

近年、輸送機分野では動力の電動化に向けた流れが急加速しており、モーターや電池の搭載による重量増加を補うために、高強度または軽量な材料への置換によるボディ軽量化などの検討が進められ、高分子材料への期待は非常に大きい。しかし、高分子材料は、動的速度域では、静的速度域とは異なる挙動を示す場合があり<sup>1)</sup>、実際の速度域での材料試験を行う必要がある。一方、CAEは、設計開発段階における製品強度や性能の評価を行う事が可能なツールとして広く活用されており、CAE用の材料構成則の取得を目的とした試験および計測は、需要が増してきている。本報では、高分子材料について、衝突など高速変形特性に対する材料試験およびCAE適応事例を紹介する。



技術本部  
機械・プロセスソリューション事業部  
機械技術部  
あなん まさひろ  
阿南 匡範



技術本部  
機械・プロセスソリューション事業部  
機械技術部  
とりこえ ゆういち  
鳥越 裕一



技術本部  
計算科学センター  
しみず ひろし  
清水 洋志



技術本部  
計算科学センター  
なかじま しんご  
中島 伸吾

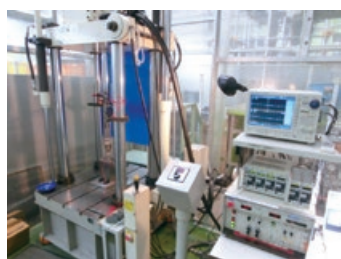
## F-1 高速変形特性取得のための材料試験設備

当社では、高速変形特性を取得する材料試験設備として、第1表および第1図に示す試験機を保有している。高速引張試験機①では、治具などの工夫により、引張/圧縮/曲げ/層間破壊じん性などの物性取得が可能である。落錘式高速引張試験機では、最大荷重50kNまで対応することができる。第2図に試験可能な荷重と速度の範囲を示す。

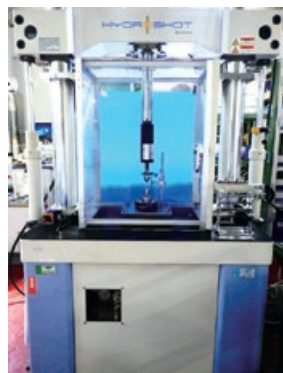
第1表 高速変形特性取得のための試験設備

試験設備	負荷方向	ロードセル容量	最大速度
高速引張試験機①	引張・圧縮	20kN	10m/s
高速引張試験機②	引張	10kN	20m/s
落錘式高速引張試験機	引張	50kN	10m/s

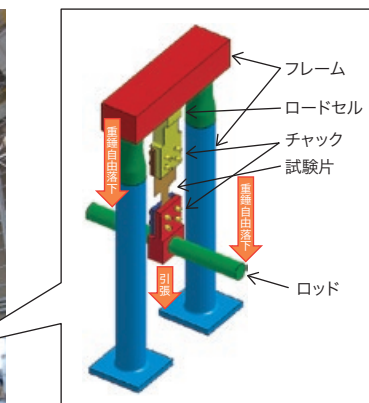
第1図 当社で保有する試験設備外観



<高速引張試験機①>



<高速引張試験機②>



<落錘式高速引張試験機>

## F-2 非強化型熱可塑性樹脂やゴム・エラストマーの高速変形特性評価技術

高分子材料の中でも非強化型熱可塑性樹脂やゴム・エラストマーなどで設計された部材は、規定された変形量の中で、破断しないことが求められる場合がある。これらの材料は、静的速度では数百%の破断ひずみを示すこともあるが、動的速度では数十%の破断ひずみとなることもある。第3図にポリプロピレンの速度依存性を取得した際の応力-ひずみ線図を示す。試験速度を0.001m/s(=60mm/min、ひずみ速度 $1 \times 10^{-1}/s$ )から10m/s(ひずみ速度 $1 \times 10^3/s$ )まで高速にすると、破断ひずみが1/5程度に小さくなる。また、第4図に示す高速引張試験後の試験片外観より、0.001m/sでは白化およびネッキングを伴って破断しているのに対し、10m/sでは破断部近傍以外は白化せずネッキングを伴わずわずかな伸びで破断している。

一方、CAEにより破壊挙動をモデル化する場合、材料の機械的特性として、破断部の局部ひずみと応力との関係を求めておく必要がある。当社では、変形過程を高速ビデオカメラにより撮影することで、画像相関法により、試験中の平行部に生じるひずみ分布や、任意の位置・評点間距離でのひずみを解析できる。一例として、第5図に応力-ひずみ線図上の任意の点におけるひずみコンター像を求めた例を示す。

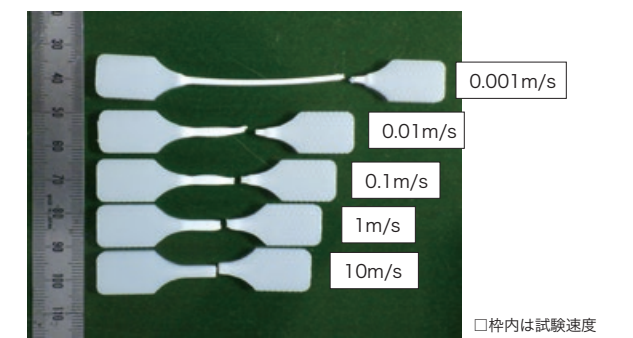
画像相関法は、ネッキング等の局部変形を伴って破断する材料において、局部における時々刻々の応力やひずみを導出する事が

でき、CAEによる破壊評価が必要となる破断までの応力-ひずみ関係の取得に非常に有効な手段である。CAEでは、この応力-ひずみ関係の速度依存性を、たとえば、降伏応力がひずみ速度のべき乗に比例するとした次式のCowper-Symonds式などで近似して用いられる。

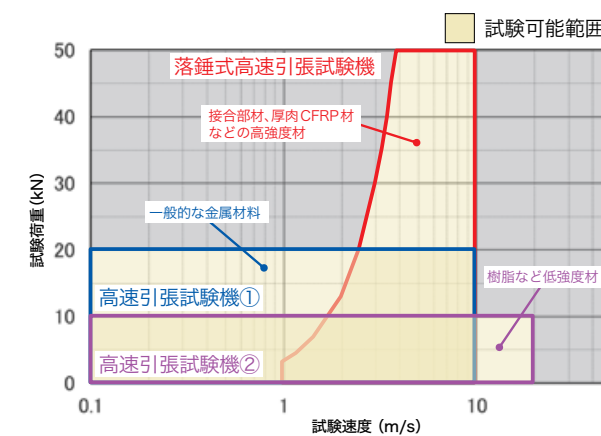
$$\sigma = \sigma_0 \left[ 1 + \left( \frac{\dot{\epsilon}}{C} \right)^{\frac{1}{p}} \right]$$

ここで、 $\sigma_0$ は静的な場合の降伏応力、 $\dot{\epsilon}$ は歪み速度、C、pは材料定数を表す。

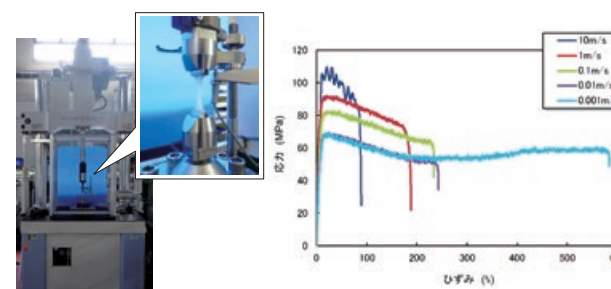
第4図 高速引張試験後の試験片外観(ポリプロピレン)



第2図 試験可能な荷重と速度の範囲



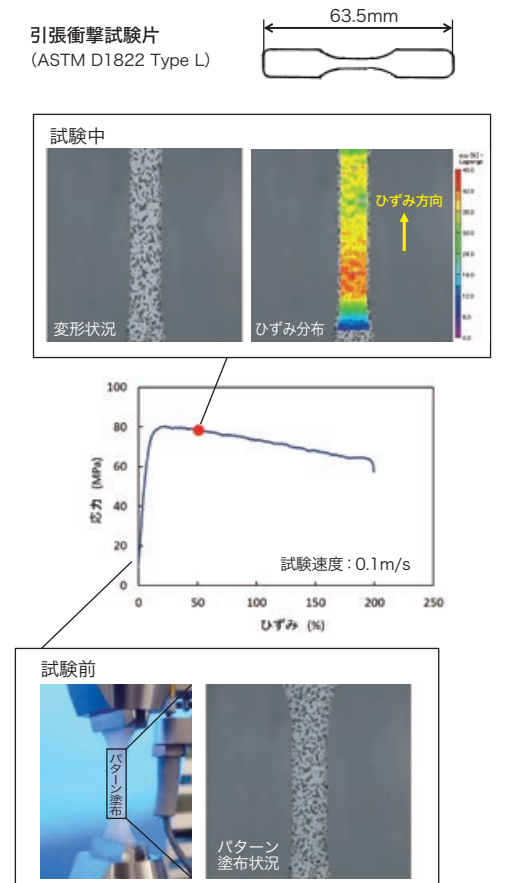
第3図 ポリプロピレンの速度依存性



<試験状況(高速引張試験機②)>

<応力-ひずみ線図>

第5図 ポリプロピレンの高速引張試験時のひずみコンター像





### F-3 繊維強化樹脂 (FRP) の高速変形特性評価技術

#### 3.1 動的速度域での層間破壊じん性値の取得

炭素繊維で強化したCFRPに代表される繊維強化樹脂は、高強度、高弾性といった優れた特性を持ち、軽量化のための金属代替材料として有望な材料である。しかしながら、繊維と樹脂に界面を有することから動的破壊挙動が複雑となり、設計にCAEを活用するには難易度が高いなどの問題がある。連続繊維を引きそろえて積層する長繊維強化樹脂の場合、特に層間の破壊挙動を把握する必要があり、動的速度域での層間破壊じん性値の取得が必要となる。

一方、動的試験では、応答遅れやハンチングの発生等の理由により荷重の計測が困難な場合がある。当社で層間破壊じん性試験ができる高速引張試験機①においても、上述の問題があり、これを解決するため、ロードセルを新規製作し、より精度よく荷重を計測できるようにした。第6図に動的試験構成を示す。ロードセル設計のポイントは、荷重当りの発生ひずみ量を大きくし、比較的応答速度が高いコラム型ロードセルとしたことである。なお、設計時にCAEにより平行部のほぼ全域に均一なひずみが発生することを確認している。このロードセルにより、試験速度10m/sまでの荷重計測精度が向上し、これまで計測が困難であった速度域における層間破壊じん性値の測定や評価が可能となった。

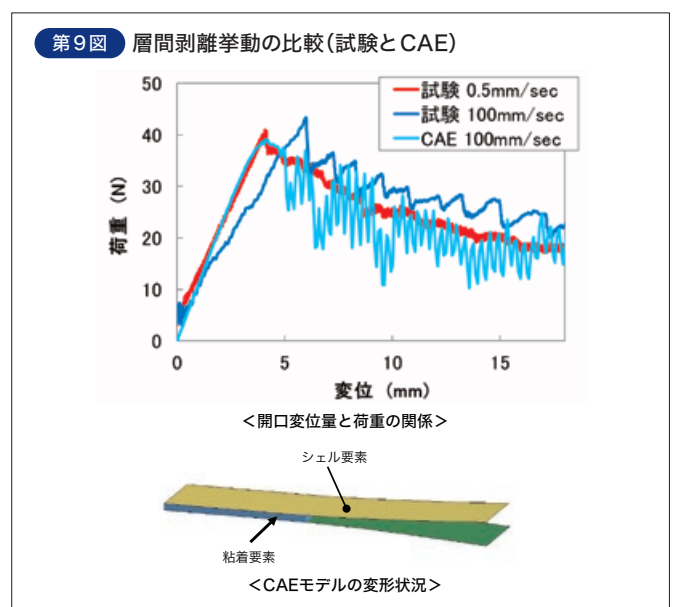
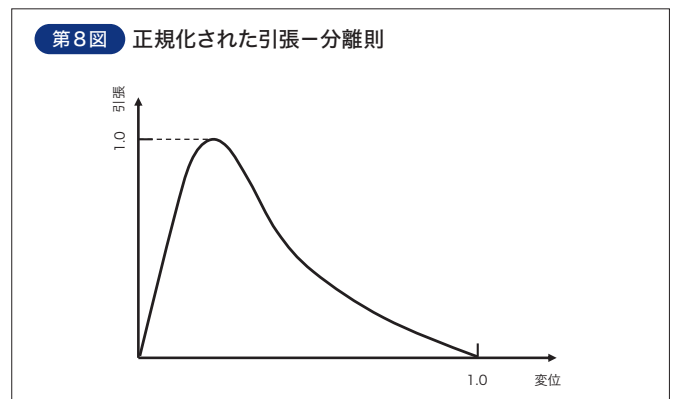
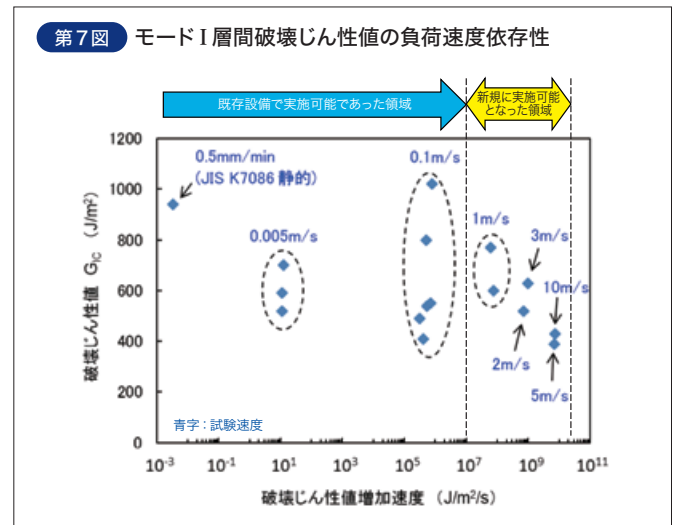
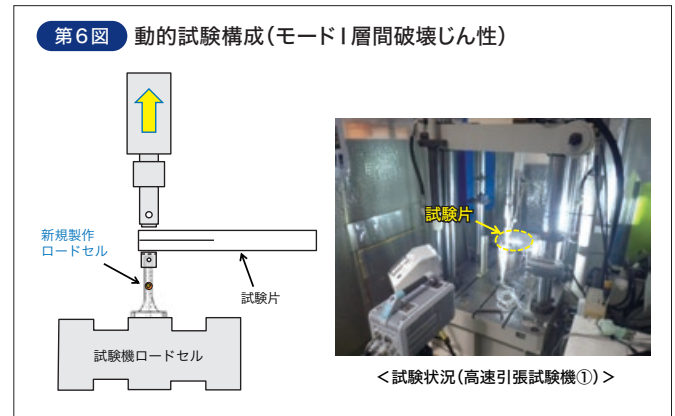
第7図に、一方向積層材の中央層1層のみを45°層とした試験

片でのモードI層間破壊じん性値の荷重速度依存性を示す。この積層構成は、擬似等方積層した際の層間を考慮したものである。中央層に45°層が存在すると、剥離面の両面を繊維が橋掛けするファイバブリッジングが起り、破壊じん性値のばらつきが大きくなった。この影響により、本件においては顕著な荷重速度依存性は確認されなかった。なお、一方向積層材では、本件と同じ破壊じん性値レベルにて、階段状の荷重速度依存性がみられる<sup>2)</sup>。

#### 3.2 層間破壊じん性値のCAEへの適応例

前項で示した試験により取得した荷重-変位線図および層間破壊じん性値 $G_{IR}$ 、 $G_{IIR}$ を用い、CFRP円筒部材の衝撃圧壊CAEに適応した事例を示す。

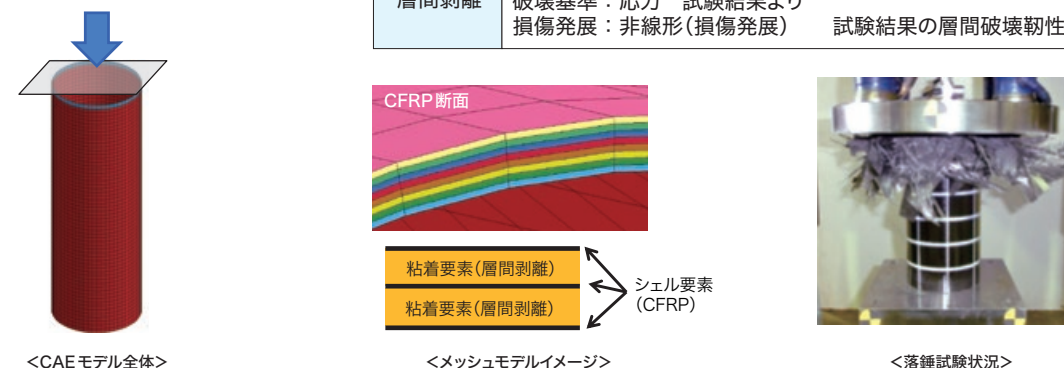
まず、層間剥離挙動を第8図に示すように正規化された引張-分離則でモデル化した。このモデルは、破壊モードIとIIの相互作用( $G_R = (G_{IR}^2 + G_{IIR}^2)^{1/2}$ )が考慮される。次に、モードI層間剥離挙動をモデル化した。CAEモデルは、CFRPの繊維層にシェル要素を、層間に粘着要素を使用し、粘着要素に前述の層間破壊モデルを設定した。層間剥離過程における試験とCAEの比較を第9図に示す。層間剥離過程の荷重と変位の関係は、試験時の挙動がCAEにて概ね表現できており、本モデル構成で層間剥離挙動の把握が可能である事が確認できた。



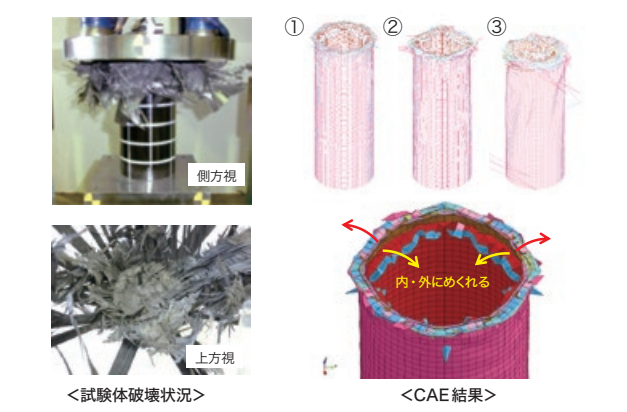
第10図 衝撃圧壊解析の概要

<落錘衝撃解析>  
 ○ CFRP 積層構造 ⇒ シェル要素+粘着要素  
 ○ 層間剥離挙動 ⇒ 試験結果を使用  
 使用解析ソフト LS-DYNA

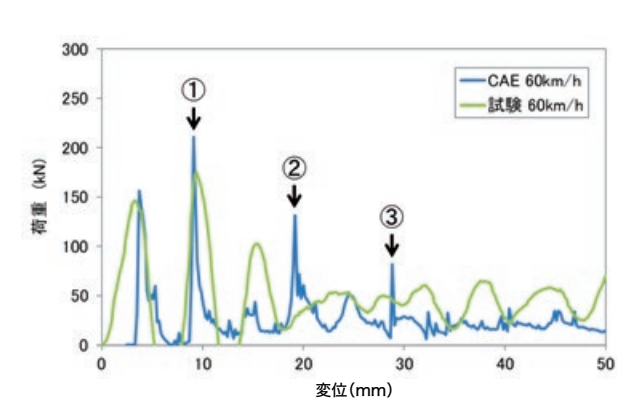
要素タイプ	CFRP各層:シェル要素、層間:粘着要素
CFRP	MAT_ENHANCED_COMPOSITE_DAMAGE (破壊考慮した複合材料モデル) 弾性率: 繊維・樹脂 破壊強度: 繊維・樹脂+引張・圧縮 損傷発展: 線形(脆性的)
層間剥離	MAT_COHESIVE_GENERAL (粘着挙動モデル) 破壊基準: 応力 試験結果より 損傷発展: 非線形(損傷発展) 試験結果の層間破壊挙動性値



第11図 CFRP部材の圧壊状況(試験とCAE)



第12図 衝撃圧壊挙動 荷重-変位線図(試験とCAE)



最後に、このモデルを円筒部材の衝撃圧壊挙動に適応した。CAEモデルの概要を第10図に示す。CFRP円筒部材は、一方向プリプレグを[0°/45°/90°/-45°/0°/-45°/90°/45°/0°]の9層に擬似等方積層し、シートワイディング成形により作製した。圧壊試験は、落錘試験装置により円筒部材の軸方向に重錘(質量184kg)を時速60km/h(17m/s)で落下衝突させた。試験およびCAEでの圧壊状況を第11図に示す。CAEでの圧壊は、重錘の衝突部近傍のみで生じており、試験と同様、重錘の移動と共に下方へ進展した。また、各層が内外へ折れ曲がる挙動がCAEでも確認

できた。ただし、CAEでは破壊したと判定され破片となった要素は削除されるため、破壊後に繊維が花びら状に広がる状況は表現できていない。

荷重-変位関係の比較を第12図に示す。CAEと試験では、初期の荷重ピーク値(①まで)は概ね一致しており、実際の破壊挙動が再現できていることが確認できた。ただし、初期以外(②、③)においては乖離があり、CAEモデルに、さらなる検討の余地がある。現在さらなるCAE精度向上に継続して取り組んでいる。

高分子材料は、変形速度によって材料挙動が大きく変化するため、高速変形域の挙動をCAEで評価するためには速度依存性を考慮した材料モデルが必要であると共に、FRPでは、その特有の破壊形態である層間剥離挙動を考慮した材料モデルが必要となる。これらの材料モデルの構築に必要な強度試験技術、可視化技術、CAE技術の代表的な事例について紹介した。当社は、試験ならびにCAE、両面からお客様の設計・開発をサポートさせていただき、さらに、未だ確立されていない評価技術にも果敢に挑戦していく所存である。

参考文献 \*1) 成澤郁夫: プラスチックの機械的性質, (1994), p.29 ~ p.199, (株)シグマ社  
 \*2) 日下貴之ほか: 日本機械学会論文集(A編), 64巻622号(1998-6), p.1625 ~ p.1631