

学位論文題名

コンピューター解析による紙パルプ製造工程の最適化

学位論文内容の要旨

製紙産業は装置産業であり、抄紙設備は高速化、大型化している。競争力強化のため、運転要員は少数精鋭にならざるを得ない。環境、資源保護の立場から、回収故紙パルプの使用量が増加し、工程のクローズド化が進行して、工程がブラックボックスになりつつある状況下で、高度な抄紙技術が要求されてきている。一方、紙の消費者のニーズが多様化し、製紙工場では多品種少ロット生産を行っている。新聞輪転機ではオフセット印刷の割合が増え、高速印刷に耐え得る、強くて品質変動の少ない紙が求められている。製紙工程の操業を最適化するには実験が必要であるが、ラボ実験は抄紙速度が格段に違うので、実機の操業を再現できない。工場実験は高価で膨大な時間と労力を要するし、製品を生産しているので、実験水準には制限がある。実験データと知見がないまま、少数の操業人員が、経験と勘に頼って、高速で大型の生産設備を運転して、これらの状況に対応していくのは困難である。近年、エレクトロニクス技術の発達により、今まで高価であったコンピューター、センサー、画像処理装置などが製紙技術者にも利用できるようになってきた。本研究ではこれらの機器を用いて新技術を開発し、製紙工程の中で特に重要なウエットエンドを重点的に解析する。大型で高速の抄紙機の抄紙メカニズムを定量的に把握し、安定操業の障害になっている要因を除去して製紙工程を最適化し、紙品質の向上を図る。そしてウエットエンド解析で得られた要素技術を他の工程解析にも拡張する。

本論文は7章からなる。以下に各章の要約を述べる。

第1章は序論であり、研究の背景、既往の研究および目的について述べた。

第2章では、伝達関数によるシステム同定では、複雑な循環系統を持つ抄紙機はモデル化できないので、製紙産業で初めてシステムダイナミックスの手法を用いてモデルを作った。多品種少ロット生産に伴う抄替え時間を短縮するために、抄替え

操業をシミュレーションし、工場実験と比較してモデルの有用性を検証した。そして、多くの操業変数の中で、ウェットエンドの操業因子の影響が大きいことを明確にし、操業条件と設備を変更して抄替え時間を短縮した。特にファーストパスリテンションが高い程、抄替え時間が短くなることを定量的に示した。ファーストパスリテンションを上げることは、内添薬品を効果的に使用するだけでなく、抄替え時間の減少にも重要であることを明らかにした。

しかし、白水のクローズド化と高速ツインワイヤー抄紙機の導入などにより、内添薬品の効果が発揮されにくく、ファーストパスリテンションを改善することは容易ではなかった。また、従来の長網抄紙機ではファーストパスリテンションを上げると紙の地合が悪くなることが知られていたため、高速ツインワイヤー抄紙機でも地合の悪化が懸念され、ファーストパスリテンションは低いままになっていた。

第3章ではファーストパスリテンションと紙の地合とをオンラインセンサーで連続モニタリングできるウェットエンド解析システムを構築し、工場実験を行った。事前にゼータ電位を最適範囲に設定しておき、カチオン性歩留まり向上剤を添加し、ファーストパスリテンションを改善した。長網抄紙機と異なり、高速ツインワイヤー抄紙機ではファーストパスリテンションを上げても地合に影響しなかった。それはコロイド化学的因子とマイクロタービュレンスの違いによることを明らかにした。

この解析システムを使ってリテイニングに強いオフセット用新聞用紙の開発に取り組んだ。当初、歩留まり向上剤でファーストパスリテンションを上げて、サイズ剤と湿潤紙力剤などの内添薬品を繊維に効果的に定着させようとした。しかし、ファーストパスリテンションを上げると紙の中のファインが増加してリテイニングが増えると言う説があり、ウェットエンドの実験を進めることができなかった。

第4章では、この説には疑問を抱き、多層抄紙のラボ実験装置で、異なった繊維組成と紙層構造を持つ多層シートを作成し、紙表面強度を測定した。ウェットエンド解析システムを活用して工場実験を行った。リテイニングと紙表面状態との関係を調べるため、画像処理技術も開発した。その結果、従来の説とは逆に、紙表面のファインは繊維間結合を強化してリテイニングを防ぐことを明らかにした。ファーストパスリテンションを上げて紙中のファインを増やし、リテイニングに強いオフセット新聞用紙を開発した。

第5章では、長周期変動だけでなく、短周期の坪量変動も測定できるように解析システムの機能を拡張し、広範囲な領域を統合的に解析できるようにした。複雑な

紙パルプ製造工程において、多くの操業因子の中の複数の長周期変動要因が、低い確率ではあるが同時に変動し、短周期変動を増幅させて紙品質問題を発生させることがあることを明確にし、原因を除去して紙品質を向上させた。

第6章では新しい紙品質測定方法として、工業用X線CTスキャナーで巻取りの品質を非破壊で検査し、巻取品質と印刷時の走行性との関連を明らかにした。

第7章では、ショートドエルコーターポンド内部の流れを数値流体力学で計算して、コンピュータグラフィックスで表示した。従来のモデルではコーティングカラーの性質が異なってもポンド内の流れは変わらないとされていたが、本研究で初めてコーティングカラーのレオロジーがポンド内部の流れに重大な影響を及ぼしていることを明らかにした。

第8章は総括で本研究の成果について要約した。

以上のように本研究では、抄替え時間を短縮するためにシステムダイナミクスモデルを開発し、その有用性を明らかにした。オンラインセンサーとコンピュータを組み合わせたウエットエンド解析システムを構築し、抄紙機のファーストパスリテンションと地合との関係は、コロイド化学的因子とマイクロタービュレンスの強さの組み合わせに依存することを明らかにした。解析システム、多層抄紙、画像処理技術を使って、微細繊維と紙表面強度との関係を明確にした。解析システムの機能を拡張し、抄紙工程の長周期変動要因が短周期変動を増幅させて品質変動を起こす場合があることを見出だした。工業用CTスキャナーで巻取り品質を非破壊で検査し、巻取品質と印刷時の走行性との関連を明らかにした。ショートドエルコーターポンドのシミュレーションモデルを開発し、コーティングカラーのレオロジーがポンド内部の流れを決定する重要な因子であることを明らかにした。

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 林 治 助

副 査 教 授 篠 原 邦 夫

副 査 教 授 高 井 光 男

学 位 論 文 題 名

コンピュータ解析による紙パルプ製造工程の最適化

製紙産業は装置産業であり、抄紙機は高速化、大型化している。また環境、資源保護の立場から、回収古紙パルプの使用量が増加し、工程のクローズド化が進行して、工程がブラックボックスになりつつある。一方消費者のニーズが多様化して、工場では多品種小ロットの生産を強いられている。これらの状況下で合理操業をするためには、工程の把握が重要であるが、抄紙速度が格段に遅いラボ実験では、実機の操業を再現出来ないし、実機での実験はコストが大きく、かつ実操業の関係で制限がある。本研究はコンピュータシミュレーション、センサーによるリアルタイムの情報収集とコンピュータ解析、画像処理技術を駆使して、大型、高速の抄紙メカニズムを定量的に把握し、工程の合理的管理と最適化および紙質の向上を目的としたものである。その主な成果は次のように要約される。

1) 複雑な循環系統を持つ抄紙機のシミュレーションに製紙産業では初めてシステムダイナミックスの手法を取り入れモデルを作成した。多品種小ロット生産に伴う抄替え操業をシミュレーションし、工場実験と比較してモデルの有用性を検証した。そして多くの操業変数の中で、ウェットエンドの操業因子の影響が大きいことを明確にし、操業条件と設備を変更して、抄替え時間の短縮に成功した。

2) また抄紙金網上への繊維歩留まり率 (FR) の向上が、抄替え時間の短縮に有効であることを明らかにしたが、従来FRの向上は紙の地合を悪化させると理解されてきた。FRと紙の地合とをオンラインセンサーで連続モニタリングできる解析システムを構築し工場実験を行なった。長網抄紙機と異なり、高速ツイーンワイヤー抄紙機ではFRを上げてても地合に影響しないことを、コロイド化学的因子とマイクロタービュレンスの違いにより明らかにした。これによりFRを上げた合理的な操業に切り替えることが出来た。

3) 歩留まり向上剤によるFRの向上は、紙表面の微細繊維が多くなり印刷時に抜けて活字面を汚すとされて来た。この説に疑問を抱き、多層抄紙のラボ実験装置で、異なつた繊維組と紙層構造を持つ多層シートを作成して、紙表面強度を測定した。またウェットエンド解析システムを活用して工場実験も行なつた。更に紙表面の微細繊維の状態を、電顕写真の画像処理技術を開発することにより定量化し、これと表面強度を比較した。これらの結果、従来の説とは反対に、紙表面の微細繊維の増加は繊維間水素結合を強化して、表面強度を増加させることを見いだした。この結果に基づき、一次繊維歩留まり率を上げて紙中の微細繊維を増やし、リnteイングに強いオフセット新聞用紙を開発した。

4) 抄紙における坪重量の長期変動のみならず、短期変動も測定できるように解析システムを拡張した。複数の長周期変動操業因子が、同時に変動した時短周期変動を増幅させることを示し、その問題解決のためにファンポンプの回転数をさらに低速に設定出来るようにし、またフローバルブの振動除去、配管系圧力の一定制御を行なつて脈動させないようにする等の改善を行い紙質を向上させた。

5) 紙の巻取り均一性を工業用X線CTスキャナーで測定する方法を開発し、巻取り品質と印刷時の走行性との関係を明らかにした。巻取りの不均一は高速輪転機で印刷した時、断紙、しわ、伸び等の原因になるので、非破壊、短時間で均一性試験法の開発は、品質管理上大きな貢献となつた。

6) 塗工紙製造における、ショートドエルコーターポンド内部の流れを数値流体力学で計算し、コンピューターグラフィックスで表示した。これにより初めてコーティングカラーのレオロジーとポンド内部の流れの関係を明らかにした。

以上本論文は抄紙工程をコンピューターで数値解析し、高速、大型の抄紙機のシミュレーションを行い、複雑な循環系統を持つ抄紙のメカニズム、紙質への影響因子を明らかにした。これにより抄紙工程の安定管理を可能にし、従来紙質に対する影響因子の誤解を正して、合理的操業の基礎を与えたもので、製紙工学ならびに製紙科学へ寄与するところが大きい。

よつて著者は、博士(工学)の学位を授与される資格あるものと認める。