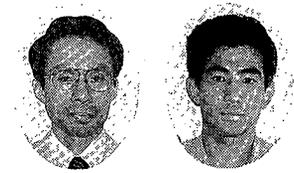


高粘度液用薄膜蒸発機「エクセバ」

(米国特許 5185060 日本, 欧州特許出願中)

The Thin-Film Evaporator "EXEVA" for Highly Viscous Products



(化)技術部 設計第2課
山崎 忠成
Tadashige Yamasaki
吉村 武司
Takeshi Yoshimura

The EXEVA, a thin-film evaporator newly developed by SHINKO PANTEC, has several special mechanisms which are not found in conventional evaporators.

The EXEVA, therefore, has been widely used in various industrial processes involving concentration and devolatilization.

Since high-viscosity solutions and heat-sensitive materials can be treated in these processes, the EXEVA has proved even more useful.

This paper describes the multiple-pitch blades, which greatly ensure efficient fillet/film mixing as compared with conventional single-pitch blades, and the screw discharger which make it possible for the EXEVA to treat high-viscosity liquids up to 10,000 Pa·s.

The paper also describes the design of the agitation system of a large-capacity EXEVA.

まえがき

高粘度用薄膜蒸発機「エクセバ」は、超高粘度のシリコン樹脂、ゴム状の樹脂、ゲル化し易いフッ素樹脂、脱揮する温度でモノマーが発生するスチレン樹脂、熱によって変色し易いポリマー等からの蒸発脱揮、流動性のない高粘度蛋白質からの脱泡等、従来機器では処理するのが困難な分野で利用されている。エクセバが、これらの分野に適用される理由は、従来機器にない特殊構造を装備しているからにほかならない。

エクセバは最適な操作条件の選定、適切なスケールアップ等のソフト面と連続運転に必須のメカニカルな強度等のハード面の両者が十分に機能することによって、生産現場で高度な性能を発揮している。

本稿では、エクセバの機構と機能、特殊構造、特長を紹介し、大型実機の攪拌系を設計する上での考慮すべき点について報告する。

機構と機能

エクセバは、攪拌式薄膜蒸発機で、その内部基本構造は、第1図に示すように、①ディストリビューター、②多段傾斜攪拌翼、③スクリュー排出部で構成されている。

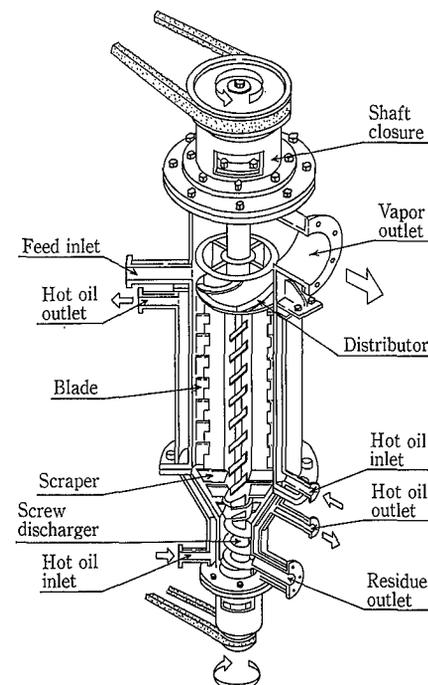
ディストリビューター及び多段傾斜攪拌翼は、缶体内壁と狭いクリアランスを有して、缶体上部のモータによって駆動されており、一方、スクリュー排出部のスクリュー軸は、缶体下部のモータによって駆動されて、軸内部に攪拌軸の軸受が設けられている。

① ディストリビューターは、原料供給口より流入した液と缶体内壁面に一様分散するためであるが、本ディストリビューターは供給口より入った液をすぐに薄膜化しているので、供給液粘度が低粘度液 (0.001 Pa·s) だけでなく超高粘度液 (5 000 Pa·s) まで処理することが出来る。

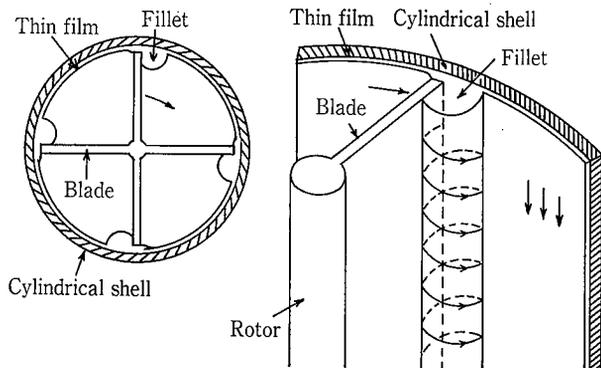
② 多段傾斜攪拌翼は、ディストリビューターで分散され

た液をさらに薄膜化すると同時に強制的に薄膜を混合し下方に移送する。多段傾斜攪拌翼によって、内容液の様な混合が促進されるので、蒸発性能が向上するとともに均一な残留液が得られる。また、攪拌翼と缶体内壁との最適なクリアランスを選定することによってより一層の蒸発性能の向上と省エネルギーをはかることが出来る。

③ スクリュー排出部は、多段傾斜攪拌翼で濃縮脱揮された高粘度液を一軸押出機と同じ作用によって連続して払い出す。スクリュー排出部は、スクリュー軸と高粘度液によって缶内の真空を保持しており、超高粘度液をも数 kg/cm²



第1図
エクセバ
Fig. 1
A cutaway view
of EXEVA



第2図 攪拌式薄膜蒸発機内での高粘度液流動模式図
Fig. 2 Schematic diagrams of flow field in an agitated thin-film evaporator with high-viscosity fluid.

の吐出圧で押し出すことができる。

このようにエクセバに供給された原料は、ディストリビューターで一様分散され、多段傾斜攪拌翼で高効率な蒸発が促進され、スクリー排出部から製品として払い出されるまで常に機械的な強制力で移送されているので10 000 Pa・sもの超高粘度液まで処理することが可能である。

2. 特殊構造

従来の高粘度液用薄膜蒸発機では、最終粘度が2 000 Pa・s以上の高粘度液を処理することが出来ないが、エクセバは、特殊構造（多段傾斜攪拌翼とスクリー排出部）を装備することによって、極めて高効率な蒸発と10 000 Pa・sの高粘度まで対応が可能である。

2.1 多段傾斜攪拌翼

エクセバの多段傾斜攪拌翼及び傾斜スクレーパの形状を写真1に示す。

攪拌式薄膜蒸発機で、垂直1枚攪拌翼近傍の高粘度液の流れを模式的に示したのが第2図¹⁾である。攪拌式薄膜蒸発機は、ディストリビューターで缶体内壁面に一様に分散された液を高速で回転する攪拌翼で掻き取っていくことによって、缶体内壁面に薄膜（Film部）を形成し、また翼先端前面部で掻き取られた液（Fillet部）は半径方向の遠心力を与えられる。低粘度液では、液膜部とフィレット部の流れが乱流であるため両者は良く混合されて均一な蒸発が行われる。しかし、高粘度液では、液膜部とフィレット部が混合されずに、第2図に示すようにフィレット部が攪拌翼前面を渦巻状態で降下していき、ショートパスをおこす。このため、フィレット部を降下した高粘度液は、十分な蒸発が行われないうえ、液膜部とフィレット部を通過した内容液の蒸発状態が異なるために、残留液（製品）が不均一になる。

以上は、薄膜蒸発機の垂直1枚翼の流動状態をモデル化したの定性的な説明であるが、垂直1枚翼と垂直2枚翼の液膜部とフィレット部の混合状態を定量的に示した村上²⁾らの実験結果を紹介する。

村上らは、翼間における液膜部とフィレット部の流体混



写真1
多段傾斜攪拌翼
Photo. 1
Multiple-pitched blades of EXEVA

合の評価法として、流体交換率Mを次に定義する。

$$M = \frac{C_{fB2} - C_{fA2}}{\bar{C} - C_{fA2}}$$

但し、

\bar{C} : 軸に垂直な断面内の平均濃度

C_{fA2} : トレーサ投入後のプローブAのフィレット部の平均濃度

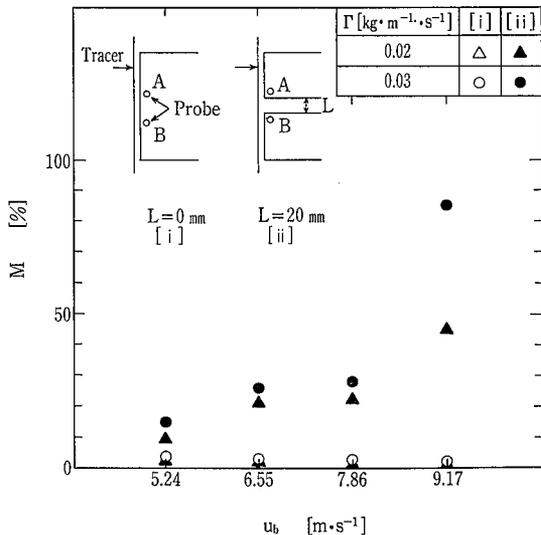
C_{fB2} : トレーサ投入後のプローブBのフィレット部の平均濃度

実験は、缶壁から電解溶液（トレーサ）を液膜部に注入し、翼前面のフィレット部に設置されたプローブAとBで濃度を測定して、前に定義した流体交換率Mで液膜部とフィレット部の混合度を判定基準とした。

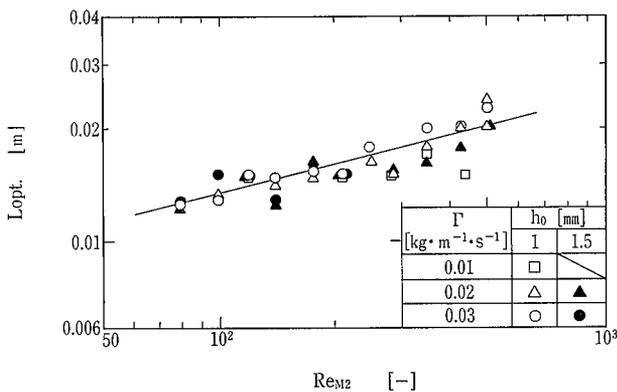
第3図²⁾に1枚翼である翼間隔 $L=0$ mmと2枚翼である $L=20$ mmの場合の流体交換率Mを翼先端速度 U_b [$m \cdot s^{-1}$] に対してプロットしたものを示す。プローブ間の間隔は両者とも等しくしている（30 mm）。翼の分割のない1枚翼の流体交換率Mは、2枚翼のそれと比較して、 U_b 及び I [$kg \cdot m^{-1} \cdot s^{-1}$]（単位侵辺長当たりの流量）によらず非常に小さいことがわかる。このことは、液膜部とフィレット部間の流体交換が極めて少ないことを示すものである。これに対して、2枚翼の場合、流体交換率Mは U_b の増加につれてかなり高くなっている。このことは、液膜部とフィレット部の流体を翼間で合流させて、翼エッジ部の攪拌作用により液膜部とフィレット部の流体混合が促進されていることを示している。

更に、村上らは、2枚翼の最適翼間隔を求めている。

第4図²⁾に流体交換率Mを翼間隔Lに対してプロットし



第3図 1枚翼と2段翼における流体交換率Mの比較
Fig. 3 Comparison of fluid exchange rate (M) of a single-blade apparatus with that of a double-blade apparatus.



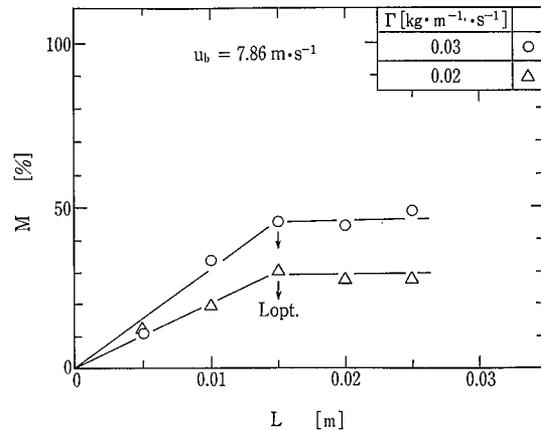
第5図 最適翼間隔 L_{opt} と攪拌レイノルズ数 Re_{M2} との相関
Fig. 5 Correlation between the optimum distance (L_{opt}) and the mixing Reynolds number (Re_{M2}).

をものを示す。これより、供給量が多い程流体交換率は大きくなる事がわかる。また翼間隔 L が大きくなる程流体交換率 M は上昇するが、ある一定の翼間隔以上になると流体交換率 M は一定値に漸近する。従って、翼間隔は翼による流体の表面更新作用を考えた場合、出来るだけ小さい方が良いことから、最適な翼間隔 L_{opt} が決定される。

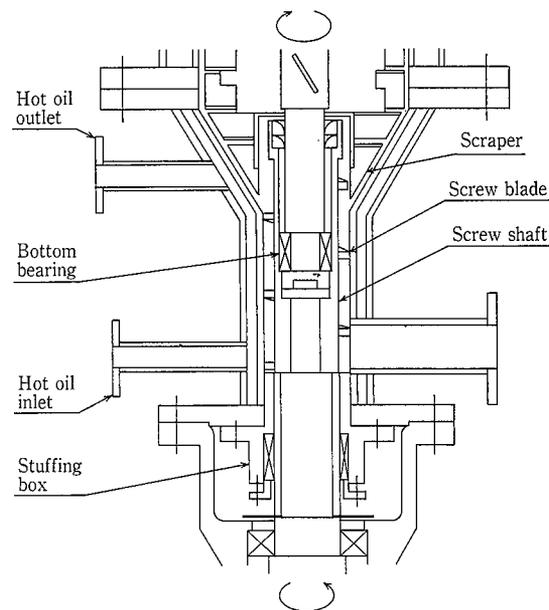
第5図²⁾に実験で求めた最適翼間隔 L_{opt} を、缶径 d を代表長さとした攪拌 Reynolds 数 $Re_{M2}(=\rho nd^2/\mu)$ に対してプロットしたものを示す。 Re_{M2} の増加につれて L_{opt} もわずかに増加するがクリアランスの依存性はない。これより、 L_{opt} は第5図中の実線で示される次式により相関される。

$$L_{opt} = 0.005 \times Re_{M2}^{1/4}$$

これらの結果より、多段翼が1段連続翼より優れている



第4図 2段翼の翼間隔による流体交換率Mの影響
Fig. 4 Effect of distance between upper and lower blades (L) on fluid exchange rate (M).



第6図 スクリュー排出部の断面図
Fig. 6 Sectional drawing of the screw discharger.

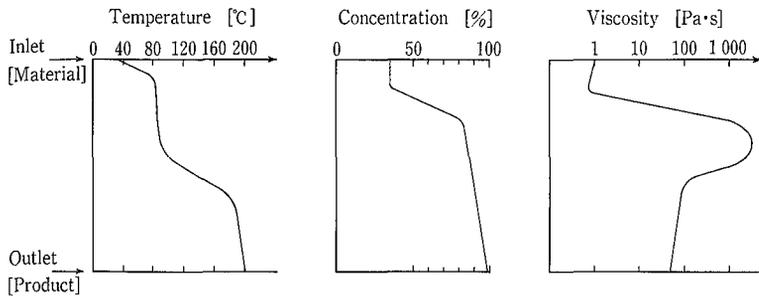
ことが明らかである。

垂直翼では、供給量が一定量を超えるとフィレット部を通過する流量が非常に増えてくるが、傾斜翼では、このようなことは生じない。傾斜翼は、翼先端前面のフィレット部の大きさが垂直翼に比較して格段に小さいので、供給量の変化によって、缶内ホールドアップ量は変化しない。

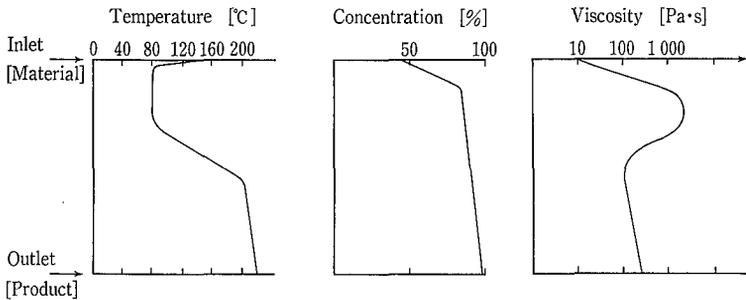
2.2 スクリュー排出部

従来の高粘度液用薄膜蒸発機の排出部は、缶体底部に真空用のギャポンプを取り付けて、自然落下してきた高粘度液を払い出しているが、エクセバは、スクリュー軸を付属した排出部を内蔵しており、缶体下部のコーン部で傾斜スクレーパによって強制移送されてきた高粘度液をスクリュー軸によって一定の吐出圧で排出する。

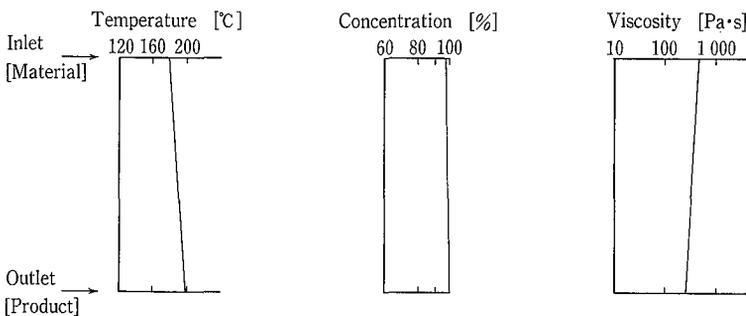
第6図にスクリュー排出部の断面図を示す。



第7図 原料から製品までの温度、濃度、粘度変化
Fig. 7 Changes of temperature, concentration, and viscosity from material inlet to product outlet.



第8図 原料から製品までの温度、濃度、粘度変化
Fig. 8 Changes of temperature, concentration, and viscosity from material inlet to product outlet.



第9図 原料から製品までの温度、濃度、粘度変化
Fig. 9 Changes of temperature, concentration, and viscosity from material inlet to product outlet.

スクリー軸は、1軸押出機と同じ原理であるが、スクリー軸の回転方向は、攪拌翼の回転方向と逆にする事によって、スクリー軸への高粘度液の流入を容易にし、低い回転数で十分な吐出量を可能とする構造に設計されている。この低い回転数のため排出動力は小さくなり、熱エネルギーへの変換が少ないので、この部分でのポリマーの熱変質を防止している。また、スクリー軸の内部に攪拌軸の軸受を設けることによって、エクセバには、下部軸受がないのと同じ効果を得ることが出来る。高粘度液用薄膜蒸発機では、攪拌翼の負荷が大きいため、どうしても下部軸受が必要であり、この部分で高粘度液を強制移送する機構を設けることが出来ないため処理液粘度は2000 Pa·sまでが限界であった。また、下部軸受サポート部で内容液の付着が生じて、この付着物が熱により劣化して、製品へのコンタミネーションの原因となる。エクセバでは、これらが全て解決され、粘度は10000 Pa·sまで処理することが出来る。エクセバは、これらの特殊機構を装備することによって、より高効率な蒸発性能と超高粘度液からの脱揮等数々の優れた特長を有することが可能となった。

3. 特長

- ① 超高粘度物質の処理が可能である。
- ② 伝熱係数が大きい。

- ③ 滞留時間が短い。
- ④ 省エネルギーである。
- ⑤ 分解点検が容易である。
- ⑥ 広い粘度域での処理が可能である。

4. 攪拌系の設計

エクセバは、超高粘度液を処理するため攪拌系への負荷は大きく、しかも缶体と攪拌翼とのクリアランスが狭いので、攪拌系の設計には十分な配慮を必要とする。また、スケールアップ時、実機での缶体と攪拌翼のクリアランスはテスト機のそれと同等なため、大型になるほど攪拌系の設計では、製作公差、負荷によるたわみ量等を考慮しなければならない。

4.1 攪拌系の荷重条件

攪拌動力は、テストで歪ゲージを利用して実測したトルク値をパソコンでオンライン処理して求めており、そのデータを基に攪拌動力の計算式を用いて実機に適用している。しかし、実機の攪拌系の設計の基になる攪拌荷重条件は、処理物質によっていろいろな場合が想定される。同等の攪拌動力であっても、攪拌翼に作用する分布荷重は異なる場合がある。攪拌翼に作用する分布荷重は、内容液の粘度に最も影響されるので、ポリマー溶液が蒸発していく過程で内容液の粘度変化を考えてみる。

供給口から出口まで、内容液中の溶剤が蒸発するに従って徐々に内容液の粘度が増していくと考えると攪拌翼にかかる分布荷重は、出口に近づくに従って増えてくると考えられるが、薄膜蒸発機内での変化はその様に単純ではない。

① 第7図に溶剤を多く含むポリマー溶液が供給口から蒸発を伴い出口へ移送されていく過程での内容液の温度、濃度、粘度の変化の1代表例を示す。供給された内容液の蒸発が始まるまでの顕熱部では、溶剤が多いので粘度も低いが、沸点(80°C)に達すると溶剤の蒸発が一気に始まりポリマーの濃度が高くなるが、ポリマーの温度は蒸発温度と等しく低いので、ポリマー粘度は非常に高くなっていく。この部分から、ポリマーが軟化する温度(130°C)まで蒸発がほとんどおこらず、ポリマー固体と熔融ポリマーが混在した極めて高粘度の領域がある。その後、ポリマー温度が上昇するに従って、ポリマー粘度は急激に低くなっていく。通常、溶剤分が数%以下になると溶剤の減少による粘度上昇より温度による粘度低下の方が大きく残留液出口では粘度が下がってくる。

この場合の攪拌翼に作用する分布荷重は、第7図の内容液粘度に比例した値にほぼ等しいと考えられる。

② 前述例はエクセバに供給された内容液が加熱されて蒸発が始まる場合であるが、エクセバ内に蒸発温度以上の液温で供給され、すぐに蒸発が始まる場合の内容液温度、濃度、粘度の変化の例を第8図に示す。供給された内容液は、ディストリビュータ部ですぐに蒸発が始まり、第7図に示される顕熱部と蒸発温度から粘度が最も高くなる領域の直前までの区間がなくなった状態になり、ポリマー固体と熔融ポリマーの混在領域を経て、その後は同じ過程を経ると考えられる。

この場合の攪拌翼に作用する分布荷重は、第8図の内容液粘度に比例した値にほぼ等しいと考えられる。

③ 第9図に原料中に含まれる揮発分が数%以下または数1000 ppm以下と少ないものを残留揮発分100 ppm以下にする場合の例を示す。本例の場合、内容液は処理温度で供給されるので入口から出口まで内容液の温度が多少上がる程度で、揮発分の変化は無視出来る程度であるので、内容液粘度は少し低下していく。

この場合の攪拌翼に作用する分布荷重は、入口から出口までほぼ一定と考えられる。

また、原料中に多量の溶剤を含み蒸発後も揮発分を数10%残留させたいもの、沸点の異なる溶剤を含む場合の蒸発

等さまざまな場合があり、それぞれで攪拌翼に発生する分布荷重条件が異なってくる。

4.2 攪拌軸の設計

攪拌軸に発生する主な荷重は、攪拌トルクによるねじり荷重と攪拌トルク変動によっておこる曲げ荷重である。薄膜蒸発機では、高粘度液のため攪拌トルクは大きく、また蒸発を伴うので機内で粘度変動が大きくそのため攪拌トルク変動も大きくなる。この攪拌トルク変動は、攪拌系の荷重条件で示されている攪拌翼の分布荷重に比例した値の変動成分であり、それが軸に作用する曲げ荷重に相当する。

エクセバは、下部軸受をスクリュウ軸内に内蔵する特殊構造を有している故に攪拌軸の設計は、従来のものに比較して複雑である。攪拌軸の上部は、缶体上部の軸受で支持された自由端固定であるが、その下部は、スクリュウ軸内に設けられた軸受で支持されているので、スクリュウ軸のたわみ量に影響を受ける自由端固定となる。それ故、攪拌軸の強度計算は、スクリュウ軸の強度も関係しており、攪拌軸系とスクリュウ軸系も含めた全体構造で解析を行わなければならないので、有限要素法プログラム ANSYS を用いて解析している。エクセバは、缶体と攪拌翼先端とのクリアランスが狭いため、攪拌軸の設計は、攪拌軸の最大たわみ量で決定される。最大たわみ量を求めるためには、攪拌軸系とスクリュウ軸系も含めた全体構造で計算する必要がある。

むすび

高粘度液用薄膜蒸発機「エクセバ」を開発して蒸発業務に携わってきたが、従来機器にない特殊構造を有している故に、実機の設計、製作上では多くの考慮を払っている。

ポリマーの高品質化に伴って、モノマー及び溶剤の許容値はますます厳しくなっており、また地球環境問題から廃棄物中の溶剤回収も必要になってきている。今後とも、エクセバの適用範囲は広がっていくものと考えており、本稿が高粘度液の蒸発に携わっている方々に少しでも参考になれば幸いである。

最後に、本開発に関して有益な御助言を頂き、また本稿に引用しました文献を提供して頂いた九州大学工学部化学機械工学科村上泰弘教授に深く感謝の意を表します。

〔参考文献〕

- 1) Komori, S., K. Takata and Y. Murakami : Chem. Eng. Japan Vol. 21, No. 6, (1988)
- 2) Komori, S., K. Takata and Y. Murakami : Chem. Eng. Japan Vol. 22, No. 4, (1989)