

中空試片によるストランド内未凝固鑄片の 変形挙動の模型実験

安田 一美*・長田 修次*²・伊藤 幸良*³・梶岡 博幸*⁴

Model Experiments with Hollow Test Pieces
on Deformation of a Continuously Cast Strand under Solidification

Kazumi YASUDA, Syuji NAGATA, Yukiyoishi ITO and Hiroyuki KAJIOKA

Synopsis : The deformation behavior of a continuously cast strand under solidification is complicated because of the interaction among wide faces, narrow faces and edges of hollow box structure. Although several theoretical analyses were reported until now, deformation behavior has remained unclarified on the whole, because the above interaction effect was not taken into account in these analyses. In this paper the deformation behavior of a continuously cast strand under solidification is investigated through a simulation experiment with hollow rubber test pieces. The following results were obtained, which enable us to estimate accurate strain in a strand to design a continuous casting machine.

1) Unbending strain in a hollow piece varies considerably in a transverse direction, and the concept of shear lag accounts for that fact.

2) Bulging strain at a location apart from edges conforms to the elastic beam theory, while the bulging coefficient increases with decreasing shell thickness.

3) The existence of new type strain named winding round strain which occurs in an unbending region even without pressure is made certain and analysed quantitatively.

4) Additivity among different kinds of strains is ascertained. Because of phase difference between different kinds of strains, knowledge of continuous strain distribution is indispensable to estimate a crack occurrence.

Key words : continuous casting ; solidification ; simulation ; deformation ; strain ; unbending ; bulging ; winding ; model experiment.

1. 緒言

連続鑄造において中炭鋼など割れ感受性の高い鋼種の鑄造や高速鑄造など従来よりも割れが発生し易い条件下で、割れない鑄片を鑄造するにはストランド内で鑄片に発生する歪の推定精度を上げる必要がある。

また連続鑄造機の設備コストを低減させるためには機高を低くする事が有効であるが、鑄片に発生する歪の観点から見るとこの事はバルジング歪を小さくするが矯正歪を大きくする。従って鑄片の割れ発生防止に与える機高の影響の推定は単純ではなく矯正歪とバルジング歪の各々の詳細な挙動と総合歪に対する両者の関与の仕方すなわち加法性の成立の正否を知る必要がある。

このうち矯正歪については、中実試験片を用いた模型実験と連続梁モデルによる理論解析に基づいて、鑄片の多点矯正挙動が著者らにより明らかにされている¹⁾²⁾。

しかし連続鑄造ストランド内のスラブ鑄片は内部が未凝固の状態では中空体と見なされる。中空体の変形挙動は長

辺/短辺/エッジ部の相互干渉のため極めて複雑で、未解明の部分が多い。中空体では曲げ矯正歪挙動も中実体と異なる事が予想される。中空体の条件下では曲げ/矯正変形挙動がどの様になるのか、さらにはバルジング歪が加わった状態でそれらがどの様に变化するのかを定量化する必要がある。

一方バルジング変形に関してはこれまで理論解析結果が数多く報告されている^{3)~6)}。しかしこれらは何れも中空体の特徴である長辺/短辺/エッジ部の干渉を考慮したものであるのではない。

連続鑄造ストランド内の中空体の変形挙動は長辺/短辺/エッジ部の干渉に加えて多数のサポートロールの存在のため拘束条件が複雑で理論解析が困難である。このためここでは中空体模擬試片を用いた模型実験を行った。模擬鑄片を用いた模型実験による研究としては、これまで Vaterlausらの報告がある⁷⁾が定量的な記述は見られない。

また本研究では総合歪を直接に連続測定する事により各種歪の合成法についても検討を加えた。

平成6年8月3日受付 平成6年10月14日受理 (Received on Aug. 3, 1994; Accepted on Oct. 14, 1994)

* 新日本製鉄(株)プロセス技術研究所 (Process Technology Research Laboratories, Nippon Steel Corp., 20-1 Shintomi Futtsu 293)

* 2 新日本製鉄(株) (現:新居浜工業高等専門学校) (Nippon Steel Corp., now Niigata National College of Technology)

* 3 新日本製鉄(株) (現:三友プラントサービス(株)) (Nippon Steel Corp., now Sanyu Plant Service Co., Ltd.)

* 4 新日本製鉄(株)技術開発本部 (Technical Development Bureau, Nippon Steel Corp.)

2. 実験方法 (中空体鑄片の曲げ矯正挙動)

2.1 装置構成

Fig. 1 に試験装置の構成を示す。ゴム試片は、ロールプロフィールのなかを、ダミーバーを介してモーターにより引抜く。試片には歪ゲージを貼付けており、これによってロールプロフィール通過中に試片に発生する歪を連続的に検知し、歪計により増幅後、電磁オシログラフに記録する。中空試片内部に内圧を負荷するためゴム管を介してポンプを接続している。内圧は水銀マンノメーターにて検出する。プロフィールはL面側(湾曲内面側)長辺面が弛まないでロールに接する様に倒立させている。

なお歪ゲージ出力信号から歪量への換算は別途実施した引張り試験で得た較正曲線によった。

また曲げ/矯正変形と分離したバルジング変形単独の挙動を調べるために、水平プロフィールのロール配列を用いたテストを行った。ロールピッチの影響を見るために基本ロールピッチ50mmの2倍(100mm)、3倍(150mm)の条件もテストした。

ロールプロフィールは矯正歪テスト用は15点矯正と4点矯正の2通りでロールギャップ(厚み方向ロール間隔)は試片厚に等しい36mm, ロールピッチ(長手方向ロール間隔)は39.2-53.0mmである。また水平プロフィールではロールピッチ50mmである。ロール径は全て17mmである。

2.2 試片

試片の素材としてはほぼ線形に近い応力歪特性を有する弾性体の天然ゴムを用いた。試片の寸法は、矯正歪テスト用の湾曲試片はF面(湾曲外面)曲率半径429mm, 長さは1000

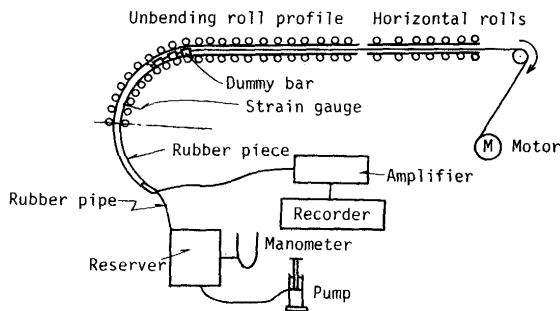


Fig. 1. Experimental apparatus.

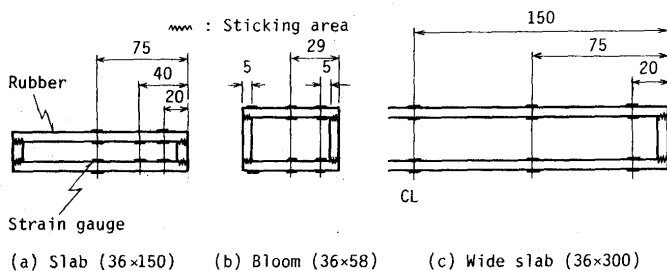


Fig. 2. Location of strain gauges in a transverse section at the medium longitudinal point.

mm, バルジング単独テスト用の水平試片は長さ1000mmである。試片の断面構造, 形状と寸法, 歪ゲージの貼付け位置をFig. 2 に示す。また長辺/短辺のシェル厚の組み合わせは3mm/10mm, 5/3, 5/5, 5/10, 10/10, 15/15の6通りである。

2.3 相似条件

シミュレーション実験に用いたゴム試片と矯正プロフィールは実鑄造条件と幾何学的に相似に製作してある。従って試片に働く主要な力の間に相似関係が成立すれば現象が相似になる⁸⁾。いま鑄片/ロール間の摩擦係数を実機と模型で同一値に揃えれば, 残る条件としては圧力pと変形抵抗 σ の比率を揃えれば良い。

$$\frac{p_{\text{模型}}}{p_{\text{実物}}} = \frac{\sigma_{\text{模型}}}{\sigma_{\text{実物}}}$$

簡単のため σ をヤング率で代表させる。

1300°C鋼のヤング率	約10000MPa
常温ゴムの "	約 20MPa
実機の溶鋼静圧(深さ3m)	約 0.2MPa

従って, ゴム試片内圧は, 約0.0004MPaで相似となる。実際には, 現象を顕著に抽出するため約0.0025MPaの内圧を与えており, これは相似条件を満たす値よりも大きい。しかし, 内圧の影響は換算可能であり, 特に問題は生じない。

3. 実験結果

ストランド内の歪分布はストランド全体にまたがるロングレンジの分布と, ロールピッチの周期で変動するショートレンジの分布の重ね合わせとして表現できる。前者は矯正に起因し, 後者はバルジング変形などに起因する。以下にそれぞれの変動および共存状態での変動について実験結果をまとめる。

ここで歪に関する用語を説明しておく。歪は公称歪を用いた。長/短辺部に発生する歪をそれぞれ長辺歪/短辺歪と呼んだ。また歪が位置/時間の関数で変化する鑄造中の高温未凝固鑄片の様な場合は, 割れ発生がロール間の歪差や歪の隣接する極大/極小値の差と対応するため単に歪と言えは慣用的にこれらの量を指す事がある。そのため歪の総量を強調する場合は紛らわしさを避けるため累積歪と呼んだ。歪の変化区間が矯正区間に対して広い場合, 歪が分散した状態と称した。

3.1 長周期歪変動 (多点矯正歪挙動)

中空帯の多点矯正挙動は以下の点で中実体の挙動と異なっている。

Fig. 3 は, 15点と4点の連続矯正の場合の累積歪の比較を示している。中実体においては矯正区間外への歪の分散は極めて小さい¹²⁾が, 中空体では無視できない。矯正点数の影響を見ると, 矯正点数の少ない4点矯正の場合のほうが分散範囲が広がっている。

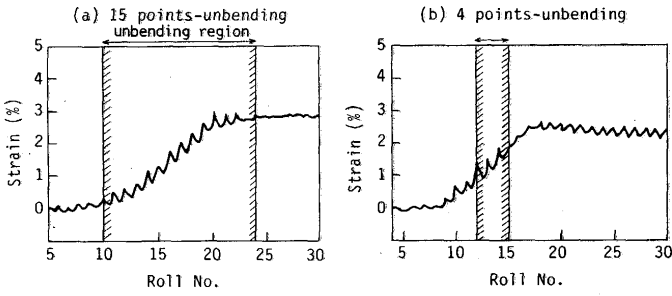


Fig. 3. Influence of number of unbending points on strain distribution.

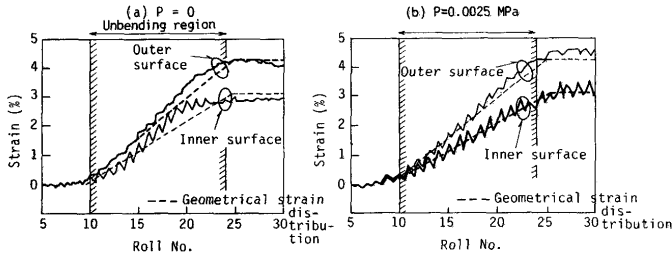


Fig. 4. Effect of internal pressure on strain distributions at outer and inner surfaces. (p: internal pressure)

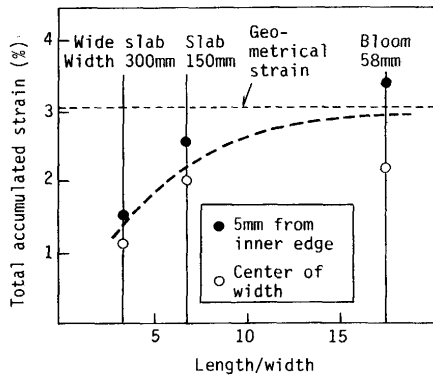


Fig. 5. Effect of slab width on the total accumulated unbending strain.

Fig. 4 は、内圧をかけない場合とかけた場合の各々について、中空体長辺シェル中央部の表面歪と内部歪を幾何学歪に対比して表したものである。

これから内圧がかかっていない状態では鑄片の歪は幾何学歪分布に沿わず、それよりも先行して上昇している（実線が点線より先行）事が分かる。内圧がかかった状態では長期トレンドが幾何学歪に近づいている。Fig. 5 は、長辺部総累積歪に及ぼす鑄片幅の影響を示している。幅が広くなるにつれエッジ部、中央部ともに総累計歪が減少している。これは短辺の剛性が一定のもとで長辺幅が大きくなると、短辺部に変形がしわ寄せされるため長辺部の歪が減少したものと解釈できる。

また中央部の歪はエッジ部に比較して小さい。この点はロールミスアライメント歪の場合⁹⁾と同様である。

3・2 短周期歪変動（バルジング歪挙動）

短辺からの拘束を受けにくい幅中央部において歪の測定値と弾性梁理論値を比較する。

両端 ($x=0, l$) 固定の弾性梁に一樣圧力 p が作用する場合、歪 ϵ と変位 δ は材料力学の梁理論から簡単に次式で与えられる¹⁰⁾。

$$\text{両端部引張歪 } \epsilon(0) = \frac{pl^2}{2Es^2} \dots\dots\dots (1)$$

$$\text{中心部圧縮歪 } \epsilon\left(\frac{l}{2}\right) = \frac{-pl^2}{4Es^2} \dots\dots\dots (2)$$

$$\text{中心部変位 } \delta\left(\frac{l}{2}\right) = \frac{1}{32} \frac{pl^4}{Es^3} \dots\dots\dots (3)$$

ここで p : 圧力 (MPa), E : ヤング率 (MPa),
 l : ロールピッチ (mm), s : 板厚 (mm)

Fig. 6 は、水平ロール中の試片の移動ともなって発生する歪分布を表す。ロール直下で引張り歪を生じ、ロール間で圧縮歪となる部分がありその比率は鑄片幅方向に変化している。

幅中央部においては(引張り歪) : (圧縮歪) = 2 : 1 となり、弾性梁による理論歪分布とほぼ一致する。

一方エッジ部では圧縮歪がほとんど発生しておらず弾性梁理論から外れた挙動をとる。これは短辺部分による変形拘束のためと考えられる。

Fig. 7 は、バルジング歪とバルジング量に及ぼす内圧の影響を表す。両者とも弾性体における理論式通り、ほぼ正確

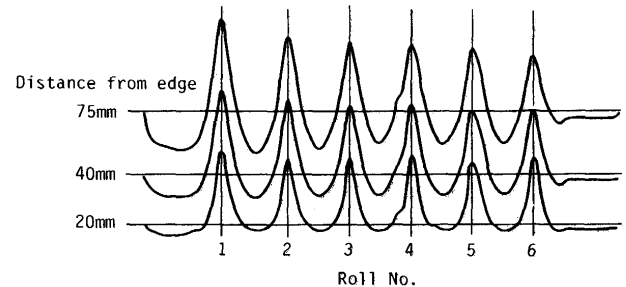


Fig. 6. Variation of bulging strain along the length of a test piece.

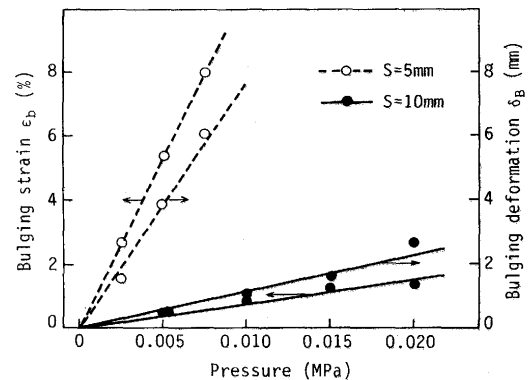


Fig. 7. Effect of internal pressure on bulging strain and deformation. (roll pitch=100mm, s: shell thickness)

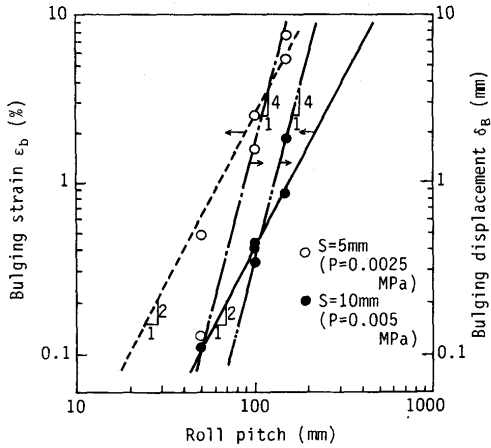


Fig. 8. Influence of roll pitch on bulging strain and deformation. (p: internal pressure, s: shell thickness)

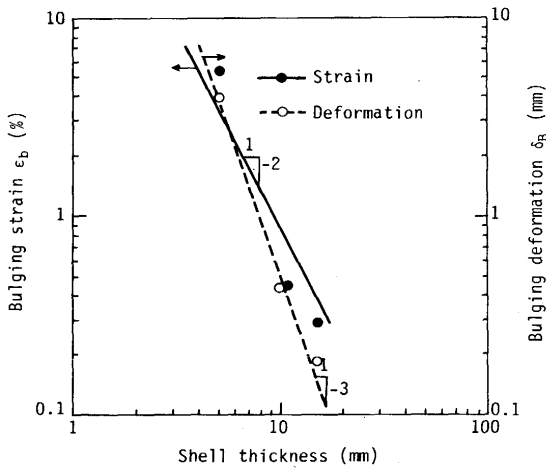


Fig. 9. Influence of shell thickness on bulging strain and deformation. (internal pressure p=0.005MPa, roll pitch=100mm)

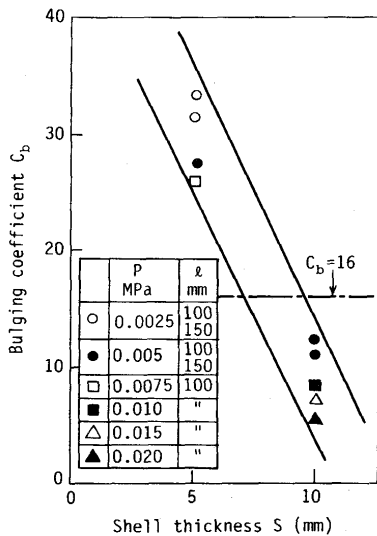


Fig. 10. Influence of shell thickness on bulging coefficient. (p: internal pressure, l: roll pitch)

に内圧に比例する。

ロールピッチ (l) の影響に関しては Fig. 8 のごとく、 $\epsilon_b \propto l^2$ 、 $\delta_b \propto l^4$ の関係が成立する。

またシェル厚 (s) の影響については、Fig. 9 のごとく、 $\epsilon_b \propto s^{-2}$ 、 $\delta_b \propto s^{-3}$ の関係が成立しており、l, s の影響はともに (1) (3) 式の弾性理論式に一致する。

この様に短辺からの拘束の弱い幅中央部においてはバルジング歪はほぼ弾性梁理論式に従う。

(1), (3) 式から

$$\epsilon(O) = C_b \frac{\delta \left(\frac{l}{2}\right) \cdot s}{l^2} \dots \dots \dots (4)$$

$$C_b = 16 \text{ (バルジング定数)} \dots \dots \dots (5)$$

Fig.10は、実測値を(4)式の形に整理して得たバルジング係数である。バルジング係数は一定値をとらず薄シェルになるほど増大する傾向がある。この理由として下記が考えられる(考察参照)。

(1) シェルが厚い場合、短辺部の拘束が幅中央部まで影響を与え易く、梁理論値 $C_b = 16$ よりも小さくなる。

(2) シェルが薄い場合曲げ剛性が小さくなり、弾性梁としてより膜としての挙動の要素が増大して、ロールに巻付く変形の効果により、梁理論値よりも大きくなる。

3・3 長短周期共存の歪変動

中空体の実験では内圧をかけない状態でも矯正時にバルジング歪に類似したロールピッチ(短)周期の歪が観察された。この歪に及ぼす諸要因の影響を検討した。

Fig.11は、スラブ形状の中空体において内圧=0で短辺シェルの厚さをほぼ一定に保って長辺シェル厚を変えた場合の、矯正帯通過時の歪分布(変動)を表す。矯正帯(15点矯正: 図中10-24番ロール)における長周期の歪分布に加え

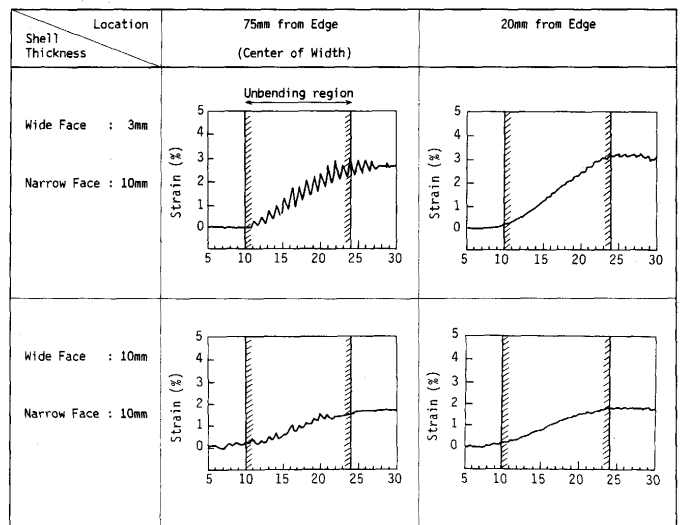


Fig. 11. Influence of wide face shell thickness on strain distribution in an unbending region without internal pressure (15 points unbending).

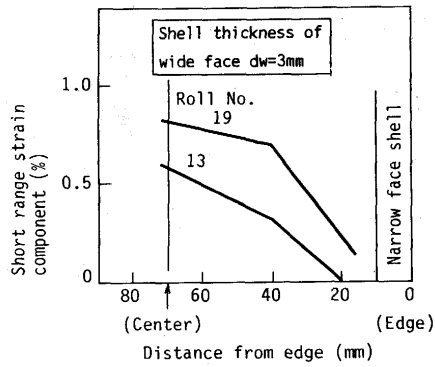


Fig. 12. Distribution of short range strain component along the width of a test piece without internal pressure.

て、内圧=0にもかかわらずロールピッチ毎の短周期変動が重畳している。この歪は内圧=0であるからバルジング歪ではなく新種の歪であるが、その振幅は長辺シェル厚が薄いほど、またエッジ部から離れるほど大きいというバルジング歪に似た性質を持つ事が分かる。

スラブ形状で内圧=0の場合の歪の短周期成分の振幅の幅方向分布をFig.12に示す。この図からスラブ形状においては歪の短周期成分はエッジに近くなるほど減衰する事が分かる。

4. 考察

中空体の歪挙動の特徴としてエッジの影響がある事、ロール直下の中空体内面側に引張り歪が発生する事、異なる種類の歪が重畳する事が挙げられる。これらについて考察したい。

4.1 Shear Lag

中空体においては矯正歪やロール・ミスアライメント歪は主としてロールにより鑄片短辺部が変形する事に起因して発生し、これが長辺内を伝播するという形態をとるために短辺近傍の歪が幅中央部の歪に較べて大きくなる。この様な長辺内での歪分布の差をShear Lagと呼ぶ事にする。中空体の矯正歪挙動において中実体のそれと異なる部分の多くはこのShear Lagにより説明できる。

Fig. 5の様に幅中央部の矯正歪がエッジ部に比較して小さいのはこの事を示している。

Fig. 3において矯正点数の少ない方が歪が矯正帯の周囲にまで分散するのは、総累計歪を同一に揃えているため、矯正点数の少ないほうが短辺部の一段当たりの矯正歪が大きくなり、Shear Lagの影響範囲が拡大したものと考えられる。

さらにFig. 4においては3.1で述べた様に内圧がかかると鑄片の歪が中実体歪分布に沿うが、内圧=0ではこれよりも先行する。これは内圧がないと長辺面がロールに押し付けられずShear Lagによる幅方向の歪分布のずれ変形が拘束

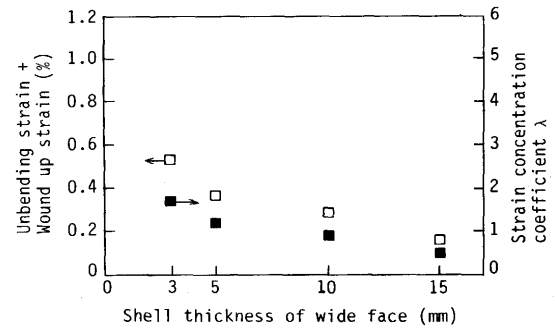


Fig. 13. Influence of wide face shell thickness on strain concentration coefficient.

を受けないが、一方内圧がかかればロールによる長辺変形の拘束のため、幅方向の不均一が抑えられると考えられる。

4.2 巻付き歪

3.3で述べた様に矯正時のロールピッチ(短)周期歪変動成分(Fig.11)はバルジングによるものではない。この歪はシェル厚が薄いほど大きく(Fig.11)、エッジ近傍では減衰する(Fig.13)という性質を持つ。

これらの実験事実に対し以下に力学的な検討を加える。ストランドの湾曲部において薄いシェルに矯正などの原因により引張り力がかかるとシェルは最短経路をとろうとしてロール近傍での曲率が上がりロール中間での曲率が下がる。そのためあたかもシェルがロールに「巻付く」様な形態となる。この歪を巻付き歪と呼ぶ事にする。歪エネルギーの面から考察すると、シェルが薄いほど(引張り歪エネルギー/曲げ歪エネルギー)の比が大きくなり全体経路長を短くしようとする変形すなわち巻付きモードの変形が発生する。ロール近傍でのシェルの曲率は引張り力が高いほど、ストランド湾曲の曲率半径が小さいほど、またシェル厚が薄いほど大きくなり歪もこれに比例する。この様なモードの変形は中空鑄片の幅中央部で顕著に発生しエッジ近傍では短辺による拘束が強いためシェルの曲率分布は中実体の曲率分布に近づく。

巻付き歪の存在による歪増大率 λ を次式で定義する。

$$\lambda = \frac{\text{矯正歪} + \text{巻付き歪}}{\epsilon_{w0}} \quad \dots\dots\dots (6)$$

ただし ϵ_{w0} : 連続梁外部表面歪

Fig.13は15点矯正(10-24番ロール)プロフィールにおいて、10~11番ロール位置における歪と歪増大率 λ の測定値を表している。シェルが薄くなるほど λ は大きくなり、Fig.13から5mm以下の薄シェル状態では歪増大率=2、すなわち矯正歪と同程度の巻付き歪が発生する事が分かる。

4.3 加法性と総合歪

Fig. 4 (b)は中空体に内圧がかかった状態での、矯正帯(15点矯正)における歪分布を示すが、矯正帯全体にまたがるロングレンジの分布にロールピッチ周期のショートレンジの分布が重畳している。ロングレンジの成分は中実体の実

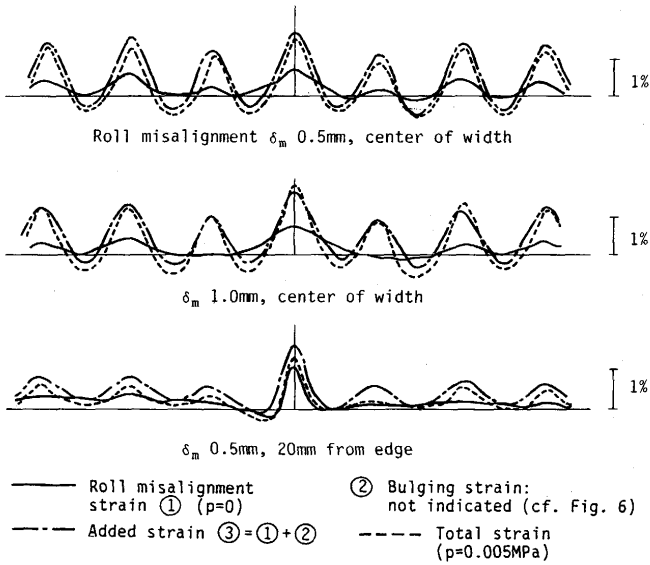


Fig. 14. Additivity of roll misalignment strain and bulging strain.

験と理論両面から確認された矯正歪¹²⁾であり、ショートレンジの成分はFig. 6に示した純粹のバルジング歪や巻付き歪などで構成されている。

Fig.14は、バルジングとミスアライメントの共存した状態での歪波形と、それぞれ単独に存在する場合の歪波形を重ね合わせた波形を比較したものである。図にはミスアライメント量と幅方向位置の異なる組み合わせを示している。共存時の波形(破線)と合成波形(一点鎖線)の形状はほぼ一致する。この事から、ゴム試片においてバルジング歪とミスアライメント歪の加法性がほぼ成立する。

以上のことから応力歪特性がほぼ線形な場合は歪の加法性が成立し、ロングレンジ/ショートレンジによらず矯正/バルジング/ロールミスアライメントなど異なる種類の歪の合成が可能となる。従来、矯正歪に関して応力歪特性が線形の場合にはロール位置の変位量と歪の大きさの間に線形関係が成立する事が判明していた¹²⁾が、中空体実験により異なる種類の歪の加法性が確認できた。この事により発生する全種の歪を合計した総合歪の推定が個々の歪の値から計算する事が可能となる。しかし鑄片の割れ発生の可能性を判定するためには、ストランド全域の歪分布曲線をどの様な量で指標化するかが重要である。従来の主要な考え方は、歪分布曲線の隣接する極小点から極大点までの歪の落差を割れの指標として用いるべきであるとするものである。この考え方に従えば、指標の大きさは各種歪のロールピッチ間での位相差の影響を強く受けるので、個々の種類の歪毎の最大落差の合計では決まらない。従って全ての歪が共存した状態での中空体模型によるシミュレーション実験の歪分布が割れ発生の推定に重要な役割を果たす。

5. 結論

中空試片を用いた模型実験において変形中の歪みを連続的に測定する事により、未凝固鑄片のストランド内での変形/歪挙動のシミュレーションが可能になった。これにより従来の中実体模型実験や梁理論では不明であった新しい変形挙動が明確になった。

(1)バルジング歪に関しては短辺からの拘束を受けにくい幅中央部においてはほぼ弾性梁理論式と諸要因の影響次数が一致する。すなわち、ロールピッチについては $\epsilon_b \propto l^2$ 、 $\delta_b \propto l^4$ 、シェル厚については $\epsilon_b \propto s^{-2}$ 、 $\delta_b \propto s^{-3}$ の関係が成立する。エッジ部では圧縮応力はほとんど発生しないため1ロール区間内でのバルジング歪の振幅が小さくなる。またバルジング係数は弾性梁理論から求められる一定値と異なる値をとり薄シェルになるほど増大する。

(2)Shear Lagにより鑄片幅方向位置により矯正歪量に大幅な差があり、エッジ近傍で大きく幅中央部で小さい。また幅中央での矯正歪は鑄片幅が広いほど小さくなる。総矯正歪量一定の条件下では矯正点数が少ないほど幅中央部の歪は矯正区間に比べて広い範囲に分散される。

(3)ストランドの湾曲部において薄シェルに矯正などの原因により引っ張り力がかかると内圧がかかっていなくてもロールピッチに一致した周期の歪が発生する。この歪は新種の歪であり「巻付き歪」と名付ける。この歪の大きさは矯正歪とシェル厚に依存し(薄いほど大きい)、等価的には矯正歪が増大したものと見なせるので、これを実験的に定量化した。

(4)異なる種類の歪の間に加法性が成立する。従って総合歪を各歪から合成する事が可能となるが、各々の歪の変化には位相差があるので、割れの指標を得るためにはロール間での連続歪分布を求める必要がある。

以上の様に中空体の変形挙動をシミュレーション実験により明確にし、これにより鑄片の歪推定精度を向上させ、連鑄機設計の基本指針を提示する事が出来た。

文 献

- 1) 安田一美, 林田道弥, 伊藤幸良, 梶岡博幸, 長田修次: 連続鑄造における力学挙動(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), p.160
- 2) 安田一美, 長田修次, 伊藤幸良, 梶岡博幸: 鉄と鋼, 74 (1988), p.1298
- 3) 藤井博務, 大橋徹郎, 広本 健: 鉄と鋼, 62 (1976), p.1813
- 4) K.Miyazawa and K.Schwerdtfger: Ironmaking and Steelmaking, 6 (1979), 2, p.68
- 5) 府川幸平, 松本紘美, 中島浩衛: 鉄と鋼, 68 (1982), p.794
- 6) 松宮 徹, 梶岡博幸, 中村 泰: 製鉄研究, (1982), 310, p.402
- 7) A.Vaterlaus, M.Poran and M.Wolf: 鉄と鋼, 68 (1982), p.S988
- 8) 江守一郎, D.J.シューリング: 模型実験の理論と応用, (1973), p.21 [技報堂出版]
- 9) 長田修次: 京都大学工学部博士学位論文, (1986)
- 10) 例えば, 吉識雅夫, 金沢 武: 材料力学明解, (1964), p.144 [養賢堂]