高分子材料の耐久性 ——耐環境応力性とその評価方法——

大石 不二夫*

1. PL 法と耐久性

最短の内閣といわれた羽田内閣（2ヵ月間）が、平成6年7月1日に画期的な法律を制定した。それがPL法であり、Products Liabilityの略で、“製造物責任制”と訳される法律である。1995年7月1日に施行され、改めて話題を呼ぶことになった。その法律は前の細川内閣のとき、実業界の強い要請を振り切って、かなり消費者寄りの立法となった。当時の主務官庁であった科学技術庁の長官であった江田五月氏と田中事務次官が（それぞれ別所にて）“PL法は骨抜きにされるのか？”という筆者の質問に答えて、“PL法は本気で徹底して作りますヨ”と断言したことが記憶に生々しい。

PL法は消費者が購入した製品の欠陥が原因で被害を受けたとき、製造者（輸入品は輸入業者）に損害賠償を請求できる制度であり、ECやUSAでは既に定着しており、やっとわが国でも実現したものである。

製品の欠陥には、設計上・製造・検査上の欠陥が含まれ、製造者が故意や過失でなくても、製造（出荷）当時の技術水準から推定できたトラブルを予知しなかった場合は欠陥とされるため、従来の民法（100年以上前からの法律）とは比べものにならないほど製造者にとっては厳しさとなる。

当時の技術水準としてとくに把握しにくいものが、耐久性の予測であろう。

アメリカのPL法に接し、多額の賠償により倒産

に到った日本企業もあるという。

なお、このPL法では、製造後10年を経過すれば不問となり、10年の寿命が一応の目標となる。

そこで、耐久性や信頼性の重要性がますます高まり、寿命予測の要請も一層強くなることが明らかである。

一方、科学（サイエンス、Science）の役割りが問われるのもPL法である。“製造当時の技術水準で、予測可能なトラブルを見過して、被害を招いた場合には、欠陥製品とみなされる”という点が、今後大いに議論を呼ぶことになる予感がしてならない。

わが国で技術（テクノロジー、Technology）といえは科学技術と解釈され、科学と一体して取り扱われる。それは、R&Dを“研究と開発”と訳さずに“研究開発”と一体化して用いるのと通じている。

そこで、当時の技術水準とは、当時の科学技術水準とみなされ、科学を含めて、寿命予測や破壊予知あるいは各種使用条件の下での、材料の経時変化などを予測することが求められてくる。

これまでとかく、実業の世界では別世界扱いを受け、アカデミックな場（大学の理学系や学会など）に置かれていたサイエンスが、企業の職場（設計・製造・品質管理・法務など）や、法廷において、論議される時代となろう。PL法がそのきっかけとなることを、筆者は歓迎したい。なぜなら、筆者の永年（鉄研時代を含めて約

平成7.6.12受理
Durability of Polymeric Materials
—Durability under Environment and Stress Conditions and Evaluating Methods—
Fujio OHISHI

*神奈川大学理学部

平塚市土屋 2946 (〒259-12)

〔氏名〕 おおいし ふじお

〔現職〕 神奈川大学理学部教授

〔趣味〕 旅、とくに遺跡の探訪

〔経歴〕 昭和15年東京生れ。昭和38年東京都立大学（工業化学科）卒業、鉄道技研入所。有機化学ユニットリーダー、鉄道総研の主幹研究員を経て平成2年より現職。工学博士。専門：高分子材料の耐久性。

40 年)の専門である“高分子材料の耐久性”が,ドロ沼領域と敬遠されずに,同好の士がまた増えてくるからである。

筆者が大学へ移って5年が過ぎ,鉄研時代はSNJ (Seeds-Needs Joint)を提唱していたのに,STJ (Science-Technology Joint)を加えて提唱してきたが,陽の目を見られる時が来るという予感がする。

もともとSTJは,わが国にはオリジナリティが欠乏しているという現状を打破するために,唱えてきたもので,科学と工学を結びつけて,開発の芽を探ぐり,まねではない独自の新技术,新製品を創り出そうという主張であるが,PL法の対応策にも科学が求められ,科学と技術のジョイントが不可欠となってきたわけである。

ここでは,高分子材料(塗料も高分子材料である)の耐久性と信頼性の関連からはじめて,筆者自身の耐久性評価法の研究の紹介しながら実用上トラブルが多い環境条件と応力条件との相乗作用による劣化—環境応力劣化—とこれに対する安定性—耐環境応力性—に重点をおいて展望したい。

2. 信頼性と耐久性

製品すなわち材料システムの信頼性は,図-1に示すように,幾つかの要素から成り立っている。すなわち,

1) 品質の均一性……製品の要求機能を果たすため,品質が一定の範囲に入っていること。QCやTQCの普及により,日本の企業ではかなり確保されている。

2) 供給の安定性……一定の範囲の品質の製品が,ある期間,安定供給が可能なこと。

3) 物性の非変動性……製品はもとより,その構成材料の諸物性が,諸条件(温度,湿度,圧力,雰囲気など)により変動しにくいこと。変動しても製品の要求機能を充たす範囲内であること。ことに高分子材料は粘弾性体であり,ヤング率をはじめ諸物性が温度により支配されるため,要注意である。

4) 突発的变化への許容性……使用条件の突発的变化,例えば温度や湿度の急変や;力学的条件では,衝撃の付加などに対する許容性などが挙げられる。

5) アブノーマルな使い方への容認性……製品の実際の使用条件は,メーカーが考えているほど単純ではなく,思いもよらないアブノーマルな取扱いが少なくない。これらアブノーマルコンディションに対する許容性は実用品にとって必須である。

6) 耐久性……信頼性を制するのは,製品の信頼性の

図-1 信頼性と耐久性

図-2 物性の経年変化のタイプ

持続性と,その構成材料の材質と物性の耐久性である。信頼性の持続性とは前記1)~5)までの項目の経時的な保持性であり,構成材料の耐久性は別に取り扱っている。

次に耐久性に関しては,それぞれの環境,使用条件下で物性値の経年変化のタイプを分けると図-2となる。

A型:物性の経時変化がほとんどなく,長期間安定しているもの。

B型:使用直後幾分低下して,後はかなり安定なもの。

C型:徐々に物性が低下し,ある期間後に急激に低下して破壊するタイプ。

D型:徐々に低下するタイプであり,初めは変化が遅く,次第に速くなる。

E型:徐々に低下するタイプであるが,初めの変化は顕著で,次第に緩慢となる。

F型:物性が直線的に低下するタイプ。

G型:ある期間(誘導期間)は変化がなく,その後急に低下していくタイプ。

H型:物性が経時的に向上するタイプ,例えば高分子材料の強度が劣化に伴って向上する。これは硬くなり

図-3 物性変化の表示法

脆くなったため、伸び（破断時の伸長率）は低下する場合が多く、望ましい変化とはいえない。

実際の挙動は以上の組合せであり、しかも要求物性は単一ではなく、数項目から十数項目が要求される。経時的な変化の表示法の一例を図-3に示す。

3. 高分子材料の劣化と耐久性

高分子材料の劣化の基本を図-4に示す。高分子材料は、もともと主成分である高分子（ポリマー）と各種の配合物から成る複合物である。そのポリマーは単一なものではなく、通常正規分布の分子量分布を有する多分子性の物質であり、物性も多分散性を呈する。また、副成分はプラスチックで数種類、ゴムでは十数種類に及ぶことが通例である。

従って、高分子材料の劣化は、図-4に示すように、材料、成形加工（プロセッシング）、環境条件、外的エネルギーがルーレットのように回転しながら変化を遂げていく、複雑なプロセスとなる。

そのため、高分子材料の耐久性の評価、特に寿命予測は、信頼性の評価に際して重要でありながら、未解決な課題であり、個別の対応に限られている現状である。そこで、普遍性のある研究手法の確立が、筆者のライフワークとなっている。

とりわけ、実用上のほとんどの場合に要求される成形・加工ヒズミの内在と外力の下での環境条件と応力との相互作用による劣化（環境応力劣化と命名）と、それに対する耐久性（耐環境応力性）は、信頼性を解く鍵であり、筆者が特に重点を注いでいる研究領域である。

高分子材料の劣化と耐久性に関しては、拙著^{1)~3)}に詳しく採り上げている。

図-4 高分子材料の劣化の基本図³⁾

4. 高分子材料の耐久性研究例

高分子材料の耐久性の研究は二つに大別される。その一つは、高分子材料の主成分であるポリマーに着目し、その経時的な変化（主に化学変化）を調べてその機構を明らかにし、かつ安定化のための配合剤（老化防止剤など）などを見いだすものであり、“高分子の劣化と安定化”と総称される研究である。この分野をまとめた最近の成書の例を文献4)に掲げる。

もう一方の研究は、高分子材料をポリマーを主成分とする複合物と見て、実用上の環境、外力などの使用条件の下での安定性である耐久性を予測し、寿命を評価する、いわば“高分子材料の耐久性”と総称される研究である。この分野をまとめた最近の成書が文献3)である。

両者の研究は関連が深く、相互に補完する役割を担っている。

筆者は鉄道技術研究所において、後者の研究を中心に、ちょうど四半世紀にわたり展開してきたが、5年前に大学へ移って以来、前者の研究へも着手し、前者と後者を合せた、“高分子材料の劣化と耐久性”という領域に取組んでいる。

次に、材料システムの信頼性向上を目指した筆者らの高分子材料の耐久性に関する研究の流れを示す。

(1) プラスチックの複合因子による疲労の研究

高分子材料が繰返しの応力や変形を受け続ける時の変

化である疲労現象を、環境条件や劣化条件（紫外線、熱、薬液）を付加しながら評価できる新しい実験装置を考案、試作し、プラスチックを試料として、動的耐久性の影響因子と寄与率を明らかにした^{5)~11)}。

(2) 応力と環境条件との相互作用によるプラスチックの劣化の研究

環境薬液に浸漬しながら、応力（静的、動的）を付加し、応力緩和現象により劣化を評価する C 形法を考案して、ポリカーボネートを中心に環境応力劣化を調べ、S. S. C. インデックスを提案した。この値とフィールドテストとを対比して、両者の相関性を得て、耐環境応力性に関して現場使用 10 年間の寿命予測法を確立した^{12)~18)}。

(3) プラスチック・ゴム・熱可塑エラストマーのウェザリング

屋外で使用される材料が、気象条件（光、気温、湿度、降水、結露と蒸発、風など）や排気ガス（SO₂、H₂S、NO_x、CO₂ など）、煙降下物（タール状物質）ほかの因子で劣化を起こす。このことをウェザリング（weathering）と呼び、その安定性を耐候性（weatherability）という。これまで筆者らは、各種エンジニアリングプラスチック^{19)~21)}、各種スーパーエンジニアリングプラスチック^{21), 22)}、各種合成ゴム（SBR, CR, EPDM, CSM, SiR など）について²³⁾、共同研究を進めてきた。また、C 形法を応用して、応力負荷状態で屋外暴露を行い、ウェザリングの促進と応力の影響も調べた。なお最近、熱可塑性エラストマー各種について、耐候性の共同研究を開始している。

(4) スーパーエンジニアリングプラスチックのせん断強度特性と総合耐久性の研究

耐熱性に卓越するスーパーエンブラとして数種類（PPS, PEEK, PES, PEI を MXD 6 ナイロン、PPO, PA6-6, POM と比較）を採上げて、実用上要求の高いせん断強度特性と種々の耐久性（耐熱性、耐候性、耐冷熱衝撃性、耐疲労性など）を調べ、その傾向を明らかにした^{24), 25)}。この研究は、今日も続いている。

(5) 高分子劣化解析の先駆的手法の探索

高分子材料の劣化を解析する新規の手法を見いだす研究であり、新たな分析・解析手法を試みながら、耐久性の予測と寿命制御の深度化を目指す。例として、応力と薬液との相互作用（環境応力劣化）と、ケミルミメッセンズの同時測定可能な新装置を試作し、光音響分析（PAS）、ESR-オープンセル、SAICAS（表面界面解

析装置）などの適用性を試みる。

(6) 新機能性高分子材料の安定性・耐久性評価

最近、機能性高分子材料など新素材の発表が相次いでいるが、それらの安定性、耐久性については未知である場合が多い。これら貴重な材料を実用化するため、実用上必須の安定性、耐久性を明らかにし、向上策を見いだす。

具体例として、振動を電気に変換して制振、防音をはかる新しいマイクロコンポジットを東工大住田先生と共同研究している。また超薄膜など。

(7) 高分子材料のケモトライボロジー

摩擦摩耗現象の科学をトライボロジーというが、超音波モータ用の摩擦材料などを対象に選び、環境条件など化学的因子を加味したケモトライボロジカルな研究を行う。まず、「ケモトライボ装置」を試作し、環境剤の影響から着手し、真空中の挙動なども明らかにしつつある。

(8) 文化財の修復・防護用高分子材料に関する研究

文化財は人類共有の財産であり、その保存科学として、特に屋外の石像や石造建造物を対象に、修復と防護にシリコン系樹脂など高分子材料を適用するための研究で、浸透性、補強性、耐久性を解明しつつある。

5. 環境応力劣化と耐環境応力性

材料の使用現場における劣化トラブルの多くの場合、環境条件と応力条件との相乗作用による。そこで、筆者はこの現象を環境応力劣化と呼び、この劣化に対する変化を耐環境応力性と命名した。

〔定義〕

高分子材料が化学的環境条件と応力条件との相互作用により劣化（好ましくない変化）をすることを、環境応力劣化（Environmental-stress degradation）と名付け、略して ESD、またこの現象に対する材料の安定性を耐環境応力性（Durability for ESD）と命名する。

実際に使用されるいかなる材料も、環境条件の下で応力（成形歪・加工歪・自重・外力等）を受け続けるため必須の課題であるが、因子が多くプロセスが複雑なため、解明が遅れている領域の一つである。とくに、新たに出現した新素材などでは、この特性はほとんど未知であり、ESD の解明と耐環境応力性の向上が強く求められる。

なお類似の現象として、環境応力亀裂（Environmental-stress cracking, 略して ESC）：環境条件と

応力とによる亀裂現象。応力亀裂 (Stress cracking): 集中応力や歪の負荷が続いたときの亀裂現象。溶剤亀裂 (Solvent cracking): 外力は作用しないで溶剤との接触による亀裂現象。また亀裂現象には、材質のマクロな分離であるクラック (crack) と、配向や微小の空隙が生成し屈折率等が変化するクレイズ (craze) とがある。

〔環境応力亀裂の基本〕

プラスチックの環境応力亀裂に関して、次のような傾向がある。

- 1) 環境物質の流入が律速段階である領域 (flow-in 域) での亀裂成長速度は、環境物質の粘度に逆比例する。また亀裂長さは浸漬時間の平方根に比例する。
- 2) 高分子中へ侵入した環境物質が、ある臨界濃度に達すると亀裂が生ずる。この破壊濃度が高分子の分子量の増加とともにわずかに増すだけで、亀裂破壊に要する時間が著しく長くなる。
- 3) ポリエチレンの場合、亀裂の成長速度は分子量によらないが、亀裂開始時間は強い分子量依存性を示す。
- 4) クレイズの発生には、膨張応力 (負の静水圧) が必要であり、この圧力によって環境物質が高分子中に混入し、さらに T_g の低下を促進する。
- 5) ポリカーボネイトの場合、環境応力亀裂の臨界歪 ε_c はつぎのような関係にある。

$$\varepsilon_c = k V_s (\delta p - \delta s)^2$$

ここで、 V_s : 環境物質のモル体積であり、高分子と環境物質との混合のエンタルピーに比例する。 $\delta p \cdot \delta s$ は高分子・環境物質の溶解度パラメーター。

6. C 形寿命予測法の開発

この方法は図-5 に示すように英字の C に似た割り円環状の試験片を考案し、エポキシ樹脂板の切削加工で作成するコの字形の光弾性スケールと名付けた測力具 (図-5 の中央) を考案した¹³⁾。この C 形試片を手で曲げてピンを用いて、スケールにとめ偏光板を直交させて観察すると、スケールの平行部分に光弾性縞が現れる。この縞の数 N が試片の曲げに対する復元力すなわちみかけの剛性 E に正比例することを導いた¹³⁾。

$$N = kE$$

ここで、 k : 比例定数 (C 形試片の形状で決まる)

図-5 C 形試片・光弾性スケール・変形保持板

E はみかけの値であるから、材質変化による剛性変化だけでなく、き裂の生長による剛性低下を定量化することができる。さらに図-5 の右に示すような任意の孔間距離を有するステンレス鋼板を用いて、C 形試片を曲げてビスどめすることにより、試片に任意の曲げ応力を与えることができる。しかも C 形試片の中央部に最大の引張・圧縮応力が生じ、両端のチェック部には応力がかからない。そこで、中央部のみを薬液に浸漬したり、日光や紫外線へかざして劣化の実験をすることができる。こうして変形状態における促進劣化実験や屋外暴露試験を行い、 N の変化を時々測ることにより、劣化度の定量的追跡を簡便かつ非破壊的に行うことが可能となった。

$$E/E_0 = N/N_0$$

ここでサフィックス 0 は初期値を示す。この C 形簡便法による促進暴露データは文献²⁾にある。

こうして、プラスチックの光劣化・熱劣化・薬液劣化・環境応力き裂・疲労劣化・天候劣化などを促進的に簡便に追跡し、しかも応力の効果を調べることが容易となった。

次にこの C 形簡便法を拡張し、装置化することにより C 形試片の剛性変化を連続的に自動計測することを試み、“C 形劣化追跡装置”を試作した¹⁴⁾。

この装置を用いると、各種温度において試料の剛性 (みかけのヤング率)・光弾性特性がわかると共に、薬液中での応力緩和やクリープが追跡でき、応力下での熱劣化・光劣化・薬液劣化を定量的に知ることができる⁷⁾。さらにこの装置に動電型加振器と加速度計を付加した“C 形振動劣化装置”を試作し、劣化に対する振動荷重の影響も調べられるようにした¹⁷⁾。この C 形劣化追跡装置を活用し、環境応力き裂のグレードによる差を調べた。これらの応力緩和によるき裂生長の追跡を進展

図-6 C 形法による S. S. C. インデックスの求め方

させて、図-6 に示すように C 形 S. S. C. インデックスと名付けた耐久性予測の指標を提案した¹⁶⁾。

このインデックス値と最長 12 年にわたる鉄道軌道における現場試験とトラブルシューティング含むフィールドテスト 10 例における損傷率とを対比させることにより、図-7 に示す相関関係を得た¹⁶⁾。

7. 最近の研究から

最近筆者らが重点的に進めている「高分子材料の劣化解析と耐久性評価の新しい手法の研究」を、平塚シンポジウム (神奈川大学理学部主催・本年 3 月の第 5 回) において紹介した。その要点をここに示して、本展望を結びたい。

(1) 研究の目的

“プラスチック、エラストマー、コンポジットのような高分子材料の種々の劣化を解析し、それらの材料のそれぞれの使用環境、条件における寿命を予測すること。”

(2) 研究の基本方針

光劣化、熱劣化、薬液劣化など単一原因による劣化から複合原因による劣化 (例えば環境応力劣化など) さらに実用原因 (実際の諸条件) の劣化ウエザリングなど実用寿命へと発展させる。

(3) 対象とする材料

広範な高分子材料を対象とするが、最近研究に取り組んでいる材種をあげると、次の通りとなる。

プラスチック: PC (最も多い) をはじめ、PPO・PA とくに PMXD 6・PTFE 系などエンジニアリングプラスチック・PEI・PPS・PEEK・PES など耐熱プラスチック (スーパーエンブラとも呼ばれる)。

エラストマー: 合成ゴム (SBR・CR・CSM・Q・

EPDM) および熱可塑性エラストマー (ウレタン系、ポリエステル系、オレフィン系、スチレン系等)

コンポジット: 繊維強化熱可塑性プラスチック (FRTP と略記) のうち、PC・PPS・PPO・PMXD 6 等) および繊維強化熱硬化性プラスチック (FRP と略記) のうち、炭素繊維—エポキシ系等。

機能性高分子: 振動—電気変換材料用としての PVDF や PE などのマイクロコンポジット。超薄膜としてアクリル樹脂系。ケモトライボロジーの研究用として PTFE—液晶プラスチック系や、PTFE—アラミド系等々。

(4) 研究のアプローチ

方針として、“マイクロからセミマイクロ、さらにマクロのレベルでの解析へ”と、多角的に解析を試みている。

その例を次に示す。

◇高分子の一次構造を探究するため

サーモ・メカケミルミネッセンス (TMCL), 分子量, IR, ESR, NMR など。

◇高分子の二次構造を探究するため

一次構造と合わせて PAS (光音響分光分析法) や深度化した熱分析法 (ATA と略記) など。

◇高次構造, 複合構造, 実用強度特性と結びつけるため

SAICAS (表面界面解析法) 等。

以上の試みの中から、とくに新しい手法のいくつかを次に紹介したい。データ例については論文投稿前のため割愛したい。

〔TMCL〕

図-8 に筆者が考案試作 (東洋精機製作所製作) したサーモメカケミルミ装置の概略図を示す。

C 形試験片を石英製容器の中の環境剤に浸漬しながら

図-7 実用状態における耐用率と S. S. C. インデックス

付表 S. S. C. インデックスとフィールドテスト結果との対比

記号	材 種 グ レード	C 形試験法による測定結果				フィールドテスト結果		
		環境媒質 (50°C)	S. S. C.* インデックス	室温空気 中イン デックス	インデッ クスの差	用 途	損傷程度	耐用の可否
ア ／ イ	ポリカーボネート S-2000	止水油 S-2	4c	95	-95	スラブ伸縮継目用 絶縁カラー／横圧受け絶縁板	1年後損傷率 2年後損傷率 約20% / 約70%	両方部品とも長期**使用に不適合
ウ	K-1300E	〃	90	93	-3	〃 / 〃	〃 / 〃 ほとんどなし	長期使用に ほぼ適合
エ	K-1300	ボイル油	22c	95	-73c	伸縮レール絶縁板	2年後損傷率3.8% 以下	長期使用に は要注意
オ	S-2000	マシン油	89c	95	-6c	レール転てつ器用軌間絶 縁板	10年間損傷率 約5.5% (分子量低い)	長期使用に はば適合
カ	L-1250	〃	68c	97	-29c	〃	ほとんどなし 1%以下(分子量正常)	同上
キ	K-1300	アミンリッチ 接着剤 ポリアミドアミンの硬化剤	0c	95	-95c	伸縮レール絶縁板	現場敷設直後き裂多 発	短期間でも 不適合
ク	GE-1030	ボルト防錆用 混合油	93	95	-2	プラスチック製アンカー プレート	11.5年以上耐用	長期使用に 完全に適合
ケ	KE-1300	〃	89	95	-6	〃	〃	長期使用に はば適合
コ	G-1030	〃	93	98	-5	〃	〃	同 上
参 考	飽和ポリエステル B-1030	〃	78	95	-17	〃	3カ月後き裂多発	長期使用に 不適合

* 50°C, 30分後の復元力の保持率。サフィックスcはき裂発生したもの。

** 長期使用とは、ほぼ10年、すなわち平均のレールの更換寿命と対応。

ら、ロードセルを介してモータとラックアンドピニオン方式で外力（一定速度で可変）を負荷する。このときロードセルで検知する応力の減衰を計測記録しつつ、試片の側面から、高感度のフォトマルチプライヤー（光電子増倍管）により、試片からの放射光（フォトン）を計

測する。

装置全体を暗幕で完全に覆って、外からの光をしゃ断する。また試片周囲の温度はプログラムに従って制御できる。

こうして、応力緩和とケミルミネッセンスによって、

試料の応力と環境剤との同時負荷条件下での変化を追跡する。

〔PAS 相関法〕

図-9 に筆者と同学科の杉谷嘉則教授、武井尊也職員が考案試作した“PAS 相関法の測定装置”の原理図を示す。試料(板状)にレーザー光ないし、または同時に、

図-8 サーマメカケミルミ装置の概略図

キセノンランプ光を照射し、試料に入射した光が熱エネルギーとなって内部に伝わり、もどってきた熱エネルギーを空気疎密波(微細な音波)として検出し、入射光のエネルギー(入射信号)との相関スペクトルを得るものである。

得られるチャートは図-10 ように、記測時間(ミリセコンド)に対して、相関信号強度であり、遅延時間の τ_0 と τ_1 が、試料表面層の情報を与える。

〔SAICAS〕

塗膜のせん断強度とはくり強度を測定するために開発された SAICAS (大日本プラスチック製「界面表面解析装置」)を、プラスチックとゴムの劣化解析へ応用する研究を進めてきた。これを SAICAS による断面解析法と呼んでいる。

図-11 にその原理図を示す。幅 5 mm の超硬合金製やダイヤモンド製の超鋭利の刃を試片に当てて、所定の荷重で、一定速度(可変)で切り込んでゆく。その時間にともない、刃の受ける抵抗力 F と切り込み深さ D を自動計測し、パソコンによってデータ処理して、図-12 に示す SAICAS 線図 (F - D 関係)を得る。この線図の変化から試料の断面方向の情報を得る。ゴム材料についても、ダイヤモンド刃を用い、刃幅等の工夫から実測可能となった。

〔超音波モータ式ねじり実験装置〕

試料の実用強度特性を簡便に評価できる手法として、図-13 に基本構造を示す。「超音波モータ式ねじり実験装置」を考案試作した。モータは(株)フコク製、全体の製作

図-9 PAS 相関法の概略図

図-10 PAS 相関法のチャート

図-11 SAICAS 装置の原理図

図-12 SAICAS 線図 (F-D 関係)

は(株)丸東製作所である。この新式モータは、わが国で開発されたコイルを用いないモータであり、筆者もその構成部材の研究に参加しており、長期の耐用試験を兼ねて採用したものである。

このねじり実験装置は、モータの回転（超音波モータは回転に惰性がなく、反転に向く）をギヤ機構により、一定速度に減速して、トルクバー（ひずみ検出）を介して一端を固定された丸棒状（つかみ部を太くして射出成形した）試片の他端に、ねじり変形を与える。一定角度および一定トルクの一方ねじりと、両振りねじりを与えながら、試片のうけるせん断応力を計測することができる。つまりせん断強度特性やせん断疲労特性という、実用上要請が高いにもかかわらず公表されたデータがほとんどないせん断強度特性が測定できる。

〔ATA〕

深度化した熱分析を指すが、紙面のつごう上割愛する。

以上紹介した最近の筆者らが試みている新しい手法の特徴等を、表-1 にまとめる。

8. 結び

以上概観したように、高分子材料の耐久性は、多くの因子が複雑にからみ合う Heterogeneous Process である。それらの機構の解明は極めて困難であり、種々の解析手法が試みられているが、それぞれが異なった切口から解析するものであって、万能な手法というものはない。

耐候性すなわち屋外の気象条件ほか諸条件によるウェ

図-13 超音波モータ式ねじり実験装置

表-1 各手法の特徴・適用範囲・制約

手 法	特徴・適用範囲・制約
TMCL	〔特徴〕 昇温速度可変, 環境条件と応力条件の同時付加と応力緩和・フォトンの同時追跡可 —高分子の1次構造と緩和—
	〔範囲〕 プラスチック・硬質ゴム・複合材料
	〔制約〕 軟質試料の場合はC形試片は不適当。矩形試片と薬液滴下の組み合わせ
PAS	〔特徴〕 表面層の解析が可能 —高分子の1次, 2次構造—
	〔範囲〕 プラスチック・ゴム
	〔制約〕 バルクの変化は不明
SAICAS	〔特徴〕 断面方向の変質, 劣化層の深さ, 剪断強度特性の評価 —高分子の2次構造—
	〔範囲〕 プラスチック・ゴム
	〔制約〕 温度依存性あり(温度可変に改造) CF・GF強化材は困難
ATA	『TG後のIR』『TMAによる針入測定』『TMA式動的粘弾性』
剪断特性	『超音波モータ式ねじり実験装置の試作による, 剪断強度特性・剪断疲労特性』 高分子の実用強度特性

ザリングに対する耐久性などはその典型例であり, “日暮れて, 道遠し” の感が深い, 主題の耐環境応力性に関しては, 新しい解析手法を提案することができた。

耐候性に関しても, 筆者らのみならず学会等の共同研究により, 少しずつ (イタリア語でポコアポコ) 核心に近づきつつあることを, 確信しながら前進を続けている。

一人でも多くの人々が関心を抱き, いっしょに取り組めたら幸いである。

引用文献

- 1) 大石不二夫: プラスチックの耐久性 (工業調査会, 1975)
- 2) 大石不二夫, 成沢郁夫: プラスチック材料の寿命 (日刊工業新聞社, 1987)
- 3) 大石不二夫: 高分子材料の耐久性 (工業調査会, 1993)
- 4) 大沢善次郎: 高分子の劣化と安定化 (武蔵野クリエイト, 1992)
- 5) 大石不二夫: 材料技術, **2**, 3 (1984)
- 6) 大石不二夫: 材料, **17**, 826 (1968)
- 7) 大石不二夫ほか: 同上, **19**, 786 (1970)
- 8) 大石不二夫ほか: 同上, **19**, 791 (1970)
- 9) 大石不二夫ほか: 同上, **20**, 462 (1971)
- 10) 大石不二夫ほか: 日本ゴム協誌, **44**, 937 (1971)
- 11) 大石不二夫ほか: 同上, **47**, 754 (1974)
- 12) 大石不二夫: 高分子, **20**, 822 (1971)
- 13) F. Ohishi: *J. Appl. polym. Sci.*, **14**, 2225 (1970)
- 14) F. Ohishi: *ibid.* **15**, 381 (1981)
- 15) F. Ohishi et al.: *ibid.* **20**, 79 (1976)
- 16) 大石不二夫: 鉄研報告, No. 1245 (1983)
- 17) 大石不二夫ほか: 日本ゴム協誌, **44**, 531 (1971)
- 18) F. Ohishi: *Analytical Science*, **7**, 1589 Supplement (1991)
- 19) 大石不二夫ほか: エンジニアリングプラスチック活用マニュアル (オーム社, 1985)
- 20) 大石不二夫ほか: 工業材料の耐候性 (日刊工業新聞社, 1985)
- 21) 大石不二夫: 繊維学会誌, **40**, 7 (1984)
- 22) 大石不二夫: 日本ウエザリングテストセンターのウエザリング技術研究成果発表会前刷, p. 37 (1992)
- 23) 日本ゴム協会環境劣化研究分科会編: エラストマーの耐候性 (武蔵野クリエイト, 1994)
- 24) 大石不二夫ほか: 高分子論文集, **45**, 4 (1988)
- 25) 大石不二夫ほか: マテリアルライフ, **1**, 2 (1989)