フィラメント積層法の研究

(第2報) 遠心力脱泡機構の解析

日立造船 技術研究所 西 野 義 則 (会員)
 〃 〃 河 内 襄 介

Study on Centrifugal Filament Winding.

Part 2: Analysis on Mechanism of Defoaming.

Yoshinori Nishino and Josuke Kawachi,

*Technical Research Institute, Hitachi Zosen Corporation,
 Sakurajima-Kitano-Cho, Konohana-ku, Osaka.*

Abstract

The centrifugal forming method has an advantage of better impregnation and defoaming performances than other general forming methods. The factors affecting on impregnation and defoaming are pressure, vibration, temperature and materials. This report is composed of an analysis and experimental study of those factors.

- (1) It was experimentally clarified that the superior impregnation and defoaming by centrifugal foaming are derived from activation of the bubble flow by vibration and from increase of the buoyancy by centrifugal force.
- (2) The speed of impregnation and defoaming was classified by an analysis of experimental results.
- (3) The centrifugal force improves the defoaming speed, but it has no influence on the attainable minimum size of bubbles.

(Received September 21, 1983)

摘 要

目的 遠心成形法の最も大きな特徴は樹脂の含浸脱泡が一般成形法に比べて優れていることである。含浸脱泡に及ぼす主たる要因は、圧力、振動、温度、材料とする。本報は、各要因の効果を実験により調べ、近似含浸脱泡速度の解析を行う。

成果

- (1) モデル実験から、遠心成形における優れた含浸脱泡特性のメカニズムは、遠心力による気泡の浮力増大と振動による気泡の運動効果であることが明らかになった。
- (2) モデル実験による含浸脱泡メカニズムの解明から、近似含浸脱泡の解析を行った。
- (3) 解析から、遠心力は含浸脱泡速度を高速にする効果があるが、可能な脱泡限界には影響しないことが明らかになった。

(昭和58年9月21日受理)

1. 緒 言

前報では¹⁾ 遠心力を利用したファイバワインディング法のメカニズムについて述べた。本報は、これに引続き遠心力下における樹脂のファイバに対する含浸と樹脂中に含有する気泡の脱泡（以下、含浸

脱泡と呼ぶ）に関して述べる。

複合材料の発祥であるFRP (Fiber Reinforced Plastics) は、最初 Pittsburgh Plate Glass 社がアリル樹脂とガラス繊維とを組合せることから始まり、1942頃 U. S. Rubber 社によって今日にみられるような不飽和ポリエステル樹脂とガラス繊維の組

合せ^{2)~5)}が開発された。その後、1950年ごろから遠心力を用いた管体成形法の研究が始まり、多くの技術者により研究が進められた。しかし、これらの先駆的研究^{6)~12)}は数少なく、主に特許によって紹介^{13)~14)}され、遠心力下での樹脂の含浸脱泡に関する研究報告はない。

本報では、樹脂の遠心力脱泡機構に関してモデル実験と解析を行った。モデル実験では、遠心成形で含浸脱泡に影響すると考えられる遠心力と金型回転に伴う機械振動をそれぞれ減圧とパイププレート振動に置換えた。そして、樹脂やファイバによる含浸脱泡に及ぼす影響などを実験した。解析では、モデル実験結果で含浸脱泡に影響の大きい要因を選択し、近似解析を行った。

2. 遠心成形法における含浸脱泡の重要性

図1に示すFRPM (Fiber Reinforced Plastics Mortar) サンドイッチ構造の遠心成形品と、図2に示す同構造の手積成形品の写真を比べてわかるよ

図1 遠心成形品

(内径150 mm, 肉厚12 mm, FRPM サンドイッチパイプ
外面FRP層: ファイバ含有率30 Vol %, モルタル層: 砂含有率72 Vol %, 内面FRP層: ファイバ含有率40 Vol %)

図2 手積成形品

(図中のクラックは強度試験によるものである。図中の点々がピンホールを指す)

うに、手積成形品はモルタル層にピンホールを多く含んでいるのに対し、遠心成形品はほとんどみられない。この例からも推察できるように、遠心成形法の最も大きな特徴は樹脂の含浸脱泡が優れていることである。しかし、遠心成形法といえども成形時間を短縮しすぎると図3、4に示すように樹脂の含浸不良や脱泡不良となる。したがって、遠心成形法では含浸脱泡が優れているがゆえに、そのメカニズムの解析は重要といえる。

図3 含浸不良によるモルタル層の分解、離脱
(図中のクラックは強度試験によるものである)

図4 脱泡不良によるピンホールの発生
(下部FRP層の線上に長い空洞がピンホールを指す)

3. 含浸脱泡に及ぼす要因

遠心成形法における含浸脱泡に及ぼす要因を図5に示す。遠心成形法の含浸脱泡は主に物理的な諸要

図5 遠心成形における含浸脱泡に関する特性要因

因と化学的な諸要因が考えられる。これらの要因のうちで、遠心成形に最も深い関係にあるのは、物理的諸要因である。この物理的諸要因として考えられるのは、遠心力、ファイバ含有率、振動、温度である。遠心力は、各材料間の強力な比重分離作用がある。この作用は含浸に影響する。また、遠心力によって生じる遠心圧は、樹脂中の気泡を強力に脱泡する作用が考えられる。ファイバ含有率、振動は、遠心力による含浸脱泡に伴う樹脂の運動抵抗に影響すると考えられる。温度は、樹脂粘度に影響するから、含浸脱泡に伴う樹脂の運動に影響する。化学的諸要因としては、樹脂とファイバの材料選択、触媒、温度による影響などがあげられる。これら諸要因はすべて材料間の界面活性作用に関係することから含浸に影響する。また、気泡のファイバ表面から離脱にも関わると考えられることから、脱泡にも影響するだろう。

その他の諸要因としては、材料要因を除くと一定にすることができる。各材料の要因は、ファイバ含有率、粘度、界面活性などに関係する。

3.1 実験方法

含浸脱泡に及ぼす各要因の影響を調べるには、遠心成形装置を用いて実験を実施するより、各要因別のモデル実験を実施する方が効果的であることから、モデル実験を実施する。遠心力と含浸脱泡効果の関係について調べるのにつぎの方法を採用する。含浸は樹脂とファイバの比重差が影響する。モデル実験では、比重差の影響をみるために、樹脂の上にファイバを入れる場合（Aモデル）とその反対のファイバの上に樹脂を入れる（Bモデル）2種類の実

験を行う。脱泡は気泡に働く浮力に加わる圧力勾配の大きさに影響される。脱泡に関しては、遠心力に相当する圧力勾配を作り出す方法として、質量の大きい樹脂なみの粘度を有する媒体を用いる方法が考えられるが、この方法ではファイバが浮上するなど問題が生じる。そこで、モデル実験では、気泡が大きいほど粘性抵抗により脱泡時間が短くなる点に着目してボイルの法則より、減圧による見掛けの気泡径を大きくとり脱泡速度の向上をはかり実験を行う。

金型の回転に伴う振動の効果を調べる方法としては、バイブレータと鋼製のワイヤ ブラシを用いて積層面を上下方向から加圧して実験を行う。材料選定や触媒、温度などに関わるファイバと樹脂の化学的な界面活性効果については、比較的实验結果が顕著に得られるAモデル（詳細後述する）を採用する。これらの実験方法により実験実施した条件を表1に示す。なお、表1において使用した樹脂量はすべて等量で、肉厚換算すると約4 mmである。そして、ファイバは各種形態（ファイバ含有率の異なる）のファイバを取上げ、積層肉厚がそれぞれ等しくなるように約1 mmとする。ここで、ファイバ含有率は特記しない場合空気中でのファイバ含有率（以下、単に含有率と呼ぶ場合もある。）を示す。各ファイバの積層プライ数、含有率はそれぞれG1;1プライ（約25 Vol %）、G2;3プライ（約25 Vol %）、G3;1プライ（約10 Vol %）である。使用する樹脂は通常市販されている不飽和ポリエステル樹脂（約40 wt % スチレン含有）で、粘度が $4 \sim 14 \text{ Pa} \cdot \text{s}$ {0.4~1.4 Pa·s} である。なお、ここで低い含有率のファイバを選んだ理由は、高い含有率のファイバを用い

表1 実験条件、項目

（総実験数約450回）

	圧			力	
	760 (mmHg) {101.3 kPa}	560 (mmHg) {74.7 kPa}	360 (mmHg) {48.0 kPa}	160 (mmHg) {21.3 kPa}	10 (mmHg) {1.3 kPa}
10(℃)		○	○	○	○
20(℃)		○	○ □ ◇	○	○
30(℃)		○	○ □ ◇	○	○
40(℃)	□ □	○ □ □ □ ◇	○ □ □ □ ◇	○ □ □ □ ◇	○

（使用樹脂）(R1) ; 8225APs, (R2) ; 3308 A, (R3) ; 3702……武田薬品

R4 ; TD-R-1068, R5 ; J-8029, R6 ; 8011, R7 ; 8027……大日本インキ

（使用ファイバ）G1 ; ガラス テープ, B11B……旭ファイバ, G2 ; ロービング クロス

WA570B, G3 ; ロービング, RS240E-601BE……日東紡

（使用触媒）BPO1 % , {○印 : Aモデルにおける触媒有無の実験を示す}

○印 : R1~R7, G1~G3 すべての組合せのAモデルを示す。

□印 : R1, G2 によるBモデルを示す。

□印 : R1, G2 による加振（強）のBモデルを示す。

□印 : R1, G2 による加振（弱）のBモデルを示す。

◇印 : 加振に加圧したBモデルを示す。

ると、実験時間が長びくことと、含浸脱泡の判定がむずかしくなるためである。また、触媒にBPOを用いたのは樹脂の硬化などによる影響を少なくするためである。

3.2 実験装置および実施手順

図6は含浸脱泡の実験装置である。この装置は恒温水プール内のデシケータ内を減圧して、内部に電動式バイブレータ〔加振(弱)：振動数約1 200 mm⁻¹、振幅約0.2 mm、加振(強)：振動数約1 700 mm⁻¹、振幅約0.3 mm〕を内装し、その振動プレート上に両面接着テープにより固定した試験体シャーレをのせ、上部より加圧ブラシ(ワイヤ径約0.2 φ mm、長さ約20 mmの木製ハンド ブラシ)を吊し、上下移動可能にした装置である。なお、加圧ブラシには おもり〔加圧(小)：約5 gf/cm²〔490 Pa〕、加圧(大)：約15 gf/cm²〔1470 Pa〕〕を取付けている。そして図6はシャーレ内にファイバが沈んでいる状態を示している。この装置を用いて前項に示した実験を実施する手順はつぎのとおりである。

図6 含浸脱泡実験装置

Aモデル：シャーレに入れた樹脂をデシケータ内で温度を一定にして安定させたのち、触媒を必要とする実験では触媒(BPO, 1 wt %)を添加し、十分混合した状態にして樹脂上にファイバを入れる。その後デシケータ内を減圧し、減圧が完了した時点から図7に示すように気泡が独立した状態で含浸完了、図8に示すように気泡がなくなった状態で脱泡完了と目視により判断し、樹脂上にファイバを入れてから、含浸完了までの時間を含浸時間、その後脱泡完了までの時間を脱泡時間、含浸時間と脱泡時間の和を含浸脱泡時間と呼びその

図7 含浸の完了状態の例

(樹脂：R2
ファイバ：G3
実験方法：Aモデル)

図8 含浸脱泡の完了状態の例

(樹脂：R2
ファイバ：G3
実験方法：Aモデル)

時間を測定する。つぎに、デシケータを常圧にしてサンプルを取出し、黒紙上で図8のように写真撮影を行って記録する。

Bモデル：シャーレに すき間のないようにファイバを入れ、所定温度の樹脂をその上から入れ、デシケータで減圧し、加圧ブラシをファイバ上に載せ、加圧ブラシに所定圧〔加圧(大)、加圧(小)〕を加え、加振〔加振(強)、加振(弱)〕させながら上記同様の目視判定により、含浸脱泡の時間測定、写真撮影を行う。

3.3 実験結果および考察

A・A・Bモデル実験の比較

図9はA・Bモデル実験の含浸脱泡時間を比較したものである。図より、ファイバ上に樹脂を入れるBモデルに比べて、樹脂上にファイバを入れるAモデルの方が含浸脱泡時間が最大約60%短くなることがわかる。そしてA・B両モデルは減圧による影響を共通に受けている。これはA・Bモデル間の脱泡時間に大差がほとんどないとみられることから、含浸段階で両モデルに差が生じたと考えられる。A・B

図9 A Bモデル実験の比較

(樹脂: R1
ファイバ: G2
温度: 40℃)

両モデルの違いは、樹脂中にファイバが沈むことと、ファイバ間に樹脂が沈むことである。この違いを比重でみると、樹脂は約1.1、ファイバは約2.6である。ここで、含浸を樹脂のファイバ間への力学的な沈みと考えるならば、Aモデルでは $2.6 - 1.1 = 1.5$ の比重差、Bモデルでは樹脂のみの比重1.1と約30%の違いを見出す。

B. 材料選定および触媒有無の影響

図10, 図11, 図12はファイバ, 樹脂, 触媒が含浸

図10 ファイバの影響

(樹脂: R1 (BPO 1 wt % 含有)
温度: 40℃
実験方法: Aモデル)

脱泡に与える影響を示したものである。図10よりファイバ含有率の最も高いG2 (約25 Vol %) は、最も含浸脱泡時間が長い。これに比べてファイバ含有率の最も低いG3 (約10 Vol %) は、含浸脱泡時間が最大約70%短縮される。これは、ファイバ含有率が含浸脱泡時間に影響することを意味する。しかし、G1 (約25 Vol %) はG2と同等のファイバ含有率にもかかわらず、含浸脱泡時間が短いことからファイバ含有率のみによる影響とはいえない。ファイバの表面処理(界面活性効果の含浸への影響)も影響していると考えられる。なお、この実験では、ファイバ外部より圧力その他荷重を加えていないことから、ファイバ含有率は樹脂中においてもほとんど変化していないと考えられる。

図11では、不飽和ポリエステル樹脂は同種の樹脂

図11 樹脂の影響

(ファイバ: G3
圧力: 360 mmHg {48.0 kPa}
実験方法: Aモデル)

ではほぼ同一の粘度¹⁾約4 P {約0.4 Pa·s} であっても含浸脱泡時間が最大約30%異なることを示している。また、図示していないが、同一メーカー製で粘度が異なる樹脂であってもR1 (促進剤入り)¹⁾約4 P {0.4 Pa·s} とR2約3 P {約0.3 Pa·s} では、前者の粘度が少し高いにもかかわらず、含浸脱泡性が良いように思えた。これらは、樹脂とファイバの界面活性効果が含浸に影響したものと考えられる。同様に、図12には触媒の添加が微かながら含浸脱泡に影響することを示している。これは、触媒中に混入している界面活性剤による影響か、あるいは触媒の過氧化物自体が含浸に影響しているのだろう。

C. 減圧の影響

図13は圧力と含浸脱泡時間の関係を示したもので

図12 触媒の影響
(樹脂: R1 温度: 40℃)
(実験方法: A モデル)

図13 減圧, 温度の影響
(樹脂: R1
ファイバ: G3
実験方法: A モデル)

ある。図より、減圧すれば含浸脱泡時間が速くなり、560 mmHg {74.6 kPa} と比較して、360 mmHg {48.0 kPa} では最大約30%, 160 mmHg {21.3 kPa} では最大約60%短縮されることがわかる。これは、減圧による樹脂中の気泡の膨張に伴う見掛けの浮力増大が影響していると推察する。また、160 mmHg {21.3 kPa} と10 mmHg {1.3 kPa} 間で含浸脱泡時間が大幅に短縮される。これは、樹脂中のスチレンモノマが沸騰状態になり樹脂中の気泡がスチレン蒸気と一緒に、放出されるためと考える。したがって、力学的な脱泡効果ではない。また、この領域は遠心成形

には存在しない。なお、スチレンモノマの沸騰は、温度により異なるが、20~40℃領域では約50~100 mmHg {6.7~13.3 kPa} 以下であった。

D. 温度の影響

図13から、温度と含浸脱泡時間の関係を見ると、温度の上昇は、含浸脱泡時間の短縮につながり、10℃のときと比較して、20℃では最大約20%, 30~40℃では最大約40%, 短縮されていることがわかる。これは、図14に示すように、温度が樹脂の粘性低下を

図14 R1樹脂の温度と粘度

促進するためであろう。一方、スチレンモノマが沸騰する領域では温度による影響がほとんどない。これは、沸騰状態であれば温度の高低には関係しないことを意味している。

E. 加振の影響

図15は加振の強度および加圧の大小と含浸脱泡時間の関係を示したものである。加振のみの影響を見ると加振((強))では含浸脱泡に影響はないが、加振

図15 加振・加圧の影響

(樹脂: R1
ファイバ: G2
温度: 40℃
実験方法: B モデル)

(強)では含浸脱泡時間は最大約60%短縮されている。これは、ファイバ間にある気泡の運動を向上させているためであろう。そして、振動による効果を得るためにはある一定以上のエネルギーが必要であることを示している。

F. 加振・加圧の影響

図15より、加振(弱)において加圧(小)では含浸脱泡時間に変化はないが、加圧(大)では含浸脱泡時間が最大約10%短縮されている。そして加振(強)において加圧(小)では最大約5%、加圧(大)で最大約10%含浸脱泡時間が短縮されている。すなわちこれらは、加圧の影響が小さいことを示している。含浸脱泡時間を最短にする条件についてみると、図15に示す範囲では、加温40℃、減圧(160 mmHg 21.3 kPa)、加振(強)、加圧(大)、Bモデルの条件時であり、図15に示す加温40℃、常圧(760 mmHg | 101.3 kPa)の状態の含浸脱泡時間に比べて単純計算で約10倍の短縮となっている。

3.4 遠心力含浸脱泡に影響する要因

図16は、遠心力含浸脱泡に影響する各要因のとり得る最大含浸脱泡効果について相対比較したものである。横軸には各要因を、縦軸には含浸脱泡影響%を示す。ここで含浸脱泡影響%とは、図9～15に示す各要因の含浸脱泡時間について、最大値と最小値の差を最大値で割った総平均%である。図よりA、Bモデルの相違、ファイバの選択による含浸脱泡影響%はともに約60～70%であり、化学的な影響については、樹脂、触媒の選択が影響している。これらの影響は前者が約30%、後者が約10%である。影響

図16 含浸脱泡要因の影響総まとめ

の少ない後者を無視すると樹脂材選択による界面活性の影響は約30%とみられる。

以上から、ファイバ含有率を除き、A・Bモデルの相違、各材料の選択による界面活性効果の含浸脱泡の影響は主に含浸に対して影響されよう。

つぎに、物理的な影響についてみると、図より、まず、減圧による影響は約80%と大きい。ついで、加振による約60%の影響、加熱による約40%の影響である。しかし、加圧の影響は約10%と小さい。これらは遠心成形要因にそれぞれ対応していることから、この傾向が含浸脱泡に適用されよう。

なお、図16において、各要因別の影響をパーセント表示したが、ここで示した値は各要因別のモデル実験値であり、要因間に対する全体的な効果を示したのではない。したがって、ここで表示された含浸脱泡影響%を遠心成形の全体に対応させた影響%にすることはできない。しかし、遠心成形に適用する場合には、つぎのような考察ができる。モデル実験では、低含有率のファイバを採用しているが、実用的には高含有率の成形が多い。高含有率の成形になれば、当然ファイバによる抵抗が大きなウェイトを持つことになる。これは、浮力に対する諸抵抗の合計値が増大することを意味する。したがって、樹脂や触媒に関する化学的な界面活性の含浸に及ぼす影響を相対的に低下させることになる。

4. 遠心成形法における含浸脱泡時間の推定

以上の実験結果から、遠心力含浸脱泡に関する主たる支配要因はファイバによる抵抗、遠心力による気泡に働く浮力の増大、樹脂温度に関係する粘性抵抗、金型の回転に伴う振動と考える。しかしこれらを時間の関数で忠実に解くことは、つぎの諸因子が不明のため困難性を伴う。

- ・金型回転に伴う機械振動とファイバ含有率に関わる脱泡過程の気泡の通過抵抗
- ・ファイバと樹脂の界面活性
- ・樹脂の硬化に至るまでの状態変化

しかし、実際成形に必要な概算式は、残留する気泡の径が許容径以下となる成形条件が、近似的に算出できれば有意義であると考えられる。このことから、ここではある程度の解析誤差を伴うが、実用上意義のあることと考え、簡略な計算式を導くことにする。

4.1 仮定と理論

前項A・Bモデル実験では、材料間の比重差が含浸に大きく影響することを示していた。ここで、比

重の影響について考えてみる。Aモデルではファイバから樹脂の比重を差引いた値 ($2.6 - 1.1 = 1.5$) を意味し、Bモデルでは樹脂から空気の比重を引いた値を意味する。 ($1.1 - 0.00 = 1.1$) A, Bモデルの相違による差は1.5と1.1の差である。これは、含浸には比重差に関係する重力加速度が大きく影響していることを意味する。遠心成形法では、遠心力が重力加速度の数10～数100倍と大きいので、非常に短時間に含浸が完了することが予想される。一方、遠心成形法においても図17に示すようにモデル実験に相当するAモデル含浸方式、Bモデル含浸方式の

図17 遠心力含浸脱泡状態の想定

成形法がある。しかし、遠心成形法では、前項モデル実験と異なり、含浸時間が脱泡時間に比べて速いことから、含浸脱泡時間は脱泡時間が主体をなすと考えられる。これは、図17に示すような想定脱泡状態のみを考えればよいことになる。

含浸終了後、樹脂中に気泡が独立した状態で複数個存在すると仮定する。今、その1個の気泡について考えてみる。図17に示すように、気泡がファイバ間を通過する必要性から、最大気泡径はファイバ間のクリアランスに近いと考えられる。また、ファイバ間のクリアランスより大きい気泡が存在した場合、あるいは気泡に働く浮力の方向にファイバによる抵抗壁からの離脱に多くのエネルギーを必要とする場合、この気泡径の分割および離脱のエネルギーは振動によるエネルギーが影響していると考えられる。

しかし、振動エネルギーだけでは脱泡することができないことから、気泡の脱泡方向に働く力は浮力である。モデル実験では、減圧による浮力増大の実験

を行い、その影響が大きかった。しかし、遠心成形法の重力加速度の倍率に見合う浮力増大は実験できなかったが、遠心成形法では大きな浮力が見込めると考えられる。以上から、脱泡過程における気泡の運動はつぎのように推定される。気泡は、一様に樹脂の粘性抵抗を受け、ファイバによる抵抗と振動による脱泡促進効果を同時に受けながら脱泡していくと考えられる。そして脱泡時の樹脂温度は樹脂の硬化発熱に対して、金型、ファイバなどの熱容量が十分大きいので一定とみなせる。さらに、気泡はファイバ間を通過してくることから、気泡径は小さく、ほぼ一定の大きさであると仮定すると、使用する樹脂のレイノルズ数は 10^{-2} オーダーであること、さらにウェーブ数が1以下であることから気泡は浮上速度が遅いため、球形とみなせる。以上から気泡の浮力に対して作用する抵抗は、樹脂の粘性抵抗とファイバによる抵抗の和によって近似的に表わせる。これらの関係を図示すると図18に示すことができる。

図18 気泡に働く力関係

ここで、これらの仮定をまとめると、つぎに示すことができる。

- 1) 含浸段階は無視する
- 2) 気泡の最小径はほぼ一定の球形で樹脂層の厚さに比べて小さい
- 3) 気泡の運動は緩慢である
- 4) 樹脂層は一様な性質で粘性抵抗は一定である
- 5) 樹脂層の肉厚は金型半径に比べて小さい
- 6) 加振時の気泡の通過抵抗は、時間、半径、位置に対して一定である
- 7) 界面活性は無視する
- 8) ファイバは気泡が通過するに十分な間隔がある

以上の仮定と図18より脱泡の釣合い方程式は(1)式で表わされる。

$$m \frac{du}{dt} = F - R - C \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここで m ; 気泡の質量

u ; 気泡の浮上速度 (中心へ向かう速

度を正とする)

F ; 浮力

R ; 粘性抵抗

C ; 通過抵抗 (脱泡抵抗)

また、遠心圧力 P は樹脂層内の微小六面体における力の釣合いの式より(2)式で表わされる。

$$P = P_1 + \frac{\rho_R}{2} \omega^2 (r^2 - r_1^2) \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここで P_1 ; 大気圧

ρ_R ; 樹脂密度

ω ; 金型回転角速度

r ; 任意の r 方向の半径

r_1 ; 樹脂層内面半径

つぎに、図18より、浮力 F は気泡が球形とみなせることから(3)式で求められる。

$$F = \int_A P \sin \theta d\theta A = \frac{\pi}{6} D^3 \omega^2 \rho_R \bar{r} \quad \dots\dots\dots (3)$$

ここで A ; 気泡の表面積

θ ; 気泡の中心から成す角

$\bar{r}$; 気泡中心位置半径

D ; 気泡径

そして、気泡は球形で小さく、緩慢な運動であると思われることから、粘性抵抗はストークス¹⁵⁾の(4)式で表わされる。

$$R = 3\pi\mu Du \quad \dots\dots\dots (4)$$

ここで、 μ ; 粘度 (成形温度での粘度)

一方、図より

$$u = -\frac{d\bar{r}}{dt} = -\frac{dx}{dt} \quad \dots\dots\dots (5)$$

であるから、(2)~(5)式を(1)式に代入すると近似遠心力脱泡を表わす(6)式を得る。

$$m \frac{dx^2}{dt^2} + 3\pi D \mu \frac{dx}{dt} + \frac{\pi}{6} D^3 \rho_R \omega^2 x = -\frac{\pi}{6} D^3 \rho_R \omega^2 r_1 + C \quad \dots\dots\dots (6)$$

ここで、 x ; r_1 内面より気泡中心までの深さ

なお、ここでは気泡径を一定と仮定しているが、振動や抵抗による気泡分割が生じないものとして、その誤差は $P_L V = \text{一定} V \propto \frac{1}{P_L}$ とすると、

$$\therefore \frac{D_{\max} - D_{\min}}{D_{\min}} = \sqrt{\frac{P_L + \frac{1}{2} \rho_R (r_2^2 - r_1^2) \omega^2}{P_L}} - 1 \leq 1.8\%$$

と小さい。

ただし、 P_L ; 樹脂層中の気泡の圧力

V ; 気泡の体積

r_2 ; 樹脂層外面半径

実際上から適当な値として、 $\omega \leq 100 \text{ rad/s}$, ρ_R

$\approx 1.1 \text{ g/cm}^3$, $r_2 - r_1 \approx 1 \text{ cm}$, $r_2 + r_1 \approx 10 \text{ cm}$ を用いた。したがって、ここでは無視される。

4.2 近似式の解

(6)式において、いま直径 1 mm の気泡を考えると、

$$m = 6.66 \times 10^{-7} \text{ gf} \cdot \text{s}^2/\text{cm} \quad [6.8 \times 10^{-10} \text{ g}]$$

$$\mu = 1 \sim 80 \text{ P} \quad [1 \times 10^{-1} \sim 8 \text{ Pa} \cdot \text{s}]$$

となる。

すると、樹脂の特性から粘性抵抗が大きく気泡の浮上が緩慢となり、このことから左辺第1項の慣性項が無視できる。したがって、(6)式は1階常微分方程式となり、初期条件は図18より $t = 0$ のとき、 $x \approx T_L$ でその一般解は(7)式となる。

$$x = \left(\frac{6C}{\pi D^3 \omega^2 \rho_R} - r_1 - T_L \right) \left(1 - e^{-\frac{D^2 \rho_R \omega^2}{18\mu} t} \right) + T_L \quad \dots\dots (7)$$

そして、 $t = t_0$ のとき $x \approx 0$ として、これにより t_0 を求めると(8)式を得る。

$$t_0 = -\frac{18\mu}{D^2 \omega^2 \rho_R} \ln \left\{ \frac{D^2 \omega^2 \rho_R r_1 - 6\beta q}{(T_L + r_1) D^2 \omega^2 \rho_R - 6\beta q} \right\} \quad \dots\dots\dots (8)$$

ここで、 t_0 ; 気泡の深さ T_L の位置から脱泡する時間 ($t_{0\max} \rightarrow T_{L\max}$)

T_L ; 気泡の深さ ($T_{L\max} \approx r_2 - r_1$)

なお、通過抵抗 C は定数として取扱いが簡単な数 (例えば $0.1 \sim 10$ の範囲) に置換するためつぎの関係を利用する。通過抵抗 C は樹脂中の球形の気泡に関わる定数である。したがって力学的に關係する気泡の表面張力に着目し、通過抵抗 C を、

$$C = \beta \pi D q \text{ とおく}$$

β ; ファイバにより定まる遠心成形の抵抗定数

q ; 樹脂層内気泡の表面張力

この(8)式が遠心力脱泡の脱泡時間を求める近似式である。(8)式を計算する場合、ある程度の誤差 (約10%以下) を許容する簡易式は2次の微小項を省略すると(9)式となる。

$$t_0 \approx \frac{18\mu T_L}{D^2 \rho_R \alpha g f - 6\beta q} \quad \dots\dots\dots (9)$$

$$\text{ただし、} \alpha = \frac{r \omega^2}{g f} \approx \frac{r_2 \omega^2}{g f} \approx \frac{r_1 \omega^2}{g f} \text{ と置き、}$$

α : 無次元遠心加速度 (重力加速度の倍数), $g f$: 重力加速度とする。

なお、脱泡時間を実算する場合、つぎの考え方をする。ある気泡径の残留は、欠隔の残留する大きさを意味することから、許容気泡径 $D_{\min}$ を定める。そして、脱泡時間は最も脱泡時間の長い気泡位置

$T_{L\max}$ からの脱泡に必要な時間とする。(9)' 式は実用的な許容脱泡時間 t_c を求める式である。

$$t_c \doteq \frac{18\mu (r_2 - r_1)}{D_{\min}^2 \rho_R \alpha g f - 6\beta q} \quad (9)'$$

一方、(8)式において、 $t_0 > 0$ であることから、右辺の対数項は、

$$1 \geq \left(1 - \frac{T_L D^2 \omega^2 \rho_R}{(T_L + r_1) D^2 \omega^2 \rho_R - 6\beta q} \right) > 0$$

$$\therefore D > \sqrt{\frac{6\beta q}{\rho_R \alpha g f}} \quad (10)$$

この(10)式が遠心力脱泡の可能脱泡範囲を表わす近似式 (= ; 簡易式) である。そこで、この(9)、(10)式を一般的な成形条件範囲で図示すると、図19、図20の特性を得る。図19より、 β 、 D は脱泡時間に大きく影響し、選択範囲は α によって定まることがわかる。

図20より脱泡時間を無視した可能脱泡限界は α の影響が少なく、 β 、 D の影響が大きいことがわかる。

すなわち、遠心力は脱泡速度を高速にする効果が主体であり、可能脱泡限界の向上効果は少ないといえる。

図19 遠心含浸脱泡速度と気泡径と抵抗の関係
(条件: $\rho_R=1.1$, $\mu=4$, $q=45$ (cgs 単位系))

図20 可能脱泡限界と気泡径と抵抗の関係
(条件: $t_0=\infty$, $\rho_R=1.1$, $q=45$ (cgs 単位系))

4.3 遠心力脱泡と一般成形における脱泡 (一般脱泡) の比較

(8)式から一般脱泡時間 t_0' を導くと(11)式となる。

$$t_0' \doteq \frac{18\mu T_L}{D^2 \rho_R g f - 6\beta' q} \quad (11)$$

ここで、 β' : 静的な通過抵抗 ($\beta < \beta'$)
したがって、 $\beta' > \beta/\alpha$ 、さらに $\alpha = \frac{1}{6} D^2 \rho_R g f$ とすると、(9)、(11)式の比較は(12)式となる。

$$\frac{t_0'}{t_0} \doteq \alpha \left(\frac{\alpha - \frac{\beta}{\alpha} q}{\alpha - \beta' q} \right) > \alpha \quad (12)$$

(12)式から遠心力脱泡は一般脱泡に比べて、少なくとも脱泡時間が遠心力 α の倍数以上短縮されることがいえる。

4.4 近似解と実験結果

遠心成形法による解析結果の直接検証実験が困難なことから、ここでは近似解の検証に図13のモデル実験結果を用いる。モデル実験では、浮力を減圧によって得ていたことから、(11)式は気体の状態を考慮して(11)' 式とする。

$$t_0' \doteq \frac{18\mu T_L}{D_0^2 \rho_R g f} \left(\frac{P T_0}{P_0 T} \right)^{\frac{2}{3}} \quad (11)'$$

ただし、(11)' 式の適用限界はスチレンモノマの沸点まで ($P_0 > 100$ mmHg [13.3 kPa]) とする。

ここで、 T , T_0 : 絶対温度、 T_0 のときの気泡径を D_0 、圧力を P_0 とする。そして、計算には、前記した実験のファイバ含有率が低いことから、 $T_L \doteq 0.4$ cm で $\beta' \doteq 0$ 、気泡の目視限界が正確にわからないことから、 $D_0 \doteq 0.1$ mm の値を採用する。

ここで、計算は含浸時間を無視していることから、計算値と実験結果の比較にはつぎの方法を採用する。含浸と脱泡時間は温度、減圧に関して同一傾向を示すとみなせる。そこでここでは、傾向が比較できれば有意義と考え、脱泡短縮率なる脱泡時間の短縮比率で比較することにする。図21は圧力560 mmHg [74.7 kPa] 温度10℃を100%とした圧力、温度変化に関する脱泡短縮比率である。図より、減圧においては計算値と実験結果がよく一致しているが、加熱においては概略一致している。したがって、近似計算結果と実験結果の傾向の一致から、この近似解析結果は遠心成形において適用されよう。

図21 計算値と実験値の比較

(計算値は $D_0=0.01$ cm, $T_L=0.4$ cm, $\rho_R=1.1$ で
温度10°C, 圧力560 mmHg [74.7 kPa] を基準に計算)

6. 結 言

遠心成形において、遠心力下で発生しうる脱泡要因は、モデル実験から遠心圧力、粘性抵抗、気泡の通過抵抗が主たる要因であることが明らかとなり、近似解析が得られた。その結果、つぎのことが明らかになった。

- (1) モデル実験から、従来定性的に知られている減圧、温度、振動、振動圧力、ファイバ含有率、樹脂、触媒、樹脂の入れ方などに関して含浸脱泡への影響を比較検討できた。その結果、遠心成形においては、発生しうる遠心力、振動が大きな影響

を与えていることが明らかとなった。そして、ファイバによる抵抗、温度に関する粘度が影響していることが明らかとなった。

- (2) 解析結果から、遠心力 α (重力加速度倍数) は含浸脱泡速度を高速にする効果が大きく、一般成形法 (重力加速度下の成形) に比べて少なくとも α 倍速くなることが明らかとなった。そして可能脱泡限界には α があまり影響しないで、抵抗定数 β が影響することが明らかとなった。

- (3) 今後の課題

本報で述べてきた事項はつぎの点で今後の課題となろう。

- ・通過抵抗定数を定める試験法の確立
- ・近似解析結果の信頼性の向上

注

注) 25°Cにおける粘度

文 献

- 1) 西野; 繊維誌, 32, T57 (1979)
- 2) 滝山; ポリエステル樹脂, 日刊工業 (1972)
- 3) W. Qascom et al; I & E C, 7-3 (1968)
- 4) J. Paul et al; SPI, 20th (1965)
- 5) W. Hand; SPI, 20th (1965)
- 6) 西野ら; 強ブラ, 第26回 FRP 総会講演会, 特別講演, 3-1 (1981)
- 7) 西野ら; 材料学会, 第9回 FRP シンポジウム, No. 5 (1980)
- 8) 西野ら; 材料学会, 第9回 FRP シンポジウム, No. 6 (1980)
- 9) 西野ら; 繊維学会, 第34回年次大会, No. 401-10 (1981)
- 10) 西野ら; 繊維学会, 第34回年次大会, No. 401-11 (1981)
- 11) H. Reiter et al; SPI, 28th (1973)
- 12) T. Kuroda; SPI, 19th (1974)
- 13) 西野ら; 強ブラ, 26-11 (1981)
- 14) 西野ら; 強ブラ, 26-12 (1981)
- 15) 藤本武助; 水力学概論, 養賢堂