三菱重工・ベロイト共同開発による新型ヘッドボックスについて

三菱重工業㈱三原製作所 牧野 哲夫, 竹口 範明
広島研究所 江口 晃, 田島 俊美

Development of Concept IV-MH™ Headbox

Tetsuo Makino, Noriaki Takeguchi, Akira Eguchi and Toshimi Tajima
Mitsubishi Heavy Industries, Ltd.

Jointly developed by Mitsubishi Heavy Industries and Beloit Corporation, the Concept IV-MH™ headbox is a major breakthrough in headbox technology. The Concept IV-MH was developed with the objective of meeting not only the traditional headbox performance requirements, but also anticipating and meeting the stringent quality demands of the future.

1. はじめに

当社は独自技術によるアクデフローヘッドボックスを1984年に開発¹⁾し、ディストリビュータを改良したII型、熱や圧力に対する安定性、繊維配向性を改良したIII型²⁾と発展させて来た。一方、当社のパートナーであるベロイト社はコンパーフローヘッドボックスを1968年に開発し、流路が浅く地合が良いシンチャンネルヘッドボックス、ステイリングチャンバをなくしてクリーンな運転が高く評価されたコンセプトIIIヘッドボックスへと発展させて来た。今回紹介するコンセプトIV-MHヘッドボックス³⁾は三菱重工とベロイト社のヘッドボックスに関する、永年に亘る経験と最新の抄紙技術や製造技術を折り込んで共同開発された最新のヘッドボックスである。

ヘッドボックスの基本的な要求性能は均一な坪量プロフィール、優れた地合、クリーンな運転、広い流量レンジなどである。これらの要求性能に対して、まず現在までの当社の取りくみと最近の課題について述べる。

1) 坪量の均一性

幅方向 (CMD) プロファイルは広いバンドと狭いバンドの坪量変動に分けられる。

広いバンドの坪量変動を低減するために①流体的な要因に対しては、チューブバンクの流量分配性能の向上とヘッダの再循環流量比コントロールで、②熱的な要因に対してはローラサポートとマルチゾーン温度コントロールで、③圧力的な要因に対しては構造の最適化で対応したヘッドボックスを1989年に開発した。

狭いバンドの坪量変動の要因は噴出口の機械的精度から発生するストリークや流れの不安定が要因である。当社の紙印刷研究センターでは図1に示すような狭いバンドの坪量変動が高精度に測定できる坪量プロファイラーを導入した。図2に示すように12mmピッチ表示の坪量プロファイルは、広いバンドを平均化した150mmプロファイルと比べてより多くのストリークや坪量変動が現れてくる。この狭いバンドの坪量変動は、特にコーティングやスーパーカレンダリングする

図1 高分解性能坪量プロファイル

図2 坪量プロファイル

紙種において品質や操業性に与える影響が大きく性能向上が要求されている。

2) 地 合

低坪量の紙ではツブツブの傾向の少ない地合、高坪量の紙ではフロック傾向の少ない地合が要求されている。従来はシートの長さや厚みなどで対応していたが繊維分散のためのタービュレンスレベルの調整範囲が十分とは言えず、場合によって、フォーマ上でのアクティビティが過大であったり、逆に不足することがあった。

3) 繊維配向性

繊維配向性、カールが問題提起され始め、当社がヘッドボックスの幅方向流速分布の計測などを調査し始めたのは1983年である。この年、Sonic Sheet Testerが日本で実用化され、その頃から繊維配向、カールに関する要求が厳しくなり多くの努力がなされてきた。

ヘッドボックスが繊維配向性に影響を与える要因はアプローチ配管、ヘッダ再循環流量比、チューブバンクの穴配列、ポンドサイドブリードやインジェクション、スライスリップの開度プロファイル、ワイヤー上での原料の拡がりなどである。これらが繊維配向に与えるメカニズムは理論的に、また実験的に多くの研究^{4,5)}が行われて解明されよく理解できるようになっている。

これらの要因の中で影響の大きいのはチューブバンクの穴配列、特に端部のわずかな流量欠損である^{6,7)}。図3には1990年から採用しているチューブバンクの端部孔配列とスリーブを示す。ポンドサイド近くまで1列にチューブを配列し、ピッチと孔径で各チャンネ

(a) 旧設計 (1986) (b) 改良後 (1990)

図3 従来のチューブバンクの穴パターン

図4 ブリードによる繊維配向性の調整

ルの流量を同一にしている。さらに端部のスリーブの内径を大きくして流量を若干多めに流している。これにより図4に示されるように、ブリードを使用しない時繊維配向角は内向きとなるが、ブリード流量で外向きに調整し良好な繊維配向角を得ている。しかし近年は更にMD/CD比が小さくて繊維配向角の小さい紙を安定して抄造するために一段と性能が向上したヘッドボックスが要求されている。

4) 高 速 性

当社製の上質、コート原紙用抄紙機的设计速度と最高操業運転速度のトレンドを図5に示す。運転速度は徐々に増加を続け、近年ハイブリッドホームの開発により増加率がふえる傾向にあり、現在1,000 m/minを越えて運転されている。生産性向上のため今後もこの傾向は続くと考えられ、新しいヘッドボックスには高速性とツインワイヤー適合性が要求されている。

5) ジェットの表面特性

ジェット表面の原料液が脱水されできた初期マットが紙の表層となる。そのため、ジェットの表面特性は紙の表層の繊維の並び等の品質に大きな影響がある。ジェットの平滑性はツインワイヤー用ヘッドボックスで特に重要である。

2. コンセプトIV-MHヘッドボックスの

概要と特徴

上記の課題を解決するため新しく開発したコンセプトIV-MHヘッドボックスは、従来のコンバーフローヘッドボックス、アクテフローヘッドボックスのそれぞれの優れた特徴を引き継ぎ、発展させ大きな性能向上を計った。

2.1 全体構成

フォードリニア用あるいはハイブリッドホーム用のコンセプトIV-MHヘッドボックスの全体図を図6に示す。ヘッドボックスの全体は流入側が固定され再循

図5 当社製上質、コート原紙用抄紙機 の速度トレンド

図6 コンセプトIV-MH ヘッドボックスの全体図

環側はローラサポートで支持されている。温度変化による長手方向の熱膨張は、フリーとしエプロンリップは水平に保たれる。マルチゾーンの温水ジャケットが設けられ、ヘッドボックスの温度分布をより均一に保ち、熱変形によるリップ開度プロファイルの変動を低減する。高精度なダブルナックル機構によりスライスリップのL/b(水平垂直位置)を再現性良く調整しジェット着地点を調整する。また、非接触速度センサ⁸⁾はジェット速度を精度よく測定でき、抄紙機用に開発された2灯式光源でJ/W比の制御にも利用できる。

2.2 流路構成

コンセプトIV-MH ヘッドボックスの流路図を図7に示す。幅方向の流量分配のために、テーバヘッダと新しいチューブバンクを採用している。チューブバンクは、幅方向の流量分配の他にフロックの分解、流れの方向・流速プロファイル、乱れの強度等を決める重要な機能が与えられている。

フローシートは流路の深さを浅く保つことにより、原料液に小さなサイズの乱れを与えて繊維分散を高める。またスライスリップまでの流路で乱れのサイズを小さくし、かつ乱れの強度を減衰させ繊維分散を保ちながら平滑で安定したジェットを得ている。抄紙グレードや抄速などに対する適応性を高める為に、アクデシートやフラットシートを単独あるいは、組合せることで乱れの強度が選択できる。

図7 コンセプトIV-MH ヘッドボックスの流路図

チューブバンクとスライス室は一直線に並んだ構成である。チューブバンクの出口の流速は従来よりも高く、流れの方向変換なしにシート部に流入している。これにより流れはジェット速度までよりスムーズに加速され、よりクリーンなヘッドボックスの連続運転を可能にする。また、この直線状にリップに向かって収束するスライス室の構成によりストラタフローが適用できる。

新しいチューブバンクとフローシートの組合せで流れは安定し、坪量の変動成分が小さい紙を高速でも抄造できる。

2.3 濃度プロファイリング

これらの乱れの制御と流れの安定性によって、濃度の調整による坪量プロファイリングが現実的に初めて可能となった。濃度プロファイリングを行なうためのインジェクションシステムが開発された。

3. コンセプトIV-MH ヘッドボックスの設計

3.1 チューブバンク

1) コンセプトIV-MH チューブ

チューブバンクにはコンセプトIV-MH チューブが採用されている。これは図8に示すように第1の丸いチューブから始まり急拡大の第2の丸いチューブにつづき、このチューブの途中からスムーズな加速変換によって四角の出口につながっている。この単純な形状のチューブの各部分は試験によって最適化され、均一な速度と濃度分布の流れがチューブ出口で得られ、次のスライスへ安定な流れを供給する。

2) チューブの流量分配性能

ヘッダから流れは図9に示すように第1のチューブの中で、流速分布が水平垂直方向共に完全に対称になり、流れの方向も完全にマシン方向に一致する。次に流れは急拡大部に流れ、幅方向の均一な流量分配を得るための安定したヘッドロスが発生する。また同時に混合攪拌作用により濃度が均一化される。

図8 コンセプトIV-MH チューブ

図9 チューブ入口の流れ

図12 チューブ出口での濃度プロファイル

3) チューブの整流性能

第2のチューブの急拡大点からは、図10に示すように流れは、非常に短い長さで安定し均一な速度となる。このあと流れは断面積が減少するユニークな方法でスムーズに四角の出口に導かれる。この変換部分でチューブは幅方向に若干未拡がりの形状をもつ。その結果、流れは加速されチューブ出口の流れの安定性と速度プロファイルの均一性が高められる。また同時にランド下流での適度な攪拌作用が行われる。更にチューブの四隅は丸みがあり、汚れが付着しにくい構造になっている。このチューブの出口の平均流速プロファイルは図11に示すようにきわめてフラットで対称である。

4) チューブの濃度均一性

またこのチューブは流れの濃度均一性も考慮して寸法を最適化している。重要なパラメータは急拡大の後のチューブの長さである。適当なチューブ長さは、壁

図10 円管から円管への拡大流れの速度プロファイル

図11 チューブ出口での平均速度プロファイル

図13 チューブ長さの最適化

面に形成される濃度の薄い層が発達するのを防止する。図12はこれを示すもので小径管の長さは同一で、大径管の長さの異なる2種類のチューブの出口で、濃度を直接サンプリングした結果である。長いチューブは坪量ストリークの原因となるし、また逆に短すぎても混合が不足し濃度ストリークとなる。図13は濃度均一性が最良になるチューブ長さがあることを示している。

流れを安定させた長いチューブでは、濃度むらによる坪量ストリークを軽減するために、チューブを千鳥に配置する必要がある。しかし、その場合でも紙の表層は最外層のチャンネルの原料液で形成されることを考えると、チューブの形状を最適化して紙の各層で濃度ストリークをさけることがより良い手法である。

これらに関連して、長いチューブの濃度ストリークを可視化した1例を図14に示す。またこのような濃度ストリークを定量化した結果を図15に示す。チャンネルを透過した光の明るさのプロファイルをチューブ出口の40, 80, 120 mm下流で測定した。明るい部分は低濃度ストリークを示し、この長いチューブではストリークが下流まで伸びる傾向がある。つぎの図16はコンセプトIV-MHに採用された適切な長さのチューブの場合を示し、そのプロファイルはより均一なものとなっている。

図 14 長いチューブの出口での濃度ストリーク

図 15 長いチューブの出口濃度プロファイル (透過光の明るさプロファイル)

図 16 チューブの出口濃度プロファイル (透過光の明るさプロファイル)

5) チューブの配列

それぞれのチューブの濃度均一性が高められた結果、コンセプトIV-MH チューブバンクは、従来のチューブバンクのようにチューブを千鳥に並べる必要はなくなり、図 17 に示すようにそれぞれのチャンネルでポンド幅の端から端まで同一のチューブを配列することが可能になった。従って端部には、従来のように流量欠損を生じさせる大きなランドや異形管がなく、端まで均一な流量が供給されている。これにより、ポンドサイドでの流速低下が抑えられ、より流れの方向がMD方向に並んだジェットが得られた。

3.2 端部流量調節装置

チューブバンクの端部には図 18 に示すように流量を調整できる特殊バルブが設けられている。この端部チューブの入口管内径は、中央部の入口管内径よりも大きい。従って端部のチューブにはたくさんの流量が

図 17 コンセプトIV-MH チューブ配置

図 18 端部流量調整装置

図 19 特殊流量調整バルブ

流せる。端部チューブの上下方向の各チャンネルの流量は1本のスピンドル軸を回転し、入口管の一部に絞りを与えて調整される。端部チューブの流れは、中央部と同じようにMD方向にまっすぐにスライス室に供給される。流量調節バルブの構造と調整機構を図 19 に示す。バルブの絞り部は、速い流速と強い攪拌作用により自己洗浄作用が働き、詰まり、汚れ等の生じないことが試験で確認された。図 20 は端部バルブ流量を変えたときの、ジェットの速度プロファイルを示し、端部の速度を平均値よりも速くしたり遅くしたり調整できる。このとき3孔ピトー管で計測したジェットの流れの向きは内向きから外向きまで変化した。図 21 は

図 20 端部のジェット速度分布とバルブ流量

図 21 繊維主配向角の調整

パイロット M/C による抄紙トライアルの結果を示し、端部流量の増減により、繊維の主配向角を内向きから外向きまで調整できた。

3.3 フローシートの選択と組合せ

コンセプトIV-MH ヘッドボックスは、抄紙グレードや運転速度などに対するフレキシビリティを高める為に、図 22 に示すようなアクデフローシートやコンバフローシートを単独あるいは組合せて使用することで、原料に適した繊維分散力を選定するための乱れの強度が選択できる。

1) チューブ出口での攪拌および整流作用

シートは付根の部分が厚く、チューブから出た流れ

図 22 コンセプトIV-MH フローシート

は上下のステップで適度な攪拌作用をもたせ、かつ急拡大するときの大きさを制限することで、チューブ出口における濃度の均一性と安定性を高めている。

2) フローシートによる乱れのコントロール

乱れの強度や乱れのサイズの測定には図 23 に示すレーザドップラー流速計を利用した。図 24 はチューブバンクの出口からスライスリップまでの乱れの強度を 2 つの流路モデルで比べた。従来最も流れが安定しジェットが平滑なハイコンバージェンスベルベヘッドボックスと比べても、コンセプトIV-MH ヘッドボックスの乱れの強度はより小さい。これは流れの安定性が高められていることを現している。またシートによ

図 23 レーザドップラー流速計による流れの計測

図 24 ヘッドボックス流路における乱れの強度 (スライス室の流れ方向)

図 25 シートによる乱れの大きさの制御 (コンバフローシート)

図 26 ヘッドボックス内の繊維分散状況

り分割された流路は深さが浅いので乱れの大きさが制限される。図 25 はこの効果を示したもので、いずれの流量においてもシートのある方が、ない方に比べて乱れの大きさが小さい。

3) 繊維分散作用

シートによる繊維分散作用を次に示す。ヘッドボックス内の繊維分散状況は図 26 に示すように流路の形状により異なる。ヘッドボックス内の繊維分散度は、要素研究の結果から図 27 に示すシェアファクターで整理された。シェアファクターはチューブバンク出口からリップまでの流路における流速、流路長さ、深さの関数で、流れ方向に積分して求めた。この結果によると、繊維分散度が効果的に高まるシェアファクターと飽和してこれ以上分散度が上がらないシェアファクターがあることが明らかとなった。したがって、抄紙グレード、坪量、抄速、濃度などの運転条件に応じて、ワイヤー上でのアクティビティを過大にしない適正なシェアファクター（タービュレンスレベル）でヘッドボックスを運転することが重要である。また、繊維分散度は流路の深さが浅い程良くなることに注目し、シートの根元から出口までこの深さを浅く保ち、流路の乱れの強度は下げても繊維分散が良好となる流路に設計した。

フローシートの効果を調査したパイロット M/C における抄紙結果の 1 例を図 28 に示す。リップ開度 12 mm で抄紙したとき 2 種のフローシートの有意差はなかったが、リップ開度 9 mm のときはシェアファクターの大きいアクデフローシートの方が、すべての J/W 比において地合は良かった。

図 27 シェアファクターによるヘッドボックス内の繊維分散の整理

3.4 濃度による坪量プロファイリング

従来のスライスリップの曲げによる坪量プロファイル調整法は、図 29 に図示するようにジェットの厚み（流量）を変えることにより坪量を調整していた。この方法ではジェットの流向も変化し、ワイヤー上での横流れ、リップ変位の相互干渉などを考慮する必要がある。またスライスリップの永久歪による定期的な取替の必要もあった。坪量プロファイルの制御性を上げるためにジャッキの設置ピッチは最近では 75 mm まで短くなっているが、この場合でも坪量バンドが 150 mm ピッチ以下の狭い場合、調整が困難である。

坪量は原料液の厚みと濃度で決まるので、リップのプロファイルコントロールの代りに局所の濃度を変化させれば、坪量プロファイルが制御できる。

図 28 抄紙トライアル結果

図 29 スライスの曲げによる坪量プロファイル

図 31 白水インジェクションシステム

図 30 濃度による坪量プロファイリングの概念

濃度による坪量プロファイリングの概念を図 30 に示す。濃度を調整するための白水はチューブバンクの中に配管された注入管よりヘッダ側へ供給される。ヘッダに流出した白水は、流速がある範囲内では図 31 に示すように全量がすぐ下流のチューブに吸い込まれる。白水は濃い原料液とチューブの中で混合され少し薄い原料液となってスライス室に流れる。この室はフローシートにより乱れのサイズが小さくコントロール

されているので、混じり合うことなく低い濃度の原料液は狭いバンドで下流に流れ、局所的に濃度の異なるジェットがワイヤーパートに噴出される。このインジェクションシステムの特徴は白水が一度ヘッダ側へ供給されているので、白水流量が変化してもチューブ流量はほとんど変わらないことである。全ての注入管には予め一律の白水を流しこの白水流量を変化させて坪量を調整する。白水注入管は図 32 に示すようにチューブバンクの垂直方向に並んだ 1 列のチューブに対して代表的には 1 本が設けられる。すなわち幅方向で濃度は 35 mm の細かいピッチで制御できる。図 33 はフォードリニアのパイロット M/C において、1 本の白水注入管にインクを加えたときの写真である。この場合、幅方向のインクの拡がりは約 50 mm である。インクの幅は狭いバンドではっきりみえる。

この本方式による坪量プロファイリングの特徴は高い分解能、良好な直線性、流向の変化がないことが上げられる。

図 32 白水注入管

図 33 ワイヤー上のインクの拡がり

3.5 ジェットの表面特性

ジェットの表面特性は地合、水縞、ストリークなどの紙の品質に大きな影響を与える。ジェット速度の増加やフリージェットの飛距離の増大は、ジェットの平滑性を悪化させる。このため当社は高速で平滑なジェットを得るために各種の要素試験を行って来た。

ヘッドボックスの流動特性の最終評価はジェットの噴出試験で行っている。

1) 高速性の向上

図 34 はコンセプト IV-MH ヘッドボックスの各スピードにおけるジェットの表面状況を示す。表面を見やすくするために、水にラテックスを入れ、ストロボは斜めの浅い角度で光を当てている。表面の凹凸が小さく平滑なジェットが 1,600 m/min でも得られた。

図 35 はジェット表面にニードルを近づけていき通電頻度をカウントしてジェットの表面粗度を定量化した結果を示す。コンセプト IV-MH ヘッドボックスはジェット表面粗度が滑らかで、従来ヘッドボックスの 900 m/min での表面粗度が高速の 1,600 m/min で得られ、高速化を実現した。

2) 機械精度の向上

高速ツインワイヤー用の長い飛距離でもストリークのない均一な厚みのジェットを得るために、エプロンリップの新しい研磨方法を開発した。従来はバフ仕上

ジェット表面粗度(mm)

図 35 ジェット表面粗度（触針法）

コンセプト IV-MH ヘッドボックス

図 34 ジェット表面状況（ストロボ写真）

図 36 コンセプトIV-MH ヘッドボックスの特徴

と電解研磨で必要な表面粗度を得ていた。新しい研磨法は高精度の工作機械の上で最終の表面粗度まで研削加工して完了する。加工時の熱変形を抑え、リップの先端まですべて機械研磨を行い仕上げは不用となった。この機械加工法はジェット噴出試験で性能を確認した。

4. ま と め

コンセプトIV-MH ヘッドボックスは多くの研究成果が折り込まれ坪量プロファイル、地合、繊維配向性、クリーンな運転、高速性、ツインワイヤー適合性、ジェットの表面特性などのヘッドボックスに要求される基本性能が向上した。

新しいチューブバンク、端部流量調整装置、濃度による坪量プロファイリング、フローシートが開発され、各種の性能が向上した。これらの特徴のまとめを図 36 に示す。

以上、ベロイト社と共同開発したコンセプトIV-MH ヘッドボックスを紹介しましたが、来年3月に米国で1号機が稼働する予定で、他にも数台を製作中である。

三菱重工は今後も高品質、高速化、高濃度化、省資

源などの課題に対して、製紙業界各位の御指導をいただきながらより高い目標に向かって技術開発を進めて行きたいと存じますので今後共ご指導ご支援の程よろしくお願い致します。

参考文献

- 1) 藤原治義ほか、三菱重工技報, 22 (4), 479 (1985)
- 2) 江口、倉ヶ崎、末岡、古賀、牧野、竹口、三菱重工技報, 25 (2), 115 (1988)
- 3) S. Pantaleo and J. Shands, CPPA BELOIT seminar 1993
- 4) H. Dahl, H. Holik and E. Weissshuhn, Tappi J., 71 (2), 93 (1988)
- 5) Y. Abe, H. Todoroki, W. Okazaki, T. Inadome and A. Sakamoto, Proceeding '92 PANPA Pulp & Paper Technology Conf, P. 149
- 6) 江口 晃、倉ヶ崎六夫、末岡靖裕、牧野哲夫、紙パ技協誌, 47 (3), 76 (1993)
- 7) 江口 晃、田島俊美、藤田得生、牧野哲夫、紙パ技協誌, 47 (7), 77 (1993)
- 8) 藤田得生、紙パ技協誌, 45 (3), 43 (1991)