

複層塗装鋼板における 衝撃応力の伝播解析

Study on Impact Stress Absorption of Coating on Steel Substrates (No.2)

Analysis of Impact Energy Propagation in Multi-layered
Coatings



分析センター
第1部
原 義則
Yoshinori
Hara



分析センター
第1部
青木美樹
Miki
Aoki

SUMMARY

In the last paper, authors reported that impact given to coated steel was classified into direct energy component and propagated energy component, and behavior of multi-layered coatings on the steel substrate against the direct impact component could be assessed by split Hopkinson bar test, and behavior against the propagated energy component could be assessed from attenuation of dynamic strain by drop test, respectively. In this paper, the propagated shock wave in multi-layered coatings on the steel substrate was simulated by FEM (Finite Element Method) analysis. Consequently, it was proved that the propagating behavior of the impact stress in each layer of the coated steel. FEM analysis is useful for evaluation of impact resistance of multi-layered coatings.

要 旨

前報において、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、直接衝撃に対しては分割ホプキンソン棒法により塗装鋼板の吸収エネルギーを評価することができ、伝播衝撃に対しては落錘試験での塗膜面を伝播する動ひずみの減衰からの吸収特性により評価できることを報告した。本報告では、衝撃応力が複層塗膜中をどのように伝播するのかFEM (有限要素法) を適用したシミュレーション解析について検討を行った。その結果、各層での衝撃応力の伝播挙動を明らかにすることが可能となり、複層塗膜の耐衝撃性評価に活用できることを明らかにした。

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」美粧効果と、様々な外的因子から「守る」保護効果である。例えば自動車用塗膜の場合、美粧効果のために美しい色彩、光沢・平滑性、耐汚染性等が求められ、さらに保護効果のために被塗物および塗膜自体が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、そして耐衝撃性等の耐久性が求められる。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ピ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恐れがあるため、耐チッピング性は塗膜に求められる重要な性能の一つである。

本現象を解析するにあたって、前報¹⁾では、塗装鋼板が受ける衝撃には衝突物質と直接接触する部位が受ける直接衝撃と、その衝撃エネルギーが複層塗膜を放射状に伝わる伝播衝撃の2種類の形態があることを明らかにし、それぞれの衝撃を定量的に評価するために、直接衝撃に対する吸収特性は分割ホプキンソン棒法、伝播特性に対しては落錘試験による伝播ひずみ測定により各々評価することが有効であることを示して塗装鋼板における衝撃吸収特性に関する評価解析技術を確立したことを報告した。

この2種類の衝撃形態のうち直接衝撃については、衝撃を受けた局部の欠陥は一般に小さく、塗膜の弾性率・破断伸び率・破断エネルギー等の物性や付着力および膜厚によ

り耐衝撃性を制御できることが判っている²⁾。一方の伝播衝撃については、自動車用塗膜のように複層から成る場合、各層の塗膜物性の違いにより衝撃を受けた際の塗膜欠陥の形状が異なり、組み合わせによっては、ある塗膜と塗膜の層間での剥離欠陥や、さらには素地鋼板からの大きな損傷に至るケースもある³⁾。そのため、複層塗装鋼板における衝撃応力の伝播解析は非常に重要になる。

伝播衝撃に関して、前報での概要について簡略に述べる。検討試料として化成処理した厚さ0.8mmの冷間圧延鋼板 (JIS G3141) に、**図1**で示した自動車ボディーの一般的部位の塗装仕様であるSTDモデルとフード先端などチップングを受けやすい部位に耐チップング性を向上させるために電着塗膜と中塗り塗膜との間に軟質のチップングプライマーを適用したCPモデルを用いた。各層の塗膜単独での機械特性を**表1**に示す。これらの耐チップング性の異なるモデル塗膜系を用いて、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行った。**図2**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。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ひずみゲージを貼り付けて、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。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の測定結果を**図3**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

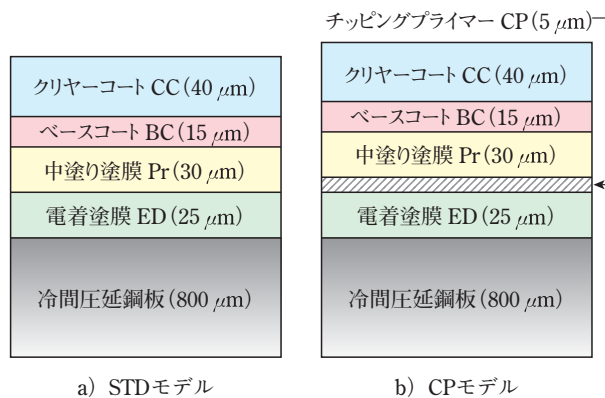


図1 モデル塗膜系

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おり、作用力は圧縮力よりも引張り(剥離)力が勝っている。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 $\tan \delta$)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(**図4**)を形成しているため高い制振性を示す⁴⁾と考えた。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のず

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

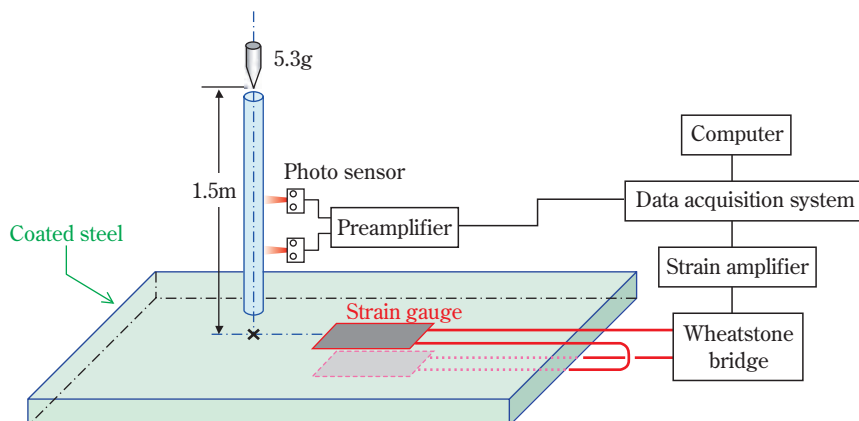


図2 伝播ひずみ計測装置の概略図

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した。

以上のように、複層塗膜全体での伝播衝撃に対する吸収特性は落下衝撃試験による動ひずみ計測により評価可能であるが、さらに複層塗膜中の任意の層および位置での衝撃エネルギーの大きさを明らかにすることができれば、物体が塗装

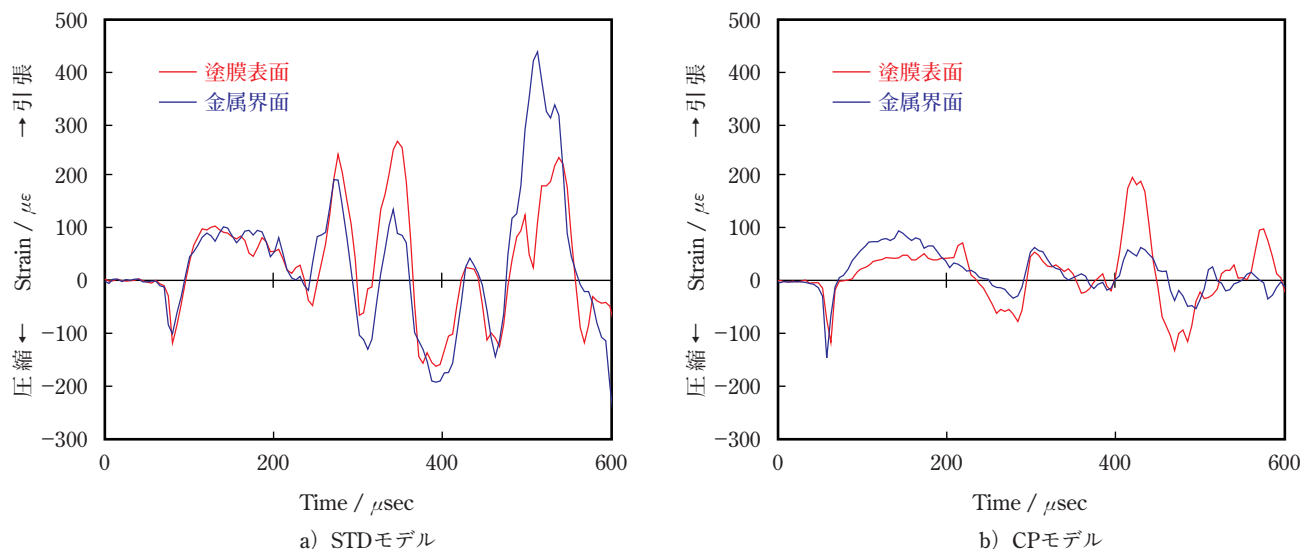


図3 伝播ひずみ波形

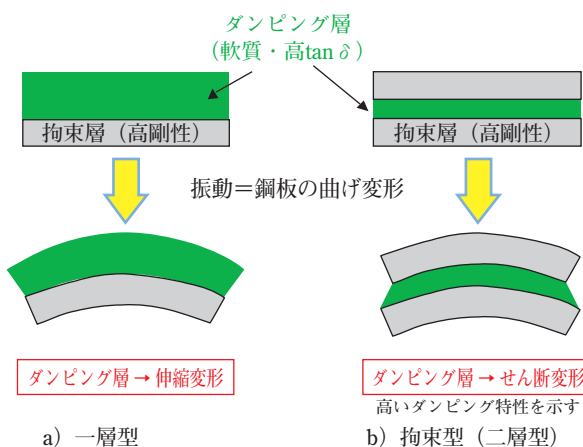


図4 制振構造モデル

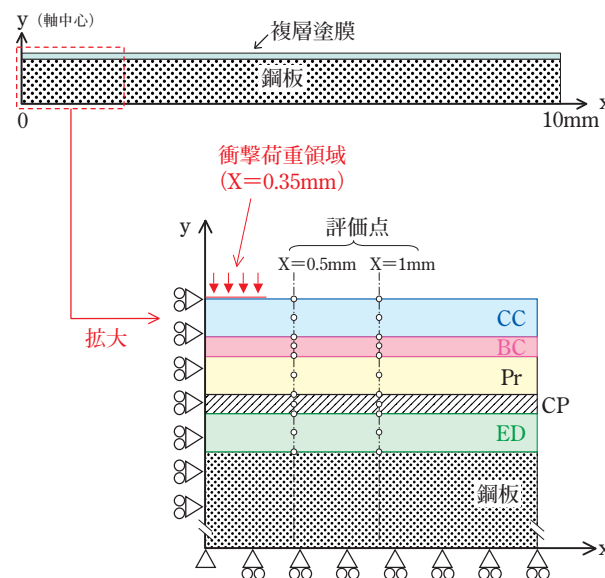


図5 複層塗装鋼板のFEM解析モデル

鋼板に衝突した場合の衝撃応力の伝播過程および損傷のメカニズムについて知見を得ることができる。また反対に、各層の機械特性および塗膜構成を調整し、複層塗膜全体で最も効率的に伝播衝撃を吸収する系を見出すことも可能となる。

そこで本報では、実測による評価が困難な構造物の応力解析や自動車の車両衝突解析等に用いられているコンピューターシミュレーション技術のFEM (Finite Element Method, 有限要素法) による衝撃応力の伝播シミュレーション解析について検討を行った。

2. FEM解析

2.1 解析モデル

自動車ボディーの塗装鋼板の構成(図1)に基づき、図5に示す2次元軸対象の解析モデルを作成した。計算に用いた材料物性値は、高ひずみ速度(0.42sec⁻¹)で各層の遊離塗膜の引張試験を行い、得られた応力-ひずみ曲線から弾塑性体としてヤング率、降伏応力、そして硬化定数を求めた。塗膜は等方硬化性と仮定し、ポアソン比は0.3で一定とした。各層の材料物性値を表2に示した。

2.2 解析条件

軸中心から半径0.35mm領域の解析モデル表面に、応力伝播挙動を明確に表すことができるように設定した衝撃荷重(図6)を加えた場合の応力分布の経時変化を汎用非線形FEMソフトAMPS (AMPS Tech Corp.) により計算を行った。応力成分には、それぞれx、y、z軸方向の引張・圧縮成分(σ_x 、 σ_y 、 σ_z)とせん断成分(τ_{xy} 、 τ_{yz} 、 τ_{zx})の6成分があり、各応力成分について解析を行ったが、本報では、これらを1次的に表すVonMises相当応力 σ_{eq} での解析結果を示した。

$$\sigma_{eq} = \sqrt{\frac{1}{2} [(\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2] + 3(\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{zx}^2)}$$

表2 FEM解析に用いた各層の塗膜物性値

	膜厚 μm	ヤング率 MPa	降伏応力 MPa	硬化定数 MPa	密度 kg・m ⁻³	ポアソン比 —
CC	40	1480	65	433	1.10×10 ³	0.3
BC	15	2360	—	—	1.31×10 ³	0.3
Pr	35	2210	59	175	1.77×10 ³	0.3
CP	5	120	1	1	1.18×10 ³	0.3
ED	25	2550	—	—	1.28×10 ³	0.3
鋼板	800	206000	—	—	7.86×10 ³	0.3

複層塗膜の各層での衝撃エネルギー分布および伝播・減衰特性を表すために、軸中心からx=0.5mmおよびx=1.0mmの位置を評価点とし、それぞれ力積を求めて比較を行った。力積は力と作用時間の積であり質点の運動量変化を表すため、次式のように評価点でのVonMises相当応力を時間積分したものを衝撃波伝播によるエネルギーとして捉えた。

$$I = \int_0^t \sigma_{eq}(t) dt$$

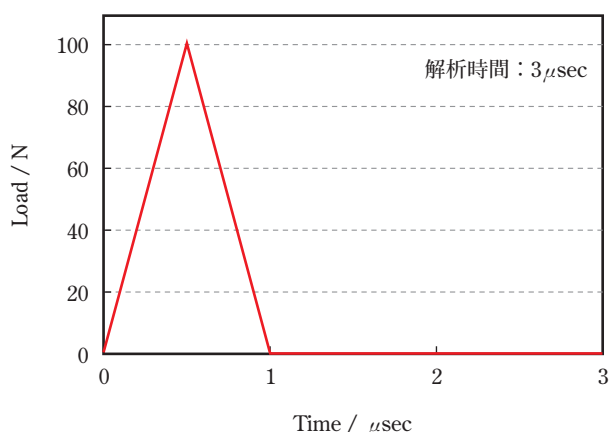


図6 衝撃荷重曲線

3. 結果および考察

3.1 複層塗膜の衝撃応力分布

図3のSTDモデルとCPモデルを用いたFEMによる衝撃解析から求めた複層塗膜中のVonMises相当応力分布の経時変化を図7、8に示す。t=0.1μsecにおいて、衝撃荷重を与えている表面の直下のみ応力が分布しており、STDモデルでは衝撃波が既に鋼板にまで達していることが判る。衝撃荷重が最大となるt=0.5μsecにおいては、どちらのモデルも直撃部を中心に放射状の応力分布を示すが、CPモデルでは中塗り(Pr)層と電着(ED)層で応力分布の不連続性が見られ、チップングプライマー(CP)層を境に膜厚方向

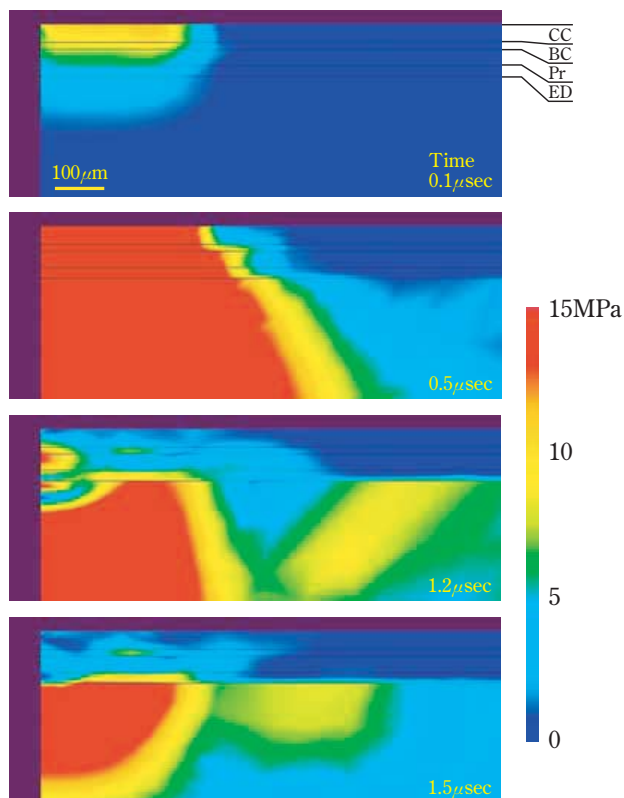


図7 STDモデルのVonMises相当応力分布

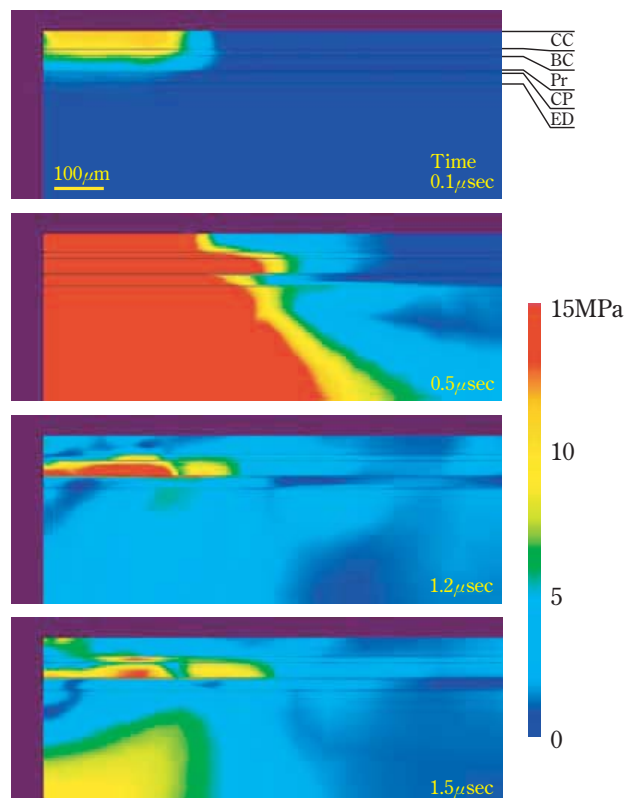
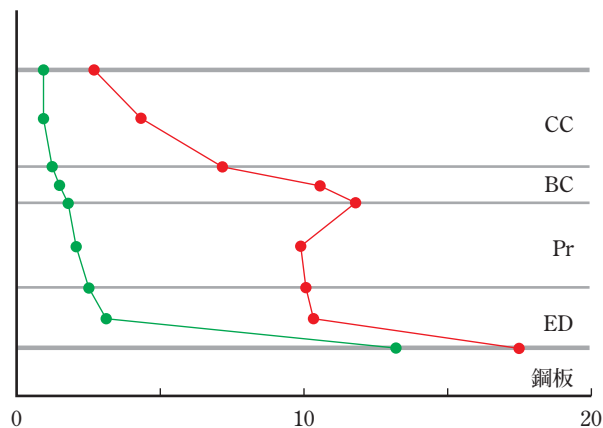


図8 CPモデルのVonMises相当応力分布

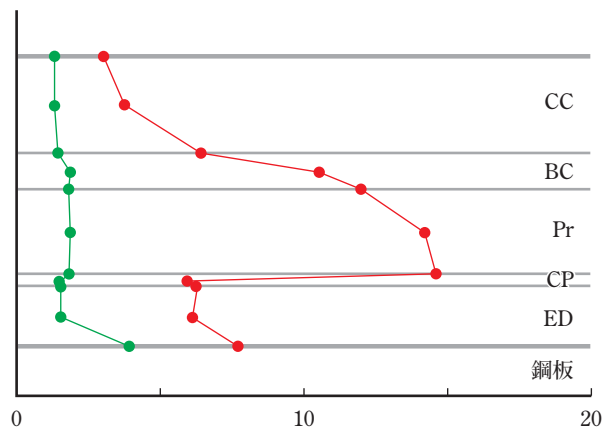
の伝播特性が異なることが示唆された。 $t=1.2\mu\text{sec}$ および $t=1.5\mu\text{sec}$ においては、STDモデルがED/鋼板界面近傍に広く衝撃応力を伝播・分布させているのに対し、CPモデルはPr層の比較的狭い範囲に応力集中させてED層への伝播を抑制していることが判った。これらの解析結果は、前述の落下衝撃試験による動ひずみ計測から得られた両モデルの特徴的な金属界面での伝播特性(図3)を反映しており、本シミュレーション解析モデルの妥当性を示すことができた。

次に、複層塗膜の各層での衝撃エネルギー分布および伝播・減衰特性を比較評価するために、軸中心から $x=0.5\text{mm}$ および $x=1.0\text{mm}$ の位置を評価点に設定し、各層の界面および層の中心に加わる衝撃応力の時間積分、すなわち力積を求めた。STDモデルおよびCPモデルでの解析結果を図9、10にそれぞれ示す。STDモデルの直撃部から近い $x=0.5\text{mm}$ の評価点では、ED/鋼板界面に最も多くの衝撃エネルギーが作用し、次いでベース塗膜(BC)/Pr界面に集中している。直撃部から更に離れた $x=1.0\text{mm}$ の評価点では、BC/Pr界面の衝撃エネルギーは小さくなり減衰していることが判るが、ED/鋼板界面では依然として大きな値を示していることから、衝撃波がこの界面を大きな減衰を示すことなく伝播していることが明らかになった。これに対して、CPモデルの $x=0.5\text{mm}$ の評価点では、CP/Pr界面に最も衝撃エネルギーが集中し、STDモデルとは異なりED/鋼板界面への衝撃応力の作用が小さいことが判った。また、 $x=1.0\text{mm}$ の評価点において、CP/Pr界面の衝撃エネルギーは急激に減衰しており、伝播が抑制されていることが明らかになった。著者らの実験^{3, 5)}では、メッキ層が比較的脆い性質を示す合金化溶融亜鉛メッキ鋼板を被塗素材に用いた場合、塗装鋼板表面の微小部に衝撃負荷を与えるとSTDモデルではメッキ層から大きく破断するが、CPモデルではCP層までの小さ



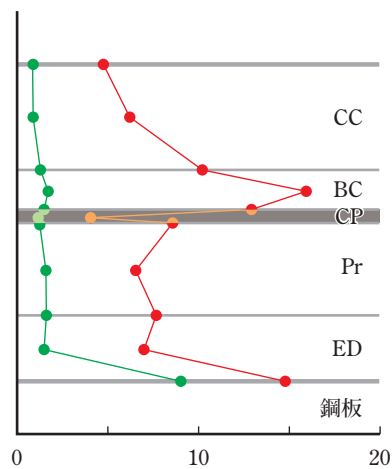
Impulse of Equivalent stress / $\text{N}\cdot\text{s}\cdot\text{m}^{-2}$
図9 STDモデルの力積分布

—●— $x=0.5\text{mm}$ —●— $x=1.0\text{mm}$



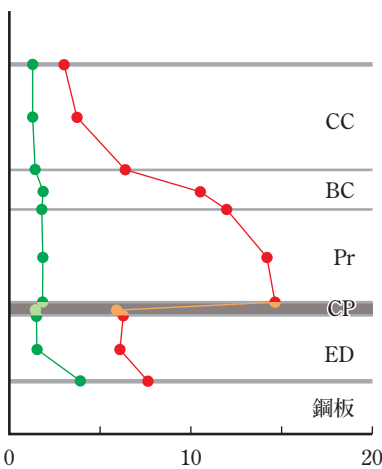
Impulse of Equivalent stress / $\text{N}\cdot\text{s}\cdot\text{m}^{-2}$
図10 CPモデルの力積分布

—●— $x=0.5\text{mm}$ —●— $x=1.0\text{mm}$



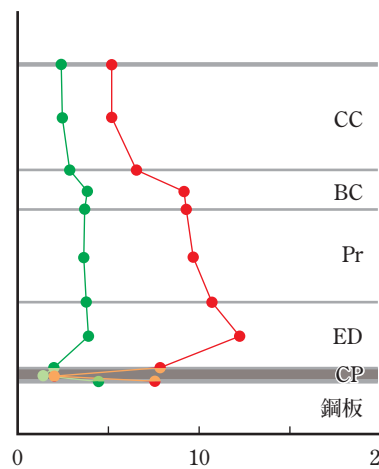
Impulse of Equivalent stress / $\text{N}\cdot\text{s}\cdot\text{m}^{-2}$

a) BC層-Pr層間



Impulse of Equivalent stress / $\text{N}\cdot\text{s}\cdot\text{m}^{-2}$

b) Pr層-ED層間



Impulse of Equivalent stress / $\text{N}\cdot\text{s}\cdot\text{m}^{-2}$

c) ED層-鋼板間

図11 CP層の位置による力積分布の変化

—●— $x=0.5\text{mm}$ —●— $x=1.0\text{mm}$

な損傷に抑制されることが判っている。これは薄膜試料の高速過渡現象であるため、実測による現象解析は非常に困難であるが、FEM解析により、上述したように両モデルの衝撃エネルギー分布とその伝播特性の差から現象を明らかにすることができる。

3.2 ケーススタディ：ダンピング層の位置による影響

FEM解析モデルの妥当性を示すことができたので、次に塗膜構成を変更したケースでの複層塗膜各層での衝撃エネルギー分布および伝播・減衰特性についてシミュレーションを行った。

CPモデルのPr/CP界面において衝撃エネルギーの集中および伝播抑制が認められているので、ダンピング層であるCP層の位置によるエネルギー分布および伝播・減衰特性への影響に着目し、図5のCPモデルでのCP層の位置をPr層とED層との間からBC層-Pr層間、ED層-鋼板間へ移動させたケースについてシミュレーションを行った。解析結果を図11に示す。何れのケースもCP層の上層および上層との界面に衝撃エネルギーが集中しており、各々の位置での伝播抑制は優れていることが判った。CP層が鋼板から離れたBC層-Pr層間に位置する場合(図11a)、ED/鋼板界面にも応力が集中し、CP層が存在しないSTDモデルに類似した衝撃波の伝播特性を示した。合金化溶融亜鉛メッキ鋼板への塗装適性等を考慮すれば、鋼板界面は無論、鋼板に近い位置での衝撃エネルギーの集中も望まれないので、これらの結果、ダンピング層であるCP層は従来用いられているようにPr層-ED層間に位置する塗膜構成が最も適切であることが判った。

以上のように妥当性のある解析モデルを構築して適正条件で活用すれば、従来の試行錯誤的な実験と検証の繰り返し作業の多くをFEM解析に置き換えることができると考えている。

4. 結 論

複層塗膜中の各層における衝撃応力の伝播についてFEMシミュレーションによる解析を行った。得られた結果は、実際の物体が複層塗装鋼板に衝突した場合に発生する現象と良く適合した。このことから、本シミュレーションは衝撃に対する塗膜の耐久性評価・解析に有効であり、FEMは実測評価が困難な現象の解析手法として今後重要になることを示した。

参考文献

- 1) 青木美樹、原 義則：塗料の研究、**144**、2 (2005)
- 2) 水谷 豊：塗料の研究、**139**、12 (2002)
- 3) 原 義則、桑野英治、中井 昇、藤谷俊英：色材研究発表会講演要旨集、p.118 (2000)
- 4) 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)
- 5) 原 義則・青木 美樹：色材研究発表会講演要旨集、p.78 (2005)