

連鑄鑄片の内部割れ発生機構

山中 章裕*・岡村 一男*・金沢 敬*

Mechanism of Internal Cracking in Continuous Casting

Akihiro YAMANAKA, Kazuo OKAMURA and Takashi KANAZAWA

Synopsis : To clarify the mechanism of internal cracking in continuous casting, a series of tensile tests of cylindrical ingot with liquid core and internal cracking tests by intentional misalignment in continuous caster were carried out. By analysing the above experimental results with strain accumulation model, it was found that internal cracking occurs and grows in the range where the total amount of strain given between ZST and ZDT exceeds the critical strain. Severe longer internal cracks which often generates in continuously cast strand is estimated to be caused with the development of solidification. To prevent internal cracking, not only suppression of each incremental strain, but the determination of casting condition and roll-layout to suppress total amount of accumulated strain smaller, considering the range between ZST and ZDT is significant.

Key words : internal cracking ; continuous casting ; strain accumulation ; critical strain ; tensile strain ; zero strength temperature ; zero ductility temperature ; roll-layout.

1. 緒言

連続鑄造において、近年、鑄造速度の高速化¹⁾、軽圧下²⁾に代表される未凝固圧下等の技術開発がなされているが、これらのプロセスにおいて内部割れの発生の防止対策が重要課題となっている。

連鑄鑄片で問題となる内部割れは、およそ20mm以上の長いものが多く、この長い内部割れは、藤井ら³⁾が報告しているように、凝固シエルの進展とともに成長したと考えられる。凝固の進展とともに内部割れが成長するなら、連鑄機の長いゾーンにおいて、鑄片が各ロールから鑄造中に受けた変形による歪が内部割れに関与しているはずである。

連鑄機の応力解析結果^{4,5)}によると、従来の増分歪評価では、連鑄機で発生する歪は最大でも0.3%と推定され、既に多数報告されている内部割れ発生限界歪⁶⁻⁸⁾の値と整合性がとれないばかりか、連鑄機内の長ゾーンにわたる各ロール対による変形の結果生じる長く連なった内部割れの生成を説明できない。

一方、著者らは一軸の未凝固鑄片の引張り試験の知見から、積算歪による内部割れ発生限界の評価を既に報告⁹⁾している。

実機での内部割れ発生機構の解明と内部割れ防止の観点から、本研究を実施した。

まず、未凝固鑄片の引張り試験により種々の鋼種の内部割れ発生限界歪を求め、次に長く連なった内部割れの生成

機構について検討した。さらに連鑄機における人為的な内部割れ発生試験と積算歪による解析から、実機における長い内部割れの発生条件を明らかにした。

また、最後に、内部割れ防止のための鑄造条件の設定、連鑄機の設計について検討した。

2. 未凝固鑄片の引張り試験

2・1 方法

Fig. 1に実験装置の概略を示す。本装置の詳細は既に報告⁹⁾した通りで、中央部が未凝固の状態、鑄型底部に連結する油圧シリンダーにより軸方向に引張り変形を与える未凝固鑄片(155mm径)の一軸の引張り試験機である。鑄片表面に設定した距離約75mmの標点間の変位を光学式変位計を用いて十数 μm の精度で測定し、鑄片表面の引張り歪を求めた。75mmの標点間での軸方向、径方向の歪は均一であり、鑄片内部の各等固相率面の歪は鑄片表面の歪に等しく、鑄片表面で測定した歪を内部歪とした。また、凝固シエルの厚さ方向に $P_t - P_t 13\% \text{Rh}$ 熱電対を、その先端が表皮から1, 20, 40mmの各位置に鑄ぐるむことにより鑄片の温度を測定した。

Table 1に試験に用いた鋼種を示す。変形速度は一定で、歪速度で $1 \times 10^{-4} \sim 6 \times 10^{-3} (1/\text{s})$ の間とし、歪量を種々変更して、先ずこれらの鋼種の内部割れ発生限界歪(ϵ_c)を求めた。引張り荷重は、鑄塊の温度測定により凝固シエル厚が

平成8年5月31日受付 平成8年9月9日受理 (Received on May 31, 1996; Accepted on Sep. 9, 1996)

* 住友金属工業(株)総合技術研究所 (Corporate Research & Development Laboratories, Sumitomo Metal Industries, Ltd., 16-1 Oaza-Sunayama Hasakimachi Kashima-gun Ibaraki-ken 314-02)

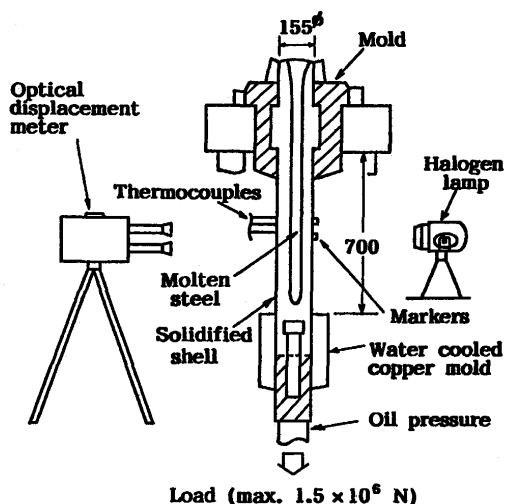


Fig. 1. Experimental apparatus.

Table 1. Kinds of steel used in experiment.

Steel	Chemical compositions(mass%)				
	C	Si	Mn	P	S
Low carbon	0.05	0.01	0.17	0.02	0.012
Middle carbon	0.15	0.28	0.6	0.02	0.005
	-0.22				-0.012
High carbon	0.45	0.33	0.87	0.018	0.015
	0.8	0.2	0.5	0.005	0.008

約20mm~55mmの間で与えた。この間の凝固組織はどの鋼種も柱状晶である。

既に報告⁹⁾しているように、内部割れ発生に有効な歪は鑄片内の各点が抗張力出現温度(以下、ZSTと称する)~延性出現温度(以下、ZDTと称する)である間に与えられた歪(ϵ_e)であり、すべての歪をこの ϵ_e に換算することによって歪量の評価を行った。鑄片内の変形中の温度データから、鑄片の各点が、この間にある時間を求め、鑄片表面の測定により求めた歪速度を乗じることで与えた歪を ϵ_e に換算した。

内部割れの判定は、標点間の鑄塊について、中心軸を含む縦断面のサルファプリントに基づいて行った。

さらに、主として40kg級鋼に対して内部割れの長さを調査して、内部割れと凝固シェルの進展の関係を検討した。

2・2 結果と検討

Fig. 2に、各鋼種の内部割れ発生限界歪の調査結果を[C]量と[Mn]/[S]の関係として示す。[C]量の増加、[Mn]/[S]の低下にとともに、内部割れ発生限界歪は小さくなり割れ感受性が高くなる。[C]量の最も高い鋼種で ϵ_c は0.7%となった。

Fig. 3に40kg級鋼と低炭素鋼(0.05%C)の内部割れ発生

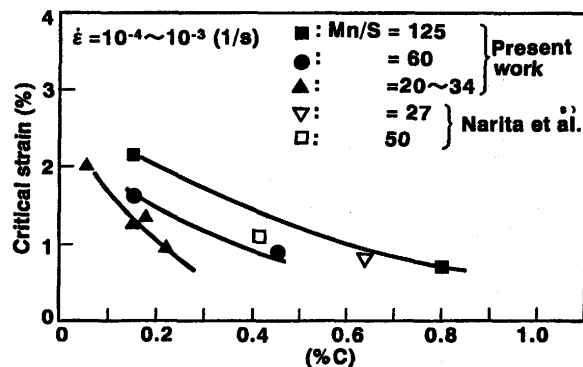


Fig. 2. Critical strain for internal cracking.

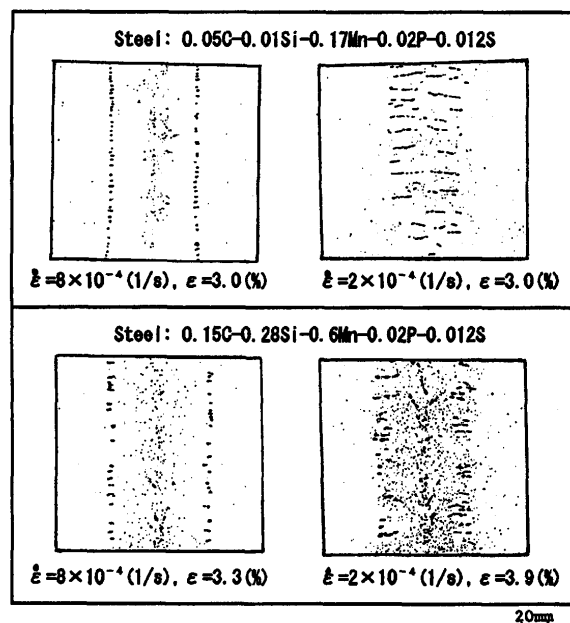


Fig. 3. Internal cracks by sulfur print of longitudinal cross section of ingot.

状況を示す。両鋼種とも、歪量は、ほぼ同じで、Fig. 2のそれぞれの限界歪値を越えるもので、歪速度のみ大幅に変更した結果を示した。歪量がほぼ同じであるにもかかわらず、内部割れの長さに大きな差が生じており、この差は歪速度の違いによるものであることは明らかである。すなわち、長い時間をかけて鑄片に変形を与えた場合、変形中も凝固シェルが成長し、その凝固シェルの増大とともに内部割れも成長したと考えられる。これを確認するために、Fig. 4に40kg級鋼に、その限界歪値(1.6%)を越える歪を、歪速度を種々変更して与え内部割れを発生させ、その長さの変化を調べた結果を示す。図の横軸は、歪が限界歪値に達してからさらに変形を与えた時間、すなわち内部割れが凝固シェルに一旦発生した後、さらに歪を与えた時間を示す。また図中の波線は、限界歪に達した時点からの凝固シェル(固相率0.8の面)の増分値を示す。凝固シェルの増分値は、溶質の再分配を考慮した凝固解析¹⁰⁾から求めた。内部割れの鑄片

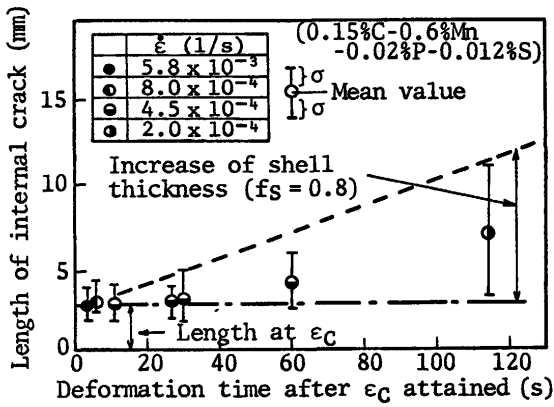


Fig. 4. Increase of internal crack length with solidification.

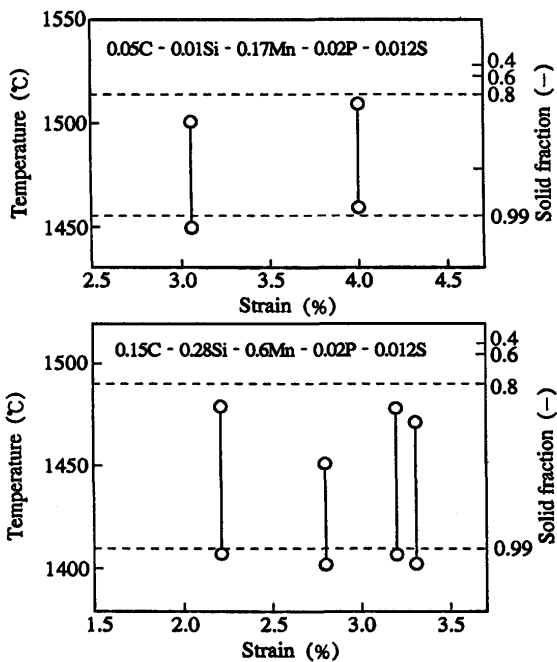


Fig. 5. Range of internal crack formation.

変形に要した時間との関係は、凝固シェル増分の増分と時間の関係にはほぼ等しいと言える。以上より、内部割れは、限界歪を越えてさらに歪を与え続けると凝固の進展とともに成長すると考えられる。

次にFig. 5に、歪速度が十分速く、凝固の進展がほとんど無い条件で内部割れを発生させた場合の、内部割れが存在した温度範囲と固相率範囲の関係を代表的な3鋼種を比較して示す。固相率分布は、先と同様、溶質の再分配を考慮した凝固解析¹⁰⁾から求めた。鋼種の違いによって、内部割れの発生する温度範囲は異なるが固相率の範囲は同じで、ほぼ0.8から0.99の間で発生すると言える。小林の解析結果¹¹⁾によれば、ZSTとZDTは、溶質の再分配を考慮した凝固解析から求まる固相率、0.8と0.99にそれぞれ相当することが判っている。また申ら¹²⁾も熔融再凝固の引張り試験から求め

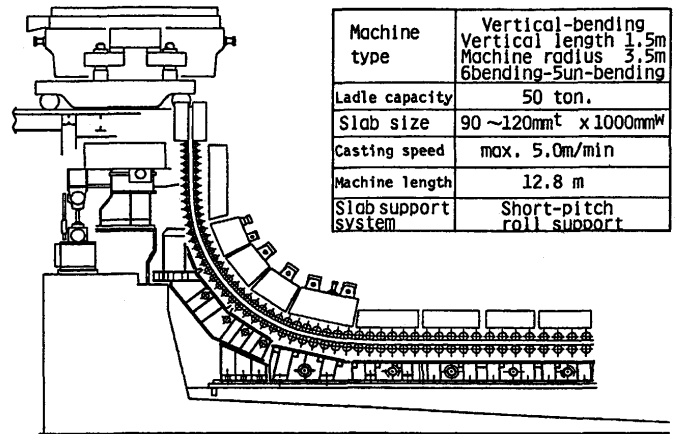


Fig. 6. Schematic diagram of experimental continuous caster.

たZSTとZDTはそれぞれ、固相率0.7と0.99に相当することを報告している。以上より、内部割れは鋼種に依らず、ほぼZST~ZDTの間で発生すると結論できる。

なお、本実験では径方向の歪分布は一樣であるため、ZST~ZDTの間の歪分布も一樣であり、この間は同時に限界歪に達し、内部割れが発生したものと考えられる。一方、連铸铸片においては、凝固シェル厚方向に歪分布が生じ、ZST~ZDTの間で歪の最大値となる部分が限界歪に達し割れが生じ、その後、ZST~ZDTの間に伝播拡大して、その部分に濃化溶鋼の吸引が生じると推定できる。

3. 連铸機における内部割れ発生試験

3.1 ミスアライメント設定試験

ここでは、実際の連铸機を用いて内部割れの再現試験を実施した。先ず、Fig. 6に示した50ton規模の試験連铸機において、溶鋼メニスカスより約7.2mと7.9mの支持ロールに2mmの押し込み型のミスアライメントを設定し内部割れの発生試験を行った。

120mm厚の铸片を铸造速度2m/minで铸造した。用いた鋼種は、0.11%C鋼で内部割れが発生しやすくなるように[S]の濃度を0.015%と高くした。

Fig. 2より、この鋼種に対する内部割れ発生限界歪は、ほぼ1.6%と考えられる。

さらに内部割れの発生位置の検証を確実にを行うことを目的として、[C]量、0.05%Cの低炭素鋼の铸造において铸造速度を大きくとって铸片の完全凝固位置がロールサポートの無い機長を越えた部分にくるように铸造し、铸片を機外でバルジングさせた。このバルジング変形により、凝固の進展をほとんどで無視できる時間で10%を超えるような大きな歪を凝固シェルに与えることが可能となり、割れの感受性の低い低炭素鋼においても、凝固シェルの成長の無い状態で内部割れを生成させることができる。

次に、凝固シェル成長をとめないながら鋳片に歪が与えられる状態を再現することを目的として、厚肉の連鋳機である鹿島製鉄所のNo. 3連鋳機において試験を行った。鋳片厚は270mmであり、固液の幅は薄スラブ鋳片に較べ広くなるため、長時間の鋳片変形条件の設定が比較的容易である。鋳造鋼種は試験連鋳機で用いたものと大差なく、内部割れ発生が容易になるよう、また試験連鋳機の結果と比較する意味で、限界歪が同一の、ほぼ1.6%となるように調整した。本試験では、溶鋼メナスカスより15mから32mの各サポートロールに平均0.2mmの押し込み型ミスアライメント、約25mと30mの位置のセグメントの継ぎ目部にそれぞれ0.8mmの、同じ押し込み型の段差を設けた。これにより鋳片に長時間にわたる各ロールからの変形を付与することが可能である。

いずれの試験でも内部割れをサルファプリントとデンドライト組織より確認し凝固シェル内の発生位置と長さを調査した。

3.2 積算歪による評価

凝固シェルの積算歪⁹⁾による内部割れ発生の評価を行った。Fig. 7に積算歪の計算方法¹³⁾を示す。溶質の再分配を考慮した凝固解析¹⁰⁾からZST, ZDTに相当する固相率0.8と0.99の凝固シェルプロフィールをそれぞれ求め、任意の凝固シェル位置が0.8と0.99の範囲で変形を受けるロール群、n-k~nを確定する。次にそれぞれのロールから受ける歪を個々に算出し、n-kからnまでの各ロールによる歪の総和を積算歪として求める。各ロールによる歪は、バルジ歪(ϵ_b)、ミスアライメント歪(ϵ_m)、曲げ歪(ϵ_B)、曲げ矯正歪(ϵ_U)、鋳造中のロール曲がりによる鋳片押し込み変形に起因する歪(ϵ_s)をそれぞれ考慮し、ロール以外の要因による熱歪(ϵ_t)も計算した。鋳造中のロール曲がりは、押し込み量で0.2~0.3mmの値をロール変位測定に基づき設定した。個々の歪の計算方法の詳細は、既報¹³⁾に基づいた。また、変形解析の機械的物性は、相澤ら¹⁴⁾の推奨値を使用した。

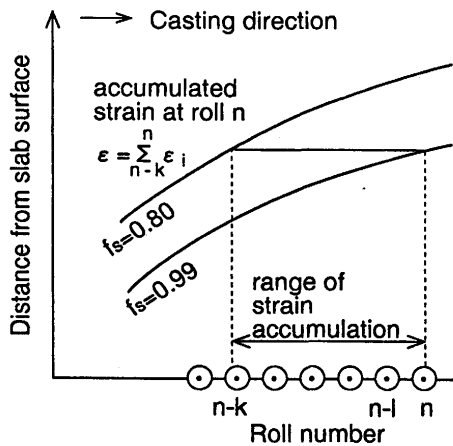


Fig. 7. Schematic of range of strain accumulation.

3.3 結果と検討

Fig. 8に、試験連鋳機において、2本のサポートロールにミスアライメントを設定して鋳造を実施した場合の凝固プロフィールと内部割れの関係、及び積算歪の計算結果を示す。Fig. 8において、縦軸に積算歪をとり、それぞれの歪の寄与分がわかるよう図中に明示した。またFig. 9に、試験連鋳機において、機外での大変形バルジングの試験を実施した時の低炭素鋼の凝固プロフィールと内部割れの関係を示す。

ミスアライメント試験による内部割れの長さは10数mmである。ミスアライメント設定区間におけるバルジング歪と

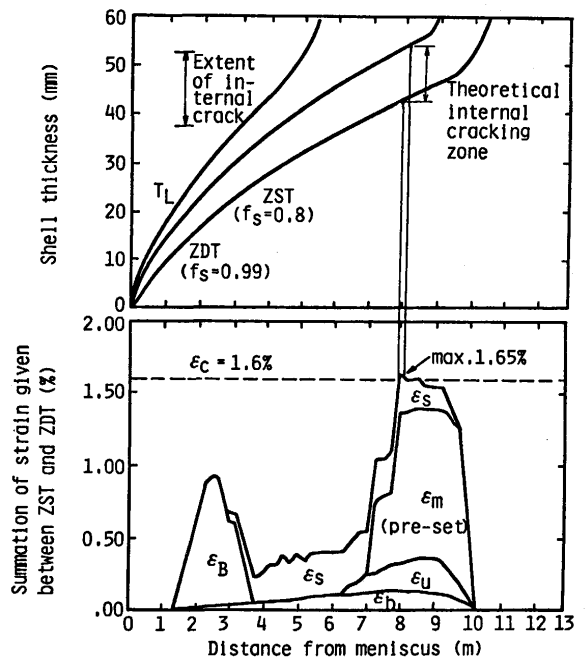


Fig. 8. Relationship between internal strain and internal crack in continuously cast slab by experimental CCM. (slab thickness: 120mm, Vc=2m/min)

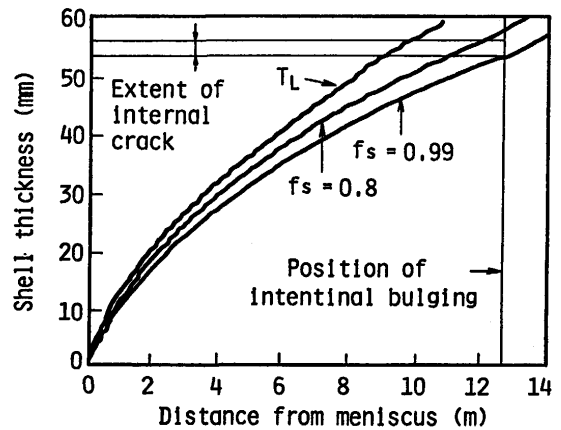


Fig. 9. Internal cracking by intentional bulging in experimental CCM.

矯正歪も加味した総積算歪は内部割れ限界歪をわずかに越える程度であり、内部割れの発生位置とほぼ合致している。また内部割れの長さも、総積算歪が限界歪を越えた地点での固相率0.8と0.99の凝固シェル厚の差にほぼ等しい。またバルジング変形による内部割れ発生位置もバルジング地点と合致している。この時の内部割れの長さは、3mm程度と比較的短い。固相率0.8と0.99の凝固シェル厚の差にほぼ等しい。ミスアライメント試験と大変形バルジング試験で内部割れの長さに差があるのは、鋼種の違いによるものである。すなわち、0.11%C鋼の方が、0.05%C鋼に比べ、固相率0.8と0.99の凝固シェル厚の差が大きいため、内部割れが長くなったと言える。

大変形バルジングにおける歪量は特に計算で求めなかったが、ミスアライメント試験の場合に比べ相当大きいと考えられるが、凝固の進展をとまなわない場合は、歪量に関わらず、固相率0.8から0.99の間、すなわちZSTからZDTの間で内部割れが生じており、内部割れ発生領域に関する未凝固铸片の引張り試験の結果が検証された。

次にFig.10に鹿島製鉄所No.3連铸機において長ゾーンのミスアライメント区間を設定した試験時の凝固プロフィールと内部割れの関係、及び積算歪の計算結果を示す。総積算歪は溶鋼メナスから約19m~32mの間で限界歪をほぼ継続して越えており、この間の凝固シェルの進展にとまな内部割れも、約38mmの長さまで成長しており、かつ凝固シェル内の内部割れ存在範囲は積算歪が限界歪を越えている範囲と対応する。

以上より、連铸铸片が凝固の進展とともに各ロール対よ

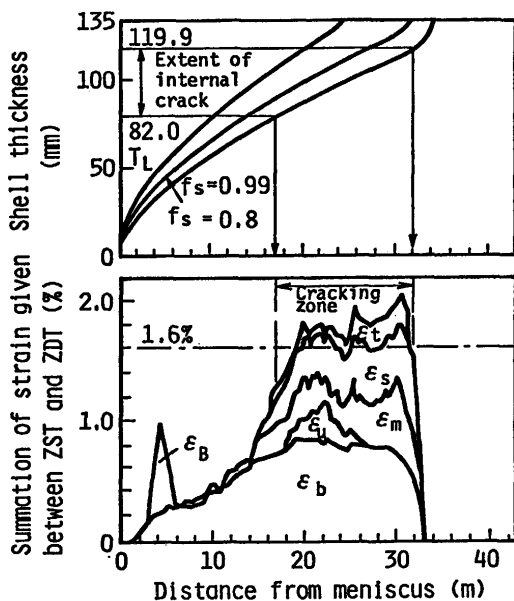


Fig. 10. Relationship between internal strain and internal crack in continuously cast slab by No.3 CCM in Kashima steel work. (slab thickness: 270mm, $V_c=1.6\text{m/min}$)

り変形を受けた場合、ZSTからZDTの間の総積算歪が限界歪を越え続ける範囲において、凝固とともに成長するものと結論できる。従って、実際の連続铸造で問題となる長い内部割れは、単なる歪の大きさを反映しているものではなく、凝固とともに変形を与えた場合に、積算歪の観点で、内部割れ限界歪を越え続ける歪の要因を考えるべきであることを示唆するものである。また逆に、大変形バルジングのように一度に限界歪を越えるような大きな歪を与えた場合は、歪は大きくても長い内部割れが発生する可能性は無いと言える。

4. 内部割れ防止法の検討

連铸铸片において、内部割れを防止するためには総積算歪を内部割れ発生限界歪以下に制御することが必要である。総積算歪は、各ロールによって発生する個々の歪そのものを小さくする以外に、積算範囲すなわちZSTとZDTの間の脆化域の铸造方向の距離を小さくすることにより低減できる。脆化域の距離は、一般的には、铸造速度の低下、二次冷却の強化、C、P、S等の不純物元素の低減、铸片厚みを小さくすること等により、小さくすることができる。また、鹿島製鉄所のNo.3連铸機に関するFig.10の結果は、ミスアライメントを設定することにより、最終的に総積算歪が限界歪を越えることにより内部割れの発生に至ったが、総積算歪の内、バルジング歪(ϵ_b)の占める割合が高く、その影響は見逃せない。バルジング歪のように互いに隣接する個々のロールから歪を受ける場合は積算歪が大きくなりやすく

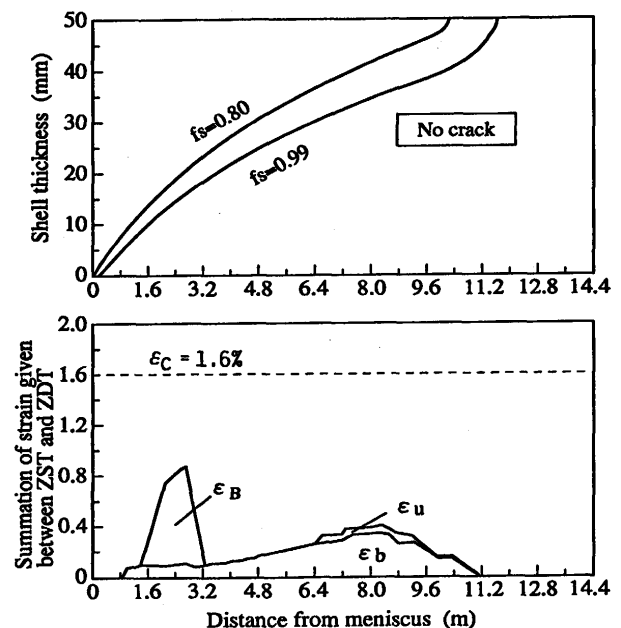


Fig. 11. Distribution of strain and shell thickness in continuously cast slab by experimental CCM. (slab thickness: 100mm, $V_c=3.4\text{m/min}$)

マシンの設計においては特別の注意を払う必要がある。

次に、内部割れ発生防止のマシン設計の事例として、薄スラブ鑄片の高速鑄造結果について示す。

Fig. 6 に示した試験連鑄機において、高速鑄造試験を実施した。高速鑄造時の、脆化域の距離の増大によるバルジング積算歪の増大が懸念されたので小径ロールの極小ロールピッチのロールレイアウトを採用した。鑄片厚みは0.05% C鋼で90mm, 0.11% C鋼で100mmで、そのほぼ機長限界となる速度で、それぞれ、5 m/min, 3.4m/minの鑄造を実施し、いずれも内部割れの発生を完全に防止できた。

Fig.11に内部割れ防止の観点で、より厳しい条件である0.11% C鋼を3.4m/minの速度で鑄造した場合の凝固プロフィールと積算歪の計算結果を示す。

脆化域の距離(固相率0.8と0.99の間の距離)は、3.4m/minの高速鑄造にも関わらず、Fig.10の結果に較べ、極めて小さくなっている。この差は、270mmと100mmの鑄片厚の差に起因するものである。このように積算領域が小さくなったことと、極小ロールピッチによる個々のバルジング歪を低減したことにより、バルジング積算歪は極めて小さく抑制でき、総積算歪を、内部割れ発生限界歪以下とすることができた。

5. 結論

連鑄鑄片の内部割れ発生条件を明らかにすることを目的として、未凝固鑄塊の一軸の引張り試験と連鑄機におけるミスライメント設定試験、および積算歪による解析を実施した。その結果、以下の結論を得た。

(1)内部割れの発生範囲は鋼種に依らず固液共存相内のZST~ZDTの間であり、凝固の進行にともなってこの間で受けた総積算歪が内部割れ発生限界歪を越え続けることにより、内部割れは成長する。また、凝固シエルの進展がほとんど無い条件で、大きな歪を与えても、内部割れは短く、

内部割れの長さは変形の大きさを単に示すものではない。

(2)連鑄鑄片で問題となる長い内部割れは、鑄造中に各ロールから長時間にわたる変形を受けた結果であり、その積算歪の解析から内部割れ発生限界歪、発生域と内部割れ長さの関係を良く説明できる。

(3)内部割れを防止するためには、個々の歪を小さくするのみならず、歪積算範囲を小さくすることと、歪積算範囲を考慮した総積算歪を低減できる鑄造条件、ロールレイアウト設計の選定が重要である。

本研究を行うにあたり、有益なご助言を頂きました住友金属工業(株)総合技術研究所 中島敬治博士、および河嶋寿一博士(現、龍谷大学工学部)に厚く御礼申し上げます。

文 献

- 1) 中井 健, 金沢 敬, 中島敬治, 山田恒夫, 丸川雄浄, 吉田克磨, 田中哲三, 井上雄次: 材料とプロセス, 4 (1991), 1283.
- 2) 例えば, 小林H登志, 栗山伸二, 政岡俊雄, 鈴木幹夫, 宮原 忍: 材料とプロセス, 2 (1989), 1158.
- 3) 藤井博務, 大橋徹朗: 連続鑄造における力学的挙動, 鉄鋼基礎共同研究会連続鑄造における力学的挙動部会編, (1985), 221.
- 4) 大西邦彦, 長井邦雄, 橋本俊栄: 鉄と鋼, 72 (1986), 2225.
- 5) K.Okamura and H.Kawashima: ISIJ International, 29 (1989), 666.
- 6) 杉谷泰夫, 中村正宣, 河嶋寿一, 金沢 敬, 友野 宏, 橋尾守規: 鉄と鋼, 68 (1982), A149.
- 7) T.Matsumiya, M.Ito, H.Kajioka, S.Yamaguchi and Y.Nakamura: Trans.ISIJ, 26 (1986), 540.
- 8) 成田貴一, 野崎輝彦, 森 隆資, 宮崎 純: 鉄と鋼, 66 (1980), S806.
- 9) A.Yamanaka, K.Nakajima, K.Yasumoto, H.Kawashima and K.Nakai: La Revue de Metallurgie-CIT, 89 (1992), 627.
- 10) S.Kobayashi: Trans. Iron Steel Inst. Jpn., 28 (1988), 535.
- 11) 小林純夫: 鉄と鋼, 73 (1987), S896.
- 12) 申 健, 梶谷敏之, 鈴木俊夫, 梅田高照: 鉄と鋼, 78 (1992), 587.
- 13) K.Okamura and H.kawashima: Proc. International Conference on Computer-assisted Materials Design and Process Simulation, Tokyo, ISIJ, (1993).
- 14) 相澤龍彦, 矢川元基, 大中逸雄: 連続鑄造における力学的挙動, 鉄鋼基礎共同研究会連続鑄造における力学的挙動部会編, (1985), 134.