化学装置特に

ライニング配管ダクトへの応用

宮崎 義隆*・山崎 昇**

1. ま え が き

高分子材料の応用分野の一つとして化学装置への利用があげられる。この分野に使用される高分子材料の特徴は構造材料であると同時に耐食材料であるといえよう。

従来、新しい材料が開発されると、その性能から適用分野を探すという手段がとられ十分なる考慮もなされないままに材料の適否を判定しようとする傾向が大きかった。性能的には一応すぐれておりながら、装置材としては適さないものも数多くある。しかしそれらは、機械的、化学的性能の他に加工性あるいは価格のいずれかに欠点を有するものであろう。

最近では、既製の高分子材料を装置材として適用しようとする努力から、しだいに装置材としての高分子材料、もしくはその複合材を開発しようとする努力へと変わりつつある。

最近、エンジニアリングプラスチック¹⁾が機械部品として使用されつつあるが、その多くは成形品としての利用が主である。

筆者らはここに一般化学工業装置として防食ライニング、配管、ダクトにしぼり、それらに利用される高分子材料の性能および諸問題について述べてみようと思う。

2. 装置材料としての高分子材料の得失

化学装置に使用される高分子材料は、熱硬化性樹脂、熱可塑性樹脂、エラストマー類に大別される。耐食性の点から考えれば、強酸化剤、有機溶剤の一部を除き、いずれも金属よりすぐれた性能をもっている。構造材としてはガラス繊維で補強した強化プラスチックを除けば機械強度、耐熱性ははるかに金属より低い、反面軽くて比強度が高く、比較的容易に加工できる利点を有するためライニングのごとく構造部を金属またはコンクリートとしプラスチックによって防食性を付与する方法がとられている。

しかしながらこれら高分子材料は幾多の問題を含んでいる。

すなわち化学装置材として使用する場合、おおむね悪条件下にさらされるため、材料劣化とそれによる、あるいはそれとは別個に起こる、ぜい性破壊的な事故発生がいちばん懸念される問題である。

2-1. 装置に使用した材料の劣化

高分子材料の劣化は、紫外線、熱、酸化剤によって連鎖的に進行することはよく知られているが、装置の一部として使用された場合は紫外線、熱の他に応力、腐食が大きな役割を占めるものと思われる。第1表に代表的なポリマーの熱安定性を示したがポリ塩化ビニルの劣化は成形加工時の熱劣化²⁾が問題にされ、ポリオレフィン類は光酸化劣化³⁾が主である。

しかし、これらに対しては、いずれも熱安定剤、紫外線吸収剤、抗酸化剤などが配合されているが、曲げ、溶接加工（三次加工）時の熱劣化などにも十分考慮する必要がある。

さらに薬液存在下で複雑な応力を受ける材料の劣化機構はきわめて複雑で大部分経験的現象論の域を脱しえないが、薬液の浸透による安定剤の脱落あるいは機能低下による劣化促進も考慮すべきであろう。液の移動、かきまぜなどにより、その効果は著しく促進されることが予想される。

中川⁴⁾らは硬質塩化ビニル板の耐薬品性について、薬液と応力が別々に作用する場合には、薬液による機械的性能の変化はあまり問題にならないが、実際の場合薬液と応力の共存状態にあるため薬液の種類、濃度によっては機械的性能を著しく変化する危険があるとし Wet creep rupture test の結果から実用性に富んだ判定を行っている。そして結局硬質塩化ビニル板の耐薬品性、すなわち薬液による使用限界はすべて Larson-Miller の mustercurve⁵⁾ によって示されると報告している。またポリプロピレン板の界面活性剤中のクリープ限強度は40°C×1000 hr で原板の約 1/2 となることが報告されている⁶⁾。実際の薬液貯槽などにおいて気液の接触部の劣化が著しいのは薬液の作用と合わせて熱応力と酸化劣化が付加されるためで、材料の選定、安全率の決定にも十分考慮しなければならない。

図2-2. ぜい性破壊

高分子材料の破壊については多くの報告が^{7)~9)}ある

* Yoshitaka MIYAZAKI 木村鉛鉄化学機械株式会社
研究所材料研究部長

** Noboru YAMAZAKI 同研究所樹脂研究課長
The Application of Plastics for Chemical Plant

第1表 ポリマーの熱分解表⁴³⁾

重 合 体	構 造 式	T_b^1 (°C)	K_{350}^2 (%/min)	E^3 (Kcal/mol)	モノマー収率 (%)
Polytetrafluoroethylene	$-\text{CF}_2\text{CF}_2-$	509	0.000002	81	>95
Polytrifluoroethylene	$-\text{CF}_2\text{CHF}-$	412	0.017	53	0
Polyethylene, branched	$-\text{CH}_2\text{CH}_2-$	404	0.008	63	< 0.1
Polypropylene	$-\text{CH}_2\text{CH}-$ $\quad\quad\quad\text{CH}_3$	387	0.069	58	< 0.2
Polystyrene	$-\text{CH}_2\text{CH}-$ $\quad\quad\quad\text{C}_6\text{H}_5$	364	0.2	55	40
Polyisobutylene	$-\text{CH}_2\text{C}(\text{CH}_3)_2-$	348	2.7	49	20
Poly (methyl methacrylate)	$-\text{CH}_2\text{C}(\text{CH}_3)-$ $\quad\quad\quad\text{COOCH}_3$	327		52	>95
Poly (vinyl acetate)	$-\text{CH}_2\text{CH}-$ $\quad\quad\quad\text{OCOCH}_3$	269	—	17	0
Poly (vinyl chloride)	$-\text{CH}_2\text{CHCl}-$	260 ⁴	170 ⁴	32	0

注 1) 真空中で 30 分間加熱したときポリマーの重量が半減する温度、ただし 5 分間隔でこの温度に上昇せしめた

2) 350°Cにおける蒸発率

3) 分解反応の活性化エネルギー

4) 脱塩酸量をもとに

が、ぜい性破壊については、金属材料においてすら完全に究明されるに至っていない。装置材として使用されている高分子材料においても全く予期せざる破壊が起こり、思わぬ事故を起こすことがある。そしてその多くは環境温度の高温側より低温側に移行するときに発生する。

それらの要因はブレート、パイプ製造時の残留応力あるいは分子配向、結晶化などに基づく時効硬化¹⁰⁾とさらに三次加工における曲げ、接合加工時における熱履歴により分子構造の不均一部が発生が考えられ熱応力によりこれらの要因が破壊につながるものと考えられる。

多くの場合、きれつは溶接部に端を発している。これは溶接技術の向上により減少しうが、いずれにせよ接合部は不均一構造部であり、ことに切欠などによって多軸応力¹¹⁾の発生を容易にし、ぜい性破壊が促進される。

残留応力に起因するきれつ、すなわちストレスラックについては多くの報告^{12)~15)}がある。

プラスチックの熱膨張は、鉄の数倍から 10 数倍におよび膨張収縮により熱応力が発生するが構造物全体が一様に伸縮せず局部的に応力集中が起こる。またくり返し温度変化による材料の疲労¹⁶⁾¹⁷⁾、熱衝撃など、ぜい性破壊への要因となる。

結晶性高分子材料は結晶化度の変化により機械的性質も変化する¹⁸⁾。また球品の大きさ、分布状態によっても左右される¹⁹⁾²⁰⁾。すなわち引張強度、弾性率は増大するが衝撃強度は低下する。ポリエチレンでは結晶化度の高いものは酸化によるぜい化が大きい²¹⁾。反応槽に使用したポリプロピレン板のきれつ発生部の結晶化度を測定してみると異状に高い値を示す場合が認められる。

このように結晶性高分子材料を装置材として使用する場合はその材料の履歴と加工時の熱管理などに十分気を

つけないといけない。

写真 1 硬質塩化ビニル板を接着ライニングした 300 トンタンクのフランジ面に発生したクラック

3. 設計上の問題点

高分子材料を化学装置に应用する場合最も重要なことは許容応力の算出である。一般に許容応力は材料の短時間あるいは長時間強度を安全率で除して求められる。

装置設計における許容応力の決定は材料の強度設計上の安全率と、更に使用条件下における応力の種類、薬液による安全率および溶接効率などを含めた安全率を考慮して決定すべきである。硬質塩化ビニル板について筆者らは国産メーカー品のクリープ限度の 1/4 を設計基準強度としてそれぞれの使用条件に応じて適当な安全率を

算入して実際に応用している。

高分子材料の材料力学的取り扱い²²⁾についてはフックの法則に従う材料力学を簡単な操作で粘弾性解析に変換できる²³⁾ため、複雑な応力状態における線型粘弾性解析の結果から、適切な安全率を考慮して実際の設計計算に応用することが望ましい。

4. 装置への応用

4-1. ライニング

4-1-1. ライニングとは

ライニング (Lining) とは内装 (Insidecovering) するという意味であるが最近ではコーティング (Surface-coating) をも含めてライニングと呼んでいる、強いて差をつけるなら、形成される皮膜の厚さが 0.5 mm 以下をコーティング、それ以上をライニングとして通常区別している。筆者らは性能的に化学工場で取り扱う防食機器類は高度の耐食性を必要とするためそのほとんどが 1 mm 以上の皮膜厚を要し、0.5 mm 以下のものは単にサビ止め塗装としか考えていない。

ライニングは古くから鉛、ゴムなどが利用されてきたが最近では化学工場の高度の要求を満たすため多くの高分子材料が応用されつつある。

ライニングに使用される高分子材料は耐薬品性、耐熱性および加工性の難易に重点が置かれる。そして金属あるいはコンクリートとの複合材として実用に供される。したがってエラストマーでもライニングすることによって広義の装置材となりうるわけである。

4-1-2. ライニングの分類

ライニングは使用する材料の形態、皮膜形成過程の差によって大体次の三つに分類できる。

- (1) プラスチック板を接着剤にて接着、あるいはビス止めする方法²⁴⁾。

写真2 電解槽に硬質塩ビ板をライニングしたもの（母材コンクリート、ルーズライニング）

この方法はプラスチックシートライニングと称して貯槽反応槽その他に広く応用されており、ポリ塩化ビニル、ポリエチレン、ポリプロピレン、合成ゴム、塩ビ系共重合体などが利用されている。

現在のところ実用耐熱性は 100°C 限界である。

- (2) 液状樹脂またはプレポリマーに重縮合剤あるいは橋かけ剤を添加し、単独または補強材とともにライニング後硬化せしめる方法^{25) 26)}。

エラストマー合成樹脂コーティングはこの方法に属す。熱硬化性樹脂は充てん材、ガラス繊維で補強し、常温、加熱硬化の両方とも可能である。筆者らは FRP ライニング^{27) 28)}と称し、化学装置に広く応用している。

写真3 ポリエステル FRP ライニング

ネオプレン、ハイパロン、フェノール樹脂、不飽和ポリエステル樹脂、エポキシ樹脂、フラン樹脂などが利用されている。実用耐熱性は最高 150°C まで可能なものもある。

- (3) 粉末状ポリマーまたはプレポリマーを加熱溶融しながら皮膜を形成せしめる方法²⁹⁾。

この方法は溶射器による溶射ライニング、加熱した被ライニング体を粉末ポリマー気流中に接触せしめ溶融皮膜を形成するいわゆる流動皮覆³⁰⁾、およびポリマーを適当な溶媒中に懸濁スプレー後加熱溶融するディスパージョン法³¹⁾と称するものなどがこれに属す。

加工設備の関係上、被加工体の形状、大きさに制限があり、かつ現場加工には適さないが小型の反応機器に適す。ポリエチレン、三フッ化樹脂、ペントン（塩素化ポリエーテル）、ナイロン、エポキシ樹脂などが利用されている。

実用温度は三フッ化樹脂で 160°C、最高 200°C（六フッ化ポリプロピレン）にも達す。

4-1-3. ライニングの問題点

上記の各工法についてそれぞれ多くの問題点を有するが、根本的にはそれぞれの高分子材料の特性を失わないようにできるだけ強力に被ライニング体に接着することにあると思う。元来熱膨張係数の異なるものを接着するために、被ライニング体との間にひずみを発生することに温度変化の伴う装置では、このひずみをいかに抑制するかが問題である。

形成する皮膜をできるだけ薄くして発生応力を小さく

第2表 各種材料の熱膨張係数

材 料 名	線膨張係数 $\times 10^{-5}/^{\circ}\text{C}$
フェノール樹脂	2.5~6.0
エポキシ樹脂	4.5~6.5
ナイロン(6)	4.6~7.1
塩ビ(硬)	7~8
ポリエステル	5.5~10
ポリエチレン(軟)	16~18
ポリプロピレン	12~15
三フッ化樹脂	4.5~7.0
アルミニウム	2.4
亜鉛	0.3
鉄	1.2
コンクリート	1.0~1.4

する、接着剤にエラストマーを使用する、充てん材を混入して皮膜の膨張係数を小さくする、被ライニング体の表面処理や構造設計に留意する、等々それらは接着の力学的諸問題³³⁾と密接な関係がある。

次に使用する材料の寸法安定性、品質の均一性、重合度、構成分子の化学構造など原材料の選択に注意を要する。

さらに加工技術の向上がライニングの成否に大きく影響す。溶接技術³²⁾、接着技術、皮膜形成技術など、ことに常温硬化の樹脂ライニングでは硬化度の判定を十分に行なわないといかに材料が良くとも性能が低下する。日本では湿度が高いため施工ふんい気に注意を要す。硬化度の判定には赤外吸収でも判定できるが実際的には溶剤によるテストを行なう方が便利である³⁴⁾。

ライニング機器を使用する場合、あくまでも高分子材料であるということを念頭において金属同様の取り扱いをしないように注意すべきである。

使用条件をできるだけ詳しく調査してそれに適した材料を選択すれば、ステンレス、金属チタン以上の防食効果をあげることができる。

4-2. 防食容器の開発

高分子材料単独で容器を製作する方法がしだいに盛んになりつつある。

構造材としての十分な強度を有する強化プラスチック、特に、ポリエステル樹脂をフィラメントウィンドイング法³⁵⁾³⁶⁾によりガラス繊維で補強した容器はすでに欧米では、実用段階にあり大形容器の製作も可能である。

ポリエステル樹脂の進歩により耐熱性も向上し、日本における実用化も近いものと思われる。

ポリエチレンによるエンゲル法³⁷⁾で成形した容器は耐食性にすぐれ薬液貯槽として利用率が増しているが機械強度が低いため補強しなければ危険である。

発泡体をサンドイッチ構造とした材料による貯槽タン

写真4 写真3のタンクに使用するかきまぜ機にポリエステルFRPライニング施工中

クもすでに市場に出ているが、耐熱性、耐食性の点で化学装置用としては十分でないが静置タンクとしては利用価値はある。今後この種の単独容器はFRPを中心に発展するであろう。

4-3. 配管

腐食性の強い化学薬品を工場設備間で輸送することは製造工場で現在当面している重要かつ困難な問題の一つである。

現在多量に使用されているプラスチックパイプとしては硬質塩ビ管、ポリプロピレン管、ポリエステルアスベスト補強管があげられる。その他、耐熱性塩ビ、ポリエチレン、ABS、フェノールFRPなども部分的に使用されている。

プラスチックパイプ使用上重要な問題は、許容耐圧力、支持間隔が使用温度、サイズにより変化することと、熱膨張による伸縮がきわめて大きいことである。

4-3-1. 許容圧力

許容圧力は、破壊圧を安全率で除して求められる。安全率の決定は、パイプの長時間強度、設計強度安全率、および寸法許容差による安全率などを勘案する必要がある。

破壊圧はBarlow³⁸⁾の式から求められるが筆者らはポ

第1図 プラスチックパイプ(2B)破壊圧の温度依存性比較⁴⁴⁾

リプロピレンパイプにつき次式で計算している。

$$P_t = \frac{2t}{D_i} \cdot f_t \quad (1)$$

$P_t = t^{\circ}\text{C}$ における破壊圧 (kg/cm²)

D_i = 管内径 (cm)

t = 厚み (cm)

$f_t = t^\circ\text{C}$ における抗張力 (kg/cm^2)

肉厚管の場合は (1) 式の D_i は $\frac{1}{2}(D_i + d)$ として計算する。ただし d は外径。

$t^\circ\text{C}$ における許容圧力を P_0 、安全率を S とすれば、(1) 式より

$$P_0 = \frac{2t}{D_i S} \cdot f_t \quad (2)$$

長時間強度の推定は Larson miller の muster curve より算出できる³⁹⁾。Goldfein はあらゆるプラスチックパイプのクリープ process は 0 次の化学反応として数学的に処理できるとして数式を提案している⁴⁰⁾。

4-3-2. パイプの固定および支持

プラスチックパイプは線膨張係数が大きいいため使用温

第2図 パイプバンドの例

度により応力を発生する。したがって伸縮継手を挿入すると同時にその応力が継手に吸収されるようパイプの固定支持が重要な問題である (第2図参照)。

パイプの支持間隔はタワミ量をどのように決めるかによって変わってくる。支持間隔を l としたとき最大タワミ δ は

一般の場合	$\delta = l/300$
片持梁の場合	$\delta = l/250$
重要なもの	$\delta = l/500 \sim l/1000$

としてよいがプラスチックの場合は温度に敏感であり、クリープを考慮し、かつ美観の点からも δ の量は最少におさえるべきで最高使用温度条件において $\delta = 10\text{mm}$ 以下となるように計算すればよい。

両端支持、等布荷重のタワミの式として次式を採用する。

$$\delta = \frac{5Wl^3}{384EI} \quad I = \frac{\pi}{64}(D^4 - d^4)$$

ここに δ = タワミ (cm), I = 断面二次モーメント (cm^4)
 W = 荷重 (kg), D = パイプ外径 (cm), l = 支持間隔 (cm), d = パイプ内径 (cm), E = 弾性係数 (kg/cm^2)

ここに弾性係数 E は時間弾性率を使用しなければならぬ。一般に設計弾性率 E は初期弾性係数 E_0 と補正係数 β の積で表わす。

$$E = \beta \cdot E_0$$

β は材料の種類、時間 (寿命)、応力範囲などによっ

て変わるので一義的に数値を決定することは問題がある⁴¹⁾。

ことに化学工場の配管は使用条件がさまざまであるから、熱可塑性樹脂パイプでは、トイあるいはチャンネルで全体支持を行なった方がよい。高温使用の場合はその方が安全である。

4-3-3. 伸縮継手

たとえばポリプロピレン管では温度差 90°C で 10m につき $108 \sim 135\text{mm}$ 伸縮する。実際には摩擦などにより計算値の 80% 前後の挙動を示す。化学工場では蛇行配管が許されないから当然伸縮継手が必要である。パイプ自体をループ状に加工したものは小径 ($< 2\text{B}$) のものには最適であるがそれ以上、もしくは肉厚管になると加工が困難なため、軸心スライド式のものがよい。スライド式にはクリープ性の小さい材料を使用しないと長期の間に変形して伸縮吸収量に変化をきたすので慎重を要する。

4-3-4. ライニングパイプ

写真5 硬質塩ビ内装鋼管

プラスチックの耐食性を生かし強度を金属でもたすため鋼管にプラスチックを内装したパイプが脚光をあびている。これらは支持間隔が大きくとれ、外部衝撃に強く、耐圧力も鋼管に近い高圧まで使用できる。耐熱性は使用樹脂によって決まるがクリープ性にあまり心配はいらない。接手が完成していればやや加工は困難でも配管

写真6 硬質塩ビ内装鋼管接手

は容易である。ダクトについて不燃性化が呼ばれているおりから、この種ライニング鋼管の将来は重要な役割を占めるものと考えられる。

4-4. ダクト

化学工場における排気ガスダクトは欠くべからざるものである。現在高分子材料としてはポリエステルガラ

ス積層板、硬質塩化ビニル、ポリプロピレン、塩ビ接着銅板⁴⁵⁾が使用されている。

ダクトについては昭和 39 年 1 月 15 日建築基準法第 129 条 9 号の政令で地階を除く階数が 11 以上である建築物または延面積が 3000 m² を越える建築物に設ける換気・暖房または冷房用の風道は不燃材でつくることと定められている。したがって高分子材料によるダクトは今後不燃焼化が考慮されなければならないが、化学装置に関連したダクトは耐食性にすぐれたものが必要で、プラスチックの利用度は、今後、さらに多くなるものと考えられる。

写真 7 化学工場における排ガスダクトを硬質塩ビ板で製作したもの

左側：従来の鉄ダクト鉛板内装のもの、右側：ポリプロピレン4mm厚プレートで構成したもの

写真 8 高温腐食ガス排気ダクト

4-4-1. ダクトの設計

ダクトの設計に関しては宮崎の詳しい報告⁴²⁾があるが、ここでは要点のみ記す。

ガス排除ダクトにおいては、外圧を受ける薄肉円筒の計算式を用い、一般には R. V. Southwell の理論式⁴⁶⁾によってダクトの板厚を求める。

$$P_0 = E \left[\left\{ \frac{\pi^4}{n^4(n^2-1)} \right\} \left(\frac{r}{l} \right)^4 + (n^2-1) \left\{ \frac{m^2}{12(m^2-1)} \right\} \left(\frac{t}{r} \right)^2 \right] \left(\frac{t}{r} \right)$$

ここに P_0 = 限界圧力 (つぶれ圧力) (kg/cm²)

E = ヤング率 (kg/cm²)

n = つぶれの定数 (ヘヨミの葉数)

r = ダクト半径 (cm)

l = 長さ (ブランチ間または補強間距離) (cm)

m = ポアソン数

t = ダクト板厚

すなわち上記理論式により、まずある板厚を仮定し、これがつぶれる限界圧の最低値を、種々の n の値について算出する。かくして求めた P_0 の最低値を安全率で除して得た数値が使用状態で受ける外圧以上になるまで計算をくり返す。

いいかえれば、種々の n の値を用いて、 P_0 の最低値を求め、これが所定の制限外圧より大であることが必要である。

このように煩雑である上に、 t の仮定は何を根拠とすべきか、これに対して筆者は、最も安全側に考えて、円筒が長く、 $n=2$ とした場合について、上式を次のように簡略化して t の判定目安とした。

$$P_0 = E \left\{ \frac{m^2}{4(m^2-1)} \right\} \left(\frac{t}{r} \right)^3$$

さらに材質別に、 E , m の数値を次のように決定づけて、 t を求める式に変更すれば、

$$t_{s.s} = \frac{1}{82.55} \times r \sqrt[3]{P_0} \quad \cdots \text{鉄板製ダクトの場合}$$

第3表 プレス法塩ビ銅板の物理的機械的性質⁴⁵⁾

要 項	材 質		硬質塩ビ	18-8 ステンレス板	軟銅板
	軟 質 0.5×0.3×0.5	硬 質 0.5×0.3×0.5			
比 重	2.89	3.55	1.32×1.40	7.92	7.82
抗 張 力 (kg/cm ²)	1,300~1,400	1,400~1,500	550~650	5,670	3,620
伸 び (%)	30	30	80~160	20	30
比 熱 (cal/g°C)	0.22	0.20	0.25	0.118	0.108
熱 伝 導 率 (kcal/inhr°C)	0.17	0.19	0.13	25	50
線膨張係数×10 ⁻⁵ (20~100°C)	1.2	1.2	6~8	1.73	1.2
電 気 抵 抗 (Ω-cm)	5.4×10 ¹⁵	5.4×10 ¹⁵	5.4×10 ¹⁵	70×10 ⁻⁶	70×10 ⁻⁶
縦 弾 性 係 数 (kg/cm ²)	7×10 ⁴	12×10 ⁴	3.5×10 ⁴	240×10 ⁴	210×10 ⁴

$$t_{p.v.o} = \frac{1}{19.13} \times r \sqrt[3]{P_o} \quad \cdots \text{硬質塩ビ製ダクトの場合}$$

$$t_{p.p} = \frac{1}{9.17} \times r \sqrt[3]{P_o} \quad \cdots \text{ポリプロピレン製ダクトの場合}$$

ただし鉄の場合 $E=200 \times 10^4 \text{ kg/cm}^2$ $m=3$, 硬質塩ビの場合 $E=2.5 \times 10^4 \text{ kg/cm}^2$ $m=2.7$, ポリプロピレンの場合 $E=0.25 \times 10^4 \text{ kg/cm}^2$ $m=2.3$ とし PP の E は温度 90°C における測定値 E_0 に補正値 0.8 を乗じて決定したものである。

5. 結 語

高分子材料の化学装置への応用に関しその問題点を列挙するにとどまった感がある。それぞれについて多くの問題を有するが、その一つ一つについてふれることができなかったので要を得なかったが、耐熱性、機械強度の向上のため、しだいに金属などとの複合材的な開発が進められるとともに、Polymer 単独にもさらに研究が進められており高分子物性学 chemo Reology とも関係の深いこの分野にさらに理論面と加工技術面での向上を計り、この分野への高分子材料の適正な応用が行なわれることをねがうものである。

文 献

- 水谷久一: *Rubber Digest*, **16**, No. 6, 2 (1964)
- 松田種光: 高分子, **11**, 455 (1962)
- 山本 連: 高分子, **11**, 451 (1962)
- 中川有三, 奥田 聡, 古賀三男: 化学工学, **27**, 703 (1963)
- F. R. Larson, James Miller: *Trans. Am. Soc. Mech. Eng.*, **74**, 765 (1952)
- 石橋鉄治, 守谷恒夫: 高分子学会第13年回 (1964) にて発表
- I. J. Gruntfest: *J. Polymer Sci.*, **20**, 491 (1956)
- 中田 修: 高分子, **7**, 671 (1958)
- 中田 修: 「高分子の物理」225 (1963) 日本物理学会編
- W. N. Findley, G. Khosla: *J. App. phys.*, **26**, 77 (1959)
- 奥田 聡: 日本材料試験協会関西支部編「工業用プラスチック」99 (1960)
- O. K. Spurr JR, W. D. Nieglisch: *J. Appl. polymer Sci.*, **6**, 585 (1962)
- V. Pelagatti, G. Baretta: *Mod. plast.* 140 (June 1959)
- 伊藤勝彦: プラスチック, **13**, 53 (1962), **14**, 6 (1963)
- 佐倉武久: 高分子, **9**, 253 (1960)
- 黒田寿紀, 小牧和夫: 材料, **14**, 172 (1965)
- 島村昭治: 強化プラスチック, **5**, 302 (1959)
- 高柳孟司: 材料試験, **10**, 502 (1961)
- S. M. Ohlberg, J. Roth, RAVRoff: *J. Appl. polymer Sci.*, **1**, 114 (1959)
- C. F. Hammer et al.: *J. Appl. polymer Sci.*, **1**, 169 (1959)
- 未発表
- 伊藤勝彦: 材料試験, **8**, 622 (1959)
- A. A. Macleod: *2nd Eng. chem.*, **47** 1319 (1955)
- 宮崎義隆, 山崎 昇: 高分子加工, 別冊3, 58 (1964)
- 吉川 潮: 高分子加工, 別冊3, 25 (1964)
- 金属表面技術協会 ライニング部会編: 「ライニング便覧」, 288, 388 (1961)
- 宮崎義隆, 山崎 昇: 強化プラスチック **6**, 303 (1960)
- 宮崎義隆, 山崎 昇: 強化プラスチック **7**, 84 (1960)
- 長坂秀雄: 「化学プラントのための特殊材料利用に関する講習会テキスト」(化学工学協会)12 (1962)
- 林 文雄: *plast., Age*, **8**, (1962)
- 本荘好雄: 高分子加工, 別冊3, 50 (1964)
- 小島陽之助: 「材料試験」**7**, 456 (1958)
- 宮崎義隆, 山崎 昇: 「日本溶接協会プラスチック研究委員会技術講習会テキスト」18 (1964)
- Matthew, J. Smith: *Mod. plast.*, **42**, 206 (1965)
- John L. Wilson: *Mod. plast.*, **40**, 89 (1962)
- Harry E. Pebly Jr: *chem. Eng.*, **71**, 75 (1964)
- USP 2915788
- Anonymous, International Standardization of plasticspipe: *Mod. plast.*, **34** 208 (1956)
- W. E. Gloor: *Mod. plast.*, **36**, 144 (1958)
- S. Goldfein: *Mod. plast.*, **37**, 139 (1960)
- 浜野伍男: *plas. Age*, **10**, 84 (1964)
- Yoshitaka Miyazaki: 「study of the plastics Ducts」R.I.L.E.M. (International Symposium) June 9 th-11 th (1964) 2-3
- B. G. Achhammer, Max Tryon, G. M. Kline: *Mod. plast.*, **37**, 131 (1959)
- 田中 伸: 合成樹脂応用化協会: 講演資料 (1963. 12)
- 宮崎義隆: プラスチック, **12**, 32 (1961)
- R. V. Southwell: *Philo sophical magazine*, **25**, 687 (1913)