

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成25年 3月31日現在

機関番号：24402

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2009～2012

課題番号：21560099

研究課題名（和文） RTM法によるFRP成形の超音波を用いたスマート化

研究課題名（英文） Smart Resin Transfer Molding of Fiber Reinforced Plastics Using Ultrasonic Monitoring

研究代表者

山崎 友裕 (YAMASAKI TOMOHIRO)

大阪市立大学・大学院工学研究科・教授

研究者番号：80230382

研究成果の概要（和文）：RTM法により高品質な繊維強化プラスチック（FRP）を短い成形サイクルで得る手法の確立を目的とし、超音波を用いたスマート化について検討した。樹脂流動については、金型の外側表面に貼り付ける圧電フィルムを加工し、較正区間と測定区間を設けることにより樹脂流動先端位置のリアルタイムモニタリングが可能であることが明らかになった。樹脂の硬化度については、電磁超音波センサ、圧電フィルムを用いて評価可能であり、特に圧電フィルムは樹脂中の縦波音速変化を検出していることを確認した。

研究成果の概要（英文）：Real time monitoring of resin flow and cure by ultrasonic sensors in resin transfer molding process of fiber reinforced plastics (FRP) is proposed to fabricate high quality products with minimum cycle time. For resin flow monitoring, piezoelectric film, which consists of calibration and measuring parts, was stuck on the outer surface of the mold. It was shown that real time detection of resin flow front is possible by using amplitude change of echo in the mold normalized by amplitude drop due to resin front passage across the calibration area. It was also found that degree of resin cure can be evaluated not only by piezoelectric film but by electromagnetic acoustic transducer, both of which detect change in reflection coefficient at inner surface of the mold.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	1,200,000	360,000	1,560,000
2010年度	900,000	270,000	1,170,000
2011年度	500,000	150,000	650,000
2012年度	900,000	270,000	1,170,000
年度			
総計	3,500,000	1,050,000	4,550,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学、機械材料・材料力学

キーワード：FRP、RTM法、超音波、モニタリング、樹脂流動、樹脂硬化

1. 研究開始当初の背景

金型内に積層された強化繊維クロスに樹脂を含浸させることにより繊維強化プラスチック（FRP）を成形するRTM(Resin Transfer Molding)法は、複雑な形状の製品を高品質に成形するのに適している。ところが

金型内部の樹脂の流動および硬化が確認できず、樹脂注入口位置を試行錯誤により決定する必要があり、樹脂が完全に硬化したと思われるまで離型できないという問題がある。これらの問題点を解決するため、樹脂の流動および硬化をリアルタイムでモニタリング

するスマートマニファクチャリングの概念が提唱されている。これまで誘電率センサ、光ファイバーなどが用いられてきたが、これらのセンサは金型内に設置しなければならず、成形品の表面性状、強度に影響を及ぼす可能性があり、センサ位置の走査やセンサの再利用は不可能である。特に誘電率センサはCFRPの成形時には炭素繊維の導電率の影響を受ける。超音波を用いる方法も提案されており、金型の外側表面にセンサを設置すればよいため成形品に影響を及ぼさず、センサの再利用が可能である。ところがこれまでに提案されている手法は金型内の樹脂を透過した超音波を用いるため、積層枚数が多い場合に超音波の減衰により測定できなくなる可能性がある。また、送信センサと受信センサの位置合わせが重要となり、測定位置の走査は困難である。これまで研究代表者は金型外側表面に設置した超音波センサにより金型内部での多重エコー振幅を計測する手法を提案し(科学研究費補助金, 基盤研究(C), 課題番号 18560084), 平板金型を用い, 流動モニタリングについては多点型電磁超音波センサによる離散計測および圧電フィルムによる連続計測の可能性を示すとともに, 硬化モニタリングについては圧電フィルム, 電磁超音波センサの利用の可能性を示してきた。

2. 研究の目的

本研究では, R T M法により高品質なFRP製品を短い成形サイクルで得るために必要不可欠なスマート化をめざし, 超音波を用いて樹脂の流動および硬化をリアルタイムでモニタリングする手法の確立を目的とする。ここで提案する手法は金型内側表面における超音波の反射率が樹脂の付着およびその後の樹脂の硬化により変化することを利用し, 金型外側表面に設置した電磁超音波センサあるいは圧電フィルムを用いて金型内の多重エコーの振幅変化から樹脂の流動先端位置の検出ならびに硬化度の評価を行うものである。金型内での多重エコーだけを用いることにより成形品厚さの影響を受けないモニタリングが可能である。本研究では, 流動モニタリングについては連続測定が行える圧電フィルムに注目し, 曲率を有する金型に対しても適用できるリアルタイムモニタリングが可能な手法の確立を目指す。硬化モニタリングについては, 圧電フィルム, 電磁超音波センサを用いる場合に理論どおりに樹脂の特性変化を捉えられているかどうかを確認する。

3. 研究の方法

樹脂流動モニタリングについては, 曲率を有する金型への適用の可能性を調べるため

半円筒形の金型を用いた。外側表面に圧電フィルムを貼り付けた軟鋼製の下型と流動先端位置を目視できるようにアクリル製とした上型とを組み合わせて周囲をシールし, 金型上部からの真空引きにより下部の注入口からエポキシ樹脂を段階的に注入した。それぞれの樹脂先端位置について圧電フィルムを広帯域パルスで駆動して金型内の第1エコーと第2エコーを観測した。これまでの研究で, 平板金型に貼り付けた短冊状の圧電フィルムを用いると, 樹脂の流動に伴い金型内側表面で反射する縦波の振幅が低下していくことが確認されている。ただし, 測定領域の単位長さあたりの振幅低下量は樹脂粘度, 強化繊維クロス積層枚数, 温度などの影響を受けるため, 測定領域全体に樹脂が含浸するまではそれぞれの測定時刻における流動先端位置を評価することはできない, ここではリアルタイムでの流動先端位置検出を行うため, 圧電フィルムを図1に示すように較正区間と測定区間から構成される形状に加工することを提案する。流動先端が較正区間を通過した際の縦波振幅低下量を用いて測定区間通過時の振幅低下量を規格化することにより, 成形条件に依存しない測定が可能になると考えられる。樹脂だけを注型した場合の結果と炭素繊維クロスを金型内に積層したR T M成形時の結果を比較することにより, 本手法の有用性について検証した。

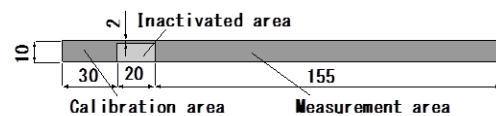


図1 圧電フィルム形状

硬化モニタリングについては, 理論的に求めた金型内側表面と樹脂との境界面での反射率を測定値と比較することにより手法の妥当性を検討する。圧電フィルムでは縦波, 電磁超音波センサではせん断波を用いることから, 金型内側表面での反射率はそれぞれ樹脂中の縦波音速, 樹脂の粘度の影響を受けると考えられる。ここでは平板状の金型を用い, 樹脂中の音速測定および粘度測定を行うようにするためエポキシ樹脂だけを注型した。

圧電フィルムでは, 金型内での多重エコーだけではなく樹脂中に透過して反対側の金型内側表面で反射した信号も受信することにより樹脂中の縦波音速を測定した。金型および樹脂について密度と音速の積である音響インピーダンスを計算し, 境界面における反射率を理論的に求めた。

電磁超音波センサは金型厚さ方向のせん断波の12次共振周波数を搬送波周波数とするバースト波で駆動し, 金型中に発生させた

定在波の減衰を測定すると同時にローター式粘度計を用いて樹脂粘度の測定も行った。硬化の比較的初期の段階で粘度計の測定限界を超えるため、ローターの浸液深さを変え、得られた測定値を補正することにより測定範囲を拡大した。樹脂を粘性流体とみなし、平面壁が振動するとして得られたせん断波の反射率を用い、単位時間あたりの金型内側

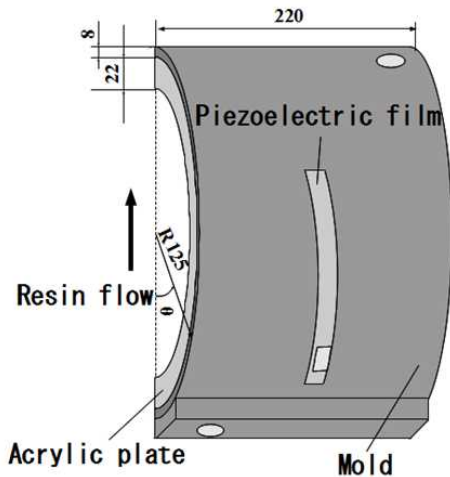


図2 半円筒形金型の形状

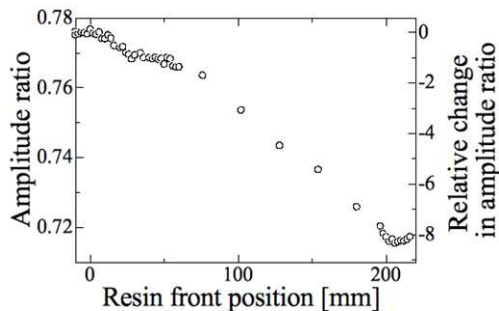


図3 樹脂注型に伴う金型中の縦波第1第2エコー振幅比の変化

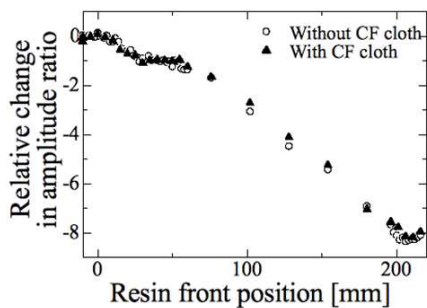


図4 樹脂流動に伴う縦波エコー相対振幅比変化の比較

表面での反射回数を考慮して求めた減衰率を理論値とした。

4. 研究成果

圧電フィルムによる樹脂流動モニタリングで用いた半円筒形金型の寸法を図2に示す。図1の形状に加工した圧電フィルムを樹脂の流動方向、すなわち図2の θ 方向に沿って較正区間が上流側になるよう貼付した。成形部の厚さは2mmとした。

金型に樹脂だけを段階的に注入し、それぞれの樹脂先端位置に対して金型内側表面からのエコー振幅を測定した結果を図3に示す。送信振幅に依存しない測定を可能にするため、第1エコーと第2エコーの比を求めた。

図3からわかるように振幅比は較正区間と測定区間を流動先端が通過する際に低下し、低下率は較正区間と測定区間とでほぼ等しい。ここでは樹脂流動先端位置の評価を行うパラメータとして、図3の右側縦軸に示しているように振幅変化量を較正区間通過に伴う低下量で規格化したものを用いる。

樹脂だけを注型した場合の結果と金型内に炭素繊維クロスを5層積層したR TM成形時の結果を比較して図4に示す。規格化された振幅変化量はほぼ一致しており、成形条件の影響を振幅低下量の規格化により除くことができたといえる。このことから、金型に圧電フィルムを貼付した後まず樹脂だけを注型し、得られた振幅低下量を較正区間通過による低下量で規格化したものを較正曲線とし、R TM成形時にも同様に較正区間での低下量で振幅低下量を規格化し、樹脂注型実験で得られた較正曲線と比較することによりリアルタイムでの樹脂流動先端位置検出が可能であると考えられる。

樹脂硬化モニタリングで用いた金型の寸法を図5に示す。圧電フィルムは板厚 44mm

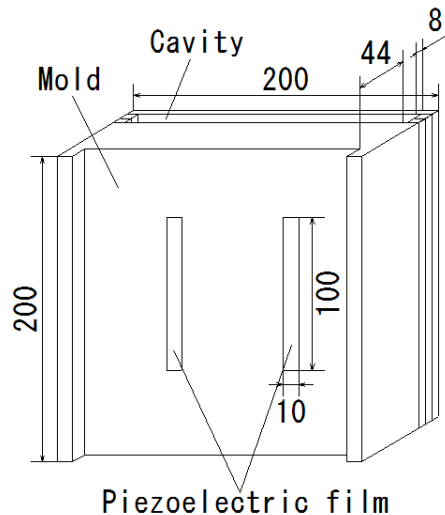


図5 注型金型の形状

の金型に貼付した。樹脂中では減衰が大きいと考えられるが、樹脂内での多重エコーの干渉を避ける必要があるため、縦波測定時には成形部厚さは5mmとした。金型を厚くすることにより樹脂を通過したエコーが金型内の第1エコーと第2エコーの間に現れるようにした。電磁超音波センサによる測定時はセンサを8mmの金型に設置し、粘度計ローターを挿入できるよう成形部厚さを10mmとした。薄い金型を用いることで単位時間あたりにせん断波が金型と樹脂との境界面で反射する回数を増やし、反射率変化に対して減衰率を敏感にすることができる。

硬化過程における樹脂中縦波の音速変化を図6に示す。音速は硬化に伴い増加し、一定値に漸近している。データのばらつきが小さく、連続的に音速が変化している点では硬化モニタリングに用いるパラメータとして適しているが、減衰のためエコーが観測されない時間帯があったことから実用的とはいえない。金型中の縦波第1エコーと第2エコーの振幅比を図7に示す。この振幅比の変化は金型内側表面と樹脂との境界面における縦波反射率の変化に起因する。測定された振幅比は音響インピーダンスから求められる理論値とほぼ一致しており、樹脂の硬化を樹脂中音速の変化としてとらえられているこ

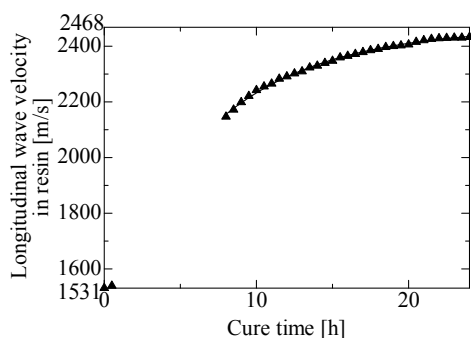


図6 硬化過程における樹脂中縦波の音速

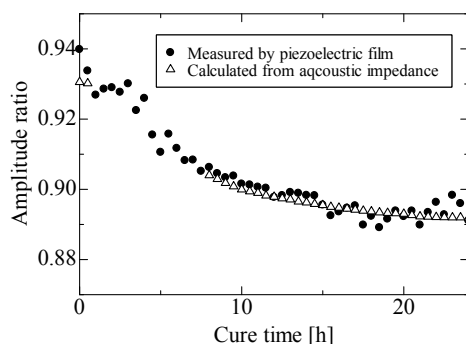


図7 硬化過程における金型中の縦波第1第2エコー振幅比の変化

とがわかる。振幅比は樹脂中のエコーが観測されない時間帯でも測定が可能であるため、データのばらつきがあるものの硬化モニタリングのパラメータとして適しているといえる。

硬化過程における樹脂粘度の変化を図8に示す。測定可能な時間帯を長くするため細いローターを用いており、主剤と硬化剤の混合後1時間程度までは粘度が測定範囲以下であった。粘度変化は注型後6時間から顕著に現れている。図9に金型中のせん断波定在波の減衰係数変化を示す。電磁超音波センサによる測定値と粘度から求められる理論値は、4時間程度までの硬化初期の段階では比較的一致しており、粘度のわずかな変化を敏感に捉えられている。ところが粘度の急増が見られるより早く4時間以降で大きく異なっている。このことから、硬化初期の樹脂は粘性流体とみなせるが、その後は粘弾性体などの物質として扱う必要があることがわかる。ただし、せん断波定在波の減衰係数は硬化に伴い増加し一定値に漸近していく傾向が見られることから硬化モニタリングに利用可能である。

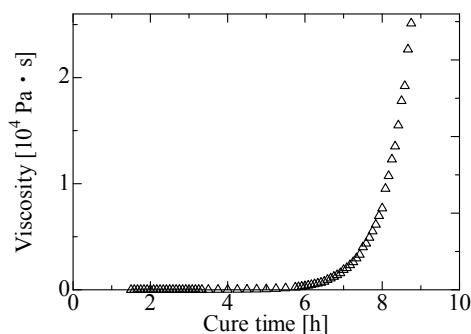


図8 硬化過程における樹脂粘度の変化

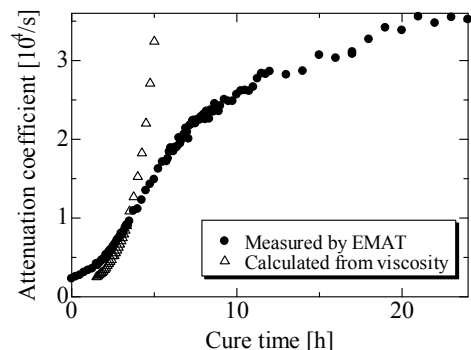


図9 硬化過程における金型中のせん断波定在波の減衰係数変化

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

なし

6. 研究組織

(1) 研究代表者

山寄 友裕 (YAMASAKI TOMOHIRO)
大阪市立大学・大学院工学研究科・教授
研究者番号：80230382

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし