縦型双ロールキャスト法は“Casting & Rolling”か“Roll Casting”かに関する検討

群馬工業高等専門学校　機械工学科
准教授　高山　雄介
（2023 年度 奨励研究助成（若手研究者枠） AF-2023046-C2）

キーワード：縦型双ロールキャスト法，柱状晶，塑性変形

１．研究の目的と背景

双ロールキャスト法とは，回転する一対の冷却ロール間に溶湯を流し込むことで，一工程で金属薄板を作製可能な鋳造法である．本手法は板の排出方向からおおまかに横型と縦型に分類される[1)]．板が水平方向に排出される横型は，ロールの回転速度を抑えて溶湯との接触時間を確保し，ロールギャップよりも厚く成長させた板を両側固定のロールで圧延し板を作製するため，“Casting & Rolling”と通称されることもある．一方の縦型は図1に示すように，ノズルでロール上部に溶湯を貯め，静水圧で溶湯とロールの密着性を高め凝固殻の成長を促進させる．このため横型と比較してロール回転速度を早くしても凝固殻の成長量が担保される．このため凝固殻がロールギャップを通過する際に，ロールと凝固殻の密着性が担保されていれば良いため片側がバネ固定となっていることが多い[1)]．ゆえに，縦型ではロールと板材との接触面圧が小さく，板材はほとんど圧延されないというのが通説である．しかし，ロール表面から成長した凝固殻が，実際にどれほどの荷重を受けているかを検証した研究は，ほとんど報告されていない．

そこで本研究では，縦型双ロールキャスト法により作製した純 Al 板を対象とし，数値解析により板内部の応力分布を評価する．さらに組織観察および硬さ試験を行い，バネ荷重の違いが板内部の組織形成に及ぼす影響を調査する．これらの結果から，縦型双ロールキャスト法は“Roll Casting”なのか，または横型のように“Casting & Rolling”なのかを明らかにすることを目的とする．

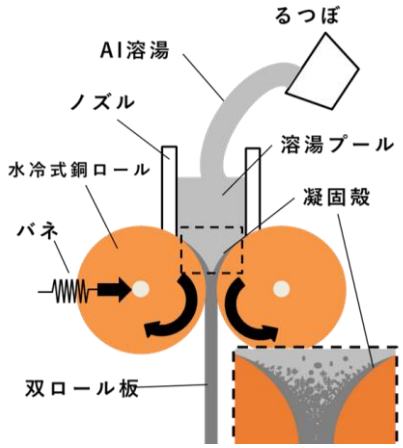


図1　縦型双ロールキャスト法の模式図

２．研究方法

2・1　数値解析

ロールギャップ通過時の板内部の応力分布を調査するため，有限要素法を用いた解析ソフト Simufact Forming 2024 を用いて，二次元平面における伝熱構造解析を行った．本解析ソフトには凝固成長を再現する機能はないため，溶湯モデルに温度依存の高温強度などの物性値を与えて，凝固直後の高温の凝固殻がロールギャップを通過する際のロールとの接触状態を簡易的に再現することを試みた．解析には本研究で対象としている縦型双ロール鋳造の実機をもとに，SolidWorks によって作成した直径 300 mm，幅 100 mm のロールと，図1の溶湯プールに相当する部分を再現した溶湯モデルを用いた．これらのモデルにおいて，板幅方向の中央断面で表1に示す条件で二次元解析を行った．また実機では片側のロールはバネ固定だが，本解析では解析の簡略化のために両側固定のロールとしている．

材料モデルとしては熱力学計算ソフト Thermo-Calc を用いて，表2に示す工業用純 Al(A1070)の組成を入力し，温度依存の熱物性値および力学特性を算出した．これらの物性値を Simufact Forming に反映させ，凝固直後からの温度低下を考慮した材料モデルを構築し，縦型双ロールキャスト法における鋳造挙動を模擬した．

表1　解析条件

ロール周速	60 m/min
メッシュ要素サイズ	0.5 mm
ロール初期温度	20 ℃
溶湯モデル材種	工業用純 Al (A1070)
溶湯モデル初期温度	660 ℃

表2　工業用純 Al(A1070)の組成

(wt %)

Si	Fe	Cu	Mn	Ti	Al
0.15	0.20	0.01	0.02	0.02	Bal.

2・2　供試材作製

実機での双ロール鋳造にも表２に示すA1070合金を使用した．また表3に鋳造条件を示す．ロールと凝固殻の接触面圧を変量した際に，板内部の応力分布に及ぼす影響を調

査するために，バネの初期縮みを変量することで初期ロール荷重を 0，20，40 kN の 3 水準とし，それ以外は全て同一の条件で鋳造を行った．なお，実機での鋳造は東京電機大学の原田准教授の研究グループに協力を依頼した．

作製した純 Al 板材の外観の例を図2に示す．それぞれの荷重で作製した幅約 100 mm，長さ約 4 m の板材のうち板厚が安定しない前後の 1 m ずつを除いた 2 m の板厚定常部から以降の試料を採取した．また，光沢部および非光沢部の各模様に対して，無作為に選定した 5 箇所の板厚をマイクロメータで測定して平均値を算出した．

表3　縦型双ロールキャスト法における鋳造条件

ロール周速	60 m/min
凝固距離	100 mm
溶湯高さ	100 mm
初期ロールギャップ	1 mm
初期ロール荷重	0，20，40 kN
注湯温度	680 ℃

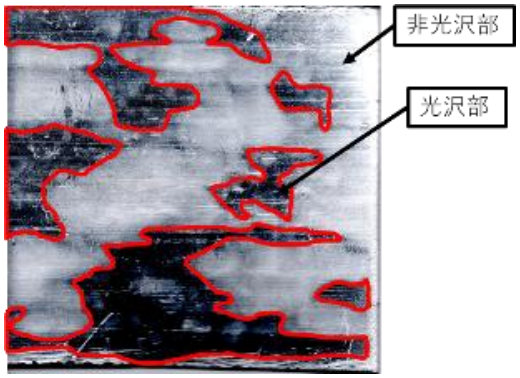


図2　純 Al 双ロール材の外観(100 mm×100mm)

2・3　組織観察

板内部の組織が応力分布や硬さ分布に及ぼす影響を調査するため，断面組織の観察を行った．板材表面の光沢部および非光沢部の模様に対して埋め込み試料を作製し，エメリー紙による機械研磨および OPS による鏡面仕上げを行い，3 %HBF_4水溶液により DC24 V，90 秒間の陽極酸化処理を行った．陽極酸化を行った試料をデジタルマイクロスコープで観察した．

2・4　ビッカース硬さ試験

板厚や板表面模様によって硬さに違いがある可能性を調査するため，各バネ荷重で作製した純 Al 板の光沢部および非光沢部に対して，厚さ方向でビッカース硬さを測定した．表 4 に，測定条件を示す．測定は先述の組織観察を行ったのと同じ板断面において，両側の板表面近傍，両側の凝固殻厚さ中心付近，板厚中央の計 5 箇所で実施し，各位置についてランダムに 5 点ずつ測定した．

表4　硬さ測定条件

試験力	490 mN
保持時間	10 sec
測定点数	1 条件あたり 25 点

3. 事件結果ならびに考察

3・1　数値解析結果

図3に溶湯モデルにおける各種解析結果を取得するために配置した計測点を示す．またこの計測点で得られたロールギャップ通過時における，板中央（A 点）から板表面（D 点）で取得された相当応力を図4に示す．これより，板表面近傍で相当応力が高く，板厚中央に向かって低下することが確認された．すなわち凝固直後の高温でロールギャップを通過する際にも，一般的な圧延の場合と同様に，ロールと直接接触する板表面付近において応力が高くなる可能性があることがわかった．

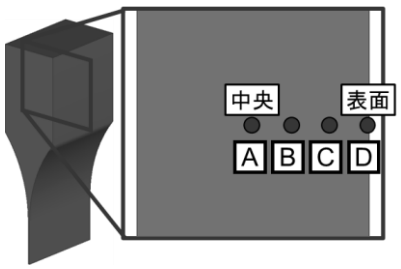


図3　溶湯モデルにおける測定点の配置

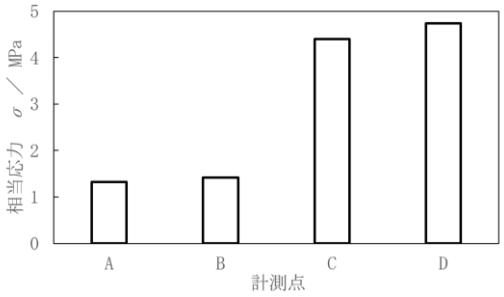


図4　ロールギャップ通過時の相当応力分布

3・2　組織観察結果

表5に各バネ荷重で作製した板材の光沢部および非光沢部の板厚を示す．これより，いずれのバネ荷重においても光沢部より非光沢部のほうがわずかに板厚が大きいことが確認できた．また，バネ荷重が大きくなると板表面模様によらず，板厚が小さくなることが確認できた．

表5　板厚測定結果(mm)

バネ荷重	光沢部	非光沢部
0 kN	2.78	2.86
20 kN	2.54	2.56
40 kN	2.35	2.40

図5から図7にそれぞれ 0，20，40 kN のバネ荷重で作製された板材の光沢部，非光沢部に対する光学顕微鏡観察結果を示す．いずれの条件においても，板表面近傍では急冷により微細なチル晶が形成されていた．一方，内部では板表面から板厚中央方向へ成長した柱状晶が確認された．光沢部と非光沢部を比較すると 20 kN の光沢部では，両表面から成長した柱状晶が板厚中央部で合体した領域において，非光沢部には見られない粒状晶が部分的に確認された．また，40 kN の光沢部では，両側の凝固殻が合流する板厚中央付近に大きな割れが確認された．

一方，バネ荷重の違いによる柱状晶の成長形態には大きな差異が確認されなかった．そこで，各条件における柱状晶の違いを定量的に評価するために幅を推定した．まず板表面付近のチル晶がおおむね全て柱状晶となる表面から 300 μm(A)と，片側の凝固殻の半分の厚さに相当する表面から 500 μm(B)の位置に線を引く．続いて線と交わる柱状晶の粒界の数で線の長さを割ることで，平均の柱状晶幅を算出した．図 8 にバネ荷重 0，20 kN で作製した板材の柱状晶幅を示す．いずれの荷重，模様においても，板表面付近(A)の方が凝固殻厚さ中央付近(B)よりも幅が小さくなっているが，これはより表面に近い A において冷却速度が大きいためであると考えられる．一方で，先行研究では非光沢部の方が凝固殻が厚く成長しているため，冷却速度が速くなると考察されている[2]．これに基づくと非光沢部の結晶粒が微細になり，柱状晶の幅が小さくなると予想されたが，A，B ともにいずれの模様でもわずかではあるが非光沢部の方が幅が大きくなっていた．ただしこれが有意な差であるかについては，さらなる検討が必要である．

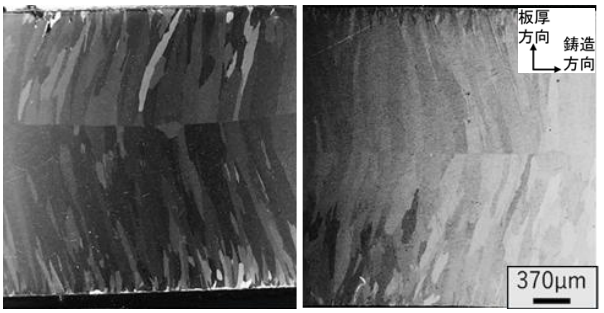


図5　0 kN で作製した板断面組織

左：光沢部　　右：非光沢部

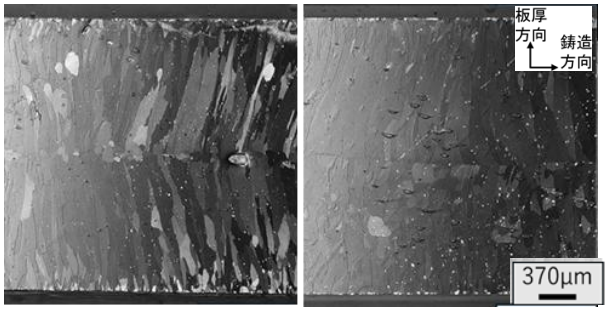


図6　20 kN で作製した板断面組織

左：光沢部　　右：非光沢部

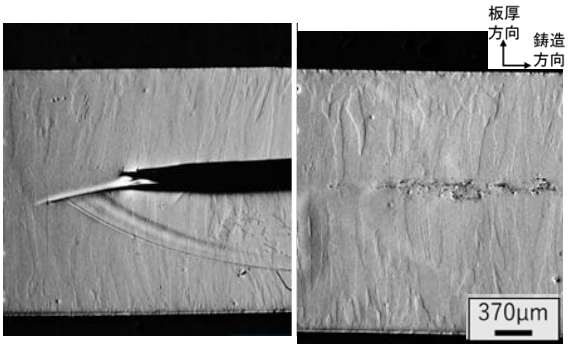


図7　40 kN で作製した板断面組織

左：光沢部　　右：非光沢部

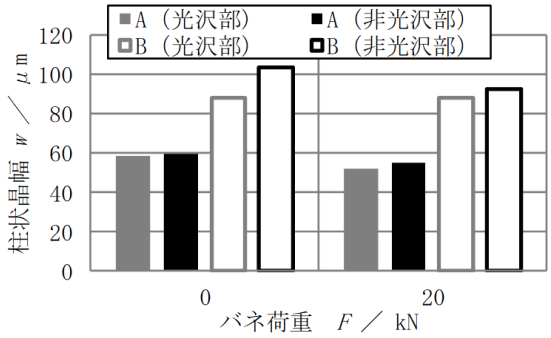


図8　0, 20 kN で作製した板材の柱状晶幅

3・3　ビッカース硬さ試験結果

バネ荷重 0，20，40 kN で作製した板材の片側板表面を 0 mm として，同一の板厚方向距離において試料内で 5 点ずつ測定した硬さの平均をそれぞれ図9から図 11 に示す．荷重および模様に応じて総板厚が異なるため，横軸のプロットには差異が生じている．また比較として市販の板厚 2 mm の A1070 熱間圧延材の硬さ分布を図12に示す．これより，双ロール材は熱間圧延材と比較して 40 HV 程度硬さが小さいが，バネ荷重によらず板厚中央に向かって硬さが低下するという傾向は同様であった．またこうした傾向は数値解析により得られた相当応力分布と定性的に一致しており，ロールギャップ通過時の応力状態に応じて加工硬化による硬さの上昇が発生している可能性が考えられる．

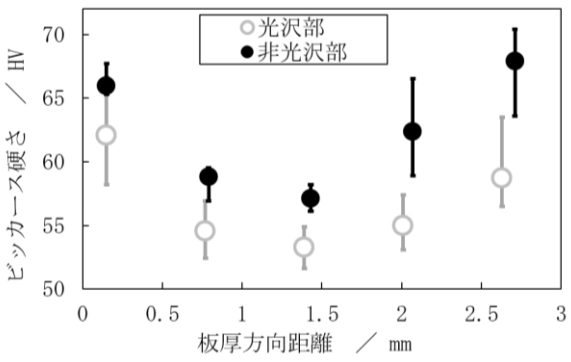


図9　0 kN における板厚方向の硬さ分布

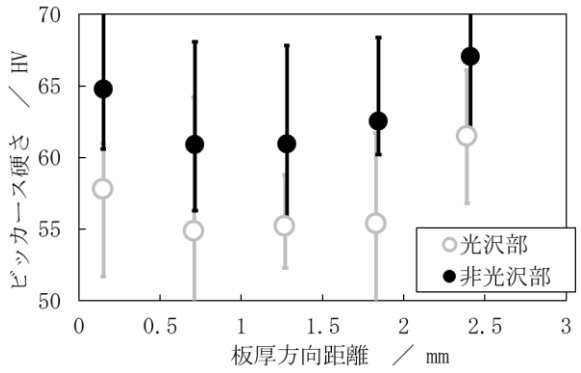


図10　20 kN における板厚方向の硬さ分布

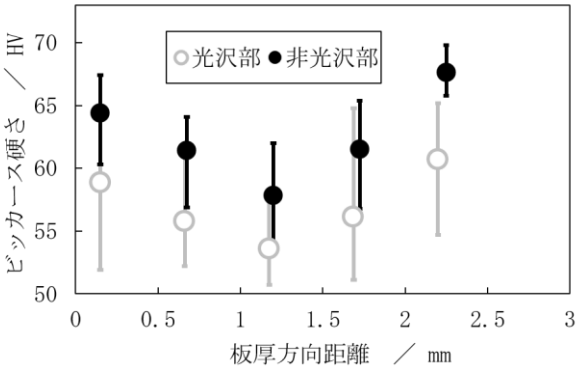


図11　40 kN における板厚方向の硬さ分布

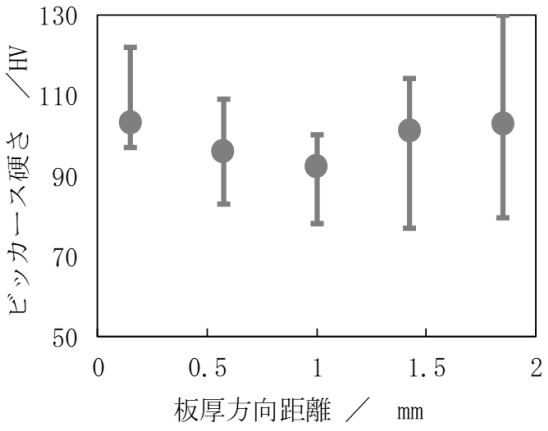


図12　A1070 熱間圧延材（板厚 2 mm）の硬さ分布

続いて図13に，バネ荷重ごとの全測定点の硬さの平均値と板厚の関係を示す．これより，バネ荷重の増加に伴い板厚は減少する一方で，板断面の硬さの平均値はバネ荷重による顕著な変化を示さず，板表面の模様への依存度が大きい傾向が確認できた．個別の荷重で比較すると，非光沢部の方がやや厚いため，ロールギャップ通過時にロールと板との接触面圧が高くなり，加工硬化の影響により非光沢部の方が硬くなる傾向は納得が出来る．しかしながら，荷重別で比べると，同荷重の光沢部・非光沢部の板厚の違いよりも顕著な板厚差が生じていることから，単純に板厚差＝加工硬化の量とは捉えられず，他の要因がある可能性も考えられる．以上の結果より，縦型双ロールキャスト法においても圧延と同様の板厚方向の硬さ分布が見られたため，ロールギャップ通過時の接触面圧に起因する塑性変形が板内部に生じている可能性があることがわかった．しかしながら，そうした硬さの分布がいわゆる圧延によるもののみであると結論付けることは現段階では困難である．

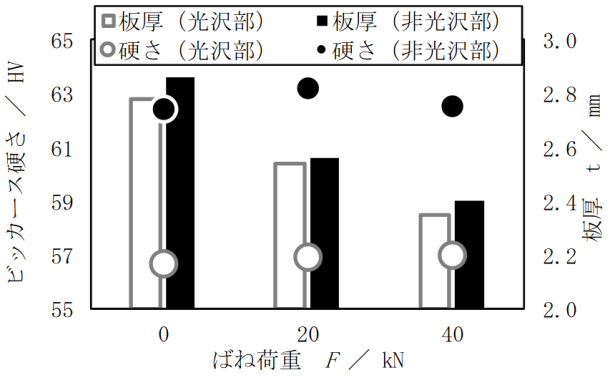


図13　各バネ荷重の全測定点の硬さ平均値と板厚

4. 結言

本研究では，縦型双ロールキャスト法によって作製した純 Al 板を対象として，ロール圧下による塑性変形が板材内部に生じているかを明らかにすることを目的として検討を行った．0，20，40 kN のバネ荷重で作製した板材について硬さ試験を行った結果，硬さ分布はバネ荷重の違いよりも板表面に形成された模様に強く依存する傾向を示した．また，板厚はバネ荷重の増加に伴い減少する傾向が確認された．数値解析では，ロール接触部近傍に高い応力が発生し，解析で得られた応力分布は双ロール鋳造板の硬さ分布と定性的に一致した．

以上の結果から，縦型双ロールキャスト法は通説とは異なり「わずかに圧延されている」可能性があることがわかったが，横型のように“Casting & Rolling”であるとは断定できず，今後さらなる検証が必要である．

謝　辞

本研究は，公益財団法人天田財団による奨励研究助成（若手研究者枠）の助成を受けて実施されました．ここに厚く御礼申し上げます．また，縦型双ロールキャスト法による板材作製にご協力頂きました東京電機大学の原田准教授と学生の皆様に感謝申し上げます．

参考文献

1)　T. Haga, K. Takahashi. M. Ikawa, H. Watari:J. Mater. Process. Technol., 610-615 (2003), 140.
2)　高山雄介，小林拓実，柴﨑零，古崎友暉，山内啓，黒瀬雅詞：鋳造工学，615-621 (2025)，75.