

論文 / 著書情報
Article / Book Information

題目(和文)	動的光散乱法を用いた懸濁粒子の拡散係数分布変化の可視化
Title(English)	
著者(和文)	原田祥宏
Author(English)	Yoshihiro Harada
出典(和文)	学位:博士(工学), 学位授与機関:東京工業大学, 報告番号:甲第12843号, 授与年月日:2024年9月20日, 学位の種別:課程博士, 審査員:笹部 崇,奥野 喜裕,西迫 貴志,高橋 秀治,伏信 一慶
Citation(English)	Degree:Doctor (Engineering), Conferring organization: Tokyo Institute of Technology, Report number:甲第12843号, Conferred date:2024/9/20, Degree Type:Course doctor, Examiner:,,,,,
学位種別(和文)	博士論文
Category(English)	Doctoral Thesis
種別(和文)	要約
Type(English)	Outline

東京工業大学 令和6年度 博士論文要約

動的散乱法を用いた懸濁粒子の拡散係数分布変化の可視化

指導教員 伏信 一慶 教授

工学院 機械系 機械コース

原田 祥宏

第1章 緒論

ドロップオンデマンド型のインクジェット方式を用いたプリンタでは、ノズルから所望の量と速度のインク滴を飛翔させて用紙等のメディアに画像や塗膜を形成する。画像や塗膜のパターンによっては、連続してインク滴を飛翔させる場合もあれば長時間インク滴を飛翔させない場合も起き得る。インクを飛翔させない間、溶媒の蒸発等によりノズル内のインク物性が変化すると、次にインク滴を飛翔させるときの飛翔状態は変化する。一般に、インク溶媒が蒸発するとインクの粘度は上昇し、時間経過に伴ってノズル部のインク粘度が上昇するとインク滴を所望の量や速度で飛翔させられなくなる。最悪の場合にはインク滴を飛翔させることも困難となってしまふことがある。これを避けるため、顕著に粘度上昇してしまう前にインクをノズルから排出する操作が行われている。頻繁に排出を行えば、ノズル内のインクを適切な粘度に保つことができるが、印刷に使われないインク量が増加してしまい、これも避ける必要がある。ノズル内のインク粘度やその分布や経時変化が把握できると、使用しようとするインクやインクジェットヘッドに応じた適切なインク排出タイミングや排出量をそのメカニズムの理解と合わせて決定することができる。そこで本研究では、ノズル内の水性顔料インクを対象に、蒸発に伴い粘度上昇の様子を、インク含有粒子の拡散係数分布とその経時変化を計測することで直接可視化できるようにすることを目的とした。

第2章 粒子運動計測による懸濁液の粒子拡散係数推定

水性顔料インクの含有粒子の拡散係数を求めるのに動的光散乱法を用いた。動的光散乱法は、流体に分散する粒子にレーザ光を照射したときに生じるスペックルの変動を評価することで、粒子の運動状態すなわち拡散係数を定量化する計測法である。アインシュタイン・ストークスの式に従うような希薄な懸濁液においては、粒子径や溶媒温度が一定で既知であれば、粒子拡散係数から溶媒粘度を算出することができる。一方、一般的な水性顔料インクのように粒子濃度が高い場合や見かけの粒子径や温度が変化する場合には、この換算が本計測のみでは行えないため、粒子拡散係数を指標として目的の状態変化を可視化することにした。

第3章 2次元センサアレイを用いた懸濁液表面の粒子拡散係数分布推定

インクジェットヘッドのノズル部と水性顔料インクの代わりにガラスキャピラリとシリカ粒子が分散したモデルインクを用いて、ノズル内インクの粒子拡散係数が計測できるか確認した。モデルインクには、一般に水性顔料インクにも用いられるグリセリン、プロピレングリコール、ポリエチレングリコールの3種類の水溶液を準備した。各モデルインクをその毛管力を利用してガラスキャピラリの先端まで充填し、充填が完了してからのガラスキャピラリ先端付近の粒子拡散係数を計測した。

ガラスキャピラリ先端部、径方向の粒子拡散係数分布を可視化する実験装置を構築した。

高速度カメラを用いた顕微撮影系により、ガラスキャピラリ端面にレーザ光を照射した様子を撮影した。モデルインク表面に生じたスペckルパターンを動画像として記録し、画像処理によってその時間的変動を画像間の相互相関係数を求めることで数値化した。撮影像からガラスキャピラリ径方向に複数の領域を抽出し、それぞれに対して粒子拡散係数を求めることでその分布を可視化した。実測の結果、いずれのモデルインクも中心部よりも端部の方が、粒子拡散係数が早く低下していることが可視化された。特にポリエチレングリコール水溶液では中心部と端部とで顕著に粒子拡散係数偏差が生じる様子が確認できた。ガラスキャピラリ先端のモデルインク気液界面からの時間当たり面積当たりの蒸発速度は、蒸気が拡散できる空間の広さの違いから、端部では中央部よりも大きくなると考えられる。これによりガラスキャピラリ先端部の径方向端部ではモデルインクの溶媒濃縮が相対的に進み、径方向に濃度勾配が生じる。この濃度勾配を解消するように溶媒の拡散が生じるが、拡散よりも濃縮の速度が大きければ結果として粒子拡散係数に分布が見られることになる。実測結果はこのような振る舞いが可視化されたものと考えられる。

第4章 光干渉断層計測法を用いた懸濁液深さ方向の粒子拡散係数分布推定

次にガラスキャピラリ先端付近の深さ方向のモデルインク粒子拡散係数分布を可視化するため、光干渉断層計測法に基づいた実験装置を構築した。光干渉断層計測法は、光の干渉を利用して観察対象物の深さ方向の断層画像を散乱光強度分布として取得するものである。計測対象物を懸濁液とした場合、取得される断層画像にはスペckルパターンが見られ、その時間的変動を数値化することでモデルインク深さ方向の粒子拡散係数分布を可視化することができる。3種類のモデルインクを用いた実測の結果、グリセリン水溶液とプロピレングリコール水溶液の粒子拡散係数は深さ方向について比較的一様な値を保ちながら低下していく様子が確認できた。一方、ポリエチレングリコール水溶液の粒子拡散係数は顕著に粒子拡散係数分布を持ち、気液界面から深さ方向へ次第に粒子拡散係数の低い領域が拡大する様子が確認できた。深さ方向においても蒸発に伴う溶媒濃縮と拡散のバランスで分布が生じるか否かが決まると考えられる。グリセリンおよびプロピレングリコール水溶液は拡散が顕著であったのに対して、ポリエチレングリコール水溶液は拡散よりも溶媒濃縮が顕著であったことが理解できる。

第5章 光干渉断層計測法を用いた懸濁液深さ方向を含む2次元断面内粒子拡散係数分布推定

光干渉断層計測法を用いた深さ方向の粒子拡散係数の計測を径方向に位置を変えながら行うことで、ノズル断面内の粒子拡散係数分布とその経時変化を計測できるようにした。内径の異なるガラスキャピラリ3種類に対し、グリセリン水溶液が蒸発するのに伴う粒子拡散係数分布変化の可視化を試みた。実測の結果、内径の小さいものほどモデルインク全体の粒子拡散係数が低下するのに要する時間は短くなった一方で、いずれの内径のガラスキャ

ピラリにおいても径方向の粒子拡散係数はほとんど分布を持たなかった。今回使用したガラスキャピラリの内径とモデルインク，周囲環境の組み合わせにおいては蒸発速度差により発生する径方向の溶媒濃度勾配よりも拡散の効果の方が大きかったものと推察される。

第6章 結言

動的光散乱法を利用した計測方法と，動的光散乱法と光干渉断層計測法を組み合わせた計測方法の開発により，インクジェットヘッドノズル部で生じる粒子拡散係数の空間的分布とその経時変化をその場観察して可視化することができるようになった。水性顔料インクが溶媒の蒸発に伴って粘度上昇する様子と，その特徴として溶媒濃縮と拡散のいずれが支配的となっているかなどを把握したうえで，適切なインク排出量やタイミングなどの設計値を決められるようになった。