印刷講座（第3講）
J. Jpn. Soc. Colour Mater., **94**〔5〕, 133-139 (2021)

溶媒蒸発にともなう塗膜内での圧縮，固体膜形成，界面変形および自発流れの諸現象

稲澤　晋*,**,†

*東京農工大学大学院工学研究院生物システム応用科学府　東京都小金井市中町2-24-16（〒184-8588）
**東京農工大学工学部化学システム工学科／化学物理工学科　東京都小金井市中町2-24-16（〒184-8588）
† Corresponding Author, E-mail: inasawa@cc.tuat.ac.jp

（2021年1月28日受付，2021年2月15日受理）

要　　旨

塗膜の乾燥現象は，液体から固体膜を得る汎用プロセスとして広く用いられる。溶媒が蒸発すると，不揮発成分が濃縮される。この濃縮過程で，分散していた固体粒子は充填され固体膜を形成する。溶解していた溶質は，析出する。さらに溶媒の蒸発は，界面の変形や液膜内の流れも誘発する。塗膜の乾燥現象は，こうした相分離や界面変形，流動をともなう複雑なプロセスであり，理解が未だ不十分である。このため溶媒の蒸発とこれら諸現象との関係を整理する基礎研究が不可欠である。本講座では，固体粒子や液滴が分散した溶液の乾燥過程について，最新の研究成果を複数取り上げる。乾燥現象の研究動向の整理に，本稿を活用いただきたい。

キーワード：乾燥の速度過程，粒子充填，バックリング，気液界面，液液界面

1. 分散液乾燥の概略

純物質からなる液体は，沸点で蒸発し気体へと変化する。一般に液体の沸点では，その蒸気圧は大気圧に等しい。沸点では，液体内部で発生した気体（気泡）の圧力も大気圧と等しいため，気泡はつぶれることなく，液体内部で継続的に発生する。これが沸騰である。一方，沸点よりも低い温度では，液体の蒸気圧は大気圧より小さい。このため，仮に液体内部で気泡が発生しても，圧力が不十分であるため気泡はつぶれ再び液体に戻る。その結果，気化は気液界面からのみ生じる。これが蒸発である。純物質液体の蒸気圧と温度の関係は古くから検討されており，ケミカルポテンシャルの釣り合いから導かれるClapeyronの式で古典的に表現される。

工業製品の製造および日常生活で広く用いられる塗布乾燥は，おもに蒸発による溶媒除去を利用している。これは沸騰による気泡生成が，概して好ましくないことに加え，極力低温で蒸発をさせ加熱に要するエネルギーを削減するためなどの理由が挙げられるであろう。たとえば，水に濡れた洗濯物は，外に干して，あるいは乾燥機で乾かす。このとき，水の沸点である100℃まで加熱することはほぼない。また洗った食器や濡れ拭きをした机などは，特段乾かす努力をしなくても，室内に放置しておくだけで自然に乾く。ペンキやスラリーの乾燥も，蒸発による溶媒の揮発を待てばよく，いずれも自発的な現象である。したがって，乾かすこと（＝溶媒の除去）だけを目的とするのであれば，蒸発を待てばよい。

しかし，塗布乾燥を用いたものづくりに目を向けると，ほとんどの場合で，溶媒の蒸発後に残る不揮発成分を利用する。このため，溶媒蒸発後に不揮発成分がどのように残るのか，どのような構造をとるのか，がきわめて重要になる。たとえば，不揮発性の物質が分散（もしくは溶解）している塗布液を乾燥させると，溶媒の蒸発にともない不揮発性成分が濃縮される。固体粒子が分散している系であれば，粒子の体積分率が増加し，ある時点で粒子同士の充填が起こる。結果として粒子充填膜が得られる（**図-1**）。この場合，粒子膜の充填率や膜厚の分布などが膜の物性に影響を与える重要な因子として挙げられる。一方，不揮発性の物質が溶解している場合であれば，溶解濃度が上昇し，ある時点で飽和溶解度を超えると不揮発性物質の自発的な析出が起こる。固体が析出する場合は，そのサイズ・形状や結晶構造などが重要となるであろう。溶媒の蒸発現象だけではこれら残留物の構造や形状などの説明はできない。溶媒の蒸発に

〔氏名〕いなさわ　すすむ
〔現職〕東京農工大学大学院工学研究院 准教授
〔趣味〕サイクリング，酒
〔経歴〕2006年3月東京大学大学院工学系研究科博士後期課程修了 博士（工学）。同年4月日本学術振興会特別研究員（PD）。2007年4月東京大学大学院工学系研究科産学連携研究員。同年10月東京大学大学院工学系研究科 助教。2013年4月東京農工大学大学院工学研究院 准教授，現在に至る。

【図表について】電子ジャーナルサイト「J-STAGE」ではカラーでご覧いただけます。https://www.jstage.jst.go.jp/browse/shikizai/-char/ja/

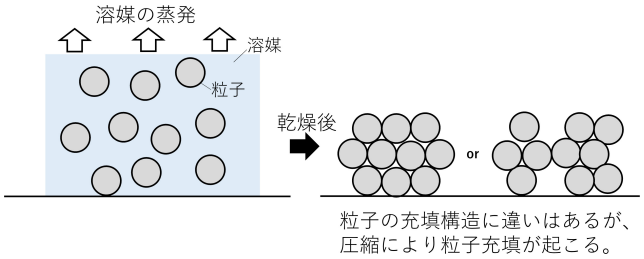

図-1　固体粒子分散液の乾燥にともなう粒子充填の概略

© 2021 Journal of the Japan Society of Colour Material