

小型木材乾燥炉内における水蒸気の流れの数値シミュレーション

平野公孝¹⁾・菊地正憲¹⁾・常友孝信²⁾**Numerical Simulation on Steam Flows
in a Small Steam-heated Dry Kiln of Wood**

HIRANO Kimitaka, KIKUCHI Masanori, TSUNETOMO Takanobu

Abstract

Recently the market demands for wood, square lumber or board produced with the dry kiln. However, energy consumption is more than necessary for drying of wood. Therefore, technological development for promoting measures for energy conservation is very important. Under the present situation, it is not sufficient to analysis steam-flows in narrow channels of pile-up arrangements in the dry kiln. The CFD technique with the finite volume method is applied to the flow analysis in the steam-heated dry kiln. Most of energy supplied from the internal fans is converted to kinetic energy of velocities running around flow path between pile-up arrangements and inner walls of the kiln. The influence of flow adjuster plates on the flow is showed, and proposals for better configuration of adjuster plates are made. Furthermore, flow control plates on the floor of the kiln make effective improvements on the flows in narrow channels of pile-up arrangements.

Key Words :

Kiln Drying, Steam Flow, Sugi Wood, Square Timber, Flow Adjuster Plate, Pile-up Arrangements, CFD(Computational Fluid Dynamics), FLUENT

1. はじめに

近年、住宅建設をはじめとして乾燥木材の需要が高まり、このため、木材の人工乾燥による生産も増えている。現在、木材の人工乾燥の技術においては、乾燥スケジューリング等は、経験に基づく手法により決定されている場合が多く、乾燥過程の詳細な情報は少ない状況である⁽¹⁾。しかし、木材乾燥の自動システム化等の取組み⁽²⁾も進められているにもかかわらず、実際に木材乾燥炉で人工乾燥のために使用されるエネルギーは、乾燥に必要とされるエネ

ルギーの約4倍も消費している⁽³⁾。

乾燥炉内の水蒸気の流れの流動解析についても、二俣らは、棧組み間の流れをアネモマスター風速計を用いた実験的手法により計測したが、その測定点はきわめて少数である⁽⁴⁾。また、その流速測定の結果によれば、棧積み間の流速が木材乾燥に必要とされる流速1~2m/sに達しておらず、このため、乾燥炉内の送風機を増設しなければならないと言う結論を導き出している。このように送風機を増設を期待する方法では、ますますエネルギー使用量を高める方向に行かざるを得ない。カーボンニュートラルを特長とする木質バイオマスの積極的な利用において、二酸化炭素(CO₂)の削減に大きく貢献することは困難となる。

1) 機械システム工学科教授

2) 機械システム工学科学生

このような状況の中で、飼肥スギの生産日本一の宮崎県においては、より効率的に、より低価格な、かつ乾燥ムラの少ない高品質な木材人工乾燥の技術開発が求められている。即ち、乾燥炉内の流動解析の結果を踏まえて、水蒸気の流れを改善し、木材の人工乾燥で消費されるエネルギーの低減を図る技術の開発が急務となっている。

そこで本研究では、省エネルギーの推進やCO₂削減の観点より、宮崎県木材利用技術センターで使用されている木材乾燥炉を対象として、水蒸気の流れを数値解析し、以下の事項を明らかにすることを目的とする。

- (1) 供試木材乾燥炉の内部流れを解析する。
- (2) 整風板が流れに及ぼす影響・効果を解析する。
- (3) 木材積み込み間内の流れの特長を明らかにする。

2. 数値解析手法

2.1 木材乾燥炉

本研究では、宮崎県木材利用技術センターで使用されているMIYAZAKI式全自動木材乾燥装置（九州オリンピック工業株式会社）⁽⁵⁾を対象とした。Fig.1にこの乾燥炉の概略を示す。Fig.1(a)に、乾燥炉の全景と木材の積み込み状態を示す。木材が置かれる炉内部の容量は、およそ13m³である。通常製材所等で使用される容量50m³程度の木材乾燥炉に比較すると、実験的使用を中心とした小型乾燥炉である。MIYAZAKI式と称される乾燥炉の特長は、Fig.1(b)に示される整風板（幅150mm）が炉内長手方向に、かつ炉の上部の左右に設置されていることである。

2.2 数値解析手法と境界条件

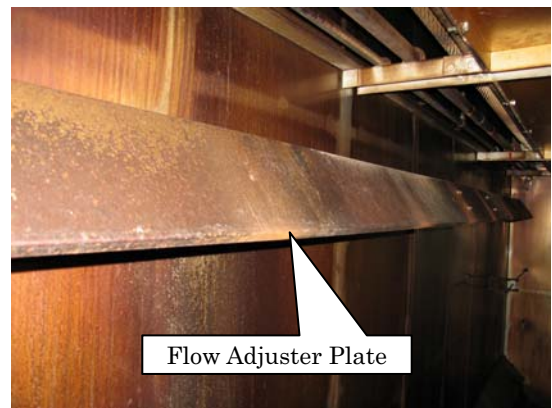
2.2.1 支配方程式 有限体積法による流動解析ソフトウェアは、FLUENT(ANSYS, Inc.)である。

流れ場の支配方程式は、質量保存と運動量保存の方程式であり、乱流モデルは低レイノルズ数の影響も取り入れたRNG $k-\epsilon$ 乱流モデルである。RNG $k-\epsilon$ 乱流モデルでは、有効粘性に対する微分形の式を使用し微分粘性補正オプションがあり、これを選択する。詳細は、FLUENTのユーザーズマニュアルに記載されている⁽⁶⁾。

2.2.2 計算領域と流れ場の設定 作動流体は、120℃の非圧縮性水蒸気である。乾燥炉内に流れを



(a) Overall view



(b) Flow adjuster plate

Fig.1 Steam-heated dry kiln

生じさせるファンの回転は、正逆の反転を繰り返す。しかし、その間隔は約1時間程度と長時間であるので、流れ場は定常流れと仮定する。また、乾燥炉の木材軸方向の大きさは約4mときわめて長いので、流れ場を木材の軸方向に直角断面内の二次元流れとする。

Fig.2に、計算領域の概略を示す。乾燥炉の断面形状は一辺1.8mのほぼ正方形であり、下部の左右にコーナー凸部を有している。計算領域の上部左右にある流入/流出部の幅は150mmである。整風板は、幅150mm、折れ部長さ5mm、 x 軸との角度 θ が60°である。角材は、一辺130mmの正方形の形状で、横に7列、縦に8段積みとなっている。積み込みの間隔は、横の間隔40mm、高さの間隔20mmである。

流入境界から流入する水蒸気の流れ速度 V は、乾燥炉使用時の代表的な流入速度を想定して、 $V = 7.5\text{m/s}$ を基本とする。一方、流出境界の条件としては、圧力を0Pa(基準圧)と設定する。また、乾燥炉内壁、整風板表面および木材表面等の壁面上では、滑りなしの速度条件を課す。

また、本計算では、木材表面からの水分の蒸発

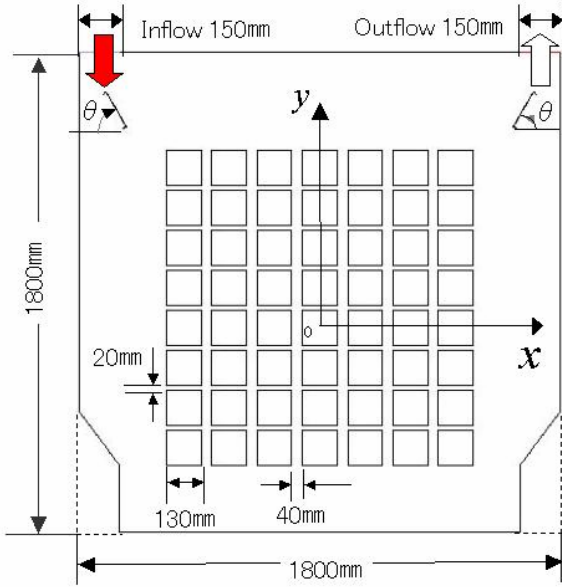


Fig.2 Computational region and coordinates

や熱移動は無視されている。

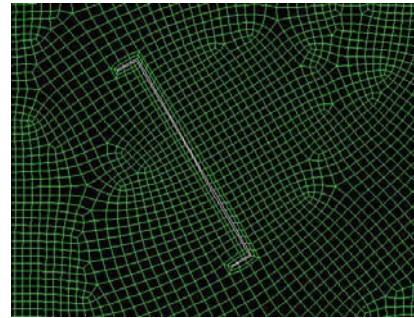
座標系は、炉中央部に座標原点を取り、水平に x 軸、垂直上向きに y 軸を取る。 x 方向の流速 u および y 方向の流速 v は、それぞれ座標軸方向の速度を正とする。

2.3 メッシュ分割

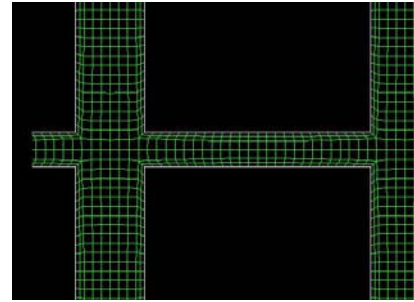
メッシュ形状は、四角形要素が用いられた。壁面から垂直方向の距離 y に関する無次元高さ y^+ を $y^+ = yu_\tau / \nu$ とする。ここで、 u_τ は壁面でのまさつ速度、 ν は水蒸気の動粘性係数である。壁面近傍のメッシュ分割モデルは、 y^+ の大きさに応じて壁面近傍モデルか壁関数モデルを適切な壁面モデルとして選択する改良型壁処理 (EWT)⁽⁶⁾ を使用した。メッシュ分割は、最高要素数12万要素まで種々変更させた予備計算の結果、約9万要素に取られた。この場合、壁面から垂直方向に2メッシュ分の高さを2.5mmとした。この場合の y^+ は約65である。これ以外の領域については、ほぼ5mmサイズのメッシュ分割とした。メッシュ分割の全体表示は、細か過ぎて判別不能であり割愛するが、計算領域の一部として、Fig.3(a)に整風板の近傍の、また、Fig.3(b)に棧積み間隔内流路のメッシュ分割を示す。

3. 計算結果

以下の数値計算結果の表示において、棧積み周囲



(a) Meshes around the adjuster plate



(b) Meshes in the channel between square timbers

Fig.3 Meshes in the dry kiln

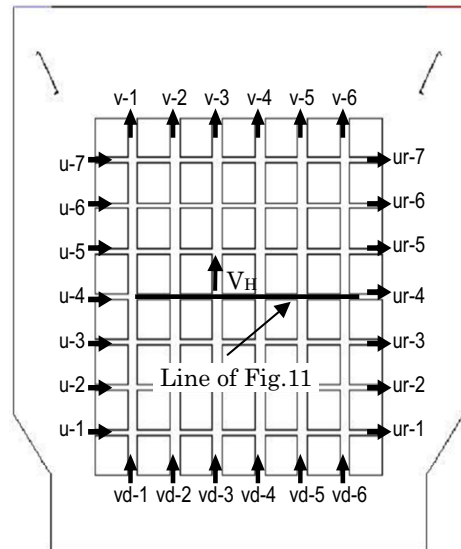
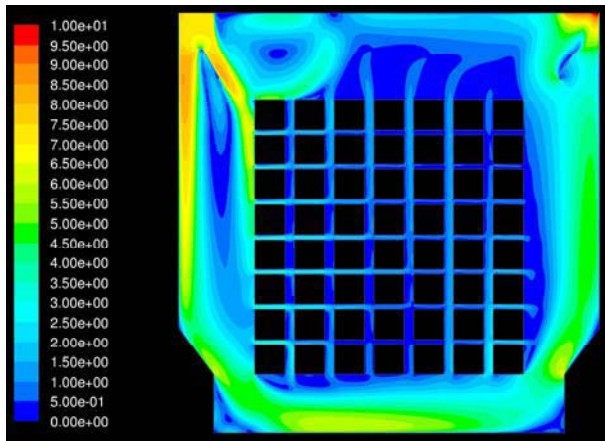


Fig.4 Flow Velocities in the monitoring points for CDF

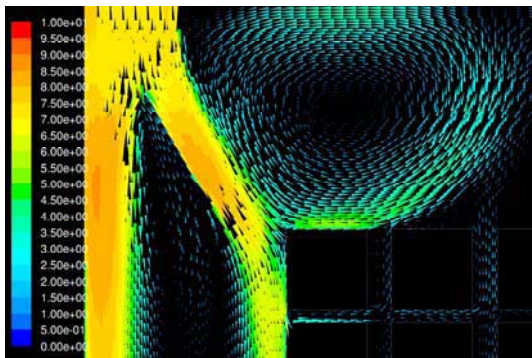
の流れが棧積み間の狭い流路に流入/流出するときの流路間中央の流速をFig.4に示す記号で示す。

3.1 乾燥炉内の流れ

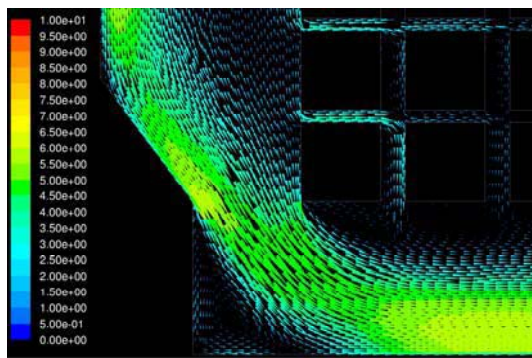
Fig.5(a)に、全体的な乾燥炉内の流速のコンター図を示す。また、Fig.5の(b)に整風板近傍、(c)に乾燥炉左下角近傍、(d)に木材の棧積み中央部近傍の速度ベクトル図を示す。Fig.5(a)より、乾燥炉内の流れは全体としては、棧積み間の流れはきわめて低



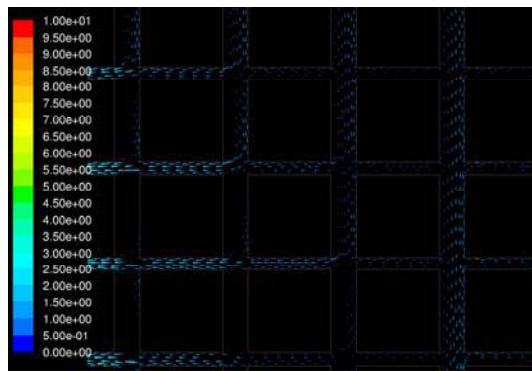
(a) Overall velocity contours



(b) Velocity vectors near the flow adjuster plate



(c) Velocity vectors at the bottom-left corner



(d) Velocity vectors at the center of the kiln

Fig.5 Velocity in the dry kiln for square timbers

速であり、乾燥炉内壁と棧積み間の流路を循環する流れが主流となっている。Fig.5(b)より、整風板で分けられた流れは、一番上に積まれた8段目の木材に衝突し、跳ね上げられる流れと棧積みに沿う下向きの流れに分けられる。跳ね上げられた流れは、渦を巻き整風板に沿う流れを加速する。整風板の下流域には、整風板両サイドからの流れのはく離による渦対とこれによる逆流が生じている。Fig.5(c)の棧積み左下部の木材角部では、流れがはく離し、低压部が形成される。棧積み間流路の下から1段目及び2段目の流れ(u-1,u-2)がこの低压部に引き込まれるように流入する。また、Fig.5(d)より、棧積み中央部の x 正方向の流れは、流速1.5m/s以下で流入し、その後上方向に流れる。

3.2 整風板が炉内流れに及ぼす効果

3.2.1 整風板の角度の影響 整風板の取り付け角度 θ は 60° である。この整風板取り付け角度の流れに及ぼす影響を明らかにするために、整風板の幅の中心点を軸に、 θ を角度 55° から角度 90° まで角度 5° ずつ変化させて、流れ場を解析した。

Fig.6に、取り付け角度 θ により、棧積み間へ流入する x 方向の流れ u の変化を明らかにするために、u-1~u-7 (Fig.4参照)の流速を示す。横軸は θ を、縦軸は流速を示す。また、各折れ線は、凡例のようにu-1~u-7を示す。各測定点の棧積み間流速は、角度の増加により、u-1~u-4の棧積み下部とu-5~u-7の棧積み上部と大きく2つのグループに分けられる。黒つぶしマーカーの実線で示されるu-1~u-4は、角度の増加と共に直線的に速くなる。これは、整風板が垂直に近づくことにより、整風板上部の渦構造 (Fig.5(b)) が弱まり、炉内を循環する流量が増加するためである。一方、 70° を越えて θ が大きくなると、整風板右側の流れがより下向きになり、棧積み間に入りにくくなる。このため、白抜きマーカーの破線で示されるu-5~u-7は、減少する。また、各測定点での棧積み流入速度の差が少なく、より一様に流入する観点からは、対象とする乾燥炉では θ が約 70° に設定することが望ましい。

Fig.7には、流入速度 $V=7.5\text{m/s}$ 、 $\theta=70^\circ$ の場合の炉内流れの速度コンター図を示す。Fig.5(a)と比較すると、整風板上に形成された渦構造が消滅し、整風板下流域での下向き速度が強まっている。

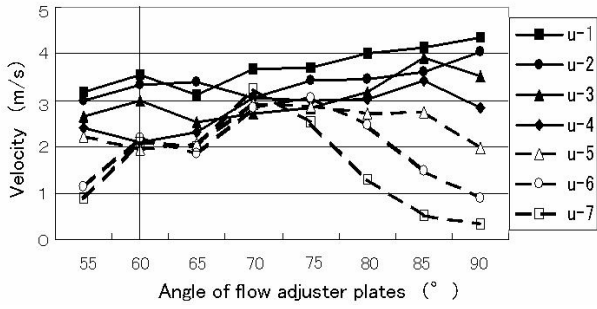


Fig.6 Effects of angles of the plate on velocities at the channels between timbers

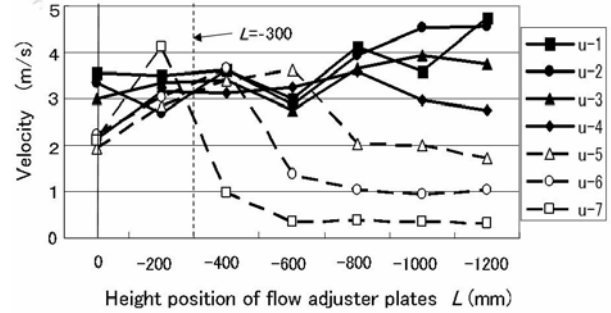


Fig.8 Effects of the height position of the plate on velocities at the channels

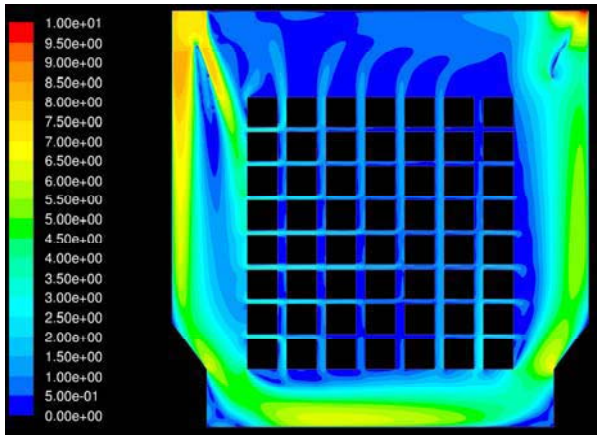


Fig.7 Velocity contours at $\theta = 70^\circ$

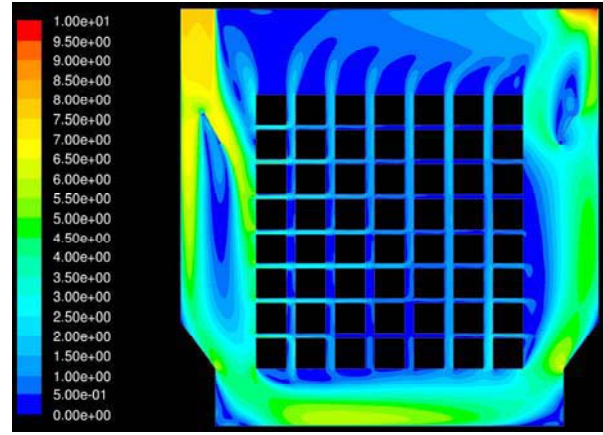


Fig.9 Velocity contours at $L = -300\text{mm}$

3.2.2 整風板の高さ位置の影響 整風板の取付け角度 θ を 60° と固定し、整風板の取付け高さが乾燥炉内の流れに及ぼす影響を解した。即ち、現状の高さを基準 0mm とし、 L はこの位置から整風板を下方向に移動させた距離として定義される。具体的には、 200mm ずつ下方向 (-200mm と表記) に 1200mm まで変化させた。Fig.8の横軸には L をとり、縦軸にはFig.6と同様に棧積み間流入速度 $u-1 \sim u-7$ を示す。この結果は、棧積み上部の速度 (白抜きマーカーの破線) と下部の速度 (黒つぶしマーカーの実線) の2グループの傾向を持つことを示している。整風板の高さ位置は、特に棧積み上部の流れに大きな影響を及ぼしている。Fig.8より、整風板の位置を現在の位置より 300mm 下げた場合に ($L = -300\text{mm}$)、 $u-1 \sim u-7$ の速度の差が少なく、ほぼ一様に棧積み間に流入することが示された。Fig.9に、整風板高さ位置が $L = -300\text{mm}$ の場合の炉内速度コンター図を示す。Fig.5(a)と比較すると、Fig.7と同様に整風板上部の渦構造は消滅し、水蒸気は棧積み流路内をスムーズに流れている。

3.3 制御板が乾燥炉内の流れに及ぼす効果

乾燥炉内の循環流を弱め、棧積み間に流れを誘導して、棧積み中央部での流れを促進するために、乾燥炉の底部に山型二等辺三角形の流れの制御板を二つ設置した。その位置は、炉内に木材を入れる台車のレールの内側である。流れの制御板形状は、高さ 50mm 、底辺幅 200mm である。Fig.10は、乾燥炉内の速度ベクトルのコンター図である。Fig.5(a)と比較すると、棧積み中央部での速度が増加している。また、Fig.11(a)(b)に、棧積み間流路の下から4段目高さ (Fig.4の中央部に引かれた水平な直線) に沿う上方向速度 V_H の分布に対して、流れの制御板が及ぼす影響を示す。ただし、水蒸気の流入速度 V は、 7.5m/s である。Fig.11(a)は、上方向 (y 方向) 速度 V_H の x 方向 (横方向) の分布を●で示す。ただし、大きな■は角材を示す。 V_H は、木材の高さ間隔間の流路ではほぼ0であり、横間隔間の流路内では流速は早くなる。この速くなる流速を○で示し、 x 方向に左から1から6までの番号を付け、実線で○を結ぶことにする。Fig.11(b)は、このようにして結ばれた実線を示す。ただし、制御板のない場合を●の実線で、制御板の設置された場合を○の実線で示す。制御板の設置により、 V_H は約2倍の流速と

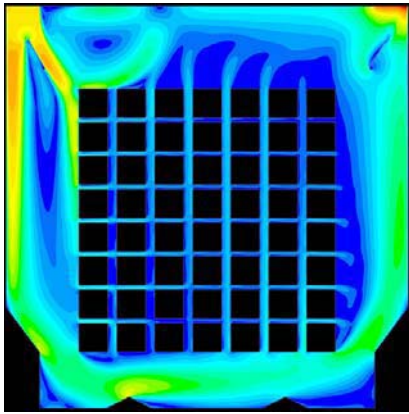
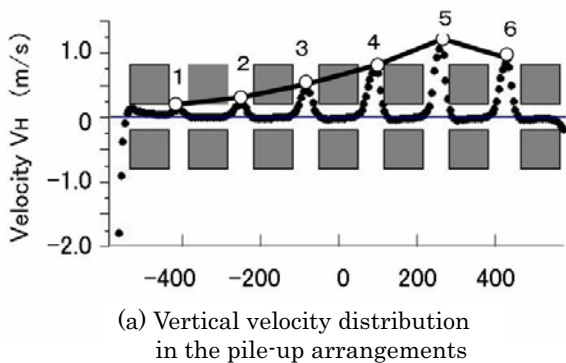


Fig.10 Velocity contours with flow control plates



(a) Vertical velocity distribution in the pile-up arrangements

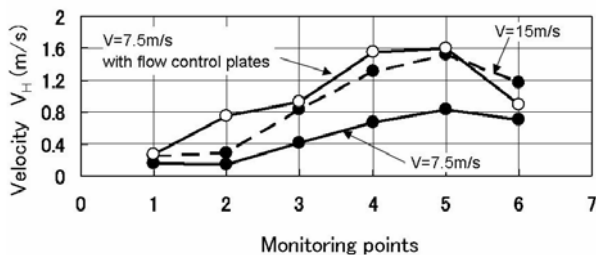


Fig.11 Effects of flow control plates on velocities in the pile-up arrangements

なっている. この増加した速度分布は, 制御板がない状態での流入速度 V を 2 倍の 15.0m/s とした場合の棧積み中央部の速度分布とほぼ同じである. 特に, 測定点の番号 2 での速度の増加は顕著である. 従って, 今回試みた流れの制御板は流入速度を 2 倍にする効果と同程度であることが明らかにされた.

4. まとめ

本研究では, FLUENTにより木材乾燥炉内の水

蒸気の流れについて数値解析を行い, 炉内の流動状況の詳細なデータを得ることができた. その主な結果を以下に示す.

- (1) Miyazaki式乾燥炉の特徴である整風板の効果を確認した. 現状の乾燥炉では, 棧積み間の狭い流路に流入/流出する速度は, 一様ではないことが示された.
- (2) 整風板の取付け角度及び高さ位置を変化させた場合についても数値計算が行われた. その結果, 棧積み間への流入速度がより一様になるためには, 整風板の角度を現状より約 10° 急傾斜にして 70° に設定し, 整風板高さも現状よりも約 300mm 低い位置に移動することが望ましい.
- (3) 棧積み間の中央部における流速を増加させるために, 炉底面に山型の流れの制御板を設置した. この制御板の効果として, 棧積み中央部の流路内流速はほぼ 2 倍となることが示された. この効果は, 炉内への流入流速を 2 倍にする場合とほぼ同程度である.

参考文献

- (1) 寺澤 眞, 木材乾燥のすべて, 海青社.
- (2) 信田聡, 木材乾燥室の自動制御システム, <http://www.fpri.asahikawa.hokkaido.jp/rsdayo/22119059001.pdf>
- (3) 藤本英人, 小田久人, スギ材の蒸気加熱式乾燥に要する燃料消費量, 都市エリア産学官連携促進事業【都城盆地エリア】バイオマスの高度徹底活用による環境調和型産業の創出第 1 年度成果報告書, 宮崎県産業支援財団, 2005.
- (4) 二俣正美, 他, 平成13年度地域コンソーシアム研究開発事業地域新技術創出研究開発『機能性皮膜応用の複合型木材乾燥機の開発』成果報告書, 新エネルギー・産業技術総合開発機構, 2002.
- (5) カタログ, MIYAZAKI式全自動木材乾燥装置 (型式: MHB-5MR), 九州オリンピア工業.
- (6) FLUENT6.1 User's Guide, Fluent Asia Pacific, 2003.