

# 安価で内部欠陥が無い高成形能 Al-Mg 板の作製が可能な 「高速双ロールキャスター・インライン圧延法」の開発

大阪工業大学 機械工学科  
教授 羽賀 俊雄

(2018 年度 一般研究開発助成 AF-2018027-B3)

キーワード：Al-Mg 合金板，高速双ロールキャスター，インライン熱間圧延

## 1. 研究の目的と背景

現在，DC 鋳造・熱間圧延・冷間圧が Al 合金板を作製する方法の主流である。Al-Mg 合金板は成形性が高く，自動車のインナーパネルなどに使用されている。Al-Mg 合金は，DC 鋳造時に鋳造割れを発生し易い。Al-Mg 合金は硬いため，耳割れを発生し易く歩留が低い。双ロールキャスターは，溶湯から直接薄板が作製可能であるため DC 鋳造と熱間圧延の設備が不要となる。したがって製品の低コスト化が可能になる。DC 鋳造時の鋳造割れへの対応も必要ない。しかし，双ロールキャスターにも欠点がある。それは，板の鋳造速度が遅い，Al-Mg 板では表面には割れが発生し易い，中心線偏析が発生し Al-Mg 合金では著しい，である。申請者らは Al 合金の高速双ロールキャスターを提案し，従来の Al 合金用双ロールキャスターの 30 倍以上の鋳造速度を達成した。しかし，表面割れや中心線偏析は改善できなかった。そこで，インライン熱間圧延により表面割れや中心線偏析を改善することを検討した。インライン熱間圧延の可否，表面割れに対する熱間圧延温度と圧下率の影響などを調査した。

## 2. 双ロールキャスターとインライン熱間圧延

従来の双ロールキャスターと高速双ロールキャスターでインライン熱間圧延を行う場合を比較した。従来の Al 合金用双ロールキャスターで DC 鋳造と同じ生産量を得るためには複数台の双ロールキャスターと熱間圧延機が必要となる。また，熱間圧延機の圧延速度を考慮すると，双ロールキャスターで鋳造した Al 合金板の複数のコイルを加熱し熱間圧延を行う方法も考えられる。熱間圧延機に必要とする費用は少なくなる。しかし，再加熱した板を熱間圧延したものとインライン熱間圧延したものが，表面割れや中心線偏析に対する改善効果が同じであるか，疑問である。少なくとも，表面割れは，表面の酸化が進み，圧着し難くなると考えられる。加熱炉も必要である。これに対し，高速双ロールキャスターであれば，必要な熱間圧延機は 1 台であり，加熱用の炉も必要ない。インライン熱間圧延は，設備費用を考慮すると，高速双ロールキャスターにおいてその有効性は高いと考えられる。

## 3. 実験方法

Al-Mg 合金として AC7A を使用した。AC7A は鋳造用合金であるが，塑性加工に使用される 5182 と成分が近く，インゴットでの購入が可能なのである。AC7A の成分を表 1 に示す。

表 1 AC7A の成分(mass%)

Mg	Si	Fe	Zn	Mn	Al
4.83	0.10	0.12	0.01	0.47	Bal.

約 3 kg の AC7A を黒鉛のつぼと電気炉を使用して大気中で溶解した。つぼを高速双ロールキャスターに移動し，つぼから樋を介して高速双ロールキャスターの下ロール面上に注湯した。

高速双ロール鋳造・インライン熱間圧延のモデル実験の模式図を図 1 に示す。高速双ロール鋳造で作製した板を搬送用のころの上から引き出し，約 200mm に切断しインライン圧延用の試験片とした。試験片の温度を測定し，所定の温度で熱間圧延を行った。

高速双ロールキャスターとして縦型高速双ロールキャスターと異径双ロールキャスターを提案し，特性を調査してきた。本研究では，搬送が容易である異径双ロールキャスターを使用した。図 1 に示す異径双ロールキャスターでは，上下のロール径はそれぞれ 300mm と 1000mm，幅は 100mm とした。ロール材質は高速双ロールキャスティングを可能にするために熱伝導率が大きく冷却能が高い銅とした。従来の Al 合金用双ロールキャスターのロール材質は，熱間加工用の工具鋼である。従来の双ロールキャスターでは，Al 合金板のロールへ固着を防ぐために，黒鉛系の離型剤をロール面に噴霧する。銅ロールを使用すると，ロール面温度が固着温度まで上昇せず固着が起らないので，離型剤は使用しなかった。離型剤は，溶湯とロール間の熱抵抗になるため，使用しない方が，高速ロールキャスティングに有利になる。異径双ロールキャスターは内製した。

圧延機は，DBR70（大東製作所製）を使用した。鋳造板の全幅を圧延することは，モーター出力が足りず不可能であった。そこでロール形状を凸型とし，凸部の幅（圧延する幅）を 20 mm とし，鋳造板の中央を圧延した。従来のア

ルミニウム合金用双ロールキャスターのロール周速は、通常 2 m/min 以下であるのに対し、本研究では 60 m/min とした。 casting時のロール荷重は、3, 13, 83, 167 N/mm とした。一般的なアルミニウム合金用双ロールキャスターの casting 荷重は、500N/mm 以上であるので、本研究のロール荷重は大変小さい。注湯温度は、720℃とした。熱間圧延の度は、300, 350, 400, 450, 500℃とした。熱間圧延の圧下はおよそ 10~50 %とした。

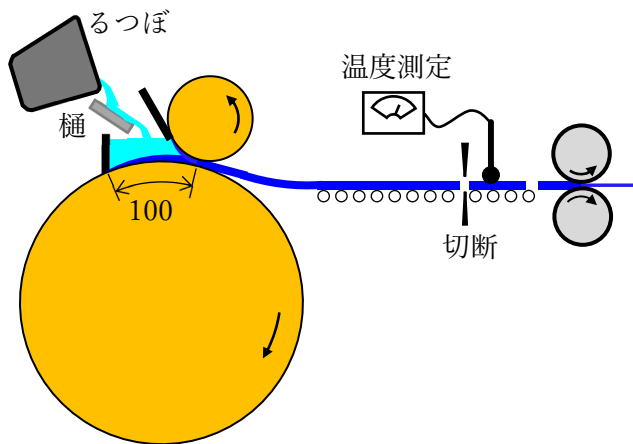


図1 異径双ロールキャスターを使用したインライン熱間圧延のモデル試験の模式図。

#### 4. 実験結果

##### 4.1 鋳造板の冷却曲線

鋳造板は空冷されるが、時間の経過と温度の関係は不明であった。そこで鋳造板の冷却曲線を求めた。結果を図2に示す。

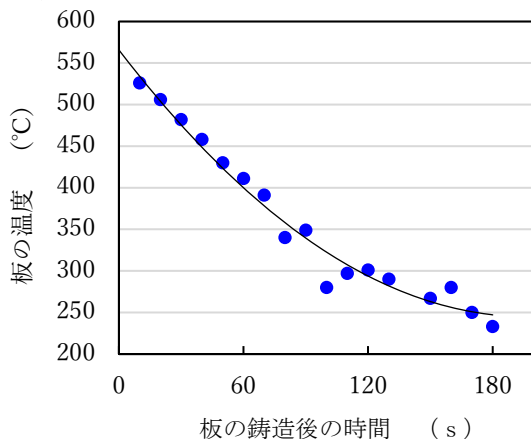


図2 鋳造板の冷却曲線

鋳造板の温度は 20 秒後に 500℃、60 秒後に 400℃である。周速 60 m/min は 1m/s であるから 500℃で熱間圧延する場合でも、キャスターと熱間圧延機の間隔を 20 m ほど取ることができる。実装業においても各種設備を設置するために十分な距離であると考えられる。

##### 4.2 鋳造板の表面割れに対する鋳造時のロール荷重の影響と熱間圧延による表面割れの改善

鋳造板の表面割れに対する鋳造時のロール荷重の影響、インライン熱間圧延による表面割れの改善を図3に示す。カラーチェックにより割れを確認した。鋳造板の割れは、ロール荷重が高くなるほど顕著になった。割れは、図4に示すように粒界で発生していた。インライン熱間圧延の温度が 350℃、鋳造時のロール荷重が 83, 167 N/mm の場合は割れがインライン熱間圧延後も確認できた。また、鋳造時のロール荷重が 3N/mm、インライン熱間圧延の温度が 500℃の場合は、板が破断した。板の内部が完全に凝固しておらず、延性が低くその結果破断したと考えられる。上記以外の条件では、鋳造時の板の表面割れは改善することができた。

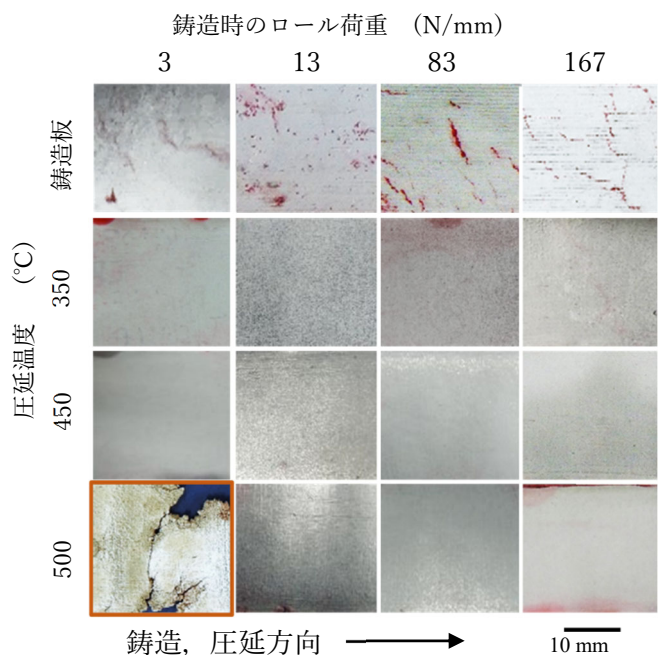


図3 鋳造板の表面割れに対するロール荷重の影響、およびインライン熱間圧延による表面割れの改善。注湯温度 720℃、インライン熱間圧延の圧下率：40%

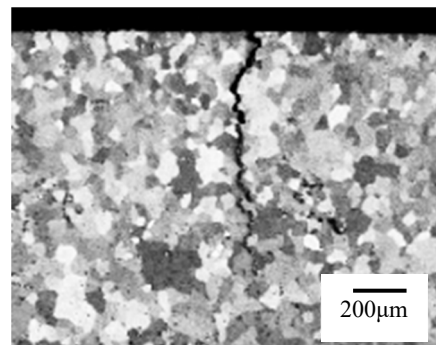


図4 鋳造板の表面割れ近傍の断面

注湯温度を下げることで圧延温度が 500℃の場合でも内部の固相率が高くなる可能性があると考えた。そこで注湯温度を 720℃から 670℃とした。その結果、図 5 に示すように破断せずに熱間圧延を行うことができた。

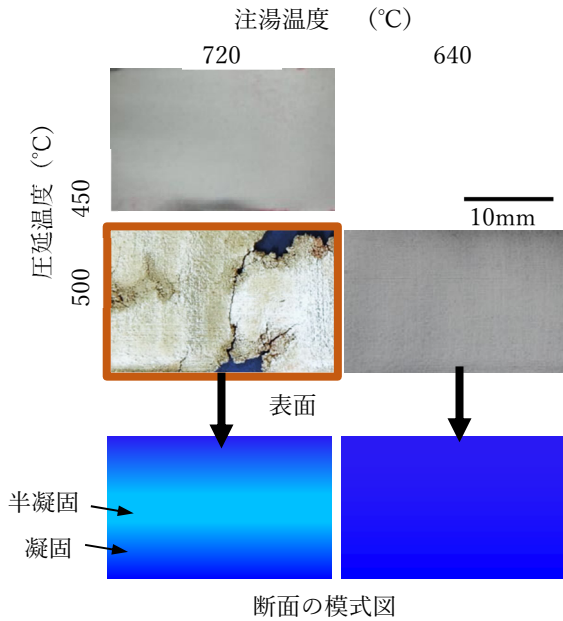


図 5 熱間圧延時の破断に対する注湯温度の影響

### 4.3 板の表面状態

鋳造板およびインライン熱間圧延板を冷間圧延した場合の表面状態を図 6 に示す。0.5mm まで冷間圧延を行った。鋳造板を冷間圧延した場合は、鋳造板の表面の凹凸が冷間圧延後も確認できる場合がある。鋳造板の表面の凹凸はインライン熱間圧延で改善されており、それを冷間圧延することで表面状態は、さらに良好になる場合がある。冷間圧延の圧下が小さいために金属光沢が乏しかった。冷間圧延

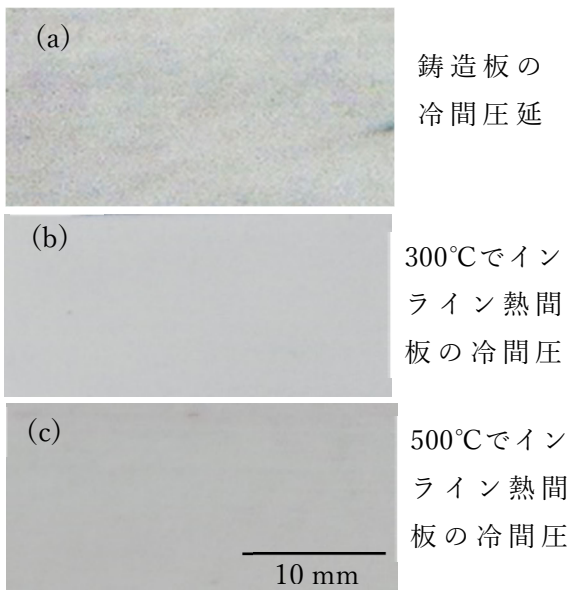
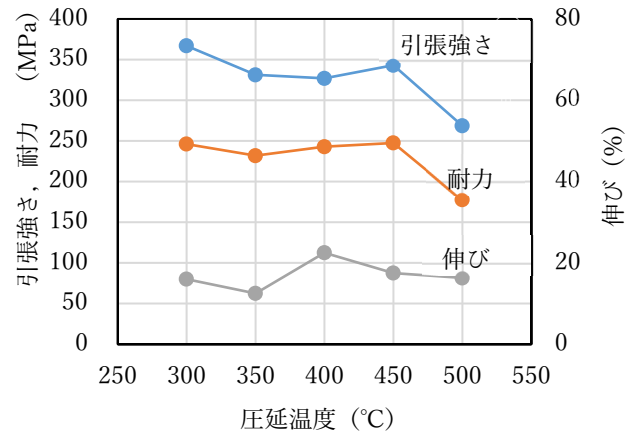


図 6 0.5mm まで冷間圧延後の表面状態

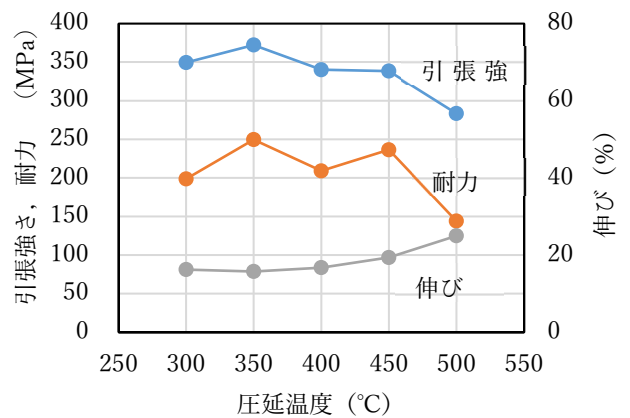
のみの板表面とインライン熱間圧延の冷間圧延板の差異は、無いと考えられる。インライン熱間圧延の温度が 300℃と 500℃の場合において、冷間圧延後の表面状態に差異は無かった。インライン熱間圧延の圧下率の表面状態への影響は小さいと考えられる。

### 4.4 鋳造荷重、圧延温度がインライン熱間圧延板の引張強さ、伸びに与える影響

鋳造荷重、圧延温度がインライン熱間板の引張強さ、伸びに与える影響を図 7 に示す。引張強さと耐力は、鋳造荷重に影響されずに圧延温度が 500℃になると著しく低下した。この原因は明らかではない。本実験の範囲では鋳造時の荷重は、インライン熱間圧延板の機械的性質に差異を及ぼさないと考えられる。鋳造時の荷重が 13N/mm と小さい条件は、内部の温度をなるべく高くする（半凝固状態の場合も有りうる）ことを狙ったものである。荷重は、167N/mm 以下と大変小さく、その範囲内では荷重の影響は小さいと考えられる。



(a) 鋳造荷重 13 N/mm

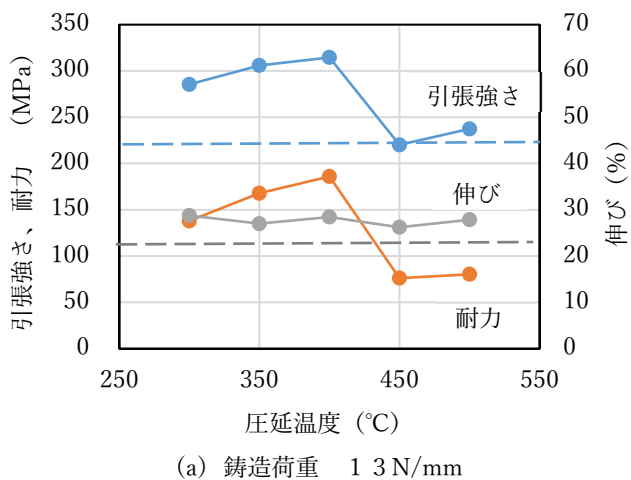


(b) 鋳造荷重 167 N/mm

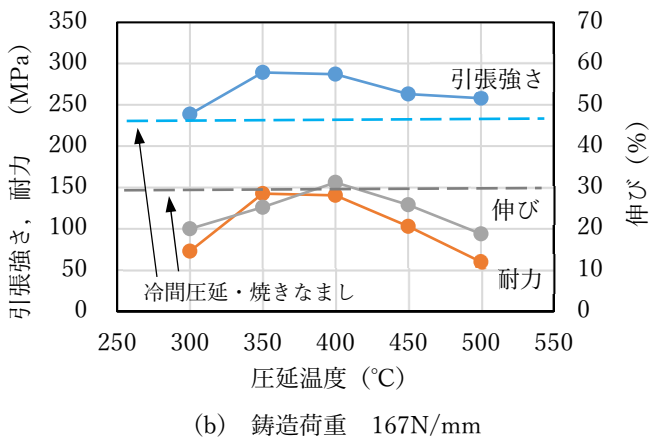
図 7 インライン熱間圧延（圧下率）板の引張試験

#### 4.5 鋳造荷重、圧延温度がインライン熱間圧延板・冷間圧延・焼きなまし後の板の引張強さ、伸びに与える影響

鋳造荷重、圧延温度がインライン熱間・冷間圧延・焼きなまし後の板の引張強さ、伸びに与える影響を図8に示す。鋳造荷重が13 N/mmの場合、引張強さと耐力は、インライン熱間温度が400℃までは、インライン熱間圧延温度が高くなるに従い、微増したが、450℃で急激に低下した。伸びは、ほぼ一定であり、インライン熱間圧延の温度の影響は小さいと考えられる。鋳造荷重が167N/mmの場合は、インライン熱間圧延の温度が450℃以上において引張強さと耐力は低下する。しかし、鋳造荷重が13N/mmの場合より、低下は著しくない。また、伸びも400℃で最も大きかった。



(a) 鋳造荷重 13 N/mm



(b) 鋳造荷重 167 N/mm

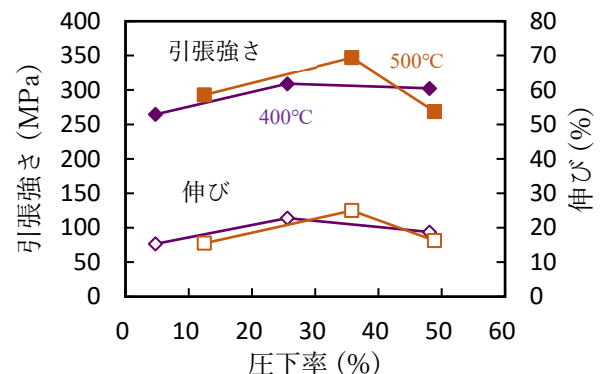
図8 インライン熱間圧延(圧下率48%)・冷間圧延・焼きなまし後の引張試験。点線は冷間圧延の値

鋳造荷重が13N/mmと167N/mmにおいて、板の内部の半凝固金属の量は13N/mmの方が多いとされる。また、インライン熱間圧延時に、板の表面温度が450℃と500℃の場合は、内部が半凝固状態であったことが推測できる。インライン熱間圧延において、内部が半凝固状態であったことが、引張強さと耐力に何らかの影響を与えたことが予測できる。引張強さ、耐力、伸びから判断して、適切なイ

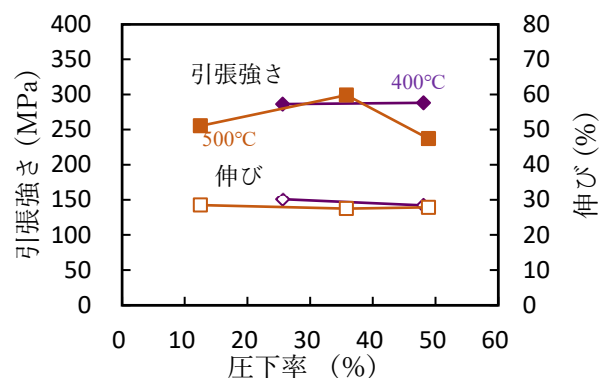
ンライン熱間温度は、400℃、鋳造荷重は13N/mmであると考えられる。インライン熱間圧延の温度が400℃の場合、機械的性質に対する鋳造荷重の影響は小さい。双ロールキャストのロールの寿命を考えると、鋳造荷重は小さいほうが良いと考えられる。鋳造時に板の両端にバリが発生する。バリは、板の内部の半凝固金属が、ロールにより押し出されたものであり、鋳造荷重が小さいほうが、バリは小さい。バリ量が増えるほど歩留りを低下させる。これらを考慮すると鋳造荷重は小さいほうが良いことは、明らかである。冷間圧延のみ・焼きなまし後の板と比較すると、伸びは同等であるが、引張強さはインライン熱間圧延の行う方が優れている。焼きなまし温度と時間の調節で、伸びは改善できると考えられる。

#### 4.6 インライン熱間圧延の圧下量がインライン熱間圧延板・冷間圧延・焼きなまし後の板の引張強さ、伸びに与える影響

インライン熱間圧延の圧下量がインライン熱間圧延板・冷間圧延・焼きなまし後の板の引張強さ、伸びに与える影響を図9に示す。



(a) インライン熱間圧延板の引張試験結果



(b) インライン熱間圧延・冷間圧延・焼きなまし後の引張試験の結果

図9 インライン熱間圧延時の圧下率が引張強さと伸びに対する影響。鋳造荷重13N/mm.



インライン熱間圧延板の引張強さは、冷間圧延・焼きなまし後より大きく、伸びはインライン熱間圧・冷間圧延・焼きなまし後の方が大きかった。インライン熱間圧延時の温度が 400℃と 500℃の場合を比較すると、500℃の方がインライン熱間圧延の圧下率の影響が大きかった。インライン熱間圧延温度が 500℃のときは、36%から 49%になると、引張強さが、インライン熱間圧延後、およびその後冷間圧延と焼きなましを行った両場合において急激に引張強さが低下した。これは、板の内部に半凝固状態の部分が存在し、高圧下率で引張強さが低下する何らかの影響があったと考えられる。詳細は不明である。500℃の場合、インライン圧延後の伸びは圧下率に対して、ほぼ均一になっている。これを考慮すると、引張強さの圧下率が 49%のときの低下は、表面の割れの影響では無いと考えられる。

#### 4.6 インライン熱間後、および焼きなまし後の組織

インライン熱間圧延後の組織に対する圧延温度の影響を図 10 に示す。インライン熱間圧延の温度が 500℃を除くと、せん断変形の痕跡があった。また、温度が 300℃から 450℃になるに従い、せん断変形は大きくなった。これは温度が高くなるに従い、変形抵抗が小さくなるためと考えられる。300℃の場合は、中心線偏析の痕跡が残っており、内部の欠陥の改善は、完全では無いと考えられる。インライン熱間圧延の温度が 400℃以上では、中心線偏析は改善できたと考えられる。圧延温度が 450℃の時は、表面近傍で再結晶が起こっていた。表面近傍では、再結晶粒は非常に微細化していた。圧延温度が、500℃の場合は、板の内部まで再結晶していた。

図 11 に (a) 鋳造板を冷間圧延後に焼きなました板の組織、(b) 鋳造板を 300℃でインライン熱間圧延後に冷間・焼きなました板の組織、(c) 鋳造板を 500℃でインライン熱間圧延後に冷間・焼きなました板の組織を示す。(a) の冷間圧延だけの場合は、偏析が残っていた。(b) のインライン熱間圧延温度が 300℃では、冷間圧と延焼きなましで中心線偏析は改善し、再結晶粒も微細であった。(c) のインライン熱間圧延を 500℃で行った場合は、中心線偏析は改善しているが、再結晶粒は粗大化した。これが、引張強さが低い直接的な原因であると考えられる。

#### 5. まとめ

インライン熱間圧延は、高速双ロールキャスターで鋳造した板に発生する、表面割れや偏析を改善することができ、引張試験の結果も向上した。

終わりに、多大なご支援を賜りました公益財団法人天田財団に深く感謝いたします。

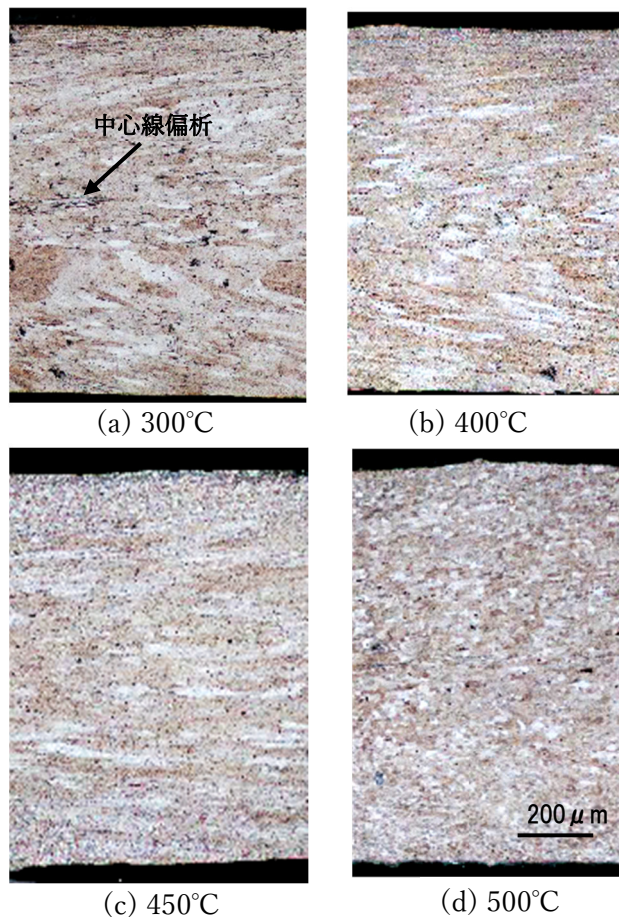


図 10 インライン熱間圧延後の組織に対する圧延温度の影響。鋳造荷重 13N/mm

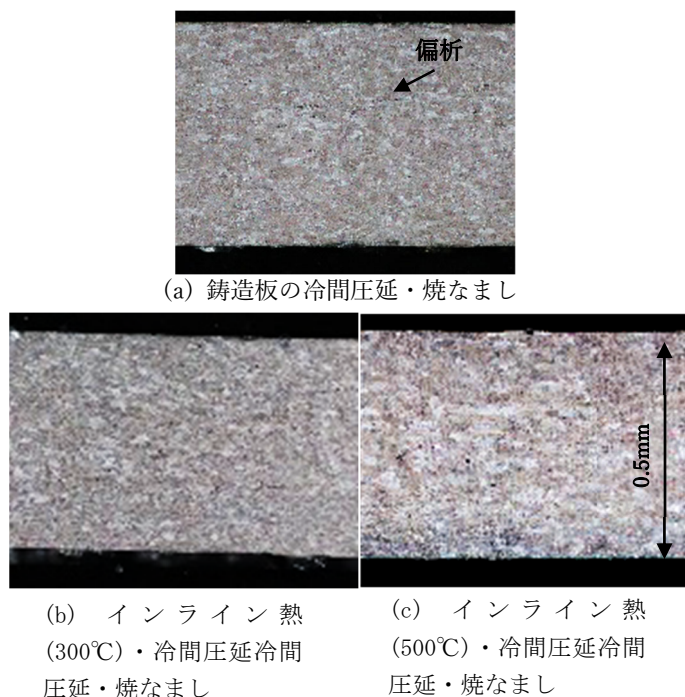


図 11 インライン熱間圧延・冷間・焼きなまし後の板の断面組織。板厚 0.5mm。鋳造荷重 13N /mm