

組物強化熱可塑性樹脂複合材料円筒のエネルギー吸収特性

柿田 恭良 (株式会社日立製作所 研究開発グループ, yasuyoshi.kakita.ec@hitachi.com)

森 雅斗 (岐阜大学 工学部, t3122041@edu.gifu-u.ac.jp)

大谷 章夫 (岐阜大学 複合材料研究センター, a_ohtani@gifu-u.ac.jp)

仲井 朝美 (岐阜大学 工学部, nakai@gifu-u.ac.jp)

Energy absorption property of braided fabric reinforced thermoplastic composite tube

Yasuyoshi Kakita (Department of Research & Development Group, Hitachi, Ltd., Japan)

Masato Mori (Graduate School of Mechanical & System Engineering Division, Gifu University, Japan)

Akio Ohtani (Composite Materials Center, Gifu University, Japan)

Asami Nakai (Faculty of Engineering, Gifu University, Japan)

要約

本研究では組物複合材料のエネルギー吸収特性について検討した。強化繊維に炭素繊維、母材樹脂にナイロン66樹脂を用いた熱可塑性樹脂複合材料円筒 (CF/PA66) を作製し、樹脂、強化繊維の異なる複合材料円筒とエネルギー吸収特性を比較した。エポキシ樹脂を用いた熱硬化性樹脂複合材料パイプ (CF/Epoxy) はCF/PA66に比べて、エネルギー吸収量が小さくなった。断面写真より長手方向のクラックが発生し、外側の層の曲率が大きくなっていることから、長手方向クラックが発生することで、外側の層が曲がりやすくなり、繊維の破壊に必要なエネルギーが減少したためだと考えられる。強化繊維にガラス繊維を用いた熱可塑性樹脂複合材料パイプ (GF/PA66) はCF/PA66と同様の破壊様相を示したが、エネルギー吸収量は低い値を示した。これは強化繊維の引張強度が影響していると考えられる。エネルギー吸収量の速度依存性に関して破壊じん性が影響し、破壊じん性の速度依存性が小さいほど圧縮速度によるエネルギー吸収量の差が小さいことが分かった。

キーワード

複合材料, 組物, 軸方向圧縮, エネルギー吸収特性, 熱可塑性樹脂

1. 緒言

複合材料から成るエネルギー吸収部材はその一端にテーパ加工を施すことにより、Progressive Crushingと呼ばれる特有な破壊現象を示し、金属材料と同等またはそれ以上のエネルギー吸収特性を示すことが明らかとされている。複合材料の強化形態として、組物、織物、編物等のテキスタイルがよく用いられている。著者らはこれまで組物を強化形態とする複合材料パイプのエネルギー吸収特性を検討してきた。図1に組物の模式図を示す。組物は、らせん状に連続して配向している繊維束で構成されており、この繊維束を組糸という。組

糸の配向方向と組物の長手方向との間で形成される組角度が自由に設計でき、また中央糸と呼ばれる繊維束を挿入することで軸方向の剛性を高めることもできるため、目的に応じた、幅広い設計が可能である。

近年、連続繊維強化熱可塑性樹脂複合材料が注目を集めている。熱可塑性樹脂を用いることから、2次加工性、リサイクル性を付与することができ、成形に化学反応を伴わないため、熱硬化性樹脂に比べて高サイクルでの成形が可能となる。そのため高い生産性、高いエネルギー吸収量を必要とする自動車用衝撃部材においては熱硬化性樹脂複合材料の代わりに熱可塑性樹脂複合材料の利用が検討されつつある。これまで濱田・中谷(1996)、上田・遊間(2013)らなどによってCFRPパイプのエネルギー吸収特性に関する研究はされてきたが、熱可塑性樹脂パイプのエネルギー吸収特性に関する研究は行

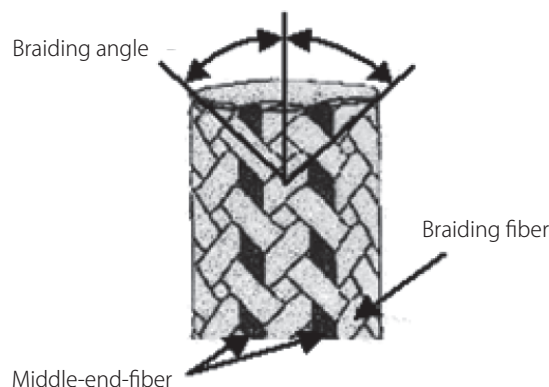


図1：組物

われていない。熱可塑性樹脂複合材料は熱硬化性樹脂複合材料に比べ、一般的にじん性が高く、衝撃特性が良いことから衝撃吸収部材への適用が検討されつつある。

また、組物複合材料の動的圧縮試験、エネルギー吸収量の速度依存性に関する研究も多くなされていない。自動車などに用いられる衝撃吸収部材の場合、圧縮速度によってエネルギー吸収量が大きく変化すると、衝突速度に応じて安定して衝撃を吸収できないため、エネルギー吸収量の速度依存性は安全性の面で非常に重要な問題である。

本研究では、強化繊維に炭素繊維、母材樹脂にナイロン66樹脂を用いた熱可塑性樹脂複合材料円筒を作製し、樹脂、強化繊維の異なる複合材料円筒とエネルギー吸収特性を比較した。さらに、エネルギー吸収量の速度依存性について検討した。

2. 材料および成形方法

本研究では、組糸16本、中央糸8本、組角度30度、積層数3層の組物複合材料円筒を作製した。試験片の諸元を表1に示す。強化繊維は炭素繊維とガラス繊維の2種類とし、母材樹脂はエポキシ樹脂、ナイロン66樹脂、ポリエーテルイミド樹脂の3種類とした。

強化繊維に炭素繊維、母材樹脂にエポキシ樹脂を使用した試験片(以下CF/Epoxy)は、炭素繊維(T700-12k:東レ(株)製)に予めエポキシ樹脂を含浸させたプリプレグ繊維を使用し、マンドレル上に組物を作製後、組物の上からテープをラッピングし、加熱硬化させ成形した。

強化繊維に炭素繊維、母材樹脂にナイロン66樹脂を使用した試験片(以下CF/PA66)は、炭素繊維(T700-12k-60E:東レ(株)製)およびPA66繊維(L235-35BAU:旭化成せんい(株)製)を混織し、混織糸を用いて組物を作製後、引抜成形法により成形した。

引抜成形機は内側に電熱ヒータを有するマンドレル、成形前に予め組物を加熱するための遠赤ヒータ、成形金型、冷却装置および引取装置の5種類の装置により構成される。成形金型の模式図を図2に示す。図中のH1～H8はそれぞれ金型上下両側に挿入された電熱ヒータの位置を示し、これらを用いて成形金型を加熱する。成形金型の設定温度はH1～H8の8カ所で制御可能であり、入口側から290、290、290、290、290、285、280、275℃とした。冷却装置はエアクーラーによる空冷式装置であり、これを金型出口に設けることで冷却を行った。エアクーラーの流量は、引抜速度に関わらず一定とした。

強化繊維にガラス繊維、母材樹脂にナイロン66樹脂を使用した試験片(以下GF/PA66)、強化繊維に炭素繊維、母材樹脂にポリエーテルイミド樹脂を使用した試験片(以下CF/PEI)もCF/PA66と同様の作製方法で作製した。

3. 実験方法および実験結果

エネルギー吸収特性を検討するため、試験片長さを60mmとし、圧縮変位30mm、試験速度を5mm/minとして、準静的圧縮試験を行った。また、エネルギー吸収量の速度依存性を検討するために、負荷エネルギー200(J)、試験速度を4.4(m/s)として、動的圧縮試験を行った。

図3に準静的試験で得られた荷重-変位線図を、図4に動的試験で得られた荷重-変位線図を示す。ここで全エネルギー吸収量は荷重-変位線図と変位軸の17mm地点を通る垂線で囲まれた部分の面積とした。図5に準静的試験での全エネルギー吸収量、図6に動的試験での全エネルギー吸収量を示す。全エネルギー吸収量の大きさは準静的、動的のどちらにおいてもGF/PA66<CF/Epoxy<CF/PA66<CF/PEIの順番になり、エネルギー吸収量の大小関係は同じであった。

表1：試験片諸元

試験片名	強化繊維	母材樹脂	内径(mm)	厚さ(mm)
CF/Epoxy	炭素繊維	エポキシ樹脂		
CF/PA66	炭素繊維	ナイロン66	15	1.4
GF/PA66	ガラス繊維			
CF/PEI	炭素繊維	ポリエーテルイミド		

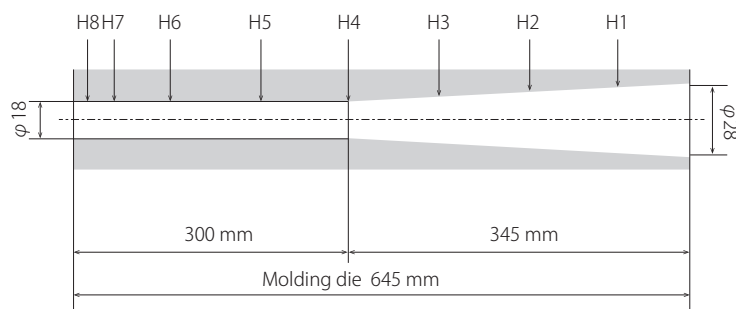


図2：引抜成形金型

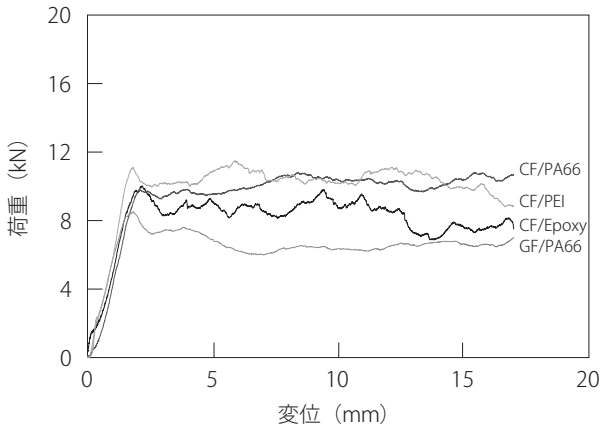


図3：準静的試験の荷重-変位線図

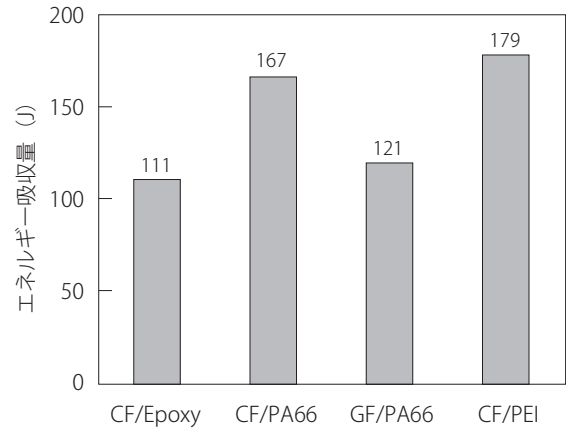


図6：動的試験のエネルギー吸収量

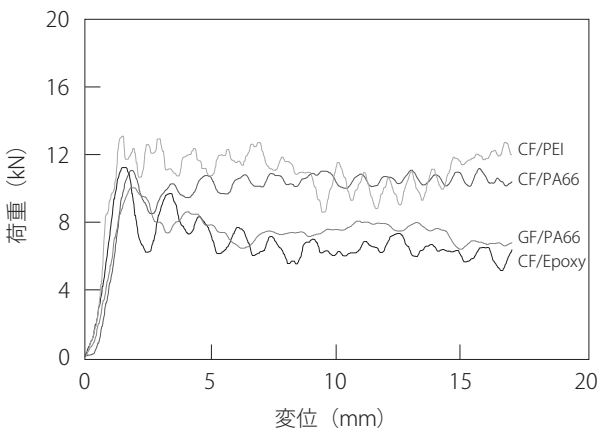


図4：動的試験の荷重-変位線図

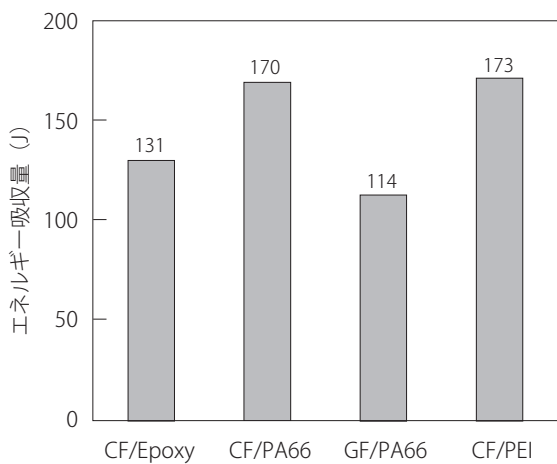


図5：準静的試験のエネルギー吸収量

4. 考察

Hamada and Ramakrishna (1995) によって破壊に必要なエネルギーの全体量 U は、各種破壊に必要なエネルギーの総和と等しいと考えられ、次式で表すことが出来ることが分かっている。

$$U = U_{de} + U_{bend} + U_{ff} + U_{\sigma}$$

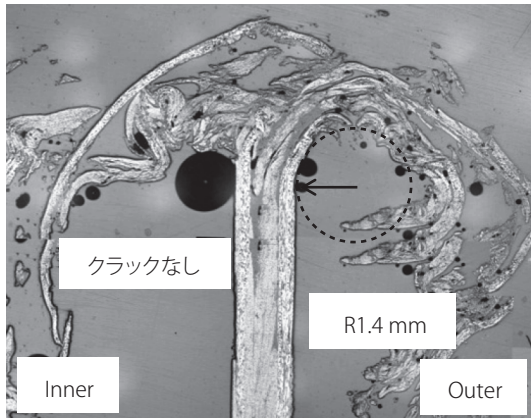
ここで繊維束間のはく離に必要なエネルギーを U_{de} 、複合材料の曲げに必要なエネルギーを U_{bend} 、繊維の破断に必要なエネルギーを U_{ff} 、その他エネルギーを U_{σ} とした。本研究では、圧縮試験後の試験片を包埋し、切断面を光学顕微鏡で観察し、上記の式を踏まえて考察を行った。

図7 (a)、(b)にそれぞれCF/PA66の準静的圧縮試験後、動的試験後の断面写真を示す。破壊は、変位初期においてテーパ部の破壊によりWedgeが形成され、そのWedgeが圧縮されることにより層間に長手方向のクラックが発生し、各層が内側と外側に開き、進展する。

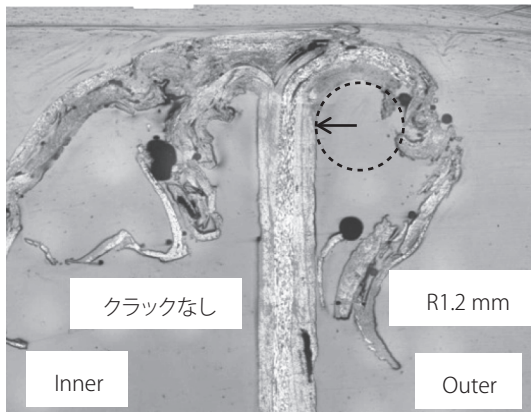
4.1 熱硬化性樹脂複合材料との比較

図5、図6よりCF/EpoxyはCF/PA66よりも準静的試験では23%、動的試験では32%低い値を示した。

図8の(a)、(b)にそれぞれCF/Epoxyの準静的圧縮試験後、動的試験後の断面写真を示す。準静的試験結果について考察するために図7(a)、図8(a)より外側の層の曲率半径を比較すると、CF/PA66の曲率半径がCF/Epoxyの曲率半径よりも小さいことが分かる。曲率半径が小さいほど複合材料の曲げに必要なエネルギー U_{bend} が大きいため、複合材料の曲げに必要なエネルギー U_{bend} の大きさはCF/Epoxy < CF/PA66であると考えられる。これまでの研究により破壊メカニズムは、まず層間に長手方向のクラックが発生し、各層が内側と外側に曲げられ、破壊が進展していくと考えられている (Hamada and Ramakrishna, 1995)。そのため、長手方向のクラックが発生しにくいと繊維束間のはく離に必要なエネルギー U_{de} は低くなるが、外側の層が曲がりにくくなるため曲げに必要なエネルギー U_{bend} が高くなり、結果、繊維破壊が多く発生し織

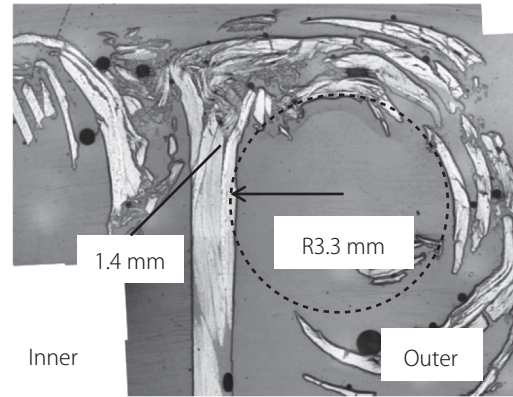


(a) 準静的試験後

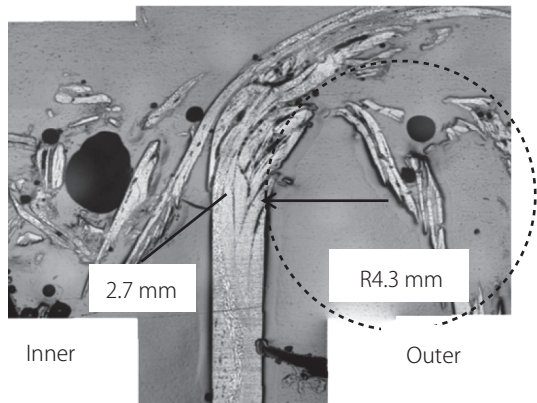


(b) 動的試験後

図7：“CF/PA66”の断面写真



(a) 準静的試験後



(b) 動的試験後

図8：“CF/Epoxy”の断面写真

維の破断に必要なエネルギー $U_{\#}$ が高くなる。

一般に長手方向のクラックは樹脂の層間破壊じん性が高いほど発生しにくいと考えられており、今回使用した樹脂の破壊じん性の大きさはCF/Epoxy < CF/PA66である。破壊後の断面写真から長手方向クラックの長さを計測すると、CF/Epoxyが1.4 mmであったのに対し、CF/PA66において発生していないことが分かった。結果、長手方向クラックの長さが長いほど、前述した通り曲率半径が大きくなっていることが分かった。

次に動的試験結果を考察するために図7、図8の(b)を比較すると、準静的圧縮試験と同様にCF/Epoxyの曲率半径はCF/PA66の曲率半径よりも小さいことが分かった。また、長手方向のクラックに関して、準静的圧縮試験同様にCF/Epoxyにおいては発生しているのに対し、CF/PA66では発生しなかった。これより、動的試験の破壊モードは準静的試験と同様の破壊モードであると考えられる。

4.2 ガラス繊維強化複合材料との比較

図5、図6よりGF/PA66はCF/PA66よりも準静的試験では33%、動的試験では28%低い値を示した。

図9の(a)、(b)にそれぞれGF/PA66の準静的圧縮試験後、動的試験後の断面写真を示す。図9をみると、長手方向クラックは発生しておらず、外側の層の曲率半径もCF/PA66と同等

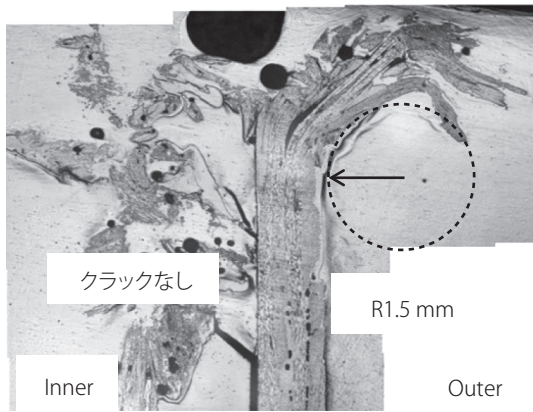
程度の大きさであることが分かった。これよりCF/PA66とGF/PA66は同様の破壊モードを示すことが分かった。同様の破壊モードを示したにも関わらず、GF/PA66の吸収エネルギーが低い値を示した理由としては、ガラス繊維が炭素繊維よりも引張強度が低いことから、繊維の破断に必要なエネルギー $U_{\#}$ が低くなったためだと考えられる。

4.3 種類の異なる熱可塑性樹脂複合材料との比較

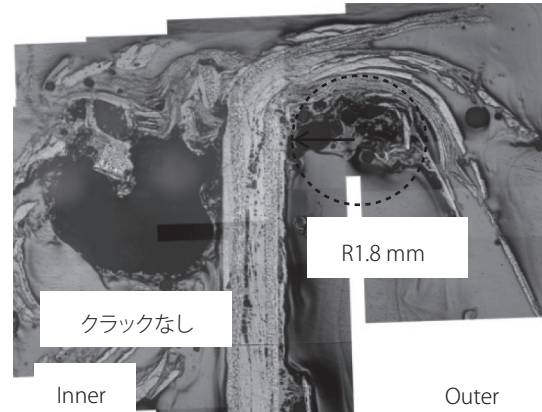
図5、図6よりCF/PEIはCF/PA66とほぼ同等の値を示した。図10の(a)、(b)にそれぞれCF/PEIの準静的圧縮試験後、動的試験後の断面写真を示す。図10をみると、長手方向クラックは発生しておらず、外側の層の曲率半径もCF/PA66と同等程度の大きさであることが分かった。これよりCF/PEIとCF/PA66は同様の破壊モードを示すことがあきらかとなった。

4.4 エネルギー吸収量の速度依存性

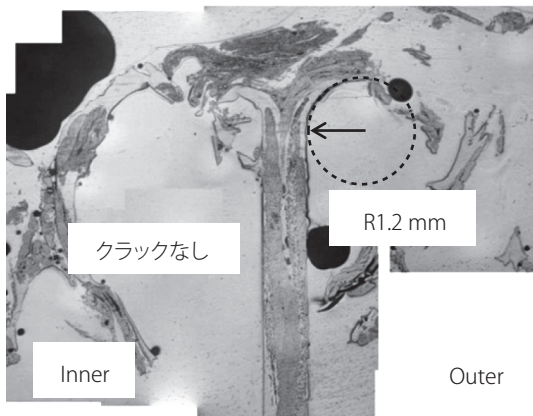
図11に準静的試験と動的試験の全エネルギー吸収量を示す。図11よりCF/Epoxyは準静的と動的の間で全エネルギー吸収量の差が15%あったことから、CF/Epoxyは熱可塑性樹脂複合材料に比べエネルギー吸収量の速度依存性が大きいと考えられる。図8の(a)と(b)を比較すると、長手方向クラックの長さは準静的では1.4 mmであったのに対し、動的では2.7



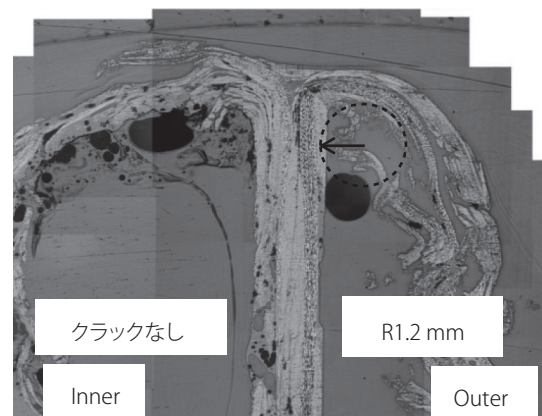
(a) 準静的試験後



(a) 準静的試験後



(b) 動的試験後



(b) 動的試験後

図9：Cross section of “GF/PA66”

図10：“CF/PEI”の断面写真

mmと準静的に比べ動的の方が長くなっていることが分かった。これはエポキシ樹脂を用いた複合材料は破壊じん性値が圧縮速度の上昇にともなって低下する特性があり、この特性のために圧縮速度によるエネルギー吸収量の差が大きくなったと考えられる。

5. 結言

熱可塑性樹脂複合材料パイプを作製し、エネルギー吸収特性を熱硬化性樹脂複合材料と比較した。樹脂の破壊じん性が長手方向のクラックの発生に大きく影響し、長手方向のクラックが発生しにくいと複合材料の曲げに必要なエネルギー U_{bend} および繊維の破断に必要なエネルギー $U_{\#}$ が高くなることが分かった。また、エネルギー吸収量の手依存性に関しても破壊じん性が影響し、破壊じん性の速度依存性が小さいほど圧縮速度によるエネルギー吸収量の差が小さいことが分かった。

引用文献

濱田泰以・中谷有 (1996). 複合材料円筒を用いたエネルギー吸収部品に関する研究—構造用FRPW/Gの研究方向—. JSAE 秋季大会, Vol. 95, 29-32.
Hamada, H. and Ramakrishna, S. (1995). Scaling effects in the energy absorption of carbon-fiber/PEEK composite

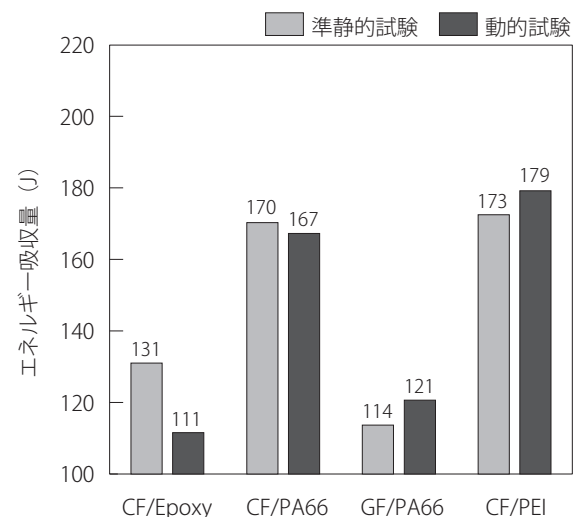


図11：準静的試験と動的試験のエネルギー吸収量の差

tubes. *Composites Science and Technology*, Issue 3, 211-221.
中谷有・横山敦士・後藤彰彦・後呂学・宗村昌幸・小池朝夫・立石源治・山根保夫 (2001). FRP 構造強度部材のエネルギー吸収特性／構造強度部門委員会構造用FRPワーキング活動

報告. 自動車技術, 54-59.

上田政人・遊間康平 (2013). CFRP 薄肉角筒のプログレッシブフォールディング破壊におけるエネルギー吸収特性. 日本複合材料学会 第38回複合材料シンポジウム, 61-62.

(受稿：2014年12月25日 受理：2015年2月25日)