

討12

鉄鋼の連続鋳造鋳型内における凝固現象

大阪大学 工学部 大中逸雄

1. まえがき

連続鋳造と圧延工程を直結するためには表面欠陥のない鋳片を安定して鋳造することが不可欠である。鋳片の表面欠陥は鋳型内で発生することが多く、鋳型内における凝固現象を理解し制御することが健全な鋳片を製造するために極めて重要である。またブレイクアウトなども鋳型内凝固と関連しており、安定操業の点からも重要である。ここでは従来の鋳型内凝固現象に関する研究をレビューし、問題点、今後の方向などについて述べる。

2. 鋳型内凝固現象の概要

スラブ連鋳においては溶鋼は長積ノズルから水冷鋳型内に導入される (Fig.1)。鋳型内に流入した溶鋼はその運動エネルギーを粘性により失いながら平均的には鋳片の引抜と共に下方へ運ばれる。溶鋼上面には厚さ数 mm の熔融スラグ層、さらに半熔融、焼結スラグ層、未焼結のパウダー層が存在する。溶鋼あるいは凝固シェルと水冷銅板の間にはメニスカス部から流入した熔融スラグあるいはその凝固した凝固スラグ層 (厚さ1mm 以下) が存在する。またメニスカス部近傍の水冷銅板には凝固したスラグが付着しておりスラグ・リムと呼ばれている。

水冷鋳型は上下に振動 (オシレーション) しており、それに伴い凝固シェルにはオシレーションマークが形成され、凝固遅れ部が発生し、き裂欠陥の起點となる。また不適切な鋳造条件ではブレイクアウトが発生する。凝固シェルには鋳型との摩擦力、引抜き力、溶鋼静圧、熱および変態応力などが作用し、不均一凝固、内部割れの原因となる。

3. 溶鋼の流動 (1)~(3)

タンディッシュからノズルを通った溶鋼は約 1 m/s の速度で鋳型内に噴出する。Fig.2 はこの噴出後の鋳型内流動を解析した結果である (2)。鋳型内流動の実測は困難であるから水モデルあるいは数値シミュレーションが必要であるが、後者の例は多くない。Fig2のような解析により、生成する渦の概略や鋳型長辺面との平行流速の最大値が0.1 ~ 0.2 m/s程度、短辺面に衝突す

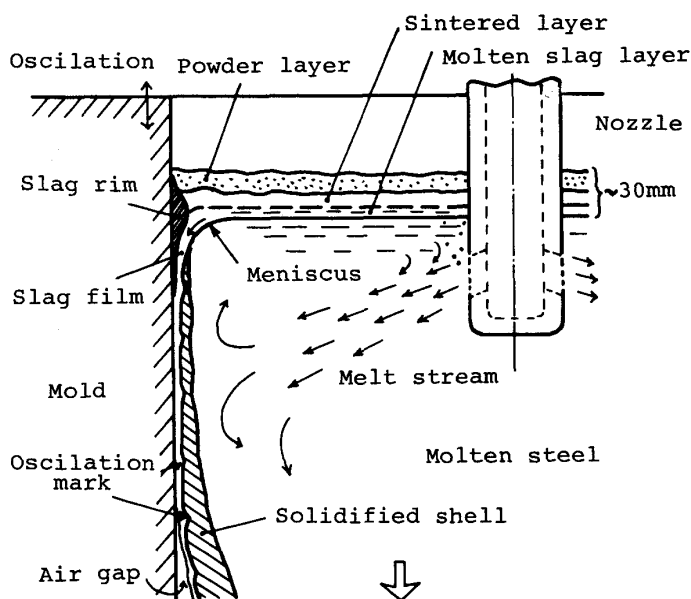


Fig.1 Schematic illustration of solidification and fluid flow in a mold of continuous casting

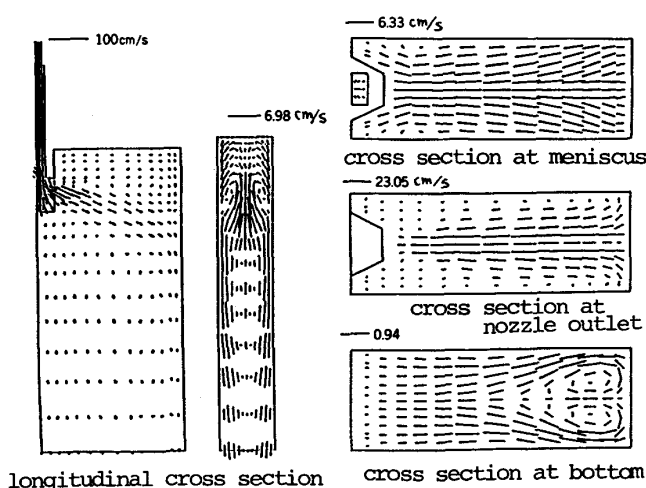


Fig.2 Computed melt flow in a mold of continuous casting (2)

る速度が 0.1 m/s 程度であるといったことが分る。このような鋳型内流動は熔融スラグの巻込み、凝固シェルの不均一な発達、介在物の生成と分散、等軸晶の生成などに影響を及ぼす。スラグの巻込などに関しては水モデル実験が有効であろうが、凝固や鋳造応力との関連では数値解析が必要となる。

電磁力による鋳型内攪拌も一部行なわれている。鋳型下方での電磁攪拌の解析は種々行なわれているが(4)~(6)、流入流動と連成した鋳型内流動の解析は少ない(2)。

鋳型内流動解析では3次元流れを取り扱う必要があり計算コストが高くなるが、凝固やオキシレーションによる湯面変動などと連成させた解析やノズルへのアルゴン吹こみの取扱いなどが今後の課題である(6参照)。

4. 熱移動(7)~(12)

溶鋼が保有する熱エネルギーは水冷鋳型に移動する他鋳型下方へ引抜かれる凝固シェルおよび溶鋼と共に運びさらされる。また湯面上部のパウダー層から熱放射および対流により外部に熱移動が生じるがこの熱エネルギー量はわずかである。さらにパウダーを焼結、熔融するために溶鋼の熱エネルギーが消費される。水冷鋳型に吸収される熱エネルギーは凝固シェル、鋳型-凝固シェル間のスラグ・フィルムおよび鋳型下部では空隙部を通過する。溶鋼から凝固シェル部への熱移動は熱伝導が主体であるが、ノズルからの吐出流が衝突する場所では対流も無視できぬと考えられる。この場合の定量的解析は少ない(12)。スラグ・フィルム中の熱移動は透光性スラグの場合には熱放射を考慮する必要がある。文献(7)などでスラグの熱伝導率が調べられている。透光性は不純物(特に酸化鉄)でもかなり異なるので注意せねばならない。透光性の熔融シリカは 1200°C で有効熱伝導約 2 W/(mK) であるが、 $\text{Na}_2\text{O}-\text{SiO}_2$ スラグでは 0.2 W/(mK) 程度であり熱抵抗は1オーダー異なることになる(7)。なお鋳型振動時の粘性発熱を検討している例がある(14)。

鋳型と凝固シェル間に明瞭な空隙が生じない場合でも鋳型表面の凹凸、熱収縮や材質によっては変態、不均一凝固などにより少なくとも局所的にはかなりの場合空隙が発生しているものと考えられる。この熱抵抗の理論的推定は容易でなく(不均一性、熱伝導、熱放射を少なくとも考慮する必要がある)実験的に求められる。また明瞭に空隙が発生すると主に空隙部の熱抵抗が溶鋼-水冷鋳型間の熱移動を律速する。いずれにしても溶鋼-水冷鋳型間の熱抵抗を精度よく推定することは現状では困難で、冷却水温変化および鋼板中にセットした熱電対の実測値より算出されている(8)~(10)。その値はほぼ $1000 \sim 2000 \text{ KW/m}^2$ である。

5. スラグの流動(13)~(16)

溶鋼の熱で溶解されたパウダーは熔融スラグとして鋳型-凝固シェル間に流入する。この流入の駆動力としては鋳型振動、凝固シェルの引抜き、スラグ・リムによるポンプ作用、重力などが考えられるが、重力効果は小さいものと考えられる。メニスカス部近傍でのスラグ流路巾の縮小を考慮してレイノルズ方程式を解きスラグ流動を解析した結果(15)はある程度妥当と考えられる。しかし、スラグ・リムの影響やスラグと鋳型間のスリップ(ぬれ性)、スラグ・フィルム間の粘度分布、湯面振動などの影響は必ずしも明確にはなっていないようである。

6. 凝固シェルの形成と欠陥の発生

鋳型内で生成する凝固シェルはまずブレイク・アウト防止の観点から解析された。このために凝固定数 K による凝固厚さ ϵ の実験的な推定($\epsilon = K \sqrt{t}$, t =時間)あるいは解析解(17)、数値解(18)(一次元熱伝導凝固モデル)などが利用された。これらの解析では溶鋼流動は無視されるか、あるいは液相の熱伝導率を増大させて流動をある程度考慮している。鋳型下部での平均的凝固厚さの推定精度には溶鋼流動の影響より凝固シェル-鋳型間の伝熱係数の推定精度の影響の方がより大きいと考えられる。

次にコーナー縦割れやコーナー部での凝固遅れの解明のため2次元熱伝導凝固モデル解析が行なわれた(19)。Fig3にその結果の一例を示す(20)。このような解析により凝固後の熱収縮と静圧の作用によりコーナー部に空隙が発生し、熱抵抗を増大させ凝固が遅れると共にコーナー部に引張応力が発生することが分っている。さらに最近はおしレーションマークの生成に関連してメニスカス近傍の凝固解析が行なわれている(15)、(21)、(26)。この場合まずメニスカス形状の決定が問題になるが、表面張力と静圧のつり合いの式(27)がよく利用されている。そして、メニスカスの形状は一定と仮定し、鑄型振動サイクル時間内のある一定時間溶鋼は静止し、非定常熱伝導凝固が生じ、他の時間内に温度変化なしに下方に移動すると考えて解析する。より進んだモデルとしては凝固シェルと溶鋼が常に水平方向と平行に引抜かれ、メニスカス部には一定温度の溶鋼が供給されるとするものがある(26)。Fig4はこれらの解析結果の一例を示しており(26)、①単なる溶鋼のオーバーフローによりおしレーションマークが発生するほどにはメニスカス部の凝固は進まない。②スラグ・リムが発生することが十分予想される。③メニスカス部とスラグ・リム間には粘度の低い溶融スラグが存在する。などのことが分る。また鑄型が下方に移動する際に(せん断力(14)ではなく)圧力によりメニスカス凝固部が変形されることがおしレーションマーク生成の最大の原因と考えられている(15)。スラグ・リムの生成はこのよう現象を助長する可能性がある(13)。ノズルから噴出した溶鋼の流動は温度分布および凝固シェルへの熱移動を変化させ均一な厚さの凝固シェルの成長を妨げるであろう。またおしレーションマークの生成、溶融スラグの不均一流動などにより不均一な凝固シェルが生じる。不均一な凝固シェルは不均一な温度分布を持っており引張内部応力を発生し、き裂欠陥の源となる(28)、(31) またおしレーションマーク谷部の冷却速度は遅く、粗い組織となるため強度が低く、き裂が発生しやすい(31)。

凝固シェルに作用する溶鋼流動は等軸晶の生成にも関連する。この流動は乱流であり、凝固シェル(必ずしも固相率1の領域とは限らない)近傍にバースティングなどの組織的構造と温度変動を生じ、デンドライトを溶断し、あるいは初期凝固結晶を分散させる。この結晶が溶解されず溶湯中の温度分布が流動により平均的に一様になれば等軸晶として成長する。

ステンレス鋼などではおしレーションマークと関連して表面偏析が問題となる。この原因として溶質濃化溶鋼のメニスカス部からのオーバーフローおよびおしレーション谷部でのブレイクアウトやしみ出しなどが考えられている(29)、(31)。しみ出しの

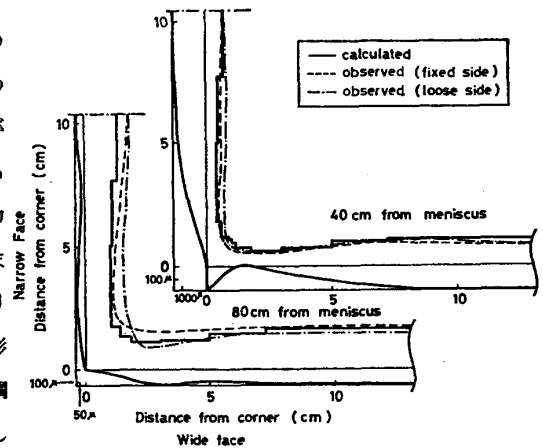


Fig.3 Deformation of solidified shell in a mold(20)

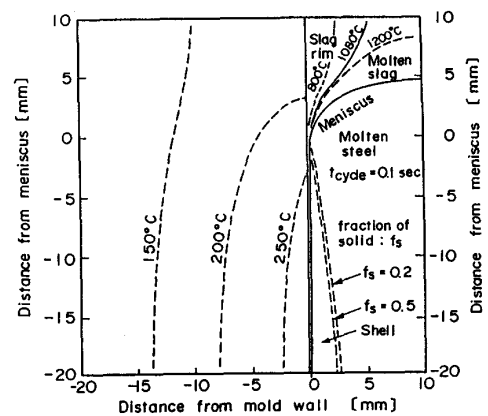


Fig.4 Temperature distribution near meniscus(26)

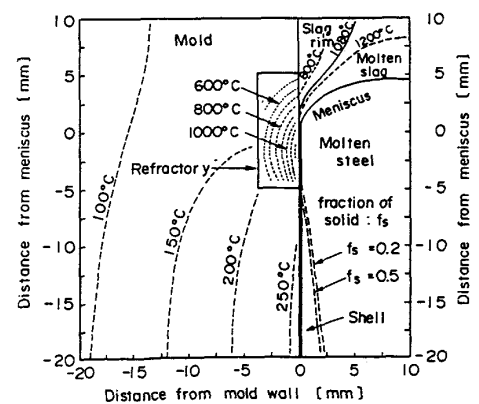


Fig.5 Effect of refractory on the meniscus solidification(26)

駆動力として鋳型-凝固シェル間に発生する負圧が考えられているが⁽³¹⁾凝固シェル表面の固相率が低い場合にはわずかな外部振動によってもしみ出しが生じ得る可能性がある⁽³²⁾。

7. あとがき

鋳型内の凝固現象には上記のように溶鋼流動, スラグ流動, 鋳型振動が複雑に関係しており, 鋳片の表面品質, 内部組織に大きな影響を与える。今後凝固シェル生成の実態のより正確な把握と流動と凝固の定量的解析, 乱流構造の解明, スラグ・リムの影響の明確化などの解析的研究の他, 鋳型内現象を積極的に制御するための工夫, 例えばメニスカス部や鋳型コーナー部の温度制御(誘導加熱, 複合鋳型の開発-Fig.5に一例を示すなど), 電磁場や不活性ガス吹込による溶鋼流れ場(乱流構造を含む), 溶鋼内温度分布の制御などの検討が望まれる。

8. 文 献

- | | |
|--|---|
| (1) J.Szekely and R.T.Yodoya:Met.Trans.
4(1973),p.1379 | (19)連続鋳造における力学的挙動:鉄鋼基礎共同
協同研究会、日本鉄鋼協会(1985.4),P.91 |
| (2) 八百升, 篠原虔章, 山元深, 杉山一久,
目崎令司:鉄と鋼, 71(1985),p.1423 | (20)木下勝雄, 江見俊彦, 笠井学:
鉄と鋼, 65(1979), p.2022 |
| (3) F-L.Zhang and Z.Jiang:ICCM86-TOKYO,
(1986.5),1D | (21)H.Tomono,W.Kurz and W.Heinemann:
Met.Trans,12B(1981), p.409 |
| (4) K.H.Tacke and K.Schwerdtfeger: Stahl u.
Eisen, 99(1979),p.7 | (22)H.Tomono,P.Ackermann,W.Kurz and W.
Heinemann:Solidification Technology in
the foundry and casthouse, Metals Society
(1983),p.524 |
| (5) 浅井滋生, 西尾 幸, 榎 巖 : 鉄と鋼
67(1981),p.333 | (23)I.Saucedo,J.Beech and G.J.Davies:
Metal Tech.,9(1982),p.282 |
| (6) 西村統 他:三菱重工技報,21(1984),p.772 | (24)R.S Laki,J.Beech and G.J.Davies:Ironmaking
and Steelmaking,11(1984)5,p.283 |
| (7) 永田和宏:学振140,鋼の連鋳用パウダーの物
性と鋳片性状シンポジウム(1984.12) p.16 | (25)長野裕, 中野武人, 田中純, 有吉敏彦:
鉄と鋼,70(1984),S983 |
| (8) 井上俊明, 秋田靖博, 野呂克彦, 片野征夫
製鉄研究,293(1978),p.12412 | (26)高本勉, 高輪武志, 友野宏, 多田健一:
鉄と鋼,72(1986),S132 |
| (9) 佐伯毅, 大口滋, 溝口庄三, 山本利樹,
三隅秀幸, 常岡聡:鉄と鋼,68(1982),p.1773 | (27)J.J.Bikerman:Physical Surface,
Academic Press,New York(1970).p.10 |
| (10) I.V.Samarasekera and J.K.Brimacombe:
Can.Met.Quart.,18(1979),p.251 | (28)松宮徹, 佐伯毅, 田中純, 有吉敏彦:
鉄と鋼, 68(1982),p.1782 |
| (11)中戸参, 榎巖:鉄と鋼,66(1980),p.33 | (29)竹内英磨, 杉村省吾, 日高良一, 長野裕,
鈴木康夫:鉄と鋼,69(1983),p.248 |
| (12)中戸参 他:鉄と鋼,67(1981),p.1200 | (30)竹内英磨, 杉村省吾, 池原康允:鉄と鋼,
69(1983),p.1995 |
| (13)T.Emi,H.Nakato et al. :
Proc.61st NOH-BOSC (1978),p.350 | (31)E.Takeuchi and J.K.Brimacombe:
Met.Trans.16B(1985),p.605. |
| (14)G.J.W.Kor:Proc.2nd PTD,AIME(1981),P.124 | (32)大中逸雄, 西井光治, 福迫達一:
日本金属学会誌,45(1981),p.424 |
| (15)E.Takeuchi and J.K.Brimacombe:
Met.Trans, 15B (1984),p.493 | |
| (16)安斉栄尚, 重住忠義, 西谷輝行, 安藤貞一:
鉄と鋼, 69(1983)5,S1083 | |
| (17)T.W.Clyne et al.:J.Metals,(1982)Feb.p.34 | |
| (18)E.A.Mizikar:Trans.AIME,239(1967),p.1747 | |