

超電導応用機器材料システムの強磁場破壊・強度特性評価

研究代表者 東北大学大学院工学研究科 教授 進藤裕英

1. はじめに

超電導応用機器は、強磁場中で作動しており、材料システムの強磁場・力学場相互干渉^{1)~4)}を詳細に検討し、これに基づく破壊・変形に関する基礎的研究を実施する必要がある。本研究は、極低温環境も含めた強磁場下における超電導応用機器材料システムの破壊・強度特性評価に関する理論的・実験的研究を行ったもので、超電導応用機器の設計および信頼性・安全性評価に資することを目的としている。このため、まず最初に、き裂を有する軟磁性平板の引張試験・磁気弾性解析を行い、破壊力学パラメーター（応力拡大係数、ひずみエネルギー密度）に及ぼす強磁場・力学場相互干渉の影響を解明した⁵⁾。次に、核融合用超電導マグネットのコンジット材料として開発されたニッケル基超合金を対象に、極低温・強磁場下における引張・切欠き引張・小型パンチ試験および有限要素解析を行い、極低温破壊・強度特性に及ぼす磁場の影響を明らかにした⁶⁾。また、オーステナイト系ステンレス鋼の極低温・強磁場小型パンチ試験を行い、極低温破壊特性に及ぼすひずみ・磁場誘起マルテンサイト変態の影響を明らかにした⁷⁾。大型超電導マグネット用構造材料として広く用いられているオーステナイト系ステンレス鋼^{8), 9)}は、極低温下でひずみ誘起マルテンサイト変態を生じ、磁場の影響を受けることが知られている。

2. 磁場内におけるき裂を有する軟磁性平板の引張試験と磁気弾性解析

供試材は、3種類の鉄ニッケル軟質磁性材料[TMC-V：縦弾性係数 $E=182\text{GPa}$ 、ポアソン比 $\nu=0.146$ 、比透磁率 $\mu_r=27900$; TMH-B： $E=203\text{GPa}$ 、 $\nu=0.279$ 、 $\mu_r=10690$; TMB： $E=146\text{GPa}$ 、 $\nu=0.228$ 、 $\mu_r=9030$]である。図1に示すように、き裂面に垂直な磁束密度 B_0 の磁場内において、長さ $2a$ の中央き裂を有する鉄ニッケル軟質磁性材料平板（幅 $2h=40\text{mm}$ 、長さ $2l=140\text{mm}$ 、厚さ 1mm 、 $2a=10, 15, 20\text{mm}$ ）の引張試験を行い、き裂先端近傍のひずみ分布を用いて強磁場応力拡大係数を評価した。強磁場引張試験は、10 T(T: tesla) ヘリウムフリー超電導マグネットの室温ポア内で行った。また、直角座標系 $O-x,y,z$ において、引張を受ける中央き裂を有する軟磁性帯板($l \rightarrow \infty$)を対象に、き裂面に垂直な一様引張応力 s_0 および一様磁場 B_0 が作用する場合の磁気弾性解析を平面応力・平面ひずみを仮定して行い、強磁場破壊力学パラメータを求めた。

図2は、試験片幅とき裂長さの比 h/a に対する磁気弾性応力拡大係数 $k_{h1}/s_0a^{1/2}$ に及ぼす磁場 B_0 の影響を示した理論解析(平面応力)・実験結果であり、TMC-V 試験片の場合である。応力拡大係数は、磁場の増大に伴い増大している。また、平面応力と平面ひずみの解析結果の差は僅かであった。さらに、理論解析結果は、実験結果と良く一致しており、き裂の強磁場・力学場相互干渉に関する理論の妥当性が検証されている。図3、4は、TMH-B および TMB 試験片の場合の図2と同様な結果である。応力拡大係数に及ぼす磁場の影響は、比透磁率が大きい程顕著になった。また、ひずみエネルギー密度に及ぼす磁場の影響は、応力拡大係数と同様な傾向を示した。

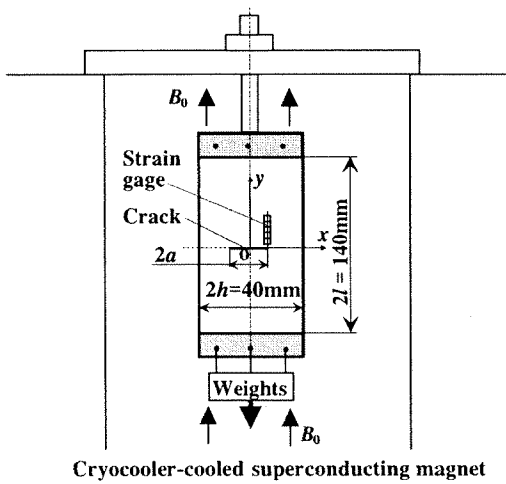


図1 中央き裂を有する平板状試験片の強磁場引張試験

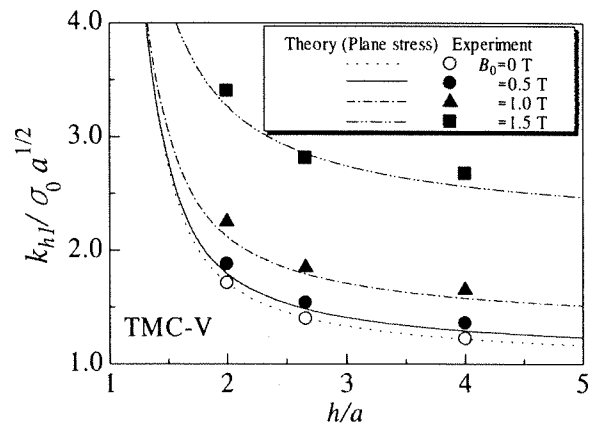


図2 応力拡大係数に及ぼす磁場の影響(TMC-V)

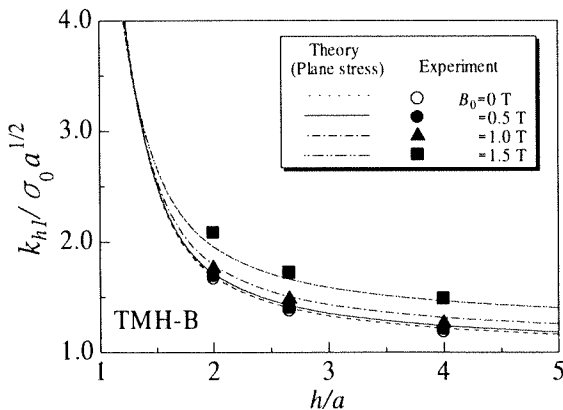


図3 応力拡大係数に及ぼす磁場の影響(TMH-B)

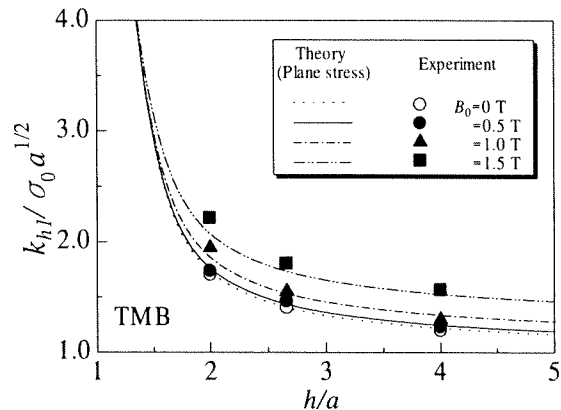


図4 応力拡大係数に及ぼす磁場の影響(TMB)

3. 極低温構造材料の強磁場破壊・強度特性

3.1 Incoloy908

ニッケル基超合金 Incoloy 908 を対象に極低温(液体ヘリウム温度 4K)・強磁場(6T)下における引張・切欠き引張¹⁰⁾・小型パンチ¹¹⁾試験を行った。図 5 に、Incoloy 908 コンジットからの試験片採取位置を示す。引張・切欠き引張試験片は、平行部長さ 40mm、幅 5mm、厚さ 3mm の板状試験片であり、切欠きは、放電加工により平行部中央に付与し、幅 0.2mm、深さ 1mm である。また、小型パンチ試験片は 10×10×0.5mm の平板状試験片である。実験は、超電導マグネットのボア内で液体ヘリウム中に浸して行い、磁場と試験片負荷方向を一致させた。また、荷重は、クロスヘッド速度 0.2mm/min のストローク制御で負荷した。さらに、極低温・強磁場引張試験より得られた物性値を用いて切欠き引張・小型パンチ試験の有限要素解析を行い、切欠き引張試験片の J 積分、小型パンチ試験片の最大ひずみエネルギー密度を求めて、実験結果に理論的検討を加えた。

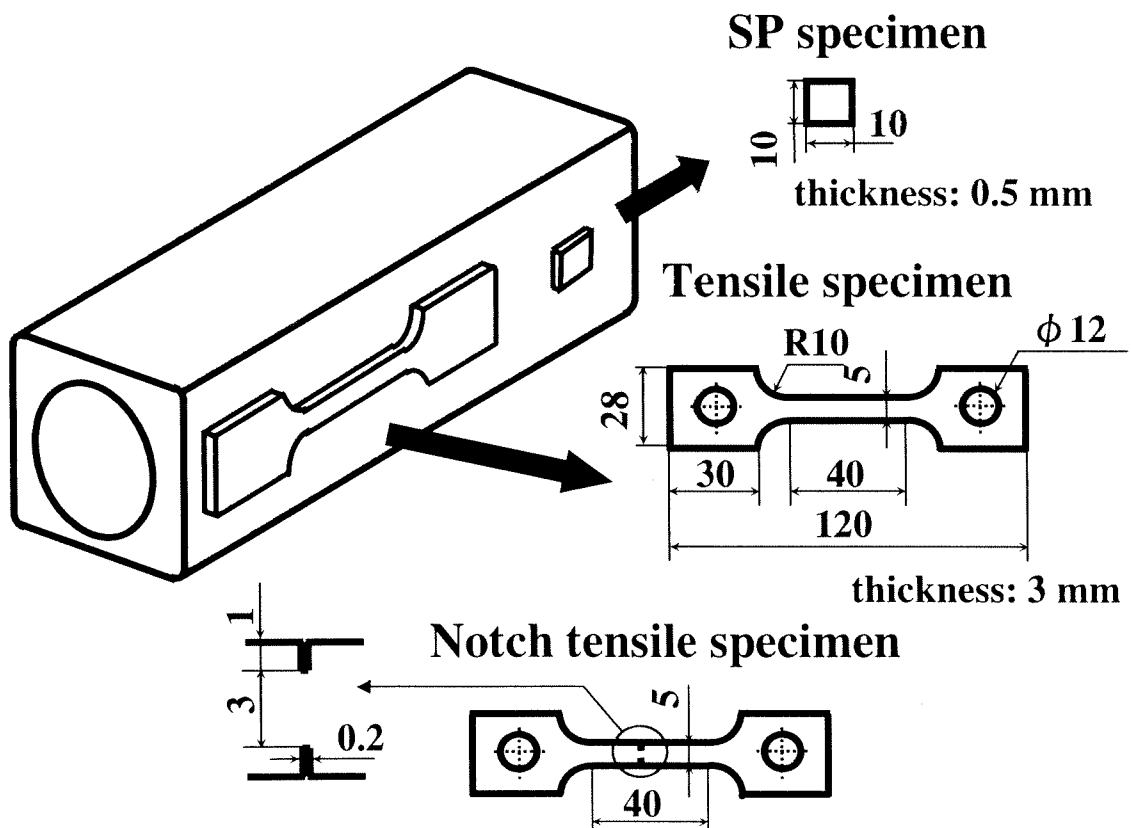


図 5 引張・切欠き引張・小型パンチ試験片採取位置

図6は、Incoloy 908 切欠き引張試験片の有限要素解析による J 積分－変位曲線を、図7は、Incoloy 908 小型パンチ試験片の実験による荷重－変位曲線および有限要素解析による最大ひずみエネルギー密度－変位曲線を示したものであるが、Incoloy 908 の極低温破壊・強度特性に及ぼす顕著な磁場の影響は認められなかった。また、き裂を有する強磁性材料の応力拡大係数に及ぼす磁場の影響を理論的に解明し、低透磁率材料である Incoloy 908 の応力拡大係数に及ぼす磁場の影響は僅かであるが、高透磁率材料の応力拡大係数に及ぼす磁場の影響は顕著であることを示した。

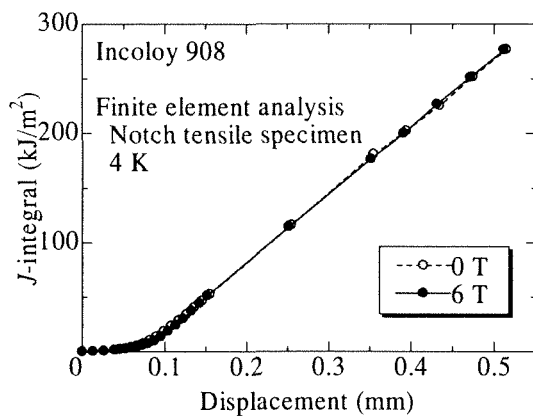


図6 Incoloy908 切欠き引張試験片の J 積分と変位の関係

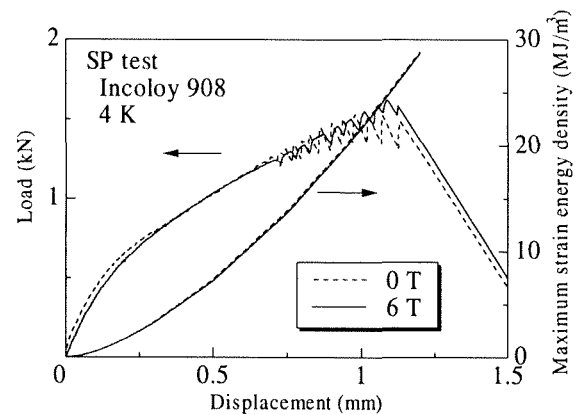


図7 Incoloy908 小型パンチ試験片の荷重および最大ひずみエネルギー密度と変位の関係

3.2 SUS304・316

オーステナイト系ステンレス鋼 SUS304・316 を対象に、極低温・強磁場小型パンチ試験を行った。小型パンチ試験片は、冷間圧延された厚さ 10mm の SUS304・316 平板から採取した。また、SUS304・316 の初期マルテンサイト量は、それぞれ 0.8%、0.4%であった。極低温・強磁場小型パンチ試験は、4K まで十分に冷却した後に、板面に垂直な磁場内においてクロスヘッド速度 0.2mm/min のストローク制御で行った。

図8に、SUS304 小型パンチ試験片の荷重－変位曲線を示す。6T 磁場の作用により、破壊荷重・変位が減少している。図9は、SUS316 小型パンチ試験片の場合の図8と同様な結果であるが、磁場の影響は僅かである。また、破壊等価ひずみ¹¹⁾を用いて小型パンチ試験による破壊靱性を求めると、マルテンサイト変態に対する安定度の低い SUS304 では、磁場が作用しない場合の 303kJ/m^2 に対し、6T 磁場の作用により極低温破壊靱性は 30%も減少 (231kJ/m^2) した。これに対し、マルテンサイト変態に対して安定な SUS316 の場合は、 274kJ/m^2 (0T)、 261kJ/m^2 (6T) であり、設計上重要な磁場の影響は認められなかった。

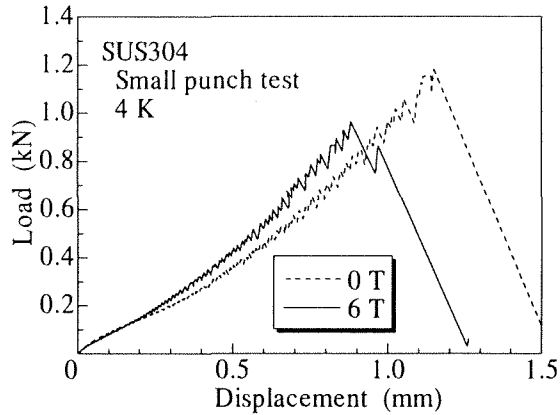


図 8 SUS304 小型パンチ試験片の荷重と変位の関係

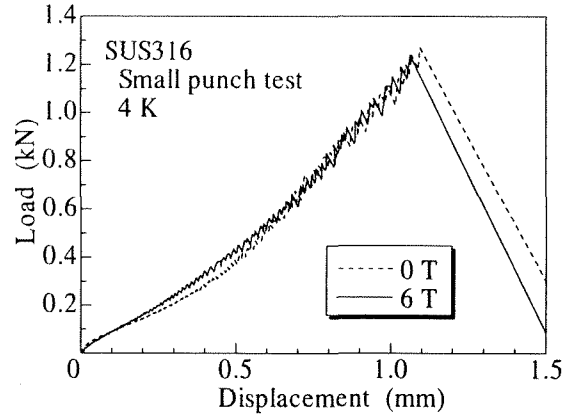


図 9 SUS316 小型パンチ試験片の荷重と変位の関係

4. おわりに

極低温・強磁場環境下における超電導応用機器材料システムの破壊・強度特性評価に関する理論的・実験的研究を行い、以下の結論を得た。

- (1) き裂を有する磁性材料平板の破壊力学パラメータは、き裂面に垂直な磁場の増大に伴い増大し、比透磁率が大きくなるほど顕著な磁場の影響を受けることを明らかにした。また、理論解析・実験結果を比較・検討し、き裂の強磁場・力学場相互干渉に関する理論の妥当性検証に成功した。
- (2) ニッケル基超合金 Incoloy 908 のような低透磁率材料の場合、切欠き引張（切欠き面に垂直な磁場）・小型パンチ（板面に垂直な磁場）試験による極低温破壊・強度特性に及ぼす磁場の影響は僅かであった。
- (3) オーステナイト系ステンレス鋼 SUS304・316 の小型パンチ試験による極低温破壊靱性は、板面に垂直な磁場の作用により、合金のマルテンサイト変態における安定性に依存して減少した。

参考文献

- 1) K. Horiguchi and Y. Shindo, "Experimental and Theoretical Results for Bending of a Soft Ferromagnetic Plate in a Transverse Magnetic Field", *Acta Mechanica*, Vol. 162, No.1-4(2003), pp. 185-194.
- 2) K. Horiguchi and Y. Shindo, "Mechanics of Cracked Ferromagnetic Plates in a Magnetic Field", *Mechanics of Electromagnetic Material Systems and Structures*, Edited by Y. Shindo, WIT Press, Southampton, Boston (2003), pp. 41-53.
- 3) K. Yoshimura, Y. Shindo, K. Horiguchi and F. Narita, "Theoretical and Experimental Determination of Magnetic Stress Intensity Factors of a Crack in a Double Cantilever Beam Specimen", *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, Vol. 27, No. 3(2004), pp. 213-218.
- 4) K. Horiguchi and Y. Shindo, "A Strain Gage Method for Determination of Magnetic-Moment Intensity Factors in Through-Cracked Soft Ferromagnetic Plates", *Journal of Applied Physics*, Vol. 96, No. 10(2004), pp. 5860-5865.
- 5) Y. Shindo, D. Sekiya, F. Narita and K. Horiguchi, "Tensile Testing and Analysis of Ferromagnetic Elastic Strip with a Central Crack in a Uniform Magnetic Field", *Acta Materialia*, Vol. 52, No. 15(2004), pp. 4677-4684.
- 6) Y. Yamaguchi, K. Horiguchi, Y. Shindo, D. Sekiya and S. Kumagai, "Fracture and Deformation Properties of Ni-Fe Superalloy in Cryogenic High Magnetic Field Environments", *Cryogenics*, Vol. 43, No. 8(2003), pp. 469-475.
- 7) Y. Shindo, Y. Yamaguchi and K. Horiguchi, "Small Punch Testing for Determining the Cryogenic Fracture Properties of 304 and 316 Austenitic Stainless Steels in a High Magnetic Field", *Cryogenics*, Vol. 44, No. 11(2004), pp. 789-792.
- 8) Y. Shindo and K. Horiguchi, "Cryogenic Fracture and Adiabatic Heating of Austenitic Stainless Steels for Superconducting Fusion Magnets", *Science and Technology of Advanced Materials*, Vol. 4, No. 4(2003), pp. 319-326.
- 9) Y. Shindo and K. Horiguchi, "Fracture Behavior of Thick-Section Weldment in Fe-12Cr-12Ni-10Mn-0.24N Stainless Steel at Liquid Helium Temperature", *Metallurgical and Materials Transactions A*, Vol. 35A, No. 12(2004), pp. 3797-3802.
- 10) Y. Shindo, Y. Mano, K. Horiguchi and T. Sugo, "Cryogenic Fracture Toughness Determination of a Structural Alloy Weldment by Notch Tensile Measurement and Finite Element Analysis", *ASME Journal of Engineering Materials and Technology*, Vol. 123, No. 1(2001), pp. 45-50.
- 11) Y. Shindo, K. Horiguchi, T. Sugo and Y. Mano, "Finite Element Analysis and Small Punch Testing for Determining the Cryogenic Fracture Toughness of Austenitic Stainless Steel Welds", *ASTM Journal of Testing and Evaluation*, Vol. 28, No. 6(2000), pp. 431-437.