

熱縮径圧延プロセスを活用した電磁特性に 優れる電縫鋼管の開発

荒谷昌利^{*1)} 石黒康英^{*1)} 石田昌義^{*2)}
河端良和^{*3)} 小久保信作^{*4)}

1. はじめに

磁気シールドや、モータ用ステータ、ロータ等には、従来から電磁特性に優れた鋼板、厚板が使用されてきた。電磁特性に優れた材料としては、磁化容易方向<001>が面内に無方向に配向された無方向性電磁鋼板や、磁化容易方向<001>が圧延方向に平行に強く配向した方向性珪素鋼板などがある。しかし、これら電磁特性に優れた鋼板を、例えば磁気シールド用として使用する場合には、これら鋼板を加工し、溶接等で接合、組み立てして所望形状に仕上げる工程が必要となる。また、モータのステータ、ロータ用として使用する場合には、これら鋼板を打抜き、複数枚を積層して使用するため、打抜き加工、積層加工などの工程を必要とする。このように、鋼板を素材とする場合には、複雑な工程を必要とするうえ、接合部等の非定常部が形成され、電磁特性が劣化するという問題があった。このような問題を回避するため、鋼管を素材として使用することも考えられている。電磁鋼板を電縫溶接して電磁特性に優れた鋼管とすることが考えられるが、電磁鋼板はSi含有量が高く電縫溶接が難しいうえ、電縫溶接部の電磁特性が劣化するという問題がある。また、電磁鋼のビレットを使用して継目無鋼管とすることも考えられるが、電磁鋼は延性が低く、製管作業が困難である。

本報告では、上記のような課題を解消するために、熱間縮径圧延プロセスを活用して集合組織を制御し電磁特性に優れた電縫鋼管を開発することに成功したので紹介する。

2. 開発のコンセプト

電磁特性に優れた鋼管を得るためには、製管工程で磁化容易軸<001>が強く配向した集合組織を形成することが重要である。通常の電縫鋼管の場合、素材である熱延鋼板や冷延鋼板の集合組織を継承するため、無配向なランダム結晶方位となり優れた電磁特性は望めない。一方、本開発鋼管の場合、熱間縮径圧延により電磁特性に有利な集合組織を優先的に発達させることが可能で、さらに最適温度で後熱処理することで、より高い電磁特性を得ることに成功した。

図1に電縫鋼管(母管)および熱間縮径圧延鋼管の製造プロセスを示す。素材鋼帯はロール成形および電縫溶接されて電縫鋼管(母管)となり、その後、誘導加熱され所定の温度、圧下条件で縮径圧延し製品鋼管となる⁽¹⁾⁽²⁾。

縮径圧延条件は要求される製品特性に応じて最適化される。例えば、加工性が重視される用途に対しては、縮径圧延の仕上げ温度をAr3変態点以下(フェライト+オーステナイトの二相域、もしくはフェライト域)とすることにより圧延集合組織を発達させ、管軸方向のランクフォード値(r値)が高く、曲げ加工性に優れた鋼管が得られることが報告されている⁽¹⁾⁽²⁾。図2に、一般的な板の熱間圧延と、鋼管の縮径圧延におけるヒートパターンの比較を示す。また、図3には、EBSP (Electron Backscattering Pattern)解析による低炭素鋼素材鋼管(0.06%C-0.3%Mn)の熱間縮径圧延前後の集合組織変化を示す⁽³⁾。

板の熱間圧延では、材質の均一性や圧延性の点からAr3変態点以上で圧延を完了する 경우가多く、これを素材とする電縫鋼管(熱間縮径前の母管)の集合組織はランダムな結晶方位(図3の結晶方位マップの色が不統一)を示す。一方、この母管をフェライト域仕上げで縮径圧延すると、管軸方向に平行に緑色で示された<001>軸が、また管円周方向に平行に赤色で示された<001>軸が強く配向した圧延集合組織が形成され、再結晶集合組織を利用した鋼板では不可能であった極低炭素IF鋼以外の鋼種でも高いr値を得ることが可能であ

* JFE スチール株式会社
スチール研究所鋼管・鋳物研究部：1)主任研究員、
スチール研究所電磁鋼板研究部：2)主幹職
知多製造所商品技術部：3)主任部員
本社鋼管営業部：4)主任部員
Development of ERW Steel Tube with Excellent Electromagnetic Property by Applying Hot-stretch-reducing Process: Masatoshi Aratani, Yasuhide Ishiguro, Masayoshi Ishida, Yoshikazu Kawabata, Shinsaku Kokubo (JFE Steel Corporation)
2011年10月25日受理

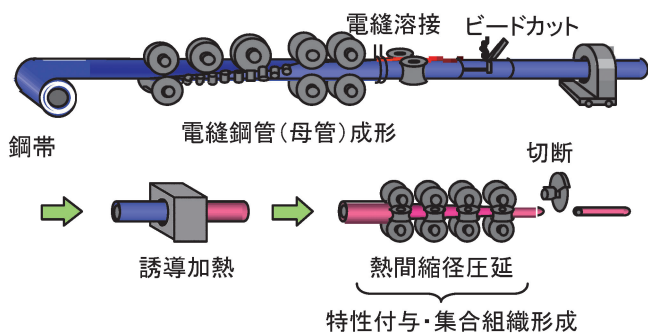


図1 電縫鋼管の製管プロセスと熱間縮径圧延プロセス。

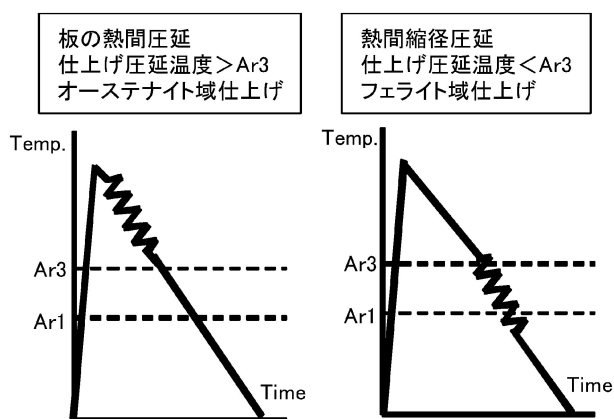


図2 板の熱間圧延と縮径圧延(フェライト域仕上げ圧延)のヒートパターンの比較。

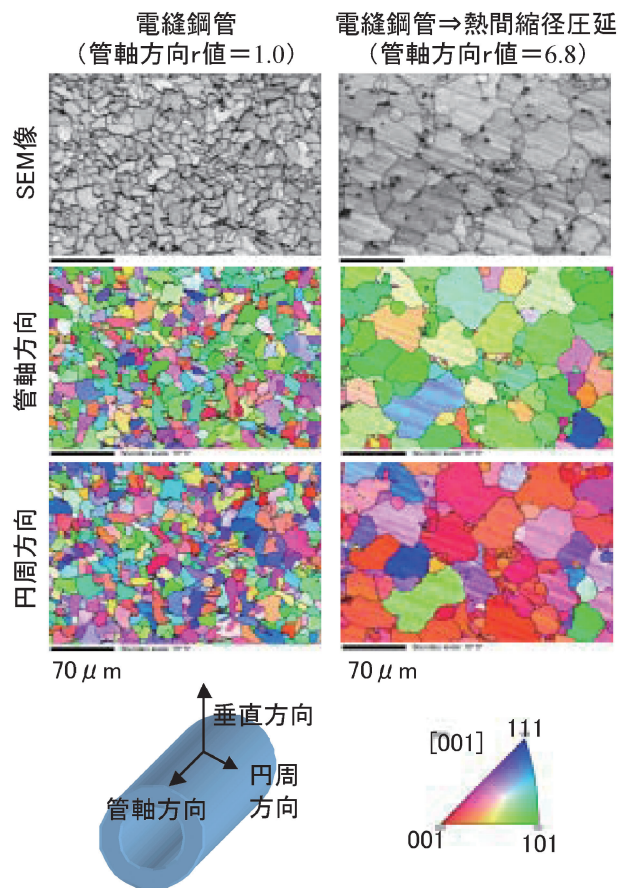


図3 熱間縮径圧延前後での集合組織の変化⁽³⁾。素材：0.06%C-0.3%Mn, 仕上げ縮径圧延温度：フェライト域

る。

図4にはフェライト域で仕上げ圧延を行った縮径圧延鋼管の結晶配向の模式図を示す。本開発においては、フェライト域縮径圧延により管円周方向に平行に<001>軸が強く配向した集合組織を形成することが可能で、これは電磁特性を高める上で必要な磁化容易軸<001>と一致することから、電磁機能性を有した鋼管としての可能性を追求した。

3. 開発鋼管の諸特性

(1) 開発鋼管の製造方法と特徴

高い電磁特性を得るには、(1)高純度系素材の選択、(2)結晶の磁化容易軸方位への高配向、(3)結晶粒成長の促進が重要であることは電磁鋼板において周知である。したがって、開発鋼管には、極低炭IF鋼(0.002%C-0.03%Ti-0.005%Nb)の熱延鋼板を素材に選択し、これを電縫溶接して母管を製造した後、一旦、オーステナイト域まで誘導加熱し、フェライト域にて縮径圧延を行うことで管円周方向に磁化容易軸<001>を配向させた集合組織を形成させる。次に、縮径圧延で形成された集合組織を維持しつつ、結晶粒成長させることを目的に、フェライト+オーステナイトの二相域にて熱処理を実施する。その結果、図5に示すEBSPによる開発鋼管の集合組織解析結果からわかるように、管円周方向に赤色で示される磁化容易軸<001>の強い配向が認められる。

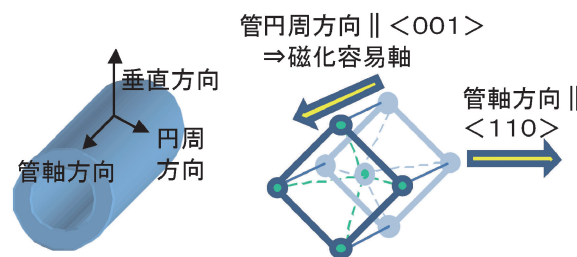


図4 フェライト域縮径圧延による結晶配向の模式図。

(2) 開発鋼管の電磁特性

図6に本開発鋼管のB-H(磁束密度-磁化力)特性を、図7にμ-H(比透磁率-磁化力)特性を示す⁽³⁾。汎用の方向性電磁鋼板(35JGH, 板厚0.35mm)、無方向性電磁鋼板(50JN1300, 板厚0.5mm)、一般軟鋼薄鋼板(SPCC, 板厚0.8mm)および電磁純鉄材(JIS SUY-1, 極低炭素鋼バルク材の管状穴あけ品)を比較評価した。開発鋼管の比透磁率μは15000~20000を示し、B-H特性、μ-H特性ともに汎用の無方向性電磁鋼板と方向性電磁鋼板の間に位置する高いレベルを示している。

(3) 開発鋼管の磁気シールド特性

本開発鋼管の磁気シールド特性を図8に示す⁽³⁾。比較とし

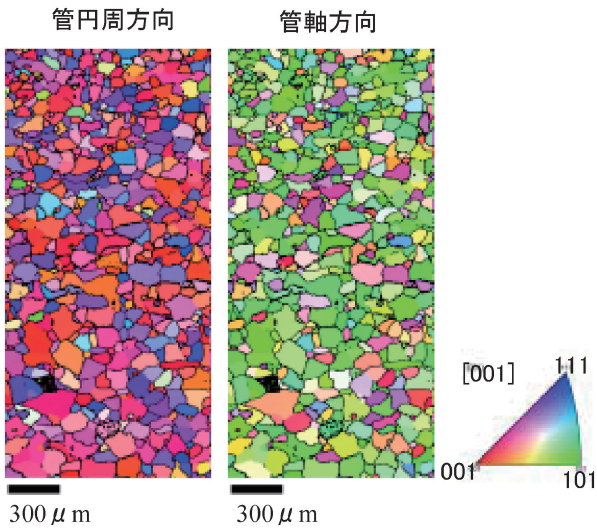


図5 開発鋼管の集合組織(EBSP 解析).

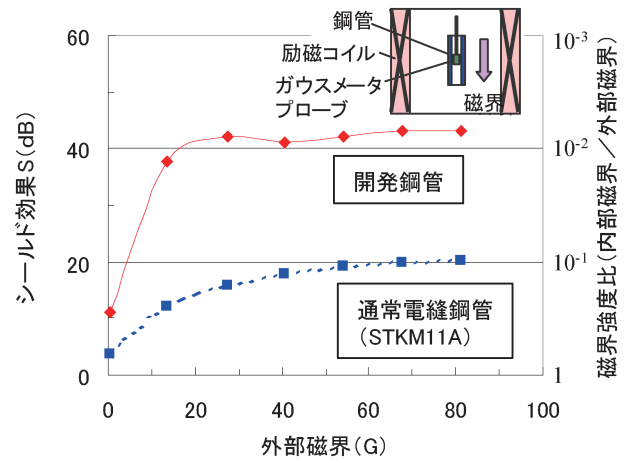


図8 開発鋼管の磁気シールド特性⁽³⁾.

て同一サイズの通常の電縫鋼管(STKM11A)を評価した. 本開発鋼管は, 通常の電縫鋼管に比べると, 約10倍の磁気シールド効果を有している. 比透磁率 μ が高い開発鋼管の場合, 管円周方向に強く配向した磁化容易軸である $\langle 001 \rangle$ に印加磁場が捕らわれることにより磁気シールド効果が発揮されている.

4. 今後の展開

本開発鋼管は汎用の無方向性電磁鋼板を凌ぐ電磁特性を有しており, 今後は磁気シールド材や電磁アクチュエータなどへの適用を期待している.

5. 特許

国内特許第4701687号, 特開2007-66970, 特開2011-149081, 米国特許7942984など取得している.

文献

- (1) 西森正徳, 荒谷昌利, 小高幹雄: 川崎製鉄技報, **33**(2001), 151-154.
- (2) T. Okabe, T. Nagahama, Y. Hashimoto, H. Hori, Y. Kawabata, M. Aratani, S. Toyoda and H. Kimura: The Proceeding of the 2011 Tube & Pipe, OSAKA, (2011).
- (3) 石黒康英, 荒谷昌利, 石田昌義, 河端良和, 小久保信作: CAMP-ISIJ, **24**(2011), 1004-1006.

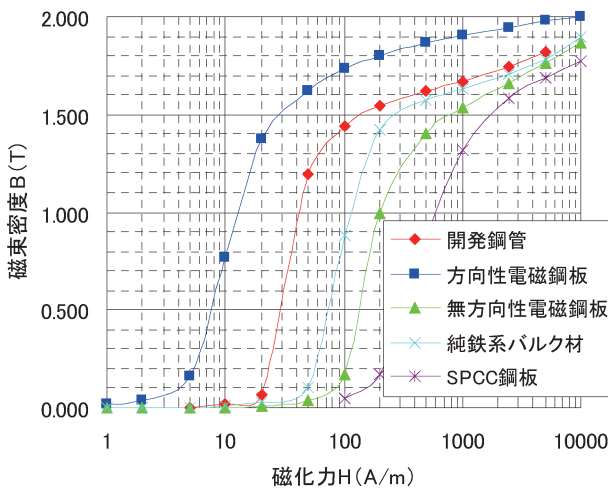


図6 開発鋼管と一般電磁鋼板のB-H特性の比較⁽³⁾.

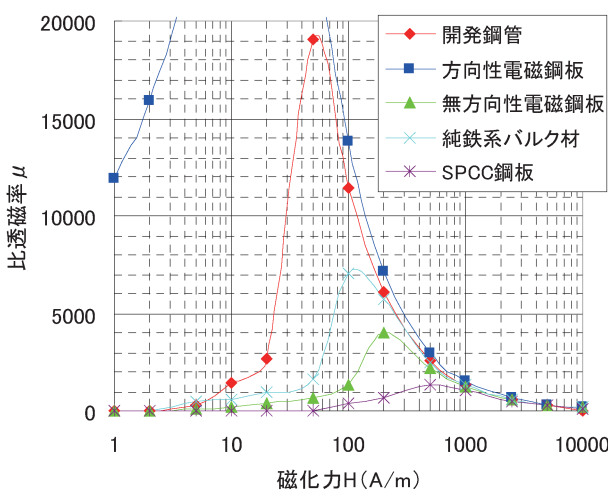


図7 開発鋼管と一般電磁鋼板の μ -H特性の比較⁽³⁾.