

アクリル樹脂発泡フィルムによる衝撃荷重の緩和効果
(Reduction effect of acrylic foam film on impact load)

2016 年 1 月

博士（工学）

竹尾 恭平

豊橋技術科学大学

目次

第1章 緒論	
1.1 研究背景	2
1.2 従来の研究	3
1.2.1 発泡材料へのスプリット・ホプキンソン棒 (SHPB) 法試験	3
1.2.2 発泡材料への落錘衝撃試験	5
1.2.3 発泡材料への衝撃曲げ試験	6
1.2.4 薄板およびフィルムに対する衝撃試験	6
1.3 研究目的	8
1.4 本論文の構成	8
第2章 SHPB 法試験による動的変形挙動の評価	
2.1 緒言	12
2.2 試験片	13
2.3 SHPB 法試験	15
2.4 実験結果	17
2.4.1 試験片形状	17
2.4.2 衝撃圧縮試験の妥当性	17
2.4.3 応力—変位線図	19
2.5 考察	22
2.6 結言	24
第3章 落球試験による衝撃吸収特性の評価	
3.1 緒言	26
3.2 試験片	26
3.3 落球試験方法	28
3.3.1 落球試験機	28
3.3.2 衝撃荷重の算出	29
3.3.3 衝撃エネルギー吸収量の算出	30
3.4 試験結果	31
3.4.1 衝撃後フィルムの外観検査	31
3.4.2 測定結果	33
3.5 考察	37
3.5.1 衝撃荷重の低減効果	37

3.5.2	衝撃エネルギー吸収の効果	37
3.6	結言	40
第4章 落錘試験による衝撃吸収特性の評価		
4.1	緒言	42
4.2	試験片	43
4.3	落垂衝撃試験	44
4.3.1	落垂衝撃試験機	44
4.3.2	衝撃荷重の算出	45
4.4	試験結果	46
4.4.1	衝撃荷重履歴	46
4.4.2	荷重—変位線図	51
4.5	考察	53
4.5.1	最大衝撃荷重	53
4.5.2	プラトー領域	56
4.6	結言	56
第5章 衝撃三点曲げ試験による衝撃荷重低減の評価		
5.1	緒言	60
5.2	試験片	60
5.3	衝撃三点曲げ試験	62
5.3.1	衝撃三点曲げ試験機	62
5.3.2	衝撃荷重の算出	64
5.4	試験結果	66
5.5	考察	72
5.6	結言	74
第6章 結論		
6.1	本論文の総括	76
6.2	今後の課題	77
参考文献		79

第 1 章

緒 論

1.1 研究背景

現在、自動車、航空機、鉄道といった輸送機器は技術発達と共にさらなる高速化の傾向にある。特に自動車はその代表例といえる。そのため、衝突安全性能基準における衝突速度の基準は年々高まっていく傾向にあり、より高速領域での衝突における安全性能の向上が求められている。最近、科学技術の急速な発展により、高性能かつ高効率なデバイスが開発されている。製造業の中心となる自動車産業ではハイブリットやクリーンディーゼルなどの最新低燃費技術が導入され、市街地を走る電気自動車も珍しいものではなくなった。同時に安全性へのニーズも高まり、自動ブレーキや車線はみ出し警報装置などの予防安全技術を搭載した自動車も増えている。安全性の向上には、事故の未然防止技術だけでなく、事故を起こしてしまったときに乗員を保護するための高い耐衝撃性が必要となる。自動車事故対策機構（NASVA）が実際に衝突実験を行い評価した「自動車アセスメント」は、国内で販売される自動車の安全性の指標になっている[1]。本研究で注目するのはこの耐衝撃性を向上させるために衝撃荷重を低減させる緩衝材である。

緩衝材にはセル構造体材料が多く使用される。セル構造体の意味は「明確な稜と面を持つセルによって空間を隙間なく詰め込まれたもの」であり、一般的に知られるものとしてスポンジや木材があげられる。近年ではポリマーを発泡させることにより、使い捨て用のコーヒーカップから航空機のコックピットの緩衝材まで発泡体は幅広く利用されている。発泡化することによって材料特性は飛躍的に向上する。低密度となることで熱伝導率が低下するので断熱材として使用される。また、同様の理由で海上浮遊体としても使用され、発泡化したポリスチレン、ポリエチレン等は船体に用いられる。優れた耐衝撃性を生かして包装用材料やヘルメット、車のバンパーなどの衝撃緩衝材としても用いられる[2]。樹脂発泡材料は、低密度であり、耐熱性や耐衝撃性に優れており、様々な分野で使用されている。発泡材料が低密度であることから、海上浮揚体に浮力材としてポリスチレンやポリエチレン、シリコンの発泡材料が船体などに使用されている[2]。また、断熱性や防音性が高いため、冷蔵庫や建物の断熱材や外壁の防音材としてポリウレタンやポリエチレンの発泡材料が使用されている[3]。また、高い耐衝撃性を有することから、車のバンパーやヘルメット、サンドウィッチパネルのコア材[4]、スマートフォンなどに緩衝材として使用されている。

1.2 従来の研究

1.2.1 発泡材料へのスプリット・ホプキンソン棒 (SHPB) 法試験

圧縮荷重を受ける発泡材料は、プラトー応力領域にて力学的エネルギーを吸収することができる [5]。通常、発泡材料の力学的特性は単に基材の材料特性のみで決定されないことが明らかにされている[5]。一般に衝撃圧縮試験はスプリット・ホプキンソン棒 (SHPB) 法試験によって行われている。SHPB 試験は、Kolsky [6] によって開発されたもので、材料の高ひずみ速度試験に用いられ、圧縮型や引張型、曲げ型の装置が開発され、衝撃試験法としては広く認知されている。図 1.1 に示されるように入力棒および出力棒の 2 本の細長い棒を直線状に並べ、同径の打出し棒の衝突による衝撃エネルギーから、間に挟み込んだ試験片の動的圧縮応力 - ひずみおよび変位関係を精度よく測定することができる[7, 8]。図 1.1 には、打撃棒方式ホプキンソン棒法の概略図とひずみパルスのラグランジュ線図を示す。打出棒を入力棒の端面に衝突させることで、入力棒中に連続した一定の応力波が伝播する。これにより、入力棒と出力棒の間に挟みこんだ試験片はその透過応力により変形し、さらにその応力波は出力棒に伝播する。試験片内の応力とひずみは、初めに応力波が通過するときは様ではないが、試験片内を応力波が複数回往復した後、ほぼ同様となる。挟み込んだ試験片は、長さが直径の半分程度であれば、応力-ひずみ関係は精度よく測定することができる。また、ホプキンソン棒法で得られるひずみ速度は、試験片の強度特性に依存するが、 10^2 s^{-1} から 10^4 s^{-1} の範囲で測定が可能である。試験装置としては実験室で用いられる全長 4m のものから全長 200m 以上に及ぶもの、あるいは 1m にも満たない卓上のものまで考案されている[9 - 11]。もともと、SHPB 法試験機は、金属材料の衝撃塑性を評価するために開発されたが、様々な改良が加えられ樹脂のような軟質材料に対しても精度よく評価することが可能となった[12 - 16]。

これまで、アルミニウム合金を材質とした発泡材料の衝撃圧縮試験は数多く行われており、アルミニウム合金発泡材料の動的な力学的特性は明らかにされている。Deshpande ら[17] は、Alulight および Duocel の異なる発泡アルミニウム発泡材料に対してひずみ速度が $10^{-3} \sim 5000 \text{ s}^{-1}$ で衝撃試験を行っており、準静的挙動と非常に似ていることを明らかにしている。Alulight では、部分的に弱い個所が変形していたが、Duocel では、均一に変形することを報告している。Yi ら[18] は、室温でひずみ速度 $10^{-3} \sim 2600 \text{ s}^{-1}$ の範囲で衝撃試験を行っている。その結果、ひずみ速度の増加とともに降伏強度およびエネルギー吸収が大きくなることを示している。Hall ら[19] は、アルミニウム合金の衝撃圧縮試験を実施し、試験片の両端における潤滑剤の影響について検討している。Tan ら[20] は、ひずみ速度 $10 \sim 210 \text{ s}^{-1}$ において、クローズドセルアルミニウム発泡材の衝撃圧縮試験を行い、強度および圧縮変形量について考察している。Cao ら[21] によって、準静的および動的荷重

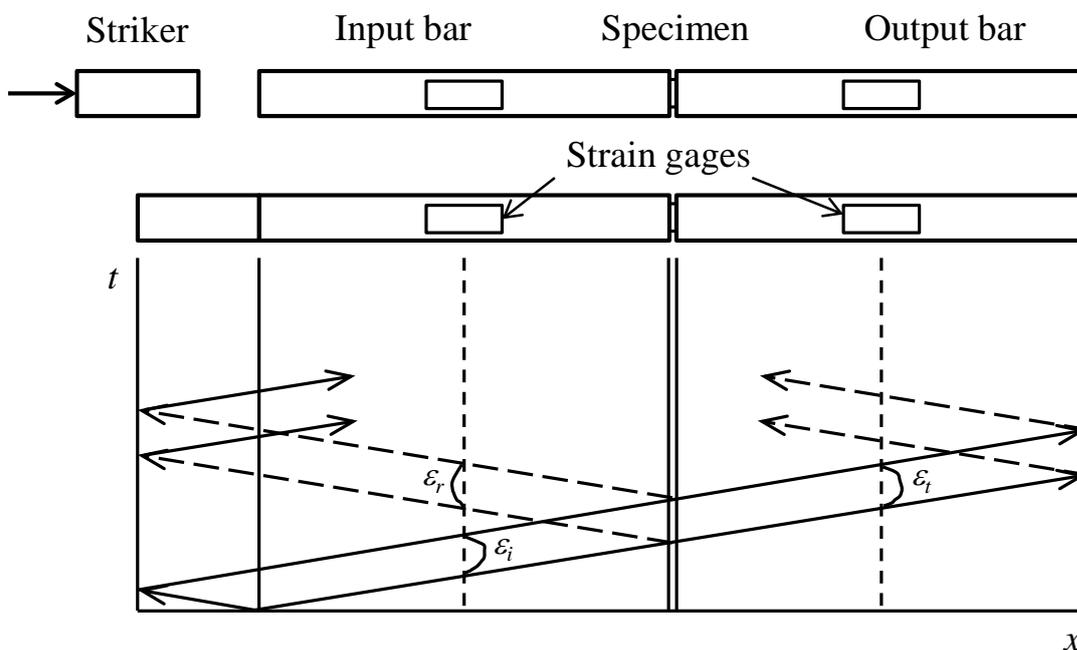


Fig. 1.1 Overall view of SHPB test and Lagrange diagram.

を受けるアルミニウム発泡体の弾性率および圧縮強度は相対密度だけではなく、発泡体のセルサイズにも依存することが明らかにされている。Cheng ら[22] は、ひずみ速度 $10^{-3} \sim 2000 \text{ s}^{-1}$ におけるアルミニウム発泡体の衝撃試験を行っている。その結果、ひずみ速度の増加とともに流動応力が上昇することを示している。Kang ら[23] は、密度の異なるアルミニウム発泡体の衝撃圧縮試験を行い、力学的挙動について検討している。その結果、応力 - ひずみ曲線は、弾性領域、崩壊領域および緻密化領域の3つの変形領域を有し、強度は密度が大きくなるにつれ、上昇する傾向にあることを報告している。Cady ら[24] は、アルミニウム発泡体に対して、ひずみ速度の関数として流動応力について測定し、変形挙動は、温度に強く依存することを明らかにした。Hamada ら[25] は、クローズドセルのアルミニウム発泡材の動的試験を行い、圧縮強度に及ぼす密度、試験片の大きさおよび合金化の影響について検討している。その結果、純アルミニウムは発泡体の動的プラトー応力は、静的試験のプラトー応力に比べ約 1.3 倍となった。また、アルミニウム合金発泡体の動的プラトー応力は、静的のプラトー応力に比べ約 1.1 倍であり、純アルミに比べ低くなっていることを明らかにした。Xie ら[26] は、発泡材料のための SHPB 法試験の有効性および精度を高めるためにアルミニウム合金の発泡材を試験片とし、試験を行っている。Edwin ら[27] は、相対密度の異なるアルミニウム発泡体の動的圧縮試験を行っている。その結果、アルミニウム発泡体の相対密度およびひずみ速度の増大とともに、プラトー応力が増加すること

を明らかにしている。また、高いひずみ速度では衝撃エネルギー吸収能力が上昇することを示している。Peroni ら[28] は、様々なひずみ速度において、二つの密度の異なるアルミニウム発泡材の衝撃圧縮試験を行っている。ひずみ速度 300 程度まではほとんど効果は示されないとしている。

また、ポリスチレンおよびポリプロピレンのような樹脂材料やコンクリートの発泡材材に対しても衝撃圧縮試験が実施されている。Song ら[29] は、ポリスチレンの発泡材を試験片とし、ひずみ速度 $0.001 \sim 950 \text{ s}^{-1}$ において衝撃試験を行っている。降伏応力はひずみ速度の対数にほぼ直線的に増加することが明らかにし、ヤング率はひずみ速度の増加とともに大きくなることがわかった。Ouellet ら[30] は、ポリスチレン、ポリエチレンおよびポリウレタンの発泡材を試験片とし、ひずみ速度 $500 \sim 2500 \text{ s}^{-1}$ で圧縮試験を行っている。ひずみ速度 1000 s^{-1} 以上でひずみ速度の影響が顕著になることを示した。Wang ら[31] は、五つの異なるひずみ速度においてポリスチレン発泡材の衝撃圧縮試験を行っている。その結果、密度およびひずみ速度はポリスチレン発泡材の圧縮特性に影響を与えることを明らかにしている。Hu ら[32] は、密度の異なるポリウレタン発泡材の衝撃圧縮試験を行い、ひずみ速度の影響を検討している。衝突速度が上昇することで衝突面付近のセルが急速に圧縮されるためひずみ速度が速くなりことを明らかにした。Bouix ら[5] は、発泡ポリプロピレンに対して、ひずみ速度 $0.01 \sim 1500 \text{ s}^{-1}$ の範囲で圧縮試験を行い、初期応力、密度およびひずみ速度の影響について検討している。Woldesenbet ら[33] は、シタクチックフォームの衝撃圧縮試験を行っている。その結果、ひずみ速度の増加および密度が大きくなるほど、強度が高くなり、ヤング率が上昇することを明らかにした。Tasdemirci ら[34] は、テフロン発泡材を試験片とし、水晶共振器を用いた SHPB 法試験を行っている。Yuan ら[35] は、密度 220 kg/m^3 の軽量気泡コンクリートに対して様々な衝突速度で衝撃圧縮試験を行っている。その結果、弾性変形領域、降伏領域および圧縮変形の 3 段階を経て変形することがわかった。また、ひずみ速度と衝突速度には線形関係があることが明らかとなった。

1.2.2 発泡材料への落錘衝撃試験

SHPB 法試験の他にも、錘を自由落下させることによって試験片に衝撃圧縮を加える落錘試験も行われている。Landro ら[36] は、密度の異なるポリスチレンの発泡材に対して落錘衝撃試験を行い、エネルギー吸収能力について明らかにしている。また、走査型電子顕微鏡で分析し、エネルギー吸収のメカニズムについて明らかにしている。Yang ら[37] は、アルミニウム発泡材に対して落錘試験を行っている。アルミニウム発泡体は非常に高いエネルギー吸収能力を有し、等方性の構造体に近い特性を持っていることを報告している。Cho ら[38] は、アルミニウム発

泡材に対して圧縮衝撃試験を行い、有限要素法と比較し、エネルギー吸収能力について明らかにしている。

1.2.3 発泡材料への衝撃曲げ試験

これらの研究では、発泡材料に対して圧縮荷重を加え、動的変形挙動について明らかにしている。しかし、衝撃時に曲げ変形を生じるような場合も想定され、アルミニウムおよびポリウレタンを材料とした発泡材料の曲げ変形特性について明らかにされている。Santosa ら[39] は、部分的にアルミニウム発泡材を充填したはりの曲げ応答について報告している。Beck ら[40] は、アルミニウム発泡材のサンドイッチ材料の曲げ試験を実施し、疲労き裂の発生について明らかにした。Kim ら[41] は、様々な密度を有するアルミニウム発泡材の三点曲げ試験を行い、構造体の耐衝撃性が向上することを示している。Crupi ら[42] は、アルミニウム発泡材の衝撃三点曲げ試験を行い、試験および理論解析の結果がよく一致する傾向があること明らかにした。Marsavina ら[43] は、室温でポリウレタン発泡材の衝撃三点曲げ試験を行っている。発泡材にすることで、衝撃エネルギーを 80%程度吸収できることを明らかとしている。Yu ら[44] は、発泡したアルミニウムはりに対する衝撃三点曲げ試験を行い、変形挙動および損傷挙動について検討している。その結果、変形および損傷挙動は準静的挙動とよく似た傾向になることを明らかにしている。Guo ら[45] は、アルミニウム発泡体を充填した二重円筒管の動的三点曲げ試験を行っている。その結果、変形は準静的のものと比較して異なる挙動となるが、衝撃荷重はほぼ同程度であることを示している。また、従来の発泡体が充填された単一の円筒管と比較して、新しい構造の二重円筒管はエネルギー吸収効率が非常に高く、さらに、動的試験では静的試験に比べ、エネルギー吸収効率が高くなることを明らかとした。Rathnaweera ら[46] は、クローズドセルアルミニウム発泡材を充填した鋼管の衝撃三点曲げ試験を行っている。その結果、充填していない鋼管と比較し、アルミニウム発泡材を充填することで衝撃エネルギー吸収能力が高くなり、変形量が少なくなることを明らかとした。

1.2.4 薄板およびフィルムに対する衝撃試験

近年では、スマートフォンやタブレット形コンピュータなど様々な電子機器が普及している。スマートフォンおよびタブレット形コンピュータはディスプレイが外側に露出しており、落下衝撃に対するディスプレイの耐衝撃性を向上させる必要がある [47, 48]、衝撃荷重を低減し、衝撃エネルギーを吸収するための緩衝材として発泡フィルムが使用されている。さらに、モバイル機器の可搬性を高めるために軽量化、薄形化が進められており、使用される発泡材も薄膜化が強く求められている。

これまでは厚さ 1 mm 程度のガラスやセラミック層への衝撃試験が実施されており、荷重低減効果やき裂伝播について研究がなされている。Chiu ら[49] は、コーティングされた基板のき裂進展の影響について理論に基づいた計算および実験によって明らかにしている。Grant ら[50] は、合わせガラスの耐衝撃性に与えるガラス厚さの影響について検討しており、外側のガラスの厚さの方が内側の厚さと比較して、重要なパラメータであることを明らかにしている。Chai ら[51-56] は、厚さ 1 mm 程度のポリマーの膜でコーティングされた板やガラスの積層板に球および先端が鋭い物体が衝突し際に生じる破壊モードについて検討している。積層板では衝突した際、主な損傷として接触表面に生じるメディアンき裂と界面に生じるラジアルき裂に分類することができるとした。また、衝撃荷重、き裂長さおよび応力の関係からき裂を予測することができている。さらに、臨界エネルギーは物体の先端形状、板のヤング率、靱性、硬度および応力から得ることができることを示している。

また、厚さ 1 mm 以下のダイヤモンド薄板や厚さ 3 mm 程度のポリカーボネートの三点曲げ試験が実施されている。平田ら[57] は、気相合成ダイヤモンド薄板の力学的強度を三点曲げ試験によって測定している。小さい粒子から成る薄板ほど曲げ強度が高くなることを明らかにしている。González ら[58] は、衝突速度の異なるポリカーボネートおよびポリブチレンテレフタラートの衝撃三点曲げ試験を行い、衝突速度の上昇とともに、曲げ弾性率は 20 ~ 30 % 程度減少し、曲げ強度は 25 ~ 30 % 程度上昇することを報告している。

さらに、発泡材料を薄くし、かつ耐衝撃性を高める必要があることから、新たにアクリルを材質としたアクリル樹脂発泡フィルムが注目されている。アクリル樹脂発泡フィルムは粘着性に優れているため、これまでは接着用両面テープ等に使用されており、Zhang ら[59] は、アクリルを材質とした接着剤について、熱やレオロジーの影響について言及している。また、耐衝撃の面においては靴の中敷きに使用され、地面からの衝撃を吸収するなど、幅広く使用されている。しかし、アクリル樹脂発泡フィルムを耐衝撃性に対して使用されているのは、ごく最近であり、アクリル樹脂を材質とした衝撃圧縮試験は行われておらず、アクリル樹脂発泡フィルムの圧縮変形挙動や衝撃吸収メカニズムは正確に把握されていない。

さらに、薄い発泡フィルムに対する衝撃試験が行われているのはごくわずかである。Yamada ら[60] は、ポリエチレンの発泡フィルムに対して SHPB 法試験を行い、圧縮特性について考察している。その結果、ひずみ速度の上昇とともに圧縮応力が上昇することを確認している。

1.3 研究目的

このように、薄い発泡フィルムに対する衝撃試験は行われておらず、信頼性の高い、衝撃吸収特性の測定法が確立されていないのが現状である。確立しない要因としては一般に使用される衝撃試験機が大形で、フィルム状の試験片に適用が困難であり、簡便でないためと考えられる。よってフィルムの製造現場での材料評価、または機器設計の初期段階での材料選定を前提とした簡易的な衝撃試験で樹脂発泡フィルムの力学的特性の評価法を確立する必要がある。また、発泡材が薄膜化することで、変形量が小さくなるため衝撃荷重の低減効果およびエネルギー吸収特性が低下すると考えられる。そこで、機器の耐衝撃性を高めるための最も適切な厚さの発泡フィルムの選定基準が必要となる。そこで、各特性と発泡フィルムとの関係について明らかにする必要がある。

以上に述べたように、薄い発泡フィルムに対する衝撃試験の妥当性について検討する必要がある。さらに、アクリル樹脂発泡フィルムは現在の設計を変更させることなく機器に付着させることで耐衝撃性を高められる可能性があり、今後、さらに普及すると考えられる。そこで、機器に加えられる衝撃荷重として考えられる圧縮や曲げにおけるアクリル樹脂発泡フィルムの動的変形挙動および衝撃荷重の低減効果について明らかにすることは重要なことであるといえる。

本研究では、アクリル樹脂発泡フィルムを試験片とし、発泡フィルムの衝撃低減効果を評価する簡便な試験方法を提案するとともに、それらの衝撃試験方法の妥当性について検討する。さらに、測定される結果に基づいて、圧縮および曲げ変形におけるアクリル樹脂発泡フィルムの動的変形特性について明らかにし、フィルムの厚さと衝撃荷重の低減効果およびエネルギー吸収特性との関係について明らかにする。最終的にアクリル樹脂発泡フィルムの緩衝材としての効果について検討し、フィルムの選択指針について考察する。

1.4 本論文の構成

本論文では、全6章から構成されており、各章の概要は次の通りである。

第2章「SHPB法試験による動的変形挙動の評価」では、SHPB法試験の試験方法および衝撃荷重の計算方法について示すとともに、試験結果から薄い発泡フィルムに対しての試験の妥当性について検討し、アクリル樹脂発泡フィルムの基本的な動的圧縮変形特性を明らかにする。さらに、アクリル樹脂発泡フィルムの衝撃エネルギー吸収特性に与えるフィルム厚さおよび密度の影響について考察する。

第3章「落球試験による衝撃吸収特性の評価」では、薄いフィルムの衝撃荷重の低減効果および衝撃エネルギー吸収量を測定するための試験方法を検討し、簡便

に実施できる落球試験を採用し、試料として厚さ 1 mm 以下の数種類のアクリル樹脂発泡フィルムにステンレス球が衝突したときの、衝撃荷重および衝撃エネルギー吸収量を測定し、その結果、フィルム厚さと荷重低減効果およびエネルギー吸収特性との関係について考察を行う。

第4章「落錘試験による衝撃吸収特性の評価」では、落錘試験方法および衝撃荷重の計算方法を示すとともに、厚さの異なるアクリル樹脂発泡フィルムに対して落錘衝撃圧縮試験を実施し、得られた力学的特性を基に衝撃荷重の変化やフィルムの厚さによる影響を考察して、落球試験に比べ、さらに大きな衝撃荷重が作用したときのアクリル樹脂発泡フィルムの選択指針を与える。

第5章「衝撃三点曲げ試験による衝撃荷重低減の評価」では、機器の剛性が低く、衝撃により曲げ変形が生じる場合を想定し、SHPB に基づく衝撃三点曲げ試験方法を示し、薄い発泡フィルムの曲げ変形における衝撃荷重の低減効果を明らかにする。試料として厚さ 1 mm 以下の薄いアクリル樹脂発泡フィルムを使用し、構造物を厚さの異なるアルミニウム合金はりとし、アクリル樹脂発泡フィルムによる衝撃荷重の低減効果について検討する。

第6章「結言」では、本論文の総括を行うとともに、今後の展望および課題について述べる。

以上のような本論文の構成を図 1.2 にまとめる。

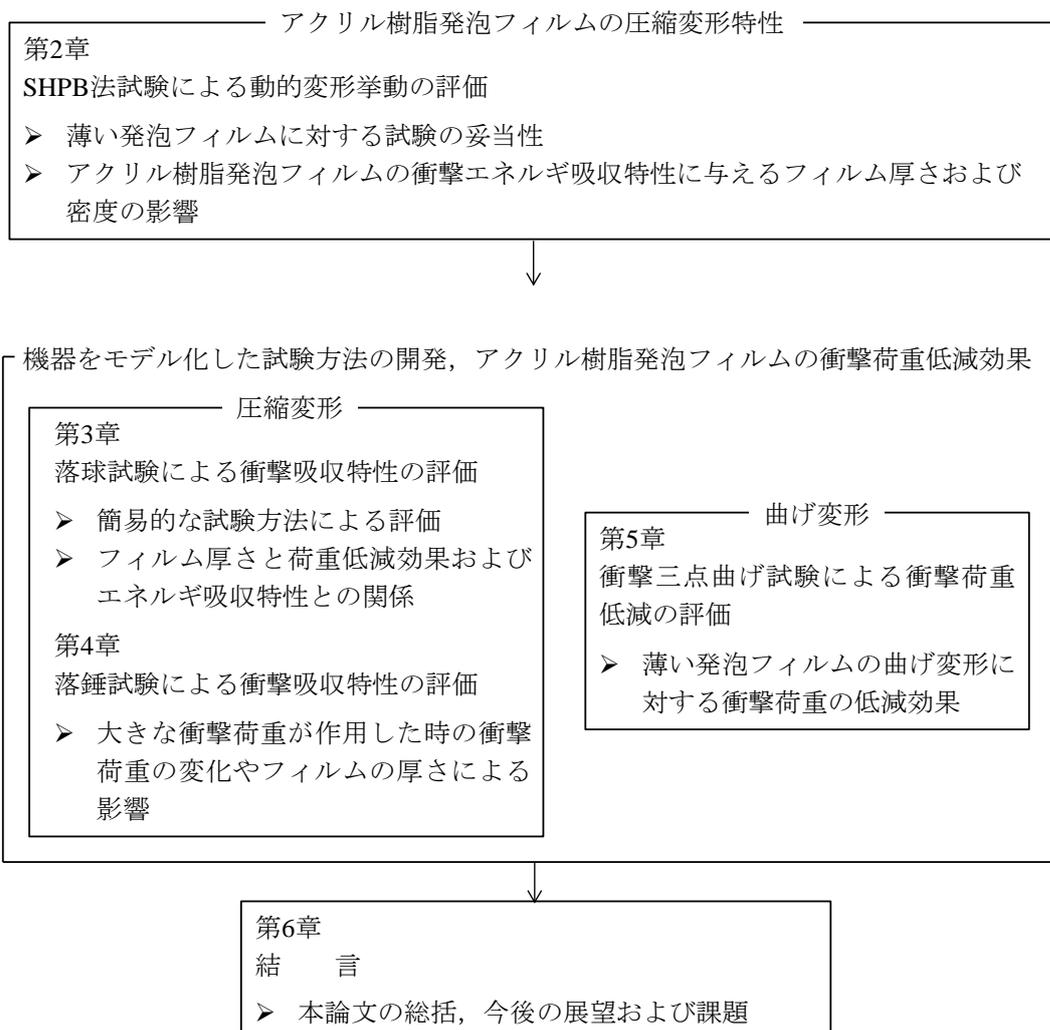


Fig. 1.2 Objectives of dissertation

第2章

SHPB 法試験による動的変形挙動の 評価

2.1 諸 言

現在、自動車、航空機および鉄道のような輸送機器やスマートフォンやタブレット形コンピュータなど様々な電子機器の落下衝撃など幅広い分野において耐衝撃性の要求が高まっている。スマートフォンおよびタブレット形コンピュータのようなモバイル機器は画面が外側に露出しており、落下衝撃に対する耐衝撃性を向上させる必要がある [48, 49]、ガラス基板およびディスプレイ筐体の間に緩衝材として発泡フィルムが挟まれている。圧縮荷重を受ける発泡材料は、プラトー応力領域にて大きな力学的エネルギーを吸収することができる [5, 30]。通常、発泡材料の機械的特性は単に基材の材料特性のみで決定されないことが明らかにされている [5]。これまで、衝撃圧縮荷重を受ける様々な発泡材料の動的な力学的特性は明らかにされている [29, 61]。近年では、モバイル機器の小型化および軽量化が進んでおり、緩衝材の厚さを薄くすることが要求されている。このような背景をもとに、新たにアクリルを材質としたアクリル樹脂発泡フィルムが注目されている。アクリル樹脂発泡フィルムは粘着性に優れており、これまでは接着用両面テープ等に使用されている。また、衝撃吸収材としてシューズなどに幅広く使用されている。しかし、定性的には高いエネルギー吸収特性を有するものとして理解されているが、定量的には特性が明らかにされていないためアクリル樹脂発泡フィルムの適用範囲が明確にされていない。さらに、様々な樹脂を用いた薄い発泡フィルムに対して、信頼性の高い、衝撃吸収特性の測定法が確立されていないため、どのような評価方法が適切であるか明らかにされていないのが現状である。

現在、動的特性を把握するために最も信頼できる衝撃材料試験法として、スプリット・ホプキンソン棒 (SHPB) 法試験 [8] が挙げられる。これまで、アルミニウムやテフロンを材質とした発泡材料の SHPB 法試験が行われており、ひずみ速度および温度の影響について明らかにされている [17-34]。しかし、アクリル樹脂発泡フィルムのような薄い材料の圧縮変形挙動や衝撃吸収メカニズムは正確に把握されていない。このため、エネルギー吸収材料として最も適切な薄い発泡フィルムを選択するための測定方法の確立とともに材料評価方法を検討することは、重要なことであるといえる。

本章では、はじめに SHPB 法試験を実施し、薄い発泡フィルムに対しての試験の妥当性について検討する。また、アクリル樹脂発泡フィルムの基本的な動的圧縮変形挙動について検討し、アクリル樹脂発泡フィルムの衝撃エネルギー吸収特性に与えるフィルム厚さおよび密度の影響について明らかにすることを目的とする。

2.2 試験片

厚さを 700, 500 もしくは 200 μm とし、密度 0.50, 0.38 または 0.30 mg/mm^3 としたアクリル樹脂発泡フィルムを試験片として使用した。また、アクリル樹脂発泡フィルムは厚さ 25 または 38 μm のポリエチレンテレフタラートのフィルム上に生成されている。図 2.1 に示すような治具にアクリル樹脂発泡フィルムを乗せ、レーザー変位測定器 (Keyence LS3032) で測定される治具上部と治具下部の隙間 h をフィルム厚さとした。A4 サイズのアクリル樹脂発泡フィルムの異なる箇所から切り出した試験片について測定し、その結果から平均値および標準偏差を求め、表 2.1 に示す。アクリル樹脂発泡フィルムの厚さは最大で 10% 程度のばらつきを有していることがわかる。アクリル樹脂発泡フィルムの表面を光学顕微鏡 (Olympus VANOX) にて観察した結果を図 2.2 に示す。密度が小さくなるほど気泡の数が多くなっていることがわかる。

Table 2.1 Specimen specifications.

Specimen ID	Density [mg/mm^3]	Thickness of acrylic [μm]		Thickness of PET [μm]
		Average	Standard deviation	
050-070-38	0.50	690	± 30	38
050-050-38	0.50	480	± 20	38
050-020-38	0.50	200	± 20	38
038-070-38	0.38	750	± 50	38
038-050-38	0.38	550	± 40	38
038-020-38	0.38	230	± 30	38
030-070-25	0.30	730	± 60	25
030-020-25	0.30	240	± 40	25

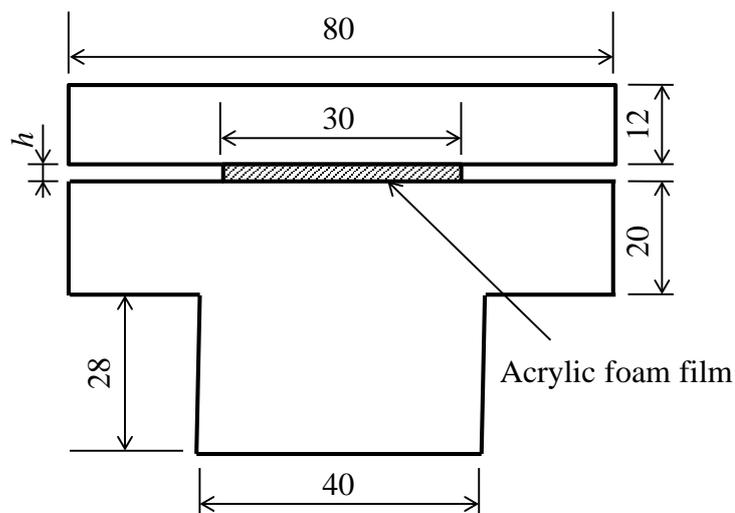
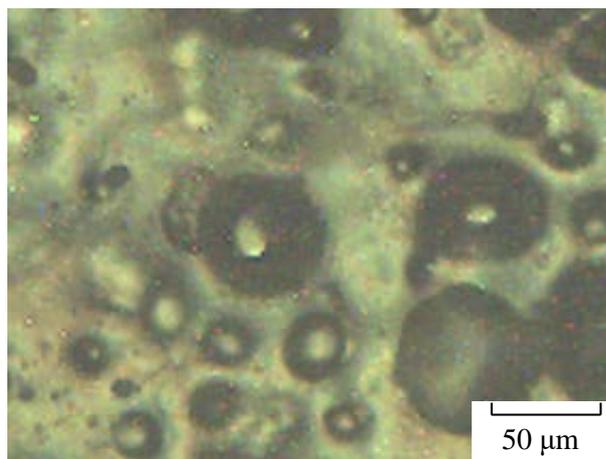
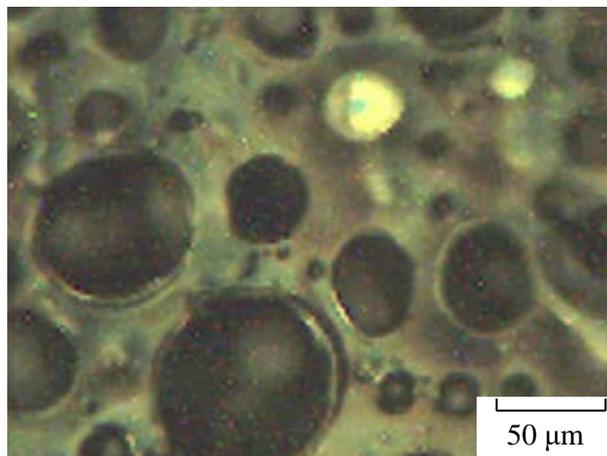


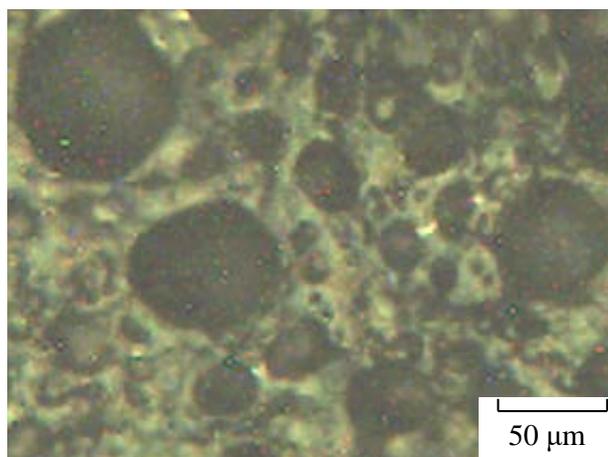
Fig. 2.1 Measurement of thickness. Unit: mm.



(a) Specimen 050-070-38



(b) Specimen 038-070-38



(c) Specimen 030-070-25

Fig. 2.2 Surfaces of 0.7-mm-thick foam film specimens.

2.3 SHPB 法試験

本実験で使用した SHPB 試験機を図 2.3 に示す。試験機は長さ 250 mm, 直径 20 mm の打ち出し棒および長さ 2 m, 直径 20 mm の入出力棒から成る。また, 入出力棒および打ち出し棒の材料として, 剛性が高く, 音響インピーダンスの低いアルミニウム合金 (JIS A7075-T6) を使用した。打ち出し棒は片当たりを防ぐために, 半球状に加工した。打ち出し棒はコンプレッサに蓄えられた圧縮空気を解放することで発射され, 衝突速度はいずれの試験においても 10 m/s 程度とした。

図 2.3 に示された入出力棒に取り付けられたひずみゲージ (KYOWA, KFG-5-120-C1-11L2M2R) により, ひずみの時間変動を測定した。ひずみの測定結果の一例を図 2.4 に示す。密度は 0.30 mg/mm^3 , 厚さ 0.7 および 0.2 mm における結果を示す。入力棒には, はじめに入射ひずみ ε_i が現れ, 試験片に到達した後に反射ひずみ ε_r が現れている。出力棒には試験片を透過した後の透過ひずみ ε_t が現れている。3 つのひずみは完全に分離していることが確認できる。入射波, 反射波および透過波を独立して測定されているという前提のもとで試験片の変位 $u(t)$ および試験片に加えられた応力 $\sigma(t)$ は次式のように入出力棒の入射ひずみ ε_i , 反射ひずみ ε_r , および透過ひずみ ε_t の履歴から算出することができる。

$$u(t) = c_0 \int_0^t [\varepsilon_i(t) - \varepsilon_r(t) - \varepsilon_t(t)] dt, \quad (2.1)$$

$$\sigma(t) = \frac{E}{2} [\varepsilon_i(t) + \varepsilon_r(t) + \varepsilon_t(t)], \quad (2.2)$$

ここで, E および c_0 は入出力棒の縦弾性係数および弾性波の速度を表しており, 弾性波の速度は次式のように表される。

$$c_0 = \sqrt{E/\rho}, \quad (2.3)$$

ここで, ρ は入出力棒の密度である。

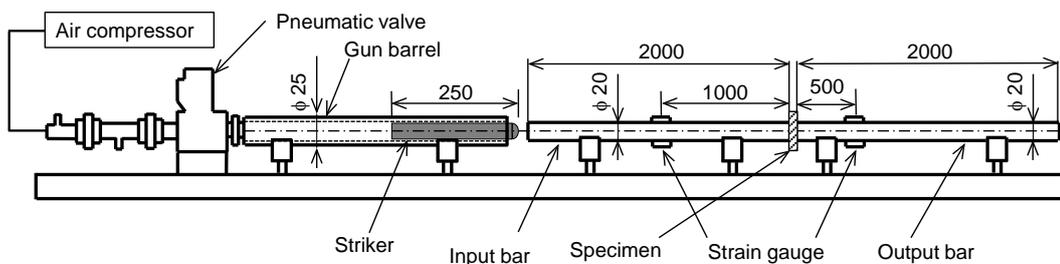
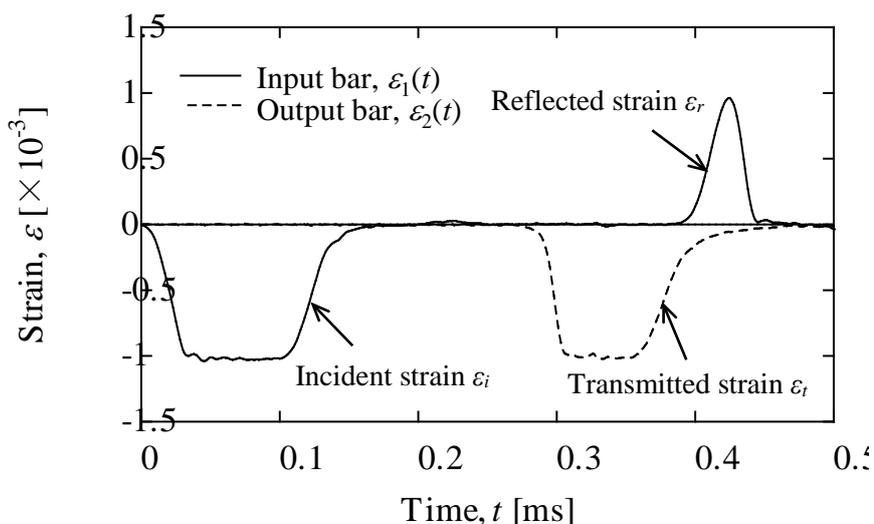


Fig. 2.3 Split Hopkinson pressure bar testing machine. Unit: mm.

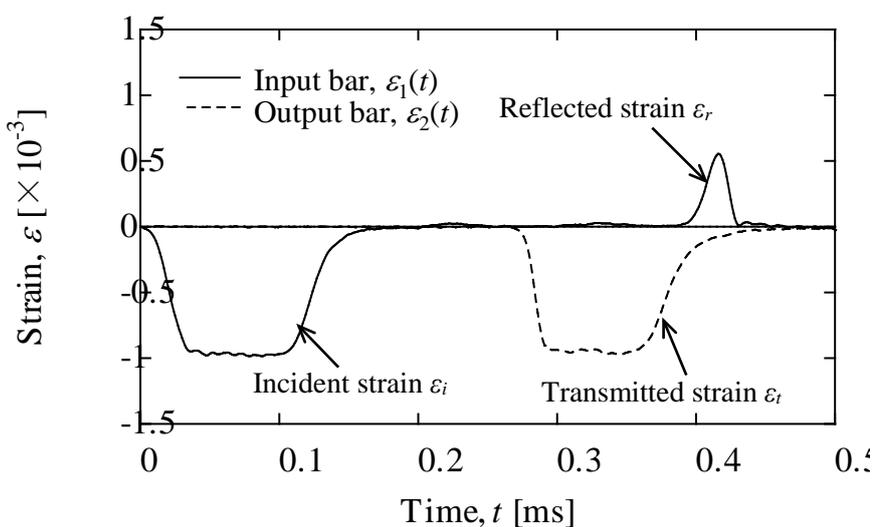
入力棒の試験片側端部の力と出力棒の試験側端部の力が等しい。すなわち，動的平衡がとれていれば，次式が成り立つ。

$$AE\{\varepsilon_i(t) + \varepsilon_r(t)\} = AE\varepsilon_t(t). \quad (2.4)$$

ここで， A は入出力棒の断面積を示す。入力棒および出力棒の応力を比較し，一致していれば，動的平衡が満足されていることになる。



(a) Specimen 030-070-25



(b) Specimen 030-020-25

Fig. 2.4 History of the strain

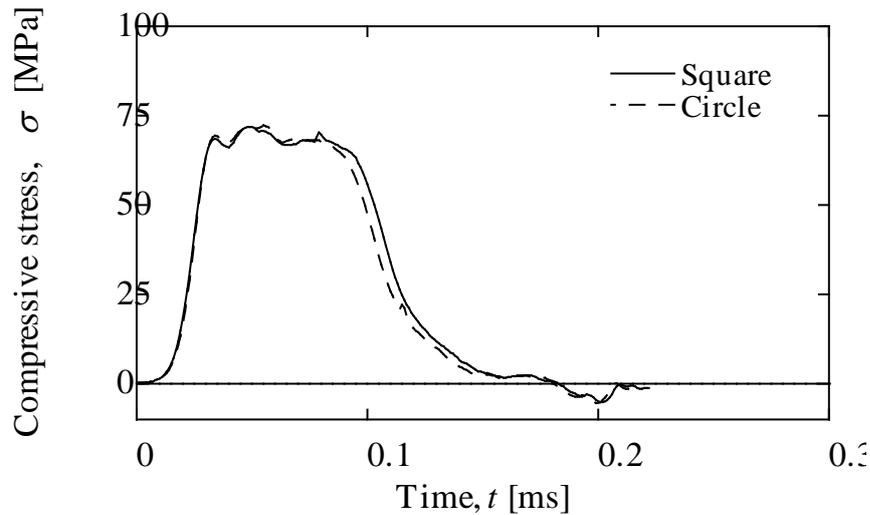


Fig. 2.5 History of compressive stress specimen.

式 (2.4) を式 (2.1) および (2.2) に代入すれば、次式のように試験片の変位および圧縮応力が求められる。

$$u(t) = -2c_0 \int_0^t \varepsilon_r(t) dt, \quad (2.5)$$

$$\sigma(t) = E\varepsilon_t(t) = E[\varepsilon_i(t) + \varepsilon_r(t)]. \quad (2.6)$$

なお、SHPB法試験は同じフィルムごとに対して5回実施した。

2.4 実験結果

2.4.1 試験片形状

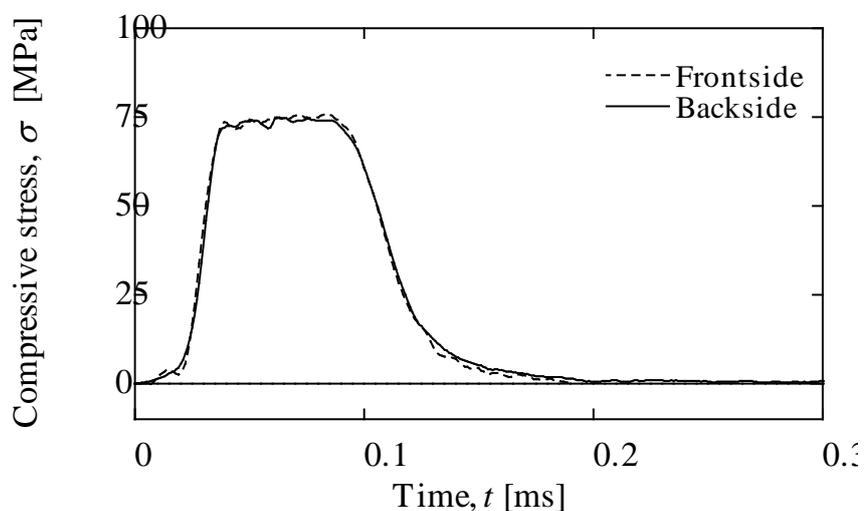
形状の異なる二つの試験片で圧縮試験を行い、試験片形状の影響について検討する。試験片は、一辺30 mmの正方形および入出力棒と同じ大きさの円形の形状とした。図2.5には、それぞれの試験片における応力履歴を示しており、よく一致していることがわかる。したがって、非常に薄い発泡フィルムのSHPB試験では、試験片形状は試験結果に大きな影響を与えないことが確認された。今後の試験においては、作製の容易な一辺30 mmの正方形の形状の試験片に対して測定を行った。

2.4.2 衝撃圧縮試験の妥当性

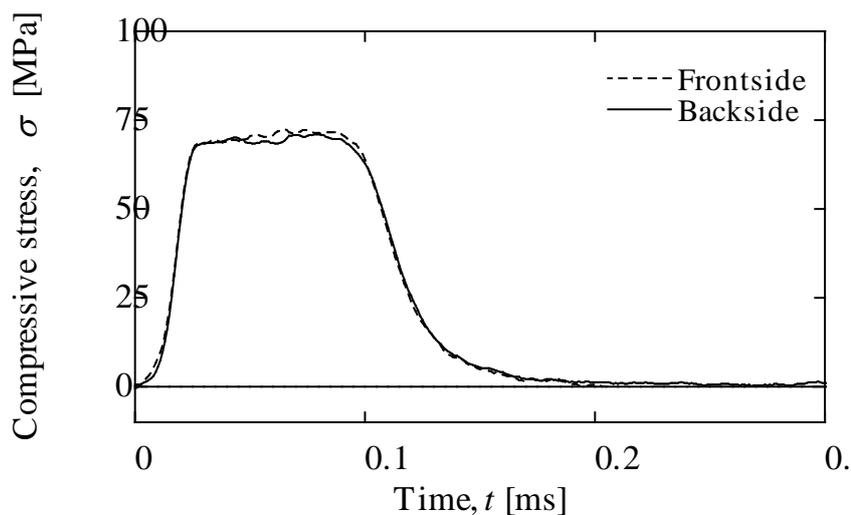
式 (2.6) により求められる試験片に作用する入力棒および出力棒側の応力の時間履歴を図 2.6 に示す。厚さに係わらず、それぞれの応力がよく一致している。

すなわち、試験片両端には同じ力が加えられており、動的平衡がとれていることが確認される。したがって、薄い発泡フィルムに対しても SHPB 試験は十分に測定が可能であることがわかる。

次に、変位履歴について評価する。図 2.7 にアクリル樹脂発泡フィルムの変位履歴を示す。変位は最初の変形で直線的に増加した後、一定となっている。荷重が零になると変位はゆっくりと回復している。厚さが異なる場合においても、変位は時間に直線的に増加し、その後は一定に維持している。いずれの試験片とも変位が直線的に増加していることから、試験は一定の変形速度で行われているといえ



(a) Specimen 030-070-25



(b) Specimen 030-020-25

Fig. 2.6 History of compressive stress.

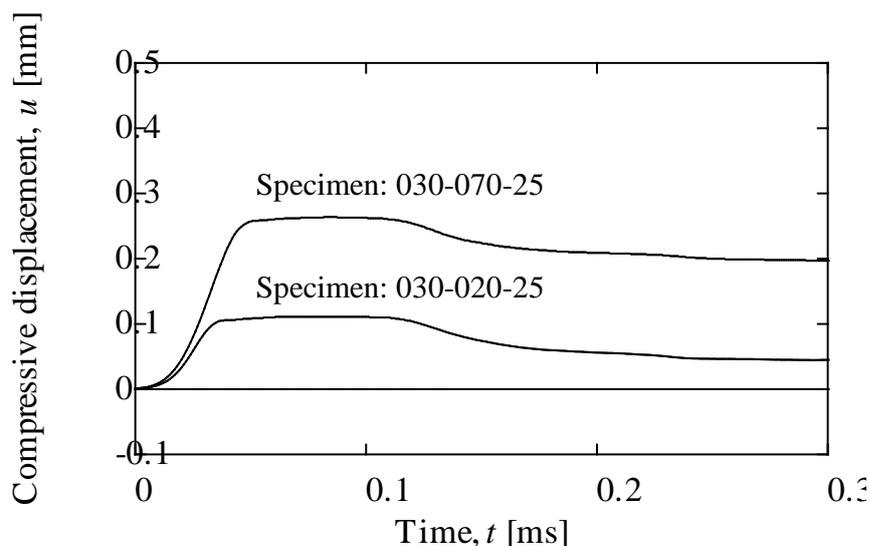


Fig. 2.7 History of compressive displacement.

る。また、図 2.6 および 2.7 から一定となっている応力の最大値と変位の最大値は同じ時間に生じていることがわかる。

2.4.3 応力—変位線図

表 2.1 に示されるようにフィルムの初期厚さには、2.2 節で示したようにばらつきが大きいため、ひずみではなく、変位で評価することとした。図 2.6 および図 2.7 から得られる応力 - 変位線図を図 2.8 ~ 2.10 に示す。応力 - 変位線図は、これまでの発泡材料と同じように直線的な弾性領域の後、応力が一定となるプラトー領域が発生し、最終的に気泡の緻密化により応力が急激に増加していることが確認できる。プラトー応力領域はフィルムが厚く、密度が高いほど長くなることが明らかとなった。

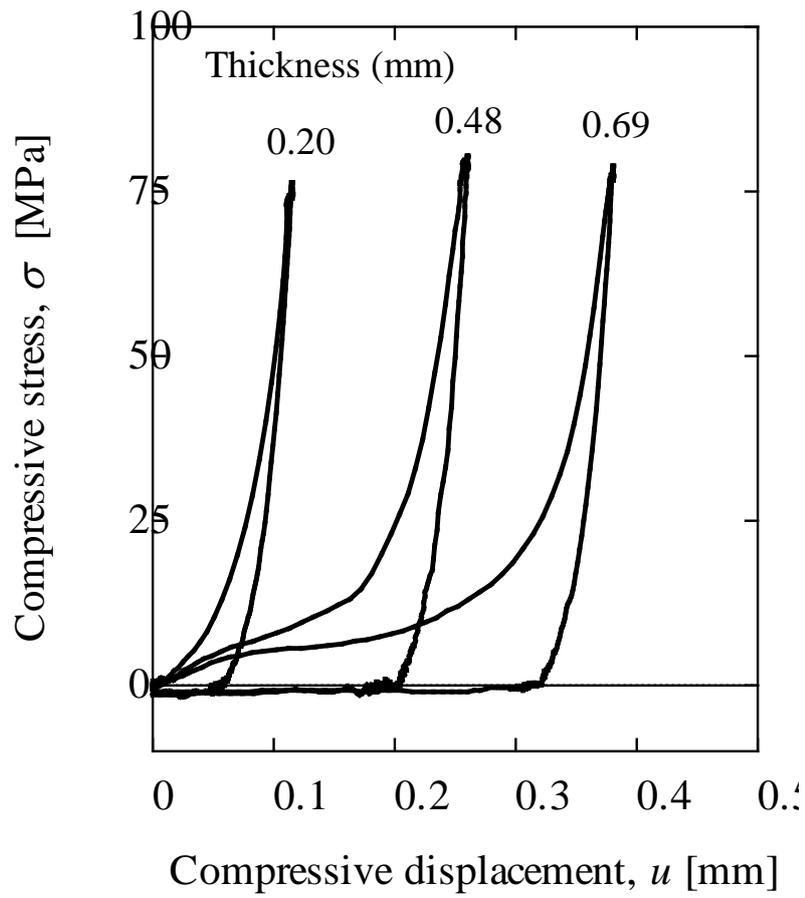


Fig. 2.8 Compressive stress-displacement curve. Density: 0.50 mg/mm^3

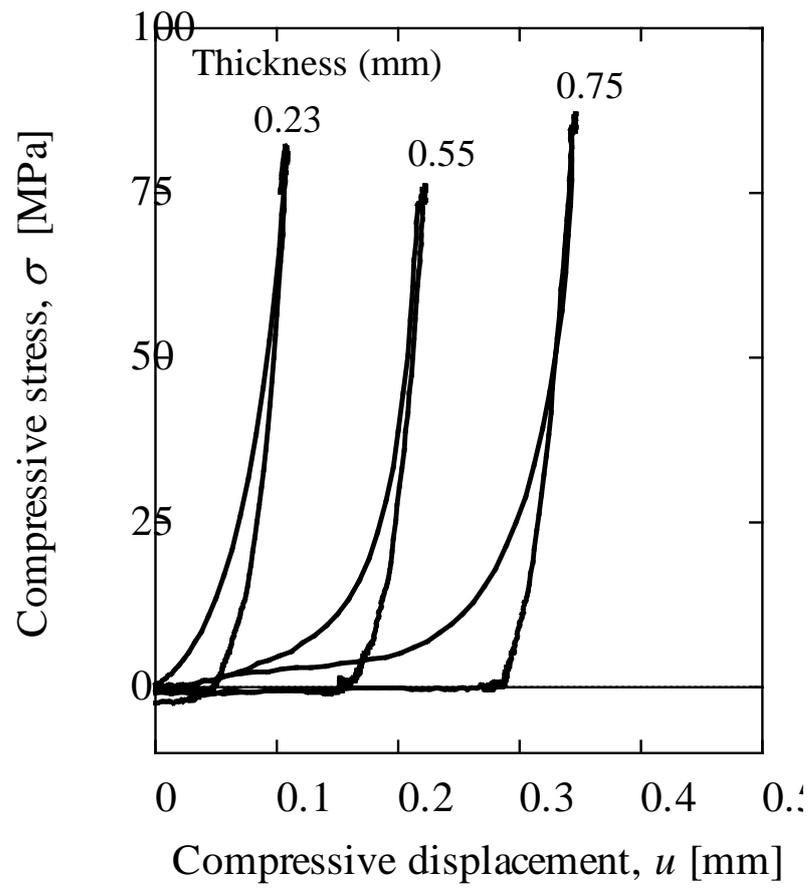


Fig. 2.9 Compressive stress-displacement curve. Density: 0.38 mg/mm³

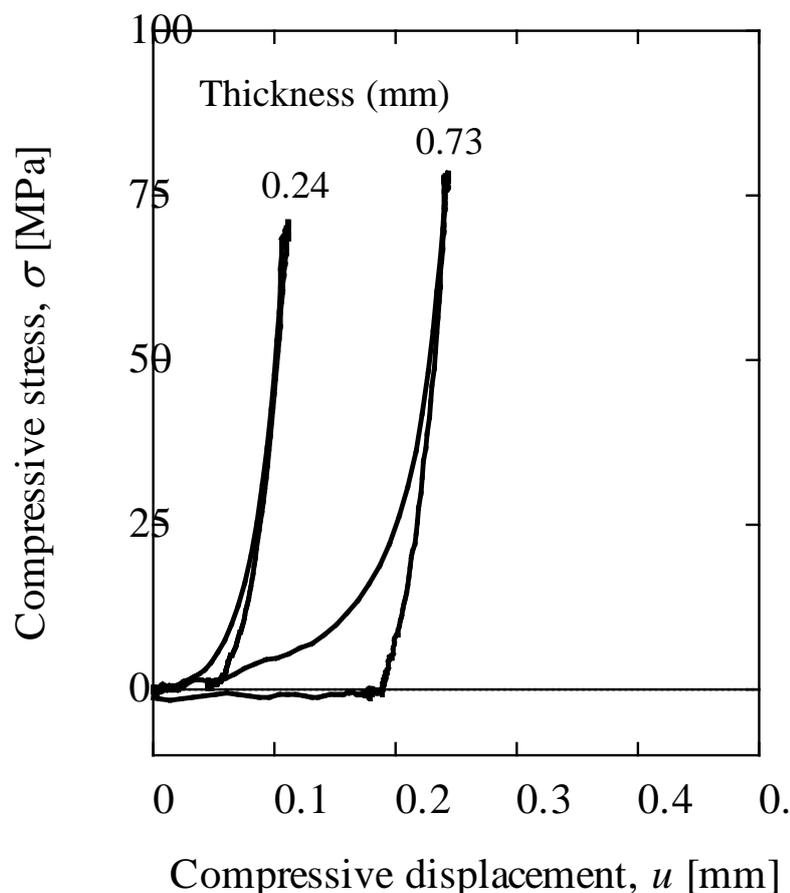


Fig. 2.10 Compressive stress-displacement curve. Density: 0.30 mg/mm³

2.5 考察

図 2.8 ~ 2.10 に示される応力 - 変位線図の面積から求めた単位面積当たりの衝撃エネルギー吸収量を図 2.11 に示す。プロットは 5 回の試験結果から求めた平均値を表し、エラーバーは標準偏差を示す。単位面積当たりのエネルギー吸収量はフィルム厚さに対してほぼ比例の関係にあることが明らかとなった。図 2.11 から、単位面積当たりのエネルギー吸収量 E_a [kJ/m²] とフィルム厚さ h [mm] の関係は次式のような線形方程式で表すことができる。

$$\begin{aligned}
 E_a &= 4.36h && \text{for density } \rho = 0.50 \text{ mg/mm}^3, \\
 E_a &= 2.96h && \text{for density } \rho = 0.38 \text{ mg/mm}^3, \\
 E_a &= 1.79h && \text{for density } \rho = 0.30 \text{ mg/mm}^3.
 \end{aligned}
 \tag{2.7}$$

式 (2.7) の近似式から同じ密度のフィルムにおいては、単位体積当たりのエネルギー吸収量は一定となることを意味している。単位体積当たりのエネルギー吸収量および

密度の関係を図 2.12 に示す. 図 2.12 の結果より, 単位体積当たりのエネルギー吸収量 E_v は次式のように表すことができる.

$$E_v = 13.1\rho - 2.28 \text{ [MJ/m}^3\text{]} \quad (2.8)$$

エネルギー吸収量は密度に対して線形の近似式で表すことができる. したがって, 圧縮されている単位体積当たりのアクリル樹脂発泡フィルムのエネルギー吸収量は厚さに係わらず, 密度によって決められることが明らかとなった.

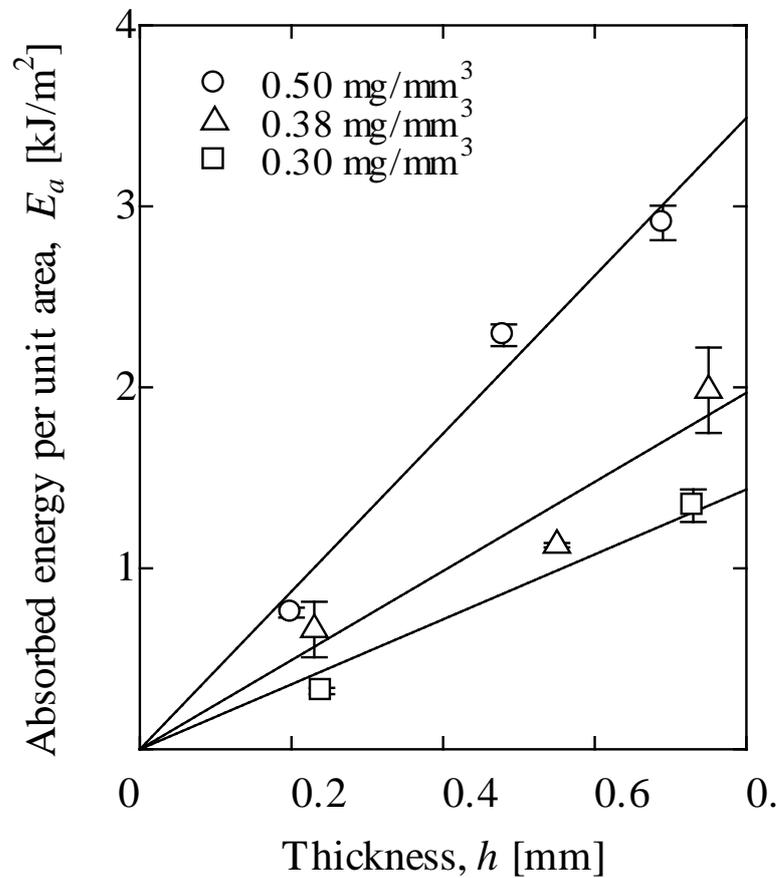


Fig. 2.11 Absorbed energy per area.

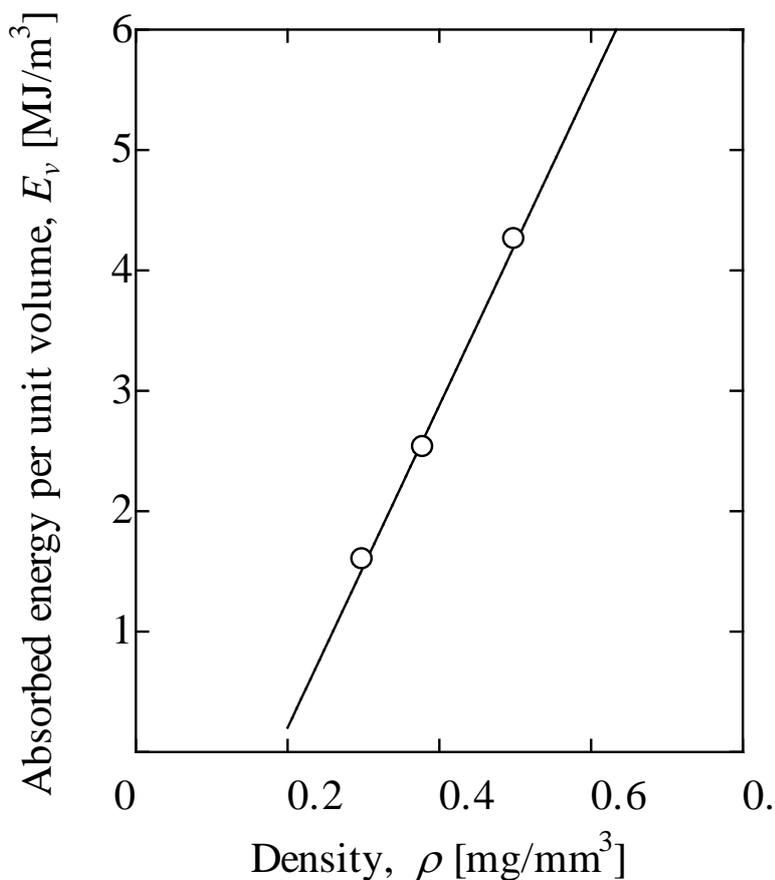


Fig. 2.12 Absorbed energy per volume.

2.6 結 言

本章では、SHPB 法試験によりアクリル樹脂発泡フィルムの動的圧縮挙動について実験的に明らかにした。はじめに、薄い発泡フィルムに対しても動的圧縮挙動を測定できることを確認した。また、応力 - 変位線図からエネルギー吸収量を測定した。その結果、アクリル樹脂発泡フィルムはこれまでの発泡材料と同様の傾向を示した。さらに、単位体積当たりのエネルギー吸収量は、密度に対して線形方程式で表されることが明らかとなった。アクリル樹脂発泡フィルムのエネルギー吸収特性は密度を制御することによって設計することが可能となる。

第3章

落球試験による衝撃吸収特性の評価

3.1 緒 言

スマートフォンやタブレット形コンピュータなどのモバイル機器が普及し、タッチパネルが外側に表示されているため、様々な使用条件において高い信頼性が要求されており、落下衝撃に対する薄形ディスプレイなど幅広い分野での耐衝撃性が必要となっている [47, 48]. モバイル機器の耐衝撃性を得るため、すなわち衝撃荷重を低減し、衝撃エネルギーを吸収するための緩衝材として発泡材 [62] が使用されている. これまでアルミニウムやテフロンを材質とした発泡材料のスプリット・ホプキンソン棒法試験が行われており、発泡材料の動的特性について明らかにされている [17 - 34]. 近年では、さらなるモバイル機器の軽量化、薄形化が進められていることから、発泡材の薄膜化が強く要求されている. これまでは厚さ 1 mm 程度のガラスやセラミック層への衝撃試験が実施されており、荷重低減効果や亀裂伝播について研究がなされている[49 - 56]. しかし、薄い発泡フィルムに対する衝撃試験が行われているのはごくわずかであり[60], 信頼性の高い、衝撃吸収特性の測定法が確立されていないのが現状である.

また、発泡材が薄膜化しフィルムのようにになると、変形量が著しく小さくなり、衝撃荷重の低減および衝撃エネルギー吸収特性が低下することが予想される. このため発泡材の厚さは、これらの特性の観点から重要な特性のひとつと考えることができる. また、さらに薄くなることで内部のセル構造が異なり、バルク材料とは異なる特性が生じる可能性がある. このようなことから、機器に発泡フィルムを適用するとき、機器の厚さに関する仕様および耐衝撃性に関する仕様をそれぞれ満足するためには、適切な厚さの発泡フィルムの選定基準が必要となる. そのために各特性と発泡フィルムの厚さの関係を明らかにする必要がある. 第2章では、SHPB 試験を行い、アクリル樹脂発泡フィルムのエネルギー吸収特性について明らかにした. 続いて、実際の機器を設計する際の材料選定のための簡便な試験方法を開発し、衝撃圧縮荷重の低減効果について検討する必要がある.

本章では、薄いフィルムの衝撃荷重の低減効果および衝撃エネルギー吸収量を測定するための試験方法を検討し、簡便に実施できる落球試験を採用した. 試料として厚さ 1 mm 以下の数種類のアクリル樹脂発泡フィルムにステンレス球が衝突したときの、衝撃荷重および衝撃エネルギー吸収量を測定した. その結果、フィルム厚さと荷重低減効果およびエネルギー吸収特性との関係について考察を行った.

3.2 試験片

本研究では、アクリル樹脂発泡フィルムの衝撃荷重の低減特性および衝撃エネルギー吸収効果特性を測定した. 本試験で使用した試験片を表 3.1 に示す. 同じアクリル樹脂材料を発泡させた 2 種類の密度 0.50 あるいは 0.30 mg/mm^3 の発泡材料

を厚さ 200 ~ 700 μm の範囲で、厚さ 38 あるいは 25 μm のポリエチレンテレフタレート (PET) の基材の上に作製された合計七種類のアクリル樹脂発泡フィルム (ISR-ACF および ISR-ACF-SF-P, Iwatani) を試料として測定した。基材の PET フィルムの影響を調査するために、PET フィルムのみについても測定を行った。

試料の内部構造を明らかにするために、厚さ 700 μm 、密度 0.50 および 0.30 mg/mm^3 のアクリル樹脂発泡フィルムの表面および横断面を走査型電子顕微鏡 (VE-8800, KEYENCE) にて観察を行った。その結果を図 3.1 に示す。図 3.1 (a) より、フィルム表面には穴があり、表面付近では偏平なセルが多数見られる。また、PET 基板付近ではセルの直径が大きい気泡が存在する。図 3.1 (b) より、密度が低いフィルムでは表面に直径の小さい穴が数多く見られる。フィルム内部では、密度が高いフィルムに対して直径の大きいセルが存在している。いずれのフィルムとも、セル壁には穴が観察され、オープンセル構造となっていることが明らかとなった。

Table 3.1 Specimen specification

Product ID	Acrylic foam		PET substrate
	Density, mg/mm^3	Thickness, μm	Thickness, μm
ISR-ACF 200	0.50	200	38
ISR-ACF 300		300	38
ISR-ACF 400		400	38
ISR-ACF 500		500	38
ISR-ACF 700		700	38
ISR-ACF-SF-P 200	0.30	200	25
ISR-ACF-SF-P 700		700	25
PET	-	0	38
	-	0	25

り生じるひずみを測定した。なお、図2に示すように対面するように二枚のひずみゲージを取り付け、対辺2アクティブゲージ法によりブリッジ回路に接続することで、ロードセルの軸方向の垂直ひずみを測定した。測定システムとして、ひずみゲージを、ブリッジボックスを介して動ひずみ計 (AS2101, NEC 三栄株式会社) に接続し、衝撃荷重の時間変化を考慮してデータロガー (8835, HIOKI) によりデータを $1 \mu\text{s}$ 間隔で測定した。測定される二か所のロードセルのひずみの時間変化のデータを次節で導出される式により試験片に作用する衝撃荷重を求めた。さらに、試験後直後に試験片の状態を観察した。

3.3.2 衝撃荷重の算出

ロードセルの上端から 200 mm および 400 mm の位置のひずみの時間変化 $\varepsilon_1(t)$ および $\varepsilon_2(t)$ からロードセル上端に作用する衝撃荷重 $F(t)$ を得るための導出式を求める。ロードセルの解析モデルを図3.3に示す。ロードセル上端から距離 L および $2L$ でひずみの時間変化 $\varepsilon_1(t), \varepsilon_2(t)$ を測定したとすると、境界条件は次式のようになる。

$$\begin{aligned} x=L \text{ において } \frac{\partial u}{\partial x} &= \varepsilon_1(t) \\ x=2L \text{ において } \frac{\partial u}{\partial x} &= \varepsilon_2(t) \end{aligned} \quad (3.1)$$

ここで、 u はロードセルの軸方向変位であり、 x および t は上端を原点とする軸方向座標および時間である。

ロードセルは球の衝撃を受ける前には、静止していることから初期条件は次式となる。

$$t=0 \text{ のとき } u=0, \frac{\partial u}{\partial t}=0 \quad (3.2)$$

ロードセルの変形は一次元弾性方程式に従うものとし、次式のように表される。

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \quad (3.3)$$

ここで、 c は、ロードセル内の縦波速度であり、次式のように与えられる。

$$c = \sqrt{E/\rho} \quad (3.4)$$

なお、 E および ρ はロードセルの縦弾性係数および密度である。

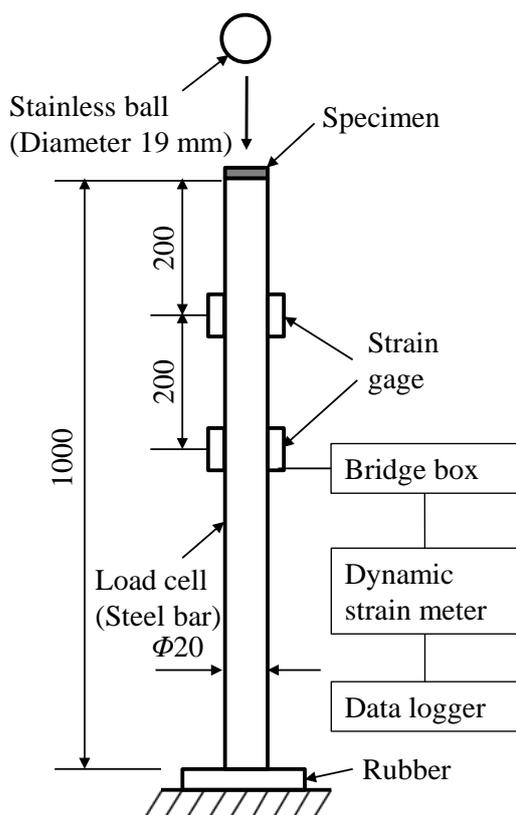


Fig. 3.2 Equipment. Unit: mm.

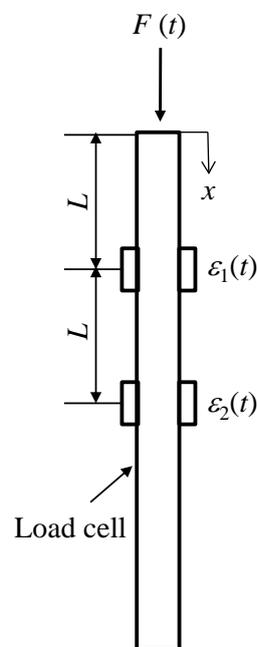


Fig. 3.3 Analytical model of load cell

式 (3.1) の境界条件および式 (3.2) の初期条件の下で式 (3.3) を解くと、衝撃荷重の時間変化 $F(t)$ は A をロードセルの断面積とすれば、次式のように求めることができる。

$$F(t) = -AE \left\{ \varepsilon_1 \left(t - \frac{L}{c} \right) + \varepsilon_1 \left(t + \frac{L}{c} \right) - \varepsilon_2(t) \right\} \quad (3.5)$$

以上のように、ロードセルのひずみの時間変化から衝撃荷重 $F(t)$ を求めることができる。なお衝撃測定の実算には $E = 206 \text{ GPa}$ および $\rho = 7900 \text{ kg/m}^3$ を使用した。

3.3.3 衝撃エネルギー吸収量の算出

棒端部へ落球が衝突したときの荷重は、球を剛体として衝突部近傍の局所変形を考慮した Hertz の接触理論[63] による解析で求められ、実験結果と十分な精度で得られることが明らかにされている。この結果を踏まえて、球を剛体としてモデル化し、発泡フィルムのエネルギー吸収量を衝撃荷重の時間変化により求める。

球を質量 m の質点と仮定すると、衝撃荷重 $F(t)$ の力積 I と球の衝突前後の運動変化量は次式のように表される。

$$I = mv_I - mv_R \quad (3.6)$$

ここで、 v_I および v_R は球のロードセルへの衝突前後の速度である。また、力積 I は次式より求められる。

$$I = \int_0^T F(t) dt \quad (3.7)$$

なお、 T は衝撃荷重の負荷時間である。式(3.6)から衝突後に跳ね上がる速度 v_R は次のように求められる。

$$v_R = \frac{mv_I - I}{m} \quad (3.8)$$

発泡フィルムの吸収エネルギー E_{abs} は球の衝突前後の運動エネルギーの差と等しいものとするれば、

$$E_{abs} = \frac{1}{2}mv_I^2 - \frac{1}{2}mv_R^2 \quad (3.9)$$

として求められ、さらに式(3.8)を代入することで、フィルムの衝撃エネルギー吸収量を次式のように求められる。

$$E_{abs} = I \left(v_I - \frac{I}{2m} \right) \quad (3.10)$$

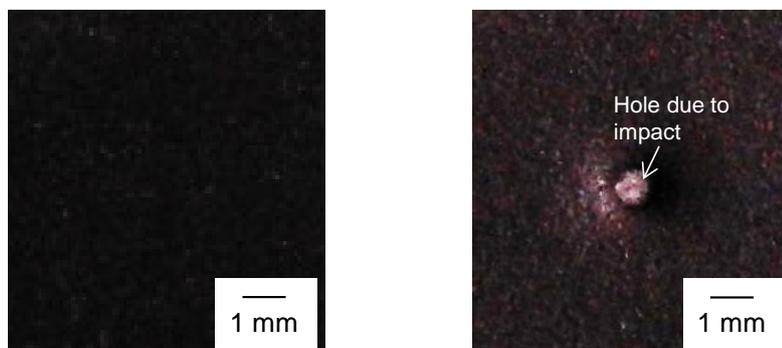
式(3.10)により、衝撃荷重 $F(t)$ の力積から衝撃エネルギー吸収量を求めることができる。

3.4 試験結果

3.4.1 衝撃後フィルムの外観検査

落球試験直後にアクリル樹脂発泡フィルムの状態を目視で観察した。高さ700 mmから球を落下させた後の厚さ700 μm 、密度0.50 mg/mm^3 および0.30 mg/mm^3 のアクリル樹脂発泡フィルムを図3.4に示す。試験後、圧痕、孔などの損傷が認められなかった場合が図3.4(a)である。これに対して、図3.4(b)のように、密度が低いフィルムでは、球が衝突した中心部に直径約750 μm 程度の穴が生じ、孔のまわりに圧痕が生じた。なお、試験後時間が経過しても特に圧痕、孔などの損傷の状態は変化が認められなかった。他の試験後の試験片の状況をまとめたものを表3.2に示す。密度が高く、厚いフィルムでは、いずれの球の落下高さの場合も損傷は認められなかった。密度が0.30 mg/mm^3 のフィルムおよび厚さ200 μm の

フィルムでは、落下高さが大きくなると圧痕、孔などの損傷が生じた。特に低密度のフィルムの場合、相対的に強度が低く、衝撃速度の高い球の衝突により生じる大きな衝撃荷重に対して損傷が生じたものと思われる。



(a) Density, 0.50 mg/mm³

(b) Density, 0.30 mg/mm³

Fig. 3.4 Acrylic foam films after impact. Film thickness: 700 μm, Drop height: 700 mm.

Table 3.2 Hole in acrylic foam film after impact test.

Acrylic film density	0.30 mg/mm ³		0.50 mg/mm ³					
	200	700	200	300	400	500	700	
Acrylic film thickness (μm)								
	100	N	N	N	N	N	N	N
	200	N	N	N	N	N	N	N
Drop height (mm)	300	N	N	N	N	N	N	N
	400	N	N	N	N	N	N	N
	500	B	B	B	-	-	N	N
	700	B	B	B	-	-	N	N
	1000	B	B	B	-	-	N	N

N : no damage in film

B: generating hole due to impact

-: no test

3.4.2 測定結果

(a) フィルムがない場合の衝撃荷重

フィルムがない場合の落球試験により生じる衝撃荷重の測定結果を図 3.5 に示す。本実験条件内では、衝撃速度が速くなっても荷重の負荷時間はほぼ一定であり、衝撃速度とともに荷重の最大値が増大することが確認される。

(b) 衝撃荷重に及ぼす PET 基材の影響

発泡フィルムによる衝撃荷重の低減効果を調べる前に、試験片の PET 基材の存在が及ぼす衝撃荷重への影響について確認を行った。厚さの異なる PET フィルムのみを試験片として球を高さ 700 mm の位置から落下させ、衝撃荷重の測定を行った。使用した PET フィルムは、アクリル樹脂発泡フィルムの基材と同じ厚さ 38 および 25 μm のものを使用した。この時の衝撃荷重の測定結果を図 3.6 に示す。図 3.6 より、PET フィルムの存在により、荷重の最大値が数%減少し荷重負荷時間が 5%程度増加となるが、その差はわずかであり、試験結果に及ぼす PET フィルムの影響は小さいことが確認された。

(c) 衝撃荷重に及ぼすアクリル樹脂発泡フィルムの影響

落球高さ 400 mm としたときの 0.30 および 0.50 mg/mm^3 の二つの密度のアクリル樹脂発泡フィルムの場合の衝撃荷重を図 3.7 に示す。図 3.7 (a) および (b) は、それぞれ厚さ 700 μm および 200 μm のフィルムの場合の結果を示す。比較のためにフィルムがない場合の結果も示す。アクリル樹脂発泡フィルム上に落球することで最大荷重は減少し、荷重負荷時間が長くなり、荷重の立ち上がりが緩やかになっている。密度が高くなるほど、衝撃荷重の減少が大きいことが確認できる。密度 0.50 mg/mm^3 のフィルムの場合の最大荷重は、フィルムがない場合に比べ、厚さ 700 μm の場合では約 80%、厚さ 200 μm の場合では約 50%程度減少しており、荷重負荷時間はそれぞれ約 5 倍および約 1.7 倍まで長くなっていることがわかる。また、密度 0.30 mg/mm^3 のフィルムの場合の最大荷重は、フィルムがない場合に比べ、厚さ 700 μm の場合では約 75%、厚さ 200 μm の場合では約 20%程度減少し、荷重負荷時間はそれぞれ約 4 倍および約 1.2 倍まで長くなっている。

衝撃荷重に及ぼすフィルム厚さの影響について検討するために、図 3.8 (a) および (b) には、それぞれ落下高さ 100 mm および 500 mm のときの結果を示す。このときの、フィルム密度は 0.50 mg/mm^3 である。図中の破線はフィルムが圧痕、孔などの損傷が生じた場合を示す。図 3.8 より、フィルムが厚くなるほど最大荷重が減少していることが確認できる。落下高さ 100 mm の場合、厚さ 700 μm のフィルムのときの最大荷重はフィルムがない場合の最大荷重に比べ、90%以上減少している。また、負荷時間はフィルムが厚くなるほど長くなっており、落下高さ

100 mm の場合、厚さ 700 μm のときの負荷時間はフィルムがない場合と比較して 10 倍程度長くなっている。さらにフィルムが破損した場合においても荷重分布には大きな影響は見られないことがわかった。

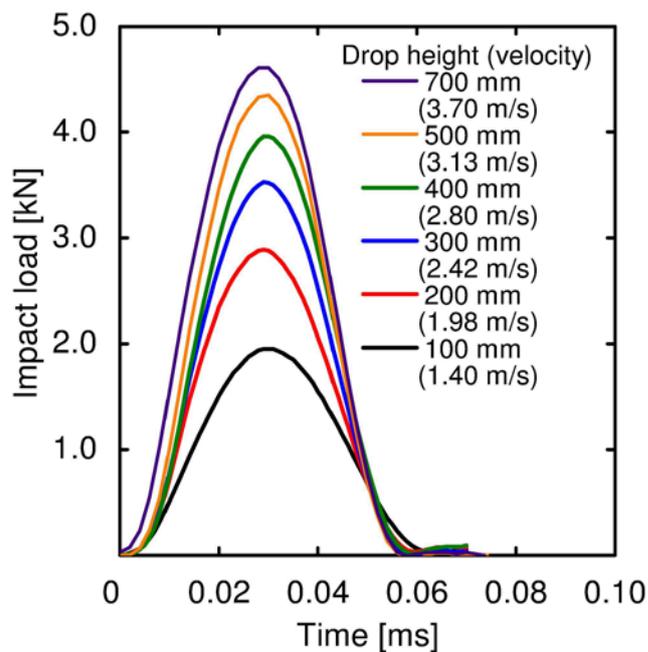


Fig. 3.5 Impact load without film.

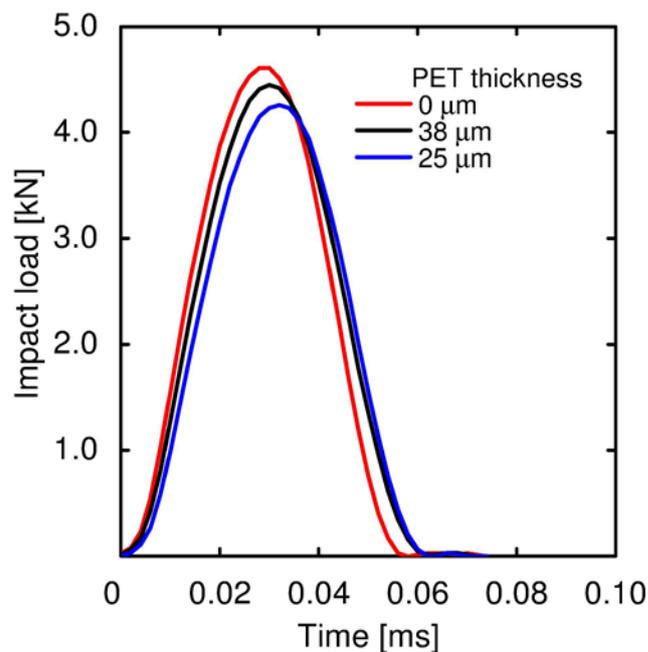
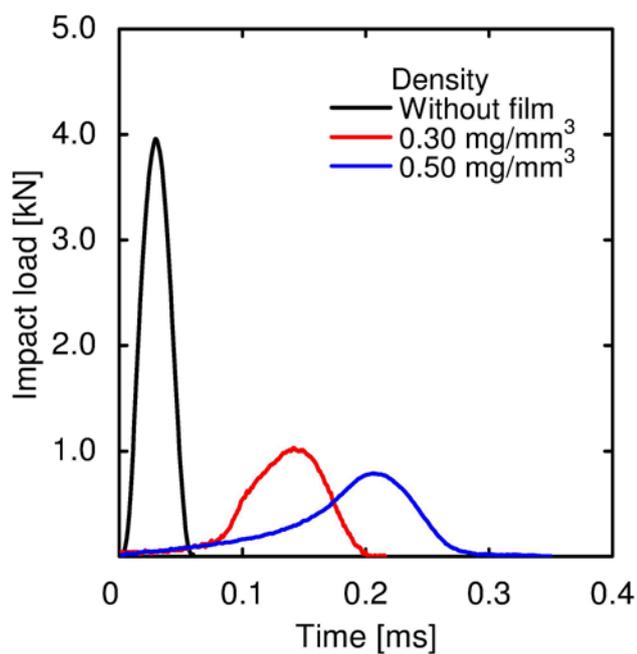
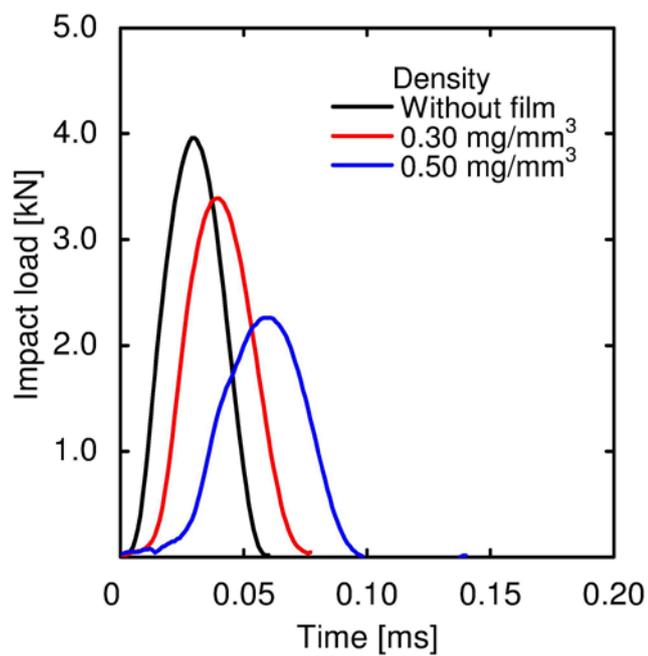


Fig. 3.6 Impact load on PET substrate. Drop height 700 mm

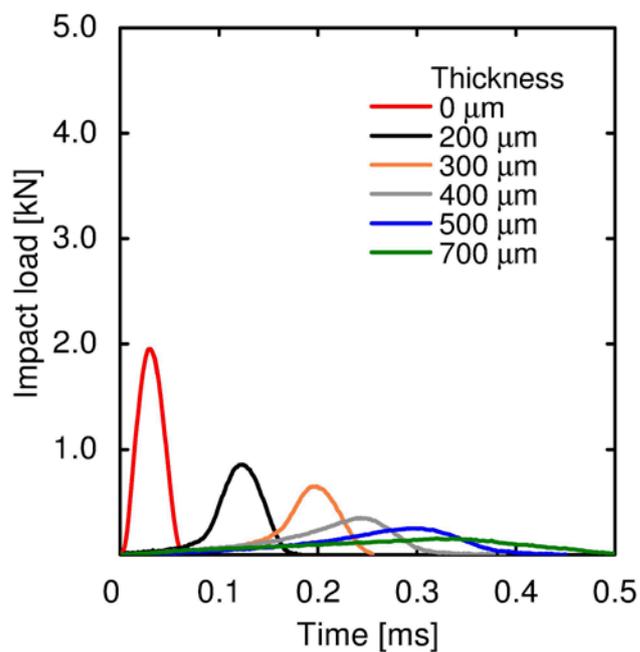


(a) Film thickness 700 μm .

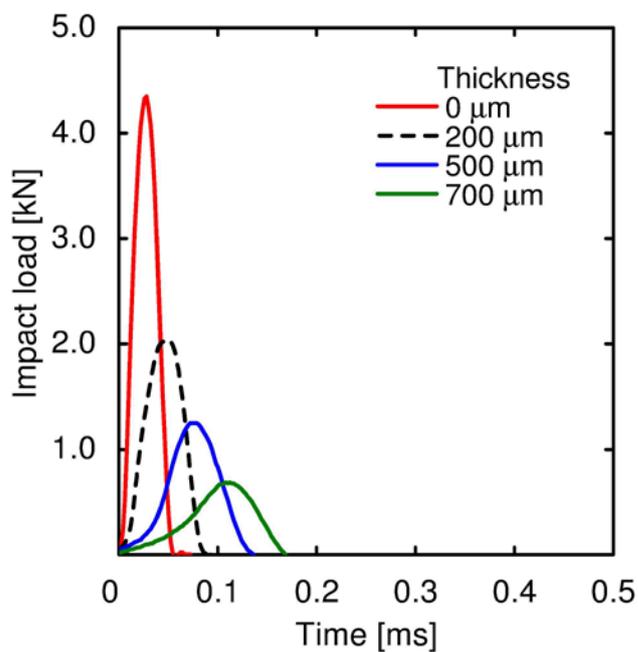


(b) Film thickness 200 μm .

Fig. 3.7 Impact load. Drop height 400 mm.



(a) Drop height 100 mm.



(b) Drop height 500 mm.

Fig. 3.8 Impact load. Film density 0.50 mg/mm^3 .

3.5 考 察

3.5.1 衝撃荷重の低減効果

3.4章で得られた試験結果から、アクリル樹脂発泡フィルムの衝撃荷重の低減効果および衝撃エネルギー吸収特性について考察を行う。以下において、落球衝撃試験でフィルムが破損しなかった密度 0.50 mg/mm^3 のフィルムの場合の結果について考察を行う。

図 3.9 に、密度 0.50 mg/mm^3 のフィルム厚さ h と衝撃荷重 $F_{max}(h)$ の関係を示す。なお図 3.9 の縦軸はフィルムのない場合の荷重の最大値 $F_{max}(0)$ により正規化している。試験は各条件において 3 回ずつ実施し、グラフ中にそれらの結果の平均値をプロットし、エラーバーは最大値および最小値を示す。多くのプロット点でエラーバーが表示されていないように見えるのは、最大値と最小値の差が極めて小さいためである。衝撃荷重の最大値の対数値は、フィルム厚さに対してほぼ線形に減少し、その減少は衝撃速度が遅いほど顕著となることがわかった。したがって、今回の落球試験のように、局部変形が支配的となる高剛性の物体に対する衝突において、アクリル樹脂発泡フィルムの荷重最大値が、フィルム厚さに対して 10 を底とした指数関数的に急激に減少することが明らかとなった。

図 3.10 には、密度 0.50 mg/mm^3 のフィルム厚さ h と荷重負荷時間 $T(h)$ の関係を示す。なお図 3.9 と同様に縦軸はフィルムのない場合の荷重負荷時間 $T(0)$ により正規化し、プロット点は 3 回の結果の平均値でありエラーバーは最大値、最小値を示す。荷重負荷時間は、落球高さが高くなるほど短くなり、フィルム厚さが増加するほど長くなることがわかる。荷重負荷時間とフィルム厚さは線形関係にあることが明らかとなった。

以上のことから、衝突を受ける面にアクリル樹脂発泡フィルムを設置することで、球とロードセルの接触面が時間とともに増加するために、衝撃荷重の増加を低減させて、荷重の負荷時間を長くすることがわかった。特に密度が高く、厚さが大きい発泡フィルムではその効果が顕著であった。

3.5.2 衝撃エネルギー吸収の効果

式 (8) と測定される力積から求められる密度 0.50 mg/mm^3 のフィルム厚さと落球の跳ね返り速度 v_r の関係を図 3.11 に示す。落下高さが低くなるほど、跳ね返り速度が遅くなっている。また、フィルムが厚くなるにつれ、跳ね返り速度が減少しており、落下高さ 400 mm の場合では、厚さ $700 \mu\text{m}$ のフィルムがあることでフィルムがない場合に比べ 90% 程度まで減少することが明らかとなった。

密度 0.50 mg/mm^3 のフィルム厚さ h とアクリル樹脂発泡フィルムの衝撃エネルギー吸収 E_{abs} の関係を図 3.12 に示す。破線は、落球のポテンシャルエネルギーを表し

ている。厚さ $200\ \mu\text{m}$ の非常に薄いアクリル樹脂発泡フィルムでも、跳ね返り速度がフィルムのない場合に対して半分あるいは三分の一以下になることからほぼ落球の衝撃エネルギーを吸収することがわかった。

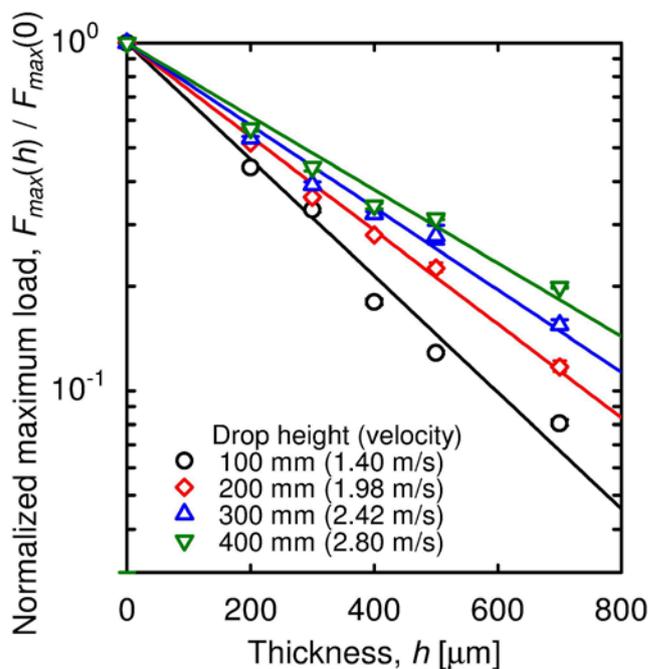


Fig. 3.9 Normalized maximum load. Film density $0.50\ \text{mg}/\text{mm}^3$.

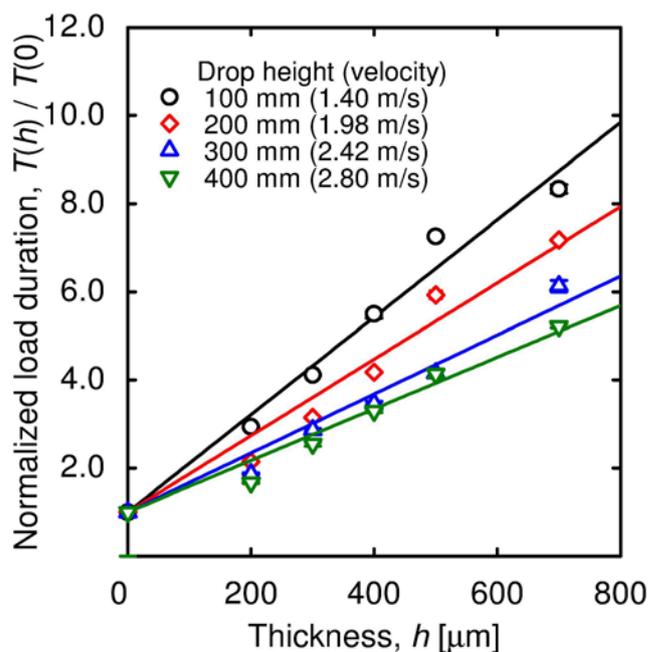


Fig. 3.10 Normalized load duration. Film density $0.50\ \text{mg}/\text{mm}^3$.

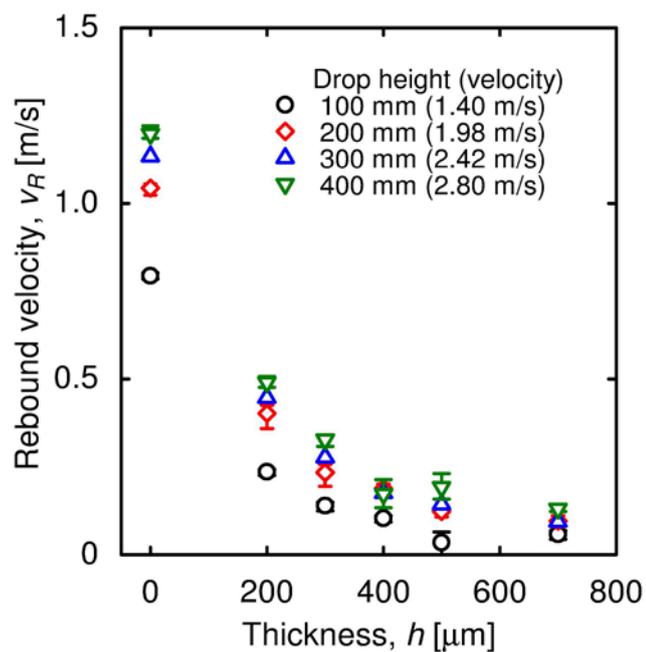


Fig. 3.11 Rebound velocity. Film density 0.50 mg/mm^3 .

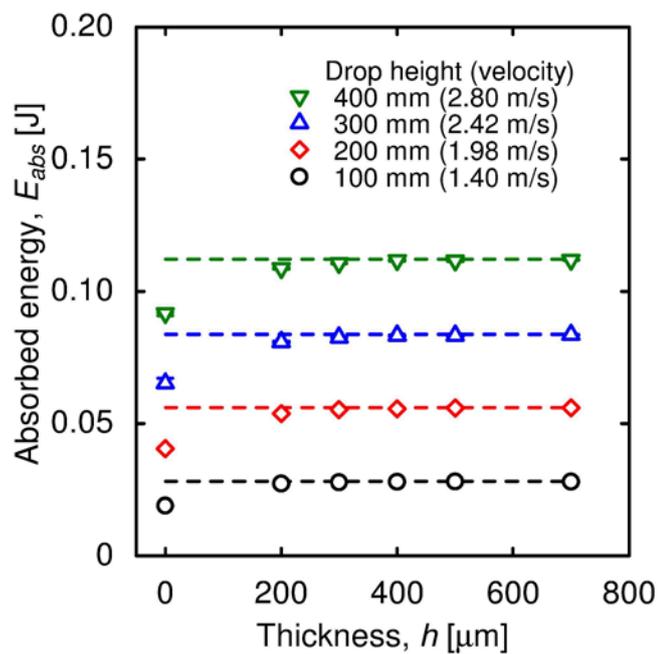


Fig. 3.12 Absorbed energy of acrylic foam film. Film density 0.50 mg/mm^3 .

3.6 結 言

本章では、薄いフィルムに対する衝撃荷重の測定方法について検討し、簡便な落球試験を実施し、衝撃荷重および衝撃エネルギー吸収への厚さ 1 mm 以下のアクリル樹脂発泡フィルムの効果について実験的に考察した。また、高剛性の構造物に対して物体が衝突した際の衝撃を低減させるためのフィルム厚さの影響を明らかにした。その結果、アクリル樹脂発泡フィルムの荷重最大値が、フィルム厚さに対して 10 を底とした指数関数的に急激に減少し、荷重負荷時間がフィルム厚さに対して線形的に増加することが明らかとなった。特に、アクリル樹脂発泡フィルムが厚く、密度が高くなるほど衝撃荷重の最大値を低減させ、荷重負荷時間を長くする効果が大きいことがわかった。さらに、厚さ 200 μm の非常に薄いアクリル樹脂発泡フィルムでもほぼ落球の衝撃エネルギーを吸収していることがわかった。

第4章

落錘試験による衝撃吸収特性の評価

4.1 緒 言

現在、自動車、航空機といった輸送機器やモバイル機器の落下衝撃など様々な分野において耐衝撃性の向上が求められている。近年では、スマートフォンやタブレット形コンピュータなどのモバイル機器が急速に普及しており、タッチパネルの性能を持たせた液晶あるいは有機エレクトロルミネッセンス (EL) を用いた薄形ディスプレイが多く使用されている。これらの機器では、様々な使用条件において高い信頼性が要求されており、落下衝撃に対する薄形ディスプレイの耐衝撃性が求められている [47, 48]。薄形ディスプレイの耐衝撃性を得るため、衝撃荷重を低減し、衝撃エネルギーを吸収するための緩衝材として発泡材が使用されている。緩衝材としての発泡材の力学的特性については、様々な変形モードに対して明らかにされている [64]。近年では、モバイル機器の小型化、軽量化等に伴い、薄形ディスプレイの緩衝材として、発泡材料の薄膜化が求められている。そこで、厚さ 1 mm 以下のフィルム状の発泡材料が使用されるようになってきており、ポリエチレンを発泡させたフィルムの衝撃試験も行われており、動的圧縮特性について明らかにされている [60]。また、第2章、第3章では、アクリル樹脂発泡フィルムの衝撃荷重の低減効果について明らかにされている。しかし、薄い発泡フィルムに対する衝撃試験が行われているのはごくわずかであり、信頼性の高い、衝撃吸収特性の測定法が確立されていないのが現状である。確立しない要因としては一般に使用される衝撃試験機が大型で普及の妨げになっている点も挙げられる。よって簡易的な衝撃試験で樹脂発泡フィルムの力学的特性の評価法を確立する必要がある。第3章では、薄いフィルムに対する衝撃荷重の測定方法について検討し、簡便な落球試験を実施し、衝撃荷重および衝撃エネルギー吸収への厚さ 1 mm 以下のアクリル樹脂発泡フィルムの効果について明らかにした。落球試験において、アクリル樹脂発泡フィルムが、破損した場合においても荷重履歴に変化は見られなかった。そこで、さらに大きな衝撃荷重に対するアクリル樹脂発泡フィルムの動的特性について明らかにする必要がある。

そこで、本章では、厚さの異なるアクリル樹脂発泡フィルムに対して落錘衝撃圧縮試験を実施し、得られた力学的特性を基に衝撃荷重の変化やフィルムの厚さによる影響を考察して、10 kN を超えるような大きな衝撃荷重が作用したときのアクリル樹脂発泡フィルムの選択指針を与えることを目的としている。

4.2 試験片

本章では、アクリル樹脂発泡フィルムとおよびウレタン発泡フィルムにアクリル樹脂発泡フィルムを積層したフィルムを試験片として使用した。

Table 4.1 に使用するアクリル樹脂発泡フィルム、Table 4.2 に積層フィルムの一覧を示す。厚さ 38 μm のポリエチレンテレフタレート (PET) を基材として、その上に発泡したアクリル樹脂が生成された密度 0.5 mg/mm^3 および厚さ 200 ~ 1000 μm のアクリル樹脂発泡フィルム (ISR-ACF, Iwatani) を試料として使用した。積層フィルムは厚さ 30 μm のウレタンフォームに2種類の厚さと密度をもつアクリル樹脂発泡フィルムが重ね合わされたものとする。図 4.1 および 4.2 に、アクリル樹脂発泡フィルムおよび積層フィルムの概略図を示す。

Table 4.1 Specimen specification of acrylic foam film

Product ID	Acrylic foam		PET substrate
	Density, mg/mm^3	Thickness, μm	Thickness, μm
ISR-ACF 100	0.50	100	38
ISR-ACF 300	0.50	300	38
ISR-ACF 700	0.50	700	38
ISR-ACF 1000	0.50	1000	38

Table 4.2 Specimen specification of laminate film

Product ID	Acrylic		Urethane		PET substrate
	Density, mg/mm^3	Thickness, μm	Density, mg/mm^3	Thickness, μm	Thickness, μm
ISR-ACF-SFH-10	0.23	120	0.22	30	38
ISR-ACF-SFH-30	0.23	100	0.22	30	38
ISR-ACF-SFT-10	0.30	120	0.22	30	38
ISR-ACF-SFT-30	0.30	100	0.22	30	38

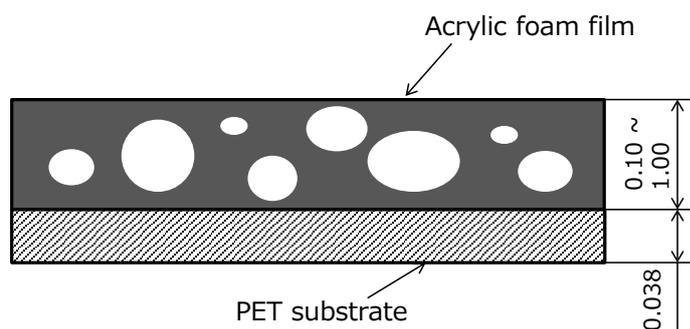


Fig. 4.1 Schematic of acrylic foam film. Unit: mm.

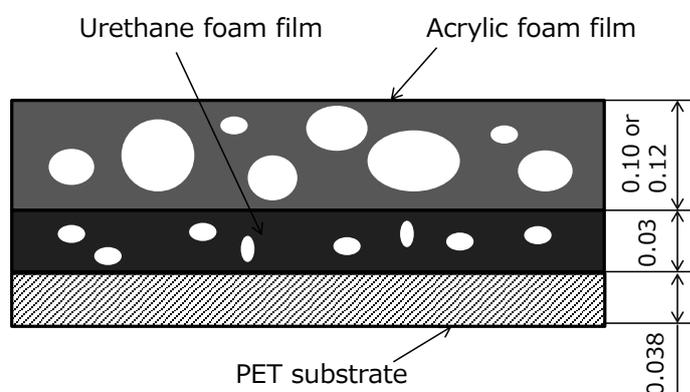


Fig. 4.2 Schematic of laminated film. Unit: mm.

4.3 落錘衝撃試験

4.3.1 落錘衝撃試験機

実験に使用した落錘試験機の概要を図 4.3 に示す. ロードセルには, 長さ 1 m, 直径 20 mm の軟鋼丸棒 (JIS SS400) を使用した. 試験片はロードセル上に設置した. 衝撃棒には直径 20 mm の軟鋼丸棒 (JIS SS400) を使用し, 長さは 100 および 200 mm の二種類を用意した. 片当たりを防ぎ, 滑らかな応答を得るために, 衝突する面を半球状に加工した. 衝撃棒は上端に結び付けられた糸により持ち上げ, 最大 1500 mm の位置から自由落下させ, 試験片に衝撃荷重を与えた.

本試験機により求められる試験片に作用する衝撃荷重の測定方法は次の通りである. ロードセルの上端から 500 mm の位置に設置された半導体ひずみゲージ (KSP-2-120-E4, 共和電業) により, ひずみを測定した. なお, 図 4.3 のように棒の中心軸を挟んで対面するように二枚のひずみゲージを取り付け, 対辺 2 アクティブゲージ法によりブリッジ回路に接続することで, 曲げひずみを消去し, 軸方向の垂直ひずみを測定した. ひずみゲージが接続されたブリッジボックスを介し

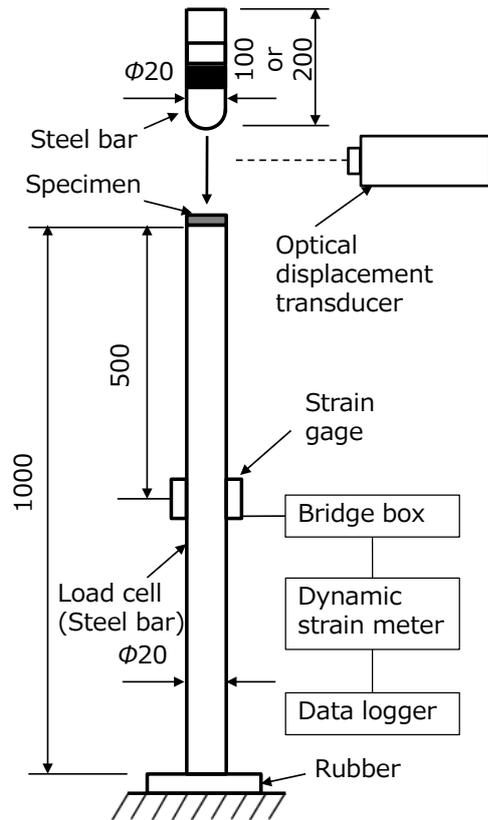


Fig. 4.3 Equipment. Unit: mm.

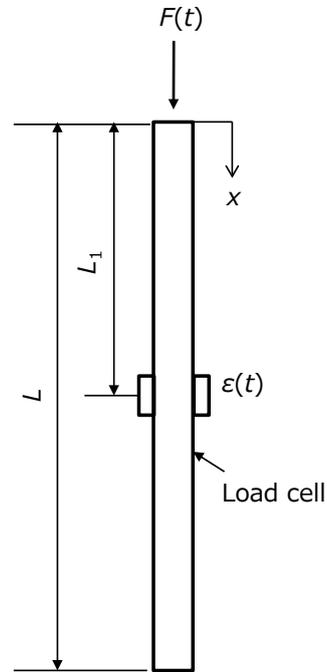


Fig. 4.4 Analytical model of load cell.

て、動ひずみ計 (AS2101, NEC 三栄株式会社) に接続し、データロガー (8835, HIOKI) によりひずみの時間変化を $1 \mu\text{s}$ 間隔で測定した。

また、衝撃による応力波の伝播だけではなく、変位計 (MODEL 100B Zimmer レンズ: 100-2) を使用し衝撃棒の変位を測定した。衝撃棒に塗装されたマーカーの白と黒の境界線の移動量を変位計により測定し、試験片の変形量とした。

4.3.2 衝撃荷重の算出

ロードセルの上端から 500 mm の位置のひずみの時間変化 $\varepsilon_1(t)$ から試験片に作用する衝撃荷重 $F(t)$ を得るための導出式を求める。解析モデルを図 4.4 に示す。ロードセル上端から距離 L_1 の位置でひずみの時間変化 $\varepsilon(t)$ を測定したとすると、境界条件は次式のようなになる。

$$\begin{aligned}
 x = L_1 \text{ において } \frac{\partial u}{\partial x} &= \varepsilon(t) \\
 x = L \text{ において } \frac{\partial u}{\partial x} &= 0
 \end{aligned}
 \tag{4.1}$$

ここで、 u_1 は入力棒の軸方向変位であり、 x および t は入力棒右端を原点とする軸方向座標および時間である。

衝撃を受ける前には入力棒は静止していることから、初期条件は次式となる。

$$t=0 \text{ のとき } u=0, \frac{\partial u}{\partial t}=0 \quad (4.2)$$

入力棒の変形は一次元波動方程式に従うものとし、次式のように表される。

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \quad (4.3)$$

ここで、 c は、入力棒内の縦波速度であり、次式として与えられる。

$$c = \sqrt{E/\rho} \quad (4.4)$$

なお、 E および ρ は入力棒の縦弾性係数および密度である。

ひずみゲージを貼付する位置 L_1 を棒の中央($L_1=L/2$)とすれば、式(4.1)の境界条件および式(4.2)の初期条件の下で式(4.3)を解くと、衝撃荷重 $F(t)$ は A を入力棒の断面積とすれば、次式のように求めることができる。

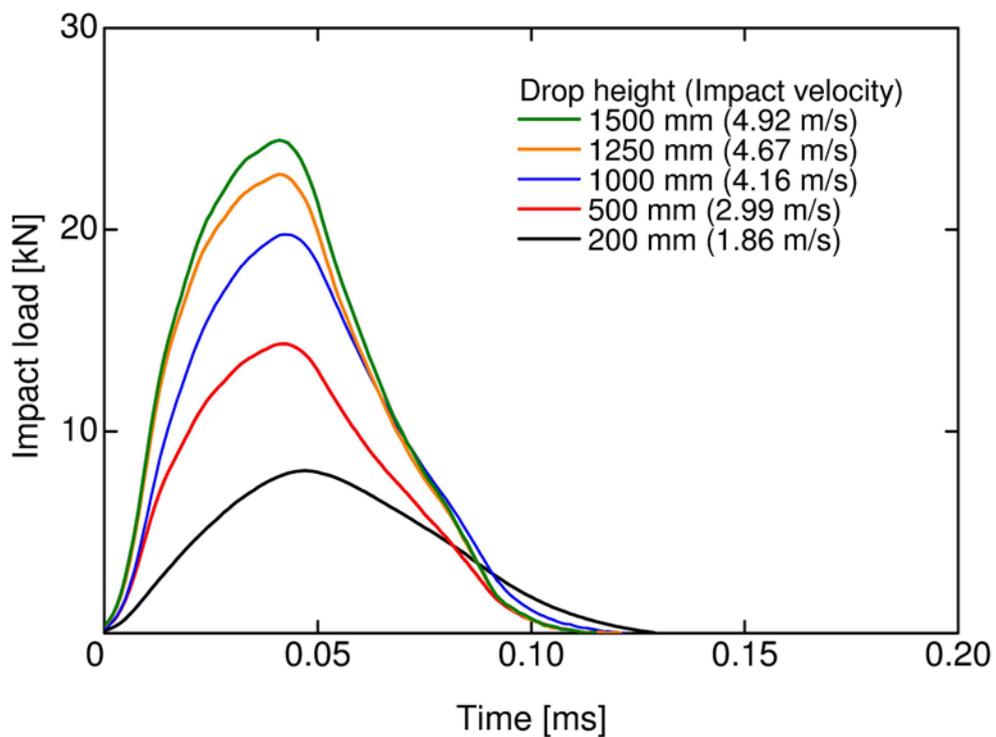
$$F(t) = -AE \left\{ \varepsilon \left(t - \frac{L_1}{c} \right) + \varepsilon \left(t + \frac{L_1}{c} \right) \right\} \quad (4.5)$$

4.4 試験結果

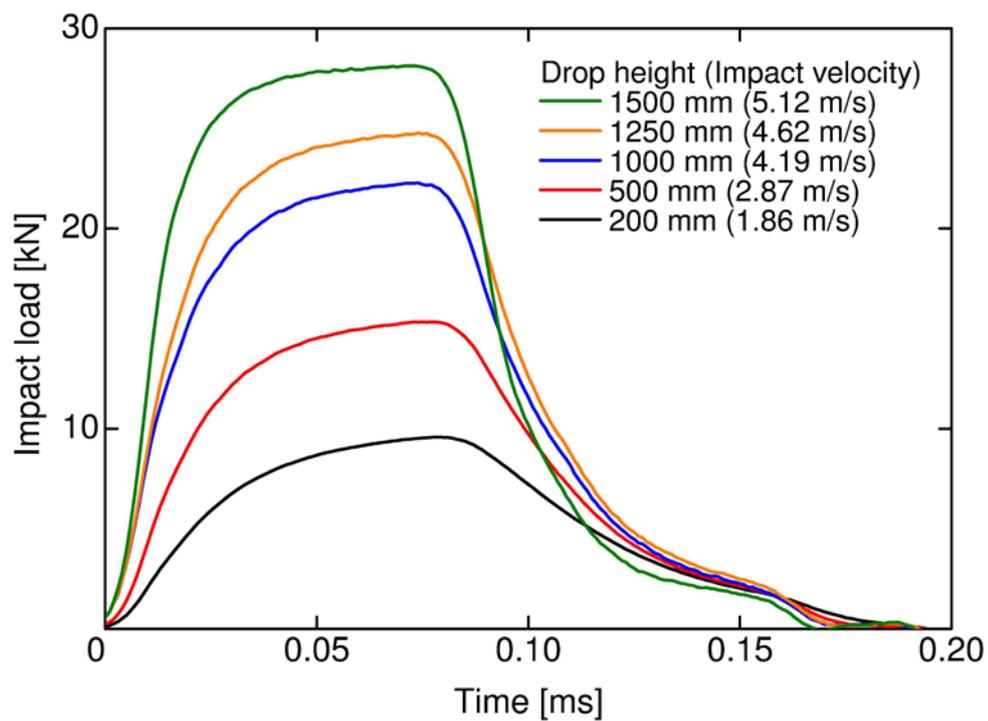
4.4.1 衝撃荷重履歴

図4.4にはアクリル樹脂発泡フィルムがない場合における荷重履歴を示す。それぞれ図4.4(a), (b)は衝突棒の長さが100 mmおよび200 mmとなっている。落下高さは50~1500 mmの範囲で行い、試験結果として5条件の結果のみ示す。荷重の最大値は衝突棒の落下高さが高くなるとともに、増加していることが確認できる。また、衝突面で発生した応力波が衝撃棒中を伝播・反射して再び衝突面に戻ってくるため、衝突棒が200 mmの場合では、衝撃荷重の時間変化が矩形状となり、荷重負荷時間が長くなっていることが確認できる。

図4.5には厚さ700 μm のアクリル樹脂発泡フィルムを使用した場合の荷重履歴を示す。それぞれ図4.5(a), (b)は衝突棒の長さが100 mmおよび200 mmの結果となっている。衝突棒の落下高さが大きい場合、荷重が一定となり増減しない区間が存在する。この領域はプラトー領域と呼ばれ、アクリル発泡体のセルが圧潰

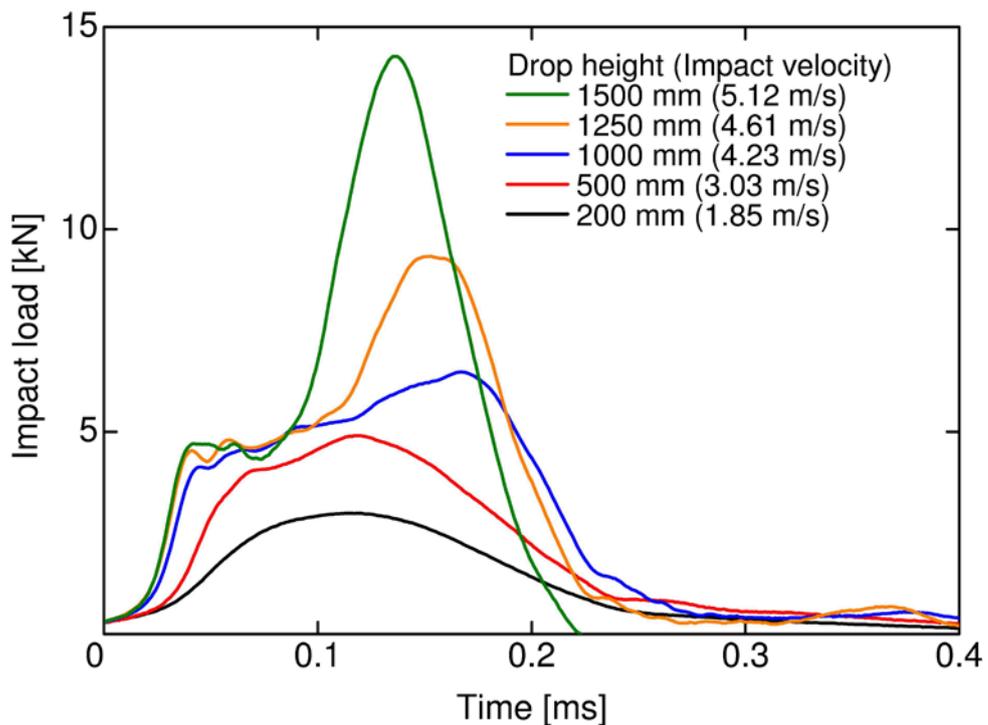


(a) Length of impactor: 100 mm

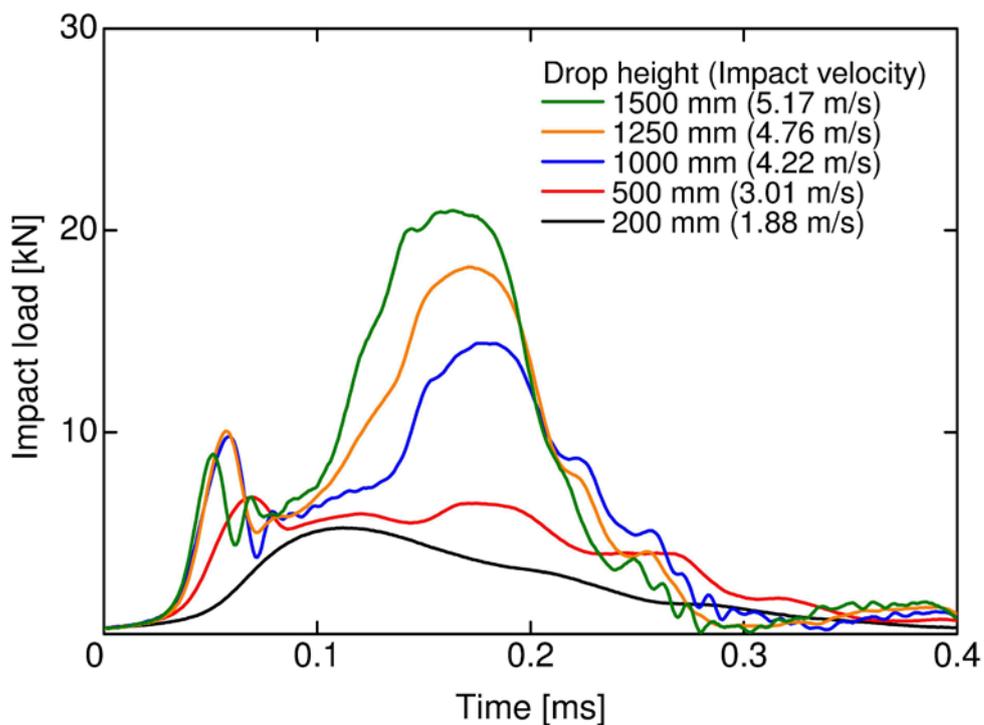


(b) Length of impactor: 200 mm

Fig. 4.4 Impact load histories without foam film.

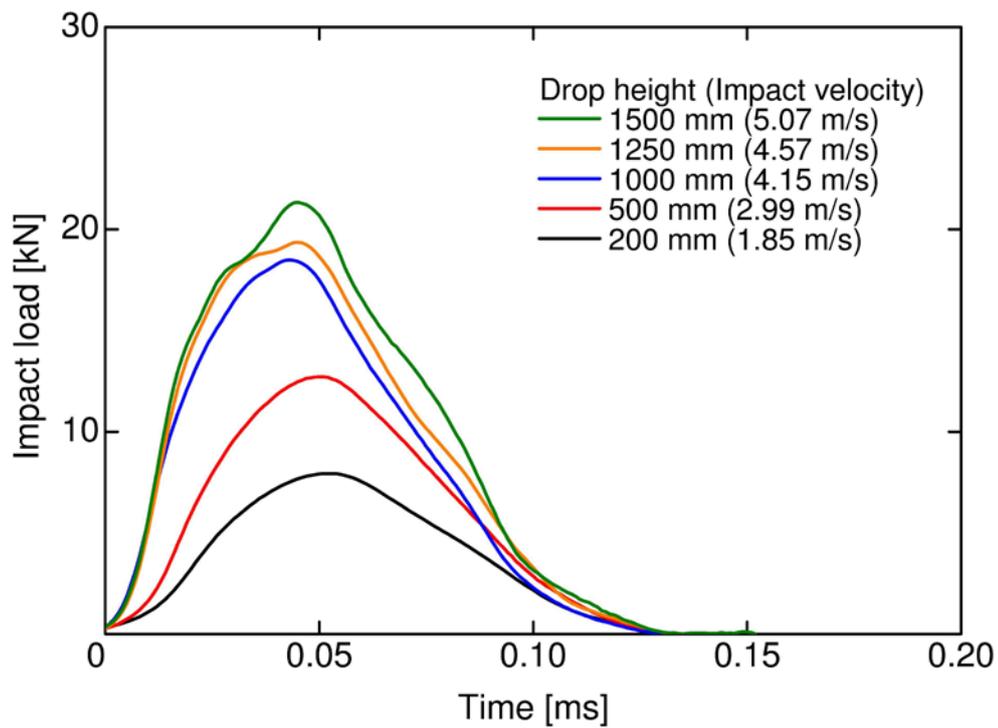


(a) Length of impactor: 100 mm

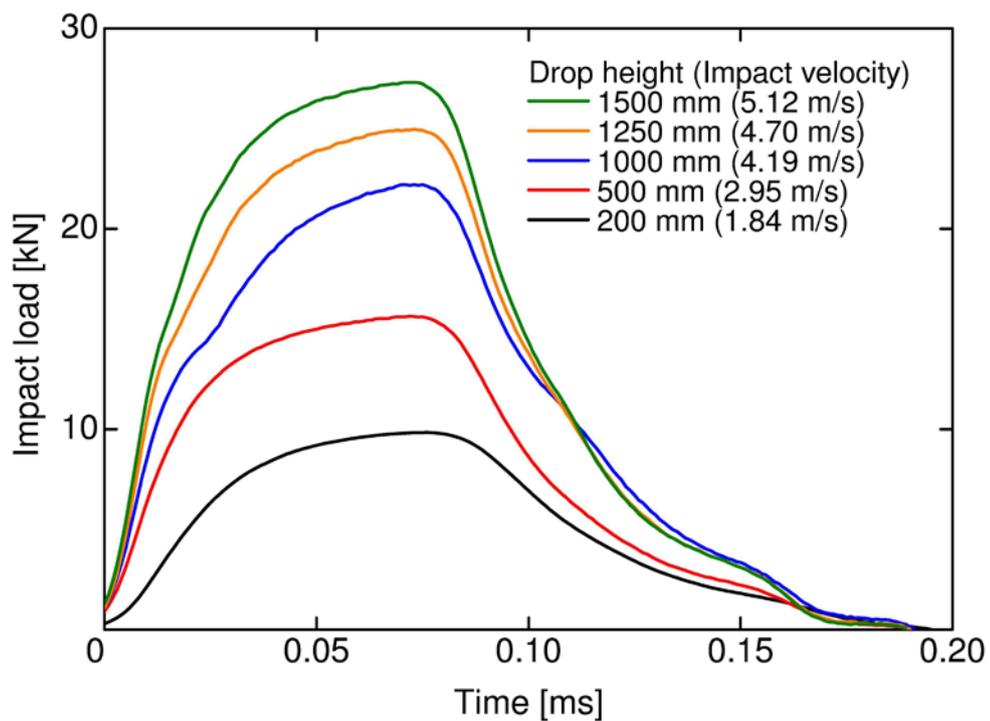


(b) Length of impactor: 200 mm

Fig. 4.5 Impact load histories with acrylic foam film. Thickness: 700 μm .



(a) Length of impactor: 100 mm



(b) Length of impactor: 200 mm

Fig. 4.6 Impact load histories with laminated film. Thickness: 0.1 mm and 0.03 mm.

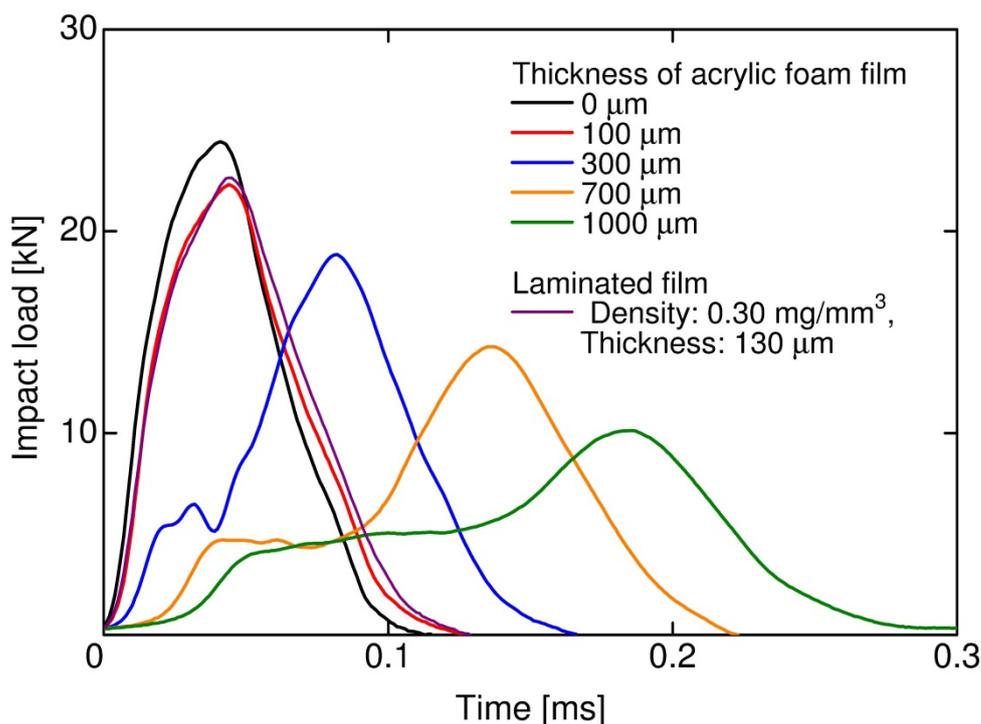


Fig. 4.7 Impact load histories different thickness.

するためにエネルギー吸収が行われ、荷重が増加しない領域である。また、プラトー領域前の荷重領域はフィルムの再生が可能な弾性領域であると考えられる。衝突速度が大きくなり衝撃エネルギーが大きくなると、プラトー領域を超え、再び荷重が急激に増加することがわかる。衝撃棒が限界までセルの圧潰がすすみ、これ以上セルが圧潰しないため緻密化し急激にフィルムの圧縮剛性が増加するためである。さらに、荷重が増加すればフィルムの強度を超えて貫通することになる。厚さ 700 μm のアクリル樹脂発泡フィルムでは落下高さが 1000 mm 以上で貫通することがわかった。

図 4.6 には厚さ 100 μm のアクリル樹脂発泡フィルムと厚さ 30 μm のウレタン発泡フィルムの積層フィルムの衝撃荷重履歴を示す。それぞれ図 5.6 (a), (b) は衝撃棒の長さが 100 mm および 200 mm となっている。アクリル樹脂発泡フィルムの場合と同様に衝突速度が速くなると、衝撃荷重の最大値が大きくなっている。

図 4.7 に落下高さ 1500 mm, 衝撃棒長さ 100 mm における異なるフィルム厚さでの荷重履歴を示す。密度 0.30 mg/mm³, 厚さ 130 μm の積層フィルムの荷重履歴についても示す。フィルムが厚くなるほど最大荷重が減少していることが明らかとなった。また、フィルムが厚くなるほど、フィルムの変形時間が長くなるため荷重の負荷時間も長くなっている。プラトー領域についてもフィルム厚さに比例し

て長くなっていることがわかる。さらに、積層フィルムは厚さ 100 μm の荷重履歴とよく一致していることがわかる。

4.4.2 荷重—変位線図

図 4.8 には衝突棒の長さ 100 mm のときのアクリル樹脂発泡フィルムがない場合における荷重—変位線図を示す。としている。変位は、荷重の上昇とともに増加し、最大荷重に達した後、減少している。また、落下高さが高くなるほど変位量は大きくなっている。

図 4.9 には厚さ 700 μm のアクリル樹脂発泡フィルムへの落錘試験の荷重 - 変位線図を示す。衝突棒の長さは 100 mm としている。約 5 kN 付近で荷重が一定となるプラトー領域を経た後、荷重が急激に上がっていることが確認できる。変位量は、フィルムがない場合と比較し、大きくなっていることがわかる。落下高さにより最大荷重が異なるが、それまでの荷重—変位線図は、おおよそ同じような経路となっている。したがって、実験を行った範囲では、荷重—変位線図におけるひずみ速度の影響は小さいことが明らかとなった。

図 4.10 には厚さ 30 μm のウレタン発泡フィルムに厚さ 100 μm のアクリル樹脂発泡フィルムを積層したフィルムの荷重 - 変位線図を示す。衝突棒の長さは 100 mm としている。アクリル樹脂発泡フィルム単体の場合と同様に落下高さが高くなるほど、荷重の最大値が大きくなり、変位量が大きくなっている。

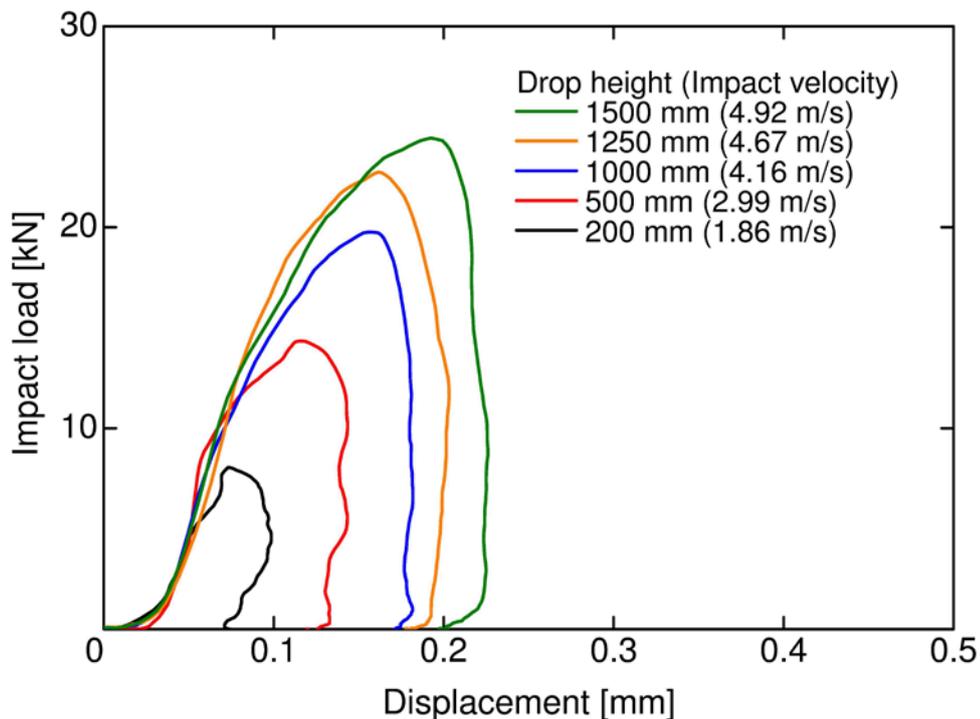


Fig. 4.8 Impact load - displacement curve without foam film.

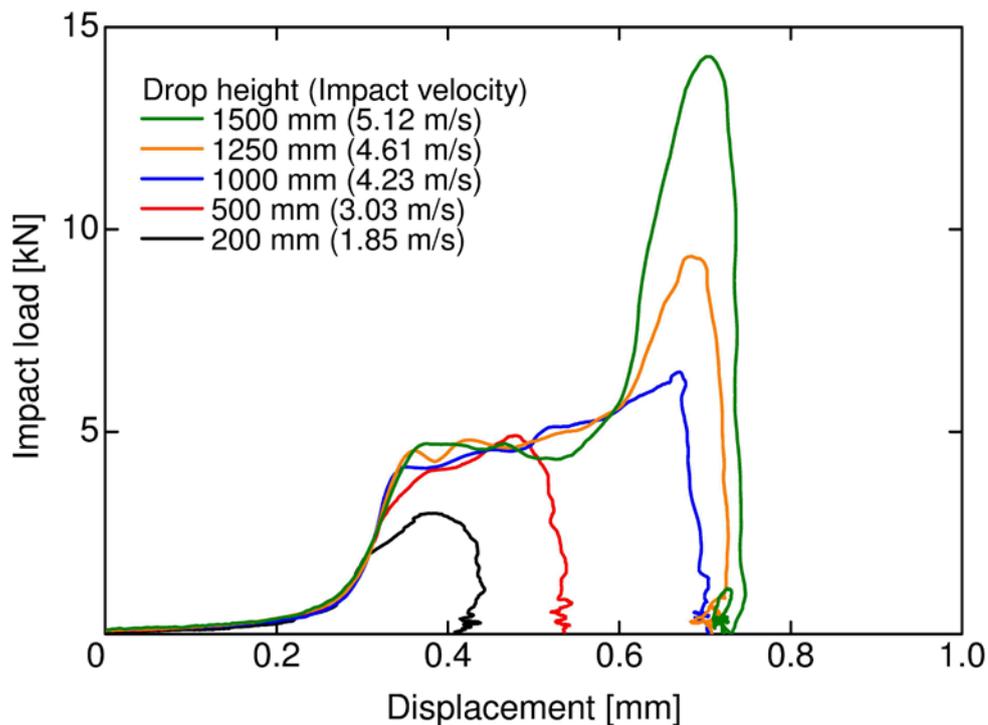


Fig. 4.9 Impact load - displacement curve with acrylic foam film. Thickness: 700 μm

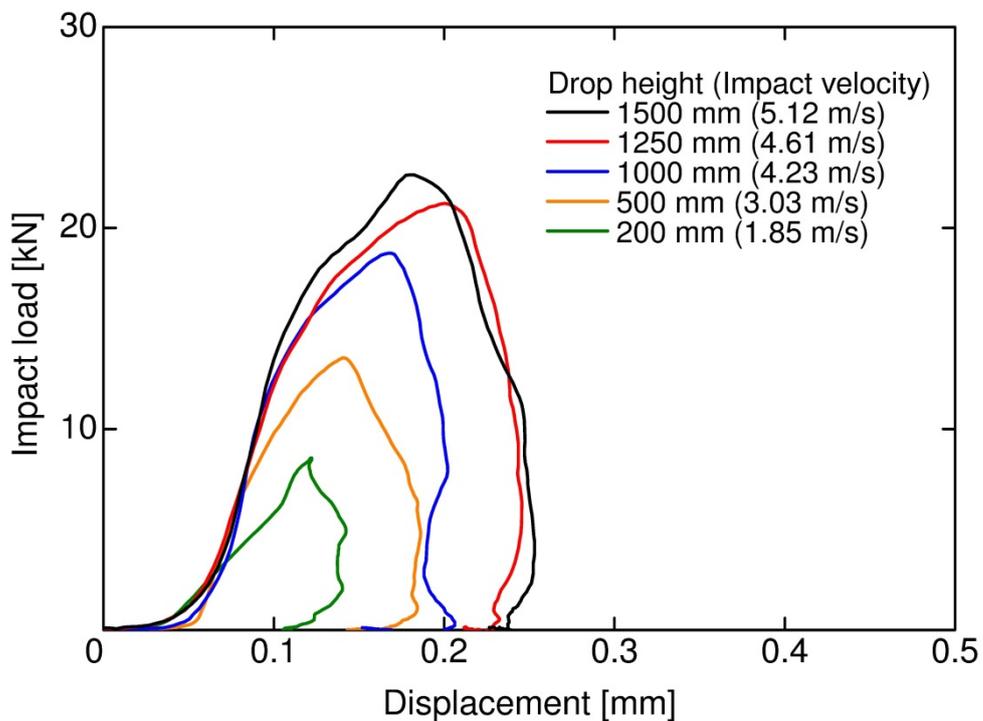


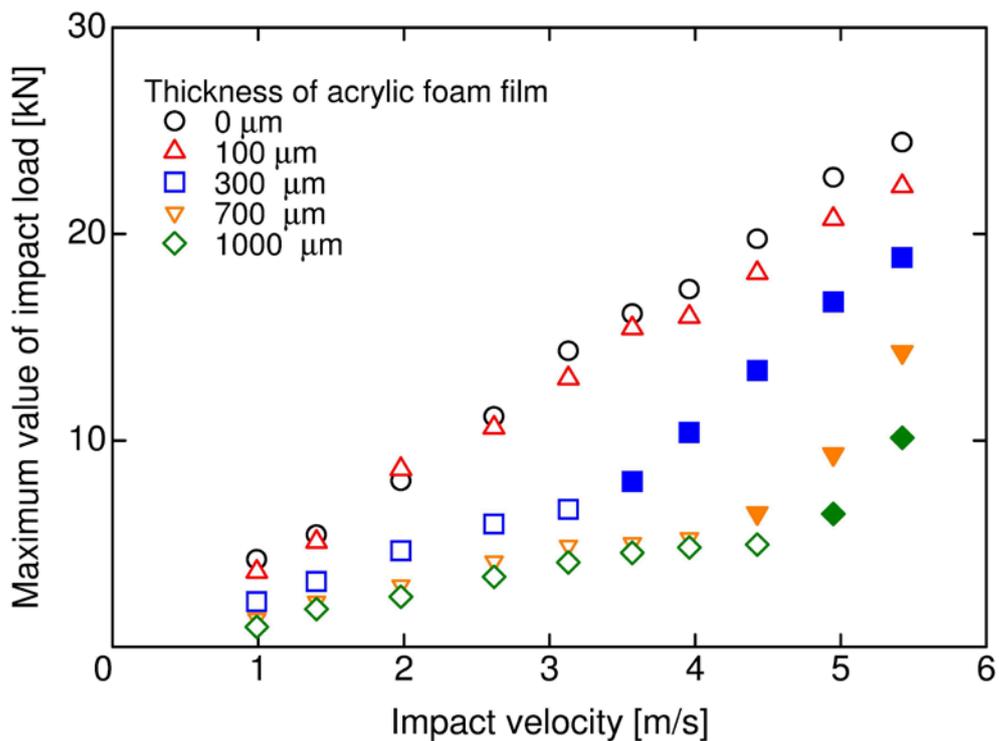
Fig. 4.10 Impact load - displacement curve with laminated film.
Density: 0.30 mg/mm^3 , Thickness: 130 μm .

4.5 考 察

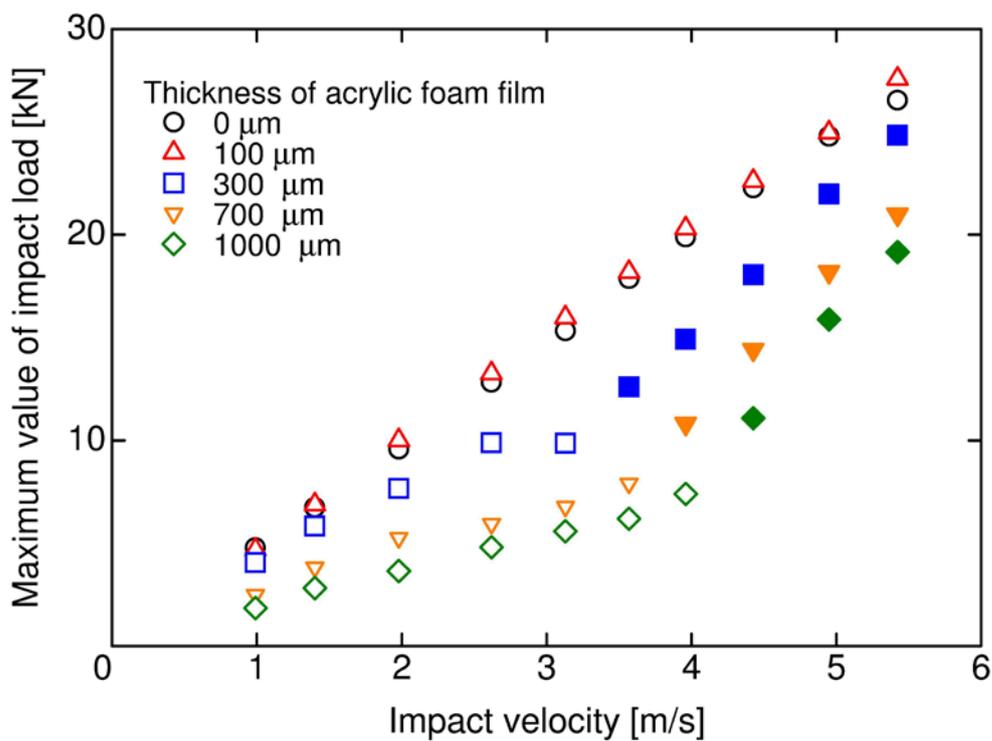
4.5.1 最大衝撃荷重

4.4節で得られた試験結果から、アクリル樹脂発泡フィルムの衝撃荷重低減効果について考察を行う。

図4.11には、アクリル樹脂発泡フィルムの場合における衝撃荷重の最大値と衝突速度の関係について示す。それぞれ図4.11(a), (b)は衝突棒の長さが100 mmおよび200 mmのときの結果を示す。なお、衝突速度は自由落下と仮定し、中塗りの記号はフィルムに貫通穴が生じた場合を示している。衝突速度が速くなるほど、衝撃荷重の最大値が増加していることがわかる。特に、フィルムがない場合および厚さ100 μm のアクリル樹脂発泡フィルムの結果には明確な違いがなく、衝突速度に比例的して増加している。厚さ300 μm 以上のアクリル樹脂発泡フィルムでは、衝突速度が2.5 ~ 4.5 m/sの範囲では衝撃荷重の最大値がほぼ一定となっている。これは、プラトー領域期間が最大値となっているためである。プラトー荷重はフィルムが薄いほど、上昇傾向にあることがわかる。プラトー領域を超えた変形を生じるようになると、フィルムが貫通し荷重が上昇している。また、アクリル樹脂発泡フィルムが厚くなるほど、荷重の最大値が減少していることがわかる。衝突棒の長さ100 mm、衝突速度5.3 m/sの場合、厚さ300 μm では20%、厚さ700 μm では、40%、厚さ1.0 mmでは60%程度減少していることがわかる。衝撃棒が200 mmの場合では、100 mmの場合比べ、減少の幅が小さくなっている。図4.12には積層フィルムの場合における衝撃荷重の最大値および衝突速度の関係について示す。また、厚さが100 μm のアクリル樹脂発泡フィルムの場合の結果についても示す。それぞれ図4.12(a), (b)は衝突棒の長さが100 mmおよび200 mmのときの結果を示す。積層フィルムの場合の結果および厚さ100 μm のアクリル樹脂発泡フィルムの場合の結果はよく一致していることがわかる。このことから、フィルムを積層しても効果が見られないことがわかった。

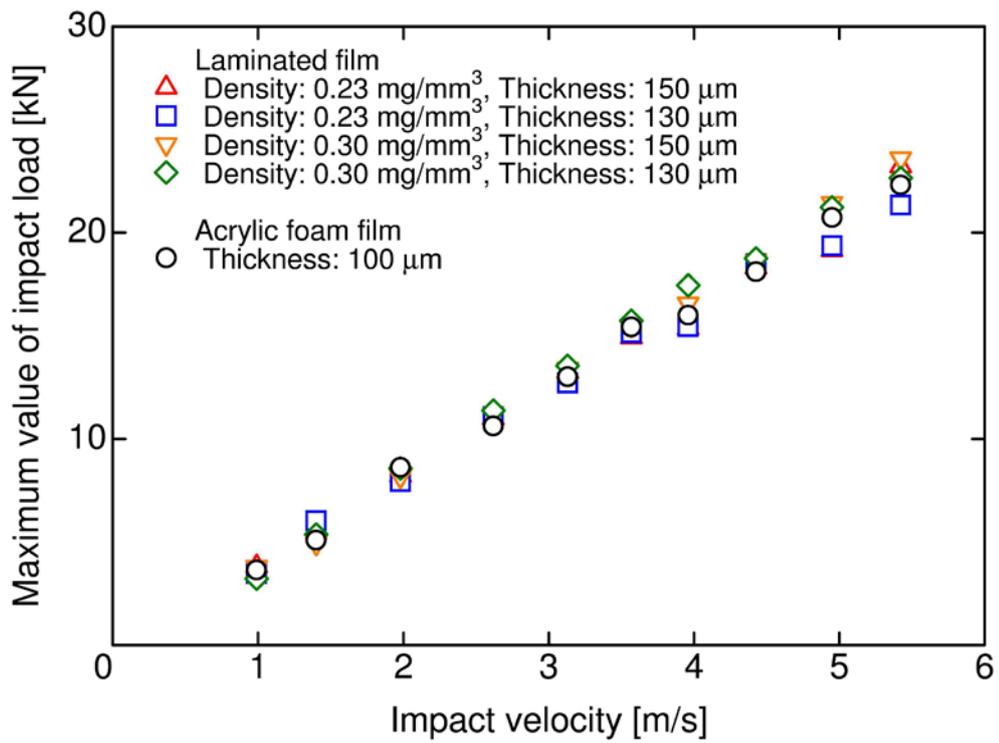


(a) Length of impactor: 100 mm

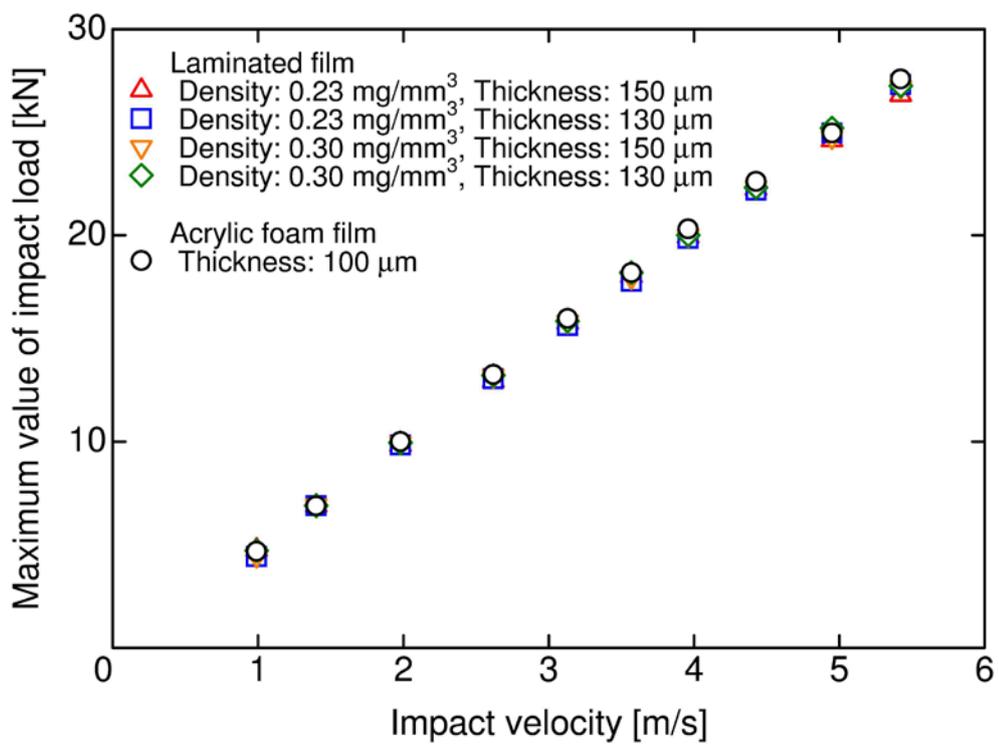


(b) Length of impactor: 200 mm

Fig. 4.11 Maximum value of impact load with acrylic foam film.



(a) Length of impactor: 100 mm



(b) Length of impactor: 200 mm

Fig. 4.12 Maximum value of impact load with laminated film.

4.5.2 プラトー領域

次に、発泡フィルムの吸収エネルギーの大部分を消費するプラトー領域について考察する。図 4.13 に示すようにプラトー変位量およびプラトー荷重を定義する。プラトー変位量は弾性変形後に荷重がほぼ一定となっている領域とし、プラトー荷重はプラトー変形領域の最後の荷重と定義した。プラトー領域を明確に確認することが可能であった厚さ 300 μm 以上のアクリル樹脂発泡フィルムについて考察を行った。

図 4.14 には、衝突棒の長さが 100 mm におけるプラトー荷重およびフィルムが貫通しないときの最大荷重を示す。フィルムが貫通しない最大荷重は、図 4.11(a) において、それぞれのアクリル樹脂発泡フィルムが貫通しなかった衝突速度におけるフィルムなしの衝撃荷重の最大値とした。図 4.14 から、荷重 14.3kN 以下であれば、厚さ 300 μm のアクリル樹脂発泡フィルムを用いることで、貫通することなく、衝撃荷重を約 5kN 程度まで減少させることができる。フィルムが貫通しない衝撃であれば、荷重をプラトー荷重である約 5 kN に減少できることがわかった。また、フィルムが厚くなるほど、より大きな衝撃にフィルムが貫通することなく耐えることができることが明らかとなった。プラトー荷重はフィルムの厚さが薄くなるほど、上昇する傾向にあることがわかった。

図 4.15 には、プラトー変形量について示す。プラトー変形量はフィルム厚さに比例して増加していることがわかる。図 4.9 に示したようにプラトー荷重は約 5 kN 程度で一定となるため、フィルムが厚くなりプラトー変形量が大きくなるほど、衝撃エネルギーを吸収することが可能であることがわかった。

4.6 結 言

本章では、厚さの異なるアクリル樹脂発泡フィルムに対して落錘衝撃圧縮試験を実施し、10 kN を超えるような大きな衝撃荷重が作用したときの衝撃荷重の変化およびフィルムの厚さによる影響について考察した。その結果、アクリル樹脂発泡フィルムの厚さが大きくなるほど、衝撃荷重の最大値を減少させ、荷重の負荷時間が長くなることがわかった。アクリル樹脂発泡フィルム貫通することなく、衝撃荷重をプラトー荷重約 5 kN 程度まで減少させることができる。また、プラトー変形量はフィルム厚さに比例して増加し、フィルムが厚くなるほど衝撃エネルギーを吸収することが可能であることがわかった。

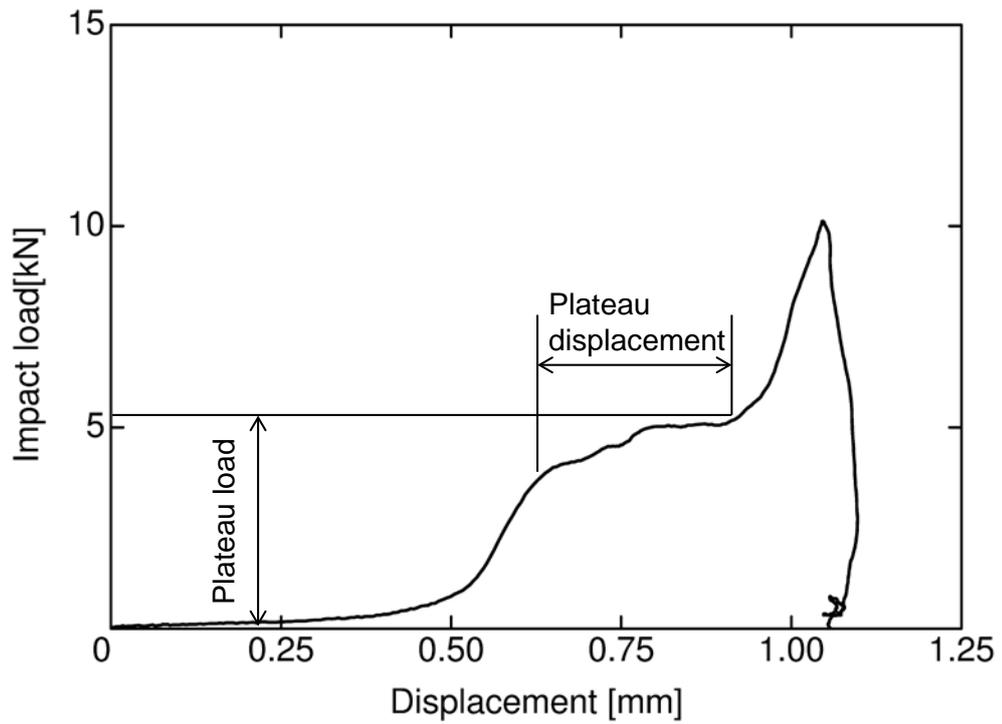


Fig. 4.13 Definition of Plateau load and Plateau displacement.

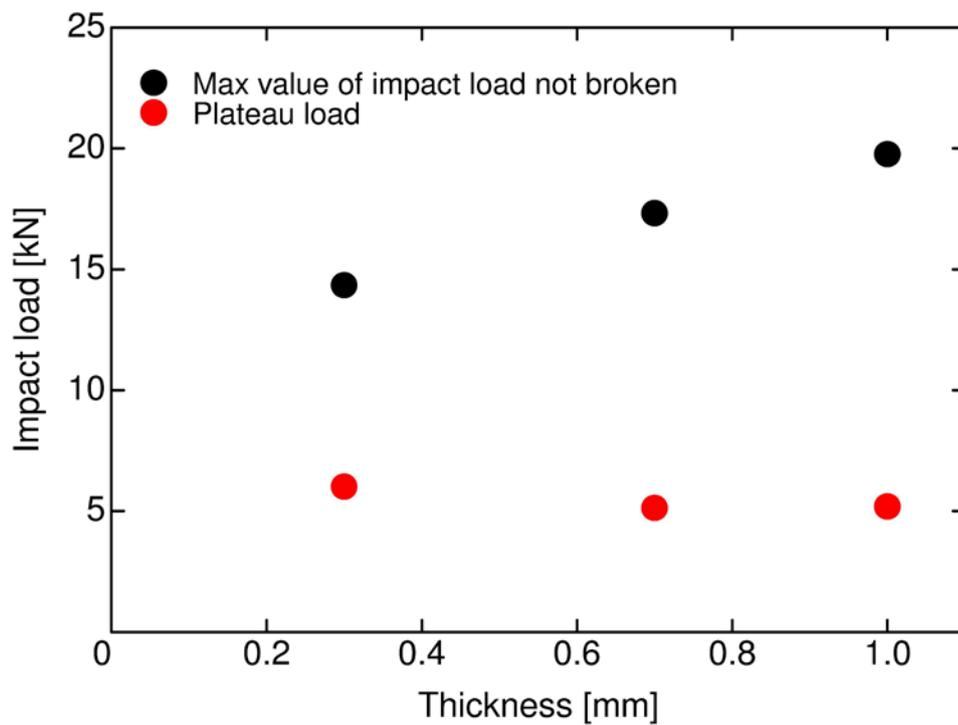


Fig. 4.14 Plateau load. Length of impactor: 100 mm

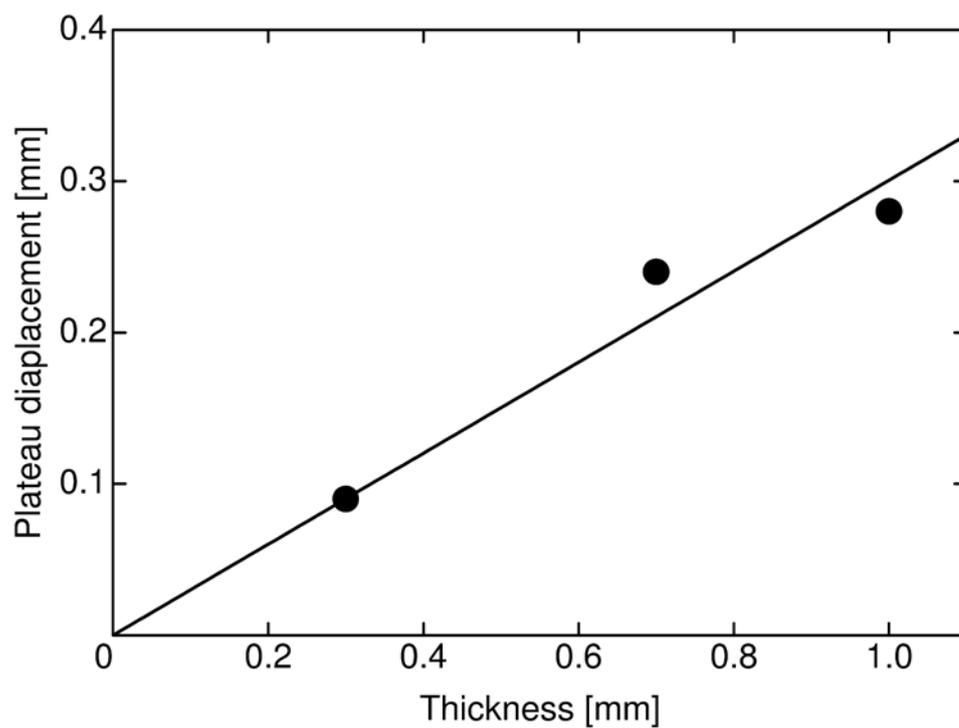


Fig. 4.15 Plateau displacement. Length of impactor: 100 mm

第 5 章

衝撃三点曲げ試験による

衝撃荷重低減の評価

5.1 緒 言

現在,自動車,航空機のような高速輸送機器やモバイル機器の落下衝撃など様々な分野において耐衝撃性の向上が要求されている.近年では,スマートフォンやタブレット形コンピュータなどのモバイル機器の普及が進んでおり,モバイル機器の外側に薄形ディスプレイを搭載されており,その耐衝撃性が求められている [47, 48].薄形ディスプレイの耐衝撃性を高めるために衝撃荷重を低減させ,衝撃エネルギーを吸収するために緩衝材として発泡材料が用いられており,発泡材料の力学的特性について明らかにされている [64].さらに,モバイル機器の小型化,軽量化等により,薄形ディスプレイの緩衝材として,発泡材料の薄膜化が求められており,これまで厚さ 1 mm 以下のフィルム状の発泡材料が使用されるようになってきている.機器の衝撃破損を防止し,緩衝材の薄形化に対応する目的で定量的な評価が行われ,第2章から第4章では,アクリル樹脂発泡フィルムの衝撃荷重の低減効果について明らかにされている.また,ポリエチレンを発泡させたフィルムの衝撃試験も行われており,圧縮特性について明らかにされている [60].

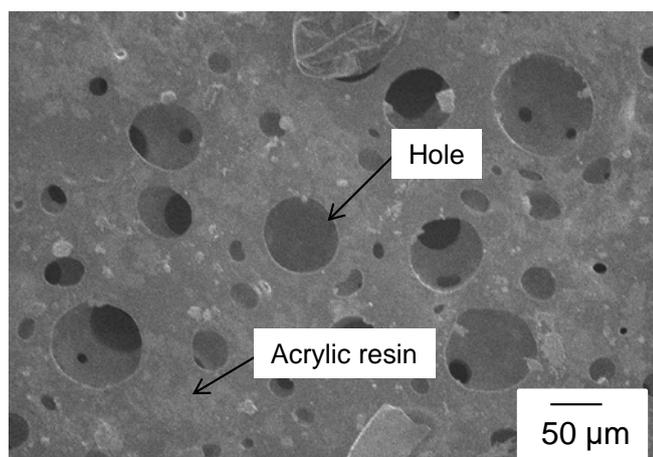
しかし,これらの研究では,機器の剛性が高い場合を想定し,試験を実施し,考察を行っているが,機器によっては剛性が低く,衝撃により構造が曲げ変形を生じることが考えられ,曲げ変形に対する衝撃荷重の低減効果について明らかにする必要がある.バルク材としてのアルミニウムやポリウレタンなどを材質とした発泡材料の動的三点曲げ試験が行われており,発泡材料の動的曲げ変形特性について数多くの研究がなされている [39 - 46].また,厚さ 1 mm 以下のダイヤモンド薄板 [57] や厚さ 3 mm 程度のポリカーボネートの三点曲げ試験が実施されている [58].しかし,動的三点曲げ試験を用いて,曲げ変形する構造物に発泡フィルムを付着させることによる衝撃荷重の低減効果について明らかにされていないのが現状である.

本章では,薄い発泡フィルムの曲げ変形における衝撃荷重の低減効果を明らかにするために衝撃三点曲げ試験を行った.試料として厚さ 1 mm 以下の薄いアクリル樹脂発泡フィルムを使用し,構造物を厚さの異なるアルミニウム合金はりとし,アクリル樹脂発泡フィルムによる衝撃荷重の低減効果について検討した.

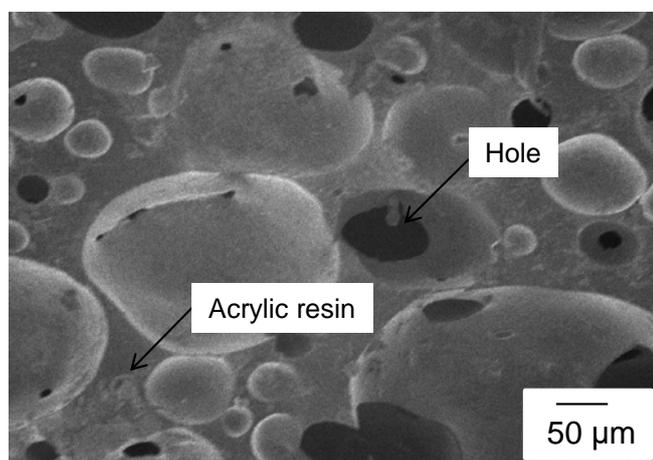
5.2 試験片

本研究では,曲げ変形を生じる機器に作用する衝撃荷重に及ぼすアクリル樹脂発泡フィルムによる低減効果を明らかにするために,アクリル樹脂発泡フィルムを表面に付着したアルミニウム合金はりを試験片として使用した.

厚さ $38\ \mu\text{m}$ のポリエチレンテレフタレート (PET) を基材として、その上に発泡したアクリル樹脂が生成された密度 $0.5\ \text{mg}/\text{mm}^3$ および厚さ $700\ \mu\text{m}$ のアクリル樹脂発泡フィルム (ISR-ACF, Iwatani) を試料として使用した。図 5.1 に、アクリル樹脂発泡フィルムの表面および横断面を走査型電子顕微鏡 (VE-8800, KEYENCE) にて観察を行った結果を示す。フィルム表面には穴があり、フィルム内部にはサイズの異なる気泡が存在していることが確認できる。



(a) Surface



(b) Cross-section

Fig. 5.1 Cell structures of acrylic foam films.

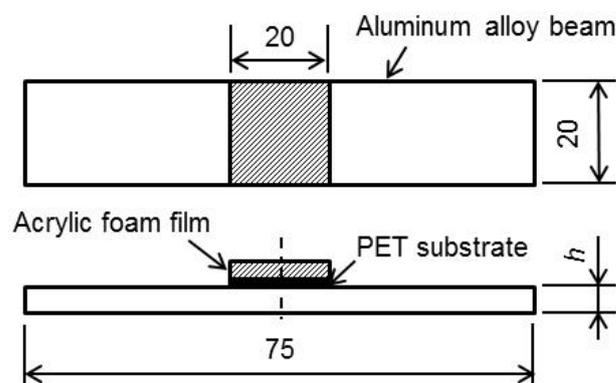


Fig. 5.2 Shape specimen. Unit: mm. $h = 3, 6, 10$ mm.

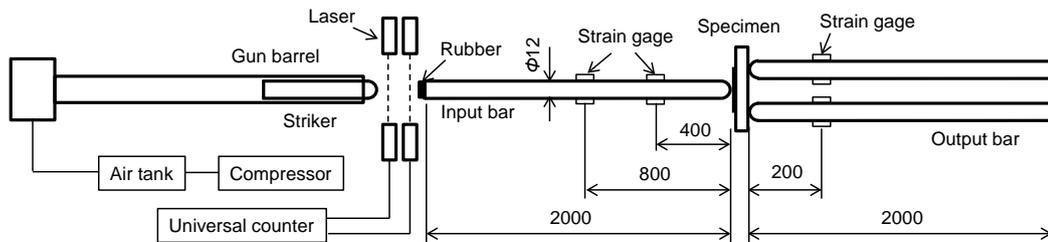
アルミニウム合金はり (JIS A6063) は、長さ 75 mm、幅 20 mm であり、剛性を変化させるために厚さを 3, 6, 10mm の 3 種類とした。図 5.2 に示すように、アルミニウム合金はり表面の中央付近に 1 辺 20 mm のアクリル樹脂発泡フィルムを PET 基板がアルミニウム合金側になるように付着させて試験片とした。また、比較のためにアクリル樹脂発泡フィルムを付着させないアルミニウム合金はりも試験片として用意した。

5.3 衝撃三点曲げ試験

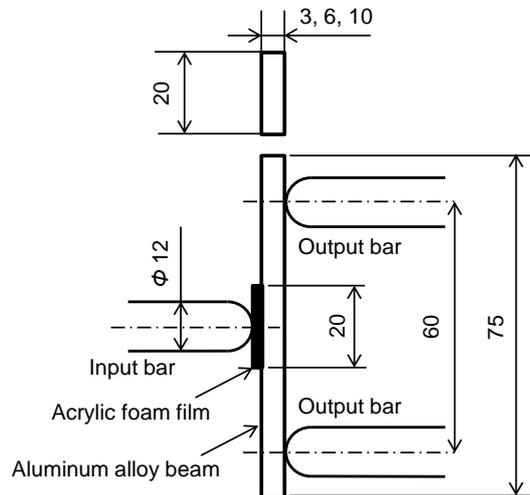
5.3.1 衝撃三点曲げ試験機

曲げ変形を生じる構造物に対するアクリル樹脂発泡フィルムの衝撃力低減効果を明らかにするために、スプリットホプキンソン棒式の衝撃三点曲げ試験を行った。実験に使用した衝撃三点曲げ試験機の概要を図 5.3 に示す。図 5.3 (a) および (b) には、試験機の全体図および試験片支持部の詳細図を示す。試験機は長さ 2 m、直径 12 mm のアルミニウム合金 (JIS A7075-T6) 製の一つの入力棒、二つの出力棒から構成される。打ち出し棒は直径 12 mm、長さ 200 mm のポリカーボネート丸棒を使用した。打ち出し棒は衝突する面を曲率半径約 20 mm の球面状に加工することで片当たりを防いだ。また、入力棒に厚さ 9.5 mm のゴムを付着させることで、滑らかな立ち上がりの入射パルスを得ることとした。コンプレッサーで圧縮された空気をエアタンクに貯蔵し、この圧縮空気を電磁バルブで解放することで打ち出し棒を発射させ、入力棒へ衝突させ、衝撃荷重を試験片に加えた。試験片の支持点距離を 60 mm とした。一定区間に配置された二つのレーザーを打ち出し棒が遮る時間間隔をユニバーサルカウンタで読み取り、打ち出し棒の衝突速度を求めた。

本試験機により求められる試験片に作用する衝撃荷重および支持反力の測定方法は次の通りである。入力棒には試験片の左端から 400 mm および 800 mm の位置に、出力棒には試験片右端から 200 mm の位置に設置された半導体ひずみゲージ (KSP-2-120-E4, 共和電業) により、ひずみを測定した。なお、図 5.3 (a) のように棒の中心軸を挟んで対面するように二枚のひずみゲージを取り付け、対辺 2 アクティブゲージ法によりブリッジ回路に接続することで、曲げひずみを消去し、軸方向の垂直ひずみを測定した。ひずみゲージが接続されたブリッジボックスを介して、動ひずみ計 (AS2101, NEC 三栄株式会社) に接続し、データロガー (8835, HIOKI) によりひずみの時間変化を 1 μs 間隔で測定した。入力棒で測定される二か所のひずみの時間変化から試験片に作用する衝撃荷重を求めた。また、出力棒で測定されるひずみの時間変化から、試験片の支点反力を次節で導出される式により求めた。



(a) Overall view of testing machine.



(b) Detail near specimen.

Fig. 5.3 Dynamic bending testing machine. Unit: mm.

5.3.2 衝撃荷重の算出 [64]

入力棒の右端から 400 mm および 800 mm の位置のひずみの時間変化 $\varepsilon_1(t)$ および $\varepsilon_2(t)$ から試験片に作用する衝撃荷重 $F(t)$ を得るための導出式を求める．解析モデルを図 5.4 に示す．入力棒右端から距離 L_1 および $2L_1$ の位置でひずみの時間変化 $\varepsilon_1(t), \varepsilon_2(t)$ を測定したとすると，境界条件は次式のようになる．

$$\begin{aligned} x = L_1 \text{ において } \frac{\partial u_1}{\partial x} &= \varepsilon_1(t) \\ x = 2L_1 \text{ において } \frac{\partial u_1}{\partial x} &= \varepsilon_2(t) \end{aligned} \quad (5.1)$$

ここで， u_1 は入力棒の軸方向変位であり， x および t は入力棒右端を原点とする軸方向座標および時間である．

衝撃を受ける前には入力棒は静止していることから，初期条件は次式となる．

$$t = 0 \text{ のとき } u_1 = 0, \quad \frac{\partial u_1}{\partial t} = 0 \quad (5.2)$$

入力棒の変形は一次元動弾性方程式に従うものとし，次式のように表される．

$$\frac{\partial^2 u_1}{\partial x^2} = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 u_1}{\partial t^2} \quad (5.3)$$

ここで， c は，入力棒内の縦波速度であり，次式として与えられる．

$$c = \sqrt{E/\rho} \quad (5.4)$$

なお， E および ρ は入力棒の縦弾性係数および密度である．

式 (5.1) の境界条件および式 (5.2) の初期条件の下で式 (5.3) を解くと，衝撃荷重 $F(t)$ は A を入力棒の断面積とすれば，次式のように二つのひずみの時間変化より求められることとなる．

$$F(t) = -AE \left\{ \varepsilon_1 \left(t - \frac{L_1}{c} \right) + \varepsilon_1 \left(t + \frac{L_1}{c} \right) - \varepsilon_2(t) \right\} \quad (5.5)$$

出力棒の左端から 200 mm の位置のひずみの時間変化 $\varepsilon_3(t)$ から試験片に作用する支点反力 $R(t)$ を得るための導出式を求める．出力棒の右端が自由であることを考慮すると，出力棒の境界条件は次のようになる．

$$\begin{aligned} y = L_2 \text{ において } \frac{\partial u_2}{\partial y} &= \varepsilon_3(t) \\ y = L \text{ において } \sigma &= 0 \end{aligned} \quad (5.6)$$

ここで、 u_2 および σ は出力棒の軸方向変位および応力であり、 y は図5.4のように左端を原点とする出力棒の軸方向座標である。

入力棒のときと同様に出力棒の初期条件および出力棒の一次元動弾性方程式は、式(5.2)および式(5.3)で表される。式(5.6)の境界条件および式(5.2)と同様の初期条件の下で、 x を y と置き換えた式(5.3)を解くと、支点反力の時間変化 $R(t)$ は、次式のように求めることができる。

$$R(t) = -AE \left[\varepsilon_3 \left(t + \frac{L_2}{c} \right) + \sum_{n=1}^{\infty} \left\{ \varepsilon_3 \left(t + \frac{2nL + L_2}{c} \right) - \varepsilon_3 \left(t + \frac{2nL - L_2}{c} \right) \right\} \right], \quad n = 1, 2, 3, \dots \quad (5.7)$$

ここで

$$t < 0 \text{ のとき } \varepsilon_3(t) = 0 \quad (5.8)$$

とする。

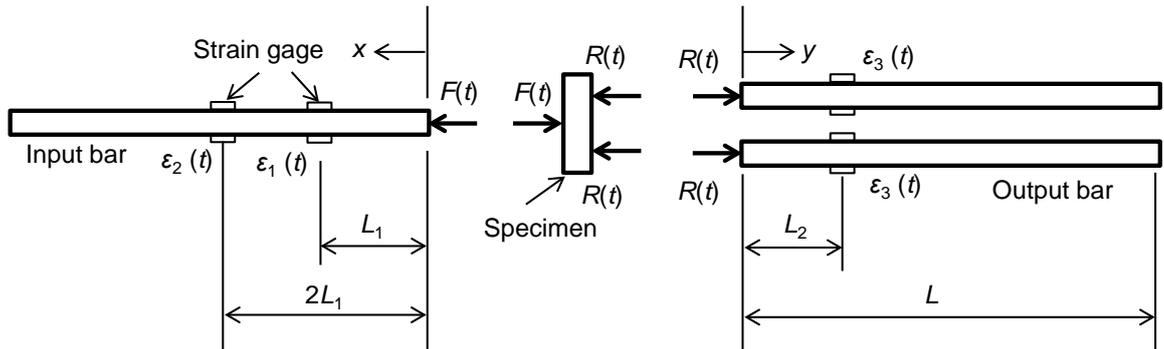


Fig. 5.4 Analytical model.

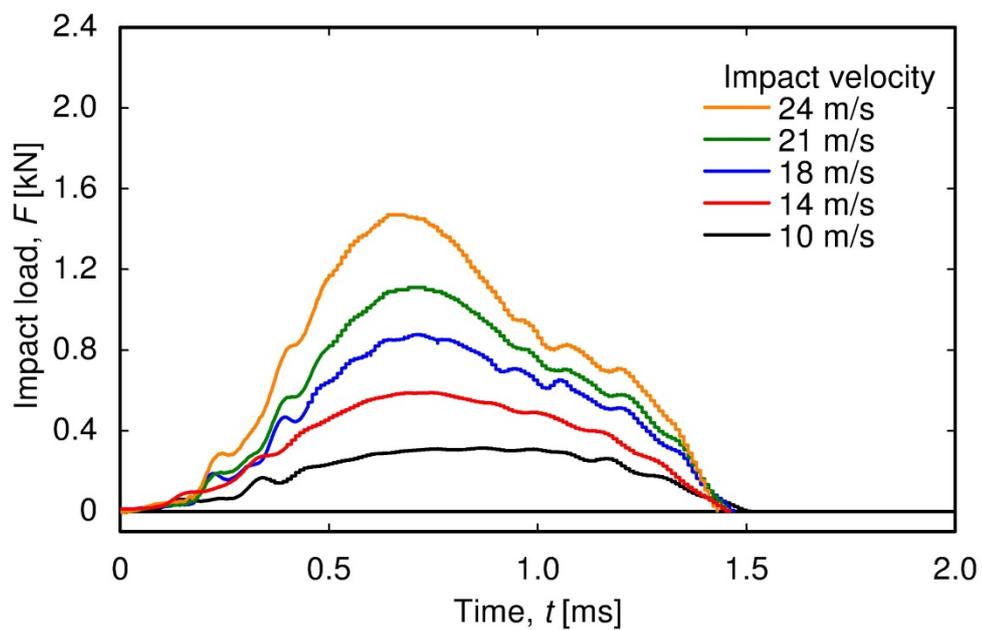
5.4 試験結果

アクリル樹脂発泡フィルムを付着させない、厚さ 6 および 10 mm のアルミニウム合金のはりの試験片に対して、異なる衝突速度で打ち出し棒を入力棒に衝突させたときの衝撃荷重の時間履歴を図 5.5 に示す。打ち出し棒の衝突速度が速くなると荷重の時間変化は変わらないが、荷重が増加し、アルミニウム合金のはりが厚くなると、試験片の曲げ剛性が大きくなり衝撃荷重が大きくなることがわかる。

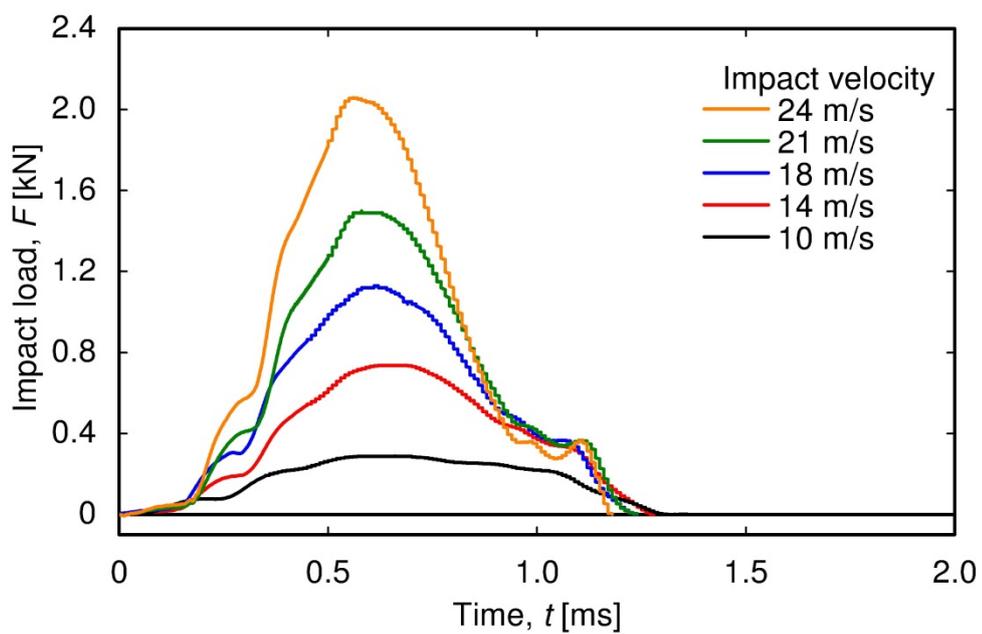
厚さ 6 および 10 mm のアルミニウム合金のはりの衝撃面側にアクリル樹脂発泡フィルムを付着させた試験片に対して、異なる衝突速度で打ち出し棒を入力棒に衝突させたときの衝撃荷重の時間履歴を図 5.6 に示す。アクリル樹脂発泡フィルムを付着させた試験片では、衝突速度の上昇または、はりの厚さが厚いほど、荷重は増加する傾向にあるが、図 5.5 の結果と異なり、衝突速度が速くなると、二つの荷重の極値が明確となり、荷重の時間変化が変わることが明らかとなった。

次に、アクリル樹脂発泡フィルムの付着によるはりの曲げ剛性への影響について検討した。厚さ 10 mm のアルミニウム合金のはりに衝撃面の反対側、すなわち出力棒側にアクリル樹脂発泡フィルムを付着させたときのはりの衝撃荷重を図 5.7 に示す。アクリル樹脂発泡フィルムのないアルミニウム合金のはりの場合の荷重履歴と出力棒側に発泡フィルムを付着させた場合の荷重履歴は、ほぼ一致していることがわかる。いずれの試験片の場合とも、入力棒とアルミニウム合金はりが直接、接触していることから、アクリル樹脂発泡フィルムを接着しても、はりの曲げ剛性には、ほとんど影響を及ぼさず、衝撃荷重の時間変化には差がなかったものと考えられる。したがって、アクリル樹脂発泡フィルムは、入力棒とアルミニウム合金はりとの接触状態に影響を与え、衝撃荷重を変化させることが明らかとなった。

厚さ 3 および 10 mm のアルミニウム合金のはりの衝撃面側にアクリル樹脂発泡フィルムを付着させた場合、付着させなかった場合の衝撃荷重の比較を図 5.8 および 5.9 に示す。それぞれの図 (a) および (b) に、衝突速度 10 および 24 m/s のときの結果を示す。アクリル樹脂発泡フィルムをはりに付着させることで、荷重が緩やかに上昇し、最大荷重が減少することが確認できる。厚さ 3 mm のはりの場合、アクリル樹脂発泡フィルムを付着させることで、衝突速度 10 m/s では 90 %、衝突速度 24 m/s では 85 % 程度の値に減少している。厚さ 10 mm のはりの場合では、衝突速度 10 m/s では 85 %、衝突速度 24 m/s では 80 % 程度の値まで減少することが明らかとなった。また、荷重負荷時間はフィルムがない場合に比べ、1.1 倍程度長くなることがわかった。したがって、はりの曲げ剛性が高いほど、より大きな衝撃荷重の低減効果があることがわかった。

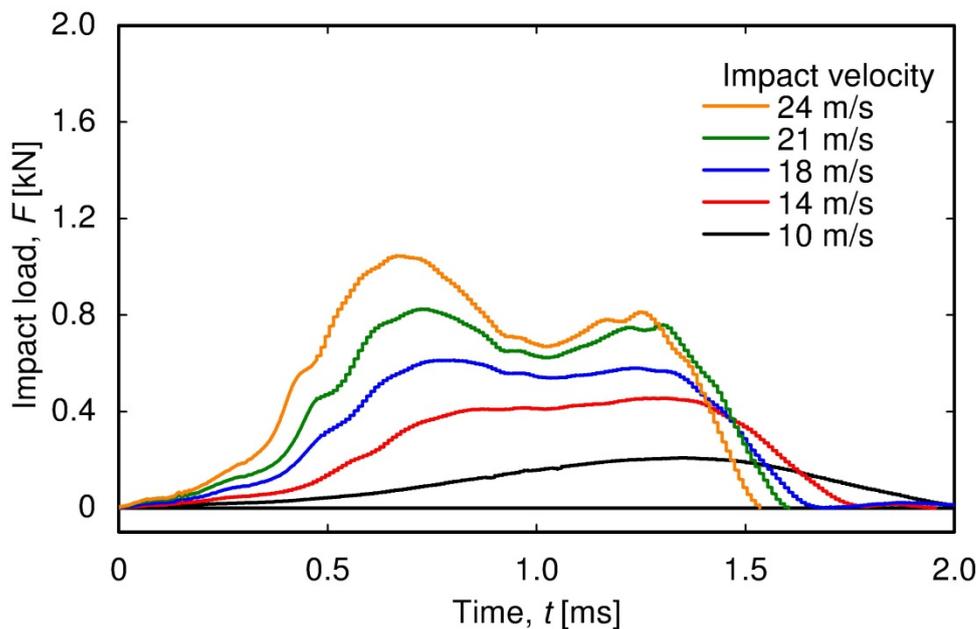


(a) Beam thickness: 6 mm.

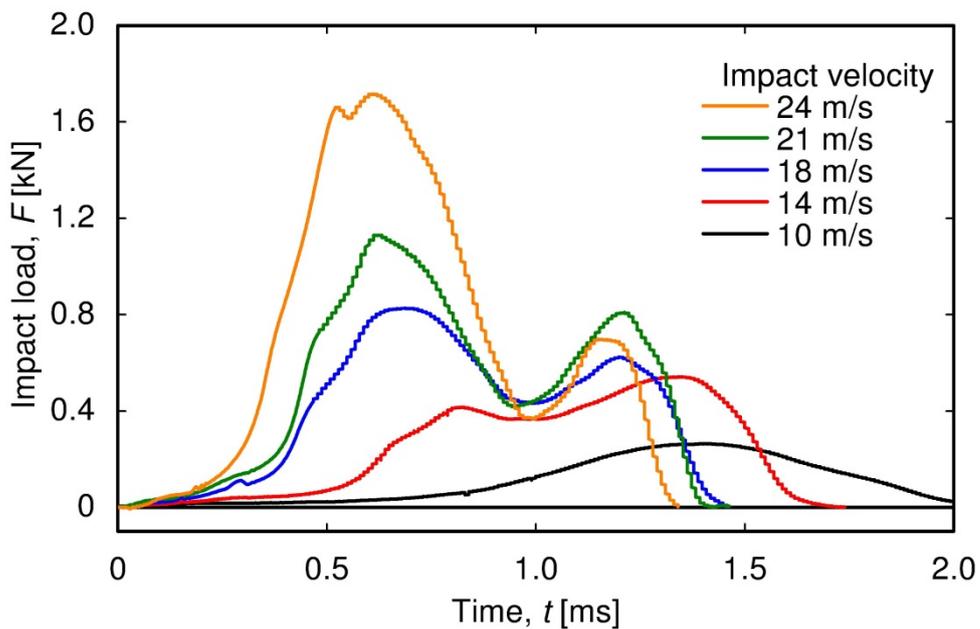


(b) Beam thickness: 10 mm.

Fig. 5.5 Impact load histories of force. Aluminum alloy beam without film.



(a) Beam thickness: 6 mm.



(b) Beam thickness: 10 mm.

Fig. 5.6 Impact load histories of force. Aluminum alloy beam with acrylic foam film.

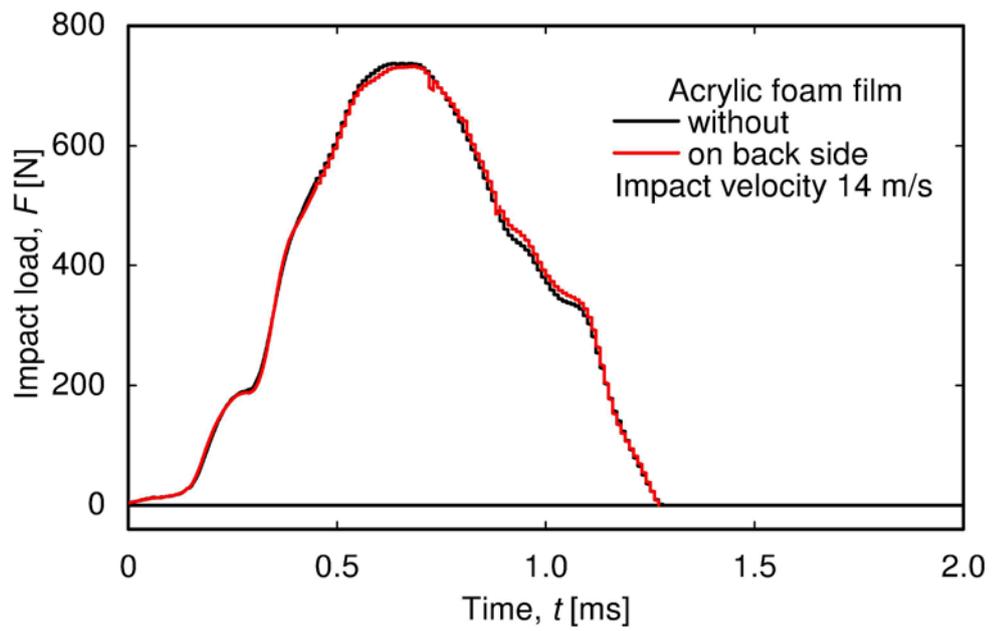
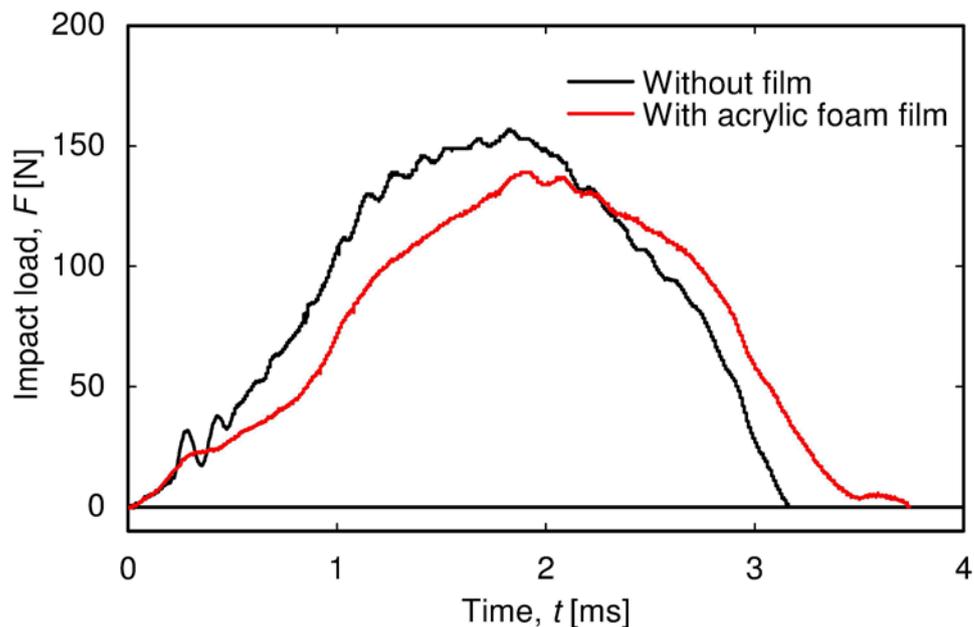
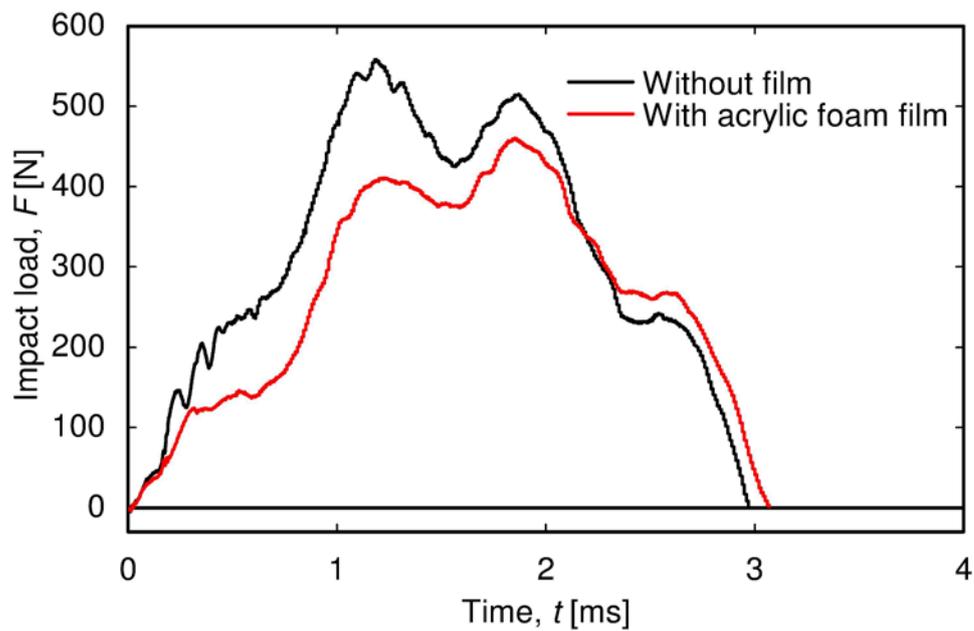


Fig. 5.7 Effect of acrylic foam film on beam stiffness. Aluminum thickness 10 mm.

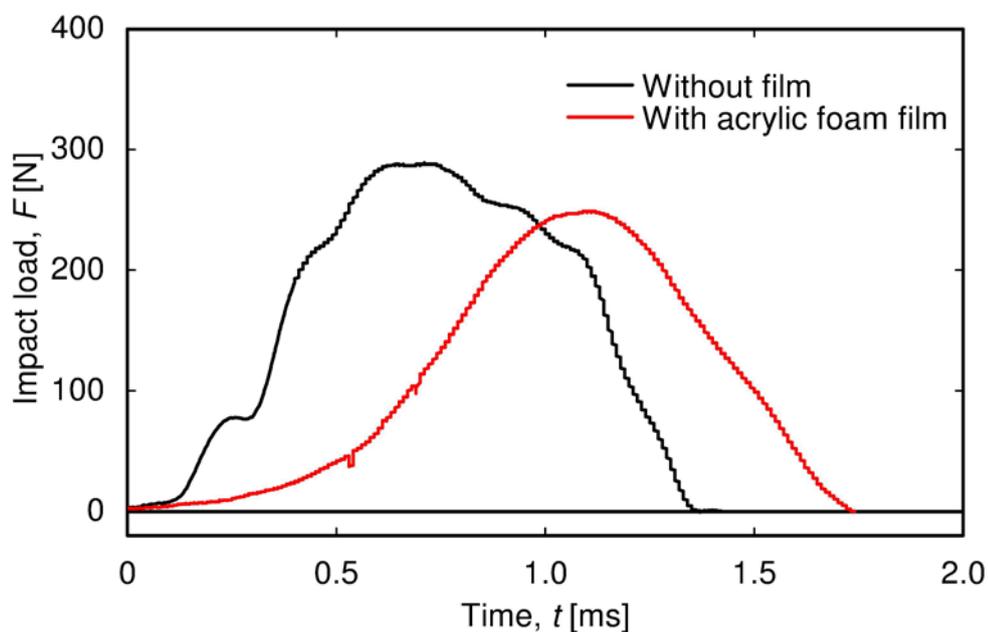


(a) Impact velocity 10 m/s.

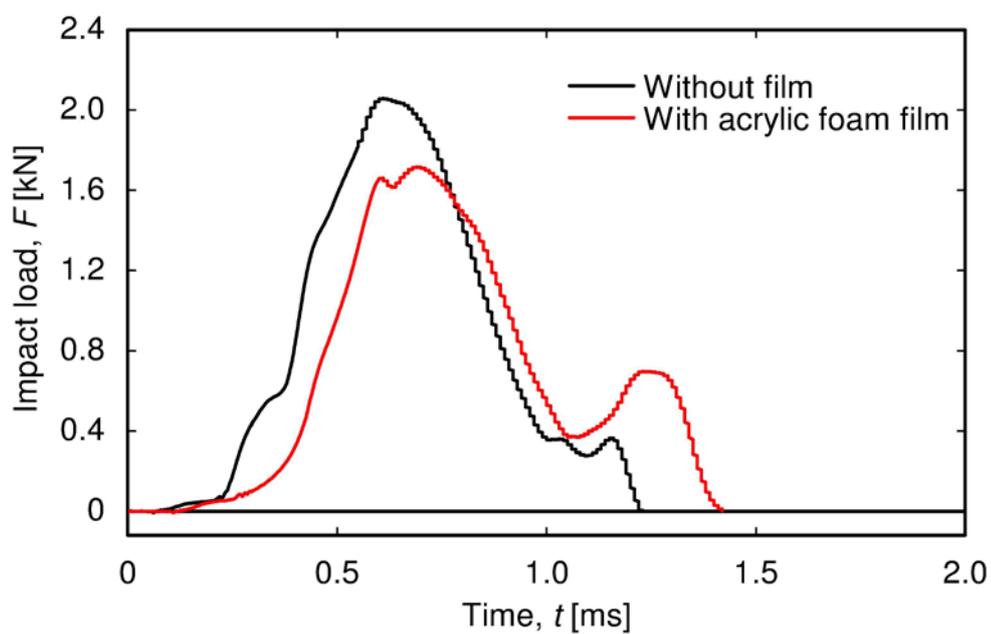


(b) Impact velocity 24 m/s.

Fig. 5.8 Effect of acrylic foam film on impact load history. Aluminum beam thickness: 3 mm.



(a) Impact velocity 10 m/s.



(b) Impact velocity 24 m/s.

Fig. 5.9 Effect of acrylic foam film on impact load history. Aluminum beam thickness: 10 mm.

5.5 考 察

打ち出し棒の衝突速度と最大荷重の関係を図 5.10 に示す。図中の中塗の記号はアクリル樹脂発泡フィルムを付着させなかった試験片，中空の記号は付着させた試験片の結果を表す。アルミニウム合金はりの厚さおよび打ち出し棒の衝突速度に係わらず，アクリル樹脂発泡フィルムを付着させることで最大荷重は減少することが確認される。厚さ 3 mm のはりの場合，最大荷重はアルミニウム合金はりのみの場合に比較して，90%程度の値に減少することがわかった。また，アルミニウム合金はりの厚さが 6, 10 mm の場合では，アルミニウム合金はりのみの場合に比べ 70~80%程度の値に減少することがわかった。したがって，アクリル樹脂発泡フィルムは，構造物の剛性が高く入力棒と試験片との接触による局所的な変形が支配的となる場合，効果的に衝撃荷重を減少させることができるといえる。

衝突速度と荷重の負荷時間の関係を図 5.11 に示す。厚さ 3 mm のアルミニウム合金はりの場合の荷重の負荷時間が最も長くなっていることが確認できる。また，アクリル樹脂発泡フィルムを付着させない場合，衝突速度に係わらず荷重の負荷時間はほぼ一定となっているが，アクリル樹脂発泡フィルムを付着させた場合では，衝突速度の上昇に伴い緩やかに短くなっており，衝突速度が 24 m/s ではフィルムがない場合の荷重の負荷時間の程度まで短くなっていることがわかる。

これらの結果より，アクリル樹脂発泡フィルムがない場合は，衝突速度が速くなっても荷重の時間変化は変わらずに最大値が高くなることがわかる。これに対して，アクリル樹脂発泡フィルムを付着させる場合では，衝突速度が速くなるにつれ，衝撃荷重の最大値だけではなく，時間変化にも大きく影響する。特に，低速度の衝突速度では入力棒との接触部のアクリル樹脂発泡フィルムの局部変形が変わり，衝撃荷重が変化するものと考えられる。また，アクリル樹脂発泡フィルムは，構造物の曲げ剛性が高い場合，接触部の局所的な変形が大きく影響し，衝撃荷重を低減させることが明らかとなった。

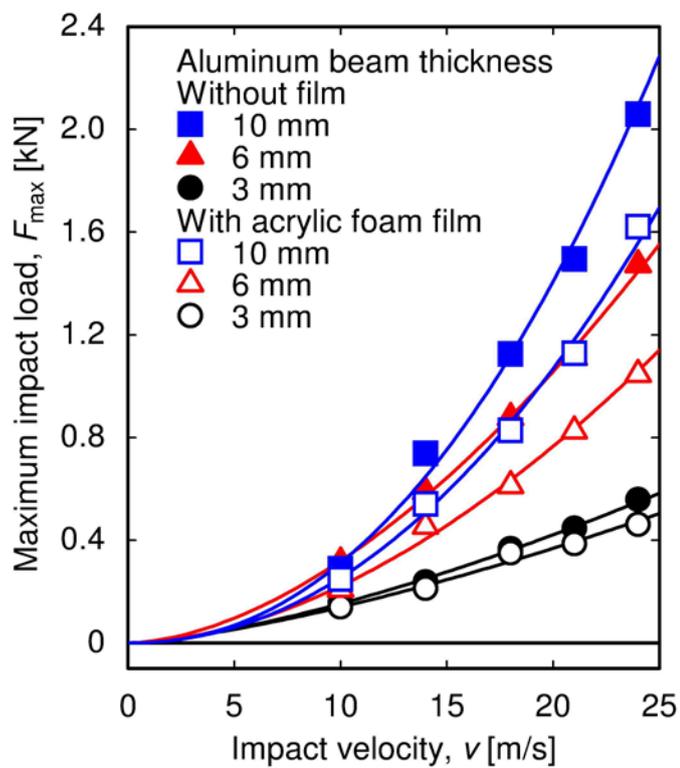


Fig. 5.10 Maximum impact load.

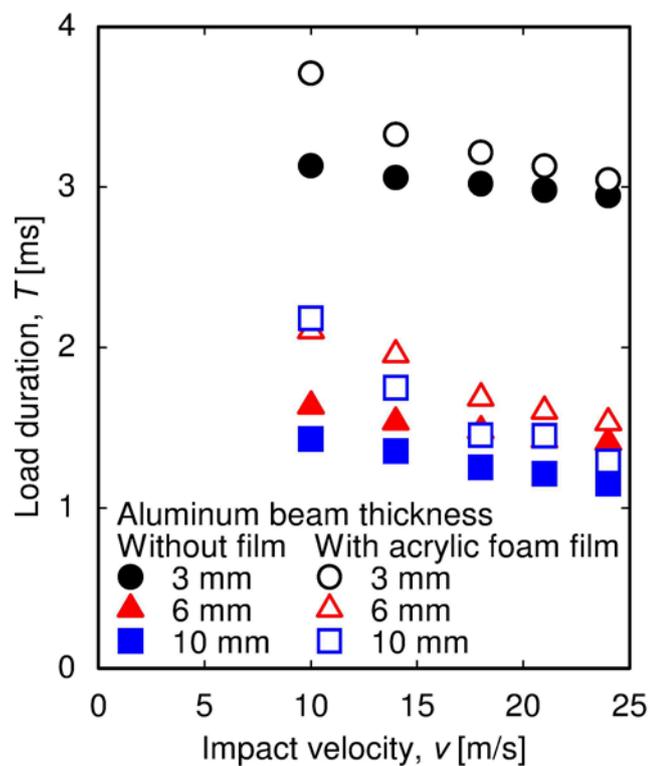


Fig. 5.11 Load duration.

5.6 結 言

本章では、衝撃三点曲げ試験を実施し、厚さ 1 mm 以下の薄いアクリル樹脂発泡フィルムの曲げ変形における衝撃荷重の低減効果について検討した。その結果、アクリル樹脂発泡フィルムがない場合は、衝突速度が速くなっても荷重の時間変化は変わらずに最大値が大きくなる。これに対して、アクリル樹脂発泡フィルムを付着させる場合では、衝突速度が速くなるにつれ、衝撃荷重の最大値だけでなく、時間変化にも大きく影響することが明らかとなった。さらに、アクリル樹脂発泡フィルムは、構造物の曲げ剛性が高い場合、接触部の局所的な変形が大きく影響し、衝撃荷重を低減させることが明らかとなった。

第 6 章

結 論

6.1 本論文の総括

本研究では、アクリル樹脂発泡フィルムを試験片とし、発泡フィルムの衝撃低減効果を評価する簡便な試験方法を提案するとともに、それらの衝撃試験方法の妥当性について検討した。さらに、測定される結果に基づいて、アクリル樹脂発泡フィルムの動的変形特性について明らかにし、フィルムの厚さと衝撃荷重の低減効果およびエネルギー吸収特性との関係について明らかにした。最終的にアクリル樹脂発泡フィルムの緩衝材としての効果について検討し、フィルムの選択指針について考察した。以下に各章における成果を示す。

第2章「SHPB法試験によるアクリル樹脂発泡フィルムの動的変形挙動」では、SHPB法試験を行いアクリル樹脂発泡フィルムの動的圧縮挙動について実験的に明らかにした。はじめに、薄い発泡フィルムに対しても動的圧縮挙動を測定できることを明らかにした。また、応力-変位線図からエネルギー吸収量を測定した。その結果、単位体積当たりのエネルギー吸収量は、密度に対して線形方程式で表されることが明らかとなった。アクリル樹脂発泡フィルムのエネルギー吸収特性は密度を制御することによって設計することが可能である。

第3章「落球試験によるアクリル樹脂発泡フィルムの衝撃吸収特性の評価」では、薄いフィルムに対する衝撃荷重の測定方法について検討し、簡便な落球試験を実施し、衝撃荷重および衝撃エネルギー吸収への厚さ1 mm以下のアクリル樹脂発泡フィルムの効果について実験的に考察した。また、高剛性の構造物に対して物体が衝突した際の衝撃を低減させるためのフィルム厚さの影響を明らかにした。その結果、アクリル樹脂発泡フィルムの荷重最大値が、フィルム厚さに対して10を底とした指数関数的に急激に減少し、荷重負荷時間がフィルム厚さに対して線形的に増加することが明らかとなった。特に、アクリル樹脂発泡フィルムが厚く、密度が高くなるほど衝撃荷重の最大値を低減させ、荷重負荷時間を長くする効果が大きいことがわかった。さらに、厚さ200 μm の非常に薄いアクリル樹脂発泡フィルムでもほぼ落球の衝撃エネルギーを吸収していることがわかった。

第4章「落錘試験によるアクリル樹脂発泡フィルムの衝撃吸収特性の評価」では、厚さの異なるアクリル樹脂発泡フィルムに対して落錘衝撃圧縮試験を実施し、10 kNを超えるような大きな衝撃荷重が作用したときの衝撃荷重の変化およびフィルムの厚さによる影響について考察した。その結果、アクリル樹脂発泡フィルムの厚さが大きくなるほど、衝撃荷重の最大値を減少させ、荷重の負荷時間が長くなることがわかった。アクリル樹脂発泡フィルム貫通することなく、衝撃荷重を約5kN程度まで減少させることができる。また、プラトー荷重はフィルムの厚さに係わらず約5kN程度になることがわかった。また、プラトー変形量はフィルム厚さに比例して増加し、フィルムが厚くなるほど衝撃エネルギーを吸収することが可能であることがわかった。

第5章「曲げ変形挙動に対するアクリル樹脂発泡フィルムの衝撃荷重の低減効果」では、衝撃三点曲げ試験を実施し、厚さ1 mm以下の薄いアクリル樹脂発泡フィルムの曲げ変形における衝撃荷重の低減効果について検討した。その結果、アクリル樹脂発泡フィルムがない場合は、衝突速度が速くなっても荷重の時間変化は変わらずに最大値が大きくなる。これに対して、アクリル樹脂発泡フィルムを付着させる場合では、衝突速度が速くなるにつれ、衝撃荷重の最大値だけではなく、時間変化にも大きく影響することが明らかとなった。さらに、アクリル樹脂発泡フィルムは、構造物の曲げ剛性が高い場合、接触部の局所的な変形が大きく影響し、衝撃荷重を低減させることが明らかとなった。

以上のように、本研究では、材料選定のための簡易的な試験方法として、落球試験、落錘試験および衝撃三点曲げ試験を実施し、アクリル樹脂発泡フィルムの衝撃緩和効果について明らかにした。その結果、フィルムが厚くなるほど、衝撃荷重を低減させ、衝撃エネルギー吸収特性が高くなることを明らかにし、アクリル樹脂発泡フィルムは、非常に高い衝撃緩和効果を有していることを明らかにした。

6.2 今後の課題および展望

本研究では、衝撃試験を行い、アクリル樹脂発泡フィルムの厚さと衝撃荷重の低減効果およびエネルギー吸収特性との関係について明らかにした。現在、アクリル樹脂発泡フィルムはモバイル機器の耐衝撃性を高める手法の一つとして使用されている。そこで、ガラスや有機ELに対するアクリル樹脂発泡フィルムの損傷防止効果について検討し、実際の機器に対する有効性について明らかにする必要がある。また、一般的な構造物に作用する衝撃荷重を低減させるフィルムの力学モデルを構築し、理論解析を実施し、構築したフィルムの力学モデルの検証を行うことで、アクリル樹脂発泡フィルムの衝撃エネルギー吸収機構についても明らかにし、さらなる衝撃緩和効果について向上させることができると考えている。

さらに、アクリル樹脂発泡フィルムを発展させるために、緩衝材だけではなく、他の用途にも広げられる可能性がある。発泡材料は、断熱材料としても利用されていることから、アクリル樹脂発泡フィルムの熱的特性について明らかにすることで、耐衝撃性に優れた断熱材を設計できる可能性がある。また、接着剤として利用されているアクリルを発泡材料にすることで、応力集中を分散させ、接着面の端に生じる特異応力が生じないような接着剤を生成が可能である。そこで、実験および解析によってアクリル樹脂発泡フィルムの接着強度やおよび特異応力場について明らかにする必要がある。

参考文献

- [1] 独立行政法人 自動車事故対策機構. 車の安全性能ガイド BOOK, 2014, pp.124.
- [2] Gibson, L. J. and Ashby, M. F., セル構造体—多孔質材料の活用のために—, 内田老鶴圃, (1993).
- [3] Seitzberger, M., Rammerstorfer, F. G., Degiseher, H. P. and Gradingner, R., Crushing of axially compressed steel tubes filled with aluminum foam, *Acta Mechanica*, Vol. 125 (1997), pp.93-105.
- [4] Santosa, S. and Wierzbicki, T., Crash behavior of box columns Filled with aluminum honeycomb or foam, *Computers and Structures*, Vol. 68 (1998), pp.343-367.
- [5] Bouix, R., Viot, P. and Lataillde, J.L., Polypropylene foam behavior under dynamic loadings: Strain rate, density and microstructure effects, *International Journal of Impact Engineering*, Vol.36 (2009), pp.329-342.
- [6] Kolsky, H., An Investigation of the Mechanical Properties of Materials at Very High Rates of Loading, *Proc. Phys. Soc.*, B62 (1949), pp.676-700.
- [7] 小川欽也, スプリットホプキンソン棒法の最近の進歩, 実験力学, Vol.2 (2002), pp.89-96.
- [8] Chen, W. and Song, B., Split Hopkinson (Kolsky) Bar: Design, Testing and Applications, *Springer Wien*, (2011), pp.1-35.
- [9] Casem, D.T., Fourney, W.L. and Chang, P., A Polymeric split hopkinson pressure bar Instrumented with Velocity Gages, *Experimental Mechanics*, Vol.43 (2003), pp.420-427.
- [10] Zhao, H., Abdennadher, S., and Othman, R., An experimental study of square tube crashing under impact loading using a modified large scale SHPB, *International Journal of Impact Engineering*, Vol.32 (2006), pp.1174–1189.
- [11] Yokoyama, T., and Kishida, K., A Novel Impact Three-point Bend Test Method for Determining Dynamic Fracture-initiation Toughness, *Experimental Mechanics*, Vol.29 (1989), pp.188-194.
- [12] Chan, W., Zhang, B., and Forrestal, M.J., A Split Hopkinson Bar Technique for Low-impedance Materials, *Experimental Mechanics*, Vol.39 (1998), pp.81-85.
- [13] Song, B., and Chen, W., Dynamic stress equilibration in split Hopkinson pressure bar tests on soft materials, *Experimental Mechanics*, Vol.44 (2004), pp.300-312.

- [14] Song, B., and Chen, W., Split Hopkinson pressure bar techniques for characterizing soft materials, *Latin American Journal of Solids and Structures*, Vol.2 (2005), pp.113-152.
- [15] Song, B., Chen, W., and Lu, W.Y., Mechanical characterization at intermediate strain rates for rate effects on an epoxy syntactic foam, *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol.49 (2007), pp.1336–1343.
- [16] Chen, W., Lu, F., Frew D.J., and Forrestal, M.J., Dynamic Compression Testing of Soft Materials, *Journal of Applied Mechanics*, Vol.69 (2002), pp.214-223.
- [17] Deshpande, V.S. and Fleck, N.A., High strain rate compressive behavior of aluminum alloy foams, *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 24 (2000), pp277-298.
- [18] Yi,F., Zhu, Z., Zu, F., Hu, S. and Yi, P., Strain rate effects on the compressive property and the energy-absorbing capacity of aluminum alloy foams, *Materials Characterization*, Vol. 47 (2001), pp.417-422.
- [19] Hall, I.W. and Guden, M., Split Hopkinson Pressure Bar compression testing of an aluminum alloy: Effect of lubricant type, *Journal of Materials Science Letters*, Vol. 22 (2003), pp.1533-1535.
- [20] Tan, P.J., Reid, S.R., Harrigan, J.J., Zou, Z. and Li, S., Dynamic compressive strength properties of aluminum foams. Part I - experimental data and observations, *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, Vol. 53 (2005), pp.2174-2205.
- [21] Cao, X.Q., Wang, Z.H., Ma, H.W., Zhao, L.M. and Yang, G.T., Effects of cell size on compressive properties of aluminum foam, *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, Vol.16 (2006), pp.351-356.
- [22] Cheng, H.-F., Huang, X.-M., Wang, Q., Tian, J. and Han, F.-S., Dynamic compressive behaviors of an open-cell aluminum foam, *Baozha Yu Chongji/Explosion and Shock Waves*, Vol. 26 (2006), pp.169-173.
- [23] Kang, Y.-A., Zhang, J.-Y. and Tan, J.-C., Compressive behavior of aluminum foams at low and high strain rates, *Journal of Central South University of Technology (English Edition)*, Vol. 14 (2007), pp.301-305.
- [24] Cady, C.M., Gray, G.T., Liu, C., Lovato, M.L. and Mukai, T., Compressive properties of a closed-cell aluminum foam as a function of strain rate and temperature, *Materials Science and Engineering Part A*, Vol. 525 (2009), pp.1-6.

- [25] Hamada, T., Kanahashi, H., Miyoshi, T. and Kanetake, N., Effects of the strain rate and alloying on the compression characteristics of closed cell aluminum foams, *Materials Transactions*, Vol. 50 (2009), pp.1418-1425.
- [26] Xie, R., Lu, Z., Chen, C., Zhang, F. and Zhao, Y., Measurement of dynamic compressive behavior of aluminum-alloy foams by polycarbonate SHPB system, *Hangkong Xuebao/Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, Vol. 30 (2009), pp.1435-1439.
- [27] Edwin Raj, R., Parameswaran, V. and Daniel, B.S.S., Comparison of quasi-static and dynamic compression behavior of closed-cell aluminum foam, *Materials Science and Engineering A*, Vol. 526 (2009), pp.11-15.
- [28] Peroni, M., Solomos, G. and Pizzinato, V., Impact behavior testing of aluminum foam, *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 53 (2013), pp.74-83.
- [29] Song, B., Chen, W.W., Dou, S., N.A. and Kang, J.H., Strain-rate effects on elastic and early cell-collapse responses of a polystyrene foam, *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 31 (2005), pp.509-521.
- [30] Ouellet, S., Cronin, D. and Worswick, M., Compressive response of polymeric foams under quasi-static medium and high strain rate conditions, *Polymer testing*, Vol. 25 (2006), pp.731-743.
- [31] Wang, Z.-L. and Zhu, B., Experimental study on impact compression and energy-absorbing property of expanded polystyrene foam, *Jianzhu Cailiao Xuebao/Journal of Building Materials*, Vol. 16 (2013), pp.630-636.
- [32] Hu, S.-S., Wang, W., Pan, Y., Zhou, J. and Li, Y.-H., Strain rate effect on the properties foam materials, *Baozha Yu Chongji/Explosion and Shock Waves*, Vol. 23 (2003), pp.13-18.
- [33] Woldesenbet, E., Gupta, N. and Jadhav, A., Effects of density and strain rate on properties of syntactic foams, *Journal of Materials Science*, Vol. 40 (2005), pp.4009-4017.
- [34] Tasdemirci, A., Turan, A.K. and Guden, M., The effect of strain rate on the mechanical behavior of Teflon foam, *Polymer Testing*, Vol. 31 (2012), pp.723-727.
- [35] Yuan, P., Ma, Q.-Y. and Zhang, H.-D., SHPB tests for light weight foam concrete, *Zhendong yu Chongji/Journal of Vibration and Shock*, Vol. 33 (2014), pp.116-119.
- [36] Di Landro, L., Sala, G. and Olivieri, D., Deformation mechanisms and energy absorption of polystyrene foams for protective helmets, *Polymer Testing*, Vol. 21 (2002), pp.217-228.

- [37] Yang, F., Ni, S., He, X. and He, D., Energy absorption behavior of closed-cell aluminium foam under drop mass impact tests, *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*, Vol. 7375 (2009), Article number 73756A.
- [38] Cho, J.U., Hong, S.J., Lee, S.K. and Cho, C., Impact fracture behavior at the material of aluminum foam, *Materials Science and Engineering A*, Vol. 539 (2012), pp.250-258.
- [39] Santosa, S., Banhart, J. and Wierzbicki, T., Bending crush resistance of partially foam-filled sections, *Advanced Engineering Materials*, Vol.2 (2000), pp.223-227.
- [40] Beck, T., Löhe, D. and Baumgärtner, F., The fatigue behavior of an aluminium foam sandwich beam under alternating bending, *Advanced Engineering Materials*, Vol.4 (2002), pp.787-790.
- [41] Kim, A., Cheon, S.S., Hasan, M.A. and Cho, S.S., Bending behavior of thin-walled cylindrical tube filled with aluminum alloy foam, *Key Engineering Materials*, Vol.270 (2004), pp.46–51.
- [42] Crupi, V. and Montanini, R., Aluminium foam sandwiches collapse modes under static and dynamic three-point bending, *International Journal of Impact Engineering*, Vol.34 (2007), pp.509–521.
- [43] Marsavina, L., Sadowski, T., Kneć, M. and Negru, R., Non-linear behaviour of foams under static and impact three point bending, *International Journal of Non-Linear Mechanics*, Vol.45 (2010), pp969–975.
- [44] Yu, J.L., Wang, E., Li, J. and Zheng, Z., Static and low-velocity impact behavior of sandwich beams with closed-cell aluminum-foam core in three-point bending, *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 35 (2008), pp.885-894.
- [45] Guo, L. and Yu, J., Dynamic bending response of double cylindrical tubes filled with aluminum foam, *International Journal of Impact Engineering*, Vol.38 (2011), pp.85–94.
- [46] Rathnaweera, G., Ruan, D., Nagaraj, V. and Durandet, Y., Dynamic three-point bending tests on aluminium foam filled steel tubes, *Tubular Structures XIV - Proceedings of the 14th International Symposium on Tubular Structures, ISTS 2012*, (2012), pp.517–524.
- [47] Wang, Y.Y., Lu, C., Li, J., Tan, X.M. and Tse, Y.C., Simulation of drop/impact reliability for electronic devices, *Finite Element in Analysis and Design*, Vol.41 (2005), pp.667-680.
- [48] Zhou, C.Y., Yu, T.X. and Lee, R.S.W., Drop/impact tests and analysis of typical

- portable electronic devices, *International Journal of Mechanical Science*, Vol.50 (2008), pp.905-917.
- [49] Chiu, C.C. and Liou, Y., Low-velocity impact damage in brittle coatings, *Journal of Materials Science*, Vol.30 (1995), pp.1018–1024.
- [50] Grant, P.V., Cantwell, W.J., McKenzie, H. and Corkhell, P., The damage threshold of laminated glass structures, *International Journal of Impact Engineering*, Vol.21 (1998), pp.737–746.
- [51] Chai, H., Lawn, B.R. and Wuttiphan, S., Fracture modes in brittle coatings with large interlayer modulus mismatch, *Journal of Materials Research*, Vol.14 (1999), pp.3805–3817.
- [52] Chai, H. and Lawn, B.R., Cracking in brittle laminates from concentrated loads, *Acta Materials*, Vol.50 (2002), pp.2613–2625.
- [53] Chai, H., Fracture mechanics analysis of thin coatings under spherical indentation, *International Journal Fracture*, Vol.119 (2003), pp.263–285.
- [54] Chai, H. and Lawn, B.R., Failure of brittle layers on polymeric substrates from Vickers indentation, *Scripta Materialia*, Vol.55 (2006), pp.335–338.
- [55] Chai, H. and Lawn, B.R., A universal relation for edge chipping from sharp contacts in brittle materials and its use as a simple means of toughness evaluation, *Acta Materialia*, Vol.55 (2007), pp.2555–2561.
- [56] Chai, H. and Ravichandran, G., On the mechanics of fracture in monoliths and multilayers from low-velocity impact by sharp or blunt-tip projectiles, *International Journal of Impact Engineering*, Vol.36 (2009), pp.375–385.
- [57] 平田敦, 鴛海達也, 山下敏, 神田一隆, 吉川昌範, 気相合成ダイヤモンド薄板の強度評価, *日本精密工学会誌*, Vol.63 (1997), pp.1054–1058.
- [58] González, L., Godlewski, T.E., Reister, S. and Fernholz, K.D., Mechanical behavior of polycarbonate-based film laminates during three-point bend impact, *SAE Technical Papers*, (2004).
- [59] Zhang, X., Ding, Y., Zhang, G., Li, L. and Yan, Y., Preparation and rheological studies on the solvent based acrylic pressure sensitive adhesives with different crosslinking density, *International Journal of Adhesion and Adhesives*, Vol.31 (2011), pp.760-766.
- [60] Yamada, H., Okui, R., Ogasawara, N., Kobayashi, H. and Ogawa, K., Impact compressive properties of foamed film with closed cell, *Applied Mechanics and Materials*, Vol.566 (2014), pp.134–139.
- [61] Maheo, L. and Viot, P., Impact on multi-layered polypropylene foams, *International Journal of Impact Engineering*, Vol.53 (2013), pp.84-93.

参考文献

- [62] Gibson, L.J. and Ashby, M.F., Cellular solids:structure and properties, 2nd edition (1999), *Cambridge University Press*.
- [63] Goldsmith, W., Impact (2001), *Dover Publications*.
- [64] Graff, K.F., Wave motion in elastic solids, *Clarendon Press*, (1975), pp.75–133.

謝辞

4年前に豊橋技術科学大学 大学院工学研究科 機械工学専攻に入学し、機能材料・構造システム研究室に配属されて以来、多くのご指導、ご鞭撻を賜りました本学機械工学系、足立忠晴教授に深甚なる謝意を表します。また、本学の河村庄造教授、竹市嘉紀准教授にはお忙しい中、本論文の審査をしていただき、有益なご教示を賜り、深謝いたします。同時に本論文を纏めるにあたり、多大なご助言とご指導を賜り、本論文の審査をしていただきました金沢大学機械工学系、樋口理宏准教授に深謝いたします。さらに、本論文を進めるにあたりお世話になった機能材料・構造システム研究室の関係者の皆様に感謝の意を表します。

最後に、本論文を纏めるにあたり、終始支えてくださった妻へ感謝の意を表します。

2016年 2月