

≡≡≡ 総 説 ≡≡≡

自動車における高分子材料の耐久性評価

Durability Evaluation of High Molecular Material in a Vehicle

竹内 勝政*1, 林 秀典*2, 栗本 英一*3

1. はじめに

自動車が生に現れ、既に150年が経過してきたが、特に戦後合成ゴム・合成樹脂の技術的な進展と、顧客ニーズに応える形で、自動車への高分子材料の適用はあらゆる部位に拡大している。また近年では地球環境保護の観点からも低燃費化等を目的とした軽量化のため、金属部品の樹脂代替化がますます進んでいる。

一方で顧客の主要ニーズの一つに長寿命化があり、耐久性がより強く求められているが、有機高分子材料そのものは金属材料と異なり、使用環境温度近くに転移点をもつため、市場ストレスによる影響を受けやすく、適正な評価を実施し、車両信頼性を確保することが非常に重要である。

加えて、よりお客様のニーズにタイムリーに応えるため、要求期間での車両開発が必要なため、耐久性判断を必要最小限な期間で行うことも必要であり、このための適正な加速試験も必要となっている。

2. 自動車の動向と高分子材料

近年の自動車の技術開発は目覚しく、毎年新たなコンセプトを有した車両が登場している。元々自動車の基本機能は「走る・止まる・曲がる」であり、昭和の時代はこれらの機能の高性能が主体であったが、現在の着眼点はパーソナルな快適性と地球・人類にとっての環境保全となっ

ている。地球温暖化対策として二酸化炭素の排出量を抑制する必要があるため、自動車としては低燃費が必要となっており、この最も単純な方策が軽量化である。図-1に示すように車両の燃費と車両重量は非常に高い相関を持っており、低燃費な車両を得る方策は車両の軽量化の効果が大きく、このため、金属部品の多くが樹脂化されている。

一方で排出ガスそのものを低減するため、ハイブリッド車の市場投入や燃料電池車の開発も急がれており、新たな使用環境下での高分子材料の耐久性見極めが必要となっている。また、二酸化炭素排出抑制のひとつの考え方として、カーボンニュートラルといった概念が導入され、石油系高分子材料から天然由来の材料への置換も開発が進められている。

更に車両の長寿命化の要望は強く、図-2に示すように車両残存率は1970年に比較し、大幅に延長され現在もまだ、年々延長してゆく傾向にある。

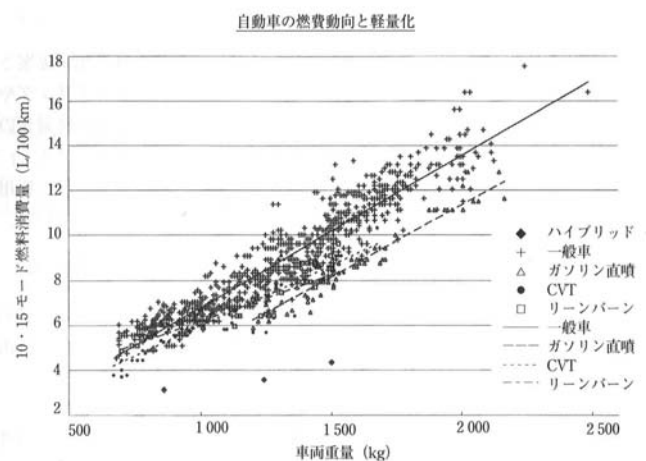


図-1. 車両重量と燃費⁽¹⁾

*1 Katsumasa Takeuchi 材料技術部

*2 Hidenori Hayashi 材料技術部 第1技術室

*3 Hidekazu Kurimoto 材料技術部 第1技術室

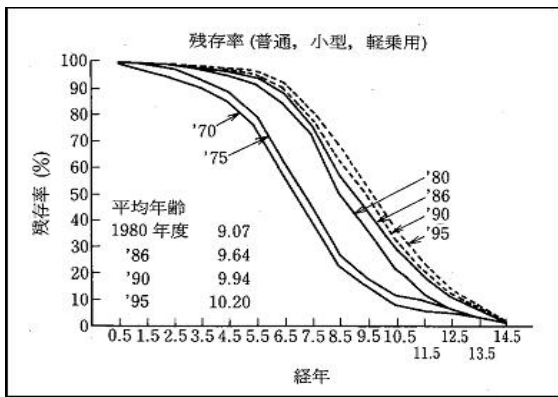


図-2. 車両残存率 (2)

この他にも車両に要求される項目が多々あり、これらの要求を満たすため、数多くの高分子材料が車両に採用されるようになってきている。

一方で車両の信頼性を示す判断材料としては平成17年1月の国土交通省ホームページの自動車リコール届出及び対象台数の推移(速報値)を基に解析すると図-3のようになり、車両の台数は少し頭打ちの感はあるが、リコール台数比率は年々増加する傾向にある。このことはまだまだ、車両としての信頼性評価技術開発そのものが、新規技術開発の速度に追従できていない部分があることを示していると思われる。

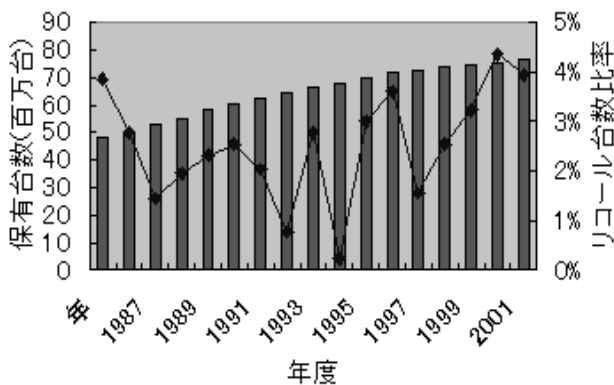


図-3. リコール台数の変化

自動車リコール制度とは？

欠陥車による事故を未然に防止し、自動車ユーザを保護することを目的とするものであり、自動車製造者等が、その製造し、又は輸入した同一の形式の一定の範囲の自動車の構造、装置又は性能が自動車の安全上、公害防止上の規定(道路運送車両の保安基準)に適合しなくなる恐れがある状態、又は適合していない状態で、原因が設計又は製造の過程にある場合に、その旨を国土交通省に届け出て自動車を回収し、無料で修理する制度です。

3. 自動車における耐久性評価

3-1. 信頼性保証 (3)

自動車の利用される環境は非常に多彩であり、それら個々の環境を模した試験は困難であるが、お客様にとってみると自動車は一般的にいえば高価なもので、その商品がお客様の期待に応える寿命を有しておらず、途中で故障したりすれば、二度とそのメーカーの車を購入しようとは思わない。また、車両の不具合として、たった1本のボルトが折れても重大な故障につながるケースもあることを認識しておかねばならない。

これらの状況から、自動車メーカーは信頼性保証のため、企画段階から生産準備・量産までに種々の試験を組み込み、評価を実施している。また、車両としての評価を満足させるため、部品一点毎に信頼性要求品質が定められ、部品毎の評価も必要となっている(図-4, 図-5)。試験評価部位の概要を図-6に示す。

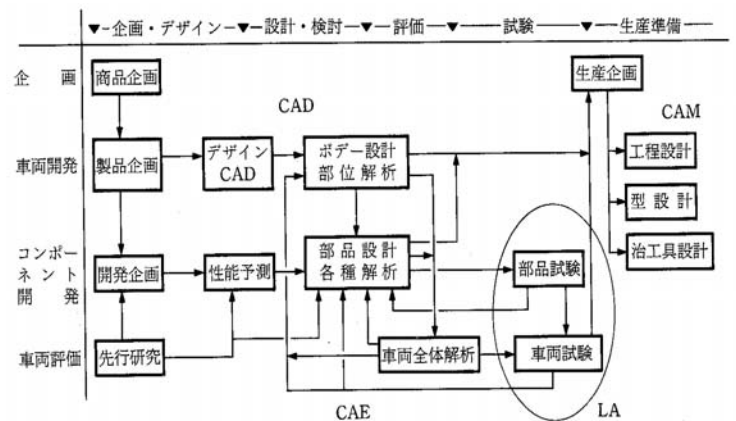
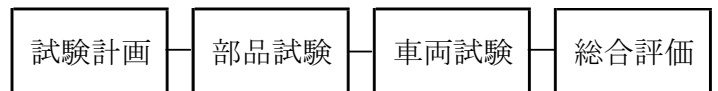


図-4. 車両開発と評価ステップ



- ・業務計画立案
- ・設備、要員計画
- ・原価管理
- ・エンジン試験
- ・駆動系試験
- ・振動騒音試験
- ・強度試験
- ・電子機器試験
- ・熱環境試験
- ・振動騒音試験
- ・排気ガス試験
- ・電波試験
- ・空力試験
- ・解析
- ・報告書作成
- ・操縦安定性試験
- ・衝突安全性試験
- ・耐久走行試験

図-5. 車両試験業務の流れ

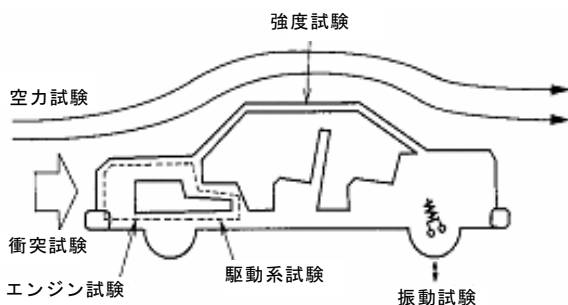
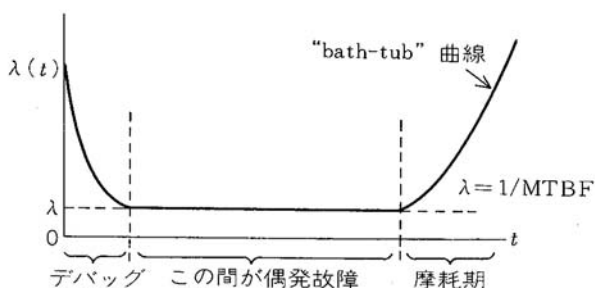


図-6. 試験評価部位の概要

一般に故障を議論する場合に用いられるのが、図-7に示す故障確率（バスタブ曲線）であり、故障は初期故障・偶発故障・疲労/磨耗故障の3つに大別され、本報の耐久性に関わる故障は疲労故障/磨耗故障に分類されるものである。



$\lambda(t)$: 故障率
 MTBF : 平均故障間隔

図-7. 故障確率⁽⁴⁾

自動車の信頼性試験はこの故障（アイテムが規定の機能を失うこと）を問題とする試験で、大入力による一発破壊や繰り返し荷重による疲労試験のほか、使用による品質・機能の低下、劣化を取り扱い、すなわち破壊以外にも磨耗やボルトのゆるみ、腐蝕、変色までも対象とする。

3-2. 耐久目標寿命

自動車に求められる耐久寿命は、基本的にはお客様のほとんど全てに満足してもらえる期間でなければならないが、現在の技術レベルでは、全ての部品を同一寿命とすることは、経済的に不合理であり、定期点検・車検などにより、部品交換を実施し、車両としての寿命を考えている。車両の種類により、その使い方が異なるため、一概には言えないが、一般的には15~30万km/10~20年が平均的な目標である。

3-3. 使用環境とストレス

これらの耐久試験を実施するには、車両の使用環境の把握により、ストレスを設定する必要がある。表-1に使用環境条件と負荷の名称・形態をまとめ、表-2に車両耐久試験の分類を示した。

表-1. 使用環境条件と負荷の名称・形態

使用環境条件	負荷 (stress)	
	名称	形態
1. 道路状況 [舗装, 未舗装, 標高, 勾配, 塩害, 塵, ほこり, 凍結]	路面負荷	・前後, 左右, 上下の曲げ, ねじり, 圧縮, 引張り等の荷重
2. 走行速度 [速度, 走行モード]	駆動負荷 制動負荷	・トルクピーク及び変動 ・前後荷重 ・制動トルク変動
3. 積載量 [過積載]	操作負荷	・操作の回数, 速度, 時間, 力
4. 操作荷重・頻度 [交通事情, 体格, 習慣]	熱負荷	・熱サイクル ・熱時間, 変位
5. 気象状況 [大気温度, 湿度, 雨量, 降雪, 風速]	物理的環境負荷 科学的環境負荷	・泥, ほこり, 温度, 勾配, 雪, 水, スプラッシュ, 石 ・塩害, オゾン, 温度, 湿度

表-2. 耐久試験の分類と環境負荷の関係

実車走行耐久試験	負荷名称	負荷					環境負荷	
		路面負荷	駆動負荷	制動負荷	操作負荷	熱負荷	物理	化学
実用走行耐久	一般路走行耐久	△	△	△	△	△	△	△
	総合路走行耐久	○	○	○	○	○	◎	○
加速促進耐久	極悪路走行耐久	◎						
	高速走行耐久 駆動系耐久		○	○	◎	○		
特殊耐久	腐食耐久						○	◎
	急発進耐久		◎					
	急制動耐久			◎				

◎: 極端に大きな負荷を再現 ○: 比較的大きな負荷を再現
 △: 一般的な大きさの負荷を再現

また、近年は自動車産業のグローバル化が進展しており、世界中の異なる環境下での信頼性保証が必要となっており、たとえば気温を考えた場合、瞬間記録では下は-80℃、上は60℃と非常に厳しいものである。これらは特殊な例であるが、低温では-40℃は頻繁に生ずる使用条件と考える必要がある。この他にも紫外線、湿度、塩害なども気象条件としては配慮が必要である。

しかしながら、最も配慮すべきは自動車部品個々の使用条件が異なることであり、例えば同じ内装部品でも、インストルメントパネルと呼ばれ

る太陽光の当たりやすい部品の最高温度とコンソール部分では20℃～30℃の差異が生ずる場合がある。

また、自動車は内燃機関を持っており、この燃料性状が各国により異なる場合が多く、この他にもブレーキフルード、エンジンオイルなども国により異なる場合がある。

3-4. 耐久寿命予測⁽⁵⁾

先に述べたように自動車の寿命は10年以上を考える必要があるが、現在の自動車の開発速度は速く、実走行で10年以上を保証することは経済的でなく、このため何らかの方法で実使用時の条件を再現し、また、短時間で保証するための加速試験が必要となっている。ここでは、種々の試験結果を市場での寿命に如何に対応付けるかに焦点を絞り、その諸手法を表-3に示す。

4. 自動車用高分子材料の耐久性

4-1. 高分子の劣化反応⁽⁶⁾

高分子材料の力学的な劣化現象は、その分子が切断され、低分子量化していくことに由来していると言われている。表-4にエチレンの重合における分子量の増加と物性の変化が示されているが、分子量が増加すると化合物は、気体から液体へ、液体から固体へ、固体でも分子量が大きくなると脆い固体から硬い固体へと変化する。すなわち分子間力が大きくなり、高分子としての特徴が発現され、力学的に強い材料として利用できるようになる。劣化とは正にこの分子量低下により、力学的な性質が低下することを表している。

表-4 ポリエチレン $H-(CH_2-CH_2)_n-H$ の分子量と沸点、融点の関係

n	分子量	融点〔℃〕	沸点〔℃〕	常温での外観
1	30	-183	-88.6	気体
2	58	-135	-0.5	"
3	86	-94	69	液体
4	114	-57	126	"
5	143	-30	174	"
10	283	38	205	ろう状
15	423	66	235/1mmHg	"
20	562	81	241/0.3mmHg	"
30	842	99	分解	"
60	1,682	104	"	ろう状固体
100	2,802	106	"	もろい固体
1,000	28,002	110	"	硬い固体

また、実際の高分子材料は固体状態で使用され、樹脂材料の場合、非晶部と結晶部が存在し、図-8に示すように非結晶部の劣化が進みやすいことが分っている。同様に一般に使用される高分子材料は補強剤・充填剤を含有する場合が多く、マクロ的・ミクロ的に不均質な状態となっており、外部ストレスに対して応力集中が発生する原因となっている。

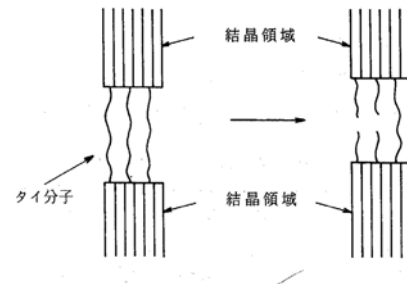


図-8. 非晶領域におけるタイ分子の切断

表-3. 耐久寿命予測法の分類

分類	寿命予測法 (仮称)	概要
類似製品の実績を利用する方法	比例倍法	ベンチ試験にてある寿命に関して類似製品に対する改良倍率を求め、それを類似製品の市場実績に掛けて改良品の寿命予測をするもの。
	特性値対応法	類似製品にてある特性の劣化段階毎に市場とベンチを対応付け、その対応関係より改良品の寿命を予測するもの。
	類似製品対応法	数種類の類似製品で、ある寿命値に関して市場とベンチの対応付けをし、その関係から改良品の寿命を予測するもの。
回収品をベンチ試験する方法	回収品ダメージ換算法	実車である期間走行させた後、それをベンチ試験する事によって新品の市場寿命を予測するもの。
	ベンチ試験と市場条件から求める方法	
ベンチ試験と市場条件から求める方法	物性値低下法	ある特定の劣化実験式を利用し、長時間域を予測するもの。
	S-N線図法	高ストレス域でS-N線図を作成し、使用条件域(低ストレス域)での寿命を予測するもの。
	マイナー則法	市場におけるストレスが変動している場合、ストレスレベルごとの累積被害でもって寿命を予測する。マイナー則(直接被害則)を適用する。
物性論的モデルと加速試験から求める方法	アレニウス法	各故障モードに対する定まった故障モデルを用いて、加速係数を定め、加速試験を実施して寿命を予測する。寿命が温度依存性を持つ場合、アレニウス法を用いることができる。

ポリマーの結合の切れやすさはそのポリマーを構成する結合エネルギーで左右される。これを越える外力や内部応力が発生する場合に破壊が始まるが、有機系高分子の場合、劣化反応の多くは酸化劣化反応であり、環境因子などにより発生するフリーラジカルが分子鎖の切断を引き起こし、低分子量化してゆく。

4-2. 自動車における高分子材料の劣化

自動車に用いられる高分子材料は多種多様ではあるが、その全てが自動車専用の特殊な材料が用いられる訳ではない。ただ、使用される環境が多岐にわたり、また使用部位・使用者によってもそのストレスの大きさ・頻度が異なることが特徴的である。自動車に加わるストレスを図-9に示すが、各ストレスが単独ではなく、複合されて影響を及ぼし、高分子材料の劣化が生ずる。

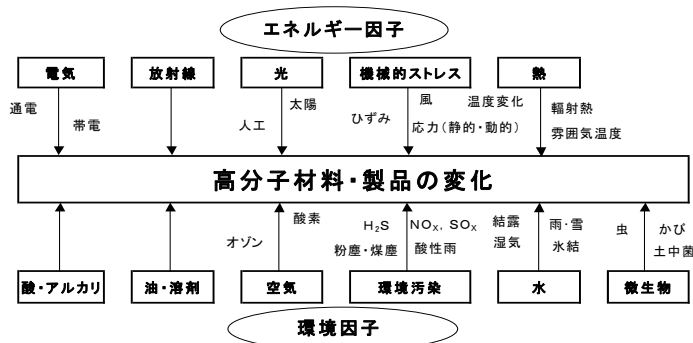


図-9. 高分子材料へのストレス概念

更に地域的にはゴムホースがネズミやテンなどの生き物に齧られて故障にいたるケースも報告されている。これらの部品に使用される材料の耐久試験・劣化試験を実施する上で重要なことは如何に実際の車両状態を再現するかであり、また、それを車両開発サイクルに合わせるべく、如何に必要最小限で実施できるかであり、この観点での事例を紹介する。

a. 耐油性材料の劣化⁽⁷⁾

自動車に用いられている燃料油やエンジンオイルは高温下で熱や酸素により、老化したり、酸化される。この際に、燃料油やエンジンオイルに接触するゴム部品はこれらの酸化物質等により、劣化が促進されることがある。この劣化現象を再現するため、いくつかの試験方法を考案している。

図-10に示すように自動車に使用される燃料・エンジンオイル等はその成分は炭化水素からなっているが、実使用時には熱や酸素の影響により、フリーラジカルが発生し、そのものが変質し、接触するゴム材料への劣化を促進する。

図-11, 12では市場で発生するガソリン中のパーオキサイド価の実測値からゴムのサワーガソリン試験を設定し、材料評価を実施している。

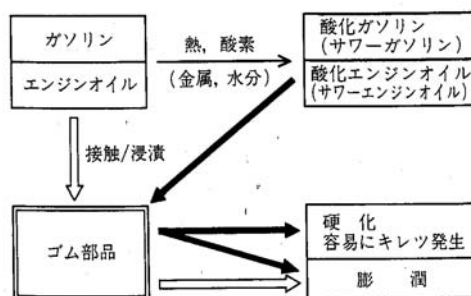


図-10. ゴム部品に対する酸化オイルの影響

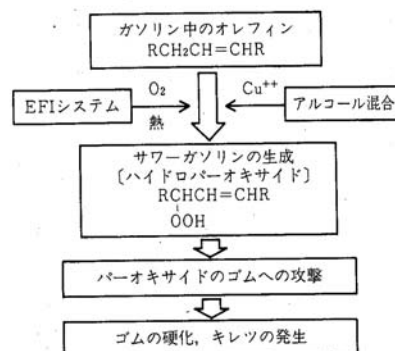


図-11. サワーガソリンの生成とゴムの劣化

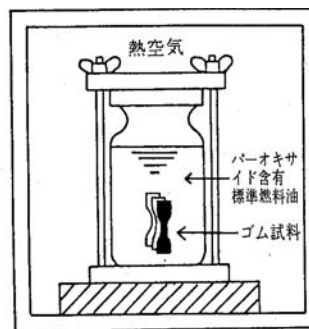


図-12. 密閉式サワーガソリン性試験装置

ガソリンと同様にエンジンオイルも実使用時に劣化するが、その劣化は空気の影響が大きいことが判っており、ここでは、図-13, 14に示すようなある特定温度下のエンジンオイル中に空気を吹き込む試験方法が考案されている。

これらの評価結果で実使用での耐久寿命を満足できる材料選定を実施している。

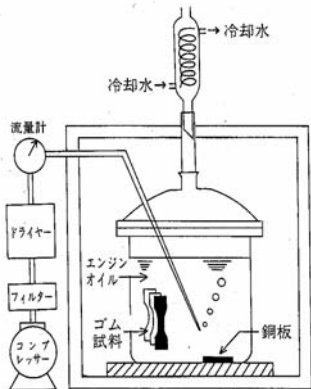


図-13. 空気吹込式耐油試験装置

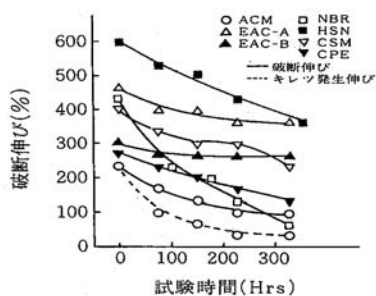


図-14. 空気吹込式サワーエンジンオイル性 (水10vol%添加)

b. 塗膜の高速耐候性試験法⁽⁸⁾

自動車の塗装は車両品質として重要な部分であるが、その耐候性評価は屋外暴露が必要となっており、車両開発期間短縮のネックとなっている。この対応として高速耐候性試験が考案されている。ここでは、屋外での塗膜の劣化反応を早くする2種の処理法を検討し、これらを交互に施す方法を開発した。(図-15, 16)

5. おわりに

今後益々発展を続ける自動車において信頼性確保は地味ではあるが、非常に重要な技術であり、そのためにはまず現地・現物による徹底した故障解析と解析結果に基づく市場再現テストがポイントであり、更に今後これらを踏まえた信頼性予測(CAEを含む)技術のレベルアップが重要となる。

参考文献

(1) (社)自動車工業会調べ, ガソリンAT車, 1999年出荷全型式
 (2) (3)自動車技術会, 自動車技術ハンドブック, 第3分冊, 試験・評価編 (1991)

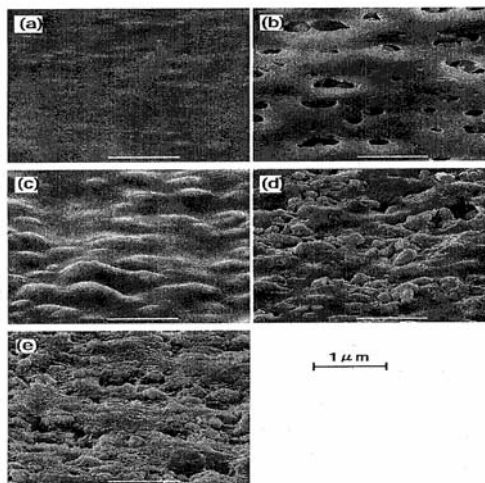
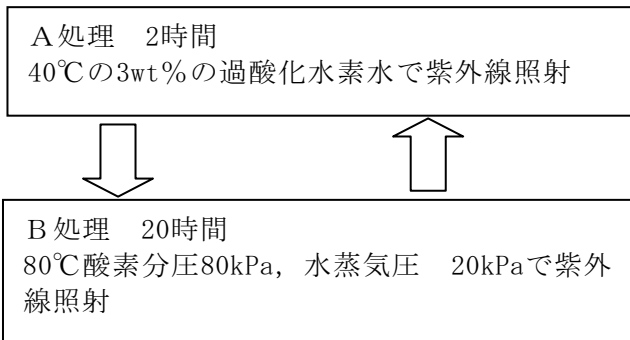


図-15 SEM images (60° tilted view) of coatings surface. (a) No treatment (b) After 30h of treatment A (c) After 100h of treatment B (d) After 132h of cyclic treatment (e) After 2-year outdoor exposure

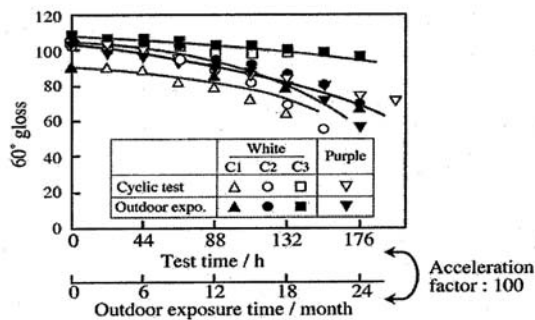


図-16 Gloss change by cyclic treatment and outdoor exposure.

(4)真壁肇, 日本規格協会,信頼性工学入門 (1985)
 (5) 福田弘, 田中博規, 豊田合成技報, vol.24 No.3,26
 (6) 筏秀之, 高分子化合物の劣化と安定性 (1982)
 (7) 杉本正俊他, 豊田合成技報, vol.28,No,2,51 (1986)
 (8) 森寛爾, 豊田中央研究所,R&Dレビュー vol.36,No.1,61 (2001)