

57 サンドイッチ複合材の超低温域における特性

水海技術部 *前田利雄、高島逸男
大阪支所 櫻井昭男

1. まえがき

地球温暖化現象などの環境問題がクローズアップされている中で、エネルギー面で化石燃料の消費から脱却した、将来のエネルギー源の一つとして、太陽光、風力、波力等を利用した水素利用エネルギーシステムが考えられている¹⁾。この水素利用エネルギーシステムの技術開発には、液化水素タンカーの開発が解決すべき課題の一つとなっている。これまでの繊維強化プラスチック (FRP) 等に関する極低温特性の研究²⁾により、FRP、発泡断熱材等は液化水素運搬船タンクの新構造材料として有望と考えられるので、断熱性のある構造材として超低温域における使用を目途に、軽量で高弾性率の炭素繊維強化プラスチック (CFRP) と断熱特性の優れた硬質ウレタンフォームを合わせたサンドイッチ複合材について、超低温域における熱伝導率特性、熱収縮率特性及び落錘三点曲げ衝撃による動的強度の温度依存性、衝撃破壊挙動等を調べたので、その結果を報告する。

2. 供試材及び試験方法

2. 1 熱伝導率特性

本試験に供したサンドイッチ平板は、心材に発泡剤の異なる3種類の硬質ウレタンフォームを使用した。それらのかさ比重は約0.05とし、厚さはすべて24mmとした。また、表面材のCFRPは強化材にカーボクロス(317g/m²)を用い、樹脂にはビニルエステルを使用して厚さを3mmとし、

表-1 供試材の組成

試料記号	表面材		心材		サンドイッチ板の比重
	強化繊維	プライ数	繊維含有量	発泡剤	
CB	カーボクロス	8	52 wt%	HCFC-141b	0.289
CW	カーボクロス	8	52 wt%	水	0.291
CF	カーボクロス	8	52 wt%	HFC-245fa	0.331

注) Cクロス: 平織カーボクロス(317g/m²)
樹脂: ビニルエステル

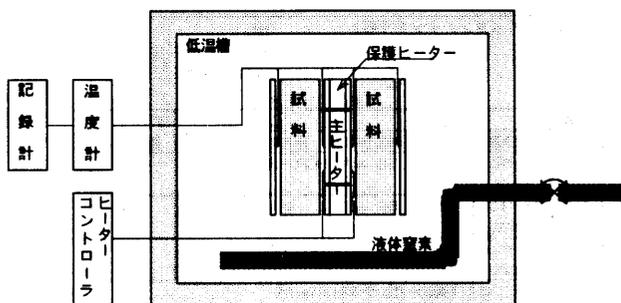


図-1 熱伝導率測定装置

サンドイッチ平板の全厚さを30mmとした。サンドイッチ平板の成形は心材に直接カーボクロスを含浸積層して所定のパネルを得る湿式成形法によって行った。そして、成形後は60℃にて24時間以上アフターキュアを行った。供試材の形状、比重、繊維含有量等は表-1のとおりである。

熱伝導率の測定は図-1に示す熱伝導率測定装置を用いて、JIS A1412の平板直接法により雰囲気温度30~-180℃における熱伝導率を求める方法で行った。本装置は2枚の同じ材質、同じ寸法の供試材でヒーターを挟むように取り付け、主ヒーターへの印加熱量、低温槽内の雰囲気温度をパソコンによりコントロールして、供試材内の熱流が定常状態になった時点での供試材表面の温度差から計算することによって厚さ方向の熱伝導率を求めるものである。保護ヒーターは試料内の熱流が正確に厚さ方向に流れるようにコントロールするためのものである。

2. 2 熱収縮率特性

供試材は熱伝導率特性の試料記号CBと同様で心材にかさ比重が0.04、0.06、0.1の硬質ウレタンフォームを用いた3種類のサンドイッチ平板を使用し、試験片の寸法は幅30mm、長さ200mmとした。

熱収縮量の測定は図-2に示す押棒式熱収縮測定装置を用いて、供試材寸法30×30×200mm

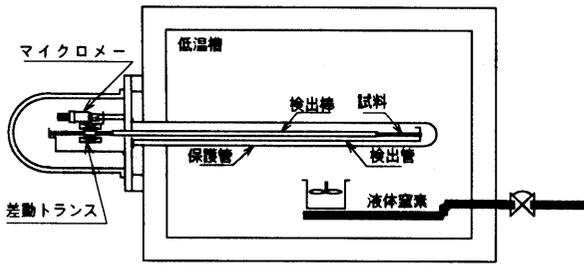


図-2 熱収縮測定装置

表-2 供試材の組成

試料記号	表面材		心材		サンドイッチ板の比重
	強化繊維	ファイバー数	繊維含有量	発泡剤	
CB	カーボンクロス	4	52 wt%	HFCO-141b	0.119
CW	カーボンクロス	4	52 wt%	水	0.116
CF	カーボンクロス	4	52 wt%	HFO-245fa	0.100

注) Cクロス: 平織カーボンクロス(317g/m²)
機種: ビニルエステル

の長手方向の寸法変化を差動トランスで検出し、記録する方式で行った。熱収縮率は周囲温度 0、-40、-80、-120、-160、-190℃の各点における熱収縮量より算出して求めた。

2.3 衝撃特性

試験に供したサンドイッチ平板は前述(2.1)と同様に成形したが、厚さは試験規格に合わせて心材は10mmとし、表面材は1.5mmとしてサンドイッチ平板の全厚さを13mmとした。供試材の形状、比重、繊維含有量等は表-2のとおりである。

試験は硬質プラスチックに関する JIS K7211、計装化衝撃試験のための報告書³⁾等を準用して製作した落錘衝撃試験機(図-3)を用いて3点曲げ衝撃試験を行った。本試験のデータ取り込みは落錘の頂部に取り付けたひずみゲージ式荷重計により行った。荷重計から出た電気信号は、動ひずみ計(応答周波数 DC~200kHz)で増幅され、10kHzのローパスフィルターを通して一旦トランジェントコンバーターに蓄えられた後、マイクロ・データロガーを経由してパソコンに取り込み、荷重-変位(たわみ)線図を作成するとともに、最大荷重、たわみ量、吸収エネルギー等を算出した。

3. 試験結果及び考察

3.1 熱伝導率特性

雰囲気温度30℃~-180℃におけるサンドイッチ平板の熱伝導率と温度との関係を調べた結果を図

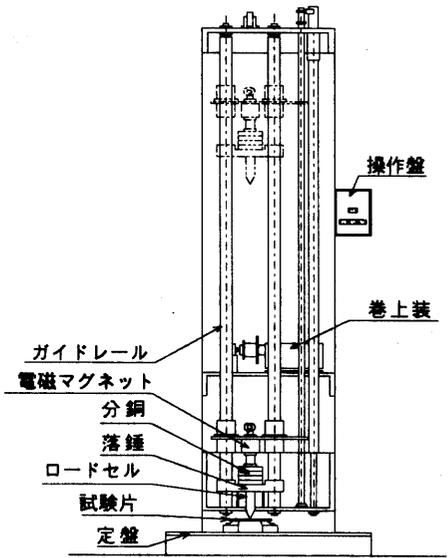


図-3 落錘衝撃試験装置

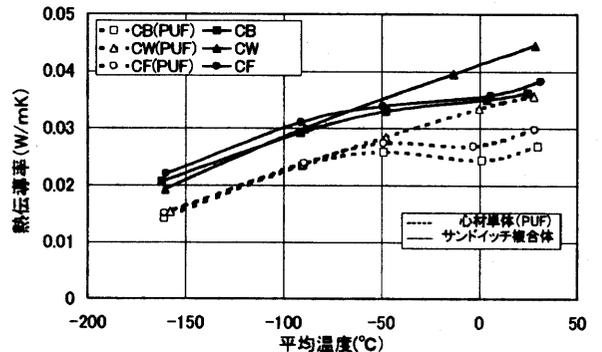


図-4 熱伝導率と温度との関係

4に示す。図には比較のため、心材の硬質ウレタンフォーム単体についても点線で示した。図からわかるように、フロン系発泡材を用いた硬質ウレタンフォーム単体の熱伝導率が-100℃以上の温度で極大値、極小値を持つ3次曲線的挙動を示すのは周知の通りである。これは、気泡内にとどまっているフロンガスが雰囲気温度の変化に伴って状態変化し、断熱効果が増減することによるものと考えられている。-100℃以下の温度では、発泡剤に水を使用した硬質ウレタンフォームを含めた各供試材とも温度の低下に伴い直線的に減少し、各供試材による差異も殆どないことがわかる。これは-100℃以下になると気泡内のガスが凝縮、凝固するため、熱伝導率の違いが顕著でなくなるものと考えられる。サンドイッチ平板の熱伝導率は心材の硬質ウレタンフォームの特性が大きく影響を及ぼし、類似の温度特性を示した。また、これらは実験に供したサンドイッチ平板の構成厚さ比に応じた値を示しており、いわゆる複合則が適用できるものとする。

3. 2 熱収縮率特性

各供試サンドイッチ平板と、これを構成している心材及び表面材の熱収縮率と温度との関係を図-5に示す。これによると心材の硬質ウレタンフ

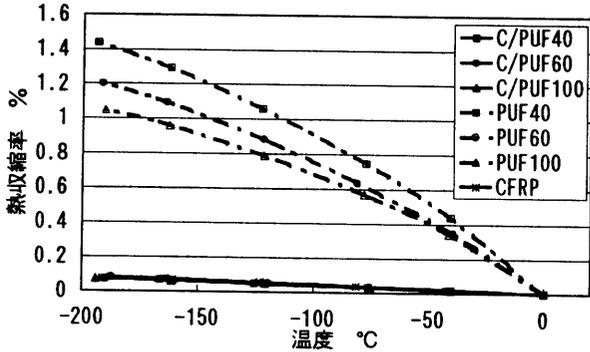


図-5 熱収縮率と温度との関係

フォームの熱収縮率は温度の低下に伴い大きくなるが、その増加する割合は温度の低下につれて小さくなる傾向を示している。また熱収縮率は心材のカサ比重により異なり、カサ比重の小さいものほど大きく、0~-190°Cでの熱収縮率は1.0~1.4%であった。これに対しサンドイッチ平板の熱収縮率は0.08%と小さく、表面材のCFRP単体の場合とほぼ同じ値であった。これは心材と表面材の強度が大きく異なるため、強度の小さい心材が強度の大きい表面材に拘束されているものと考えられる。

3. 3 衝撃特性

3. 3. 1 エッジワイズ

落錘重量2.5kg、落下高さ1.0m、スパン60mmで落錘3点曲げ衝撃試験を行ったサンドイッチ平板のエッジワイズ方向（表面材の層に平行方向の打撃）の荷重-時間線図の一例を図-6に示す。エッジワイズ方向の破壊は一般に試験片の支持側中央に発生したクラックが打撃側へと伝播していく破壊と打撃側から圧縮によるせん断破壊が支持側へと進行していく破壊が重なって破断する¹⁾。

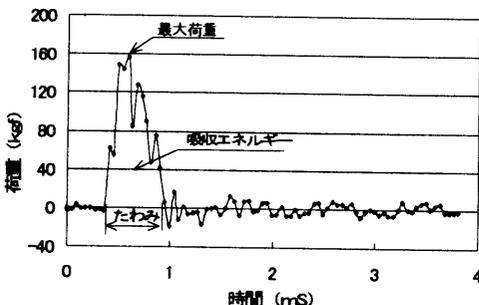


図-6 エッジワイズ方向の荷重-時間曲線

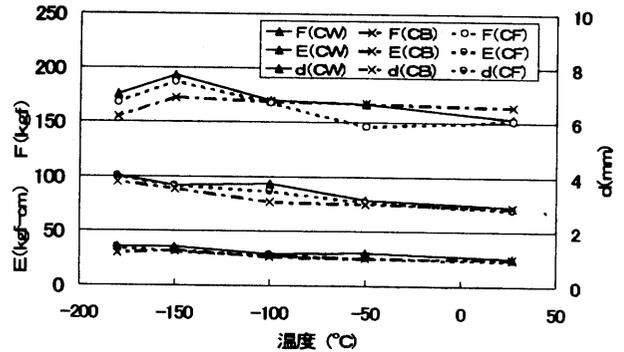


図-7 エッジワイズ方向のサンドイッチ平板の衝撃特性

本試験の破壊様相も支持側の引張りによる破壊と打撃側の圧縮による破壊が混在した様相が見られた。このため、破壊時の荷重の挙動は最大荷重後、破壊の進展にしたがい急激に低下するが、ある値で再度上昇した後また低下上昇を繰り返しながら徐々に減少する傾向が見られる。衝撃破壊挙動の温度依存性を調べるため、図中に示す最大荷重(F)、たわみ(d)、吸収エネルギー(E)を各供試材について求めたものが図-7である。これによると、最大荷重は-150°C付近までは温度の低下に伴いやや上昇するが、それ以下の温度では減少する傾向が見られる。これに対し、たわみは温度の低下とともにやや上昇する傾向を示している。吸収エネルギーはたわみと同様の傾向を示し、吸収エネルギーにはたわみが依存していることがわかる。また、衝撃挙動の供試材による違いはそれほど見られなかった。

3. 3. 2 フラットワイズ

図-8は落錘3点曲げ衝撃試験によるサンドイッチ平板のフラットワイズ方向（表面材も層に垂直方向の打撃）の荷重-時間線図の一例である。フラット方向の荷重の挙動は時間の増加とともに上昇し、最大荷重後ある値まで急激に減少し、その後も荷重は上下の変動を繰り返しながら徐々に減少する。試験後の破壊様相を見ると打撃側表面

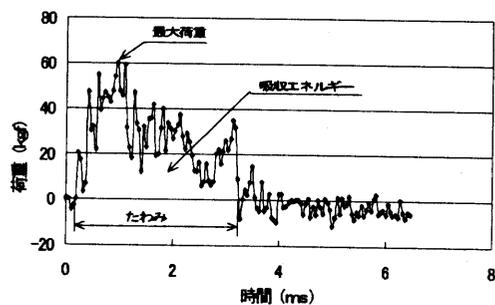


図-8 フラットワイズ方向の荷重-時間曲線

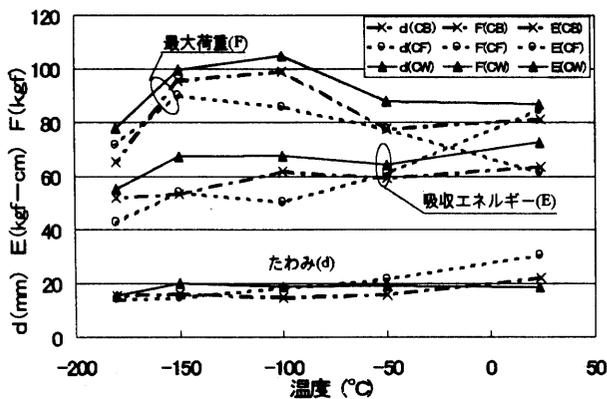


図-9 フラットワイズ方向のサンドイッチ平板の衝撃挙動

材は完全に打撃部で破断し、支持側の表面材も大部分が中央で層間剥離を伴って破断している。心材は表面材との界面あるいは界面近傍の心材内で破壊している。破壊様相の温度による影響はエッジワイズ方向では殆ど見られなかったが、フラットワイズ方向では-150℃以下の温度で、心材が表面材から数個にはずれて飛散するケースが多く見られるようになった。また支持側表面材が完全に破断しない場合がいくつか見られた。エッジワイズ方向と同様に各供試材の衝撃挙動の温度依存性を調べた結果を図-9に示す。フラットワイズ方向の最大荷重は一体に-100℃~-150℃までは温度の低下に伴い大きくなる傾向を示し、-150℃以下の温度ではエッジワイズ方向の場合と同様に減少する。しかし、たわみ及び吸収エネルギーはエッジワイズ方向の場合とは逆に温度の低下に伴いやや減少する傾向を示した。

衝撃特性の方向による違いを比較すると、最大荷重はエッジワイズ方向の方が約2倍程度大きくなっているが、たわみは約1/6、吸収エネルギーは約1/2と小さくなっている。

3.3.3 衝撃特性の向上対策

つぎに衝撃特性の向上を図るため、表面材の強化繊維にカーボン繊維とガラス繊維を3:1の割合で使用したハイブリッドFRPを用いたサンドイッチ平板の落錘3点曲衝撃試験を行った。エッジワイズ方向の結果を比較のため前述の結果と併せて図-10に示す。表面材にハイブリッドFRPを使用したサンドイッチ平板は点線で示している。これによると表面材がCFRPの場合に比べ、最大荷重はあまり変化が見られないが、たわみは4.5倍、吸収エネルギーは3倍に大きくなった。フラットワ

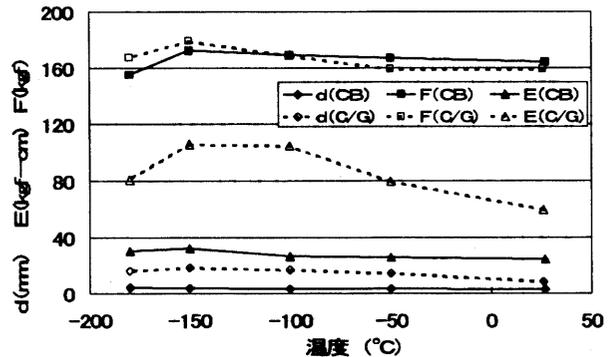


図-10 エッジワイズ方向の衝撃特性（表面材による違い）

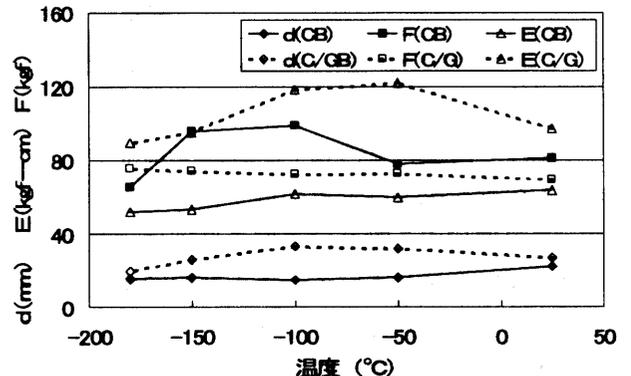


図-11 フラットワイズ方向の衝撃特性（表面材による違い）

イズ方向についての結果を同様に図-11に示す。フラットワイズ方向では最大荷重がやや小さくなったが、たわみは1.7倍、吸収エネルギーは1.8倍大きくなった。これらの結果は、ガラス繊維とのハイブリッド化により強度はあまり変化しないが、変形量の増加により衝撃エネルギーの吸収を向上させることができることを示している。

4. あとがき

CFRP サンドイッチ複合材の超低温域における熱伝導率特性、熱収縮率特性及び衝撃特性を調べた。その結果、熱伝導率特性は超低温域においてもいわゆる複合則が適用できることがわかった。熱収縮率特性では心材の収縮が強度の大きい表面材に拘束され、表面材のCFRP単体の特性と殆ど同様である。また、衝撃特性では低温域においても特性の劣化は見られず、断熱性のある構造部材として有用なものである。

参考文献

- 1) 阿部他；日本造船学会誌第832号1998,680-687
- 2) 櫻井他；第69回船研発表会講演集1997,101-108
- 3) (社)日本機械工業連合会他；平成2年度計装化衝撃試験機の標準化のための調査研究報告書,1991
- 4) 上村他；高圧ガスVol.14 No.6,1977,1-7