

また、本発表の分析に供した試料は急冷試料を用いており炭素の分析で 95% の精度であった。操業速度の早いときとおそいときは同じ Si 含有量でも、平衡分配比  $L_0$  は異なっているのだからこれによつて Si の管理に結びつけられないし、また高炉内の状態は必ずしも各所が同一であるとは言えないので熱力学的取扱いには合意を要するところであるという意見も出た。炉況指数として酸素ポテンシャルの比を取つたならより直接的な指数となるであろうし炉況指数として  $R_{Mn}$  と  $R_S$  とを比べると必ずしも同じ関係を示さず、何れの値を取つたらよいかというような意見もあつた。

討 4 高炉内における装入物の挙動と反応について日本鋼管技研・福島が発表した。高炉内装入物分布特に溶解帯の状態とガス流れとの関連に注目して、炉の下部におけるガス化物質の挙動を論じている。コークス中のアルカリの蒸発・凝縮の実験により蒸発速度はコークス粒径が小さい程、アルカリ濃度が高い程大きく、1%を超えるとアルカリ濃度が蒸発速度に依存しなくなる。レースウェイ上部の溶融帯の上では外周部より中心部がアルカリ蒸気の上昇が速かであり、この結果より解体実高炉のアルカリ濃度分布を検討すると中心部では上昇ガスとともにかなりアルカリ蒸気が出ていると考えられる。また Si の挙動についても  $SiO$  に注目して高温におけるコークス灰分中の  $SiO_2$  の還元量を知り、それより  $SiO$  の生成量、温度・加熱時間・CO 分圧との関係を示し、その結果から高炉下部における Si と  $SiO$  ガスの分布が同じ傾向を示すことを述べている。しかし、さらに理解を深めるためには溶銑がコークス層中を降下する速度帯留現象についての研究結果と解体高炉の溶銑粒の履歴との間の知見を明らかにする必要があると述べた。

討論終了の時間が近づき本発表に充分討論する時間的余裕が持たなかつたので、質問事項についてやや詳述する。レースウェイ上部の材料の流れ込み角度が自由表面安息角に近いと述べているが、その定量的評価が必要であろうという質問があつた。その他はアルカリ分布と Si の還元に集約されていた。アルカリ分布について、高炉内のアルカリの蒸気は  $K_2O$  の形か、単体の K で存在するのに対して、著者は  $KCl$  などの形であろうと述べた。また試験高炉では  $1100\sim 1300^\circ C$  でアルカリが最も高いが、実験結果と矛盾するように思えるが、実験で何か見落した要因がないのか、蒸発するのはコークス中の灰分中のアルカリのみを考えているが、スラグ中のものも考慮しないのか、中心ガス流によりアルカリ蒸気の運搬が実高炉でも相当あると思うか、0.3~1.0%アルカリの存在は凝縮による増加を起す範囲とも考えられるかどうかというような質問が出された。 $SiO_2$  の還元について、実炉では羽口面で灰分の  $SiO_2$  が 100%  $SiO$  として蒸発したと考えてよいか、高炉が大型化する程銑鉄中の Si は低下して来る傾向があるが、化学反応上にそれに寄与する要因となるものがあるか、また  $SiO_2$  の Si への還元と、 $SiO$  を介しての Si の還元について、それぞれに反応熱を考慮すると炉内の熱的条件が異なるがその点についてどう考えるかというような質問があつた。なお新日鉄生産研西田は従来解体された高炉の Si の挙動として炉腹から朝顔にかけて Si の急激な増加と羽口面での低下について示した。そして製鋼用銑・スラグとコ

ークスとを 0.5, 2, 4 時間加熱して、スラグ・メタル反応、ガスメタル反応により溶銑中の Si の増加が相当量であることを実験で知つた。また羽口面の Si の低下はスラグ中の  $FeO$ ,  $MnO$  による酸化と考えたが、朝顔部スラグ中のそれらの含有量からこれを説明することが出来ない。これらの事実から、高炉の冷却中に赤熱コークス上での反応により Si の増加が起つていたため、炉腹・朝顔では操業時より高い値を示したものである。また中心部と周辺部での Si が異なるのはそれぞれの温度および通過ガス量が異なるためということを実験により示した。かくして、解体高炉のデータを直ちに稼動中の高炉内の組成と考えることは誤解を招きやすいので注意を要するという重要な提言を述べた。

近年高炉炉内の溶着層、溶融帯の様子が理解され、解体高炉の調査から得られた結果は物理的挙動、化学的反応の研究によつて解釈され、さらに操業時の過程に結びつけて行くためには、多くの討論を重ねて行くことが有意義であると、参加者は感ぜられたことと思います。しかし、4つの講演に対し多くの質問が提出され、時間的制約のため充分の討議をつくすことがことは残念でした。講演数と質問数の最適な状態が得られず、司会として充分な配慮が必要であるといつもながら痛感します。講演者・討論者の御協力により有意義に終つたことを深謝します。

## II. 連鑄々片の内部割れの発生とその防止法

金属材料技術研究所

工博 郡 司 好 喜

新日本製鉄(株)広畑製鉄所

大 橋 徹 郎

わが国の連続鑄造鋼の生産量は全粗鋼の約 1/3 にも達し、その操業技術は着実に進歩している。鑄片の内外に発生する多くの欠陥も、その生成機構の解明と防止対策の進歩によつて大幅に減少しつつある。しかし連続鑄造法はいまだ発展途上にある技術であり、その完成には克服しなければならないいくつかの問題を抱えていることも事実である。たとえば鋼の熱伝導度が小さいことが原因となつてその生産性は小さく、酸素転炉の生産性に到達するまでには解決すべき 2, 3 の大きな問題が依然として残っている。

この討論会には生産性向上のための高速連鑄を実現するにあつてもつとも大きい障害と考えられる“内部割れ”を取上げました。内部割れの発生機構を理解するには、基礎的には鋼の高温強度、鑄片内の諸応力の解析が必要であり、さらに連鑄機の形式、操業条件など広範囲な検討が必要とされています。

この討論会においては、下記の 3 編の研究結果が報告され、それらを中心にきわめて活発な質疑応答が行われました。

討 5 「連鑄々片の応力と内部割れ」日立製作所、日立研究所：○児玉英世、新山英輔、堀口 穰、日立工場：木村智明

討 6 「SUS 430 連鑄々片の内部割れに関する研究」

日新製鋼, 周南: 丸橋茂昭, ○長谷川守弘

討 7 「内部割れにおよぼす 2 次冷却とロールピッチの影響」新日鉄・名古屋: 井上俊朗, 小舞忠信, 森紘一, 加藤 郁, ○秋田靖博

上記の論文の詳細については, 「鉄と鋼」Vol. 62, 10号を参照して下さい. なお次の 4 件の招待講演も行われ討論の進展の大きな助けとなりました.

討 5-1. 「凝固シェル割れのモデル化と実験」横浜国立大学: 沖 進

討 5-2. 「ウォーキングバー方式連鑄機の鑄片内に発生する熱応力」神戸製鋼所: ○森 隆資, 綾田研三, 宮崎 純, 藤巻正憲

討 7-1. 「連鑄々片の内部割れにおよぼす 2, 3 の要因について」住友金属工業: ○丸川雄浄, 川崎守夫

討 7-2. 「ストップテストによる内部割れの増大について」川崎製鉄: ○野崎 努, 伊丹俊夫, 橋 林三, 児玉正範, 上田徹雄

討 5 に関する児玉氏の報告はブルームを対象としたものであり, まず前段において, 凝固しつつある小鋼塊にポンチ押し込みを行って強制的に内部割れを発生させ, 割れが発生するときの限界歪みを求め, 後段においては, 実機における鑄片の応力因子としてスプレー条件で決まる熱応力に着目し, これを平面歪問題として有限要素法により計算したものである. その結果, 2 次冷却帯を通過した直後の鑄片表面の復熱により鑄片内側に引張り応力の発生すること, さらに凝固完了直後の急激な温降下によっても中心部に引張り応力の発生することを指摘した.

森氏は同じような計算手法を用いウォーキングバー方式で鑄造した鑄片内に発生する熱応力を計算し, 表面を強制冷却した場合急激な復熱の不利なことを示した. 伊藤氏(新日鉄・室蘭)は, 児玉氏らと同一条件のブルームについて行った実機での凝固テストの結果を報告し, 熱応力によつて発生したと考えられる half way crack を紹介するとともに, これが凝固組織によつても影響されることを示唆した. さらに木下氏(川鉄・技研)は, 熱応力計算に用いられた鋼の高温物性の妥当性に触れ, 内部割れ発生時の限界歪と歪速度の関連性を整理すべきであると指摘した. 討論の中で指摘されたいくつかの問題点はいずれも重要なものであり, 内部割れの機構を根本的に解明するため今後詳細な研究が期待される分野であろう.

討 6 に関しての長谷川氏の報告は SUS 430 のスラブを対象としたもので, 数多くの実操業データを中心に内部割れ発生機構ならびにその対策を検討したものである. とくに 2 次冷却後の復熱帯が内部割れの発生源であることを実験的に確認し, その原因としてまずバルジングをとり上げ鑄片内の溶質分布と溶鋼流動から裏付けるとともに, 熱応力計算も行いこの両者が内部割れの発生原因になり得ることを指摘したが, 両者のいずれが主因になっているかを現段階で結論づけることは不可能であるとした. こうした考察から 2 次冷却帯を長くし, 鑄片の凝固が完了するまで復熱が生じない対策をとつた結果内部割れの少ない鑄片を高速鑄造できることを操業例によつて示した.

これに対して, 小沢氏(大同, 渋川)は SUS 430 ビレットの操業例を主体に 2 次冷却後の復熱の影響を紹介するとともに, 電磁攪拌と復熱現象の関係について興味ある事実を報告した.

討 7 に関する秋田氏の報告は普通鋼スラブに関するもので, 内部割れの分布を詳細に検討することにより, その主原因はロール間バルジングであると結論づけた. その対策としてロールピッチの縮小および 2 次冷却帯の延長が実施され, ロール間バルジングを抑制することにより内部割れ分布の改善されることが豊富な操業例によつてあきらかにされた.

丸川氏はスラブ連鑄の操業データにもとずき, ロール間バルジングと矯正点において内部割れが発生するが, 組成および組織, 歪および歪速度が内部割れ発生的主要原因であることを指摘した. その対策として, 比水量増加によるバルジングの縮小および未凝固矯正の減少の有効なことが操業例によつて示された. 野崎氏は連鑄スラグの内部割れをストップテストによつて調査するとき起る基本的な現象とその試験結果にもとづいた内部割れ発生機構についての見解をあきらかにした. 森氏はスラブにおいても熱応力の重要なことを示唆し, さらに石黒氏(鋼管・福山)は円弧型連鑄機における矯正応力の問題を指摘して非常に活発な議論が行われた.

また沖教授(横浜国立大)は凝固時の固-液界面の割れ形成現象に関し独特な見解を発表された. それによると, 割れは凝固時にデンドライトが成長する時の樹間液体の濡れ現象と void の成長との関連によつて決まるものであり, 凝固殻が引張り応力を受けた時の変形帯に液体が流入して液膜を形成するが, 粘性抵抗による液体内の圧力低下が鋼の表面張力を超えると空孔すなわち割れが発生すると結論づけられる. この新しいモデルは内部割れ機構をさらに詳細に検討していく上できわめて重要なヒントを与えるものとして注目すべきだろう.

最後に総合討論を行い, 今後鑄片の内部割れを研究するために注目すべき問題点を整理した.

内部割れは鑄造時の凝固殻に何らかの応力が加わり, それが鋼の耐力を超えた時に発生する現象であるが, 考えられる応力の主なものはバルジング応力, 熱応力および矯正応力があげられる. 小断面鑄片では熱応力が主体であり, 大断面鑄片ではバルジングの寄与の大きいことはほぼ推定されたが, その定量的な位置づけや矯正応力の評価は今後の問題と言え. さらに鋼の耐力については沖教授の指摘された現象をもふまえ, 限界歪, 歪速度等を中心に凝固点附近の高温物性の解明に真剣に取り組む必要の大きいことを痛感せしめた.

内部割れの減少対策についても示唆に富む提案がなされ, ロールアライメント, スプレーパターンおよび凝固組織等の寄与があきらかにされたが, これらについても今後はより定量的な解析が望まれるとともに, その他の有効な対策たとえば compression casting や電磁攪拌などの特殊な技術の適用が示唆された.

この討論会では連鑄々片の内質に関する問題が取上げられたが, 鑄片の品質に直接に関連した問題としてではなく連続鑄造を製鋼技術の主力とするために解決すべき一つの問題点として取上げられたものである. 日本が世界一の連続鑄造化率を誇つていると言つても 30% に達

したに過ぎず、生産性の向上とか鋼種から見た普遍化など今後克服すべき問題は過去に克服した諸問題に比して優るとも劣らない困難さを含んでいるように見える。そうした観点から、設備や実操業を直接に改善して行く方法だけではなく、実操業に現れる諸問題を抽出しこれを基礎的な視野の中で検討した上で設備や実操業にフィードバックする態度が必要であり、そのことが問題の早期解決につながる近道になるのではないかと思います。

### III. 鋼の疲労き裂の発生と伝播特性

金属材料技術研究所 工博

座長 荒木 透

本討論会は鋼材が繰返し応力-ひずみを受けたときの疲れ損傷によりき裂を発生しそのき裂が成長伝播する現象について、とくに冶金的要因との関連を追求する観点から討論することを主眼にして行なわれた。

討13「鋼の疲労損傷におよぼす微視組織因子の影響」は疲労き裂発生前の鋼疲労試片の内質変化、疲れ損傷の進行の問題を扱った研究で、東大工堀部氏により発表された。炭素鋼 (0.13~0.4%)、Nb 処理鋼、Fe-Ni-(Cu) 合金等を用いて、結晶粒径、析出物、(セメントイト、 $\epsilon$ -Cu 粒子等) の存在形態と安定度などの強化機構と関係ある組織因子および試験温度因子が疲れき裂発生に至るまでの微視的損傷程度に及ぼす影響を調べた研究で、この間の巨視的塑性ひずみ振幅の変化 (軟化/硬化) の観測結果とともに、表面疲労による初期の損傷特性は静的強度試験結果やそれに基づいた微視組織の強化機構とは異なるものがある点を明らかにしている。

討論として、新日鉄石黒氏、東工大小林氏よりそれぞれ電顕透過観察試片の採取位置ならびに試験機の条件などについての質問回答があつた後、疲労損傷が試片のどの場所でどう起つているかという点についての意見が求められた。これに対して、この場合の損傷は試片表面のストライエーション、スリップバンド等に見られるマクロ的な繰返しひずみ変形の局部集中現象から生じつつあるものと、全般的に生起する母質 (マトリクス) 組織のミクロ的变化、主として透過電顕組織で観察されミクロ硬度によつて測定し得る変化、に大別して考察し、それぞれの影響のもとにマクロ的塑性ひずみの挙動が観察され、き裂の発生へとつながると考える旨の見解が講演者より述べられた。

討14「5.5%Ni-C-Mo-V 鋼の組織と疲れ性質」は、き裂発生後  $150\mu\text{m}$  に達するまでの初期き裂の疲労伝播挙動および定荷重疲れ破壊強さに対する表記鋼の調質組織、オーステナイト粒度などの冶金要因の影響を追求した研究であり、金材技研、角田氏より発表された。片切欠付板試片による  $R=-1$  の繰返し荷重試験により得られた結果として、1) 焼入れ焼もどしあるいは類似熱処理の場合疲れ強さは組織因子に支配され、主として初期き裂 ( $150\mu\text{m}$ ) までの繰返し数に依存する。2) オーステナイト結晶粒度が同じ場合、組織に関係なく繰返し降伏強さが疲れ破壊強さに比例する。また粒径の小さいほど疲れ強さは高い。3) ベイナイトマルテンサイト混合組織はき裂伝ば指数の点ですぐれており、恒温変態と細粒化処理の組合せにより高い疲れ強さが得られる。など

の成果が述べられた。

討論として、東工大小林氏より、予講にき裂発生繰返し数 (Ni) として扱っているのは発生ではなく、初期の伝播き裂の部分で、Nは大半伝播に費やされていることが過去の研究から明かであると述べた。また伝播速度がほぼ  $K_{\text{max}}$  に依存すると考えられる図2の結果については肯定の意見を述べ、 $K_{\text{max}}$  の極めて低い領域では冶金的要因をさらに受けたデータが得られるであろうと考察した。新日鉄石黒氏は切欠試験片の加工残留応力のき裂発生への影響の懸念を述べ、またオーステナイト粒より切欠先端部ではさらにミクロ的なサブ構造が影響すると考える。むしろマクロ的に  $\sigma_g^2$ 、 $\Delta K^2$  に依存する繰返し塑性域の大きさで考えた方が簡単ではないかとの意見を述べた。

さらに準備討論として、討14-1「フェライト系鉄合金における疲労のラック伝播速度と塑性域について」の発表が東北大鈴木氏によつて述べられた。これは Fe-10%Cr-2%Ni 鋼等のラスマルテンサイト、フェライト、冷間加工フェライト等異なつた相組織の試片を用意し、繰返し引張圧縮応力下のき裂伝播をしらべたもので、塑性域測定値の大きさとき裂長さ、き裂伝播速度等の関係の理論式との対応を見、 $\Delta K_{\text{th}}$ 、塑性域の組織依存性などを考察している。東工大、小林氏より、1) 試片が小規模降伏条件が満足されていないのではないかと 2) 定荷重試験での  $\Delta K_{\text{th}}$  の値の求め方、等に関しては疑念を述べ、理論的な数式の導入にはその前提となる種々の条件についての慎重な吟味が必要である点を指摘した。これに対して鈴木氏からは純鉄試料以外は小規模降伏の条件は充たされていると考える旨の回答があつた。また新日鉄石黒氏より、雰囲気の影響によつて  $da/dN$  が変化することと塑性域の大きさととの関係および原因について質問したに対し、測定結果では塑性域の大きさはき裂伝播の遅くなるような雰囲気の方が少し小さいが、そのみでは速度の差を説明できない。き裂新生面へのガス吸着や給合エネルギーの低下などの要因も考えられるが決定的なことは現段階では言えないとしている。

つづいて、準備討論発表、討14-2「鋼の疲れ亀裂伝播速度の低  $\Delta K$  側の遷移について」が東工大布村氏によつて述べられた。これは構造用鋼、Fe-3%Si 及びアルミ合金の切欠試験片について、 $dl/dN-\Delta K$  関係をしらべ、疲れき裂つ初期の段階が遷移域的挙動を示し、発生前の損傷過程に影響されることを立証しようとした研究である。これに対し、小林氏はこの遷移域は、切欠き附与条件によつて影響を受ける領域であり、初期の  $\Delta K$  を見掛けの  $\Delta K$  で整理することによつて生じ  $\Delta K_{\text{th}}$  とは無関係ではないかとコメントした。布村氏はこの遷移域はき裂伝播速度の下限を表わすいわゆる  $\Delta K_{\text{th}}$  ではなく、 $\Delta K_{\text{th}}$  そのものの意義にも疑問がある。本実験の遷移域の伝播特性は実用構造物の疲れき裂と寿命の考察上重要として検討している旨を述べた。

さらに準備討論発表、討14-3「高張力鋼の  $\Delta K_{\text{th}}/2$  におよぼす平均応力の影響」が金材研太田氏により述べられた。これは上記  $\Delta K_{\text{th}}$  を疲れの潜在する材料の疲れ限度に対応するものとして注目し、 $\Delta K$  漸減法により履歴の影響を除きながら測定し、き裂伝播速度を  $R$ 、 $\Delta K_{\text{th}}$  等により統一的に表わしうる実験式を提示したものであ