

ため、凝固完了時および凝固後の1473 Kで 7.2×10^2 s間保持した場合の結果を示す。なお、解析ではデンドライト一次アームの対象性を考慮し、一次アーム間隔の1/2領域を解析対象とした。

凝固完了時のMn濃度はいずれの一次アーム間隔の場合も、デンドライト樹間部で濃化し、溶質再分配により樹芯部で最低濃度を示す。最大値を示す樹間部のMn濃度を比較すると、一次アーム間隔が短い 1.5×10^{-6} mの方が小さいことが分かった。

次に、凝固完了後に一定温度で保持した場合のMn濃度分布を見ると、いずれの一次アーム間隔の場合もデンドライト樹間部のMn濃度が凝固完了時よりも低下している。これは濃度の高い樹間部から濃度の低い樹芯部に向かい、Mnが拡散したことによる。この場合も一次アーム間隔が小さい方が最高Mn濃度が低くなりデンドライト内でMn濃度が均一化し易いことが分かる。

マイクロ偏析の低減には、デンドライト一次アーム間隔の短縮が有効である。拡散の程度を表す指標としてFourier数($Fr = D \times t / L^2$)があり、この値が大きいほど拡散が進行し易いことを表す。ここで、 D は拡散係数、 t は時間、 L は代表長さである。マイクロ偏析を考える場合、Fourier数の代表長さ L はデンドライト一次アーム間隔と等価である⁽⁵⁾。そのため一次アーム間隔の2乗に反比例し、一次アーム間隔の短縮によるFourier数の増大効果は大きい。従来、Fourier数を高くするために時間 t を長くするか、あるいは温度を高め拡散を速くする手段が用いられているが、本研究では一次アーム間隔に着目しその効果を確認した。

5. 鋼板表面のすじ模様抑制

図6にラボ溶解材を用いて作製した鋼板の曲げ加工試験結果を示す。鋼板の組成は0.14 mass% C-2.0 mass% Mn鋼であり、厚みは1.6 mmである。この鋼板を用いて曲げ半径1 mm、曲げ角度90度の試験を行った。Bi添加により固液界面エネルギーを低減しデンドライト一次アーム間隔を短縮すると鋼板表面のすじ模様が抑制できることが分かった。

6. 連続鋳造試験

以上の基礎検討から、鋼板の表面すじ模様の低減にはBi添加が有効であることが分かった。そこで、実際の連続鋳造が可能であるかラボ連続鋳造試験機を用いて鋳造を行った。

ラボ連続鋳造条件は、鋳片サイズ800幅×100厚、鋳造速度1.0 m/minである。Bi添加しても鋳片表面に縦割れなどの欠陥が発生しないことが確認できた。

図7にラボ連続鋳造鋳片の表層近傍のデンドライト1次アーム間隔の測定結果を示す。一方向凝固実験と同様に、Bi添加で1次アーム間隔が短縮化できることが分かった。

また、実機鋳造試験も行ったが、ラボ連続鋳造と同様に操業上の問題が無く鋳造可能であることも分かった。

図6 鋼板の曲げ試験結果。
(a) Bi無添加, (b) 30 ppmBi.

図7 ラボ連続鋳造試験結果。

7. ま と め

以上のように、凝固過程における鋼の固液界面エネルギーを低下させることでデンドライトの一次アーム間隔を短縮できることが分かった。基礎試験結果を基に実機溶鋼中に微量のBiを添加した試験の結果、連鋳片におけるデンドライト一次アーム間隔の短縮化によりすじ模様の抑制が可能であることを実証した。固液界面エネルギーの低下を目的とした微量のBi添加による凝固組織に関する制御技術は、今後更なる鉄鋼材料の高品質化への要求に応え得る製鋼から始まる材料特性の制御技術の一つの新機軸に成り得ると考えられる。また、この技術は今後の進展が期待される高速鋳造化、難鋳造鋼種の連続鋳造化にも応用可能である。

なお、本開発に関連して18件の特許を出願した。

文 献

- (1) W. Kurz, B. Giovanola and R. Trivedi: Acta Metall., **34**(1986), 823-830.
- (2) S. G. Kim, W. T. Kim and T. Suzuki: Phys. Rev. E, **60**(1999), 7186-7197.
- (3) R. A. Grange: Metall. Trans., **B**, **2**(1971), 417-426.
- (4) G. Krauss: Iron and Steel Technology, **1**(2004), 145.
- (5) H. Mizukami, K. Hayashi, M. Numata and A. Yamanaka: Tetsu-to-Hagané, **97**(2011), 457-466.