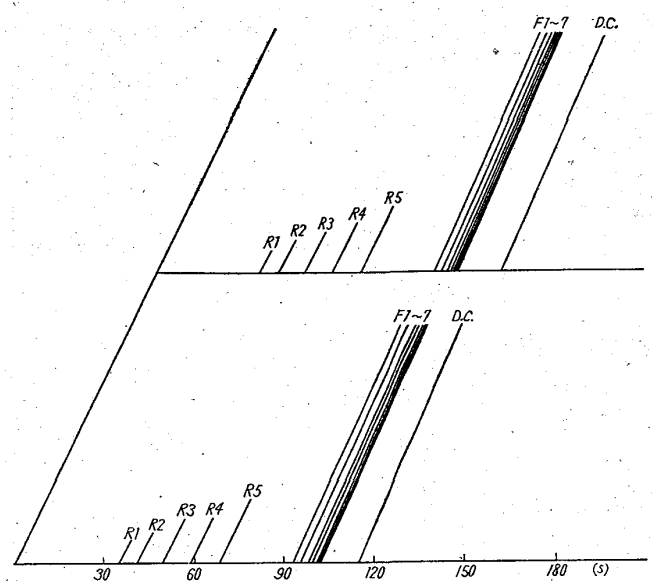


Fig. 4. Time study for a semi-continuous hot strip mill.

Table 2. Relation between the slab size and the rolling time.

Slab size				Rolling time	
Thickness mm	Width mm	Length mm	Weight kg	Roughers	Finishers
100	800	5000	3140	54・4	34・4
130	"	"	4080	58・8	43・2
160	"	"	5020	62・6	52・0
190	"	"	5960	64・7	64・6
220	"	"	6900	66・7	69・6
250	"	"	7850	63・4	78・5

Products: 2・0×800mm

上、また品質上の利益が得られるが、反面粗圧延終了時の鋼材厚は 3/4~1in であるから、スラブを大きくするほどディレクターテーブル上での鋼材長さが長くなつて、頭尾部の温度差が大きくなりコイル内寸法変動が増大して寸法精度が落ちてくる。

III. 頭尾部の温度差による厚みの変動

コイル内の厚みの変動を誘起する因子は多数あるが、仕上圧延機に入ってくるバーの厚みの変動や温度の変動、仕上圧延中のテンションの変動、圧延ピッチの変化などが主なものである。

圧延中の圧延機の状態を考えてみると、圧延機を構成しているロール、ロールネックベアリング、圧下スクリュー、ハウジングの各部とも完全な剛体でないために変形する。すなわち圧延荷重のためロールは彎曲し、ベアリングおよびスクリューは圧縮され、ハウジングビームは彎曲しポストが引伸ばされ、また高温にさらされるた

Table 3. Pass schedule for the slab (100×800×500mm) and the product (2·0×800mm)

Pass No.	Thickness mm	Width mm	Length mm	Roll dia. mm	Rolling speed cm/mn	Roll contact time s	Rolling power HP
RSB	100	800	5000				
R 1	90	//	5500		5500	5·6	
R 2	65	//	7700	915	9000	5·1	5290
R 3	45	//	11100	//	12000	5·6	5710
R 4	32	//	15600	//	16200	5·8	5850
R 5	23	//	21800	//	21600	6·1	9100
R 5	18	//	27800	//	27000	6·2	7690

Rougher : 34·4+20=54·4 s Finisher : 29·4+5=34·4 s

Table 4. Pass schedule for the slab (190×800×5000) and the product (2·0×800mm)

Pass No.	Thickness mm	Width mm	Length mm	Roll dia. mm	Rolling speed cm/mn	Roll contact time s	Rolling power HP
RSB	190	800	5000				
R 1	160	//	5940		5500	6·5	
R 2	115	//	8270	965	9000	5·5	8970
R 3	72	//	13200	//	12000	6·6	10400
R 4	47	//	20200	//	16200	7·5	9470
R 5	29	//	32800	//	21600	9·1	10100
R 5	20	//	47500	//	27000	9·5	9500

Rougher : 44·7+20=64·7 s Finisher : 59·1+5=64·6 s

Table 5. Pass schedule for the slab (250×800×5000) and the product (2·0×800mm)

Pass No.	Thickness mm	Width mm	Length mm	Roll dia. mm	Rolling speed cm/mn	Roll contact time s	Rolling power HP
RSB	250	800	5000				
R 1	220	//	5690		5500	6·2	
R 2	160	//	7820	1120	9000	5·2	11500
R 3	110	//	11350	//	12000	5·7	12700
R 4	65	//	19200	//	16200	7·1	13800
R 5	38	//	32900	//	21600	9·2	13600
R 5	25	//	50000	//	27000	10·0	11300

Rougher : 43·4+20=63·4 s Finisher : 73·5+5=78·5 s

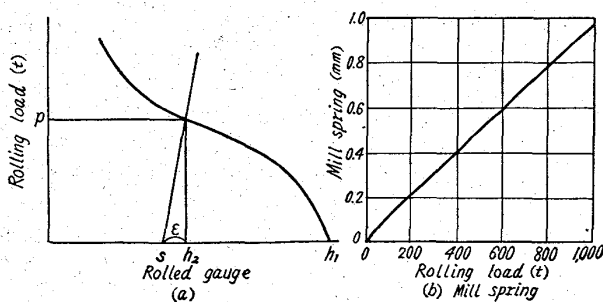


Fig. 5. Relation between the mill spring and gauge variation.

めの熱変形が発生する。圧下量が大きく、したがって荷重が大きいほどこの変形量は大きくなる。この関係はいわゆる弾性方程式

$$F=K(h_2-S_0)$$

で表され、圧延荷重と伸びの関係を図示すると呉工場の場合、Fig. 5 の通りになる。勿論これは圧延機に固有

のものであるから各圧延機ごとにことなる。つぎにスラブの初厚 h のものを圧延して色々な厚み h_n にするときのそれぞれの所要荷重 P との関係は所謂塑性方程式

$$F=\phi(h_2)$$

で表され、厚みを横軸、荷重を縦軸にとり図示すると Fig. 5 のような曲線になる。この曲線は初厚および圧延後の厚みの組合せに応じて傾斜と極点が大巾に変化するが、例えば Fig. 5 ではロール間隙を S に設定して厚み h_1 の板を圧延すると、圧延荷重 P 、圧延機の変形量 ϵ が発生し $h_2=S+\epsilon$ の板厚になることを示している。圧延機に入ってくるスラブの温度が変わると変形抵抗が変わって、圧延荷重が変化し、これが圧延機のミルスプリングのために厚みの変動に変わる。

スラブを大型化するとき、最も影響の大きいのがこのスラブ内の温度変動であつて、先づ頭尾部の温度差につ

いて考える。今 3500 HP, ロール径 910 mm の逆転式粗圧延機が 80rpm で最終パスを行なう場合のバーのディレーテーブル上での通過速度、つまり粗圧延機から仕上圧延機入口に達するまでの間の速度を考えると、粗圧延の最終パス期間中は 3.8 m/s で通過するが、粗圧延終了後はディレーテーブル速度の 1.5 m/s で仕上圧延機に達する。そして仕上終速 10m/s で 1.2mm の成品を圧延する場合、仕上第 1 スタンドに厚み 18mm で噛込み、55% の圧下を受けると仕上第 1 スタンドでの出口速度 1.21m/s, 入口速度 0.67m/s であるから、バーの先頭が仕上圧延機に噛込んだ後はディレーテーブル上で 0.67m/s で通過することになる。このためディレーテーブル上でのバーの全通過所要時間は頭部 21.7s に対し尾部端 54.8s となり、頭尾部の間に 33.1s の差がある。

バーはディレーテーブル上を通過する間に輻射によって熱を失い、温度が下がるので、バーの頭尾部の温度を計算すると、粗圧延を 1100°C で終了したとき、仕上入口でバーの頭部温度 1033°C, 尾部 965°C となり 68°C の温度差がある。スラブが大きいほど温度差は大きくなる。前記の塑性～弾性式の交点から、当工場の仕上スタンドについて巾 600mm のコイルで 68°C の温度差のとき、成品の頭尾部の厚みの差は 0.075mm となる。実際圧延中のスラブ温度を色々変えて、成品の温度差とそれに基づく厚みの変動との関係を統計的に集計して次式を得た。

$$y = 0.0025x + 0.0035G + 0.000025W - 0.027$$

但し y = 厚みの変動

x = 温度差

G = 成品厚

W = 成品巾

さてこの現象の主原因は粗圧延機の終速と仕上圧延機の入口速度との差にあるから、今粗圧延終速を下げ、例えば 1.0m/s で終パスを行なうと仕上圧延機入口でのバーの頭部温度 973°C, 尾部温度 962°C, したがって温度差は 11°C で成品の厚みの差は 0.006mm と小さくなる。しかし粗圧延終パスのこの低速は生産能力上の隘路となり、ホットストリップミル全体の能力を抑制することになる。

能力低下の打開策として粗圧延機と仕上圧延機との間に粗圧延機を 1 基追加して粗圧延機を 2 スタンドとし、粗圧延の最終パスをこのスタンドで行なえば、圧延速度が低くても仕上圧延機と粗圧延機の能力は均衡し、圧延ピッチを規定するものは再び仕上圧延機となる。ただし

れの場合も低速で圧延した場合、ディレーテーブル上での温度降下が大きくなるという欠点がある。これを避けるには低速で粗圧延終パスを行なうことを止めて通常速度で圧延し、失熱を防ぐためディレーテーブル上で適宜保熱するとか、さらに根本的には逆に仕上圧延機の上昇速度を上げることが考えられるが、現用の 10m/s の壁を越えるためには問題が未だ多く残されている。

仕上圧延機のスピードアップが実現すると、仕上圧延機と粗圧延機の能力の均衡上、さらに再び粗圧延機の上昇速度を上げなければならないので、粗圧延終パス速度と仕上入口速度との相対的な速度差、したがってこれに起因する温度差という問題はかなり軽減はされるが、相対的には依然残るので、粗圧延最終パス速度を仕上圧延入口速度に対応させるという前記の考慮は矢張り必要である。要するに頭尾部の厚みの変動に対しては粗圧延機を 2 基にして、速度制御により温度を調節することが基本的な解決策となる。

IV. スキッドマークによる厚みの変動

今一つの問題としてスキッドマークがある。スラブ下面と加熱炉のスキッドパイプとの接触部はスラブの他の部分に比べて昇温が遅れ、いわゆるスキッドマークになる。スキッドマークがあるとこれが仕上圧延の最終パスまで持ち越され、圧延中に圧延機のミルスプリングのため、厚みの差に変わる。したがってコイル内の厚みの変動は前記した頭部か

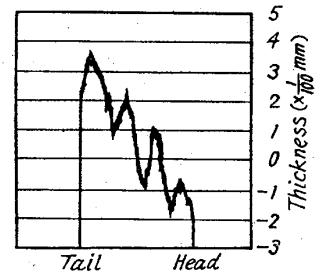


Fig. 6. Gauge variations caused by temperature difference.

ら尾部に向つて漸増する傾向に加えて、スキッドパイプが 4 本あればその 4 カ所が低温のため変形抵抗が増して厚い山ができて、Fig. 6 のようになる。

色々の厚みのスラブについてスキッドマークを熱伝導式からいわゆる数値積分法によつて計算してみると、同じ加熱特性で加熱したとき、スラブ厚が厚いほどスキッドマークが大きくなる。スキッドマークおよびスラブ中心部温度の計算値は実測値に比べて 700~800°C 付近で上昇が鈍化することと、スキッドマークはスキッドパイプを離れて均熱帯に入ると急激に上昇することが見られるが、この 2 点を除けば測定値と割合よく近似している。

Fig. 7 は実際加熱中のスラブに熱電対を埋設して昇温

状況を記録したもので、被測定スラブ厚みは 120mm 測定カ所は Fig. 8 の通りである。Fig. 7 は在炉時間 1 h 47mn の場合で、熱電対が切断するまでの記録を示した。

スキッドマークの大きさはもとよりスラブ厚に固有のものではなく、加熱炉の特性や操炉方法によつて変る。呉工場では現在 2 帯式と 3 帯式の加熱炉 2 基を併列運転

しており、両炉共有効炉長と均熱帯長さは同じであるが、スラブは同じ表面温度に加熱されていても 3 帯式の方がスキッドマークが小さく、かつ圧延負荷が軽くて全体がよく均熱されている。2 帯式と 3 帯式では加熱特性がことなり、Fig. 9 の通り 3 帯式の方が急速加熱されると矢張り急速加熱するほど、スキッドマークが軽減されるという結果が得られる。

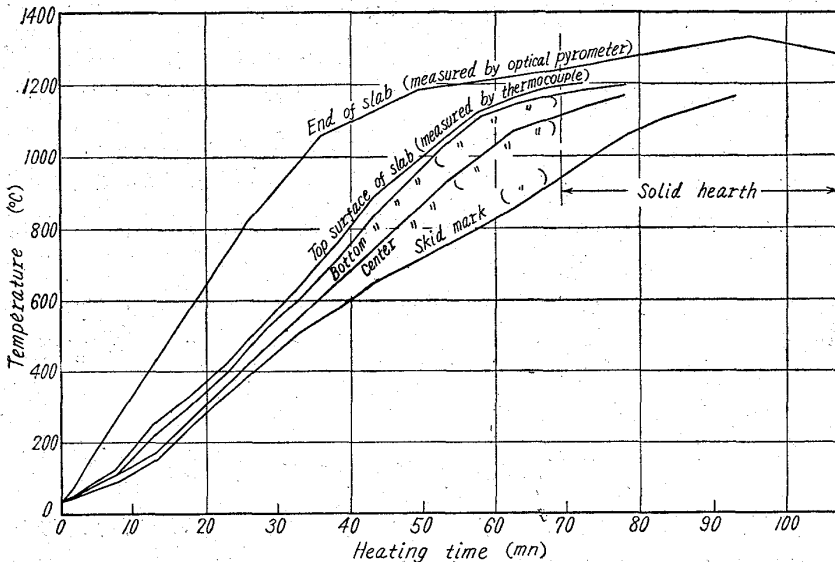


Fig. 7. Temperature of a slab measured by thermocouples.

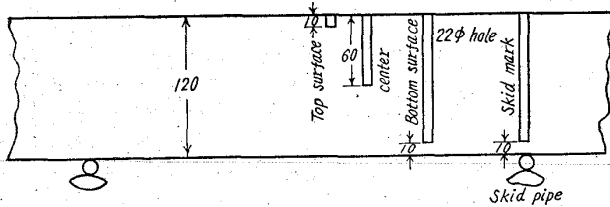


Fig. 8. The measuring points of temperature of a slab.

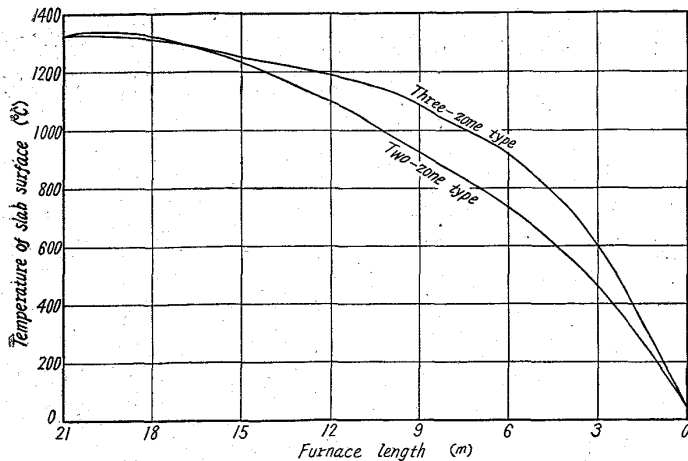


Fig. 9. Heating characteristics of a slab-reheating furnace.

スラブ表面温度の上昇率の早いときと遅いときには炉内熱負荷分布が当然違つており、Fig. 10 に 2, 3 の例を示す。図は有効炉長 21 m、均熱帯 5 m の炉で厚み 120mm のスラブを 60 t/h で加熱する場合のガス温度を示す。スラブ中心温度およびガス温度とも計算値である。急速加熱するほど、熱負荷分布がいわゆる 2 帯式から 3 帯式に移行して行くのが見られ、さらに急速加熱するためには一層炉尻側の熱負荷を高めねばならない。操炉上ロングフレームで熱負荷分布を調節することは勿論必要であるが、これには限度があるから、熱負荷配分につ

いては設計上考慮せねばならない。

スラブが均熱帯に入るとスキッドマークは急に軽減されるので均熱帯を長くすることがスキッドマーク軽減に有効であるが、均熱帯上のスラブは上面からのみ片面加熱されるので均熱帯を長くするとそれだけ加熱能力が制約される。スキッドマークの均熱は温度と時間の函数であるから、均熱帯が短くても高温で入ってきたスラブの方がスキッドマークが小さい場合もあり得るから、均熱帯長さは均熱帯入口でのスラブ内温度分布に応じて考慮する必要がある。Fig. 11 は厚み別の均熱所要時間と 60 t/h のレートで加熱するときの厚み別の均熱帯上でのスラブ滞留時間を示す。スラブが厚い程長い均熱時間が必要であるが、スラブの均熱帯滞留時間はその割合では長くなつていないから、スラブが厚くなるとスキッドマークが大きくなりがちである。

スキッドマークはスキッドパイプと接触して冷却されてできる訳であるから、水温を上げれば当然軽減されるし、熱効率も向上する。当工場では 4 本のメインスキッドパイプで 50 t/h の冷却水を使用しているが、例えば同じ熱量を空気て除去冷却するためには 160,000m³/h が必要であるから、若し水を

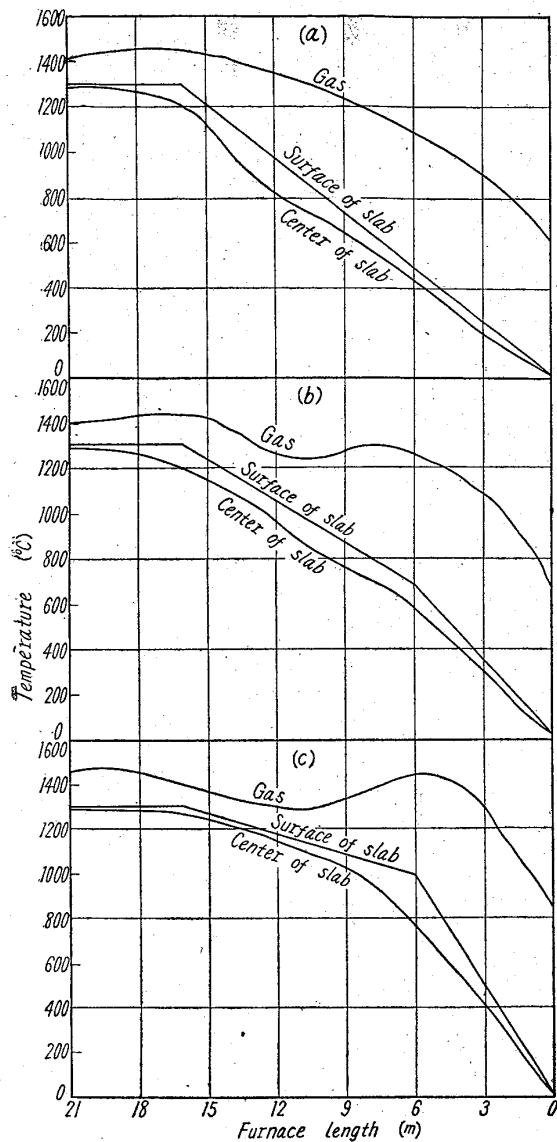


Fig. 10. Relation between the gas-temperature distribution and the heating characteristics.

空気と代えてスキッドパイプの許容温度まで冷却温度を上げてもなお大量の空気が必要となり、スキッドパイプの断面積を増さねばならない。これは下面からのスラブへの熱伝達を妨げる。またスキッドパイプは炉尻から均熱帯入口まで一直線であるが、これを千鳥型にすればスキッドマークが改善されることが計算される。

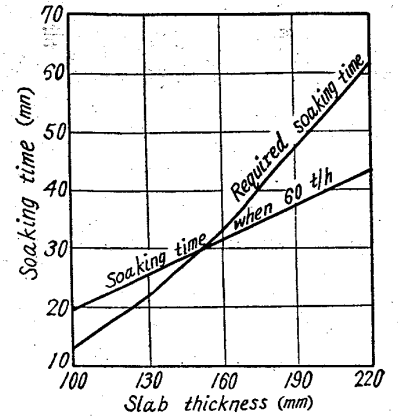


Fig. 11. Relation between the slab thickness and the soaking time.

加熱炉から抽出されたスラブにスキッドマークが残っていると、コイル厚みを周期的に変動させ、スキッドパイプと同数だけ厚い部分が発生するが、これを現在の所、圧延設備上から軽減することは困難であつて、厚みの自動制御 (A.G.C.) の俟たれる所以である。

V. 結 言

スラブは次第に大型化する趨勢にあり、これに伴つて頭尾部の温度差が大きくなり、スキッドマークも大きくなるため、成品厚みの変動も大きくなるので、本報では両者についていずれも原因に対する抜本的な解決策を考えてみたが、近時熱延においても A. G. C. が具体化しつつある。したがつて前記対策とは別にこの面からコイル内あるいはコイル間の厚みの変動の軽減を期待できる趨勢にあり、A. G. C. がスラブの大型化を助成すると思われる。

(昭和37年3月寄稿)