

# ワックス添加ラミネート鋼板の塗料密着性に及ぼす影響因子

## Factors Affecting Coating Adhesion of Wax-Added Laminated Steel Sheets

平口 智也 HIRAGUCHI Tomonari JFE スチール スチール研究所 表面処理研究部 主任研究員  
中川 祐介 NAKAGAWA Yusuke JFE スチール スチール研究所 表面処理研究部 主査研究員  
岡井 和久 OKAI Kazuhisa JFE スチール スチール研究所 表面処理研究部 グループリーダー

### 要旨

ワックスを添加したポリエチレンテレフタレート (PET) フィルムを適用したラミネート鋼板は、フィルムの摩擦係数が下がり加工性が向上する一方で、塗料密着性が低下する。表面自由エネルギー変化の解析から、ワックス比率の増加に伴い PET フィルム表面の双極子間力成分  $\gamma^d$  および水素結合成分  $\gamma^h$  が減少することがわかった。フィルムと塗料間の接着仕事から、ワックス添加による接着仕事の低下は PET フィルム表面の  $\gamma^d$  の減少に起因することが示唆され、密着性低下の主要因であると考えられる。この双極子間力成分  $\gamma^d$  の低下はワックス濃度の増加に伴う PET 表面のエステル結合の減少に起因しており、これらの知見は、加工性と塗料密着性の両立に向けた製品設計に有用である。

### Abstract:

Wax-added polyethylene terephthalate (PET) films are used in laminated steel sheets for demanding can-forming applications. However, wax addition tends to reduce coating adhesion. This study investigates the effect of wax on coating adhesion using surface free energy analysis. Results show that wax reduces the dipole force component ( $\gamma^d$ ) of PET film surface energy, which in turn lowers the work of adhesion between the film and the coating. X-ray photoelectron spectroscopy revealed that this reduction in  $\gamma^d$  is due to a decrease in ester bonds on the PET surface as wax concentration increases. The coating adhesion of laminated steel sheets correlates with the work of adhesion, indicating that wax-induced adhesion loss is attributable to reduced  $\gamma^d$ . These findings suggest that optimizing wax content is essential to balance lubricity and coating adhesion in laminated steel sheets.

## 1. はじめに

近年、飲料缶や食料缶の分野において、ポリエステルフィルムを被覆したラミネート鋼板を用いた製品が広く実用化されている<sup>1,2)</sup>。ラミネート鋼板は従来の塗装材と比較して、塗装・焼付け工程の省略により製造コストを低減できること、有機溶剤などの有害物質を製造工程から排除できることなどの利点がある<sup>2,3)</sup>。このような缶用ラミネート鋼板には、加工性、耐食性、鋼板とのフィルム密着性といった基本特性が要求される。さらに、缶の外面に内容物の識別や意匠性の付与を目的としてフィルム表面に直接印刷を行う場合は、印刷に用いられる塗料との密着性が不可欠となる。一方、ラミネート鋼板に深絞りなど厳しい成形加工が施される場合、加工時の摩擦係数を低減する目的で缶外面フィルムにワックスを添加する手法が用いられる<sup>4)</sup>。一般に、ワックスの添加により成形性は向上するが、塗料密着性は低下する傾向があるため、深絞りしたラミネート鋼板に印刷する

用途では、両者を両立させる製品設計が求められる。

塗料密着性に影響を及ぼす因子としては、分子間力、一次結合、機械的結合、内部応力などが挙げられ、これまで、缶成形後の残留応力との関係については報告がある<sup>5)</sup>。しかし、フィルム中の添加剤による表面特性の変化や、それに伴う分子間力の変化に着目した研究は少ない<sup>6)</sup>。本研究では、PET フィルム中に添加するワックス量を変化させ、これらのラミネート鋼板の表面自由エネルギーの違いを調査し、塗料密着性に及ぼす分子間力の影響を評価した。さらに、塗料との接着仕事を用い、塗料密着性に影響の大きい因子について検討した。

## 2. 実験方法

### 2.1 供試材

ラミネート鋼板の原板として板厚 0.22 mm のクロムめっき鋼板 (Tin Free Steel: 以下, TFS) を使用した。表 1 に示す 6 種のフィルムを、フィルムの融点以上に加熱した TFS 表面に熱融着した後、水冷処理を施し、さらに 180°C の熱風

2025 年 9 月 25 日受付

表1 供試フィルム

Table 1 Laminated films examined in this study

No.	Polymer	Additive	Amount of additive (wt%)
1	PET	—	—
2	PET	PE WAX	0.05
3	PET	PE WAX	0.10
4	PET	PE WAX	0.20
5	PET	PE WAX	1.00
6	Nylon6	—	—

炉で10分間加熱することで供試材を作製した。No.1は、イソフタル酸を共重合させた二軸延伸ポリエチレンテレフタレート (PET) フィルム (融点 248°C, 厚さ 20 μm) を熱融着したラミネート鋼板である。また, No.2~No.5は, No.1と同組成の PET フィルムに対し, 融点 125°Cのポリエチレン (PE) ワックスをそれぞれ 0.05, 0.10, 0.20, 1.00 wt%の割合で添加したワックス添加 PET フィルムを熱融着したラミネート鋼板である。No.6は, 6-ナイロンフィルムで同様に作製されたラミネート鋼板であり, PET フィルムを基材とするラミネート鋼板と比較して表面自由エネルギーが低く, 各成分の比率が異なることから, 比較材として用いた。これらの供試材は, ワックス添加量の違いによる表面特性の変化を系統的に評価するために設計されており, 塗料密着性に及ぼす影響因子の解析に使用した。

## 2.2 塗料密着性試験

No.1~No.6のフィルムを用いたラミネート鋼板上にポリエステル-メラミン系塗料を印刷適性試験機 (熊谷理機工業 (株) 製) により塗布し, 続いて 215°Cに設定した熱風乾燥炉で1分間の焼き付け処理を行って塗装材を作製した。

塗料密着性の評価には, 荷重変動型摩擦摩耗試験機 (新東科学 (株) 製 HHS 2000) を用いた。試験は, 塗装されたラミネート鋼板の塗装表面上にサファイア圧子 (先端 R: 0.6 mm) を接触させ, 掃引速度 2 mm/s, 移動距離 30 mm, 荷重を 10 g から 500 g まで連続的に変化させて実施した。掃引中に塗料の剥離が発生した時点の摩擦力を「塗料剥離摩擦力」と定義し, これを塗料密着性の指標として定量化した。

## 2.3 表面自由エネルギー測定および接着仕事の算出

表2に示す表面自由エネルギーが既知<sup>7)</sup>の6種類の液体 (イオン交換水, グリセロール, ホルムアミド, エチレングリコール, ジョードメタン, α-ブromonaphthalene) を用い, 接触角計 (協和界面科学 (株) 製 CA-D 型) で各液体と供試材および塗装表面に対する静的接触角を測定した。測定は, 室温 20°C, 相対湿度 50±10%の環境下で, 2 μLの液滴を滴下する液滴法により実施した。それぞれの液体で得られた接触角の測定値と既知の表面自由エネルギー値を用い,

表2 液体の表面自由エネルギー

Table 2 Surface free energy of liquids

Liquids	Surface free energy (mN/m) <sup>7)</sup>			
	$\gamma_L$	$\gamma_L^d$	$\gamma_L^p$	$\gamma_L^h$
Water	72.8	29.1	1.3	42.4
Glycerol	63.4	37.4	0.2	25.8
Formamide	58.2	35.1	1.6	21.5
Ethylene glycol	47.7	30.1	0	17.6
Methylene iodide	50.8	46.8	4.0	0
α-Bromo naphthalene	44.6	44.4	0.2	0

拡張 Fowkes の理論に基づく北崎・畑らの式 (1)<sup>7)</sup> から6つの式を構築し, 線形回帰により誤差を最小化する方法<sup>8)</sup>で各成分を算出した。これにより表面自由エネルギーの分散力成分  $\gamma^d$ , 双極子間力成分  $\gamma^p$ , および水素結合成分  $\gamma^h$  を得た。

$$\gamma_L(1 + \cos\theta) = 2\sqrt{\gamma_s^d\gamma_L^d} + 2\sqrt{\gamma_s^p\gamma_L^p} + 2\sqrt{\gamma_s^h\gamma_L^h} \quad \dots (1)$$

さらに, ラミネート鋼板と塗料との間の接着仕事  $W_a$  は, Young-Dupré の式と式 (1) を組み合わせた式 (2) により算出した。これにより, 界面における分子間力の寄与を定量的に評価した。

$$W_a = W_a^d + W_a^p + W_a^h = 2\sqrt{\gamma_1^d\gamma_2^d} + 2\sqrt{\gamma_1^p\gamma_2^p} + 2\sqrt{\gamma_1^h\gamma_2^h} \quad \dots (2)$$

## 2.4 X線光電子分光 (XPS) 測定

ラミネート鋼板フィルム表面の元素組成および化学結合状態を評価するため, X線光電子分光 (X-ray Photoelectron Spectroscopy: XPS) 測定を実施した。測定には, SSI 社製 SSX-100 型 XPS 装置を用い, 単色化 Al Kα 線を X線光源として使用した。測定条件は, 測定領域 600 μm, 積算回数 6 回, 光電子脱出角 35° とした。

PET フィルムにワックスを所定の割合で添加したラミネート鋼板のワイドスキャンスペクトルから得られた O 原子の比率 ( $O_{sa}$ ) と, ワックスを添加していない No.1 の PET フィルムの O 原子比率 ( $O_p$ ) との差分を用いて, フィルム表面に存在する PE ワックスの比率を以下の式 (3) により算出した。

$$\text{表面ワックス比率 (\%)} = (O_p - O_{sa}) / (O_{PET}) \times 100 \quad \dots (3)$$

また, 図1のように C1s 領域のナロースキャンスペクトルから, C 原子の結合状態を解析した。ナロースキャンスペクトルは C-C (284.8 eV), C-O (286.4 eV), COO (288.8 eV) に対応するピークに分離でき, それぞれのピーク面積から各結合

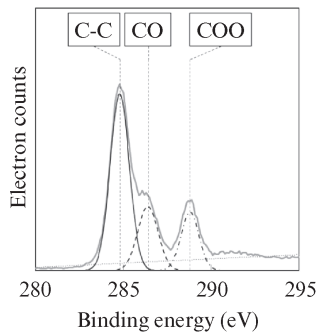


図1 サンプル No.1 の X 線高電子分光分析の C1s スペクトル  
Fig. 1 C1s spectra of X-ray photoelectron spectroscopy of sample1

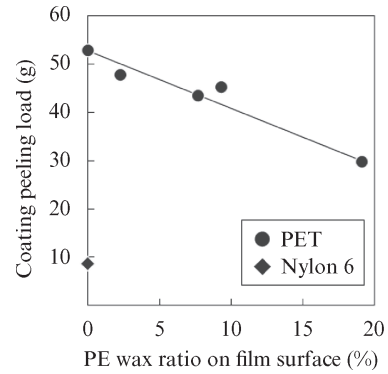


図3 塗料剥離摩擦力とフィルム表面のワックス比率の関係  
Fig. 3 Relationship between PE wax ratio on film surface and polyester-melamine coating peeling load

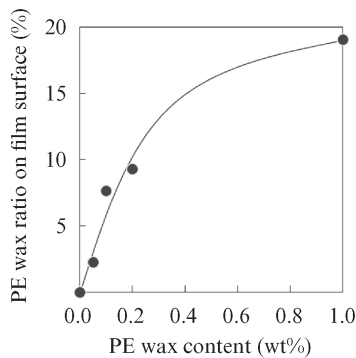


図2 PE ワックス添加量とフィルム表面の PE ワックス比率の関係  
Fig. 2 Relationship between PE wax content and PE wax ratio on film surface

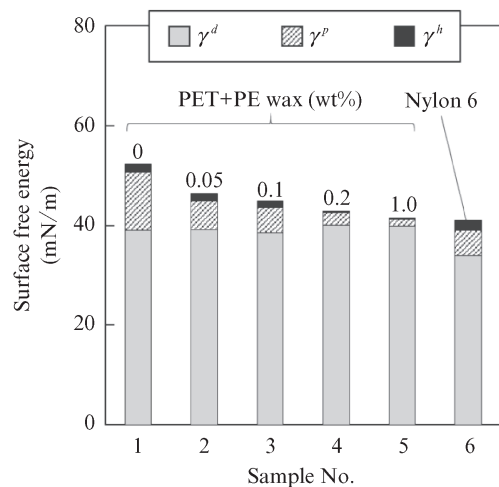


図4 ラミネート鋼板の表面自由エネルギー  
Fig. 4 Surface free energy of laminated steel sheets

状態の比率を算出した。

### 3. 結果

#### 3.1 PET フィルム表面のワックス比率

PET を基材としたラミネート鋼板におけるワックス添加量とフィルム表面のワックス比率との関係を図2に示す。ワックス添加量の増加に伴い、フィルム表面におけるワックス比率は増加した。また、表面におけるワックス比率が、フィルム中に添加されたワックス量に対して相対的に高いことから、ワックス成分がフィルム表層に濃化していることが示唆された。

#### 3.2 ラミネート鋼板の塗料密着性

ラミネート鋼板の塗料剥離摩擦力とフィルム表面のワックス比率との関係を図3に示す。PET を基材としたラミネート鋼板は、フィルム表面のワックス比率が増加するにつれて塗料剥離摩擦力が低下した。このことから、フィルム表面に存在するワックスが塗料密着性を阻害する要因であると考えられる。また、6-ナイロンフィルムをラミネートした No.6 は、PET 基材のラミネート鋼板と比較して塗料剥離摩擦力

が低く、ワックス添加による変化だけでなく、基材となるフィルム種が異なることによっても、塗料密着性が変化することが確認された。

#### 3.3 ラミネート鋼板の表面自由エネルギーと塗料との接着仕事

各供試材の表面自由エネルギーの算出結果を図4に示す。PET を基材としたラミネート鋼板 (No.1~No.5) では、PE ワックス添加量の増加に伴い表面自由エネルギーが低下した。また、6-ナイロンフィルムをラミネートした No.6 の表面自由エネルギーは、PET に 1.0 wt% のワックスを添加した No.5 と同等であったが、No.5 に比べて、表面自由エネルギーの分散力成分  $\gamma^d$  が小さく、双極子間力成分  $\gamma^p$  および水素結合力成分  $\gamma^h$  が大きかった。PET フィルム表面の PE ワックス比率と表面自由エネルギー各成分 (分散力成分  $\gamma^d$ 、双極子間力成分  $\gamma^p$ 、水素結合力成分  $\gamma^h$ ) との関係を図5に示す。分散力成分  $\gamma^d$  はワックス比率に依存せず一定であったが、特に、双極子間力成分  $\gamma^p$  および水素結合力成分  $\gamma^h$

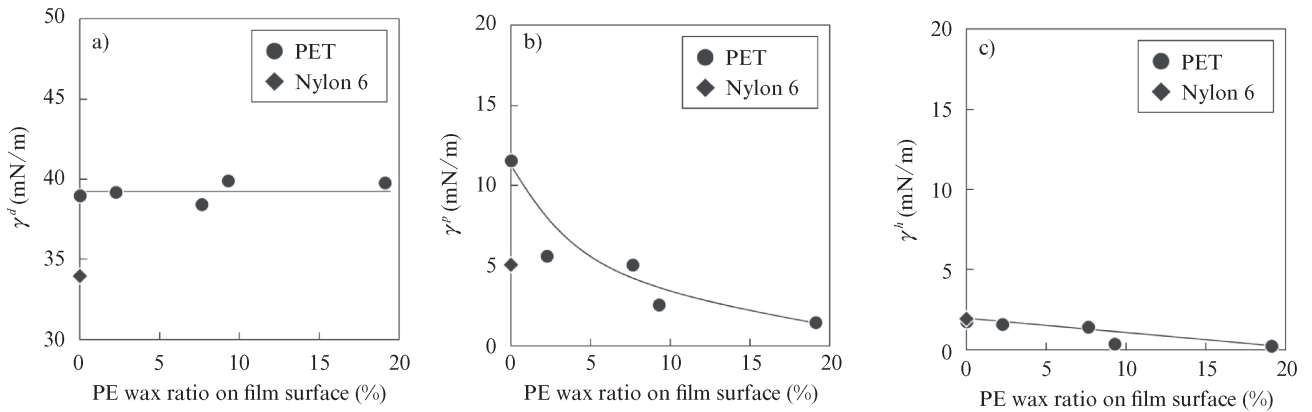


図5 フィルム表面のPEワックス比率と a)  $\gamma^d$ , b)  $\gamma^p$ , c)  $\gamma^h$   
 Fig. 5 Relationship between PET wax ratio on film surface and a)  $\gamma^d$ , b)  $\gamma^p$ , c)  $\gamma^h$

表3 塗料の表面自由エネルギー

Table 3 Surface free energy of polyester-melamine coating

	Surface free energy (mN/m)			
	$\gamma$	$\gamma^d$	$\gamma^p$	$\gamma^h$
Polyester-melamine coating	37.2	34.9	2.3	0

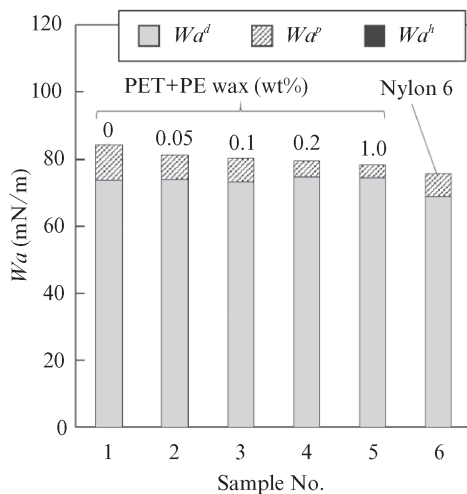


図6 サンプルと塗料間の接着仕事

Fig. 6 Work of adhesion ( $W_a$ ) between samples and polyester-melamine coating

はワックス比率の増加に伴い減少した。表3に、使用したポリエステル-メラミン系塗料の表面自由エネルギーを示す。本塗料は、水素結合成分  $\gamma^h$  がなく、主成分は分散力成分  $\gamma^d$  である。

ここで、式(2)を用いて各試料と塗料との間の接着仕事  $W_a$  (分散力成分  $W_a^d$ , 双極子間力成分  $W_a^p$ , 水素結合成分  $W_a^h$  の合計) を算出した結果を図6に示す。PETフィルム表面の  $W_a$  は、ワックス添加量の増加に伴い低下した。 $W_a$  を構成する各成分のうち、 $W_a^d$  の寄与が最も大きい

ラミネート表面の分散力成分  $\gamma^d$  はワックス濃度によらずほぼ同程度であることから  $W_a^d$  に試料間で差は生じない。さらに、使用した塗料は水素結合成分  $\gamma^h$  を持たないことから  $W_a^h$  は0となり、 $W_a^h$  も試料間に差はない。これらの関係から、 $W_a$  に影響する因子は  $W_a^p$  のみであり、ワックス添加量の増加に伴って  $W_a$  が低下するのは、前述の双極子間力成分  $\gamma^p$  の低下に起因するものであると示唆される。

一方、6-ナイロンフィルム表面の接着仕事  $W_a$  は1.0 wt%のPEワックスを添加したPETフィルム表面よりも低い。これは、 $W_a$  を構成する各成分のうち、 $W_a^d$  の寄与が最も大きく、6-ナイロンフィルム表面の分散力成分  $\gamma^d$  がPETフィルムよりも小さいためであり、この差が塗料剥離摩擦に影響したと考えられる。

#### 4. 考察

##### 4.1 表面自由エネルギーに及ぼすワックス添加の影響

ラミネート鋼板フィルムの表面自由エネルギーを三成分(分散力成分  $\gamma^d$ , 双極子間力成分  $\gamma^p$ , 水素結合成分  $\gamma^h$ )に分けて解析すると、分散力成分  $\gamma^d$  はPETと6-ナイロンの基材により差異が見られた(図5a)。フィルム種の違いで見ると、PETは芳香族環(ベンゼン環)を含むため、電子密度が高く、さらに  $\pi$  電子系による分子間の瞬間的な誘起双極子が強く働きやすいのに対し、6-ナイロンは柔軟な脂肪族鎖中心の構造であり、電子密度が低く、 $\pi$  電子系も持たないため、分散力は相対的に弱いと考えられる<sup>9)</sup>。一方、PETを基材とした場合、PEワックスを添加しても、分散力成分  $\gamma^d$  には影響せず一定であったが、フィルム表面のワックス比率の増加に伴い、双極子間力成分  $\gamma^p$  および水素結合成分  $\gamma^h$  が明確に減少する傾向が確認された(図5b, 5c)。これらの結果は、ワックス添加によって極性相互作用が低下し、表面自由エネルギーの低下に寄与していることを示している。

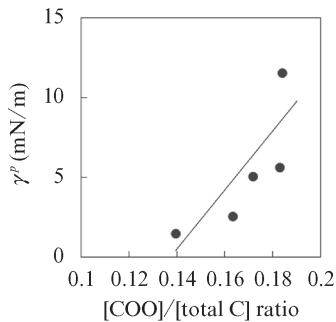


図7 フィルム表面のエステル結合比率と双極子分子間力 $\gamma^p$ の影響

Fig. 7 Relationship between [COO]/[total C] ratio on PET based film surface and  $\gamma^p$

そこで、PET フィルムの表面に濃化したワックスが、双極子間力成分 $\gamma^p$ および水素結合成分 $\gamma^h$ にどのように影響をおよぼすか考察する。

双極子間力成分 $\gamma^p$ は、双極子モーメント間の静電引力（双極子モーメント同士の相互作用）および誘起力（双極子モーメントと有機双極子モーメント間の相互作用）に由来する成分であり、分子構造に依存する。そのため、表面を構成する分子の双極子モーメントの大きさについて考える必要がある。本検討ではPEワックスを添加することで、双極子モーメントを持たない脂肪族炭化水素部が表面に濃化、PETに含まれる高い双極子モーメントを持つエステル結合部<sup>10,11</sup>が減少することが想定される。ここで、PETを基材とした試料について、XPS測定のパーク分離によりフィルム表面のエステル結合に帰属されるCの比率を算出した。エステル結合に由来するC比率と双極子間力成分 $\gamma^p$ の関係を図7に示す。ワックス添加量が多いほどフィルム表面のエステル結合は減少しており、さらにこのエステル結合比率の低下に伴い、双極子間力成分 $\gamma^p$ が低下することが確認された。PETのベンゼン環部やPEワックスの脂肪族炭化水素部が双極子モーメントを持たないのに対し、PETに含まれるエステル結合部のC=O結合は高い双極子モーメントを有することが知られている<sup>10,11</sup>。このことから、ワックス添加によってフィルム表面に存在するエステル結合部が減少することで、双極子間力成分 $\gamma^p$ の低下を引き起こすと考えられる。

次に、水素結合は軌道間相互作用および静電引力の影響を含むと考えられているが<sup>12</sup>、静電引力は双極子間力成分 $\gamma^p$ に含まれる。よって、水素結合成分 $\gamma^h$ は軌道相互作用で被占軌道から空軌道への電子の非局在化に起因する分子間力である。被占軌道から空軌道への電子の非局在化に起因する相互作用に寄与する要因として、PET中に存在するエステル結合上の酸素(O)原子、水素供与体としてPETの末端カルボキシル基、および水酸基が考えられる。これらの官能基に含まれるO原子は非結合性の孤立電子対（被占軌道）を有しており、他の分子の水素ドナー部の空軌道と

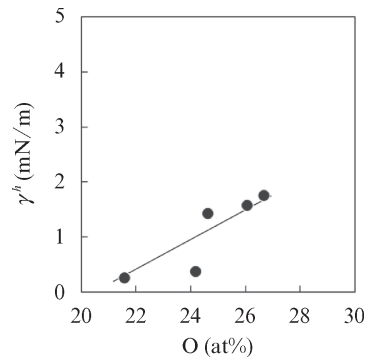


図8 フィルム表面のO原子比率と $\gamma^h$ の関係

Fig. 8 Relationship between O atom ratio on PET based film surface and  $\gamma^h$

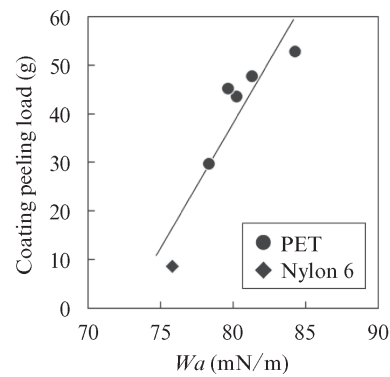


図9 接着仕事と、塗料剥離摩擦力の関係

Fig. 9 Relationship between  $W_a$  and polyester-melamine coating peeling load

の間で軌道間相互作用を形成することで、水素結合成分 $\gamma^h$ に影響を与える。ここで、XPS測定により算出したPETのO原子比率と水素結合成分 $\gamma^h$ との関係を図8に示す。O原子比率は、ワックス添加量が多いほど低い傾向となり、O原子比率の減少に伴って $\gamma^h$ が低下する傾向が確認された。PET中の末端カルボキシル基や水酸基は、分子末端に限られ、存在量が極めて少ない。そのため $\gamma^h$ の低下は、主にPET中に繰り返し構造として多数存在するエステル結合部に存在する酸素原子の減少による影響と推察される。このことからPEワックスの添加量を増加させたことで、フィルム表面に存在するエステル結合部が減少し、それに伴って水素結合成分 $\gamma^h$ も減少したと考えられる。

以上から、双極子間力成分 $\gamma^p$ 、および水素結合成分 $\gamma^h$ の減少は、ワックス濃度増加に伴って、ラミネート表面に露出するエステル結合部が減少するためであると考えられる。

## 4.2 塗料密着性と接着仕事の関係

図3および図6に示す結果より、PETを基材としたラミネート鋼板では、フィルム表面のワックス比率の増加に伴い、塗料密着性および接着仕事( $W_a$ )がそれぞれ低下した。

$W_a$  は分子間力により接着している界面を引き離すのに必要な仕事量であり、塗料剥離摩擦力と  $W_a$  の関係を図 9 に整理した。 $W_a$  の増加に伴い塗料剥離摩擦力も増加したことから、PET フィルム表面と塗料との間の分子間力が大きいほど、塗料密着性が向上することがわかった。PET フィルム表面は、ワックス添加によってエステル結合部が減少し、双極子間力成分  $\gamma^p$ 、水素結合成分  $\gamma^h$  が変化するが、今回使用した塗料は水素結合成分  $\gamma^h$  を有していない。そのため、PET を基材としてワックス添加を行った本検討では、双極子間力成分  $\gamma^p$  が接着仕事  $W_a$  に寄与し、塗料密着性に影響した因子であると言える。

## 5. おわりに

本研究では、ワックス添加 PET フィルムラミネート鋼板における塗料密着性の低下要因を、表面自由エネルギーおよび接着仕事の観点から解析した。得られた知見を以下に示す。

- 1) ワックス添加量の増加に伴い、フィルム表面のワックス比率は増加し、これにより表面自由エネルギーの双極子間力成分  $\gamma^p$  および水素結合成分  $\gamma^h$  が減少した。一方、分散力成分  $\gamma^d$  は添加量に依存せず一定であった。これらの結果は、ワックス添加による極性相互作用の低下が表面自由エネルギーの低下に寄与することを示している。
- 2) ラミネート鋼板と塗料との間の接着仕事  $W_a$  は、ワックス添加量の増加に伴い低下した。特に、 $W_a$  の低下は双極子間力成分  $\gamma^p$  の減少に起因する双極子間力成分  $W_a^p$  の低下によるものであった。
- 3) 塗料密着性は、接着仕事  $W_a$  の増加に伴い向上する傾向を示した。したがって、ラミネート鋼板と塗料との界面における分子間力が大きいほど、塗料密着性が高まることが示唆された。

- 4) PET フィルムへのワックス添加による塗料密着性の低下は、フィルム表面のワックス比率増加に伴う双極子間力成分  $\gamma^p$  の低下に起因する分子間力の減少によるものであると考えられる。

以上から、添加するワックス量を変化させ表面自由エネルギーを制御することが、加工性と塗料密着性を両立させた製品設計の指針として有用であることがわかった。

### 参考文献

- 1) 今津勝宏, 佐藤一弘. ポリエステルフィルムラミネート鋼板を用いた薄肉化深絞り缶 “TULC<sup>®</sup>” の開発. 色材. 1995, vol. 23, no. 10, p. 622-628.
- 2) 山中洋一郎, 北川淳一, 中丸裕樹. フィルムラミネート鋼板の表面自由エネルギーが内容物取り出し性に及ぼす影響. 表面技術. 2013, vol. 64, no. 10, p. 560-564.
- 3) 宮澤哲夫, 今津勝宏. 容器用塗膜の新展開—ラミネート—. 表面技術. 1996, vol. 47, no. 8, p. 677-681.
- 4) 河合佑哉, 北川淳一, 吉田安秀, 小島克己. ラミネート鋼板フィルム表面へのワックス濃化による表面物性変化. 材料とプロセス. 2018, vol. 31, no. 2, p. 860.
- 5) 吉村国浩, 田屋慎一. 無延伸ポリエステルフィルムラミネート鋼板を用いた 2 ピース飲料缶 (TULC) の塗料密着性. 東洋鋼板. 2013, vol. 37, p. 1-8.
- 6) 畑敏雄. 接着の界面化学. 工業化学雑誌. 1970, vol. 73, no. 1, p. 10-15.
- 7) 北崎寧昭, 畑敏雄. Fowkes 式の拡張と高分子固体の表面張力の評価. 日本接着協会誌. 1972, vol. 8, p. 131-141.
- 8) 下山啓介, 納所伸二, 中森英雄. 固体の表面自由エネルギー測定方法及びその測定装置. 特許公報. 2007, JP4012891.
- 9) Cao, Y.; Wong, M, W. Roles of electrostatic interaction and dispersion in CH...CH, CH... $\pi$ , and  $\pi$ ... $\pi$  ethylene dimers. J. Mol. Mode. 2014, vol. 20, p. 2185-2196.
- 10) Israelachvili, J. N. Intermolecular and Surface Forces. 3rd ed., Academic Press, 2011, 704p.
- 11) Mark, H.; Tobolsky, A. V. Physical Chemistry of High Polymeric Systems. 2nd ed., Interscience Publishers, 1950, 506p.
- 12) 岩岡道夫. 現代化学. 東京化学同人, 1996, 80p.
- 13) 河合佑哉, 吉田安秀, 北川淳一, 鈴木善継. ワックス添加フィルムラミネート鋼板の塗料密着性に関する表面自由エネルギーによる解析. 表面技術. 2021, vol. 72, no. 7, p. 398-403.

本稿は、参考文献 13) の論文の一部表現を変更して記載しております。