酵素脱墨のメカニズムに関する研究（第2報）

—酵素処理条件及び酵素活性が脱墨に与える影響—

日本製紙株式会社 技術研究所 杉 野 光 広
北海道大学 大学院工学研究科 高 井 光 男

The Study for the Mechanism of Enzymatic Deinking Part 2

—The effect of enzymatic treatment condition and
enzyme activity on deinking efficiency—

Mitsuhiro Sugino

Pulp and Paper Research Laboratory, Nippon Paper Industries Co., Ltd.

Mitsuo Takai

Graduate School of Engineering, Hokkaido Univ.

We have studied the mechanism of enzymatic deinking because there is few papers concerning it. In the previous paper three important points were reported, namely, mechanical forces were necessary in enzymatic deinking, the main function of enzymes was to convert Hairy toner to Clean toner, and higher charge of enzymes gave a lower efficiency in ink separation at a flotation.

A new test method was developed for the easy evaluation of the conversion rate from Hairy toner to Clean toner because this conversion could be a key of the mechanism in enzymatic deinking. By this method several enzymatic conditions and six enzymes were evaluated.

The enzyme with higher Avicel activity could convert more effectively at a certain level of CMC activity. Therefore Avicel activity would be a key factor to remove fibers from Hairy toner along with mechanical force and CMC activity. And the enzyme addition could decrease mechanical force.

Comparing the results by both the test and usual deinking experiment, the close correlation between them could be observed. We can confirm that Avicel activity is important factor for the conversion.

Keywords : Waste Paper, Enzymatic Deinking, Toner Printed Paper, Hairy-Toner, Flotation, Avicel activity

分類 : G: 脱インキ, S: 情報洋紙 (複写用紙・フォーム用紙・PPC用紙・感熱原紙等) W₃ 脱墨剤

1. 緒 言

近年、複写機やコンピューターの普及に伴うレーザープリンターの利用拡大によりトナー印刷物がオフィス古紙の大部分を占めるようになってきた。オフィス古紙は再利用率が低く、現状ではほとんどが紙ゴミとなっているため、環境問題の観点からオフィス古紙リサイクル技術の確立が急務となっており、そのためには難脱墨であるトナー印刷物の脱墨性向上が必要であ

る。現状の脱墨工程において完成パルプに残存するトナーを満足のいくレベルまで低減させるには、多段の強力な機械処理を行い、繊維からトナーの剥離を促進しなければならない。しかし、このような処理工程は脱墨パルプの製造コストを上げ、繊維自体にも不可逆的な損傷を与えることになり、古紙の有効利用を考えると必ずしも好ましくはない。これらの問題点を解決するには機械処理以外の有効なトナー剥離方法が必要であり、その一つとして脱墨工程にセルラーゼを主体

とした酵素の利用がここ 10 年ほど研究され、多数報告されている¹⁾²⁾。しかし、多くの文献でその効果が認められているにもかかわらず、コスト、品質安定性の問題など解決しなければならない幾つかの問題があり、酵素脱墨の実用化はそれ程進んでいない。酵素脱墨を普及させるには、より効果的な酵素処理方法の開発が必要であり、酵素脱墨のメカニズム解明が、その鍵を握ると思われる。

前報³⁾ではトナー印刷物の酵素脱墨において、酵素処理単独では効果がなく、酵素処理と機械処理の組み合わせが重要であると述べた。これは Zeyer ら⁴⁾のモデル実験の結果と一致する。トナー脱墨効率の向上はヘアリートナーをクリーントナーに変換することであり、酵素処理と機械処理の組み合わせは、この変換効率を向上させる。同様の結果は Jeffries ら⁵⁾の実験によっても得られている。更に我々の観察結果から酵素脱墨程度の処理においてクリーントナーへ変換可能なヘアリートナーは繊維がトナーに巻き込まれていない表面ヘアリートナー主体であることがわかった。また、機械的処理後の酵素処理は Jobbins ら⁶⁾の結果と同様に全く効果を示さないどころか、我々の結果ではむしろフローテーション効率を悪化させた。この現象は機械的処理と酵素処理を同時に行った場合でも酵素高添加の条件下において認められた。同様の現象は Morkbak ら⁷⁾や Jeffries ら⁵⁾の研究結果でも認められ、Morkbak らは酵素によるトナー微細化がフローテーション効率を悪化させたと説明した。しかし、我々は酵素処理がトナーの粒径に影響を与えないことを確認しており、この原因が酵素によるヘアリートナーのフローテーション除去効率の低下によることを明らかにした。更に今回は、上述したように、酵素によるトナー印刷古紙の脱墨率向上が主にヘアリートナーからクリーントナーへの変換によることから、クリーントナーへの変換率を調べるモデル実験法を確立し、機械力、時間、酵素添加率等の条件がクリーントナー変換率に与える影響を調べた。また、活性の異なる酵素数種を用いてアビセル活性がクリーントナー変換率に与える影響を、上述したモデル実験及びテーブルでの脱墨実験にて調査したので報告する。

2. 実験方法

2.1 古紙試料

Canon NP 6550 機 (ポリスチレン系トナーを使用) にてコピーした上質系トナー印刷紙を 2 cm 四方に切断し、試料として用いた。

Table 1 Activity of enzyme

	Optimum pH	CMC activity U/mg	Avicel activity U/mg
Cellulase A	6	0.23	2.25×10^{-3}
Cellulase B	5	0.65	2.95×10^{-1}
Cellulase C	7	0.23	6.91×10^{-5}
Cellulase D	5	2.22	2.48×10^{-2}
Cellulase E	4	0.27	1.56×10^{-2}
Cellulase F	4	0.25	6.30×10^{-1}

2.2 酵素及び酵素活性試験

酵素活性の異なる 6 種類の市販セルラーゼを用いた。CMC 活性及びアビセル活性は Berghem ら⁸⁾の方法に従って測定し、表 1 に示した。

2.3 クリーントナー変換試験

トナー印刷古紙における酵素の効果は主にヘアリートナーからクリーントナーへの変換であることから、機械力、時間、酵素添加率の影響及び各種酵素の比較を簡便に行う方法として本法を用いた。

2.3.1 離 解

古紙試料絶乾 600 g を熊谷理機製高濃度パルパーを用い、パルプ濃度 15%、温度 40 度で 35 分間離解を行った。

2.3.2 ヘアリートナーサンプルの調製

2.3.1 の方法に従い古紙を離解し、篩分試験機にて篩い分けを行った (2.5.3 参照)。各フラクションの内、42 メッシュパス、80 メッシュオンのフラクションから、付着繊維が 1 本のヘアリートナーを採取しヘアリートナーサンプルとした。

2.3.3 クリーントナー変換試験方法 (図 1)

20 ml の試験管に 2.3.2 で調製したヘアリートナー 100 個、LBKP (CSF 400 ml) 絶乾 0.02 g、蒸留水 5 ml 及び所定の pH 緩衝液 (2.3.4 参照) 0.5 ml 加えた後、各酵素を所定量加え、最後に蒸留水にて全量を 10 ml とした。LBKP を加えた理由は、酵素を対パルプ当たりの重量として添加するためであり、振とう培養機中で流動性を損なわない程度の重量とした。このサンプルを低温恒温槽付振とう培養機 TXY-24 R-F (高崎科学機械株式会社製) を用いて、40℃ で種々の条件で処理を行った。処理後は 80 度の熱水中で 30 分間失活処理を行った。

2.3.4 pH 緩衝液の作成⁹⁾

Sorensen 氏緩衝液作成法にて pH 6 及び pH 7 の緩

Fig.1 The method of clean toner transformation test

衝液を作成し、Walpole 氏酢酸塩緩衝液作成法により、pH 4 及び pH 5 の緩衝液を作成した。

2.4 酵素脱墨試験処理方法

2.4.1 酵素処理

古紙を離解と同時に酵素を所定量添加し酵素処理を 2.3.1 に示した離解条件下で行った。離解終了後、80 度の熱水中で 30 分間失活処理を行った。

2.4.2 インキ除去

2.4.1 の方法にて離解した原料を濃度 1% まで 40 度の温水中で希釈し、2L ラボフロッター (ファーレンワルド浮選試験機) を用いて 10 分間フロッテーションを行った。フロッテーション条件はパルプ濃度 1%, 温度 40 度, 空気量 1.5 L/min である。

2.5 評価方法

2.5.1 画像処理法による残トナー定量

各処理後パルプを TAPPI 205 に基づき手抄きシートを作成し、Conmark Analyzer 社 Scan-Mark 800 を用いて残トナー面積率, 平均粒径の測定を行った。

2.5.2 実体顕微鏡によるヘアリートナー及びクリーントナーの測定

実体顕微鏡を用いて繊維が付着しているヘアリートナーと付着していないクリーントナーの割合を測定した。測定個数は、2.3 ヘアリートナー除去試験に関してはトナー 100 個, 2.4 酵素脱墨試験に関してはトナー 500 個である。

Fig.2 The distribution of the conversion number to clean toner by the clean toner conversion method

Temp. 40°C, Time 0.5 hr, Agitation 200 rpm

2.5.3 篩分試験

TAPPI 233 に基づき, パルプの篩分試験を行った。

3. 結果

3.1 クリーントナー変換試験

3.1.1 試験の測定回数

2.3. で示した方法の測定回数を決定するために, セラーゼ A を用いて同一条件 (添加率 0.2% (CMC 活性 0.47 U/絶乾 g, アビセル活性 4.5×10^{-3} U/絶乾 g), 温度 40°C, 処理時間 0.5 時間, 回転数 200 rpm) で 100 サンプルの処理を行った。結果は図 2 にヘアリートナーからクリーントナーへ変換した個数の分布を

Fig. 3 Effect of mechanical action on the conversion rate to clean toner without enzyme
Temp. 40°C, Time 0.5 hr

Fig. 4 Effect of treatment time on the conversion rate to clean toner without enzyme
Temp. 40°C, Agitation 200 rpm

示した。平均が 33.1 個, 標準偏差は 4.2 個であり, この結果から信頼度 95%, 推定誤差 3 個として, 必要な測定回数 (n) を以下の式¹⁰⁾により算出すると 7.5 となったことから, 同一条件で 8 回測定を行い, 結果はその平均値にて示した。

$$n = (1.96 \times \text{標準偏差} / \text{推定誤差})^2 = (1.96 \times 4.2 / 3)^2 = 7.5$$

3.1.2 機械力の影響

本方法において, 機械力のみにおけるヘアリートナーからクリーントナーへの変換率 (以下, クリーントナー変換率と記す) を図 3 及び図 4 に示した。図 3 は攪拌回転数の影響を調査したものであり, 攪拌回転数が 150 rpm 以上でクリーントナーへの変換が認められ, 攪拌回転数とともに変換率は上昇するが, 今回の条件で最も強力であった 250 rpm においても 17% の変換率であった。また, 図 4 は攪拌回転 200 rpm において処理時間がクリーントナー変換率に与える影響を調査したのものであるが, 時間とともに変換率は上昇するものの, 2 時間処理においても変換率は 30% であった。

3.1.3 酵素の効果

セルラーゼ A を用いて酵素がクリーントナー変換率に与える影響を調査した。図 5 は攪拌回転数とクリ

Fig. 5 Effect of mechanical action on the conversion rate to clean toner with enzyme A
Enzyme addition 0.2% Temp. 40°C, Time 0.5 hr

Fig. 6 Effect of treatment time on the conversion rate to clean toner with Cellulase A
Enzyme addition 0.2% Temp. 40°C, Agitation 200 rpm

ントナー変換率の関係を酵素処理の有無で比較した結果である。100 rpm 未満の機械力の弱い範囲においては酵素の有無で差はなく変換率は認められなかったが, 攪拌回転数 100 rpm 以上では, 両者に差が生じた。攪拌回転数 100 rpm において, 酵素無添加ではクリーントナーへの変換は全く認められなかったが, 酵素添加では 2% 程度確認された。回転数が高くなる程, その差は顕著となり, 攪拌回転数 150 rpm におけるクリーントナー変換率は酵素無添加が 3%, 酵素添加では 10% であり, 最大の 250 rpm においては酵素無添加が 17% であるのに対し, 酵素添加は 51% となり, 酵素によるトナーからの繊維剥離効果が認められた。剥離効果は攪拌回転数 100 rpm 未満の機械力が弱い範囲では認められず, 攪拌回転数が高くなると共に酵素有無の差がより顕著になっていることから, 酵素処理と機械力が相乗的に働いていると考えられる。また, 酵素添加において攪拌回転数 155 rpm 程度で, 酵素無添加の攪拌回転数 250 rpm における

Fig. 7 Effect of Cellulase A addition rate on the conversion rate to clean toner

Temp. 40°C, Time 0.5 hr, Agitation 200 rpm

クリーントナー変換率 (17%) と同等となり, 攪拌回転数で約 38% 程度の低減となった。図 6 は処理時間とクリーントナー変換率の関係を酵素処理の有無で比較した結果である。処理時間に関しても攪拌回転数と同様に, 酵素の有無でクリーントナー変換率に大きな差を生じ, 時間が長くなるほど差が著しく大きくなった。処理時間を延長することは, 酵素反応が更に進み, 一定の機械力で除去される割合が増えるため差が広がるものと考えられる。図 7 はセルラーゼ A の添加率とクリーントナー変換率の関係である。添加率が増加するとクリーントナー変換率は上昇し, CMC 活性にして 0.5 U/g で約 35%, 1.5 U/g で約 50% の変換率が認められ, 酵素無添加 (変換率 10%) に比べ, それぞれ 250% 及び 400% 向上した。

3.2 各種酵素処理におけるクリーントナー変換率の比較

市販のセルラーゼ 6 種類を用いて, 酵素活性の違いがクリーントナー変換率に与える影響を調査した。酵素活性と脱トナーの比較を行った研究は過去にも報告されている。例えば, Zeyer ら⁴⁾は硝酸銀を用い, 酵素活性を低下させて脱トナーへの影響を調査し, 両者の相関を確認している。また, 彼らの報告の中で基質の結晶性の差は脱トナーにほとんど影響を与えないと述べられており, このことは CMC 活性の重要性を示唆していると考えられる。一方 Morkbak ら⁷⁾は CMC 活性に着目し, セルロース結晶領域への作用を有さない酵素を用いて脱墨性との関係を明らかにしている。このように, 脱トナーに関して, セルロース非晶領域への作用を示す CMC 活性の重要性は比較的明らかにされているが, 結晶領域への作用の指標であるアビセル活性に関しては詳しく報告されていなかった。

我々は酵素活性のうちアビセル活性に着目し, 脱トナーに与える影響を調査した。実験は各種酵素の CMC 活性を一定 (表 2) とし, 2.4 のクリーントナ

Table 2 Avicelase of each enzyme at a constant CMCase

	Optimum pH	CMC activity U/mg	Avicel activity U/mg
Cellulase A	6	0.47	0.00450
Cellulase B	5	0.47	0.00021
Cellulase C	7	0.47	0.00014
Cellulase D	5	0.47	0.00523
Cellulase E	4	0.47	0.02674
Cellulase F	4	0.47	0.00119

Fig. 8 Comparison of 6 enzymes at the same CMC activity

ー変換試験に準じ, 攪拌回転数を変えてクリーントナー変換率の測定を行った。結果は図 8 に示したように, 各酵素とも攪拌回転数 100 rpm 以下の弱い機械力の範囲ではクリーントナー変換率は低く, 酵素による差は認められなかった。しかし, それ以上の比較的強い機械力において, 酵素によりクリーントナー変換率に差が生じた。実験における酵素活性と攪拌回転数 150 ~ 250 rpm におけるクリーントナー変換率に表 3 に示した。明らかにアビセル活性はクリーントナー変換率に影響を与えており, 同一 CMC 活性において最もアビセル活性の高かったセルラーゼ E が, 6 種類の酵素の中で最もクリーントナー変換率が高かった。従って, トナーから繊維を剥離するにはアビセル活性も重要な要因の一つであり, ヘアリートナーのヘアリー部 (繊維) 除去において, 酵素のセルロース結晶領域への作用も関与していると考えられる。

また, 表 4 に攪拌回転数 250 rpm におけるブランクのクリーントナー変換率と同等の変換率を得るのに必要な各種酵素処理における攪拌回転数を示したが, 酵素処理により攪拌回転数を 28~40% 程度低減でき

Table 3 Conversion rate to clean toner

	CMC activity U/mg	Avicel activity U/mg	Conversion rate to clean toner (%)		
Agitation speed (rpm)			150	200	250
Blanc	—	—	3	10	17
Cellulase A	0.47	0.00450	15	33	51
Cellulase B	0.47	0.00021	8	25	43
Cellulase C	0.47	0.00014	9	24	45
Cellulase D	0.47	0.00523	14	32	48
Cellulase E	0.47	0.02674	17	40	58
Cellulase F	0.47	0.00119	10	29	45

Table 4 Agitation speed with enzyme needs for the transformation rate 17% that is achieved at 250 rpm without enzyme

	Agitation speed (rpm)
Cellulase A	155
Cellulase B	180
Cellulase C	180
Cellulase D	160
Cellulase E	150
Cellulase F	170

Fig. 9 Effect of enzyme A addition on residual toner area after floatation

ることがわかった。3.1.3項でも述べたが、トナー印刷物の脱墨工程において、酵素処理は脱トナーのための機械処理を大きく低減できる可能性があると思われる。

3.3 各種酵素脱墨結果

次に実際にトナー印刷古紙を用いて、2.4で示した方法に準じて酵素脱墨実験を行い、脱墨における酵素活性の影響を確認した。図9はセルラーゼAにおける酵素添加率とフローテーション後の残トナー面積率を示している。セルラーゼAにおいて、最も残トナー面積率が小さくなるのが0.2%添加であり、CMC活性にして0.47 U/絶乾gであることから、3.2と同様に各酵素ともCMC活性が0.47 U/絶乾gになるように添加し処理を行った。図10は離解後のヘアリートナー率を示しているが、酵素無添加が57%であるのに対して、酵素添加は25~41%と16~32%程減少しており、どの酵素においても酵素無添加(ブランク)に比べて明らかに酵素処理の効果が認められた。

更にブランクのヘアリートナー率と各酵素のヘアリートナー率の値から各酵素処理によるクリーントナー変換率を求め、図11に示した。最もヘアリートナー変換率の高かった酵素はセルラーゼEであり37%、次いでセルラーゼAとDが30%前後、最も低かったのがセルラーゼBとCであり20%強であった。これらの結果は明らかにアビセル活性がクリーントナー変換率に影響を与えていると考えられ、クリーントナー変換試験の結果が再現された。また、フローテーション後の完成パルプにおける残トナー面積率を図12に示したが、酵素無添加に比べ酵素添加の残トナー面積率は大きく減少しており、その減少率は21~32%で

Fig. 10 Hairy toner rate after pulping

Fig. 12 Residual toner area after floatation

Fig. 11 Transformation rate to clean toner after pulping

あった。また、残トナー面積率の最も低かったのがセルラーゼ E、次いでセルラーゼ A と D、高かったのはセルラーゼ B と C であり、離解後のクリーントナー変換率が高いほど残トナー面積率が低かった。以上の結果から、トナー印刷古紙の酵素脱墨効果の主要因はヘアリートナーからクリーントナーへの変換であることが再確認された。

4. ま と め

以上の検討結果から以下のことが明らかとなった。

1) クリーントナー変換試験と実際の脱墨試験におけるクリーントナー変換率の傾向は一致しており、酵素によるトナー印刷紙の脱墨効果を調査する上でクリーントナー変換試験は有効な方法である。

2) クリーントナー変換試験の結果より、ヘアリートナーからクリーントナーへの変換率は機械力が弱い範囲（攪拌回転数 100 rpm 未満）では酵素処理の有無で差はなかったが、機械力が比較的強い範囲（攪拌回転数 100 rpm 以上）においては明らかに酵素処理が高い値を示し、また攪拌回転数が高くなるに従い、その差が顕著になったことから、クリーントナー変換率には機械力と酵素処理が相乗的に作用すると考えられる。

3) 活性の異なる各種酵素のクリーントナー変換試験及び脱墨試験の結果より、酵素脱墨の効果にはアビ

セル活性も重要な要因の一つであることが明らかとなった。

4) クリーントナー変換試験の結果より、酵素無添加と同等のクリーントナー変換率を得るのに、酵素添加により攪拌回転数を 28~40% 程度低減できることがわかった。この結果から、酵素の利用はトナー古紙処理工程における機械力を低減できる可能性があるといえる。

5) 脱墨試験において、フローテーション後の残トナー面積率がパルピング後のヘアリートナー率に依存していることから、トナー印刷古紙の酵素脱墨効果の主要因はヘアリートナーからクリーントナーへの変換であることが再確認された。

参 考 文 献

- 1) Thomas Welt and Ronald J. Dinus : Progress in Paper Recycling 36-47 (February 1995)
- 2) Pratima Bajpai and Pramod K. Bajpai : Tappi J. 81 (12) 111 (1998)
- 3) 杉野光広, 松下泰幸, 高井光男 : 紙パ技協誌 53 (12) 86-94 (1999)
- 4) Christian Zeyer, Thomas W. Joyce et. al. : Tappi J. 77 (10) 169 (1994)
- 5) Thomas W. Jeffries, John H. Klungness et al. : Tappi J. 77 (4) 173 (1994)
- 6) Jill M. Jobbins, Neal E. Franks : 1997 Recycle Symposium Proceeding 411-421
- 7) Anne L. Morkbak, Wolfgang Zimmermann : Progress in Paper Recycling 33-37 (May 1998)
- 8) Lans E. R. Berghem and L. Goran Pettersson : Eur. J. Biochem, 37 (1973) 21-30
- 9) 三井哲夫ら 農芸化学実験書 (第 2 巻) 産業図書 P 670~677 参照
- 10) 藤沢偉作「楽しく学べる統計教室」現代数学社 P 176~179 参照

(受理: '99. 9. 27)

ASA と AKD のサイズ効果、反応速度、加水分解速度に関する研究

日本製紙株式会社 技術研究所 小野 裕司, 宮西 孝則

ASA と AKD は中性サイズ剤としては、もっとも一般的なサイズ剤であるが、繊維の接触角の測定方法や紙中サイズ剤の定量方法の問題、セルロースと反応説を支持するかどうか意見が分かれており、繊維の疎水化、セルロースとの反応速度、及び加水分解速度について比較検討した研究は行われていなかった。そこで、我々は AKD や ASA がセルロースと反応しているとの仮定のもとに、反応速度を決定することを試みた。AKD とセルロースの反応速度定数については、Lindstrom らの研究で明らかにされているが、ASA とセルロースの反応速度定数は、この反応が AKD よりも速く、しかも、反応した ASA を定量する適切な方法がなかったために測定されていなかった。そこで、我々は矢野らが報告している熱分解 GC 法を用いて ASA とセルロースの反応速度を決定した。一方、AKD の加水分解速度は Marton らによって測定されているが、ASA の加水分解速度については測定例がないので Wasser らの ASA の電位差滴定法と FT-IR 法を用いて加水分解速度を決定した。単繊維前進接触角の測定はウィルヘルミ理論に基づく Hodgson らの方法を改良して AKD と ASA でサイズした紙のそれぞれの単繊維前進接触角を測定した。

その結果、サイズを発現する領域での ASA の単繊維前進接触角が 95° で AKD の 85° よりも高く、サイズを発現させるのに必要なサイズ剤量も ASA は AKD の約半分であり、ASA のサイズ剤としての効果が潜在的に高いことが示された。また、 90°C 、 $\text{pH } 6.0$ の ASA とセルロースの反応速度は AKD とセルロースとの反応速度の約 3 倍であり、ASA の方がサイズの立ち上がりが速いことが定量的に示された。更に、 50°C 、 $\text{pH } 8.0$ におけるカチオン澱粉で乳化した ASA エマルジョンの加水分解速度は、カチオン澱粉で乳化した AKD の約 40 倍であり、ASA の効果を十分引き出すには、ワンパスリテンションを高めることが重要であることが定量的に示された。これらの知見は、AKD と ASA サイズ剤の特性をより深く理解し、サイズ剤の使用方法を最適化する助けになるものと思われる。

(本文 70 ページ)

酵素脱墨のメカニズムに関する研究 (第 2 報)

—酵素処理条件及び酵素活性が脱墨に与える影響—

日本製紙株式会社 技術研究所 杉野 光広
北海道大学 大学院工学研究科 高井 光男

トナー印刷古紙における酵素脱墨は酵素処理と機械力の組み合わせが重要であり、酵素はヘアリートナーからクリーントナーへの変換率を向上させ、フローテーションでのトナー除去率を改善することを前報で報告した。本報では、更にトナー印刷古紙における酵素脱墨の効果がヘアリートナーからクリーントナーへの変換率向上であることに着目し、この変換率を簡便に調査できる試験法(クリーントナー変換試験)を考案し、酵素処理条件及び活性の異なる酵素の比較を行った。

その結果、ヘアリートナーからクリーントナーへの変換率は機械力が弱い範囲では酵素添加の効果は認められなかったが、機械力が強くなると酵素の効果が顕著となり、機械力と酵素処理が相乗的に作用していると考えられた。次に、酵素のセルロース結晶領域への作用がクリーントナー変換率に与える影響を調べるため、活性の異なる 6 種の酵素を用いて CMC 活性一定で比較したところ、アビセル活性が大きいほどクリーントナー変換率が高く、機械力、CMC 活性のほか、アビセル活性も重要であることが明らかとなった。また、酵素添加により酵素無添加と同一のクリーントナー変換率を得るのに、振とう培養機の攪拌回転数を 20~40% 低減できることから、トナー古紙処理工程において機械力を低減で

きる可能性があることがわかった。更に、これらの酵素を用い、実際の脱墨試験を行った結果、パルピング後のヘアリートナー率はCMC活性を同一とした場合、アビセル活性が高いほど低く、クリーントナー変換試験の結果が再現された。また、その後のフローテーション処理でフローテーション後のパルプの残トナー面積率がパルピング後のヘアリートナー率に依存していることから、前報で報告したように、トナー印刷古紙の脱墨効果の主要因はヘアリートナーからクリーントナーへの変換であることが再確認された。

(本文 78 ページ)

乾燥工程における紙の寸法安定性の改善 (第 1 報)

—静的拘束乾燥モデルによる実験検証—

三菱重工業株式会社 広島研究所 久野廣明, 蓮池牧雄, 真田 晃
三菱重工業株式会社 紙・印刷機械事業部 大平和仁

一般に、紙の寸法安定性には伸びたり、縮んだりする 2 次元的な面内変形と、カールのような厚み方向の伸縮差による 3 次元的な変形がある。乾燥過程における紙の拘束はその寸法安定性に大きな影響を与える。湿紙は、水分率 40% 前後から収縮を始め、乾燥が完了するまで収縮し続けるため、乾燥過程での拘束条件や拘束力が、出来上がった紙の寸法安定性を大きく左右する。本研究では抄紙機ドライヤでの拘束状態を要素的にモデル化し、機械抄きシートを用いて各拘束乾燥法、すなわち、シリンダ上カンバス面圧拘束、真空拘束およびテンション拘束、に於ける拘束力と収縮特性、カール特性を静的な拘束乾燥実験により明らかにした。機械抄きの紙では 2 kPa 以上の面圧拘束力で収縮率を 0.5% 以下に抑制でき、その結果、水分伸縮率は約 0.05%/%, ストレッチは約 2% 以下になる。また、MD テンション拘束では拘束力の増加とともにボアソン効果によって CD 収縮率は増加し、80 N/m で CD 収縮率は 4% を超える。一方、カールの傾向は紙をどちらの面から加熱するかで異なり、フェルト側から乾燥するとワイヤ側を内側にカールし、ワイヤ側から乾燥するとその逆となる。その程度は表裏の繊維配向 MD/CD 比に影響されるが、乾燥時の拘束力を高めることやより低温で乾燥することでカールは抑制される。今後は、本研究を動的な検証に発展させることで、抄紙機ドライヤを寸法安定性改善に結びつくものに改良できると考える。

(本文 85 ページ)