

## エア・ストリーム乾燥法

大量の湿った紙媒体を早く、平らに乾燥する

エバ・グルック  
ゲルハルト・バーニック  
エルンスト・ベッカー  
ミハイル・キューネル

(蜂谷伊代 訳)

株式会社 資料保存器材

以下は Eva Glück, Gerhard Banik, Ernst Becker, Michael Kühner : Air-Stream Drying of Paper, Restaurator, Vol.32, Issue1, 27-38 (2011.)の全訳である。著者および Restaurator 誌の許可を得て全訳する。

## 【概要】

気流(air stream)による乾燥は、乾燥時間の短縮と紙の平面性維持を目的に、印刷や製紙の分野では以前から使われてきた方法である。紙のコンサーベーションの分野では、1988年に R. Futernick により提案され、サンフランシスコの Western Regional Paper Conservation Laboratory が初めて導入した。以下では、段ボールに挟んだ紙を気流で乾燥するというシンプルな方法の物理学的な根拠を述べる。使用するのはアーカイバル品質の段ボールと、吸取り紙などの吸湿性材料。これらを重ねたもの(スタック)に軽い圧力をかけながら乾燥を行う。スタックには送風機でオープン・エア・ダクト(波形に加工した中芯が形成する空間)を空気が流れ続けるようにする。周囲の湿度と平衡になるまで、共に重ねた吸湿性材料を通過しながら水分は蒸発し続け、やがて取り除かれる。

## 1. はじめに

紙の乾燥は、ペーパー・コンサーベーションにおける最も重要な工程のひとつである。乾燥に関してここで述べる細かい問題点は、なにも水害に遭った紙に限った話ではない。乾燥をコントロールするという事は、つまり、水性処置をコントロールすることだといえる。水性処置とは、フラットニング、クリーニングや脱酸性化における洗浄、また没食子インクの影響がある場合の化学的安定化処置などでの、紙の加湿のことを指す。基本的に“乾燥”は、紙の内部において物質的に結合した水分の減少と関係している。そしてこれは蒸発によって起こる。紙が濡れた後の湿度平衡は、およそ18%から25%である。ちなみに紙の乾燥重量のうち、普通の含水量は5%~9%(紙のタイプにもよる)であるが、水に浸漬した後の含水量は約50%とかなり高くなる。つまり乾燥工程においては、水分の40%以上を繊維から取り除かなければならないことになる。

乾燥は、水性処置後の紙の物理的強度を回復するための鍵である。さらに、乾燥中は過度の引きつれに注意することで、紙の完全性を維持することができる。つまり、紙表面の質感や寸法といった重要な特徴に対して、乾燥技術が決定的な影響を与える(Brecht 1958)。すなわち乾燥とは、コンサーベーション処置のクオリティーに大きく影響するステップであると考えなければならない。それほど重要であるにも関わらず、乾燥はほとんど注目されてこなかった。わずかに Sugarman and Vitale (1992)や Watkins (2002)そして Mentjes (2006)らによる保存科学および処置に関する論文での乾燥の概要について体系的に分析した項目があるだけである。ペーパー・コンサーベーションに

においては、適切な乾燥技術の原則とそれを支える根拠と並んで乾燥における可能性と限界があるのだが、まだよく分かっていないのが実情である。

## 2. ペーパー・コンサベーションにおける乾燥

紙に含まれる水分量は、一定の気温と気圧のもとで、周囲の相対湿度との均衡の上に成り立っている。通常の状態(気温 23°C、大気圧 760 Torr (=1atm)、相対湿度 50%)における紙の平衡水分は平均 6%である。これら“通常”の状況下では、平衡水分になるまで、紙中の水分は湿っている部分から水蒸気という形で放出される。これを物理的観点からやや詳しくいうと、空気中の偏った水蒸気圧と、紙の細孔システム内の偏った水蒸気圧の関係になる。水平方向、もしくはその他複合的な原因による圧力勾配によって、紙はもちろん、セルロース系物質が水分を放出(乾燥)したり、吸収(湿潤)したりして、周辺環境との湿度平衡は確立する。

## 3. 乾燥方法に求められるクオリティー

製紙過程で繊維間に形成された水素結合は水性処置によって破壊され、紙の構造的変化をもたらす。水分を吸収することによって紙は安定性を失い、表面の質感と寸法は変化する。紙が元の状態に戻ろうが戻るまいが、乾燥は紙にかなりの影響を及ぼすことから、処置のクオリティーを決定づけるといえる。例えば、“そのまま”空気乾燥をするというのは、服をロープにかけて外で干すこととだいたい同じことだといえる。紙中水分の分布が不均一なために、空気乾燥による水分の放出は不均一になり、結果、紙の表面は歪む (Brecht 1958)。乾燥における重要な条件の 1 つが平面性の維持であるがゆえに、空気乾燥でこれを満たすことはできない。つまり、乾燥工程を均一にすることが、歪みを避けることへの鍵である (Fig. 1)。

しかし、ペーパー・コンサベーションにおける全ての乾燥方法においては、ある程度の湿度勾配が紙内部で発生するのだから、どれもが危険だともいえる。とはいえこれらのリスクは、簡単な方法で軽減、または排除できる。どんな乾燥手順であろうと、原則として守るべき条件は以下の通り。

- ・望ましい平面性のレベルに持ち込む。
- ・オリジナルの紙表面の質感と寸法は、望ましいレベルに復元するか、もしくは維持する。
- ・紙の上に載っている印刷や手書きのメディア(インクなど)の全ての質を保持する。
- ・モノの文化的な価値に見合った費用対効果(コストパフォーマンス)の高い手段をとる。

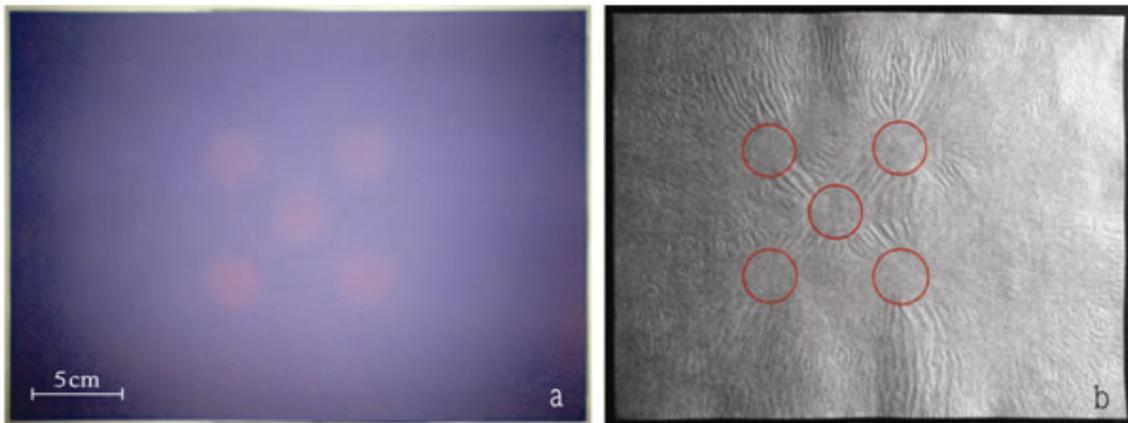
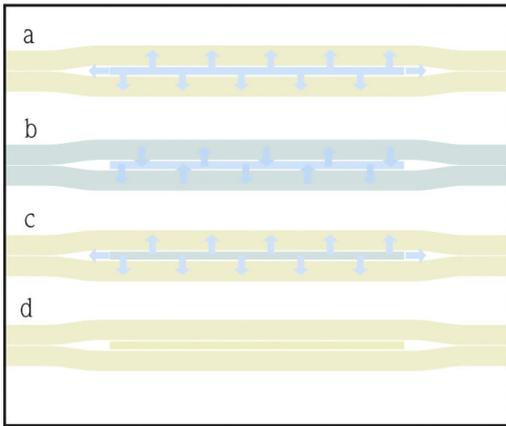
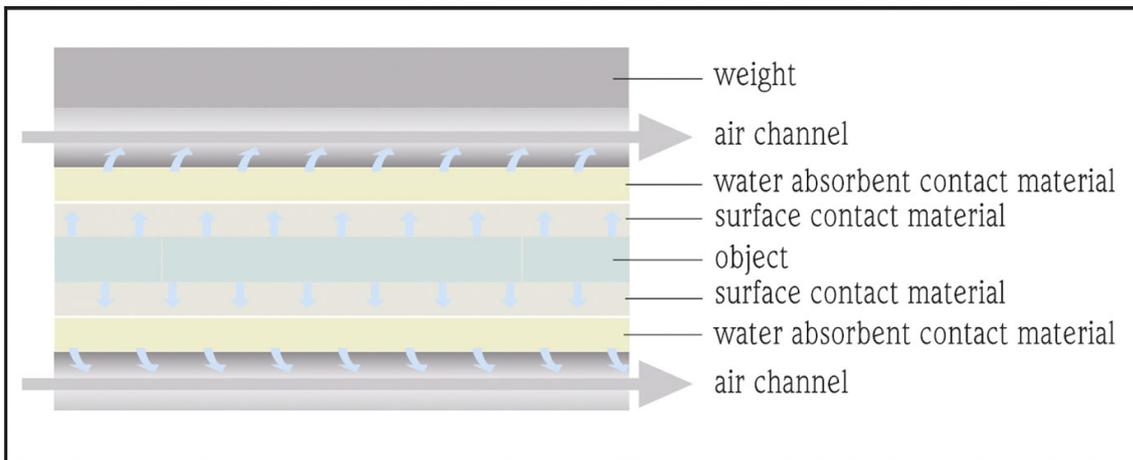


Fig. 1: 不均一に乾燥した紙。密着した乾燥方法(吸取り紙に挟む方法)を使用、テストペーパーは塩化コバルト(II)インジケータ紙(a)と、グラシン紙(b)。塩化コバルト(II)インジケータ紙は、吸取り紙と接触している場所(青)よりも、接触がない場所(ピンク)の方が、より長く湿った痕跡が残っている。つまり、接触していない場所では乾燥が遅い。グラシン紙は、不規則な収縮が起こり、不均一な乾燥結果が明らかになった。結果として、ゆっくり乾いたエリアの中(赤い輪の中)は、より早く乾いた場所よりも、平坦なままである。Brecht (1958)に倣って行った実験による。

ペーパー・コンサーバターは、不均一な水分放出によって起こる紙の歪みを避けるため、圧力をかけながら乾燥する技術を経験的に作り上げてきた。いわゆる接触型の乾燥方法(吸取り紙の間に挟む方法)である。この乾燥を行うために、吸取り紙(セルロース系)またはウール・フェルト(タンパク質系)などの、吸湿性を持つ「接触材」を使用する。これらの中に湿った紙を挟み、軽く圧力をかけながらゆっくりと水分を取り除く。毛細管現象と拡散現象を通して紙は水分を放出し、その一方で、接触材は水分を吸収する。この作用は、紙と接触材との間の湿度が平衡になるまで続き、そして平衡になったところで乾燥は一旦停止する。ここからさらに乾燥を促すためには、確立した平衡を一度崩し、新しい湿度勾配を作り出さなければならない。つまり、湿った接触材を定期的に変換する。これは、均一に乾燥させるために必要な工程ではあるものの、時間のかかる不連続な工程で (Sugarman and Vitale 1992)、そのうえ人手を要する作業である。さらにその後、接触材の方を乾燥させなければならないのだが、それが歪んでしまう。不均一な乾燥の技術的な問題は、そもそも乾燥の対象である紙の問題だったはずだが、ここへきて補助材料である接触材へと問題点に移る。しかし、紙が平面性を得ることと引き換えに、接触材が歪んでしまうことを受け入れなければならない (Fig. 2)。



**Fig. 2:** 接触型乾燥法の基本。濡れている紙(青)を、乾いている吸収紙(黄)に挟む。紙と吸収紙の間に湿度変化する間は、紙から水分が移動する(a)。平衡の状況(b)を中断するため、吸収紙を数回交換し(c)、乾燥終了(d)。(Banik, Bruckle, Paper and water:A guide for conservators, 2011.)



**Fig. 3:** エア・ストリーム乾燥法の基本。濡れている物(青)は、保護のため Hollytex などの接触材(灰)の間に挟む。空気の通り道(灰)を有する素材と、吸収紙(黄)によって乾燥スタックが構成される。対象物と、通り道を通過する空気との間で湿度変化が起こっている間、水分は吸収紙を通して空気中に放出される。(Banik, Bruckle, Paper and water: A guide for conservators, 2011.)

#### 4. エア・ストリーム乾燥

エア・ストリーム乾燥は、乾燥中の紙と接触材との間の湿度が平衡になろうとするのを「妨げる」ことによって乾燥を促す。この乾燥システムのために、空気の循環を促進するオープン・エア・ダクト機能のある材料を使用する (Futernick 1988, Shure 2000, Minter 2002, Kieffer 2007)。オープン・エア・ダクト、つまり空気の通り道を持つ、コルゲートボードもしくは合成素材のものが用いられる (Schopfer 2004)。強制的に空気の流れを作ることによって、空気はスタックの片側から入り、通路を通過して移動し、もう一方へと出ていく仕組みである。紙中の水分は、はじめに接触材の中に放出され、そして平衡を確立しようとしてコルゲートボードに沿って移動する (Fig. 3)。そこでは、空気と通路の壁との間で水蒸気圧が絶えず変化し続け、さらに、空気が通路を移動し続けると、水分は壁から蒸発し続ける。したがって、乾燥スタック内の紙と接触材との間の湿度平衡は、ずっと確立しないままである。平衡するためには、水分はスタックの中から外に、つまり、紙から空気の通路の

表面に移動し続けなければならない。動き続ける空気内の偏った水蒸気圧と、接触材の細孔システム内の水分との間で平衡になるまでこの作用が続き、乾燥は完了する。この乾燥法は、効率的かつ連続的で、紙構造を通して行われる均一な工程であり、伝統的な接触型乾燥方法のように、繰り返し接触材の交換をする必要がない。労力が抑えられるだけでなく、接触材の量もかなり削減することができる。

#### 4.1 エア・ストリーム乾燥のモデル

Table 1: 板紙素材(表左)と、合成素材(表右)を使ったテストスタックの構造

Stack construction for paperboard materials	Stack construction for synthetic materials
corrugated board	spacer fabric (polypropylene)
	reinforcing interlayer (polypropylene)
blotter	polypropylene fibre mat
Hollytex™	Hollytex™
object	object
Hollytex™	Hollytex™
blotter	polypropylene fibre mat
	reinforcing interlayer (polypropylene)
corrugated board	spacer fabric (polypropylene)

エア・ストリーム乾燥法の研究のために乾燥スタックのモデルを作成し実験を行った。エア・ストリーム乾燥を熱力学的なシステムとみなし、技術的パラメータ、材料、および熱平衡を算出した。特に、レイノルズ数(Re)で表わされる空気の乱流について着目した。水蒸気がエア・ストリームの道に沿って滑らかに運ばれる、すなわちシステム内での湿度勾配を避けるためには、できるだけ気流を荒くする必要がある。通常の場合下における乱流の臨界レイノルズ数は2,320で、一般的に、レイノルズ数0以下の気流が層流、すなわち空気が乱れずに流れていく状態である。0~2,320の間は遷移段階とみなされ、この間で層流から乱流に変わる。予備試験では、様々なスタックを、だいたい135m<sup>3</sup>/hから270m<sup>3</sup>/hの間で流量が変化する気流を強制的に起こす送風機に繋いだ。また、乾燥の間は、気流の入口と出口で、気温と相対湿度を電子的に記録した。ここでは、板紙と合成材料の、二つの異なる素材を使用したスタックの実験を行った (Table 1)。

気流速度が乾燥結果に与える影響を見るために、伝統的な接触型の乾燥方法による実験も行った。テストペーパーとして、伝統的な手漉き紙と、木材原料のロジン・サイズされた機械漉きの紙の二種類が用いられた。これらはまず、水槽で事前処置され、その後、ポリプロピレン繊維のマットの間に挟まれ軽い圧力がかけられた。その結果、接触型の乾燥方法は乾燥が完了するまでに4日間かかった。その間、吸取り紙は5回交換しなければならなかった。この実験中、紙が平らになる圧力を計測しながら、オリジナルの紙の寸法と表面の質感を可能な限り維持した。その結果、手漉き紙のテストペーパーにかけた圧力は、約  $0.014 \text{ N/cm}^2$  で、機械漉きの紙は約  $0.25 \text{ N/cm}^2$  だった。

コルゲートボードのスタックにエア・ストリーム乾燥法を使用したものと(Fig. 5)、接触型の乾燥方法によって4日間乾燥したものを比較すると、わずか4時間後に、同等の良い結果を得ることができた。これが実現する条件は、気温約  $20^\circ\text{C}$ 、相対湿度30%(実験中の主な条件)、空気の流量は  $270 \text{ m}^3/\text{h}$  以下(レイノルズ数で約730)だった。これよりも速い気流速度では、湿度勾配のみならず引きつれが生じて、紙の歪みを引き起こしてしまう。また、合成素材でできたスタック内では、テストペーパー(同様の状況下)はわずか1.5時間で乾燥が完了した。これは、無極性のポリプロピレン繊維素材には、水を保持する原因である吸取り紙のような吸湿性素材の吸収力がないからである。

1.5時間という乾燥時間は、均一に乾燥するにはあまりに短く、そのために紙が歪み、引きつれが生じる。乾燥時間を長くするには、相対湿度を約55%にして流入する空気を湿らせる。それによって、乾燥時間は4時間に延びた。しかし、紙の平面性は基準となるものと比べると、完全に同じではなかった。とはいえ、この実験から、空気の流入を意図的に調整することによって、エア・ストリーム乾燥法は制御が可能であり最適化できると実証できた。

## 4.2 適用

エア・ストリーム乾燥法は、Kreismuseum Grimma (Saxony)の図書館所蔵品の中から、1850年ごろに印刷された児童書の修復で導入された。その本は、2002年夏の洪水で深刻な被害を受けた多数あるコレクション品のうちのひとつだった。変形し、ひどく汚れ、本文紙には、顕著なタイド・ライン(輪染み)とフォッキングが見られた(Fig. 5a)。表面のドライ・クリーニングと洗浄を行い、紙が劣化して生じた汚れを除去するため、光漂白処置が行われ、外観の改善がされた。最後に、13~14ページは、約  $135 \text{ m}^3/\text{h}$ (レイノルズ数約730)の流量と、約  $0.014 \text{ N/cm}^2$ の圧力のもと、エア・ストリーム乾燥法を使って、板紙によるスタック内で乾燥させた。均一な乾燥を行うために、水を吸収する中間層として吸取り紙に挟んだことで、乾燥は5時間で完了した。処置の結果は十分だった(Fig. 5b)。



Fig.5a、5b: Kreismuseum Grimma (Saxony)より、目録ナンバーJ 4. 5、洪水で被害を受けた児童書 (Das Kind, von der Wiege bis zur Schule, by Andreas and Friedrich Perthes, Hamburg and Gotha, c. 1850) クロス・ハーフバインディング、総頁数 41、サイズ 22 cm × 14.5 cm。ベラムに模した紙による本体は、ハインリック・ジャスタス・シュナイダーの版画によるタイトルページ(写真参照)と銅版画 19 頁、ヨハン・ウィルヘルム・ヘイによる本文 24 頁で構成されている。上記写真は処置前(a)と処置後(b)。本体のページは、変色と堆積したホコリを除去するための水性処置が行われ、板紙で作成したスタック内で乾燥とフラットニングが行われた。

## 5. 結論

これまで、エア・ストリーム乾燥法は主に、サイズが大きい一枚物の美術作品などの処置で利用されてきた。しかし、この方法はルートウィヒスブルグにある Institute for Preservation of Archival and Library Materials (Institute für Erhaltung von Archiv- und Bibliotheksgut, IFE)において、アーカイブ資料のコンサベーションに用いられ、リーフキャストが行われた大量の文書の最終工程として導入された (Kieffer 2007)。総合的に判断すると、エア・ストリーム乾燥法は費用対効果が高い方法であり、また標準化することも可能で、高い品質の乾燥結果を得ることができる。大量の紙媒体物の乾燥が必要な状況、例えば、水性脱酸性化処置や洪水被害にあった紙のコンサベーションにおいても、活用できる可能性を持っている。

## 6. 参考文献

Banik, G., Brückle, I.: Paper and water: A guide for conservators. Oxford: Elsevier –Butterworth Heinemann, 2011.

[『ほぼ日』2011年4月28日\(木\)『紙と水:コンサーバターのための手引き』\(Paper and Water: A Guide for Conservators\)が上梓](#)

Brecht, W.: Beating and hygrostability of paper. In: Fundamentals of papermaking fibres. Transactions of the symposium held at Cambridge, September 1957, Francis Bolam (ed.), Kenley: British Paper and Board Makers Association, 1958: 241–262. [\[Abstract\]](#)

Futernick, R.: Alternative techniques in paper conservation. In: Proceedings of a Conference, Symposium 88 – Conservation of Historic and Artistic Works on Paper, Ottawa, October 3rd to 7th, 1988, H. Burgess (ed.), Ottawa: Canadian Conservation Institute, 1994: 85–88. [\[Abstract\]](#)

Glück, E.: Luftströmungstrocknung von Papier – Erarbeitung eines Funktionsmodells zur Anwendung in der Papierrestaurierung. Unpublished graduate thesis, Staatliche Akademie der Bildenden Künste Stuttgart (2005).

Kieffer, A.: Strömungstrocknung. In: Arbeitsblätter des Arbeitskreises Nordrhein – Westfälischer Papierrestauratoren 11 (2007): 35–39.

Mentjes, M.: Untersuchung des Trocknungsverhaltens von Papier bei der Anwendung von Trocknungstechniken aus der Papierrestaurierung. Weiße Reihe des Instituts für Museumskunde der Staatlichen Akademie der Bildenden Künste Stuttgart, Vol. 22, Gerhard Banik and Volker Schaible (eds), München: Anton Siegl, 2006.

Minter, B.: Water damaged books: Washing intact and air drying – A novel (?) approach. The Book and Paper Group Annual 21 (2002): 105–109. [\[Full text\]](#)

Shure, B.: Chine Collé: A printer's handbook. San Francisco: Crown Point Press, 2000: 81–88.

Sugarman, J. E. und Vitale, T. J.: Observations on the drying of paper: Five drying methods and the drying process. Journal of the American Institute for Conservation 31 (1992): 175–197. [\[Full text\]](#)

Schopfer, J.: Personal Communication. (2004). Western Regional Paper Conservation Laboratory, Fine Arts Museums of San Francisco, California Palace of the Legion of Honor, Lincoln Parc, 100 34th Avenue, San Francisco, CA 94121-1693, USA.

Watkins, S.: Practical considerations for humidifying and flattening paper. The Book and Paper Group Annual 21 (2002): 61-76. [\[Full text\]](#)

## 著者プロフィール

Eva Glück

Academy of Arts in Berlin 現代美術コレクション部門の紙媒体および写真作品のコンサーバター。State Academy of Art and Design in Stuttgart を 2005 年に卒業。同アカデミーのペーパー・コンサベーション卒業研究プログラムに協力し、2008 年より、“ハンス・シャーロン・アーカイブの意匠図、写真複製 –分析および修復–”プロジェクトを率いている。

Ernst Becker

State Academy of Art and Design in Stuttgart の化学およびプロセス・エンジニアリングの分野において、工学修士の学位を取得。大学での経験を経て、先進技術、プラント・エンジニアリング、建築、測量技術の分野における企業家としてだけでなく、保存修復分野においても意欲的に活動を行った。現在は、Becker Systems 社の CEO と業務執行取締役を兼務、保存修復テクノロジーの開発と製作だけでなく、再生可能エネルギーにも関連している。

Gerhard Banik

Vienna Technical University において科学博士号を取得。1990 年から 2008 年まで、State Academy of Art and Design in Stuttgart のペーパー・コンサベーション卒業研究プログラムの指導にあっていた。現在、University Life Sciences(BOKU)in Vienna 補助研究員、University of Applied Arts in Vienna 客員教授。

Michael Kühner

産業的な製本と工芸製本の両分野で訓練を受けた。1991 年から 1995 年にかけて Stuttgart の“製本の国家教育および訓練協会”代表を務め、1995 年から 2000 年まで、Kuehner-Schempp 社において業務執行取締役、1996 年には ARCHE GmbH for Conservation 社の代表取締役であり、2000 年からは Klug-Conservation 社の業務執行取締役を兼務。