

氏 名	そり まち けん いち 反 町 健 一
授 与 学 位	工 学 博 士
学位授与年月日	昭和 60 年 3 月 13 日
学位授与の根拠法規	学位規則第 5 条第 2 項
最 終 学 歴	昭和 47 年 3 月 東北大学大学院工学研究科金属工学専攻 修士課程修了
学 位 論 文 題 目	伝熱と応力の解析に基づく鋼の連続铸造過程の铸片 れ欠陥に関する研究
論 文 審 査 委 員	東北大学教授 大森 康男      東北大学教授 白石 裕 東北大学教授 高橋 裕男      東北大学教授 菊池 淳

## 論 文 内 容 要 旨

### 第 1 章 緒 論

鋼の連続铸造法が工業的規模の生産設備として採用されたのは1950年である。近年のエネルギー価格の高騰は省プロセスである連続铸造法の比率を押し上げる原動力となり、1982年には国内鋼材生産量の81.2%を占めるにいたった。

現在の標準的な連続铸造機の断面図をFig.1に示した。

溶鋼は取鍋よりタンディシュを経て、水冷された銅製のモールドに注入される。モールドは一定の上下振動により溶鋼とモールド表面の固着を防止しながら、冷却水の間接冷却を利用して溶鋼の外周に凝固シェルを形成する目的で使用される。この凝固シェルで保持された溶鋼はピンチロールによって順次下降し、サポートロールで構成された2次冷却帯を通過中に、冷却水のスプレー冷却を受けて凝固が進行する。

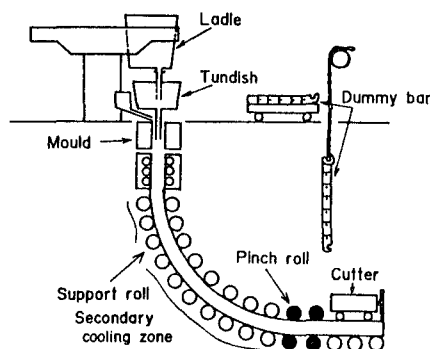


Fig.1. Schematic drawing of continuous casting machine (cross section)

このように連続铸造法では凝固現象を伴な

いながら、鋳片は機械的に連続引抜、曲げ、矯正変形を受けることになり、Table 1 に示すような問題点が発生しやすい。鋳片の割れ欠陥は凝固過程あるいは冷却過程において、何らかの力が加わり、その力が鋼の破壊強度を越えた場合、または歪量が鋼の許容変形量を越えていた場合に発生するものと考えられる。

Table 1. Quality problems in continuous casting of steel.

Location	Problem	Cause
Mould (Elementary cooling zone)	Break out	* Non uniform cooling due to air gap Lack of lubrication between mould and solid shell
	Longitudinal facial crack	Thermal stress due to non uniform cooling Tensile stress due to ferrostatic pressure Stress due to solidification
	Non metallic inclusion	Entrapment of inclusion at meniscus
Spray zone (Secondary cooling zone)	Internal crack	* Tensile stress due to bulging deformation * Thermal stress due to surface reheating
	Centerline crack	* Thermal stress after solidification Stress due to pinch roll pressure
	Unbending crack	Tensile stress due to unbending deformation
	Transvers facial crack	Lack of deformability due to AlN NbC precipitation at grain boundary

\* Problems discussed in this thesis.

したがって割れ欠陥の防止のためには、

- (1) 凝固シェルの温度変化とそれに伴う熱応力
- (2) 凝固シェルに外力が加わった場合の変形挙動
- (3) 連続铸造条件下の鋼の高温強度、破壊強度または限界歪量

等の定量的知見が不可欠である。しかしながら、従来の報告はいずれの項目においても近似的、定性的であり、数多くの操業因子の最適化を決定することは困難であった。

そこで本研究の目的は連続铸造時の鋳片に生ずる種々の割れ欠陥を、伝熱と応力の解析に基づいて定量的に明確にすることを主眼においた。また、得られた結果をもとに割れ欠陥の防止法について論述した。

## 第 2 章 連続铸造過程における応力解析方法

伝熱解析により鋳片内の温度分布と温度変化を把握することは応力解析の必須条件である。ここでは、換算温度を用いた有限差分法により非定常伝熱方程式の解を求めた。また、スプレー帯におけるスプレー水量の表面伝熱係数におよぼす影響を検討している。

応力解析方法としては有限要素法による数値解析を用いた。該当温度（800℃以上）を考慮して弾性変形のみならず、塑性変形も解析が可能な計算プログラムを作成した。また有限要素法による非線型問題の取扱い方法を論じている。

弾塑性応力解析を精度よく行なうためには、高温における鋼の強度を変形の歪速度と温度の関数として表現することが必要となる。しかし、連続鋳造プロセスの歪速度は他の熱間変形プロセス（圧延、鍛造）に比較して著しく低い特徴があるが、その解析方法は遅れている。本論文は歪速度を考慮しつつ、(1)ヤング率 (2)弾性限界歪 (3)加工硬化率 (4)ポアソン比 を温度関数として数式化を行なった。

次に、弾塑性応力解析の熱応力の取扱い方法として異なる2種類の方法があることを初めて明らかにした。Total Thermal Load Method に比べて Thermal Load Incremental Method の方が、塑性段階での各要素内応力状態の把握の点ですぐれていることを明示した。

### 第3章 モールド内伝熱解析と空隙の発生およびブレイクアウトの発生の解析

本章はモールド内の凝固シェルとモールド間に生成するエアギャップと熱伝達の状況を、数学モデルから導出したものである。応力解析モデルで求めたエアギャップを次の伝熱解析に組み込み、ここで求めた温度変化から次のエアギャップを求める応力解析を行なう。このようにエアギャップの生成と熱伝達を対現象として取扱う点に特徴がある。本計算モデルによって明らかにされた典型的なエアギャップの様子をFig.2に示した。エアギャップはコーナー部分に局在化している。一度空隙が生成するとコーナー近傍の熱流束は急激に減少し、Fig.3に示すコーナーホットスポットを生ずる。このホットスポットの温度が臨界温度以上となった場合には、凝固シェルの強度が失なわれて内部の溶鋼が流出する現象、すなわちブレイクアウトにつながるものと考えられる。また、長辺面の温度上昇は短辺面のエアギャップを減少させることとなり、長短辺は相互に影響しあうことを初めて明らかにした。コーナー部分エアギャップの生成に及ぼす各種操業要因（鋳造速度、スラブサイズ、モールド

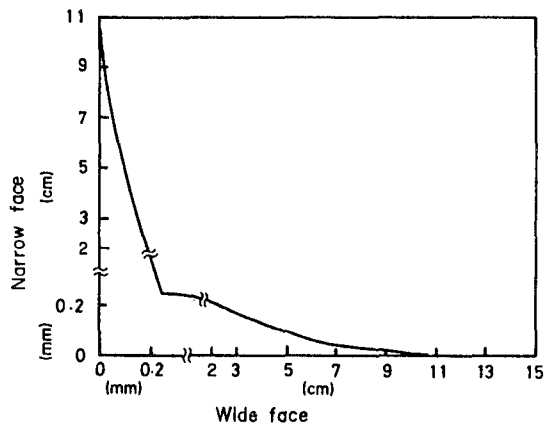


Fig. 2. Shape of gap formed near corner of a continuously cast slab. Note expanded scale near the corner.

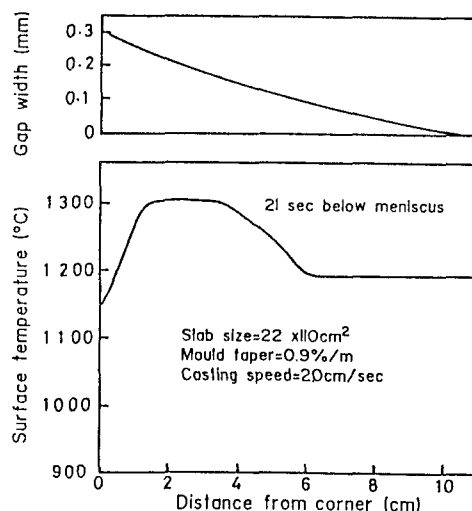


Fig. 3. Temperature profile produced by the air gap between the face of a continuously cast slab and mold.

ド短辺テーパ量)の影響を理論的に導出し検討を加えた。

#### 第4章 スラブ連続铸造における内部割れの解析

連铸スラブの内部割れはサポートロール間の凝固シェルが溶鋼静圧を受けてバルジング変形を生じ、凝固前面のデンドライト樹間に濃化溶鋼が浸入することによって生ずる欠陥である。ロール間バルジングは铸片品質のみならず、連続铸造機のマシンプロフィール設計、サポートロール設計の基本となるものであるにもかかわらず、定量的解析が遅れていた。そこで本章では、これを両端固定の弾塑性梁として、铸片内温度分布を考慮しつつ変形解析を行なった。その結果、ロール間铸片バルジングに及ぼすロール間隔、铸造速度、2次冷却比水量、ロールアライメント不整などの操業要因の影響を定量的に明らかにした。また、数多くの操業データと理論解析から、Fig.4の等歪線図を作成した。内部割れの実績をプロットすることにより、内部割れの発生は限界引張歪は0.3%であることを明らかにした。

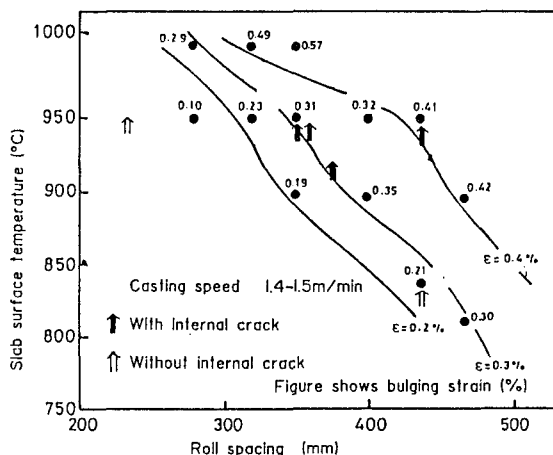


Fig.4. Bulging strain diagram as a function of roll spacing and slab surface temperature (16.4 m from meniscus)

これによりロール間隔の既知の場合の操業の最適化を図ることが可能となった。

#### 第5章 高炭素鋼スラブのコーナー表皮下縦割れの解析

高炭素鋼 (C = 0.5~1.0%)の連続铸造スラブに発生するコーナー表皮下縦割れについて铸片の伝熱と応力の解析を行なった。モールド直下のサポートロール帯において、長辺面のバルジングにより、凝固シェルの内面コーナー部分に0.65%の引張歪が作用していると予測できる結果を得た。

該当部の引張歪は、2次冷却方法によって影響を受け、短辺面のスプレー冷却を停止して、短辺面の凝固シェルの剛性を低下させることにより、約1/4に減少することを提案した。この知見を実操業に適用して、コーナー表皮下縦割れを防止することができた。

#### 第6章 ビレット連続铸造におけるハーフウェイクラックと中心割れの解析

連铸ビレット铸片において、2次冷却方法が不適当な場合には、Fig.5に示すような铸片表面の復熱現象が生ずる。

このような铸片内温度の不均一変化は熱応力を誘発して、凝固界面にハーフウェイクラックを発生することがある。Fig.6に铸片表面が121°C復熱した場合の応力計算例を示す。ハーフウェイクラックが観察された部位の歪を求めるといずれの場合も0.2%以上であり、これが割れ発生

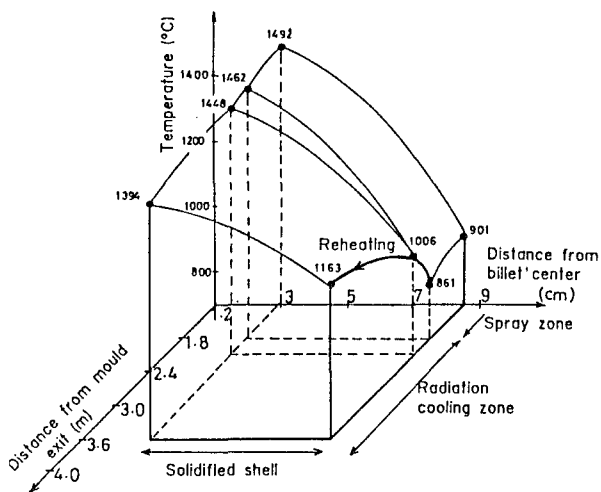


Fig. 5. Schematic diagram of surface reheating on continuous casting billet

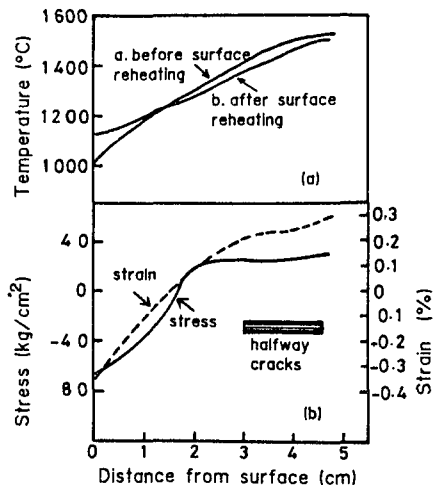


Fig. 6. Profiles of a temperature and b stress and strain perpendicular to wide face at centreplane of billet cast at installation A

条件であろうと推察される。この値は第4章で求めた割れ発生限界歪ともほぼ一致しており、解析の妥当性を裏づけていると考えられる。

同様の解析を中心部の凝固完了直後において発生する中心割れについても適用したところ、操業知見と良い一致が得られた。

## 第7章 スラブ連続 casting における表面復熱と内部割れの解析

スラブ連続 casting における表面復熱の影響について、実験と理論計算の両面から検討を行なった。その結果、スラブ形状の場合には静鉄圧によるバルジング歪が主体であり、熱応力の寄与は少ないことが明らかとなった。したがって表面復熱によって内部割れが発生する原因は、温度上昇による鑄片剛性の低下によって、ロール間バルジングが増大するためであろうと結論した。

## 第8章 結 論

本章では以上に述べた本研究における主要な結論を要約した。

以上、本論文に述べた理論解析方法およびそれに基づく考察によって各種の鑄片割れ欠陥の発生限界が定量的に明確になり、健全な鑄片品質を保証しうる操業設計の最適化を行なうことが可能となった。また、本理論解析方法は、今後の装置設計の最適化も含めて、連続 casting 工程のプロセス解析にきわめて有効であることが明らかとなった。

## 審査結果の要旨

鋼の連続铸造法について、鑄片は凝固現象を伴いながら、機械的に連続引抜き、曲げおよび矯正変形を受けることになり、種々の割れ欠陥を生ずる。

本論文は、伝熱と応力の解析によって鋼の連続铸造過程における鑄片の種々の割れ欠陥の発生限界を定量的にもとめ、それらの割れを防止するための操業ならびに装置設計の最適化について研究した成果をまとめたもので全編8章より成る。

第1章は緒論である。

第2章では、伝熱解析と弾塑性応力解析の方法および鋼の応力値について述べている。凝固点直下より室温までの高範囲の温度において、鋼の応力値を歪の非線型関数として数式化し、凝固層の温度分布に基づく鑄片の弾塑性応力解析に成功している。また塑性段階での熱応力の取扱い方法として、初めて熱荷重増分法を提案し、この方法により要素内応力状態が良く記述できることを明らかにしている。これらは貴重な成果である。

第3章では、凝固殻と鑄造間に形成される空隙と熱伝達の状況を対現象として解析した結果を述べている。

第4章では、スラブの内部割れの主因となるバルジング現象の解析結果を述べている。鑄片内温度分布を考慮した弾塑性応力解析により、鑄造速度、2次冷却水量、ロールの間隔とその不整列性などの影響を定量的に評価している。これは有用な知見である。

第5章では、高炭素鋼スラブ鑄片のコーナー表皮下縦割れの解析とその防止方法について述べている。スラブ短辺面の冷却水を停止し凝固殻の剛性を低下させることにより、コーナー部分の引張歪を低減させ、割れ欠陥のないスラブの製造を可能とした。

第6章では、ピレット鑄片の中間部および中心部割れの解析結果を述べている。

第7章では、スラブの2次冷却帯における復熱現象と内部割れの関係についての検討結果について述べている。表面復熱による鑄片強度の低下がバルジングを増大させ、内部割れを発生することを明らかにしている。

第8章は結論である。

以上要するに本論文は、鋼の連続铸造過程において生ずる各種割れ欠陥の発生限界を、伝熱と弾塑性応力の同時解析によって定量的にもとめ、その結果に基づき、健全な鑄片品質を保証する操業設計ならびに装置設計を確立したもので、金属工学の発展に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は工学博士の学位論文として合格と認める。