

審査の結果の要旨

氏名 松原 基行

本研究は、シップリサイクル問題の解決を通して、国際的な循環型社会形成に資することを動機として行なわれたものである。

現在、船舶の解体は発展途上国においてビーチスクラッピングで代表される、安全と環境に多くの問題を有する方法でなされているとともに、廃船により発生する鉄スクラップは本来、高品質であるにもかかわらず、伸鉄等の加工により再利用されているものの、有効なリサイクルが図られていない。廃船から回収されるスクラップ鉄を鉄源とし、電炉法により造船用鋼として蘇らせることを目的として、リサイクル鋼の製造方法に関する基礎的な研究を行った。

ここでの問題は、電炉法では不可避免的に鋼に含有される窒素の濃度が高く、靱性を阻害することである。この問題を克服するために、結晶粒微細化のプロセスを検討した。具体的には、降伏強度が 355MPa 以上、引張強度が 490MPa 以上の高強度鋼で、且つ、シャルピー衝撃試験遷移温度が -70°C 以下で、特に衝撃試験におけるセパレーション指数が船体用鋼板として許容可能と考えられる 0.50/mm 以下で、強度と靱性に優れた鋼板を目標とした。この特性を得るために、フェライト結晶粒径を $5\mu\text{m}$ 以下とすることを目標とした。

まず、加工熱処理再現装置を用いて圧延プロセスを基礎的に検討した。上記目標を達成する加工熱処理プロセスとして、オーステナイト (γ) 相均一域での加熱圧延後、フェライト (α) 均一相まで制御冷却し、フェライト/オーステナイト (α/γ) 二相低温域まで再加熱後圧延し、 α/γ 二相分率が 50%前後となる温度まで再加熱してから制御冷却するプロセスを提案した。提案したプロセスを実験室圧延実験に適用して鋼板を試作した結果、上記の目標を達成することを確認した。本提案プロセスの圧延変形抵抗は従来の圧延設備で耐えうる程度であり、設備技術の新たな開発を必要としないため、シップリサイクル鋼は既存の製鉄設備を利用することにより製造可能と考えられた。

上記のような高靱性鋼の開発においては、目標とする特性を達成するための目標マイクロ組織を設定する必要があるが、従来はこれを経験に基づいて行っており、精度よい定量評価ができず、鋼材開発におけるネックの一つとなってい

た。このような問題を解決するためには、鋼のマイクロ組織と機械的特性との関係性を定量的に評価する必要があるが、特に、ばらつきを伴う靱性については、理論構築が遅れていた。靱性のばらつきを説明する確率論的なモデルはあるものの、マイクロ組織との直接的な関係性に乏しく、鋼の製造指針を与えるには至っていなかった。そこで、本研究では、フェライト (α) 粒径とセメンタイト (θ) 寸法分布の異なる鋼材を実験室製造して靱性評価を行い、靱性に及ぼすマイクロ組織因子を定量評価することを行った。さらに、マイクロ組織因子から靱性を予測する新たな方法について研究を行った。

はじめに、 α 粒径と θ 短径の異なる 8 鋼種の靱性を切欠き付 3 点曲げ試験で評価した。その結果、脆性延性遷移曲線は、 α 粒径が小さい鋼種ほど低温側に、同等の α 粒径の鋼種でも θ 短径の小さい鋼種ほど低温側に位置した。また、同等の α 粒径の鋼種でも θ 径の小さい鋼種ほど低温になった。

次に、この実験結果を基に各鋼種の降伏応力を材料特性として入力した有限要素法 (FEM) で切欠き付 3 点曲げ試験片の応力歪解析を行った。この解析において実験における破壊変位まで負荷し、実験の破面で同定した破壊起点と同じ位置のモデル上の最大主応力を局所破壊応力 σ_f として算定した。この実験結果に基づいた局所破壊応力 σ_f を各鋼種の α 粒径分布と θ 短径分布のマイクロ組織観察結果を用いて従来提唱されたモデルの計算式から算出した局所破壊応力 $\sigma_{f\theta}$ と比較した。その結果、 α 粒径分布を考慮することで、 α 粒径分布の異なる鋼種に対してのみ、その実験結果をほぼ説明することができた。しかしながら、 α 粒径分布が同程度でも θ 径分布の異なる鋼種の実験結果は説明できなかった。これは、従来のモデルが θ 割れを前提条件としており、それに及ぼす諸因子の影響を考慮していないためであると考えられた。

そこで、温度と拘束条件の異なる砂時計型丸棒引張試験を用いて θ 割れに及ぼす諸因子を検討した。FEM で算出した試験片中心の最大主歪が 40% となる変位を負荷した後、その試験片縦断面上の最大主歪がほぼ一定となる領域を観察して θ 割れを計数することで、 θ 割れに及ぼす諸因子の影響を調査し、 θ 割れ率が作用応力 η と最大主歪と θ 径の関数となる実験式を得た。

次に、 θ 割れによる微視き裂の発生と「最弱リンク機構」を考慮した新たな靱性予測モデルを構築した。このモデルでは、試験片応力集中部を微小体積要素に分割し、その要素内にはマイクロ組織観察で得られる α 粒径分布と θ 径分布が存在するものとする。FEM から求めた作用応力が当該体積要素に作用する時、 θ 割れの頻度を上記実験式より求め、 θ き裂が隣接 α に突入する限界応力と α 亀裂が隣接 α に伝播する限界応力によって、へき開破壊の 3 段階の限界条件を設定し、これらがすべて満足された体積要素がひとつでも存在する時に試験片が破壊するものとした。この新へき開破壊モデルに基づき、靱性を予測する計

算プログラムを作成し、再現計算を行なったところ、予測破壊靱性値は実験値と概ね一致することが確認できた。さらに、破壊靱性値のばらつきも予測できることを確認した。本へき開破壊モデルにより、結晶粒微細化のみならず、 θ 寸法も微細化することにより靱性を向上できることを定量的に示すことができた。

本へき開破壊モデルは鋼のマイクロ組織情報から靱性値をそのばらつきまで含めて予測可能とすることに端緒を開いたものであり、今後、シッフリサイクル鋼を含めた高靱性鋼開発指針の提示等に威力を発揮するものと期待できる。

よって本論文は博士（工学）の学位請求論文として合格と認められる。