

.....
技術報告

UDC 621.74.047 : 669.14-412-147

線材用連鑄設備と品質問題

山田 勝彦*・橋本 義弘*・藤田 照夫*
 青木 義明*・多田 英昭*

Continuous Casting for Wire Rods and Its Quality Problems

*Katsuhiko YAMADA, Yoshihiro HASHIMOTO, Teruo FUJITA,
 Yoshiaki AOKI, and Hideaki TADA*

Synopsis :

For the production of high quality high carbon steel wire rods at reasonable cost, Sumitomo Electric has designed and installed a C.C. machine for both small size bloom and large size billet together with a break down mill.

Investigations before designing are as follows :

(1) Influences, on centerline segregation, of such factors as casting temperature, E.M.S., size and shape of bloom and billet, and diffusion during soaking have been made clear.

(2) Evaluation of hot-workability of C.C. blooms by using a wedge specimen with fin was developed and criteria of hot workability were made clear to several grades of steel. These results were applied to design new C.C. machine, reheating furnace and break down mill, and wire rods having good drawability, cleanliness and surface were produced.

1. 緒 言

高品質線材における品質については、当然性能や特徴も重要だがまず材料の信頼性——鋼種、用途にてらしてトラブルとなる欠陥の程度と発生頻度——が統計的見地で論議されるべきであろう。

連続鑄造法により直接小断面の高炭素鋼ビレットを造る場合、一般的には中心偏析、表面欠陥などの品質管理が困難視され、最近では大型ブルーム連鑄の採用が増している。この場合、経済的には一見後退のように見えるが、断面大型化による組織の均質化、非金属介在物汚染の軽減とその分離効果、ブレイク・ダウンによる表面疵の減少と磁気探傷精度向上など期待される。

住友電工においては 1967 年、113φ ビレット用連鑄機を設置、多くの品質問題を克服しながら主として高炭素鋼を 60 万 t/ストランド製造、1979 年には品質の一層の高級化と原価低減を目ざしてレードル精錬装置、ブルーム連鑄機、ブレイク・ダウン設備の設置を含む全面改造を行った¹⁾。本報告においては、製造プロセスの選定、鑄片断面寸法の決定、中心偏析対策、非金属介在物

制御および表面疵低減などに関する著者らの研究とその応用結果を述べる。

2. 改造設備の内容**2.1 製造プロセスの選定**

製鋼設備の常識的な設計手順を次に示す。

(1) 何をつくるか、……鋼種、用途に適する品質仕様が決められる。

(2) どのようにしてつくるか、……品質仕様をみたすため必要な技術もしくは完成に近い新技術は絞られ、製造プロセスはほぼ決まる。

(3) 採算向上へ何を工夫するか、……品種構成、生産規模、資本・操業コストなどの調和、特徴により競争力が影響される。

高炭素鋼線材に必要とされる品質はよく知られているように高度の冷間加工性と製品の耐疲労性などを支えるため中心偏析、表面疵、非金属介在物、表面脱炭、不純物など厳しく制約されている。これら欠陥を統計的許容限内とするため、Fig. 1 に示されるプロセスを選定したが、その要点は小断面ブルーム連鑄—ブレイク・ダウン

昭和 55 年 10 月本会講演大会にて発表 昭和 55 年 10 月 22 日受付 (Received Oct. 22, 1980)

* 住友電気工業(株)伊丹製作所 (Itami Works, Sumitomo Electric Industries, Ltd., 1-1-1 Kita Koya Itami 664)

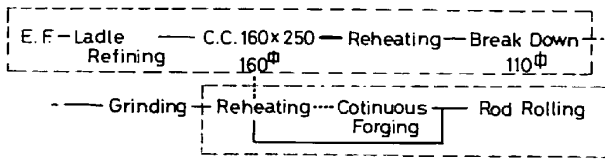
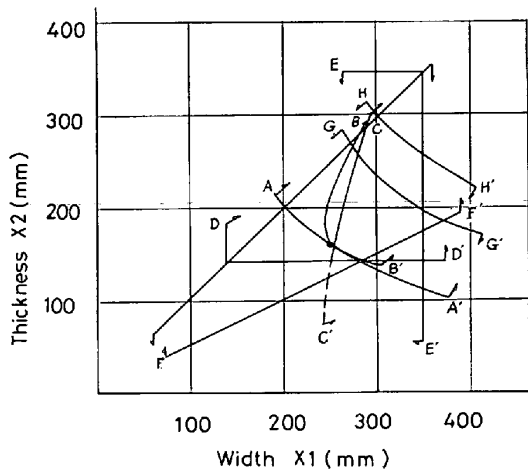


Fig. 1. Production process of high carbon steel wire rod.



- AA' : Rolling ratio $\geq 3g_0$
- BB' : Speculated segregation ratio ≥ 1.2
- CC' : Casting rate ≥ 30 t/h
- DD' : For submerged nozzle $X_1 \geq 140$ mm
- EE' : Prevention of bulging $X_1 \geq 350$ mm
- FF' : Rectangular rate $\frac{1}{2} \geq X_1/X_2 \geq 2$
- GG' : Capital cost $X_1 \cdot X_2 \geq 700$ cm²
- HH' : Operation cost $X_1 \cdot X_2 \geq 900$ cm²

Fig. 2. Optimum condition in size of cross section of C.C. strand.

と大断面ビレット連鑄の併用にあり、品質、コストの必要に応じて使い分けられる。これらの技術的根拠を以下に述べる。

2.2 鑄片断面寸法の決定

断面寸法の決定は既存の圧延設備の都合で拘束される場合もあるが、本来必要品質を最少コストで得るよう検討されるべきである。

一般に大型化ほど品質保証は容易となり、小型化ほど資本、操業コストは有利となるから、これは必要最少断面を求める問題となる。

Fig. 2 は製鋼要因と断面寸法の関係を示すが、このような問題では十分な資料は得にくいこと、系統だった実験が困難なことから著者が相当主観をまじえて提示したものである。図において、中心偏析率の限定領域 (BB') は最もデータに欠けるが、後述の断面矩形化効果と、小断面における不均等性を推定、合成したものである。鍛圧比 (AA') ≤ 3 、偏析率 (BB') ≤ 1.2 、鑄造能率 (CC') ≥ 30 t/h、浸漬管使用限界 (DD') > 140 mm、バルジング予防範囲 (EE') < 350 mm、矩形比 (FF') ≤ 2 、設

Table 1. Specification of continuous casting machine.

Ladle capacity	30 t
Type of C.C. machine	Vertical bending
Number of strand	1
Type of tundish	Induction heating
Mold size	160×250, 160×160
Electromagnetic stirrer	2-poles rotary field
Casting speed	1.4 2.0m/min
Cutting	Hydraulic diagonal shears
Machine length	23m
Height of vertical zone	7m
Machine radius	12-7m, 2-points bend
Bloom transfer	Hot charge boggy
Reheating furnace	Walking hearth
Break down mill	2-high reverse, box caliber

備コスト (GG') ≤ 700 cm²、ランニングコスト (HH') ≤ 900 cm² の条件を設定して、総合的に検討した結果、ビレット最大寸法として 160 mmφ、ブルームとして 160×250 mm を決定した。

2.3 設備諸元

Table 1 は新連鑄設備の諸元を示す。旧設備と比較してあえて特徴というなら以下があげられる。

- (1) 品質、操業安定のためタンディッシュ誘導加熱。
- (2) 品質管理の容易な垂直-曲げ方式、1972 年来実績のある二次冷却帯回転磁界式電磁攪拌、切断面のよい“ダイアゴナル”油圧シャーなどの踏襲。
- (3) 原価低減のため、単ストランド化と熱片直送ボギー。
- (4) ウォーキング・ハースと均熱帯をもつ加熱炉。
- (5) ブレイク・ダウンのトラブルの連鑄への干渉防止のためブルーム搬送待避ラインを含む緩衝システム。

3. 品質問題

いろいろな問題に対する実験方法と結果を以下に述べるが、特にことわりのない限り供試材はすべて SWRH 82 A. B. (0.8% C, 0.25% Si, 0.5~0.7% Mn, 0.015% \geq P, S) 113 mmφ 連鑄ビレットである。偏析に関しては比較精度をあげるため分析サンプルは、幅 2.5 mm×高さ 5.0 mm×長さ 200 mm、もしくは、直径 5.0 mm×長さ 5.0 mm×40 点を切り出した。

3.1 中心偏析

3.1.1 電磁攪拌

本手段は鑄造組織の均質化に対して有効²⁾ だが中心偏析に対しては必ずしも完全でない。Fig. 3 は最大偏析率におよぼす電磁攪拌の影響を既発表の資料³⁾ に新資料を加えて示した。図から以下がわかる。

- (1) 中心偏析は攪拌の有無にかかわらず鑄込温度が高いほど大きくなる。
- (2) 電磁攪拌は鑄込温度が高いところで効果的であ

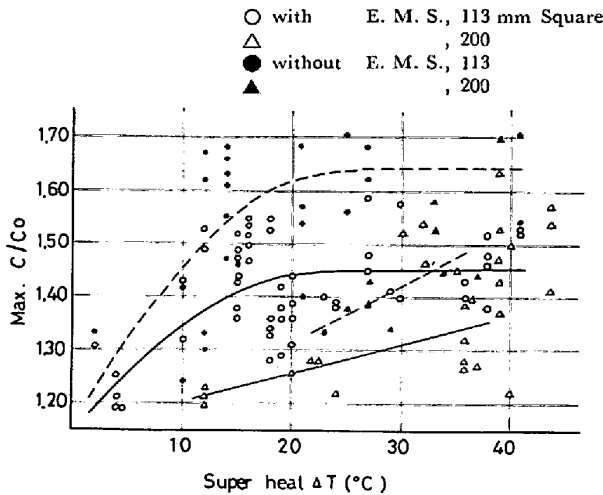


Fig. 3. Effects of casting conditions on segregation ratio of billets.

る。

(3) 鋳片断面が大きい場合はさらに有効と推定される。

電磁攪拌の他の問題として、ホワイト・バンドの生成によるその内側濃度の増加がある。その値を許容限内とするにはバンドの大きさ、負偏析率とバンド内側面積との関係から容易に攪拌時間、強度および部位の適正値を求めることができる。なおホワイト・バンドについては、1972 年来各種用途に供されトラブルは経験されなかつた。

3.1.2 矩形化

中心偏析率におよぼす断面形状の影響を明らかにする簡単な方法として横断方向の溶質の収支を検討する。横断方向偏析に関する多くのデータ⁴⁾⁵⁾で注目すべきことは、中心周辺領域ではわずかに負偏析に偏っていることである。著者らは炭素の“負偏析領域”の大きさと濃度、中心正偏析のそれらをいろいろな寸法の鋳片について調査し、前者は (30~45 mm φ) × (0.97~0.98)、後者は (10~15 mm φ) × (1.1~1.45) を得た。

Fig. 4 は正方形、矩形断面それぞれの正、負偏析をモデル化して示したもので、正、負偏析はバランスするという仮説に基づき、次式を導いた。

$$C_c/C_0 = 1 + (A_n \cdot B_n / A_c \cdot B_c - 1) \cdot (1 - C_n/C_0) \tag{1}$$

ここで、 C_0 は鍋下、 C_c は正偏析部、 C_n は負偏析部の濃度、 A_c, B_c は正偏析部の長、短辺寸法、 A_n, B_n は負偏析部の長、短辺寸法である。 $B_n = 40 \text{ mm}$ 、 $B_c = 10 \text{ mm}$ 、 $A_n = 110 \text{ mm}$ 、 $A_c = 80 \text{ mm}$ をとり、 $C_n/C_0 = 0.97$ として計算すると、正方形、矩形断面の C_c/C_0 はそれぞれ 1.45、1.14 を得る。正方形に比較して矩形断面の

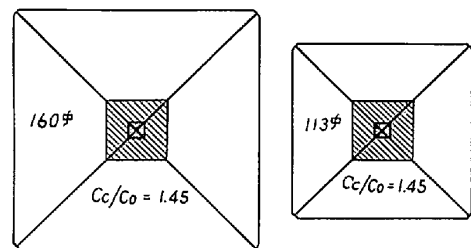
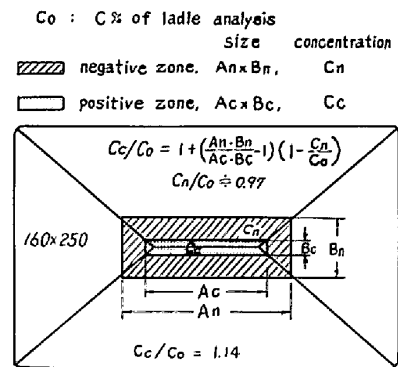


Fig. 4. Comparison of speculated ratio of centerline segregation among 160×250 bloom, 160 sq. and 110 sq. billet.

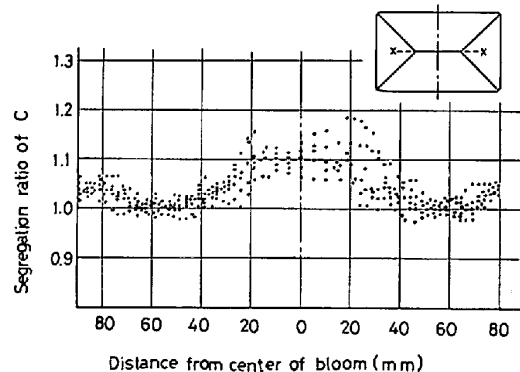


Fig. 5. Distribution in width direction of C in cross section of bloom.

方が中心偏析に対し有利であることがわかる。

Fig. 5 は実際のブルームについて鋳片中心軸から短片に向かつての C 偏析率の変化を示す。中心偏析は線状に分散し、偏析率は 1.1~1.2 になる。この 2 点から本仮説の妥当性がうかがえる。

なお図において“負偏析領域”は必ずしも負ではないが、これは電磁攪拌に伴う負偏析ホワイト・バンドに起因している。

3.1.3 鋳込温度

低温鋳込は不均一組織、偏析、内部割れなどの防止にとって有効だが実操業では困難である。とくに溶鋼ロットが小さい場合、温度変化は大きいので何らかの温度補償が望まれる。タンディッシュ、ノズルの周辺の加熱⁷⁾も

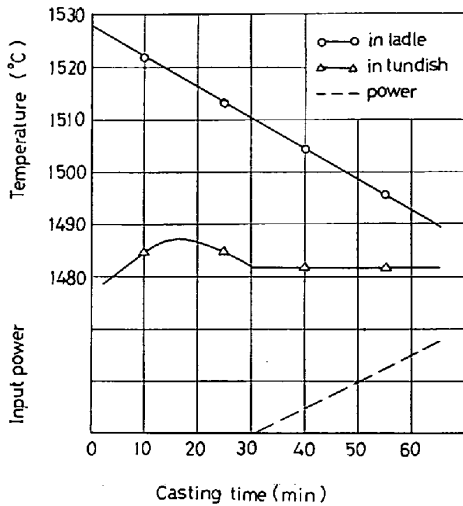


Fig. 6. Relation between casting temperature and induction heating in tundish.

役立つが、理想的にはレードル注入流のタンディッシュへの持込熱量が一定になるかのようなタンディッシュ全体の加熱がよい。

Fig. 6 はタンディッシュに高周波誘導加熱コイルを設け温度制御する状況を示すが、この装置は効果的に利用されている。

3.1.4 中心偏析の拡散

線材の伸線加工性は熱間圧延のさいの加熱条件の影響をうけることがしばしばある。これは中心偏析Cの拡散によると推定され、温度、時間および鍛圧の影響を明らかにするため以下の実験を行つた。

110 mmφ 連鑄片を (1100~1300°C) × (1~4 h) 均熱し、中心C量を分析、(4)式に従う拡散度 H_a を求めた。一方数学的モデルを以下のように作り拡散度 H_c を計算した。

- (1) 偏析は中心軸周りの円錐分布とみなす。
- (2) 拡散は横断方向のみ生ずるものとする。
- (3) Fick の拡散第2式を適用する。
- (4) 拡散係数は温度、濃度の関数とする⁹⁾。

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial}{\partial r} \left(r \cdot D \cdot \frac{\partial C}{\partial r} \right) \dots\dots\dots (2)$$

$$\frac{\log D + 3.51}{T - 1820} = -6.23 \times 10^{-4} C + 3.93 \times 10^{-3} \dots\dots\dots (3)$$

$$H = \frac{C_{0.0} - C_{0.t}}{C_{0.0} - C_m} \dots\dots\dots (4)$$

C : 濃度 (%) D : 拡散係数 (cm²/s)
 t : 時間 (s) C_{0.0} : 初期中心濃度 (%)
 T : 温度 (°C) C_{0.t} : t 時間後中心濃度 (%)
 r : 距離 (cm) C_m : 平均濃度 (%)
 初期条件 : C_{0.0} = 実測値, r₀ = 0.3~0.6 cm

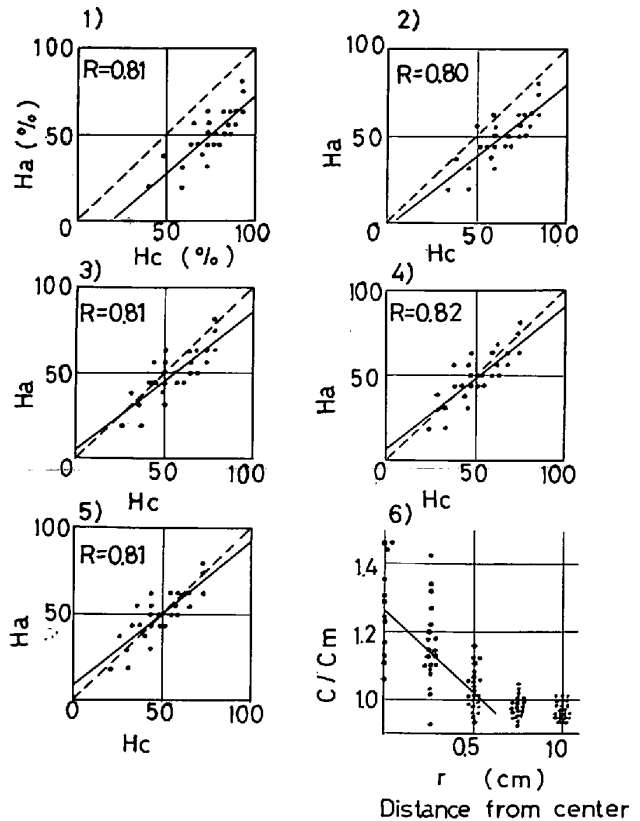


Fig. 7. Comparison of analytical value H_a and calculated value H_c of ratio of diffusion of centerline segregation carbon.

1),5) radius r_0 of center part is each 0.3, 0.4, 0.5, 0.55, and 0.6cm 6) analytical value of r_0 .

境界条件 : $r = 4r_0$ において $C = C_m, \partial C / \partial r = 0$

Fig. 7 は拡散度の実測値と計算値の関係を示す。図において $r_0 = 0.55$ cm の場合に両者の近似が高いこと、b) に示す実測濃度勾配より $r_0 = 0.5 \sim 0.6$ cm になっていることから本モデルの妥当性が認められる⁹⁾。

本モデルによつて拡散度におよぼす加熱条件、鍛圧比および再加熱条件の影響は容易に算出される。その一例を Fig. 8 に示す。これらはブルーム加熱炉の設計に応用された。

3.1.5 伸線加工性

この評価のため偏析欠陥の露呈しやすいダイレクト・パテンチングされた線材を供した。加工性は断線率のような粗い比較ではなく、終局的には、断線に関連する鋼線の靱性のばらつき、とくに下方分布によつて評価されるべきであろう。

Fig. 9 は 11.5 mm に圧延直後、沸騰水中に浸漬変態させた ED 処理線材から伸線された 4.2 mm 径鋼線の機械的性質を示す。靱性を示す絞りは高位に安定しており、伸線加工性が優れていることを示している。

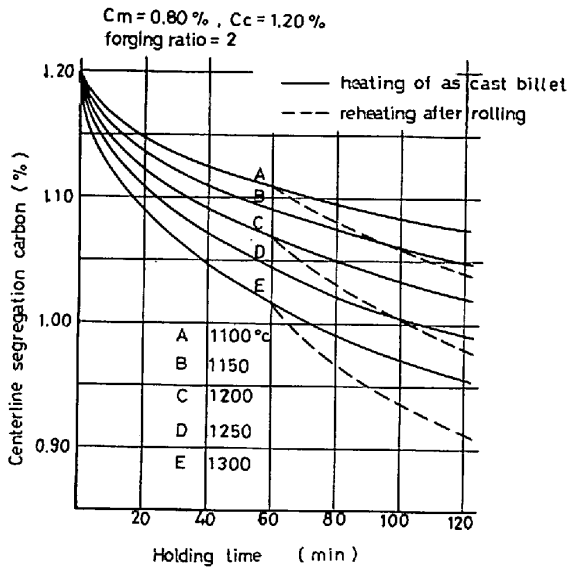


Fig. 8. Effect of heating time on C centerline segregation. —calculated curve by mathematical model—

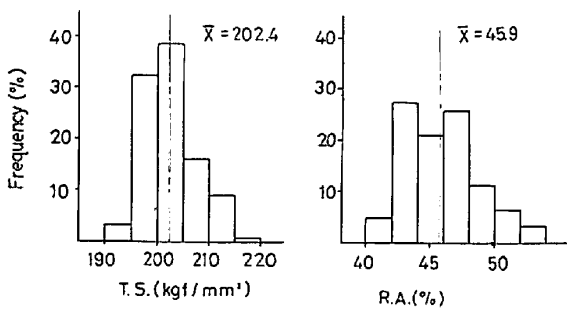


Fig. 9. Mechanical properties of 4.2 mm dia., 0.8% C steel wires drawn from 11.5 mm dia. ED rods.

3.2 非金属介在物

鋼種により非金属介在物仕様は異なる。スチール・コード用線材では介在物総量もさることながら介在物径が重視される。非金属介在物径最小化の手段として組成の熱間可塑性がある¹⁰⁾。著者らは鍛圧比の影響を明らかにするため以下の実験を行った。介在物組成を低融点シリケートとするため Mn, Si のみで脱酸した。熱間圧延の種々の断面でサンプリングし、組成を XMA で定量分析する一方、介在物寸法を測定し、変形指数 P ¹¹⁾ をもとめた。

$$P = \frac{2}{3} \cdot \frac{\ln b/a}{\ln F_0/F} \dots\dots\dots (5)$$

a, b : 介在物の短径, 長径

F_0, F : 鋼材の初期および圧延後の断面積

$P=1$ では介在物は鋼と同一変形, $P=0$ で完全非塑性となる。

Fig. 10 は変形指数におよぼす鍛圧比の影響を示す。状態図にプロットされた組成の場合, P は約 0.6 に収束

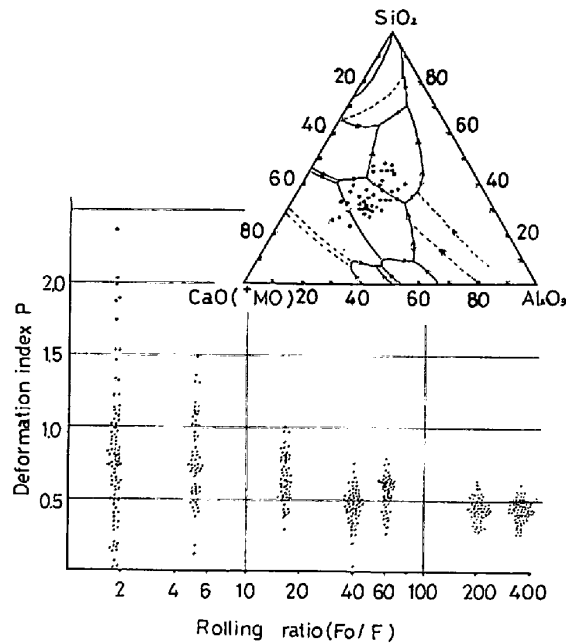


Fig. 10. Deformation of non-metallic inclusion during hot rolling and its composition.

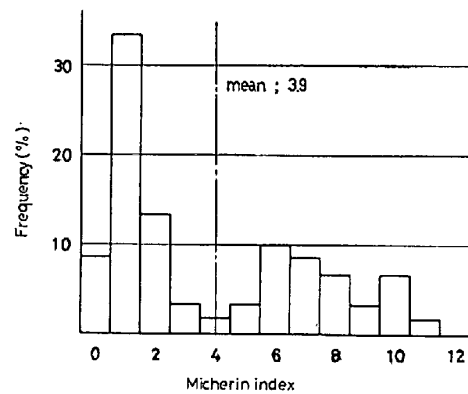


Fig. 11. Histogram of Micherin index of high carbon steel rods.

するものと考えられる。なぜなら鍛圧比が大きくなると測定技術上 b は実際より小さく測定されやすくなるからである。

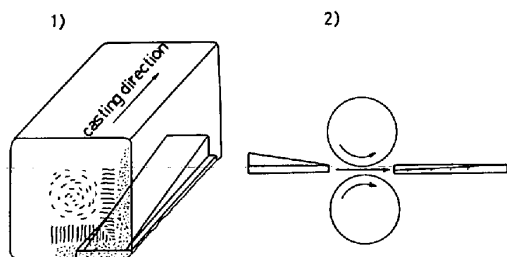
Fig. 11 はレードル精錬, 高級耐火物, パウダー・キャストなどの手段を構じて造られた線材のミシュラン評点を示す。本評点は介在物径 5~10, 10~20, 20 μ 以上にそれぞれ 1, 5, 10 を配点し, 60.5 mm² の被検面積の全介在物についての合計点として定義される。スチール・コード用として数値上は必ずしもよくないが, きわめて断線の少ない線材が得られている。

3.3 線材の表面疵

連铸片のプレイク・ダウンにあたって铸片欠陥が拡大して有害な表面疵となることがある。強制圧縮応力下での熱間加工により割れの発生, 拡大を防止する例¹²⁾ もあ

Table 2. Chemical composition of specimen (%).

	C	Si	Mn	P	S	Cu	B	No. of heat
A B-steel	0.36	0.28	0.80	0.009	0.014	0.02	0.0055	8
B SWRH42A	0.42	0.27	0.49	0.013	0.015	0.02		6
C SWRH62A	0.62	0.27	0.48	0.013	0.014	0.02		6
D SWRH72A	0.70	0.27	0.49	0.009	0.013	0.02		6
E SWRH82A	0.80	0.27	0.53	0.008	0.015	0.02		5
F SUP6	0.59	1.55	0.81	0.011	0.007	0.01		5



1) Specimen 2) Rolling of specimen

Fig. 12. Method of hot workability test by tapered specimen with fin from C.C. billet.

るが、これに先行すべき連鑄片の熱間加工性に関する研究資料はあまり見かけない。著者らは数鋼種の加工性を評価するため以下の実験を行つた。

3.3.1 熱間加工性評価方法

予備試験において、ある種の鑄片欠陥が圧延中に拡大すること、コーナー部に割れが発生しやすいこと、表皮を除去すると全く割れが生じないことを確認し、その結果連鑄片の熱間加工性とは鑄肌面およびその直下の微小欠陥が割れに拡大しない加工条件の範囲であると認識した。

Table 2 は 113 mm φ 供試ビレットの化学成分を示す。Fig. 12 は試験片とその圧延方法を示す。本試験片は多くの試行ののちに到達した適切な方法であり、ひれ付楔形と称している。その特徴は(1)割れにおよぼす圧延温度、加工度の影響が容易に得られること¹³⁾。(2)ひれ部は最も割れの発生しやすい加工方法といえる単純引張りとなること。(3)そこから単純引張りに近いダイヤ角方式孔型圧延の良否が検討できることである。

3.3.2 適正圧延条件

Fig. 13 は上記方法による連鑄片コーナー部の圧延による割れ発生におよぼす圧延温度と加工度の影響を示す。図中の境界線は各供試片の割れの発生した最小加工度のヒート間の平均値を示している。図から 900~1000 °C の範囲が最も加工性が小さいこと、ボロン鋼 A は全温度範囲で小さいこと、Si-Mn 鋼 F は低温側で加工性が小さいことなどがわかる。低温側で加工性が再び向上する事実に関してその理由はよくわからない。

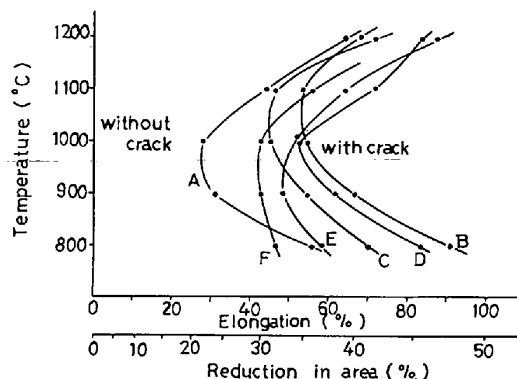


Fig. 13. Hot workability of edge of C.C. billets.

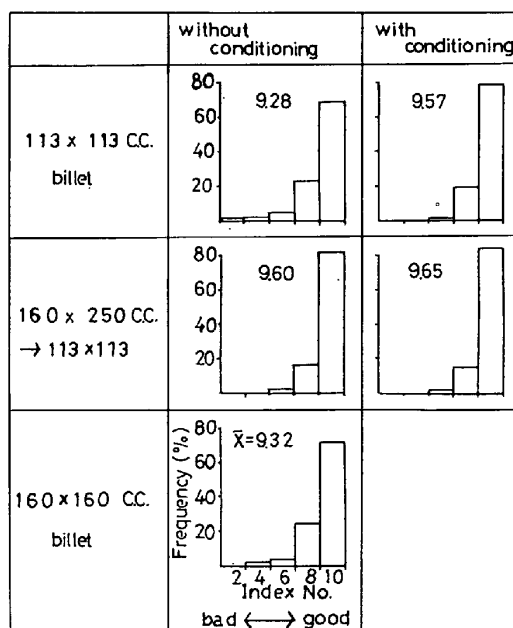


Fig. 14. Comparison of surface defect of wire rods produced by different process.

他方ひれなし試験片¹⁴⁾—フラット・ロールまたはボックス・カリパー圧延に相当すると考えられる—では割れは全く発生しなかつた。

3.3.3 ブレイク・ダウン・ミル

上記結果にもとづき、ミルは最も簡単かつ確実な二重逆転式、ボックス・カリパーを主とした適正カリパー・スケジュールを採用した。

Fig. 14 は線材表面疵に関して各種プロセスの比較を示す。図中の平均評点Xは表面疵深さに対応した配点を多数の線材試験片について加重平均したものであり、この評点からそれぞれの材料はプロセスに見合った成績となつているが、160 mmφ 無手入圧延においても、一種のブレイク・ダウン・ミルといえる4面拘束連続鍛造機の加工方式の優秀性から銹片欠陥の拡大を防止してよい成績が得られている。

4. 結 言

高品質の高炭素鋼線材を合理的コストで得る連铸設備の設計について住友電工における改造事例——小断面ブルーム C. C. —ブレイク・ダウン方式と大断面ビレット C. C. の併用——にそつて述べた。

(1) 中心偏析におよぼす铸込温度、電磁攪拌、銹片断面寸法・形状および均熱拡散などの影響を明らかにし、設計に応用した。

(2) ブレイク・ダウンにおける銹片割れを防止する目的で連铸片熱間加工性評価方法——ひれ付楔形試験片——を考案し、数鋼種の加工限界を明らかにするとともに加工方式について検討した。その結果圧延機は固定ボックス・カリバーをもつ二重逆転式とした。

(3) 新製造プロセスで得られた線材は伸線加工性、非金属介在物および表面疵などについて秀れていることが確認された。

文 献

- 1) 山田勝彦, 青木義明, 藤田照夫, 橋本義弘: 鉄と鋼, 66(1980) 11, S 736
- 2) R. ALBERNY, L. BACKER, J. P. BIRAT, P. GOSSELIN, and M. WANIN: Elect. Fur. Steel Conf. Proc. (1973), p. 237
- 3) 岩田 齊, 山田勝彦, 藤田照夫, 林 享三: 鉄と鋼, 61(1975), p. 2972
- 4) 川和高穂, 佐藤秀樹, 宮原 忍, 小谷野敬之, 根本秀太郎: 鉄と鋼, 60(1974), p. 486
- 5) 森 久, 鉄と鋼, 58(1972), p. 1511
- 6) 実用新案公報, 昭 53-5054
- 7) 佐々木徹, 峰 公雄, 藤田利夫: 鉄と鋼, 57(1971), S 122
- 8) C. WELLS, W. BATZ, and R. H. MEHL: Trans. AIME 188 (1950), p. 553
- 9) 山田勝彦, 藤田照夫, 小城邦夫: 鉄と鋼, 66(1980), S 872
- 10) 白岩俊男, 藤野允克, 松野二三郎: 住友金属, 25(1973) 3, p. 18
- 11) T. MALKWICZ and S. RUNDNIK: J. Iron Steel Inst. 201 (1963), p. 33
- 12) 公開特許公報, 昭 53-110949
- 13) 山田勝彦, 福田俊雄, 橋本義弘: 鉄と鋼, 66(1980), S 708
- 14) 速水哲博, 山口重裕, 松宮 徹, 坂口庄一: 鉄と鋼, 61(1975), S 163