

.....
 論 文

UDC 531.717.1 : 53.082.79 : 669.14-122

ホットストリップ γ 線クラウン計の開発*

宮川 一男**・市嶋 勇***・江頭 武二****

Development of Hot-strip Crownmeter Using γ -ray

Kazuo MIYAGAWA, Isamu ICHIJIMA, and Takeji EGASHIRA

Synopsis:

Strip crown measurements have been requested by strip mills for the production of uniform strip. An on-line strip crown meter has been developed using Am γ -ray. This paper deals with the problems for the development of the crown meter. Main features of this instrument are using relatively large radiation source and narrow rectangular γ -ray beam. It takes about one minute to scarm entire with of strip, and the accuracy of two microns of thickness was obtained.

(Received June 30, 1972)

1. 緒 言

ストリップの幅方向断面形状、すなわち幅方向の厚さ分布形状は、鋼板のクラウン形状といわれ、ホット、コールドストリップに関して次の二つの観点から技術的に重要な因子である。

まず冷間圧延成品の形状、または平坦度を左右する決定的な要因は、ホットストリップのクラウン形状である。センターバックル(中のび)とか、ウェイヴィエッジ(耳波)は明らかにホットストリップのクラウン形状と冷間圧延時のロールクラウン形状の不整合が原因している。またリューダースライン(耳しわ、腰折れ)の発生はさらに強度なクラウン形状不整合と考えられている。

さらに電磁鋼板のように打ち抜いてから積層して使う場合には、積層されることにより、個々の打ち抜きピース内のわずかな偏差が積算され、結果として大きな傾きを生じる。また容器材として使用される場合に、用途によつてはその重量管理がきびしく要求され、したがって素材の厚さの均一性が、きわめて高くなければならない。

このような要請から、ストリップのクラウン形状を迅速に、精度よく計測する必要を生じた。ところが、従来行なわれていた方法は、切断サンプリングした試料をマイクロメーターで測定する方法がとられ、人手もかかるし、測定結果が得られるまでに時間がかかつたために、素材クラウン形状と冷延鋼板成品形状の対応関係を求め

た解析や、日常の形状管理が十分に行なわれていなかった。

あたかもこの要請にこたえるかのように、この時期にきわめて高精度の γ 線厚さ計が開発された¹⁾。この厚さ計は²⁴¹Amの γ 線を利用したものであり、応答速度が大きくかつ高精度測定ができるものであり、本文に詳述するように多くの長所を有している。筆者らはこの点に着目し、鋼板クラウン計として非破壊測定が可能な装置の開発を試み²⁾、冷延工場、酸洗ラインに設置実用化した。

最近にいたり、この種 γ 線鋼板クラウン計の利用が活発となり^{3)~5)}各所で活用されている。そこでこの装置開発についての試験過程および結果を報告し、同時に将来技術への応用、改善についての考察を行なつた。

2. 試 験 装 置

実験に供された γ 線厚さ計は²⁴¹Amを線源とし、電離箱形の検出器を持ちその出力をレートメータを介して記録させるものである。従来の厚さ計を改良した点は、幅方向での厚さ変化をこまかくとらえることと、エッジ近傍までその厚さを測定する必要があることから、ビームを幅方向に狭く、圧延方向に長い形状にするため、幅を6~12mm、長さ60mmのスリットを線源窓にとり

* 昭和47年6月30日受付

** 新日本製鉄(株)君津製鉄所 工博

*** 新日本製鉄(株)君津製鉄所

**** 新日本製鉄(株)広畑製鉄所

表 1 鋼板断面形状測定試験装置
(神戸工業(株)製)

使用線源	^{241}Am 900mCi (半減期, 458年)
線源スリット	幅 15 mm, 12 mm, 10 mm, 8 mm 長さ 60 mm
検出器	電離箱
検出器窓	100φ, 40×100, 60×100
測定可能厚範囲(鋼板)	0.2 mm~4.5 mm
測定精度	±1%以下
設定厚	0.2 mm~4 mm 連続可変
設定数	0.2 sec
検出部走査速度	1.5m/min
使用記録計	ハニウェル Electronic 19 型 (ペンスピード 0.5 sec/fullscale)

つけた。このようにすると有効な放射線量が減少するので、線源としては通常の厚さ計の3倍の900mCiを使用した。

計器の時定数は厚さ計としては非常に短く設定し、検出部のすばやい走査速度に応じられるようにした。

試験装置の仕様の概要は表1のとおりである。

装置設置場所としては、熱延コイルの断面形状を観察するのが目的であるので熱延コイルが通板するラインが

考えられたが、連熱ラインは高温でしかも高速であるので、この場所をさけて酸洗ライン入測に設置することにした。測定条件を決定するために、まず最初実験室で採取鋼板試料について測定した。さらに酸洗工場では第1号酸洗ラインのアップカットシャーとウェルダーとの間に設置して、オンライン試験を実施した。

3. 試験結果

3.1 予備試験結果

オンライン試験に先だち、試験装置を実験室に設置し、鋼板試料を静置してこの装置の再現性および精度、他の測定方法との比較、測定結果記録と鋼板の位置対応のつけ方、とくにエッジから一定位置の測定方法の検討、異常微小瘤起すなわち、ビルトアップの検出能力などについて種々検討した。

3.1.1 再現精度試験

ホットコイルより採取した鋼板について本装置を幅方向に走査して測定した結果を Fig. 1(1), (2) に示す。それぞれ幅方向に往復走査させた結果であるが、いずれも往きの結果と復りの結果とは、2μ程度の差に収まりよく合致しており、しかも鋼板によって種々な断面形状

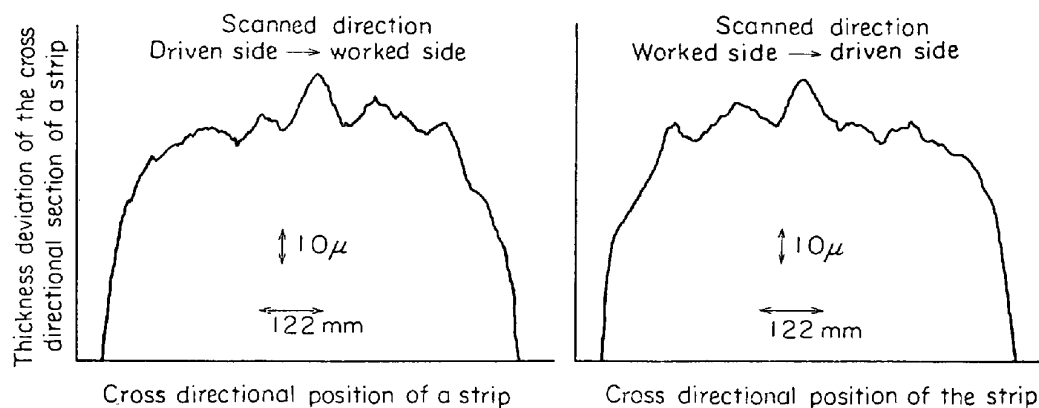


Fig. 1(1). One example of recorded profiles which shows repeatability of the test instrument.

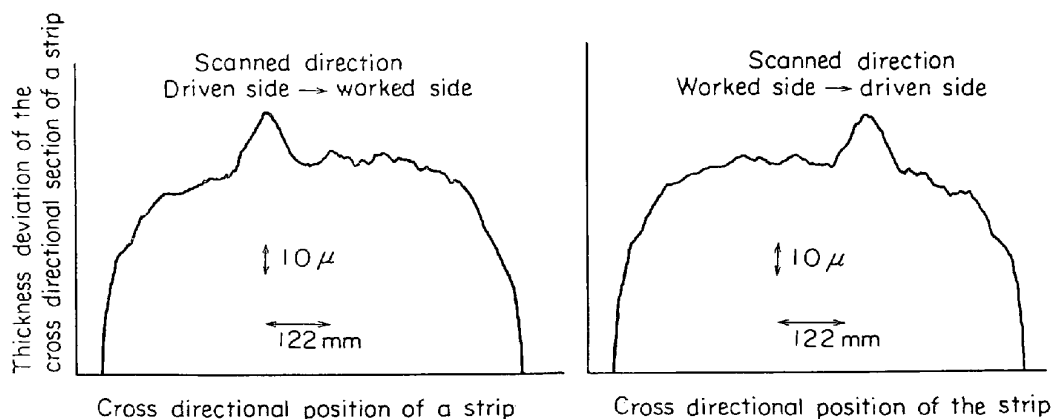


Fig. 1(2). The repeatability of the test instrument.

を有していることがわかる。なおビルドアップも明確に測定されることが判明した。

3.1.2 マイクロメーター測定結果との比較

γ 線鋼板クラウン計の精度はきわめてすぐれていることは前述のとおりであるが、この計測器による測定法は絶対測定法ではないので、その測定値の信頼性を他の測定方法との比較により確かめる必要がある。それゆえ従来の最も標準的なマイクロメーターによる測定値と比較した結果の1例を Fig. 2 に示しておく。図からみられるようにこの両者の測定値の差はたかだか 5μ である。マイクロメーターの誤差も約 3μ はあり、これを考慮に入れるときわめて信頼度の高い測定値を示していることがわかる。

3.1.3 測定記録と鋼板位置対応のつけ方の検討

すでに Fig. 1, Fig. 2 に示したように本装置によつて鋼板の厚さを測定した場合鋼板の断面形状を描くが、この図形上の各点と鋼板の位置との対応をつけるのが重要な問題である。とくに現行の管理基準のエッジから 20~30 mm 位置での厚さと、中央での厚さとの比較によりクラウン量を表示する方式では、エッジから 20 mm の位置の厚さを明確に検出することが重要になつてくる。しかるに放射線ビームは細い線ではなくある程度ひろがりを持つたものであるので、エッジの点で正確に立ちあがらずにビームが完全に鋼板中に入ったところで立上がる。すなわちその間の遅れがあらわれる。その上、ビームが鋼板をはずれ直接検出箱に到達するときわめて大きな出力となるが、このような大出力の場合には、増幅器の動作範囲を逸脱してしまい、特殊な回路としない限り回復に 1~2 sec かかる。その間約 30 mm 程度検出部が進行してしまい立上りの遅れをいつそう大きくする。

一方、線源部のスリットを細長い長方形にしてあるの

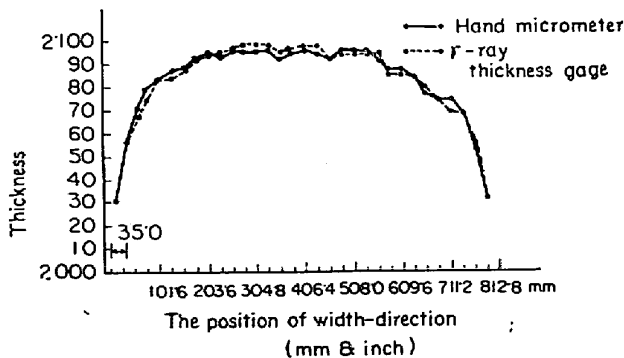


Fig. 2. Comparison between measured results of hot-rolled-sheet crown by a hand micrometer and the γ -ray thickness gage.

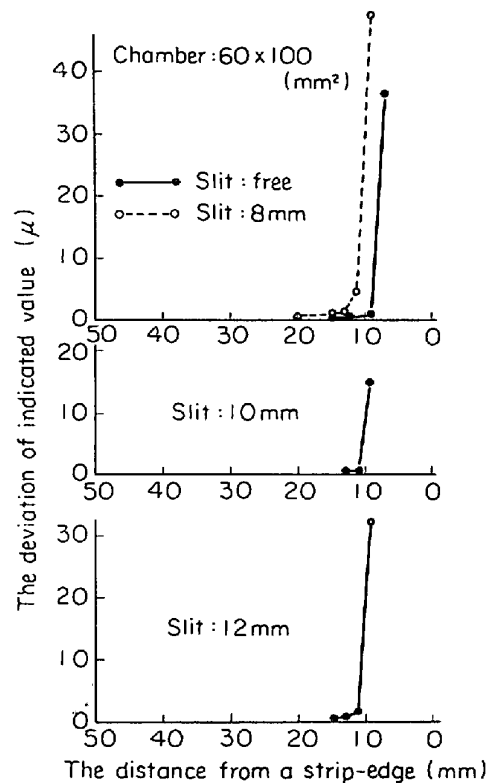


Fig. 3. Measurable areas near the edge.

で、かなりエッジ近傍まで、ビームが鋼板をはずれずに測定できるはずである。そこで実験の順序としてまず検出部静止の状態、エッジ近傍何 mm まで測れるか実験した。

エッジサイドにサンプルと同程度の厚さの板を置き、これをはずしたときに急激な出力差があらわれる位置をみつけ出し、その点をエッジ検出限界とした。このようにして、測定した結果を Fig. 3 に示す。

スリット幅 12 mm では、エッジより 15 mm まで、スリット幅 10 mm ではエッジより 11 mm まで、スリット幅 8 mm ではエッジより 9 mm まで測定可能である。以上の測定は検出部を静止した場合のエッジ検出限界であるが、検出部をライン外から移動させて測定する場合には、時定数分だけの指示遅れと、前述の増幅器の飽和現象からの指示遅れとで、エッジ検出がむずかしくなる。

とくに増幅器の飽和現象は指示遅れがはなはだしく、本試験ではストリップエッジサイドに同程度厚さの添え板をおいたりして種々検討したが、適切な解決方法は見い出せなかつた。しかし電気回路的にはこの現象を取り除くのは比較的容易なことである。それに反して回路時定数の時間遅れは本質的な問題であり、これを皆無にすることは不可能であり、影響を無視できる程度に小さく

しようとする、放射線の統計揺動が大きくなり、実用手段としては採用できない。

やむをえず鋼板のエッジ近傍でいつたん検出部を停止してその位置での厚さを測定してから、幅方向に検出部を走査せしめ、反対側のエッジ近傍で再び検出部を停止せしめる方法を採用することにした。エッジ検出は光電式の方法で行ない、制動は電動機に逆トルクを与える方法によつた。制動距離は実験的に求め決定した。

この処置により、エッジ近傍 15 mm までは十分測定可能であつた。この測定結果の記録には、X-Y レコーダーが適当と考えられる。

通常の記録計では被測定鋼板幅の正確な幅からと記録計の中心位置とから決定していかねばならない。エッジ付近に、箔片か針金を置くことによりこの部分の瞬間的な厚さ変化記録によりエッジ位置指示を試みたが、エッジから 30 mm 以内まではその指示があらわれなかつた。

これに対し鋼板の中央部の位置対応はエッジに比較し容易に対応がつけられる。

3.1.4 ビルドアップ測定

模型実験として、50 μ のステンレス箔片をベース鋼板上にのせて測定した結果を Fig. 4 に示す。

このように鋭い形状のビルドアップに対しては、形状がくずれてくるがビームがある程度ひろがりをもつているのでやむを得ない。

異常微小瘤起すなわちビルドアップを、Fig. 5 に示したような幅と高さのとり方で γ 線クラウン計測定データとマイクロメーター測定データと比較してそれぞれ幅 W 、高さ h を測定し、等価打点図に示した。それが Fig. 6 である。ビルドアップ高さについてはこの測定器の精

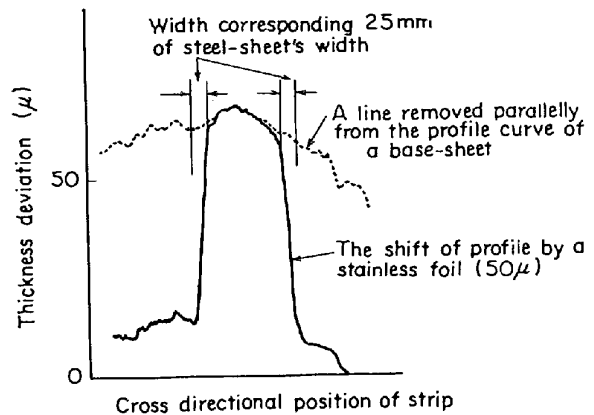


Fig. 4. Test example for unusual crown detection.

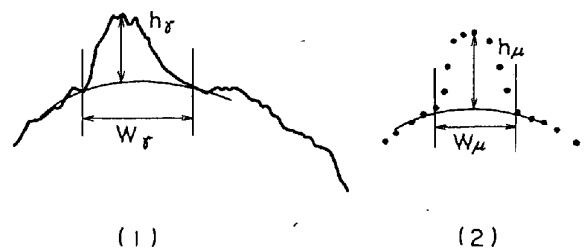


Fig. 5. Measurements of unusual crown by the γ -ray crown meter (1) and micrometer (2).

度からみて非常によく一致している。また、幅についても一応満足できる結果といえよう。

ビルドアップの測定された試料について、圧延方向へ 33 mm 間隔に 5 箇所クラウンを測定した結果を Fig. 7 に示す。 γ 線クラウン計とマイクロメーターとは非常によく一致した形状および対応を示している。また、ビルドアップが長さ方向にある周期で存在している 1 例と考えられる。

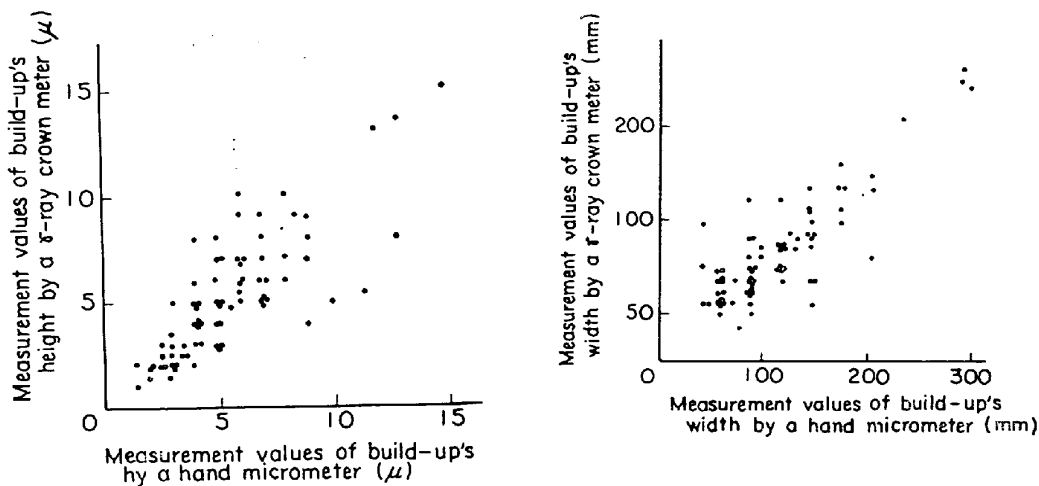


Fig. 6. Correlation figures of unusual crown height and width between the measured values by γ -ray crown meter and micrometer.

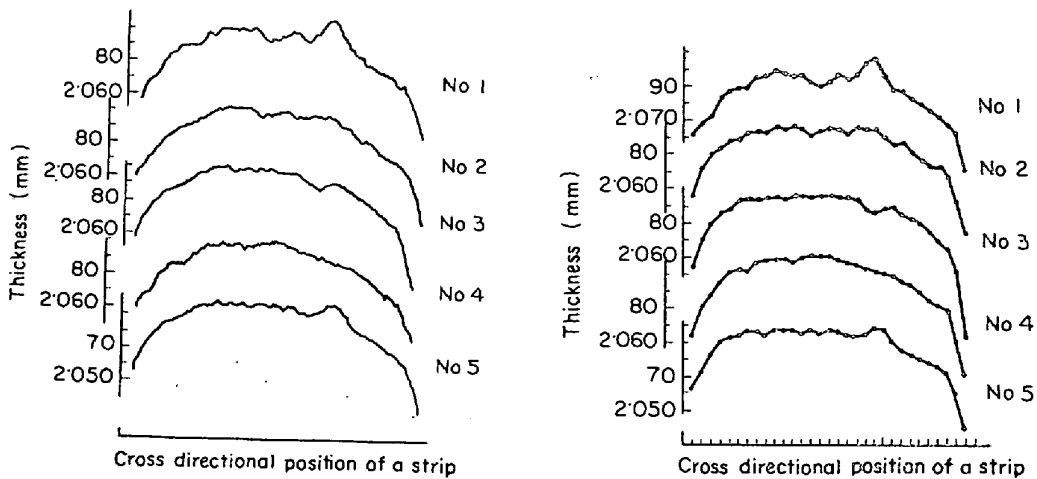


Fig. 7. Profiles measured by γ -ray and hand micrometer at regular intervals of 33 mm to longitudinal direction.

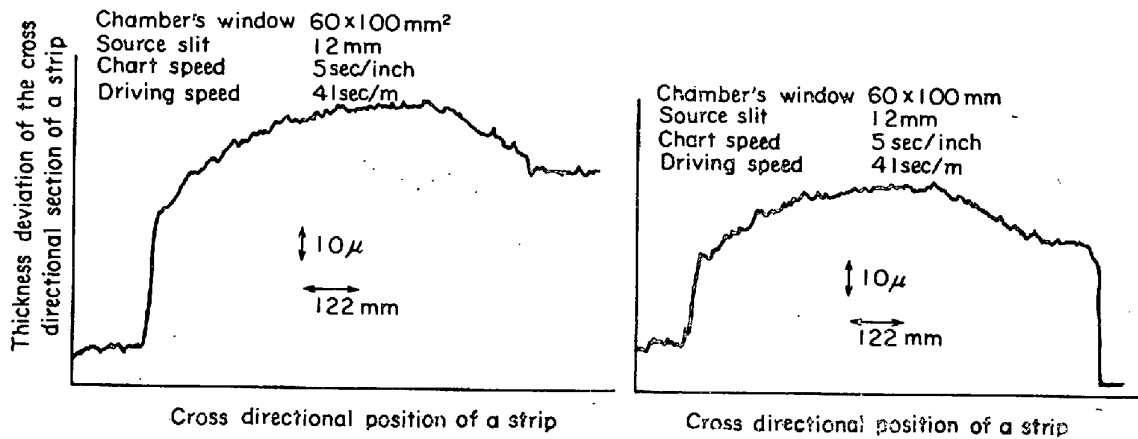


Fig. 8. Examples of measured profiles by on-line γ -ray crown meter. (pickling line)

3-2 ライン設置試験結果

以上の実験室での予備試験ののちに装置を冷延工場酸洗ラインに設置し、実際のラインでの測定を行なった。

Fig. 8 にホットコイルのクラウン形状を測定した結果の例を示す。Fig. 8(1) にはラインを停止した上でエッジから 20 mm の両端位置で静止測定し、その两点の間を走査測定している。この 1 例はウェッジタイプの鋼板であり、ドライブサイドの厚さが厚くなっている。

Fig. 8(2) はもう 1 例で、やはりラインを停止してから、エッジから 25 mm の位置で静止測定したものである。エッジ近傍管理位置の測定もこのように静止測定すれば統計揺動が除かれた精度のよい測定値を得ることができる。中央位置はビルドアップがなければほぼフラットなので、統計揺動があまり入っていない測定値を読みとることができる。

4. 本装置について

冷延工場酸洗ライン設置の鋼板クラウン形の仕様は基本的には前述の試験装置と同様のものであるが、これまでの実験結果をもとに若干の改良が加えられたものである。その特徴の主たるものをかいつまんで述べると、第 1 に ^{241}Am 線源を 5 mm \times 100 mm の長方形のものとし、 ^{22}Ci のものを使用し、スリットは短柵状のものを使用した。

エッジ管理位置の測定は正確を要するのと、この装置がストリップの断面の厚さ偏差を精度よく指示する機能をもつものであるため、板厚レベルによる較正が必要であるので、ラインを停止した上でエッジ検出装置で検出部を静止させ測定した。計録計は X-Y レコーダーを使用しクラウン形状の直観的把握を可能にした。検出部の駆動は 2 m/min \sim 6 m/min まで 3 段切換えとし、測定

表 2 酸洗ライン設置装置
(神戸工業(株)製)

1.	検出部移行距離	1 600 mm
2.	移動速度(検出部)	1m/30 sec~1m/10 sec 連続可変
3.	線源	$^{241}\text{Am}2\text{Ci}$ (5 mm×100 mm)
4.	鋼板耳端および基準点検出方式	光電方式
5.	記録計	X-Y レコーダー X軸, 板幅方向と対応
6.	使用温度	5°C~40°C
7.	測定範囲	鋼板 1 mm~3.5 mm 厚
8.	精度	板厚 2 mm ヘッド移動速度 1m/20 sec 時定数 0.2 sec の条件で $1.7\mu(\sigma)$
9.	測定	ワンタッチボタンで一測定を自動的に 行なう。
10.	較正	作動ボタンを押すことにより自動的に板 厚偏差 0 位置にサーボ駆動で行なう。 この場合板厚はポテンショメーター指示 で表示される。

時間の短縮をはかった。

次の表 2 にその仕様のおもなものを示しておく。

5. 考 察

5.1 結果の考察

5.1.1 クラウン量管理

このクラウン計はラインを停止した上でエッジから一定位置に検出部を静止して厚さレベル較正を行なうが、この間一定時間静止測定するために変動の中心点から統計揺動が補償された値を読みとることができるので、きわめて高精度の測定が可能である。

一方、鋼板の中央位置での測定も比較的フラットな部分であるので、この点での測定値も高精度なものが得られる。もし中央位置にビルトアップが存在する場合には、測定者の直観でそのビルトアップ量を補正することができるであろう。また X-Y レコーダーに記録させる方法は鋼板の測定位置とチャート線上の位置が対応するので直観的なクラウン形状観察が可能であり、その点でも従来のマイクロメーター管理に比べきわめて迅速な判断が可能である。Fig. 1 に示したように再現性がすこぶるよいこと、Fig. 2 の結果もきわめてよく一致していることはこの計器が信頼度の高いものであることを示している。

そして結果の判明が 1 min 程度で可能であるから熱延工程へのフィードバックが迅速にできること、熱延コイルのクラウン形状と、最終成品の形状との対応試験が容易にできるようになったこと、そしてその結果により、酸洗ラインでの向け先変更の指示が可能になること等々の大きなメリットが期待される。

なお、この報告は板厚 2 mm~3 mm のホットコイルについて試験した結果を述べてきたが、前述のように 2 mm 厚の鋼板に対して誤差数ミクロンで測定可能であったことから、吸収特性がより好適な領域にある 0.3 mm 厚から 1 mm 厚の薄板に対してもより高精度で測定可能である。したがって最終成品でとくに位置による板厚偏差が問題になる場合、たとえば打ち抜き板を積層して用いる鋼板、重量管理が厳重な鋼板などには利用価値が大きい。

5.1.2 ビルトアップ管理・ロールの局部摩耗管理

Fig. 7 (1), (2) にみられるように局部的な厚さ変動の様子がよくあらわれている。この γ 線クラウン計はビームが鋼板を通過する面積がある程度ひろがっているため、たとえば Fig. 9(1) のような鋭い突起に対しては追従がにぶいが、Fig. 9(2) のような形のビルトアップに対してはかなり忠実にその様子を示してくれる。

実際に鋼板上にできるものは(2)のような形のものが多いと思われるので、その点確かな測定ができています。ただし小さなビルトアップに対してやはりビームの面積が大きいことから起ふくが実際より小さく記録され正確な形状はつかめない。たとえば 1ϕ の針金を置いて測定しても $2\sim3\mu$ の突起があらわれるだけである。

つぎにロールの局部的な摩耗による異常瘤起は、たとえば Fig. 7 に示したものがその例であるが、これもかなり忠実にその姿を示してくれている。実際問題としてこの程度の局部瘤起が成品に悪影響を及ぼしているか否か現在のところ明らかにされていないが、ロールの摩耗状況をチェックするには十分利用できる。

5.2 ^{241}Am γ 線厚さ計について

鋼板用放射線厚さ計は従来主として β 線厚さ計、X線厚さ計が利用されていた。そしてとくに厚板とか大形形鋼には 0.1 MeV 以上のエネルギーを有する γ 線が利用

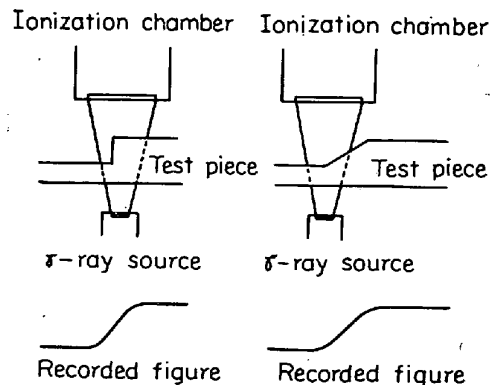
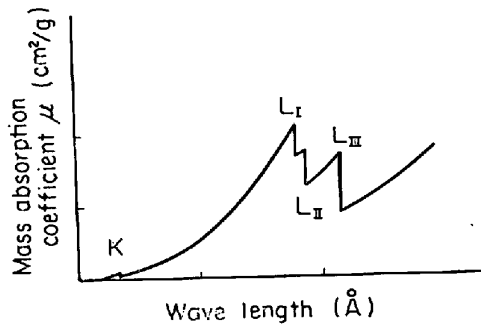
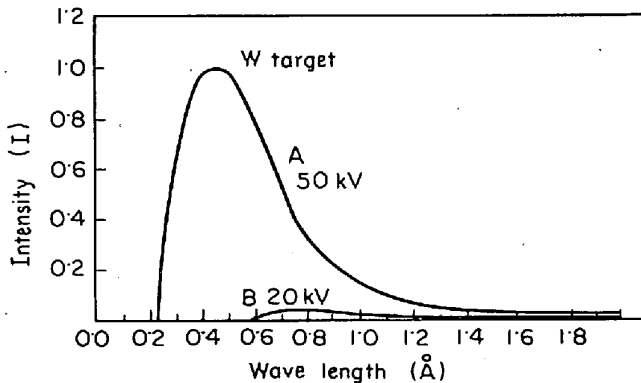


Fig. 9. Response of the γ -ray crown meter to thickness variance of strip.

表 3 各種放射線源厚さ計の特徴

核種	半減期 (年)	エネルギー (MeV)	測定範囲 (mg/cm ²)	鋼板 (mm)
⁹⁰ Sr (β)	27.7	2.26	8~600	0.01~0.75
¹⁰⁶ Ru (β)	1.00	3.55	60~1 200	0.075~1.5
²⁴¹ Am (γ)	458	0.06	160~3 500	0.2~4.4
¹³⁷ Cs (γ)	30.0	0.66	2 000~40 000	2.5~50
⁶⁰ Co (γ)	5.24	1.17 1.33	2 700~55 000	3.4~69

Fig. 10. Mass absorption coefficient curve of platinum⁶⁾.Fig. 11. White spectrum intensity produced by tungsten-target X-ray tube⁷⁾.

されていた。これらのおおのの厚さ計の特徴を表3に示しておく。

表3から見られるように β 線は測定範囲が1mm厚以下の鋼板に限られていて、利用範囲がきわめて狭い。また鋼板上の油膜とか水滴に、きわめて大きく影響を受けやすい。X線はX線管球のターゲットからの特性X線と電子粒から発生する制動放射線とから構成されていて後者は連続スペクトルである。この連続スペクトルの発生ということがX線厚さ計の精度に限界がある大きな原因となつている。

すなわちX線エネルギーにより、それぞれの元素に応じた吸収特性があり、その吸収特性が不連続的に変化する。この様子を Fig. 10 に示しておく⁶⁾。引用例は白金についてであるが他の元素についても同じ傾向の吸収曲

線となる。そのために発生放射線が連続スペクトルであり、その強度分布が一定でない場合には含有元素の影響が強くあらわれる。通常のX線管球によつて発生したX線の強度分布はたとえば Fig. 11 のようになる⁷⁾。したがつて合金の場合、その合金元素含有量によつて絶えず調整を必要とし、数 μ の精度を要求される厚さ計の場合には大きく問題になる。その上X線厚さ計は電源の変動などが線源量の変動として直接あらわれてきてやはり誤差の原因となる。

以上のような理由で γ 線エネルギーはX線と同程度でしかもモノクロマティックなスペクトルを有する γ 線源が利用されれば上述の問題は解決されると予想されていた。そこへ²⁴¹Amの同位元素が比較的low価格でかつ容易に入手できるようになつてきた。この γ 線源は半減期も458年と非常に長く、きわめて好都合である。

事実この線源を利用した γ 線厚さ計は前述のように非常に高精度のものであり、プロフィールメーターへの応用が可能になつたものである。

²⁴¹Am γ 線厚さ計のもう一つ大きな利点は、放射線遮蔽がきわめて容易であるということである。²⁴¹Amは α 線と γ 線を出す、 α 線の方は空気中で数cmの飛程しか持たないのであるから問題ないし、 γ 線も鋼板5mm程度で全く安全なところまで遮蔽できる。したがつて作業上の取扱いも、ビームに直接手を入れることさえなければ安全である。形態もセラミック状に固着したものであり、密封線源として理想的な状態であるので、放射線障害防止のための完璧な管理がきわめて容易にできる。

5.3 鋼板クラウン自動制御について

基本的にはA.G.C. (Automatic Gage Control) Systemと同様な原理で鋼板クラウンコントロールシステムが考えられている。その具体的なものとしては4重圧延機に応用した例としてT. A. Foxの特許⁸⁾にみられるようなものである。

その他にもワークロールベンディング法、バックアップロールベンディング法⁹⁾が考察されている。

上の3方法でFoxタイプはワークロールショックとバックアップロールショックの間にハイドロリックシ



Fig. 12. Work roll bending crown shape⁹⁾.

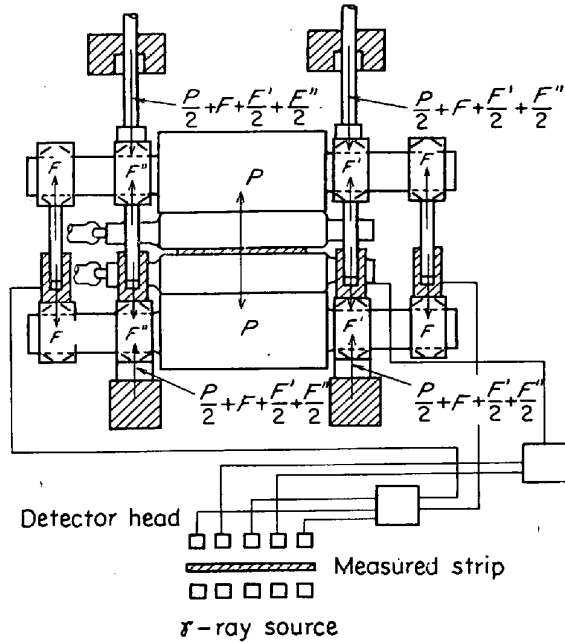


Fig. 13. Crown control system using back-up roll bending.

リンダーを入れ制御するものであり、ワークロールベンディング法はワークロールショックの間にハイドロリックシリンダーを入れるものである。そしてこれらの2方法はいずれも制御された鋼板の断面形状が Fig. 12 のようになると考えられている。これに対し、バックアップロールベンディング法は理想的なクラウン制御が得られるといわれている。

いずれにしても上に述べた各方法が理想的な機能を発揮するためには、高精度の厚さ検出器が要求されていた。そしてこれまでその条件が満たされていなかったのである。

そこへこの ^{241}Am - γ 線厚さ計が開発されこの種厚さ計の精度がいちじるしく高められたのでクラウンの自動制御用として十分使用できるものとなった。実際のクラウン制御は Fig. 13 に示すように5点の測定器を置き、両端と中央のものでクラウンを制御し、両側の測定器でウェッジ制御をするのが望ましい方法である。このウェッジ制御方法を加えたバックアップロール彎曲法は U. E. の方法⁹⁾に改良を加えた方法である。図中 $\frac{P}{2} + F + \frac{F'}{2} + \frac{F''}{2}$ は A. G. Cシステムから指示される量であり、厚さを設定するものである。Fは中央の測定器によ

る測定値と最も外側にある両測定器による測定値の平均との差から指示される量である。F'は固定された量としておいてF''を2番目と4番目の測定器による測定値の差から指示される量とすればよい。

もちろん技術的に困難な点はまだ数多くある。たとえば厚さ計を複数個並列で使用するのであるから、その各計器間の誤差が当然加わってくる。これを極力小さくするために較正方法の確立が必要である。と同時に計器ドリフト、周囲温度などの外部条件変動による指示値の変動なども極力小さくしなければならない。またたとえば熱間圧延機にこの自動制御機構をとりつける場合には、高温下で適応できるようにすることも必要である。

最近のワークロールベンディング法の研究、厚板でのバックアップロールベンディング法の研究¹⁰⁾成果からみられるように近い将来、クラウンコントロールが現実のものとしてクローズアップされる日も近い。

そのときにはこのクラウン自動制御技術の確立が強く要望されるものと思われる。

5.4 動的誤差の補正について

この種の測定ヘッドを走査させるγ線測定器の誤差は放射線源壊変にともなういわゆる統計揺動による誤差、電気回路による誤差と、測定ヘッドの検出出力をメーターまたは記録計までに指示されるのにかなり長い時定数を取り、結果として時間遅れによる指示誤差、いわゆる動的誤差から構成されている。統計揺動による誤差は線源量を増加させることにより 1μ 程度までは任意に小さくできる。電気回路による誤差は現状に必要な程度には十分小さくできる。

しかし最後の動的誤差は現在のところ解決していない。この誤差があらわれる様子を Fig. 14 に示しておく。この動的誤差は全誤差のうちかなり大きな部分を占めているので、これを改良できる見通しを得ておくこと

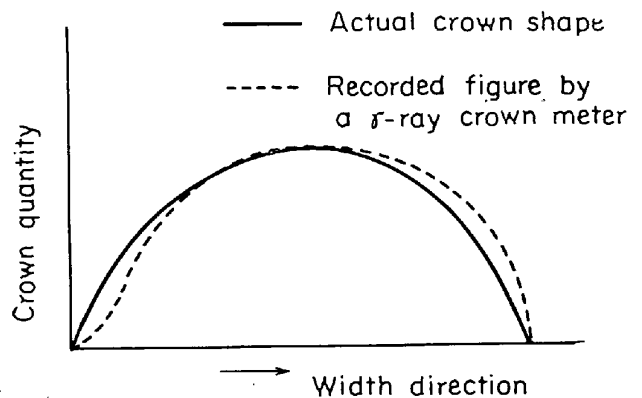


Fig. 14. Difference between recorded curve by γ -ray crown meter and actual crown.

は重要なことであり、ここに考察を加えておく。

この動的誤差が生ずる原因は、X・Y・レコーダーに記録された場合、X-方向入力に時間遅れがなく、Y方向入力に対しては時間遅れがあるために起こるものである。

そこでX方向入力も同じ時定数で遅らせた場合どうなるか、この動的誤差が補正できて正しい形状の記録が得られるのではないかとすることが考えられる。

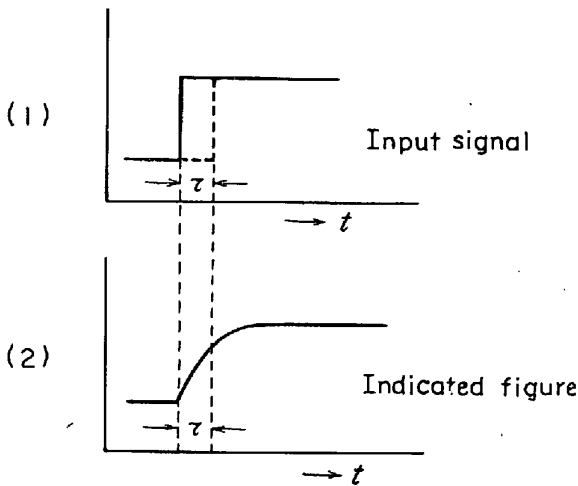


Fig. 15. Correspondence between input and output signals of the instrument having time constant τ .

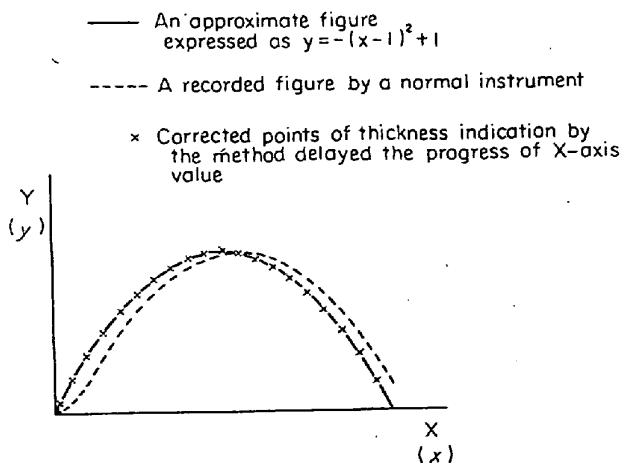


Fig. 16. Correction of recorded curve.

Fig. 15 にその実際の時間遅れの様子を示しておく。
 Fig. 15(1) のような入力変化に対しての実際の応答が Fig. 15(2) のようになる。もしこれが(1)の破線で示したような時間遅れを示すのであれば問題は簡単であり、X軸に対してYと同じ時定数分の遅れをとらせるだけで解決する。しかし実際には(2)のように変化するためにこの方法で解決できるか否か検討をする必要がありこれを計算で行なつた。その計算は後に示し、ここでは結果だけを示しておく。

鋼板のクラウンの形状を

$$y = -(x-1)^2 + 1$$

と記述する。その形状は Fig. 16 に示すとおりである。計算にあつては $x=kt$ で $k=1$ とし $\tau=0.1 \text{ sec}$ とし計算している。したがつて実形状と記録形状のずれは実際より誇張されて示されている。

X・Y レコーダーのX軸方向を通常の方法で走査させると、X-Y レコーダー上に描かれる曲線は Fig. 16 の破線で示した曲線を記録する。

そこでX方向に時定数 τ の遅れ回路を入れると×印であらわした値を示す。すなわちきわめて正確な形状をX-Y レコーダー上に示してくれることがわかる。このようにしてクラウン形状記録装置の動的誤差を補正することが可能となる。実際の回路上の改良はR-C回路をX-入力端前に入れ $RC = \tau$

となるように R・C を定めてやればよい。

6. 結 言

^{241}Am γ 線厚さ計を改良した鋼クラウン形は十分な精度で使用できる。その裏づけ実験として熱延コイルについて測定した結果を列挙する。

(1) 繰り返し精度は往復測定法で試験した結果往復の差 2μ 以下でおさまっている。

(2) マイクロメーターとの比較結果ではその差 5μ 以下でおさまっている。

(3) ビルトアップについてもマイクロメーターで検出したものと幅、高さ共によい一致を示している。

(4) エッジ近傍の測定は測定ヘッドを一たん停止して測定する方法をとれば 15 mm まではかれる。

(5) 測定は約 1 min で完了する。

先行きの展望として次のことがいえる。

(1) 測定精度は、動的誤差の補正、使用線源量の増大などにより、さらに向上できる。

(2) クラウン自動制御のための検出器として開発しうる可能性を十分に持っている。

Appendix

時定数 τ の R-C 回路で $t=0$ で入力が $y=a$ に変化したとき、メータ指示は $y=a(1-e^{-t/\tau})$ と変化する。ここでクラウン形状を $y=f(x)$ とおく。考察の段階ではノルマライズしておく。同様に記録計での記録もノルマライズして $Y=F(X)$ とおいたとき、 $F(x)=f(x)$ であればこの記録は鋼板断面形状を正確に記録していることになる。

まず最初にX軸に時間遅れをとらない場合について考察する。この場合 x は時間と直線関係にあり

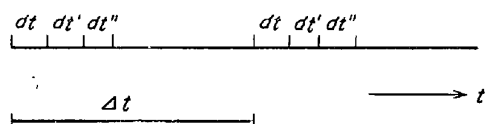


Fig. 17. Differential time dt , dt' , dt'' , and Δt .

$$x = kt$$

とあらわされる。またこの条件のもとでは

$$X = kt$$

である。

一方 $Y(t)$ について考えてみると、スタート直後 dt sec 後には

$$Y(dt) = (y(\Delta t) - Y(0))(1 - e^{-dt/\tau})$$

と書きあらわされる。 Δt についての考え方はやはり無限小量ではあるが、Fig. 17 に示すとおりである。次の dt' 後には

$$\begin{aligned} Y(dt + dt') &= (y(\Delta t + dt) - Y(dt))(1 - e^{-dt'/\tau}) + Y(dt) \\ &= (y(\Delta t + dt) - Y(dt))(1 - e^{-dt'/\tau}) \\ &\quad + (y(\Delta t) - Y(0))(1 - e^{-dt/\tau}) \end{aligned}$$

同様に次の dt'' 後には

$$\begin{aligned} Y(dt + dt' + dt'') &= (y(\Delta t + dt + dt') - Y(dt + dt'))(1 - e^{-dt''/\tau}) + Y(dt + dt') \\ &= (y(\Delta t + dt + dt') - Y(dt + dt'))(1 - e^{-dt''/\tau}) \\ &\quad + (y(\Delta t + dt) - Y(dt))(1 - e^{-dt'/\tau}) \\ &\quad + (y(\Delta t) - Y(0))(1 - e^{-dt/\tau}) \end{aligned}$$

いま $dt, dt', dt'' \dots$ を等間隔にとつていくことはいつかこうに差しつかえないのだから

$$\begin{aligned} Y(t) &= \frac{1}{dt} \left\{ \int_0^t y(t) dt - \int_0^t Y(t) dt \right\} (1 - e^{-dt/\tau}) \\ &= \frac{1}{\tau} \left(\int_0^t y(t) dt - \int_0^t Y(t) dt \right) \end{aligned}$$

ここで $\frac{dY}{dX}$ を計算すると

$$\frac{dY}{dX} = \frac{dY/dt}{dX/dt} = \frac{(y(t) - Y(t))/\tau}{k} = \frac{y(t) - Y(t)}{kt}$$

となる。

$$\frac{dY(t)}{dt} = \frac{1}{\tau} y(t) - \frac{1}{\tau} Y(t)$$

から $Y(t)$ を求めると

$$\begin{aligned} Y(t) &= e^{-t/\tau} \int \frac{1}{\tau} y(t) e^{t/\tau} dt + c, e^{-t/\tau} \\ &= y(t) - \tau y'(t) + \tau^2 y''(t) - \tau^3 y'''(t) \\ &\quad + \tau^4 y''''(t) \dots + c, e^{-t/\tau} \end{aligned}$$

となり $y(t)$ が x の整函数形として表わせればこの $Y(t)$ はすこぶる単純な形で表現できる。

一方 X 軸に同様に時間 τ の遅れ回路を入れると、前述

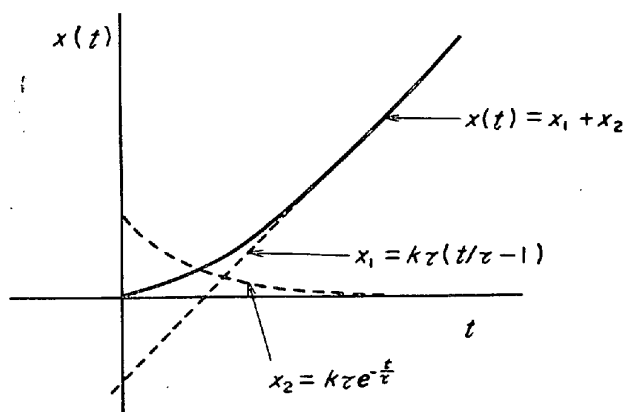


Fig. 18. Progress curve of X-axis pen in case of insertion of τ delay circuit in X-axis potentiometer.

の $Y(t)$ と同様に考えて全く同じ計算が行なわれる。すなわち

$$X(t) = \frac{1}{\tau} \left(\int_0^t x(t) dt - \int_0^t X(t) dt \right)$$

両辺を微分すると一階の線型微分方程式になる

$$\tau \frac{dX(t)}{dt} = x(t) - X(t)$$

$x(t) = kt$ であることから

これを解けば

$$X(t) = k\tau \left(\frac{t}{\tau} - 1 \right) + k\tau e^{-t/\tau}$$

となる。ここで積分定数を求めるために初期条件を入れた。この式を図示すれば Fig. 18 のようになる。

また $\frac{dY}{dX}$ は

$$\frac{dY}{dX} = \frac{dY/dt}{dX/dt} = \frac{(y(t) - Y(t))/\tau}{(x(t) - X(t))/\tau} = \frac{dy}{dx} \approx \frac{dy}{dx}$$

すなわち、記録形状と、実際の形状とがよく一致していることを示している。

現実にクラウン形状が

$$y = -(x-1)^2 + 1$$

で近似できる場合実在のクラウン形状と、従来の $X-Y$ 記録と、改良後の $X-Y$ 記録とを図示したのが前掲の Fig. 16 である。

文 献

- 1) 三輪, 水越, 西村: 原子力工業, 12 (1966) 10, p. 67
- 2) 第5回理工学における同位元素研究発表会 1968, 4月, p. 16
- 3) Iron Steel Eng., (1968), August, p. 147
- 4) 城戸, 西脇, 桑川, 島崎, 乾, 川瀬: 東芝レビュー, 23 (1968) 10, p. 16
- 5) 第50回計測部会資料 (日立製作所), 1972年3月

-
- 6) *A. GUINIER*: X線結晶学の理論と実際
(高良他訳), p. 14 (理学電機図書出版社)
- 7) *H. A. LIEBHAFSKY*, et al.: “分析化学者のためX
線分光分析法”(柴田他訳), p. 6 (理学電機図書
出版社)
- 8) 特許出願公告, 昭40-19734 (1965年9月)
- 9) *M. D. STONE* and *R. GRAY*: *Iron Steel Eng.*,
42 (1965) 8, p. 73
- 10) *K. KONO* and *H. NAKAMURA*: *Proceedings*
ICSTIS, Suppl. Trans. ISIJ, 11(1971), p. 684
-