

審査の結果の要旨

論文提出者氏名 佐藤 強

本論文は「圧電式インクジェットヘッドの吐出異常検知に関する研究」と題し、産業向けの圧電式インクジェットヘッドを対象とし、アクチュエータである圧電素子を圧力センサとしても使用して、ヘッド内部の気泡の存在をin-situかつリアルタイムに検出できる画期的な吐出異常検知システムを開発することを目的とした一連の研究内容とその成果を纏めたものである。本文は以下に示す12章で構成されている。

第1章「序論」では、インクジェット技術の動向、インクジェットヘッドの分類について概説し、インクジェットヘッドへの要求を6項目に整理して、産業用途に適したインクジェットヘッドの形態を明らかにしている。この要求の中で吐出安定性の確保が最大の課題であることを示し、阻害要因のうち、気泡対策が最も困難であることを説明している。また、従来の吐出異常と気泡の検出方法について調査し、塗布中にin-situかつリアルタイムに気泡の存在を判定できる検出システムの重要性を明らかにし、これを本研究の目的とすることを述べている。

第2章「インクジェット塗布装置の概要」では、産業用途のインクジェット塗布装置の基本構成と、高精度に着弾位置と液量を制御するための仕組みについて述べている。また、吐出安定性を向上するために実施されている外段取り作業やメンテナンス、ノズルプレートへの撥インク処理、基板への表面処理などの要素技術についても概説している。

第3章「吐出解析」では、検出すべき気泡サイズを目安を得るために、流体解析ソフトウェア（FLOW3D）を用いて、インクジェットヘッド内に気泡を配置した解析を行い、吐出性に深刻な影響を与える気泡サイズと位置を明らかにしている。今回のダミーインクを用いた解析結果から、おおよそ半径 $25\mu\text{m}$ の気泡を検出目標としている。

第4章「吐出異常検知システムのモデル化」では、インクジェットヘッドとこれを駆動する電気回路を含めた電気/機械システムを、等価回路を用いてモデル化している。また、圧電素子の残留振動に関する動力的な考察を行い、残留振動の基本波形が圧電方程式と運動方程式から決定されることを示している。そして、この考察に基づき、指令電圧のパルス幅をどのように変化させても残留振動が発生し、吐出異常検知のための音源が確保されることを明らかにしている。

第5章「超音波照射場における気泡の挙動」では、気泡の呼吸運動が超音波照射場と相互作用することで気泡に並進運動を起こす力（Bjerknes forces）が作用すること、周囲の圧力変動によって気泡が次第に大型化する現象（Rectified mass diffusion）が発生することについて述べている。

第6章「気泡検出のための解析設計」では、電気、機械、音響、気泡振動と複数の系にまたがる吐出異常検知システムに対し、各種の解析を用いて気泡検出のための設計指針を得ている。その中で、2次元のC型CIP法を用いた音響と機械の連成解析プログラムを開発し、ダイヤフラムからの音圧と気泡からの音圧の両方を合わせた圧力伝播状態を求めることで、気泡発生音圧とダイヤフラム到達音圧を試算し、これを基に吐出異常検知ユニットの入力部を設計している。また、気泡からの放射圧の吸収減衰について検討し、吸収減衰は無視できることを明らかにしている。

第7章「吐出異常検知ユニットの開発」では、リアルタイム判定機能と、吐出不良

の発生個所を特定できる機能の実現方法について説明している。また、標準型検知ユニットからリアルタイム判定機能を省いて小型軽量化、低コスト化した簡易型検知ユニットについてと、測定や判定条件の設定、判定結果の論理演算、判定基準値の自動設定などに使用するアプリケーションソフトについて述べている。

第8章「レーザによる気泡生成」では、レーザと超音波照射場において気泡間に作用するsecondary Bjerknes forcesを利用して、インクジェットヘッド内に半径数 μm ～数十 μm の気泡を人為的に生成する手段について述べている。この方法はインクジェット分野に限らず、キャビテーションの研究など、気泡サイズの制御が必要な他の分野でも応用することが出来ると考えられる。

第9章「インクジェットヘッド内の気泡検出評価」では、前章の方法でインクジェットヘッド内に気泡を生成し、気泡の位置によって混入モードを4つに分けた評価結果を詳述している。その中で、Mode 2（インク室上面に気泡が付着）とMode 3（インク室の側壁に気泡が付着）では、気泡の有無により検出波形が明確に異なる一方で、気泡サイズが変わっても殆んど検出波形に変化が現れない一種の不感帯が存在することを実験により明らかにしている。また、上向きに設置したヘッド内において、気泡が浮力に逆らって下降する現象を映像で捉え、この原因がBjerknes forcesであることを、圧力分布解析とポリスチレン微粒子を使った音響流の可視化実験により明確にしている。

第10章「拘束空間における気泡の挙動」では、先ず鏡像法を用いて壁面での反射に起因する音響インピーダンスの項をRP方程式に追加し、拘束空間における気泡の動的振動モデルを導出している。次に、インクジェットヘッドを模した正方形断面管について、気泡半径が増加しても散乱断面積がほぼ一定となる半径領域が存在することを示し、前章の不感帯現象の発生原因として説明している。

第11章「吐出異常検出機能の評価」では、電気的なノイズを考慮すると、周波数領域の判定アルゴリズムの方が適していることを示している。また、塗布中に意図的に配管に振動を与え吐出異常を発生させた評価を実施し、検知ユニットのOK/NG判定結果と、CCDカメラで撮影したガラス基板上の液滴の状態とを比較して、判定結果の妥当性を検証している。また、同様の判定アルゴリズムによって、通常より探索音波の波長が3倍高いヘッド内の気泡、ダスト、圧電素子への電圧供給経路の断線、微粒子入りインクでの気泡に対しても検出可能であることを実証している。また、インクジェット塗布装置との接続実験において明らかとなったノイズ問題への対策を考案し、その有効性をシミュレーションにより確認している。

第12章「結論」では、本論文の本研究の成果を総括すると共に、今後の研究課題について述べている。

このように、本研究では、インクジェット分野では世界で初めてとなる、リアルタイムの吐出異常検出機能と吐出異常発生個所の特定機能を有する吐出異常検知ユニットを開発し、その有効性を確認した。本論文での研究成果は精密工学の発展に貢献するものであり、インクジェット工程の信頼性と歩留まりを飛躍的に向上させることが期待できることから、産業の基盤技術としての意義は大きい。

よって本論文は博士（工学）の学位請求論文として合格と認められる。