極低温環境における材料特性と信頼性

石 川 圭 介*

* 金属材料技術研究所筑波支所

Performance and Reliability of Materials at Cryogenic Temperatures

Keisuke Ishikawa*

* National Research Institute for Metals Tsukuba Lab.

Cryogenic engineering is one of important high technologies. Research and development of superconducting systems has accelerated the studies on structural materials for low temperature use. Mechanical properties of the materials at liquid helium temperature are unique as well as essential for the design and the reliability of cryogenic machinery. The deformation and fracture behaviors of structural materials in liquid helium are reviewed. Chaotic behaviors in the discontinuous deformation are characteristic of fractal in the distribution of plastic deformation. Dimple pattern on fractured surface has also fractal in the randomness of the distribution. The reliability of the cryogenic machinery and systems depends upon the properties of structural materials. Now, the fundamental research of the materials has been promoted and R & D for new materials and the evaluation has been carried out internationally.

Key words: cryogenic engineering, superconducting system, structure materials, reliability, deformation, fracture, chaotic behavior, fractal

1. はじめに

一時の超伝導フィーバーは納まったものの超伝導技術の開発は重要な先端技術であることには変わりはない¹⁾。超伝導技術を初めとした極限技術は技術的困難さにかかわらず既存の技術に対するブレークスルーになると同時に、関連する先端技術への波及効果の恩恵を我々は受けることができる。超伝導技術は液体ヘリウム温度を稼動環境とした典型的な極低温技術である。新しい技術開発の課題として超伝導技術開発の研究ニーズは、情報・通信、医療、エネルギー技術、交通・運輸等広範な分野において貢献することが期待されており、より高まってきている。

液体ヘリウムは我々が入手できる冷媒の中で最も低い温度（大気圧のもとでは 4.2 K）を提供する。

ヘリウムよりは高い温度ではあるが比較的容易に入手することができる冷媒としては液体水素がある。液体水素は冷媒としてのみならず、燃料としても重要なエネルギー資源である。

極低温環境の利用にはいくつかの特徴と利点がある。温度の低下とともに材料の物性値の変化がある。中でも超伝導は述べたよう応用があり、学問的にも技術的にも大きな興味の対象である。また、極低温下では温度の変動が少ないことから、温度に起因する現象が無視できる。例えば、温度のゆらぎによるノイズの低下がある。ノイズの低下は高精度の計測、制御にとっては不可欠な条件である。加えて、液体ヘリウム中では不活性なことから低温による熱エネルギーの供給が少ないのと相まって、酸化に代表されるような化学反応が全く無視できる

* 〒305 茨城県つくば市千現 1-2-1 (1-2-1, Sengen, Tsukubashi, Ibaraki, 305 Japan)

著者紹介:

昭和 40 年 東京大学工学部卒業，材料強度専攻，金属材料技術研究所においては金属材料の変形と強度，さらには破壊機構の研究に従事。現在は液体ヘリウム温度域における高強度材料の機械的および物理的特性に関する研究を実施している。加えて，材料の機能特性と幾何学的形状の関係に興味を持っており，その一環としてフラクタルの材料科学における働きについての基礎研究に着手している。鉄鋼協会，低温工学協会等に参加。

図1 主なガスの沸点と低温領域の定義

環境と言うことが出来る。このような環境のもとで起こる現象は我々の居住している環境と著しく変わった極端なものではあるが、自然現象の基礎過程を理解するためには、学問的興味を強く喚起している。ひいては、基礎過程の理解は常温環境下での問題の解決につながっていく。

2. 極低温という環境

低温の環境は、物質の運動エネルギーを低下させていくことによって得てきた。具体的にはより低温にて沸騰するガスの液化によってである。最後の永久ガスであるヘリウムが液化されることによって、4.2 K に到達した²⁾。我々が手にいれた低温はガスの液化順番により低くなっていた。図1は主な液化ガスの沸点を示したものである。より低い温度を低温、極低温あるいは超低温と呼んでいる。より低い温度を求めて温度の壁に挑戦する研究は今なお続けられているが、このような研究領域を除いては、低温、極低温の区別は慣用的にははっきりしてきた。123 K を境にして低温、極低温と分けられ、これから対象にする液体ヘリウム温度は極低温と工学的には呼ばれている。

極低温が注目される理由としてはその温度域で起こる現象に特異なものが観察されるからである。

その中で最も興味を引いているのは超伝導である。超伝導は金属、合金系の物質に特有な現象であるように理解されてきたが、昨今のフィーバーに見られるように酸化物のセラミックスにおいて金属に比べて著しく高い超伝導遷移温度を持つものが現れた。そのほかに遷移温度は低いものの高分子にも超伝導は発現し、金属、セラミックス、有機物質とあらゆる物質において極低温環境で認められる。材料が超伝導化するとその電気抵抗が零になることは知られているが、機械的性質の変化については、あまり知られていない。図2は、金属の変形応力の

図2 超伝導と常伝導における金属の変形応力の変化。超伝導になると変形応力は減少する。(超伝導軟化現象)

超伝導と常伝導とによる変化を示したものである。超伝導化することによって金属の変形応力の低下、すなわち超伝導軟化である。超伝導電子の塑性変形をになっている転位線への運動抵抗の低下によるものと説明されているが詳しいことは今なお明らかでない。

超伝導が電子によってもたらされる臨界現象であるならば、分子、原子による同様な現象がありうる。それが、超流動である。超流動は超伝導に比べより低い温度で現れることと超伝導のように観測が容易でないうえに、現状では実用性が低いことから学問的興味が優先している。しかし、より低い温度の必要性、冷却効率等の点から先端技術の分野ではこれからその重要度を増していくものといえよう。

分子、原子のエネルギーレベルにおいても、トンネル効果が見られることは量子力学の教えるところであり、トンネル効果を巨視的観測結果を説明するために使われることがよくある。より低い温度環境になると図3に示すように金属の変形応力が低下していき、この機構の説

図3 純金属および合金の極低温における降伏応力の変化。液体ヘリウム温度以下になると降伏応力は一定または減少する。(低温軟化現象)

図4 金属材料の降伏応力は液体ヘリウム温度では歪み速度に依存しない。極低温において降伏応力の温度依存性が無くなることと対応している。

明にトンネル効果が引用されている。さらに、図4に示すように変形応力の歪速度依存性が認められなくなる。すなわち、何らかの助けのもとに温度低下にともなう熱的障害の増加を克服している機構が働いているものと理解されよう。

液体ヘリウムが不活性なことによる材料との界面における化学反応が起こり得ないことは予測できる。しかし、液体窒素においては同様ではない。液体ヘリウムおよび液体窒素の中で金属材料（銅、ステンレス鋼）の摩耗の試験を行った。液体ヘリウム中では予測どおりなんらの反応が材料表面に観察されないが、液体窒素中では摩耗により酸化物が生成されていた³⁾。液体窒素に共存する液体酸素が摩耗界面において酸化反応を液体窒素中においても起こしている。

極低温技術はヘリウムの液化とともに進歩、発展し、その利点について大きな関心が払われるようになってき

たものの、なお今までの研究蓄積が多くはない。しかし、環境の特殊性による学問的興味の対象が多いうえ、実用的可能性を秘めた技術課題を多く抱えているのが、極低温技術である。以下においては、極低温技術を支えている材料についてさらにはそれらで構成されている極低温機器の信頼性にかかわる材料問題について述べることにする。

3. 極低温における材料特性の特殊性

3.1 構造材料の変形と破壊

極低温において使用される材料は低温脆性をいかなる低温においても起こさないことが基本である。その中でオーステナイトステンレス鋼は代表的な構造材料である。特に18-8に代表されるSUS 304 Lが広く使われている。SUS 304 Lの低温域における変形挙動を図5に示す。室温から液体窒素温度までは滑らかな変形曲線を示し、温度の低下に伴う変形応力の上昇はそれほど大きくない。試験環境が液体ヘリウムになると、変形挙動は著しい変化を示す。変形曲線は鋸歯状になり応力と変位の関係が不確定になる。すなわち変形が均一に起こらない不連続変形になる。このように応力と変位を一对一に決めることが出来ない混沌とした状態、カオスが見られる。変形においてカオスが見られる理由として変形が均質に試料全体に発生するのではなく、離散化したためである。変形が離散化した様子を示しているのが温度測定の結果である。変形中の試験片の温度変化を測定するため試験片の中心に熱電対を置いた。極低温では材料の比熱と熱伝導率が低下することから、わずかな塑性変形によって発生した熱が拡散しにくく断熱的になり、試験片の温度が変形の進行に伴って上昇していく。その結果、それぞれ

図5 (a) 低温域におけるオーステナイトステンレス鋼の引張変形曲線。(b) 液体ヘリウム中での304 Lの不連続変形とそれにともなう試験片の温度変化。カオス的な変形に対応した不規則な温度変化を示す。

図6 試験片の温度と液体とヘリウムの温度差による熱伝達機構の遷移と界面を通じて流れる熱量の関係。

の塑性変形に伴った試験片の温度上昇が観測されることになる。

断熱変形は試験片とそれに接している液体ヘリウムとの熱伝達の遷移現象とも関連している。すなわち、試験片表面からの液体ヘリウムへ伝わる熱流速密度に依存した熱伝達の挙動に変化が見られる。図6は液体ヘリウムとステンレス鋼との熱伝達の遷移挙動を示したものである。熱流速密度が低い状態では液体ヘリウムは金属の表面において泡を形成することによって金属の熱を吸収する核沸騰が起きている。しかし、金属の発熱量が多くなるともはや核沸騰では熱を吸収することができず、金属表面にヘリウムガスの膜が形成される膜沸騰へと遷移していく。膜沸騰状態ではヘリウムガスの膜により熱の伝達が一時的に遮断されることから金属は断熱状態になり、その結果として金属の温度上昇につながっていく。

断熱変形による塑性変形の離散化は変形曲線の上にカオスを形成する。カオスはランダムな自然現象であることからその中にフラクタルを認められることが予測される。

フラクタルはマンデルブロ (Mandelbrot) によって提唱されたランダムさの程度を測定するための新しい概念である⁹⁾。その例として挙げられる複雑に入り組んだ海岸線の長さは計測に用いたスケールの基本長さによって変化し、スケールの依存性がフラクタル次元 (D) であり海岸線の複雑さの尺度になる。フラクタル次元の求め方はいろいろあるが、図7に例示するように霞ヶ浦の湖岸線の例に、正方目盛りを変えて湖岸線が含まれる正方形の数を数える、ボックスカウンティング法がある。図8に示すように、正方目盛りの寸法を変化させたときの霞ヶ浦の周長は (周長=正方目盛り×湖岸線が含まれる正方形の数)、目盛りの寸法を短くすると増していき長さ零では無限大になる。実際にはそのようなことはなく、有限の長さで打ち切れ有限の長さになろう (最小のス

図7 霞ヶ浦 (茨城県) の湖岸線のフラクタル次元を求めるためにボックスカウンティング法を適応した例。メッシュの寸法を変えて湖岸線が含まれる正方形の数を数える。

図8 図7におけるメッシュの寸法と湖岸線を含んでいる正方形の数の関係。(メッシュの数) $\sim$ (メッシュの寸法) $^{-D}$ の関係が成立している。

ケールは湖岸を形成している砂石の大きさと言ってもよからう)。霞ヶ浦の周囲の長さは理科年表によると 138 km となっている。霞ヶ浦の湖岸線のフラクタル次元は、 $D=1.15$ であり、三陸海岸の複雑さ $D=1.35^{10)}$ と比べてより直線に近い。(直線は1である)。霞ヶ浦は人工的に手が加えられており自然の状態が少なくなっているためでもあろう。

さて、フラクタルの考察をランダムに起こっている不連続変形に適用してみた結果が、図9である。もし変形

図9 図5(b)における温度上昇 (ΔT) とその頻度との関係。 $N(\Delta T)$ (温度頻度) $\sim (\Delta T)^{-D}$ の関係が304L および 310S において観察される。

図10 試験片を一次元の棒と見なしたときの不連続な塑性変形域の形成される様子を模式的に示す。無限回繰り返し反したものが、コントロール集合。

が試験片全体に均一に起こるならば試験片の縦断面全体に変形分布は2次元になる。しかし、不連続変形が起るとその次元は試験片の縦断面では、 $D=0.6$ になっている。これは試験片を長手方向の直線と考えると、図10に示すように塑性変形が起こる場所が試験片を分割していくように離散的に発生していくとする、といわゆるコントロール集合になり次元は、 $\log 2 / \log 3 \sim 0.56^{(7)}$ となり実験値に近い。また、実際の変形挙動を調べた結果局所的な塑性変形により形成されるくびれは、図10に近い分布を示していた⁽⁸⁾。

極低温における破壊は先に述べたように、脆性破壊を回避しているためにあらゆる材料で延性破面を示すといえてよい。延性破面の代表はディンプルである。ディンプル破面の形成機構については、多くの説明がなされて

図11 完全な延性破壊をした破面に見られるディンプルの直径 (d) と頻度。 $N(d)$ (個数) $\sim d^{-D}$ の関係が成立している。

いるが、個々のディンプルの分布とその原因となるディンプル形成のプロセスを論じた例は見当たらない。また、破面凹凸等の形状についてフラクタルにもとづく解析は多くみられ、破面の幾何学的形状についての研究分野において有効的な手段になりつつある^{(9)~(11)}。延性破壊のディンプル分布についてディンプルを円形に近似してその直径を尺度にした累積頻度を求めてみると、図11となる。ディンプルの分布頻度からフラクタル次元を求めてみると、 $D \sim 1.5$ となった。ディンプルが2次元の面状に隙間なく形成されるならば、その次元は平面の次元と同じ2となる。しかし、有限の直径の円のみで平面を埋め尽くすことはできず、ディンプルの形成されない領域が残る。ディンプルの形成を平面の分割占有に見なすならばそれはシェルピンスキーカーペットあるいはシェルピンスキーガスケットと呼ばれている2次元模様該当する。図12は、修正されたシェルピンスキーガスケットである。正方形の平面においてディンプルが占有していく仕方は、まず、4等分したその1つがディンプルによって占められる。次には、4等分された残りの3つが更に同様に4等分されその内の1つがまたディンプルによって占められるような操作を繰り返し行なった結果形成されたのが、図12に示すシェルピンスキーガスケットである⁽¹²⁾。

ディンプルの形成を整然と順序よく操作したが、実際には4等分した内のどれがディンプルになるかは確定できないのでランダムに選択するようにするならば、より実際の破面に近づく分布になる。シェルピンスキーガスケットの次元は、 $D = \log 3 / \log 2 \sim 1.585$ である。

極低温になると、環境との化学反応、温度の影響が殆ど無視できることから、変形、破壊等の素過程が顕著に現れた結果である。しかし、変形、破壊に見られるラン

図12 デンプルの形成の分布を模式的に描いた図。修正されたシェルピンスキーガスケットと呼ばれるものに相当する。

ダムな挙動は室温、高温あるいは環境との相互作用の起こる状況でも起こりうるので、それぞれに特有なフラクタルが見いだされるであろう。

3.2 塑性変形と強度の評価

金属材料はある値以上の応力を負荷すると永久変形が始まり、その値を降伏応力あるいは強度と呼んでいる。降伏強度を測定することは実際には困難であるから、0.2%の塑性歪の応力を耐力として工学的降伏強度としている。明確な降伏点を持たないオーステナイト・ステンレス鋼は、耐力以下の応力においても塑性変形が進行していき、機器の稼動状態で変形が進行して機器の機能が損なわれることがある。

高性能超伝導機器において、 Nb_3Sn に代表される金属間化合物の超伝導線材が使用される。金属間化合物は延性に乏しいため稼動時の負荷応力によって機器の構成部材に歪が生じると線材にも同様な歪がもたらされ、そのため線材の特性劣化となり機器の機能が損なわれる。超伝導機器特有の大きな電磁力と熱収縮により発生する応力が稼動時に構造材料にかかっている。極低温において定応力下での塑性変形、すなわちクリープは全く新しい問題であるためほとんど研究されてこなかった。一方、クリープ現象は拡散等の熱活性化過程の活発に起こる高温域での問題であり、低温とくに極低温では無視できるものと見なされていた。しかし、クリープ破断に至ることはないがクリープ変形については全く無視できる状況ではない¹³⁾。

液体ヘリウム中でのオーステナイト・ステンレス鋼のクリープ挙動を調べてみた結果が図13である。確かに試験温度が低下するとクリープ歪は小さく、歪速度も低下している。しかし200時間においても歪速度は零にな

図13 4 Kにおけるオーステナイトステンレス鋼のクリープ曲線。鋼種のための数字は0.2%全耐力との比である。歪は応力負荷による初期歪を除いたものである。

図14 200時間におけるクリープ歪。耐力以下の負荷応力で市価も低温下でもクリープ歪は零にはならない。

ることではない。図14は200時間のクリープ歪を示している。クリープ歪が、加工硬化と回復との競合によって生じるものと一般的に理解されている。極低温での回復は考えられない、従って加工硬化により可動転位数の減少がクリープ歪の変化に対応しているといえよう。そのため加工硬化の著しい、SUS 304Lではクリープ歪の低下が顕著になっている。極低温における転位の運動についての考察には興味ある議論がなされているが結論はえられていない¹⁴⁾。

3.3 極低温における疲れ試験と破壊特性

材料の疲れ特性は主として繰返し破断のための応力と破断に至る繰返し数によって表示されるS-N曲線と可視的なき裂の長さを測定することによって示されるき裂の伝播特性がある。後者の試験は比較的時間的制約は少ない。それに対して、S-N曲線を求めるためには試験片の破断回数を予測できないため試験時間を想定することが難しい。極低温の試験機においては試験片を破断に至るまで液体ヘリウム温度に保持していなければならない。そのため液体ヘリウムの貯蔵あるいは液化機の長

図15 極低温疲れ試験装置における冷凍システムの概念図と再凝縮システムの原理図

時間運転という問題があった。これらの問題を解決するため長時間にわたって液体ヘリウム温度を保持するための再凝縮冷凍システムを開発して試験を可能にした¹⁵⁾。装置のシステムおよび概念図を図15に示す。

図16は上記装置により取得したチタン合金およびオーステナイト・ステンレス鋼の長時間疲れ特性、4KでのS-N曲線である。両材料とも液体ヘリウム中では繰返し数が、 10^6 回を越えると疲れき裂の起点は試験片の内部（内部き裂により破断した場合は黒塗りにて示す）になる。疲れき裂の起点は試験片表面の突き出し・引っ込みの凹凸と言われていることと異なる。特に図17(b)に示すようにき裂の伝播特性が試験温度によらないチタン合金では、S-N曲線の試験温度依存性(a)はき裂発生特性によって支配されていることになる。従って、き裂発生初期の挙動は重要な研究対象といえよう。

図18は疲れき裂の起点近傍の走査電子顕微鏡写真である。疲れき裂の起点には介在物、空洞等の先在的物理欠陥の存在は認められていない。内部き裂の発生原因はマイクロ組織の不均一性と塑性変形の局在化にあることがマイクロ解析から明らかにされている¹⁶⁾。内部き裂の寸法と応力拡大係数の間には逆比例の関係が存在する¹⁷⁾。内部き裂は単一な平坦面から成り立っている場合と、幾つかからの面から出来ている場合がある。応力拡大係数が高くなると単一の面の内部き裂が、観察される傾向にある。

内部き裂が最終破断の破面に成長するための臨界値として、その応力拡大係数が重要になる。内部き裂の繰返し応力下の応力拡大係数を、 $\Delta\sigma_{\max} \sqrt{f_s}$ と見なして、最大応力振幅との関係を示したものが図19である。内部き裂が進展するための下限値は応力振幅によらず2～

図16 液体ヘリウム中でのオーステナイトステンレス鋼とチタン合金のS-N曲線。白抜きは疲れき裂が表面から、黒塗りは疲れき裂が試験片の内部から発生したものを示す。

$3 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ と一定となっている。これがこの材料の臨界値すなわち疲れ強度限界値を与えているといえる。疲れき裂伝播の下限界値ともほぼ一致している¹⁸⁾。

現在、疲れ特性の極限値の解釈、疲れ機構の統一的解釈について基礎的研究が進められている。

図17 チタン合金 (Ti-6Al-4V) の疲れ特性の温度依存性。
(a) S-N 曲線の温度依存性, 試験温度の依存性が大い, (b) き裂伝播の温度依存性, 試験温度の依存性が小さい。

4. 極低温機器の信頼性

4.1 構造的特徴

極低温機器の構造物としての最大の特徴は室温環境の中においておよそ 300 度近い温度差をもった極低温環境を安定にかつ長時間保持しなければならないことである。この温度差を保つためには、極低温環境への熱の侵入を抑えなければならない。熱は伝導、対流、放射によって伝達される。対流、放射は真空断熱によって極力抑えられていることから、極低温機器は必ず真空構造が存在すると言ってよい。真空空間を有する構造は常に圧力差によって生じる応力を隔壁は受けていることになる。真空断熱の破損は外部からの急激な熱侵入をまねき、そ

図18 極低温における疲れき裂の試験片内部発生点の走査電子顕微鏡写真。

図19 試験片内部における疲れき裂の発生点におけるミクロな応力拡大係数 $\Delta\sigma_{\max}\sqrt{f_s}$ と試験時における最大応力振幅, $\Delta\sigma_{\max}$ の関係。

れは容器内に貯蔵されている液体ヘリウムの急激なガスを生じさせ機器内の圧力の急上昇、機器の爆破等の災害をもたらす危険がある。従って、真空容器の信頼性は不可欠な条件になっている。機器の冷却にともなって常温では検知されなかった微小な欠陥が冷却による部材の収縮により生じ、それを通してヘリウムの漏洩がある。これはいわゆるコールドリークと呼ばれるもので極低温機器の製造において注意しなければならない点である。

さらに、極低温機器は機器の稼動する低温域まで冷却しなければならない。冷却の方法は冷凍機、液化機あるいは冷媒ガスを使用するのであれ、エネルギーを必要とする。温度の低下は上昇とことなりエントロピーを低下させなければならないことから、温度を低下させる際のエネルギー効率は至って低い。従って、冷却しなければ

ならない部分は最小にしたい。そのため機器を構成する材料の高強度化は効果的である。強度の上昇にともなう、靱性が低下するのは極低温においても起こるため、極低温機器の構造材料には靱性の低下を抑えた高強度化が施された材料を選択しなければならない。

4.2 機能特性について

極低温機器は稼動状態においては、冷却にともなう熱収縮の応力と稼動負荷が構造材料にかかっている。稼動負荷としては、超伝導マグネットによる電磁力、および回転、振動、加速度等の動的な力がある。

超伝導機器に代表される極低温機器は冷却の効率を考慮すると長時間稼動を前提としている。その際の問題として稼動中の機器の機能の劣化がある。先に述べたように高強度材を使用するものの、冷却システムの軽減のため強度の点からも限界設計が採られている。そのため何らかの原因で変形や歪を生ずる危険性がある。変形による問題点はすでにクリープのところで述べたように、超伝導線材の特性劣化につながりひいては機器の機能特性の低下、運転の継続が困難になる。しかるに、構造材料の強度、靱性値等は機器の設計に欠かせないうえ、それらの特性の向上も重要な研究対象である。加えて長時間使用の信頼性を考慮すると長時間特性の情報も重要な材料選択の因子である。

4.3 材料データの現状

前節で述べたように、機器の設計、安全性、信頼性等の点から極低温材料の材料データは不可欠なものであるが、最近注目されてきた新しい技術分野であるため一般にはまだまだ広範なニーズは低い。極低温技術の優位性は認められているものの既存技術の代替え技術が多くかつ克服しなければならない研究課題も残されている。ヘリウムガスの液化、超伝導の発見から 80 年余りが過ぎようとしている現在、極く少数の特定分野を除いて実生活で我々の目にふれるものは稀である。従って、そのための材料研究は超伝導物質の研究と比較して決して多くはない。

極低温機器の開発プロジェクトにおいて構造材料に関する研究項目は含まれており、より高性能の材料を選択しようとする意気込みはうかがえるようになってきたが、プロジェクトの絶対数が少なく材料データが整備されるまでには至っていない。しかし、評価法の特殊性を鑑み普遍的な評価法の検討が国際的に検討されており、共通試料にもとづいたラウンドロビンテストが実施されており、評価法の規格化の動きとそれに伴うデータの蓄積が始まりつつある¹⁰⁾。

4.4 評価技術の今後

今まで論じてきた材料の問題は極低温機器に使用される場合を想定してきたものであり、実際に機器として使

用された材料の問題を直接シュミレートしてはいない。特に超伝導機器においては強力な磁場に材料はさらされることになる。磁場に材料がさらされると材質の変化、材料特性の劣化等をもたらすことになる。液体ヘリウム中でオーステナイトステンレス鋼の破壊靱性が磁場の強さに依存する結果が得られている。

オーステナイト・ステンレス鋼は低温において、応力負荷によってマルテンサイト変態を起こすことが知られている。同様に磁場によっても変態が起こり強磁性相が出現する²⁰⁾。従って、組成によっては極低温、強磁場でさらに応力負荷の状態ではそれらが複雑に相互に及ぼしあう。オーステナイト相の安定性によって磁場中での破壊靱性は増加したり減少したりし複雑な変化を示す²¹⁾。これらの挙動は疲れ等他の特性にも現れると思われるが現在ほとんど研究はなされていない。

磁場との相互作用の問題を避けるためにオーステナイトステンレス鋼の非磁性化の研究はなされており、新材料開発の面では見るべき成果が挙げられている²²⁾。

5. ま と め

先端技術の研究開発分野において必要とされる構成材料の信頼性は、それらの新技術が社会に根付くためには充分保証されなければならない。しかし、先端技術の研究開発の進歩は急速であり、それに対して材料データの取得、整備、さらには新材料の開発等は追いついていけないのが実状である。そのためには材料研究の守備域を常に拡大しておき、いかなる要望にも迅速に対応できるようにしておかなければならない。

材料の保証が不十分であると先端技術を取りまく、規制、法規等の整備が遅れ社会的な不安を生み出すことになるから、適切な配慮が必要になる。

(1990 年 9 月 25 日受理)

文 献

- 1) 戸叶一正, 前田 弘: 低温工学, **23**, 334 (1988).
- 2) K. メンデルスゾーン, 大島恵一訳: 「絶対零度への挑戦」, 講談社ブルーバックス.
- 3) A. Iwabuchi, T. Honda & J. Tani: *Cryogenics*, **29**, 124 (1989).
- 4) T. Ogata & K. Ishikawa: *J. Mater. Sci. Lett.*, **4**, 1079 (1985).
- 5) マンデルブロ, 広中平佑監訳: 「フラクタル幾何学」, 日経サイエンス (1985).
- 6) 高木隆司: 「かたちの不思議」, p. 210, 講談社 (1984).
- 7) 長井 寿, 石川圭介: 鉄と鋼, **75**, 707 (1989).
- 8) B. B. Mandelbrot, D. E. Passoja & A. J. Paulay: *Nature*, [309], 721 (1984).
- 9) E. Underwood & K. Banerji: *Mater. Sci. Eng.*, **80**, 1 (1986).

- 10) R. H. Dauskardt, F. Haubensak & R. O. Ritchie: *Acta Met.*, **38**, 143 (1990).
- 11) 高安秀樹: 材料科学, **24**, 138 (1988).
- 12) K. Ishikawa: *J. Mater. Sci. Lett.*, **9**, 400 (1990).
- 13) J. K. Tien & C. T. Yen: *Adv. Cryog. Eng.*, **30**, 319 (1984).
- 14) T. A. Parkhomenko & V. V. Pustovalvo: *Phys. Stat. Sol.*, **74**, 11 (1982).
- 15) T. Ogata & K. Ishikawa: *Trans. I.S.I.J.*, **26**, 48 (1986).
- 16) 梅澤 修, 長井 寿, 石川圭介: 鉄と鋼, **75**, 159 (1989).
- 17) 梅澤 修, 長井 寿, 石川圭介: 鉄と鋼, **76**, 924 (1990).
- 18) 石川圭介: 配管技術, **28** [5] 77 (1986).
- 19) T. Ogata, K. Nagai, K. Ishikawa, K. Shibata & E. Fukushima: *Adv. Cryog. Eng.*, **36**, 1053 (1990).
- 20) T. Kakeshita, H. Shirai, K. Shimizu, K. Sugiyama, K. Hazumi & M. Date: *Trans. J.I.M.*, **29**, 553 (1988).
- 21) J. W. Chan, J. Glazer, Z. Mei, P. A. Kramer & J. W. Morris, Jr.: *Acta metall. mater.*, **38**, 479 (1990).
- 22) 平賀啓二郎: バウンダリー, **3** [12] 63 (1987).