

連铸ブルームの内部割れ解析

井塚滋夫・藤村俊生

1. 諸言

連続铸造設備の高生産性の達成には、稼働率の向上とともに铸造速度の増大などの铸造中の生産性向上が必須であるが、そのためには高速铸造下でも良好な铸造品質を確保する技術の確立が重要である。

本報告で議論する連続铸造ブルームにおいては铸造中の種々の原因によって内部割れと称する内部欠陥が発生する。内部割れは高速铸造時の主要な問題点であり、これを防止する技術の確立することは重要である。

当水島製鉄所においては、ブルーム用連铸機として、8ストランドブルーム専用第1連铸機（以下1CCと略記）および4ストランドブルーム・ビームブランク兼用連铸機（以下3CCと略記）を有しているが、これらの連铸機の高速铸造実験により、内部割れの発生原因についてはかなりの知見が得られている。しかしながら、従来の解析方法は高々3次元程度の解析であり、要因分析・数量化および結果の吟味が不十分であると考えられた。

このため、多変量解析法を適用し、内部割れについてさらに詳しい検討を行なうこととした。

2. 連続铸造工程の概略

図1に連続铸造のイメージを示す。取鍋内の溶

いづか しげお 川崎製鉄 水島製鉄所 企画部能率室
ふじむら としお 同 技術研究所 第1研究部製鋼研究室

鋼はタンディッシュを經由してモールド内へ注入される。モールド内で生成された凝固シェルはローラーエプロンロールでサポートされ、スプレー冷却帯で冷却を受けながら成長を促進していく。そして铸片は、ピンチロールにより引抜き矯正されながら、トーチカッターにより所定の長さに切断され、ブルームとして次の工程に供給される。

3. 内部割れ

図2に内部割れの模式図を示す。内部割れの発生機構および凝固前面近傍の許容歪みについては多くの知見が得られている。

内部割れ発生の主原因はバルジングによるものが多いが、その他ロール圧下力が不適當な場合の圧下割れ、および曲げ矯正時の変形による割れ、ロールの不整合による割れなどが考えられる。

そこで、内部割れの形態別に考えられる要因を特性要因図の形にまとめて図3に示す。

割れAと割れBは、バルジング起因と考えられ

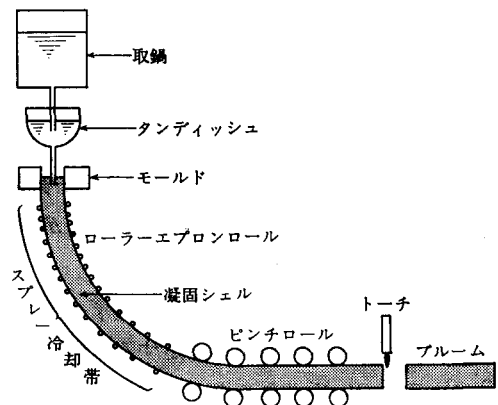


図1 連続铸造のイメージ

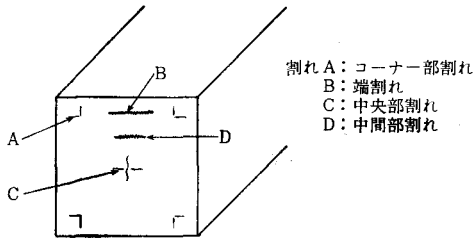


図2 内部割れの模式図

る。割れCは熱応力起因、割れDはバルジング起因と引抜き矯正に起因するものの2種類が考えられる。

4. アプローチ

前章で述べた内部割れにおよぼす各要因の影響を定量化し、割れの発生を最小にする製造条件を明らかにすることが目的である。

アプローチとしてはブルームのサイズ、CC、成分条件、操業条件などの約30因子について、1st Stepでデータのグルーピングをクラスター分析を中心として行なう。2nd Stepでは、割れに対する原因分析を行なう。具体的には、1)割れの有無に対する判別分析、2)割れの大きさ別の判別分析、3)割れの大きさに対する重回帰分析、4)割れの大きさの主成分分析などを行なっている。図4にアプローチの概略を示す。

5. データのグルーピング (1st Step)

解析にあたり、割れA・B・C・Dは同時に解析しうるか、1CC(ブルームサイズ:200×220, 250×300), 3CC(300×400)の3種のデータは同時に解析しうるかを検討する必要があり、クラスター分析、主成分分析、判別分析を行なった。

5.1 割れの4形態について(クラスター分析)

割れA・B・C・Dが同時に解析できるか調べるために、

- 1) 1CCと3CCの割れを区分せず(図5)
- 2) CC別に割れの形態を限定する(図6)

の2ケースについてクラスター分析を行なった。

その結果、割れを併合したケースより割れの形

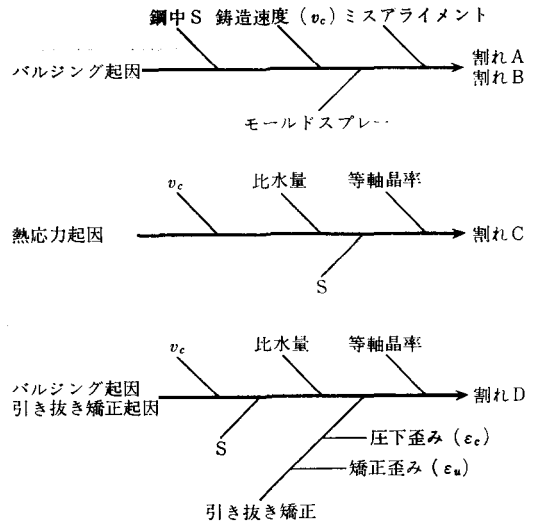
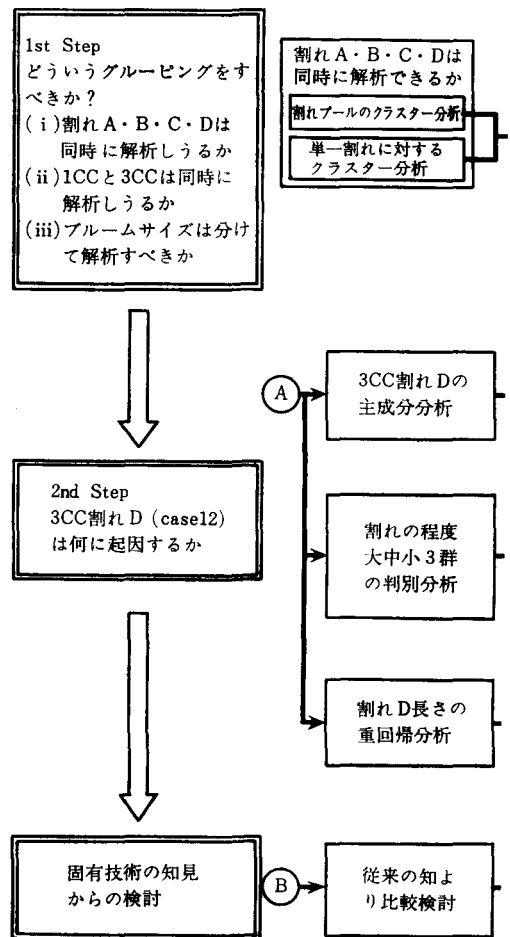


図3 内部割れの特性要因図



態を限定したほうがベターと判断した。

5.2 CC・サイズについて (主成分分析)

1CCと3CCの割れDについて、CCとサイズの影響を分析した。

〔割れD長さに関する主成分分析〕(表1)

割れD長さ(単位面積当り)は、 z_1 (サイズファクター)、 z_2 (引抜き矯正： $\epsilon_c \cdot \epsilon_u$)、 z_3 (ミスアライメント)、 z_4 (鋼中S)、 z_5 (ΔT と等軸晶率)で寄与率0.85であり、サイズの関与大と判断される。

〔主成分スコアによる分析〕(図7)

主成分 z_1, z_2 の主成分スコアによる分布を示すが、 z_1 によりCC別、サイズ別にグルーピングされている。したがって、サイズによるデータ分割はすべきである。

表1 割れD長さの主成分分析

固有値	5.88554	2.09057	1.56519	1.23654	0.80330
累積寄与率	0.45274	0.61355	0.73395	0.82910	0.85094
固有ベクトル(解釈)	z_1	z_2	z_3	z_4	z_5
	サイズファクター	引抜き矯正	ミスアライメント	S	比水量等軸晶率

5.3 その他の事前検討

〔割れの有無によるグルーピング(判別分析)〕

割れの有無という2群を判別したときの判別関数により割れの原因を探るために判別分析を行なった(図8)。

その結果、割れの有無は v_c , 厚み, $\epsilon_u \cdot \epsilon_c$, 比水量, $\epsilon_u + \epsilon_c$ で95.1%で判別されていることがわかる。

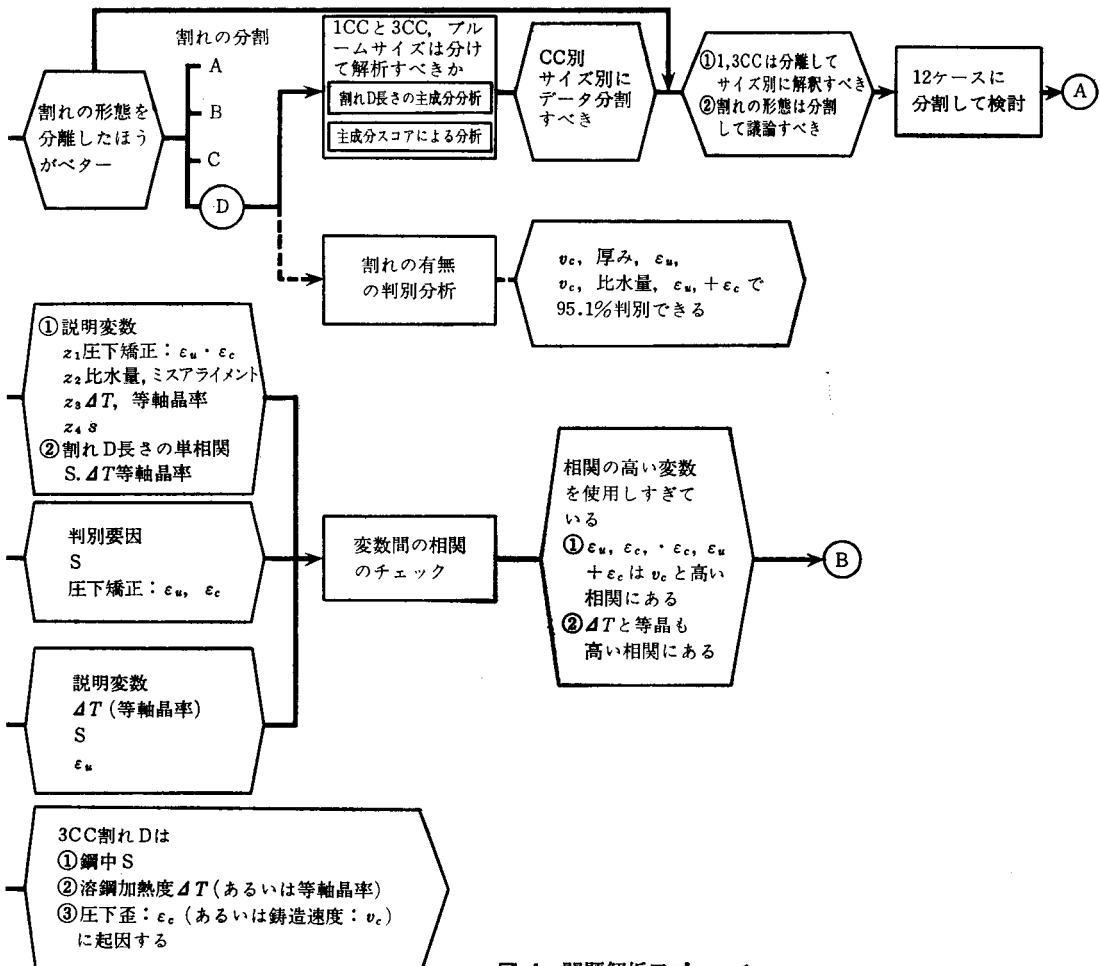


図4 問題解析アプローチ

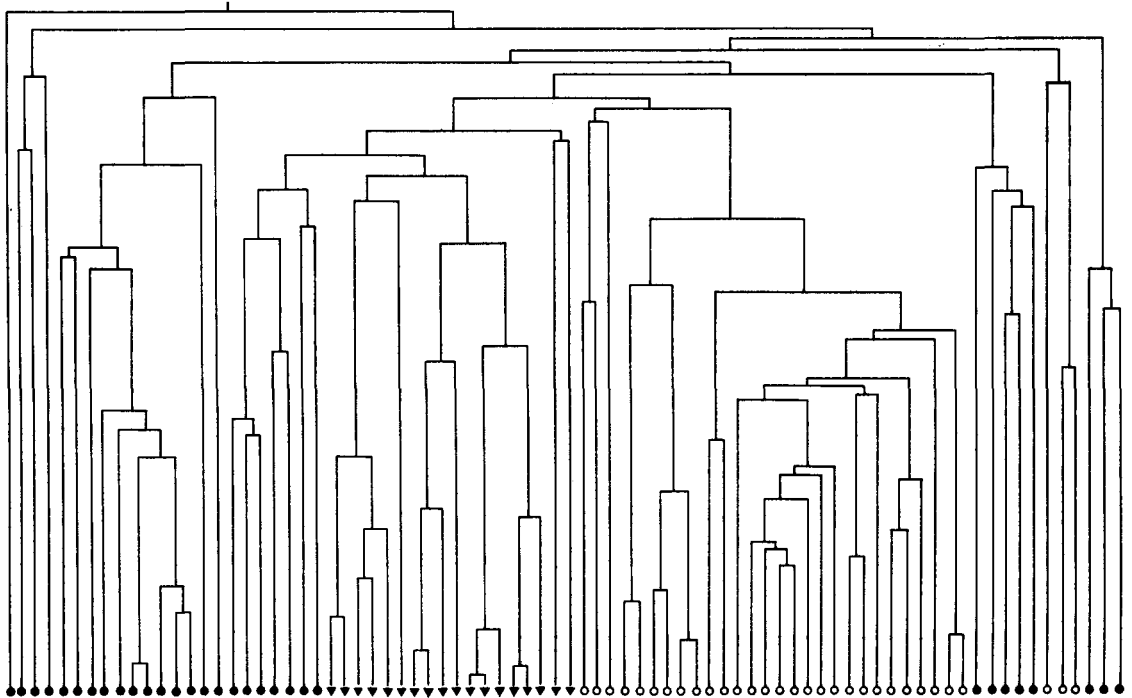


図 5 クラスター分析 (割れA・B・C・D包含) ● 1 CC 200×220, ○ 1 CC 250×300, ▼ 3 CC 300×400

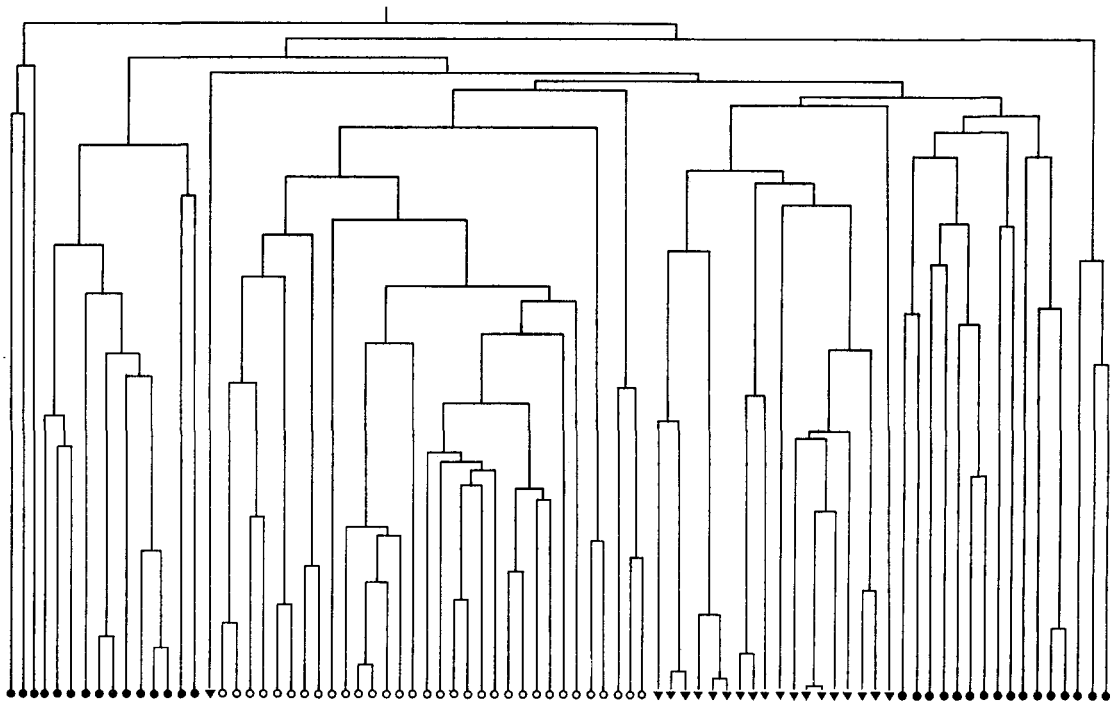


図 6 クラスター分析 (単一の割れ(D)について) ● 1 CC 200×220, ○ 1 CC 250×300, ▼ 3 CC 300×400

5.4 まとめ

以上のプレスタディにより、

1) 1 CCと3 CCを分け、サイズ別に解析を進める必要がある。

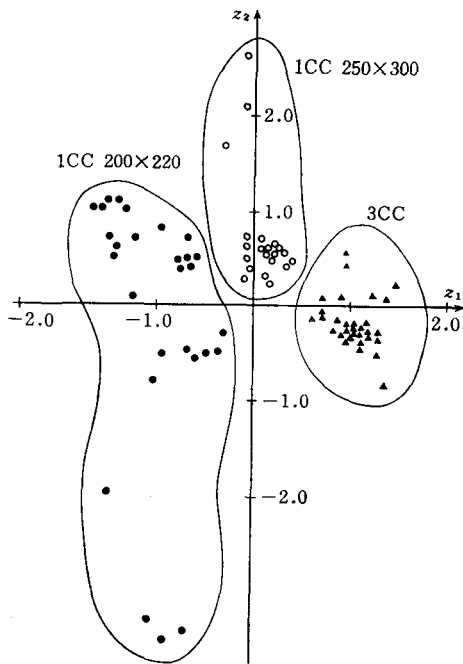


図7 割れD長さの主成分スコアによる分布図

2) 割れの形態は分離して個別に扱うのがベターであることが明らかになった。

6. 割れに対する原因分析 (2nd Step)

1st Stepでの事前検討により、データを表2のようにグルーピングして解析を行なう。

ここでは、Case12の3CC—サイズ300×400—割れDに対象を絞って報告する。

6.1 3CCの割れD長さの主成分分析

表3に主成分分析結果を示す。これより3CC

判別行列

グループ	正解率	NASHI	ARI
NASHI	91.9	34	3
ARI	97.8	1	44
TOTAL	95.1	35	47

判別関数

$$F_{NASHI}(x) = -1429.01 + 75.42x(2) + 11.03x(4) - 887.72x(26) - 2015.48x(56) - 3796.10x(57)$$

$$F_{ARI}(x) = -1645.54 + 80.75x(2) + 11.88x(4) - 951.52x(26) - 2130.62x(56) - 4077.26x(57)$$

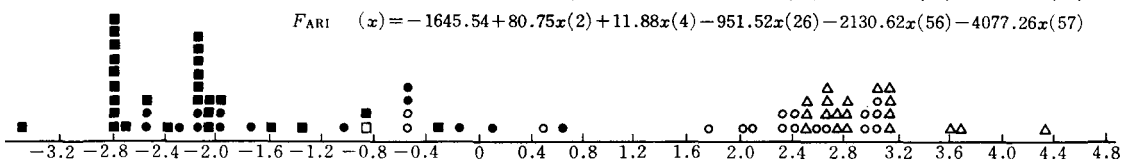


図8 割れの有無, 2群の判別分析

の割れDは, z_1 (圧下矯正: $\epsilon_u \cdot \epsilon_c$), z_2 (比水量, ミスアライメント), z_3 (ΔT , 等軸晶率), z_4 (S) で寄与率0.915で説明される。

また, 相関行列から, 割れD長さとの単相関係数の大きなものは, S, ΔT , 等軸晶率であることがわかる。

表2 データの分割

ケース	CC	サイズ	割れの形態
1	1	200×220	A
2			B
3			C
4			D
5	250×300	250×300	A
6			B
7			C
8			D
9	3	300×400	A
10			B
11			C
12			D

6.2 割れの程度の判別分析

割れの大きさを大・中・小に3分類して, その判別関数を見る。判別率84.4%で, S, ϵ_u , ϵ_c により判別された(図9)。

6.3 重回帰分析による割れD長さの説明

表4に結果を示す。ここで割れDの説明変数はS, ΔT , ϵ_u である。

しかし, 3CCの割れDがピンチロールでの引抜き矯正(ϵ_u)に起因するというは従来の知見と異なる。そこで, 以下に変数間の相関を調べた。

6.4 変数間の相関のチェック

6.3の結果ならびに前述の主成分分析, 判別分析, 重回帰分析における要因のピックアップに差異がある要因を追求するため変数間の相関をチェックした(表5)。

これによると,

- 1) $\varepsilon_u, \varepsilon_c, \varepsilon_u \cdot \varepsilon_c, \varepsilon_u + \varepsilon_c$ は v_c と高い相関 (0.8以上) がある
- 2) ΔT と等軸晶率も高い相関 (0.71) がある
- 3) モールドスプレーとミスアライメントも高い相関がある (これは固有技術では説明がつかない) であることがわかる。

したがって, 相関の高い変数を使用しすぎているからと考えられる。

6.5 まとめ

3CCの割れDは鋼中S, 溶鋼加熱度: ΔT (あるいは等軸晶率), 圧下矯正: ε_u (あるいは $\varepsilon_c, \varepsilon_u \cdot \varepsilon_c, \varepsilon_u + \varepsilon_c$) が大きな要因であることがわかる。

しかし, 圧下矯正項が取り込まれていることから, ただちにピンチロールの圧下矯正に起因すると考えるのは早計である。従来知見によれば, 3CCの割れDの発生位置は共用体内ローラーエプロン内であり, ピンチロールでの圧下矯正に起因するとは考えにくい。

表3 3CCの割れD長さの主成分分析

固有値	5.11062	2.51801	1.91864	0.51756	0.39218
累積寄与率	0.46461	0.69352	0.86794	0.91499	0.95064
固有ベクトル	z_1	z_2	z_3	z_4	z_5
(解釈)	圧下矯正	ΔT 比水量 ミスアライメント	ΔT 等軸晶率	S	比水量 ミスアライメント

表4 割れD長さ重回帰分析 (3CCの割れDについて)
重相関係数: $R = 0.8017$
 $R^2 = 0.6427$

変数	回帰係数	標準誤差	標準偏回帰係数	F TO REMOVE
(Y-INTERCEPT -0.054)		↓	↓	↓
X(3)S	0.001	0.000	0.373	7.132
X(5) ΔT	0.001	0.000	0.511	14.258
X(45) ε_u	26.187	10.346	0.308	6.407

回帰推定値: $\hat{y} = -0.054 + 0.001x(3) + 0.001x(5) + 26.187x(45)$

したがって, v_c と $\varepsilon_u, \varepsilon_c, \varepsilon_u \cdot \varepsilon_c, \varepsilon_u + \varepsilon_c$ は高い相関にあるため, 圧下矯正項は v_c の代わりに取り込まれていると考えるのが妥当と思われる。

以上より, 3CCの割れDがピンチロールでの圧下矯正によるものか, 共用体内でのパルジグに起因するものかについては明らかではないが,

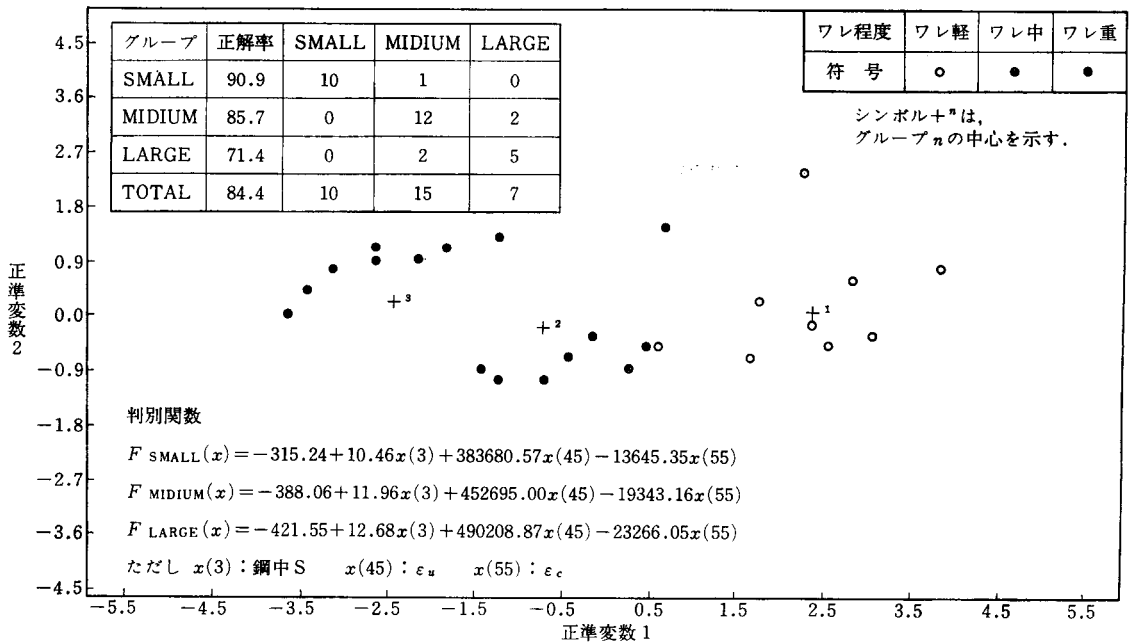


図9 割れの大きさ, 3群の判別分析 (3CCの割れDについて)

表 5 変数間の相関表

		X(3)	X(4)	X(5)	X(21)	X(24)	X(25)	X(29)	X(30)	X(33)	X(37)	X(38)	X(39)
		S	v_c	ΔT	等軸晶率	比水量	モールドスプレー	割れD	ミスアライメント	ϵ_u	ϵ_c	$\epsilon_u \cdot v_c$	$\epsilon_u \cdot \epsilon_c$
X(3)	S												
X(4)	v_c												
X(5)	ΔT												
X(21)	等軸晶率				◎								
X(24)	比水量												
X(25)	モールドスプレー						○						
X(29)	割れD	○			◎	◎							
X(30)	ミスアライメント						○	◎					
X(33)	ϵ_u												
X(37)	ϵ_c										◎		
X(38)	$\epsilon_u \cdot v_c$										◎	◎	
X(39)	$\epsilon_u \cdot \epsilon_c$										◎	◎	◎

◎ $|\lambda| > 0.7$ ○ $0.7 > |\lambda| > 0.5$

従来の知見から共用体内でのバルジングに起因すると考えたほうが妥当であろう。

Sと ΔT (あるいは等軸晶率)については、Sを下げ、 ΔT を小さくする(あるいは等軸晶率を高く)すれば、割れDは軽微にすることが可能と判断される。

7. 結論

連铸ブルームの内部割れについて、多変量解析アプローチにより検討を行なった。

そして、3CCの割れD長さに対して、溶鋼成分のS、溶鋼加熱度: ΔT (あるいは等軸晶率)、圧下歪: ϵ_u (あるいは鑄造速度: v_c)が関与することが明らかになった。また、成分Sの寄与については、大きな要因であることが認識された。

8. 結言

本報告は、当水島製鉄所の管理技術教育体系の一部であるOR基礎講座の第三セッション:多変量解析の実習テーマのうちの1テーマとしてアプ

ローチした事例である。

当講座の主眼は、実習を通して、アプローチとORマインドの訓練および問題解決のプロセスと個々の技法との結びつきを認識させることである。また、実習ではコンピュータを使いこなすことも副題としている。したがって、本検討においては学習した手法のほとんどを適用してみた。

その結果、固有技術の知見とは異なった点も見つかり、問題解決の足がかりとなっている。

また受講者はこの実習から手法の意味と有効性ならびに適用上の選択基準を体験的に得ている。

参考文献

- [1] 児玉正範: 連铸鑄造設備の最近の進歩. 鉄と鋼, 67, 8 (1981), 1043-1055
- [2] 飯田義治ほか: 大断面連铸ブルームの内部品質におよぼす操作条件の影響. 鉄と鋼, 67, 8 (1981), 1269-1277
- [3] 佐伯祐治: 管理技術教育体系とOR教育. 鉄鋼のIE, 20, 4 (1982), 58-66
- [4] 奥野忠一ほか: 統多変量解析法. 日科技連(1976)