

塗装鋼板における衝撃応力 吸収特性の評価(第1報)

Study on Impact Stress Absorption of Coating on Steel
Substrates (No.1)



分析センター
第1部
青木美樹
Miki
Aoki



分析センター
第1部
原 義則
Yoshinori
Hara

SUMMARY

Although impact resistance of coating films such as chipping resistance is one of the most important performances in automotive coatings, even quantitative evaluation of the behavior has not been well established. The impact given to the coated steel was classified into direct energy component and propagated energy component for detailed analysis. So-called split Hopkinson bar test was adapted to evaluate the behavior of multi-layered coatings on the steel substrate against the direct impact component. This test provided reproducible compressive stress-strain curve at strain rate of the order 10^3 s^{-1} . Dynamic strain was created by drop test and the behavior of the multi-layered coatings against the propagated energy component was successfully evaluated by measuring damping waveform in the energy propagation. Based on these findings, we examined various multi-layered automotive coatings with the above stated test methods. We found that inserting a layer with a high loss coefficient between two layers with high elastic modulus was very effective to improve absorption behavior against both the direct and the propagated energy component.

要 旨

自動車用塗装鋼板の耐衝撃性は重要な特性ではあるが、定性・定量的に評価することが難しかった。そこで塗装鋼板が受ける衝撃を直接衝撃と伝播衝撃とに分けて考え、それぞれの衝撃吸収特性の評価手法を確立した。分割ホプキンソン棒法により、ひずみ速度が 10^3 s^{-1} オーダーの動的圧縮応力-ひずみ曲線を得ることで、直接衝撃に対する塗装鋼板の吸収エネルギーを評価することができ、伝播衝撃に対する吸収特性は、落錘試験での塗膜面を伝播する動ひずみの減衰から吸収エネルギーを評価することができた。本手法を適用し、電着、中塗り、そしてカラーベース/クリヤーからなる自動車用複層塗膜を検討試料とし、エネルギー吸収層の有無による衝撃応力吸収特性への影響について解析した。高弾性率の電着層と中塗り層との間に高損失係数(高 $\tan \delta$)層を適用した塗膜系は、直接衝撃および伝播衝撃どちらに対しても優れた吸収特性を示すことが明らかになった。

1. 緒言

われわれが身の回りにある物に塗装を施す第一の目的は、被塗物を「美しく見せる」ことと、様々な外的因子から「守る」ことである。例えば自動車用塗膜の場合、「美しく見せる」ために意匠性のある色彩、光沢・平滑性、耐汚染性等が求められ、さらに被塗物および塗膜自体を曝される使用環境中の負荷因子(熱・水・光・力等々)から「守る」ために耐候性、耐食性、耐スリ傷性、そして耐衝撃性等が求められる。これらの要求を満たすため、自動車用塗膜は一般に、電着塗膜(耐食性)／中塗り塗膜(耐衝撃性等)／上塗り塗膜(意匠性・耐候性等)といった機能分担された複層薄膜から成っている。自動車用塗膜が受ける衝撃としては、高速走行中に跳ね上げられた石等が衝突するチップングと呼ばれる現象があり、衝撃を受けて塗膜が損傷・剥離すると外観を損なうだけでなく、損傷部から腐食が進行するため、耐チップング性は塗膜に求められる重要な性能の一つである。

自動車用塗膜の耐衝撃性は、中塗り塗膜がその機能を主に担っている¹⁾が、塗膜の破壊を伴うほどの大きな衝撃に対しては系全体、すなわち複層塗膜および被塗素材の複合体としての特性および各層のエネルギー伝播特性を評価しなければならない。しかし、このような衝撃条件下での塗装鋼板の耐衝撃性の定量的評価は難しく、一般には、一定量の碎石の高速衝突²⁾や任意形状のおもりの落下^{3), 4)}等により塗装鋼板に生じた損傷を目視で定性的に評価されているのが現状である。本報では、塗装鋼板の耐衝撃性を定量的に評価するために、塗装鋼板が受ける衝撃応力の吸収特性や伝播挙動について評価解析技術を確立した。写真1は100mg

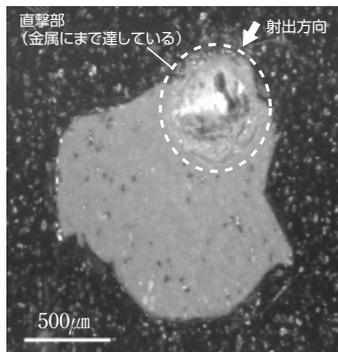


写真1 衝撃試験後の塗膜欠陥

のダイヤモンドを入射角30°、速度50 m/sで自動車用塗装鋼板に衝突させた時に生じた塗膜損傷を示している。ダイヤモンドが直接接触した部位は被塗素材である鋼板まで傷が達しており、さらに入射に対して反対側の部位はダイヤモンドが直接接触していないにもかかわらず塗膜の層間で大きく損傷していることがわかった。後者は、塗膜を伝播した衝撃波により層間で破断を起こしたものと考えられる。これらのことから、塗装鋼板が受ける衝撃には直接衝撃と伝播衝撃の二つの形態があることが判り、本報では、それぞれの衝撃応力吸収に対する定量的評価手法について検討した結果を報告する。

2. 実験

2.1 試料

化成処理した厚さ0.8mmの冷間圧延鋼板(JIS G 3141)に、図1で示した自動車ボディーと同じ構成の塗装を施したものを検討試料とした。各層の塗膜単独での機械特性を表1に示す。図1のSTDモデルは自動車ボディーの一般的な部位の塗装仕様であるが、フード先端などチップングを受けやすい部位にはCPモデルのように電着塗膜と中塗り塗膜との間にエネルギー吸収層として軟質のチップングプライマーが適用され、耐チップング性を向上させている⁵⁾。これらの耐チップング性(耐衝撃性)の異なるモデル塗膜系を用いて、衝撃応力吸収について下記評価手法の検討を行った。

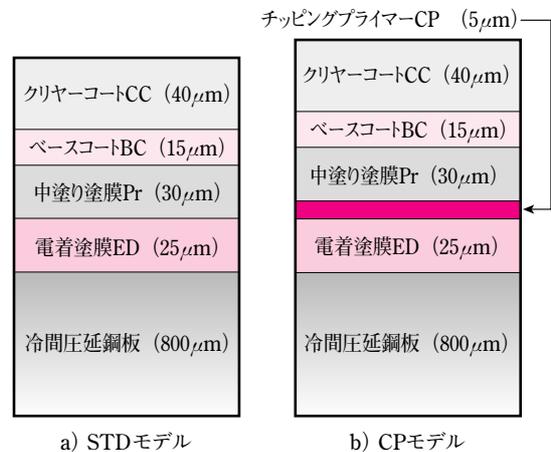


図1 モデル塗膜系

表1 各層単独膜の静的引張試験による機械特性

材 質		弾性率 MPa	最大応力 MPa	破断ひずみ	破断応力 MPa
CC	酸/エポキシ硬化塗膜	1200	41	0.08	39
BC	アクリル/メラミン硬化塗膜	2500	46	0.03	46
Pr	ポリエステル/メラミン硬化塗膜	2400	47	0.08	43
CP	ポリオレフィン樹脂	120	3	10.0	3
ED	エポキシ/イソシアネート硬化塗膜	2800	84	0.04	84

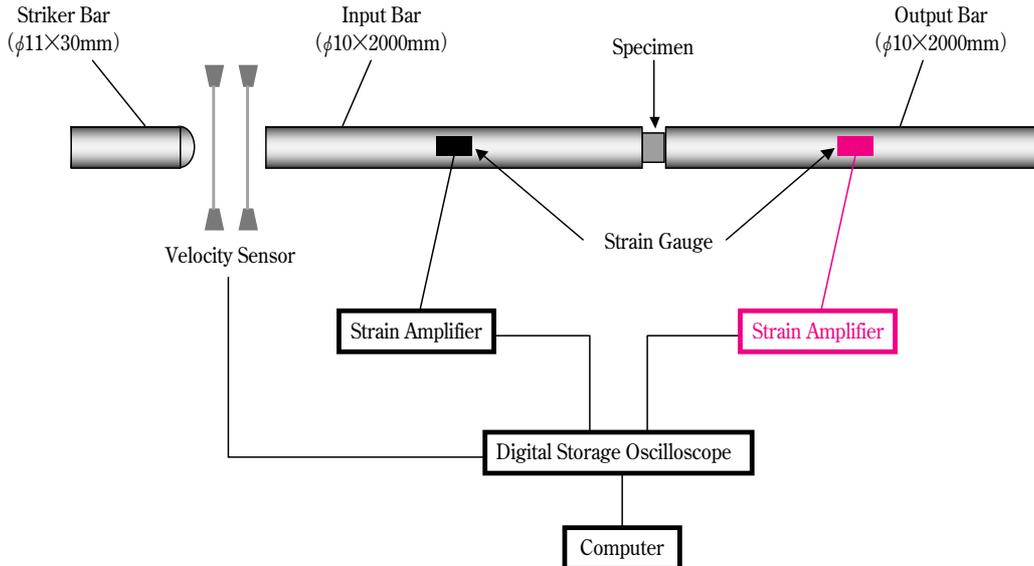


図2 分割ホプキンソン棒法圧縮試験装置の概略図

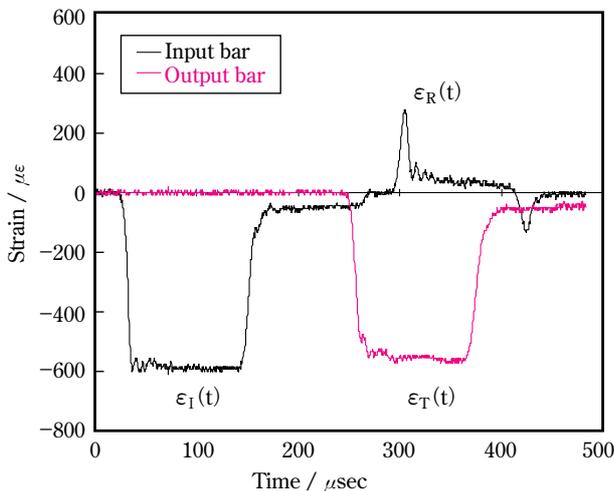


図3 代表的な分割ホプキンソン棒法での計測波形

2.2 直接衝撃の評価 —分割ホプキンソン棒法—

直接衝撃に対しては、分割ホプキンソン棒法⁶⁾による衝撃圧縮試験^{7), 8)}から複層塗膜の動的圧縮応力-ひずみ曲線を求めて評価を行った。分割ホプキンソン棒法圧縮試験の概略を図2に示す。2本の細長い弾性棒の間に試験片を挟み込み、その一方にストライカーを圧縮空気で打ち出して圧力波を入射させ、そのひずみパルスを入力側、出力側それぞれのひずみゲージにより計測する。代表的な計測波形を図3に示した。入射、反射、そして透過のひずみパルス波形を $\epsilon_I(t)$ 、 $\epsilon_R(t)$ 、 $\epsilon_T(t)$ で表すと、試験片内の平均公称ひずみ $\epsilon(t)$ 、平均公称ひずみ速度 $\dot{\epsilon}(t)$ 、および平均公称応力 $\sigma(t)$ は簡便に次式で表すことができる。

$$\epsilon(t) = \int_0^t \dot{\epsilon}_R(t) dt \quad (1)$$

$$\dot{\epsilon}(t) = \frac{-2c_0}{L_S} \epsilon_R(t) \quad (2)$$

$$\sigma(t) = \frac{EA}{A_S} \epsilon_T(t) \quad (3)$$

ここで、 L_S 、 A_S は試験片の厚さおよび面積を表し、 E および A は入出力棒の弾性率、面積をそれぞれ表している。 c_0 は応力波の伝播速度であり、入出力棒の密度を ρ_0 とすると

$$c_0 = \sqrt{\frac{E}{\rho_0}} \quad (4)$$

で表すことができる。

衝撃実験はストライカーの射出速度を約3~8m/sの範囲で変化させ、式(1)~(4)の関係から動的圧縮応力-ひずみ曲線を求めた。さらに、応力-ひずみ曲線の図積(ヒステリシス面積)から衝撃吸収エネルギーを算出した。

2.3 伝播衝撃の評価 —伝播ひずみ計測—

伝播衝撃に対する塗装鋼板のエネルギー吸収特性評価として、衝撃を受けた時に塗膜を伝播する動ひずみ波形からの解析を検討した。図4に示したように、1.5mの高さから5.3gの円錐状のおもりを塗装鋼板上に落下衝突させ、衝撃中心から10mmの位置に貼り付けたひずみゲージにより伝播動ひずみを計測した。ひずみゲージを測定試料の表裏同位置に貼り付ける2枚ゲージ法により縦波成分のみを計測できるようにし、さらに、塗膜表面だけでなく、衝撃中心より同距離の位置の塗膜を削り出して鋼板面にも貼り付けて、一度の落下衝撃実験で塗膜表面および金属表面を伝播する動ひずみの計測を可能とした。

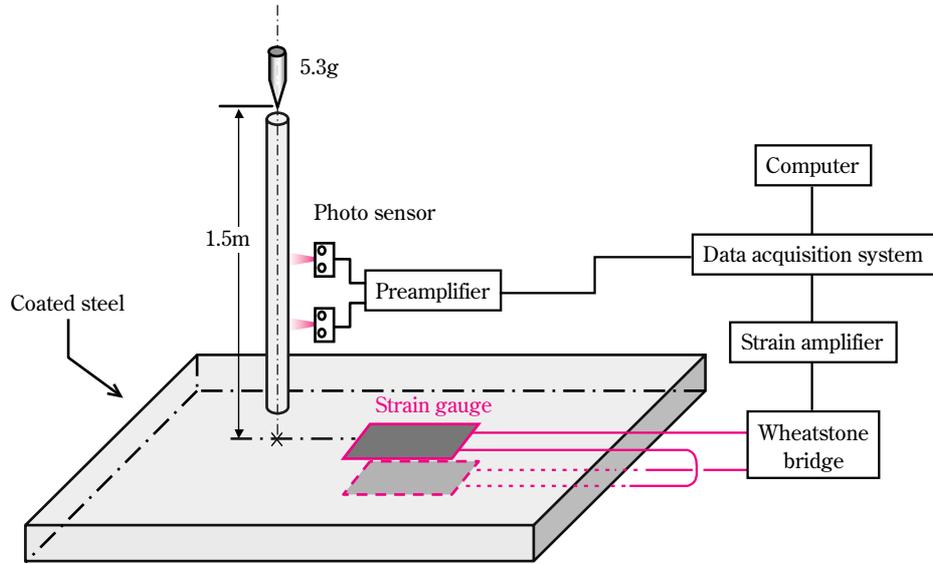


図4 伝播ひずみ計測装置の概略図

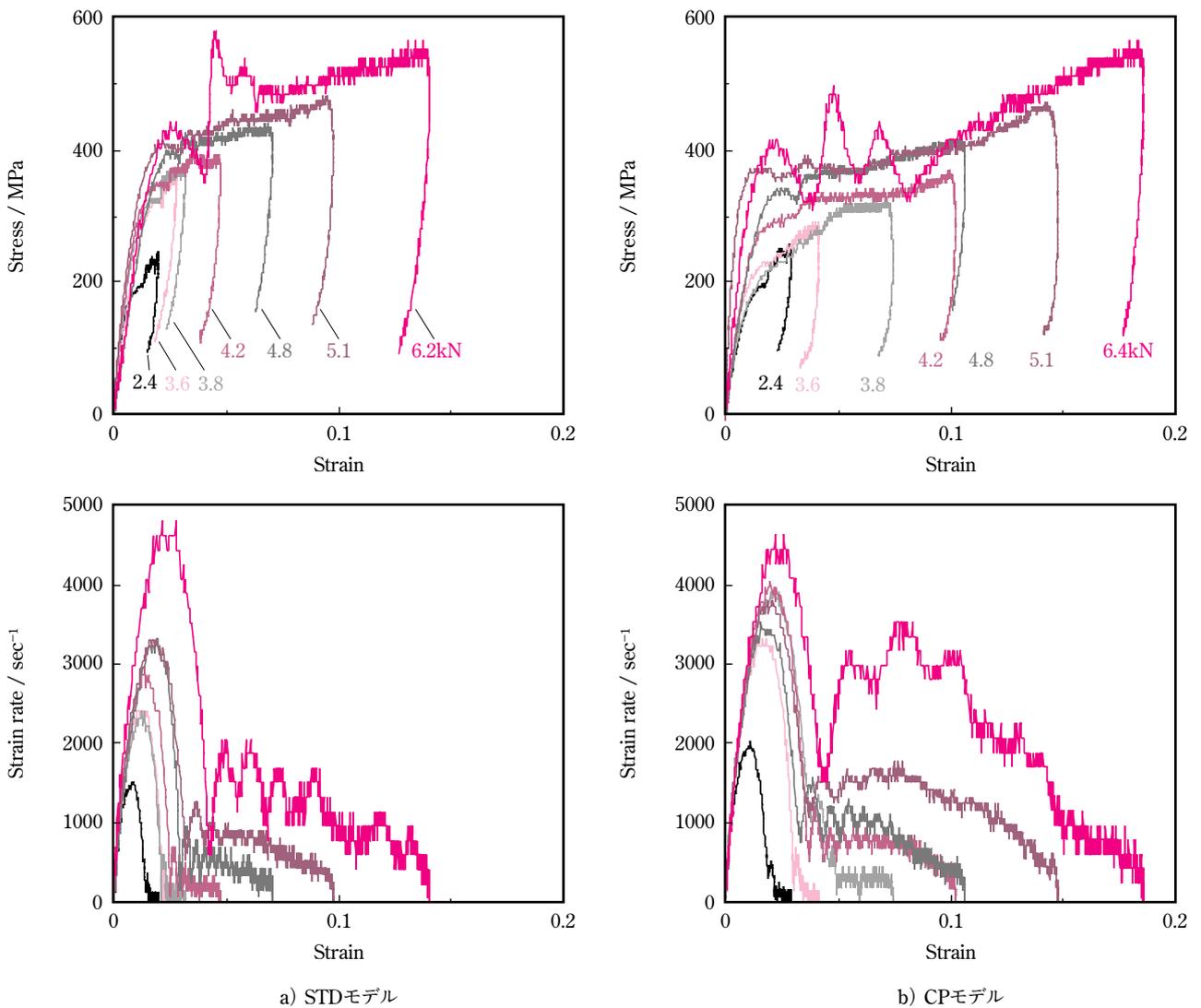


図5 動的圧縮応力-ひずみ曲線の衝撃力依存性

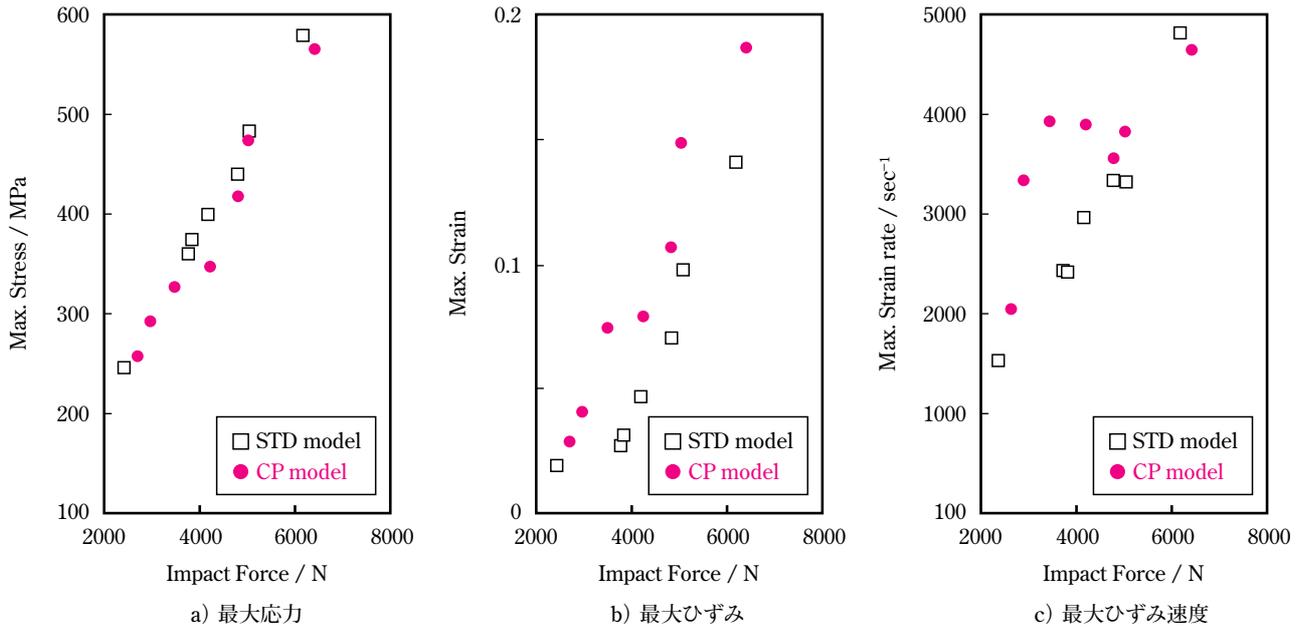


図6 最大応力・最大ひずみ・最大ひずみ速度の衝撃力依存性

3. 結果および考察

3.1 直接衝撃に対する吸収特性

3.1.1 複層塗膜の動的圧縮応力-ひずみ曲線

分割ホプキンソン棒法による衝撃圧縮試験から得られた複層塗膜試料の動的圧縮応力-ひずみ曲線の衝撃力依存性を図5に示す。図中の衝撃力の値は、入力棒に注射されたひずみパルスから求めたもので、ストライカーの射出速度を変えることにより調整した。塗膜に 10^3 s^{-1} オーダーのひずみ速度の動的応力を加えることができ、その時の機械特性評価が可能であることが判った。

図6に、塗装鋼板に与えた衝撃力と塗膜が受けた最大応力、最大ひずみ、および最大ひずみ速度との関係を示した。一定の衝撃力を与えた場合、塗膜が受ける最大応力は塗膜モデルにかかわらずほぼ同じである(図6a)が、CPモデルはSTDモデルよりも最大ひずみが大きく、かなり圧縮変形しやすいことがわかった(図6b)。両モデルの塗膜構成の違いは薄膜(7 μm)のチップングプライマー層の有無のみであり、CPモデルではこの層が主に圧縮変形していると考えられる。衝撃力と最大ひずみ速度との関係は、STDモデルではこれらが比例関係にあり、塗膜が単純圧縮されていることがわかる。一方、CPモデルではこれらが非線形な関係にあり、ある範囲で衝撃力を大きく(ストライカーの衝突速度を早く)しても塗膜の最大ひずみ速度は変化が小さい挙動を示しており、塗膜が単純に圧縮変形しているだけでないことを表している(図6c)。そこで、次に塗膜の衝撃吸収エネルギーと試験後の試料片の状態について調べた。

3.1.2 複層塗膜の衝撃圧縮エネルギーの吸収特性

与えた衝撃力と複層塗膜による衝撃吸収エネルギーとの関係を図7に示す。CPモデルは、評価した衝撃力範囲すべ

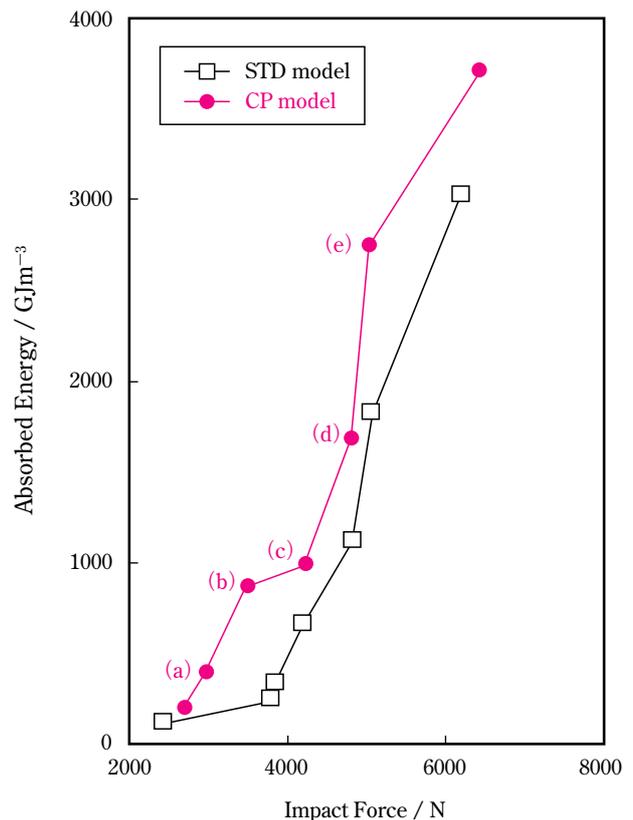


図7 衝撃吸収エネルギーの衝撃力依存性

でSTDモデルよりも高い衝撃吸収エネルギーを示すことがわかった。この衝撃吸収エネルギーと最大ひずみ速度との関係(図8)から、CPモデルでは最大ひずみ速度 4000 s^{-1} 程度で、衝撃力を大きくしても最大ひずみ速度は変わらないが衝撃吸収エネルギーが急激に高くなった。この衝撃力範囲で試験を行った後のCPモデル試料片を写真2に示した。端部より同心円状に塗膜がめくり上がって剥離しており、衝

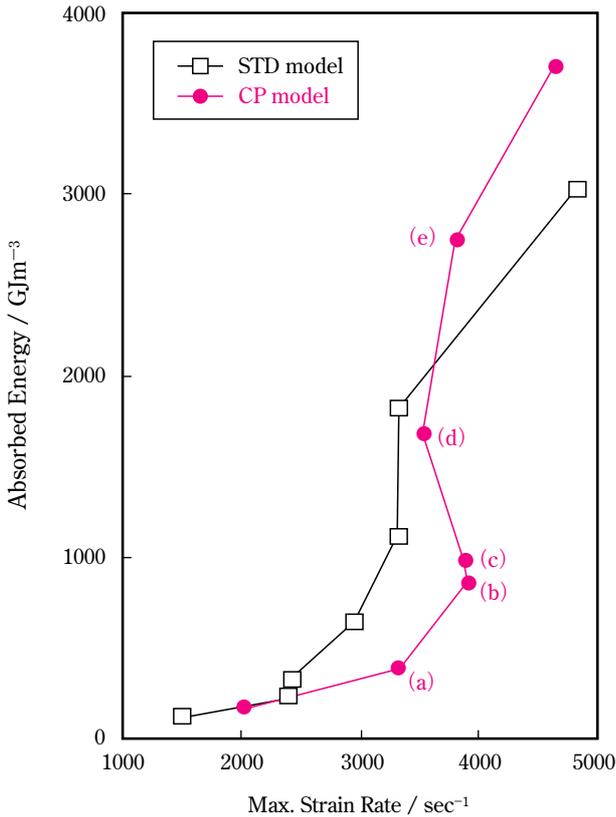


図8 衝撃吸収エネルギーと最大ひずみ速度との関係

衝撃力を大きくするに従い剥離面積が広がっていることが観察された。剥離部位の両面にチップングプライマーが存在していたことから、剥離現象はこの層での凝集破壊であり、CPモデルはチップングプライマー層の凝集破壊により圧縮衝撃に対して高いエネルギー吸収特性を示すことが明らかになった。

これらの結果から、分割ホプキンソン棒法衝撃圧縮試験によって直接衝撃に対する多層薄膜試料の吸収特性の定性・定量的評価が可能であることがわかった。

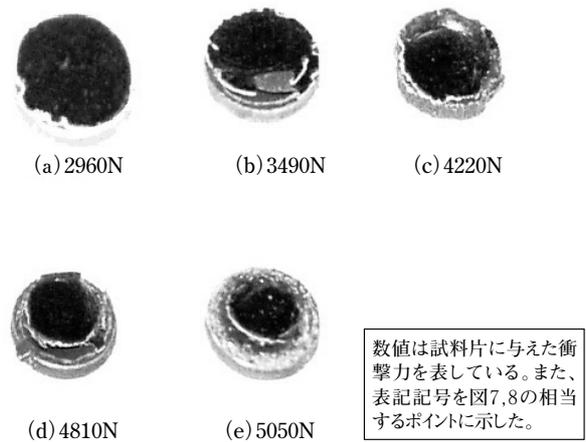
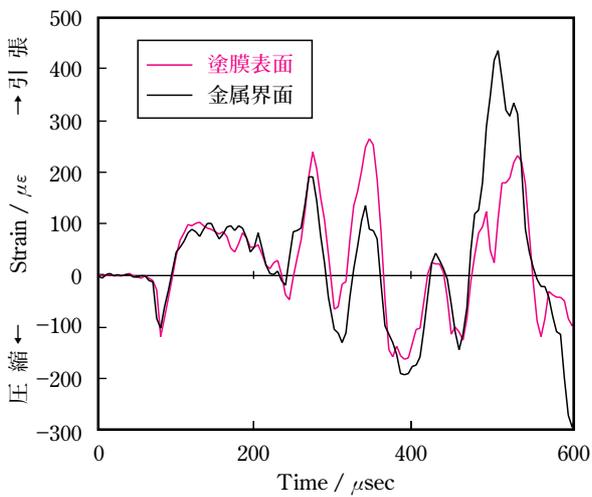


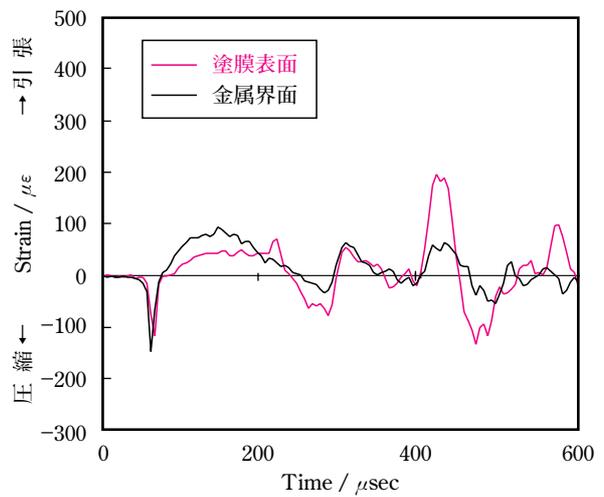
写真2 衝撃圧縮試験後のCPモデル試料片

3.2 伝播衝撃に対する吸収特性

円錐状おもりの落下衝突により塗装鋼板を伝播した動ひずみ波形を図9に示す。STDモデルとCPモデルを比較すると、伝播ひずみはSTDモデルの方が全体的に大きく、伝播衝撃を吸収できていないことがわかった。また、塗膜表面と金属界面での動ひずみ波形を比較すると、STDモデルでは同位相だが、金属界面でのひずみの方が塗膜表面のひずみよりも大きいことがわかり、金属界面を中心に塗膜全体が衝撃伝播により振動していることが考えられる。一方、CPモデルでは伝播ひずみが小さく、伝播衝撃を吸収していることがわかった。これは、塗装鋼板を伝播する衝撃波を制振しているためであり、CPモデルは軟質・高損失係数(高tan δ)のエネルギー吸収層(チップングプライマー)の上下層に硬質の電着塗膜および中塗り塗膜が適用されており、これらがいわゆる拘束型制振構造を形成しているため高い制振性を示すと考えられる。さらにSTDモデルとは異なり、CPモデルでの塗膜表面と金属界面の伝播ひずみ波形には位相



a) STDモデル



b) CPモデル

図9 伝播ひずみ波形

のずれが見られること、および塗膜表面を伝播する動ひずみの方が大きいことから、CPモデルにおける伝播衝撃波はチップングプライマー層を境に伝わり方が異なり、互いに打ち消し合いながら上層側を中心に伝播すると考察できる。

以上のことから、落下衝撃試験による動ひずみ計測により、伝播衝撃に対する多層薄膜試料の吸収特性の定性・定量的評価が可能であることがわかった。

4. まとめ

塗装鋼板が受ける衝撃を直接衝撃と伝播衝撃とに分けて考え、それぞれの衝撃吸収特性の評価手法を確立した。本手法を適用し、自動車用複層塗膜を検討試料とし、エネルギー吸収層の有無による衝撃応力吸収特性について解析を行った。チップングプライマーを適用した塗膜系は、圧縮衝撃（直接衝撃）に対してはこの層での凝集破壊により高いエネルギー吸収を示し、伝播衝撃に対しては優れた制振特性を示すことが明らかになった。なお、被塗素材に合金化溶融亜鉛メッキ鋼板を用いた場合、本報で検討したSTDモデルでは、亜鉛メッキ層が脆い性質を示すために微小部位に高速衝撃を受けるとメッキ層から大きく破断するが、CPモデルではチップングプライマー層までの小さな塗膜欠陥にまで抑制される⁹⁾。この現象は、受けた衝撃エネルギーを直撃部で吸収しきれず金属界面中心に伝播してしまうSTDモデルと直接・伝播衝撃に対して上述した特性を示すCPモデルとの差で説明することができる。

謝 辞

本研究を遂行するにあたり、薄片試料の分割ホブキンソン棒圧縮試験において多大なるご協力を頂きました新潟大学工学部の田邊裕治教授ならびに研究室の皆様へ深く感謝申し上げます。

参考文献

- 1) 桑野英治、原義則：塗料の研究、135、10 (2000)
- 2) (社)自動車技術会：自動車規格 JASO M 306 耐チップング性試験
- 3) JIS K 5600-5 塗膜の機械的性質
- 4) ASTM D 2794 Resistance of Organic Coatings to the Effects of Rapid Deformation (Impact)
- 5) 水谷豊：塗料の研究、139、12 (2002)
- 6) U.S. Lindholm: J. Mech. Phys. Solids, 12, 317 (1964)
- 7) N.N. Dioh, J.G. Williams: J. Mater. Sci., 29, 6091 (1994)
- 8) 高橋清澄、田邊裕治、原義則：日本機械学会第40期総会・講演会 (2002)
- 9) 原義則、中井昇、田邊裕治：色材研究発表会講演要旨集、p.46 (2004)