

PIV法を用いた空気の流れ解析に関する研究

奥 雅貴*, 南 晃**

Research on Air Flow Analysis by the PIV Method

Masataka OKU and Akira MINAMI

空気の流れを可視化する手法の一つとしてPIV法（Particle Image velocimetry, 粒子画像流速測定法）が挙げられ、多点の空気の流れを同時かつ非接触で調べることができるというメリットがある。本手法の解析精度に影響を与えるパラメータとして、1フレームあたりの画素移動量、検査領域、探査領域が挙げられる。これらのパラメータの適正範囲（実際の風速に近い解析値が得られる範囲）は実施環境に影響するものと考えられる。このため、当センターでPIV法を活用するためには適正範囲の検証が必要である。本研究では県内企業からあった要望の一つである木材乾燥を想定したモデル装置を解析対象とし、パラメータの適正範囲を示した。

Keyword : PIV法, 画素移動量, 検査領域, 探査領域

1. 諸 言

空気の流れを可視化する手法の一つにPIV法（Particle Image velocimetry, 粒子画像流速測定法）が挙げられる。PIV法とは、高速度カメラを用いて流体中の粒子を撮影し得られた画像から流体の速さや向きを調べる手法であり、多点の流体の挙動を同時かつ非接触で調べられるという利点がある^{1)~3)}。この手法は流れが関与する工学、理学、医学から社会科学関連の行動分析などまで幅広い分野で活用されており、事例として血管内の血流⁴⁾、回路基板の放熱対策⁵⁾、エンジン筒内の流動⁶⁾などが挙げられる。

県内企業からは飛沫防止材の効果検証や、室内、木材乾燥庫内などの空気流れに関する可視化・検証を行いたいという要望があり、これらに応えるために当センターでもPIV法に関する設備を導入した。PIV法による解析の精度に大きく影響を与えるパラメータとして、1フレームあたりの画素移動量、検査領域、探査領域（これらの定義は後述）が挙げられる。空気の流れを撮影する際に、1フレームあたりの画素移動量の適正範囲（実際の風速に近い解析値が得られる範囲）を把握する必要があるが、文献⁷⁾では5~10pixel程度に設定するのが望ましいとされている。一方で、文献⁸⁾では測定風速と撮影範囲を考慮に入っていない方法により概ね10~20pixel程度が適切であると記述されている。検査領域について、文献⁹⁾では32pixelを適正值として測定した事例があるが、文献¹⁰⁾では13~23pixel程度が適切であるとされている。探査領域について、1フレームあたりの画素移動量より十分に大きなピクセル数に設定するのが望ましいとされているが¹¹⁾、具体的な値につい

て記されていない。これらパラメータの適正範囲は使用する機器やトレーサーなどの実施環境に影響するものと考えられる。

以上より、当センターでPIV法を様々な事例で活用するためには、各パラメータにおける適正範囲の検証が必要となる。本研究では県内企業からあった要望の一つである木材乾燥を想定したモデル装置を解析対象とし、各パラメータの適正範囲について検証した結果を報告する。

2. 解析方法

本研究では、PIV法を用いて空気の流れを調べた。解析はレーザー光源（KLD-V, カトウ光研(株)）、高速度カメラ（K6, カトウ光研(株)）、煙発生装置（PS-2006, ダイニチ工業(株)）、実際の風速の測定は多点風速計（System 6243 Model 1560, 日本カノマックス(株)）と風速センサー（MODEL 0965-01）、解析ソフト（Flow Expert2D2C）を用いた。使用装置のセットアップの写真を図1に、撮影の模式図を図2に示す。図1の装置は木材乾燥を想定した簡易モデルである。ファンからの空気を、乾燥対象の木材へ送り込む熱風に見立てている。空気の流れを捉えやすくするために、ノズルを介してトレーサー（煙）を撮影対象である管の入口へ注入しレーザー光で煙を照射した。管の内部に散布されたトレーサーを高速度カメラで撮影し、解析ソフト上で風速を算出した。

撮影対象の管路を図3に示す。空気の乱れを低減するために管の入口に整流板を設けた。解析対象の領域と実際の風速の測定箇所については、予備試験より比較的空気が乱れにくいところを選択した。

*企画支援部

**生産技術部

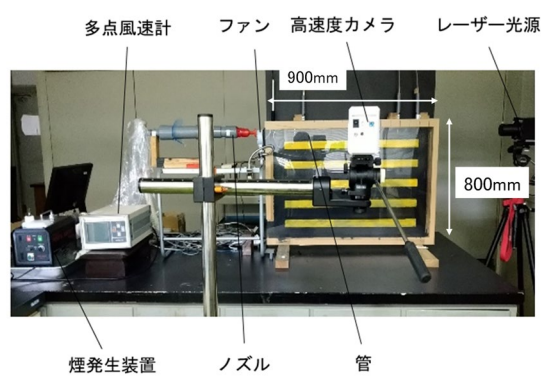


図 1 使用装置のセットアップ

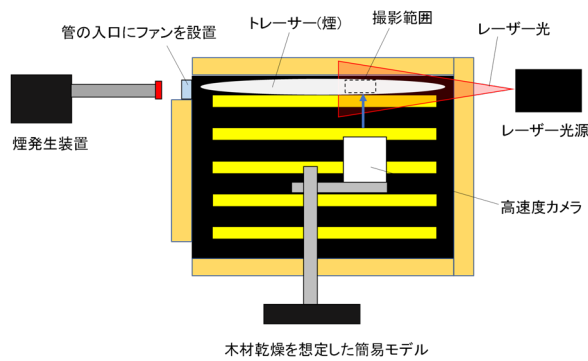


図 2 撮影の模式図

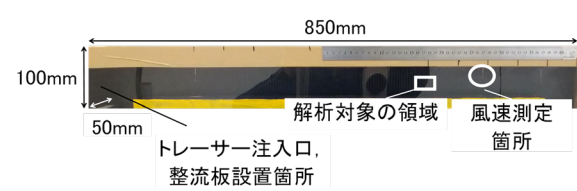
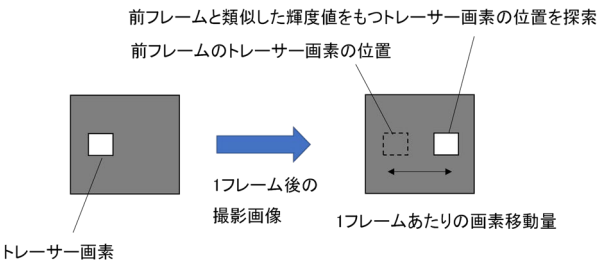


図 3 撮影対象の管路

2. 1 1フレームあたりの画素移動量

1フレームあたりの画素移動量の概略図を図4に、実施条件を表1に示す。1フレームあたりの画素移動量は、トレーサー画素の1フレームあたりの変位を指しており、撮影速度、撮影範囲、横ピクセル数、測定風速で決定されるパラメータである。本研究ではこの1フレームあたりの画素移動量の適正範囲を、解析で得た風速と測定風速の比較によって確認した。測定風速とは、多点風速計から検出した値を平均化したものである。本研究ではPIV法の一つである直接相互相関法を用いて解析を行った。直接相互相関法とは、前後のフレームに映されたトレーサーの輝度値の相互関係から流れの速さや向きを求める手法であり、査領域を自由に設定できるという特徴がある。



1フレームあたりの画素移動量(pixel/frame)

$$= \frac{\text{横ピクセル数(pixel)} \times \text{測定風速(mm/s)}}{\text{撮影速度(fps)} \times \text{測定範囲(mm)}}$$

図 4 1フレームあたりの画素移動量の概略図

表 1 実施条件

測定風速	1880, 2270, 2530mm/s
横ピクセル数	640pixel
撮影範囲	250mm×250mm
撮影速度	200～2000pixel
検査領域	32pixel
探査領域	10pixel

2. 2 検査領域

検査領域の概略図を図5に示す。高速度カメラで撮影した画像データを解析ソフトへ出力した後、解析ソフト上で画像処理を行う。処理の過程で撮影画像を複数の小さな領域に区分する。この小さな領域を検査領域と呼ぶ。検査領域内の類似した輝度値をもつトレーサーの位置を探索することにより、トレーサーの変位が求まり風速が得られる。本研究ではこの検査領域の適正範囲を確認するために、検査領域と解析で得た風速の関係を調べた。実施条件について、測定風速、横ピクセル数、撮影範囲、探査領域は2. 1と同様で、撮影速度は2. 1で得た結果をもとに決定した。

2. 3 探査領域

探査領域の概略図を図6に示す。解析上で風速を算出するには、前後のフレームから検査領域内の類似した輝度値をもつトレーサーを探索する必要がある。トレーサーの位置を探索するために設けられる領域を探査領域と呼ぶ。本研究ではこの探査領域ΔNの適正範囲を確認するために探査領域と解析で得た風速の関係を調べた。実施条件では測定風速、測定風速、横ピクセル数、撮影範囲は2. 1と同様で、撮影速度は2. 1での実験結果、検査領域は2. 1での実験結果をもとに決定した。

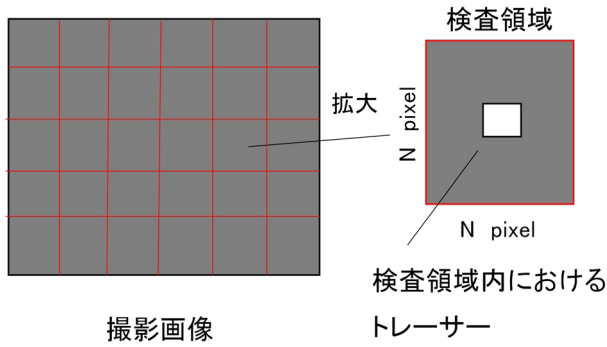


図5 検査領域の概略図

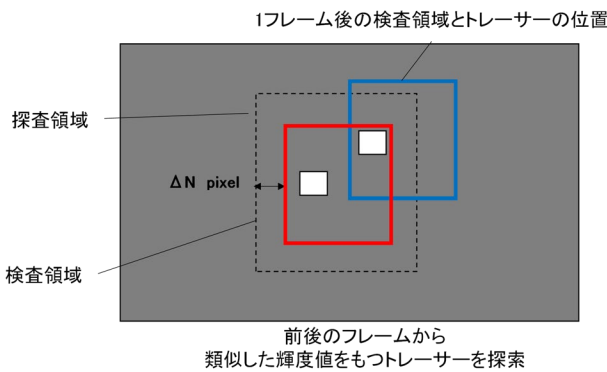


図6 探索領域の概略図

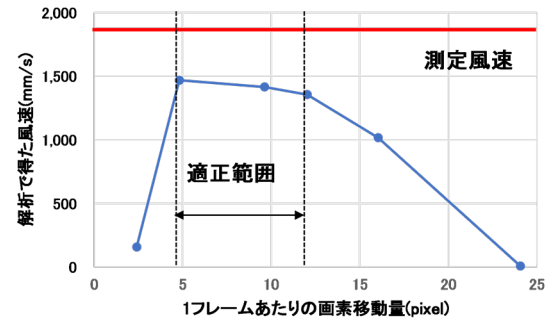
3. 解析結果

3. 1 1フレームあたりの画素移動量

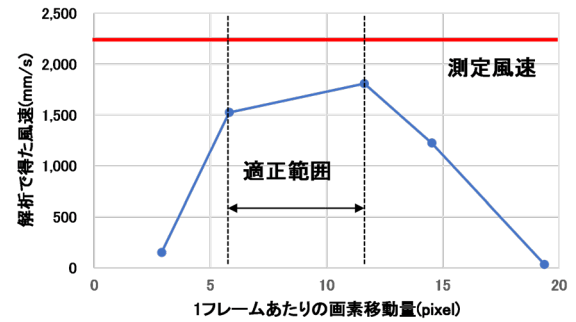
1フレームあたりの画素移動量と解析で得た風速の関係を図7に示す。解析対象の領域内（図3）におけるデータの平均値をプロットしている。全体的には約5～12pixelで測定風速に近い値が得られた。この範囲でも測定結果と解析結果に隔たりが生じる原因として、散布するトレーサーの量、高速度カメラの絞り量など撮影者の感覚に依存する要素が影響していると推測された。移動量が約5pixel以下および約12pixel以上の範囲では、測定風速と解析上での風速との差が大きくなる傾向にあることが分かった。約5～12pixelではそれ以外の範囲（約5pixel未満、約12pixel超え）と比べて、1フレームあたりの画素移動量の大きさが解析結果に与える影響が小さく、変動幅は100～300mm/s程度となっている。これらより5～12pixelを適正範囲とした。

測定風速に対する解析で得た風速の相対誤差を表2に示す。文献¹⁰⁾では全体的に相対誤差5～15%程度であったことに対し、本研究では15～30%程度となった。

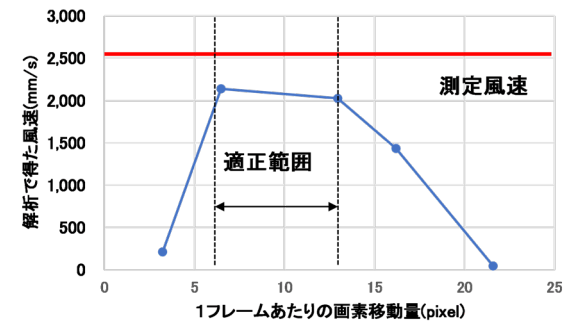
1フレームあたりの画素移動量ごとの速度分布図を図8に示す。(a)は適正範囲内、(b)は適正範囲外での速度分布図である。各部の空気の流れをベクトルで表現した図



(a) 測定風速1880 mm/s



(b) 測定風速2270 mm/s

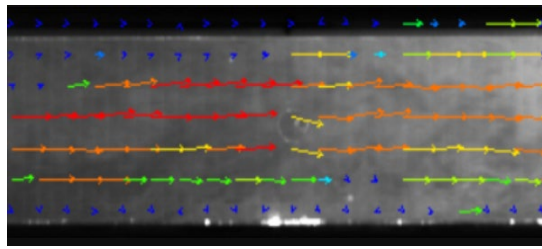


(c) 測定風速2530 mm/s

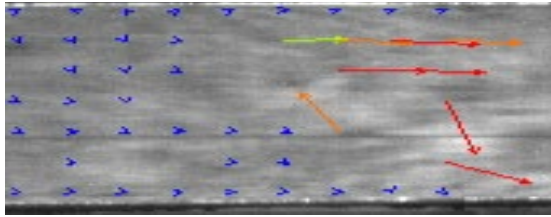
図7 1フレームあたりの画素移動量と解析で得た風速の関係

表2 条件ごとの測定結果に対する解析結果の相対誤差

測定風速 (mm/s)	撮影速度 (fps)	1フレーム あたりの 画素移動量 (pixel)	相対誤差 (%)
1880	1000	4.8	21.9
	500	9.6	24.7
	400	12.0	27.9
2270	1000	5.8	32.9
	500	11.6	20.4
2530	1000	6.5	15.5
	500	13.0	20.0



(a) 9.6pixel



(b) 23.9pixel

図8 1フレームあたりの画素移動量ごとの速度分布図
(測定風速 1880mm/s)

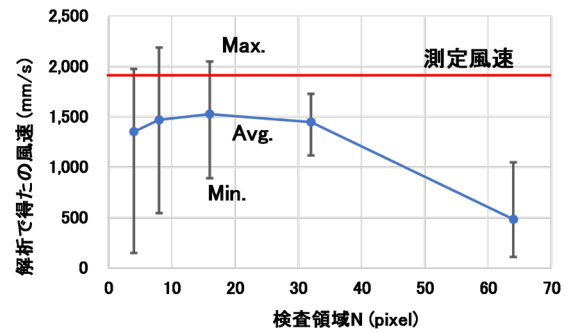
であり、ベクトルは速度に応じて色分けされている。暖色系は速度が速く、寒色系は速度が遅いことを示す。解析領域内において、(a)は(b)と比べてベクトルデータの欠落が少なく、広い範囲で風速ベクトルが出力されていることが確認できた。

3. 2 検査領域

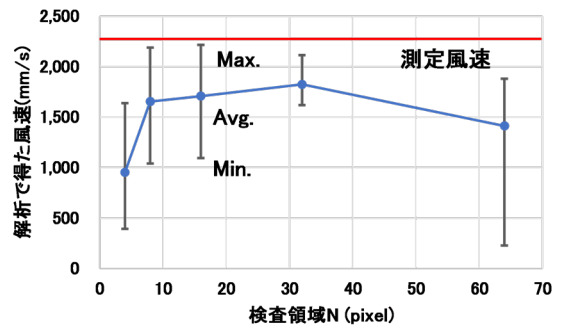
検査領域Nと解析で得た風速の関係を図9に示す。解析対象の領域内(図3)での平均値(Avg.)・最大値(Max.)・最小値(Min.)をプロットしている。図7と表1より撮影速度を500fpsにし、測定風速が1880, 2270, 2530mm/sに対し1フレームあたりの画素移動量はそれぞれ8.0, 9.7, 10.8pixel(図4の式を参照)である。全体的に検査領域Nが8~32pixelの範囲で測定風速に近い平均値が得られる傾向にあることが分かった。3.1と同様に、この範囲でも測定結果と解析結果の隔たりが生じる原因として、散布するトレーサーの量、高速度カメラの絞り量など撮影者の感覚に依存する要素が影響していると推測された。

表3に示すように、測定風速に対する解析で得た風速の相対誤差は20~25%程度となった。

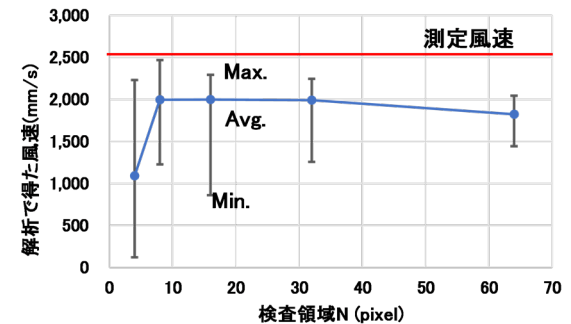
検査領域ごとの速度分布図を図10に示す。(b)は適正範囲内、(a)・(c)は適正範囲外での速度分布図である。(b)は(a)・(c)に対しベクトルデータの欠落が少なく、比較的広い範囲で風速ベクトルが出力されていることが確認できた。



(a) 測定風速1880mm/s



(b) 測定風速2270mm/s

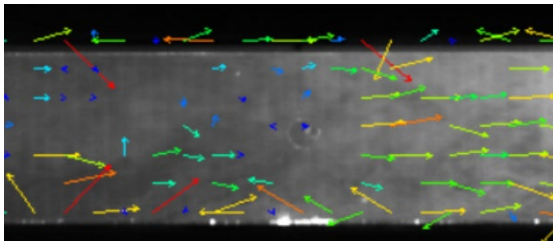


(c) 測定風速2530mm/s

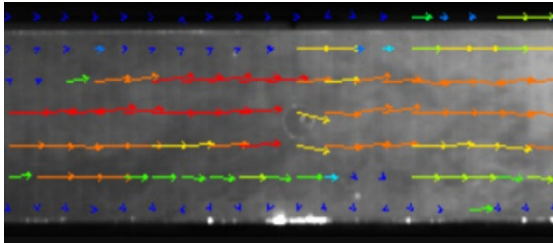
図9 検査領域Nと解析で得た風速の関係

表3 条件ごとの測定結果に対する解析結果の相対誤差

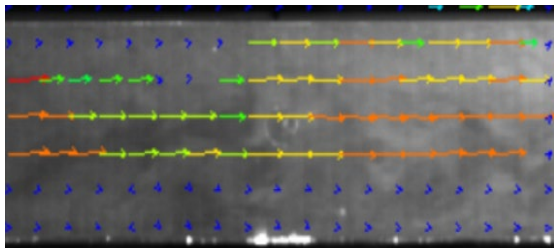
測定風速 (mm/s)	検査領域 (pixel)	相対誤差 (%)
1880	8	21.8
	16	18.8
	32	23.0
2270	8	27.1
	16	24.8
	32	19.7
2530	8	21.1
	16	21.0
	32	21.2



(a) 検査領域 4pixel 探索領域 10pixel



(b) 検査領域 32pixel 探索領域 10pixel



(c) 検査領域 64pixel 探索領域 10pixel

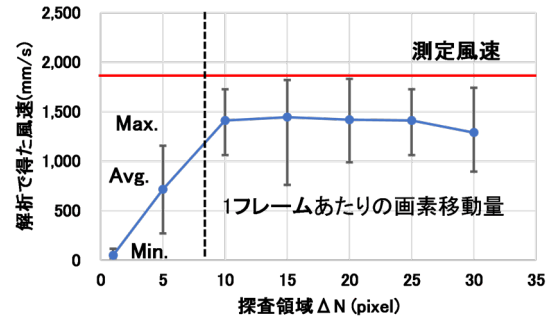
図10 検査領域ごとの速度分布図
(測定風速 1880mm/s)

3.3 探索領域

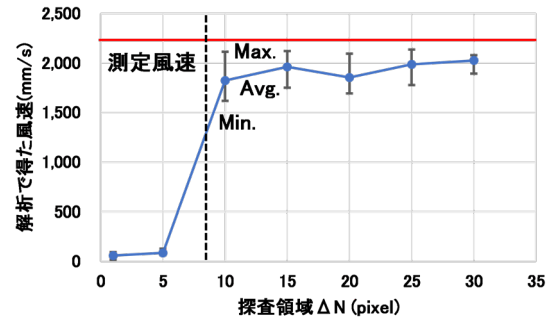
探索領域 ΔN と解析で得た風速の関係を図11に示す。解析対象の領域内での平均値(Avg.)・風速の最大値(Max.)・最小値(Min.)をプロットしている。撮影速度は3.2と同様で500fps, 検査領域Nは8~32pixelの範囲のうち, 風速のばらつきが比較的小さいという理由で32pixelとした。 $\Delta N \geq 10\text{pixel}$ のとき測定風速に近い平均値が得られ, 反対に $\Delta N < 10\text{pixel}$ では解析精度が下がることが分かった。先述のように文献⁷⁾では探索領域を1フレームあたりの画素移動量より十分大きくするのが望ましいとされている。結果より少なくとも15pixel以上の探索領域を確保できれば十分であることから, 今回の事例では探索領域を1フレームあたりの画素移動量より約1.5~2.0倍以上大きくするのが適切であると判断した。

検査領域ごとの速度分布図を図12に示す。(a)は適正範囲外, (b)は適正範囲内での速度分布図である。(a)のように探索領域が狭いとベクトルデータの欠落が顕著になっていることが確認できた。

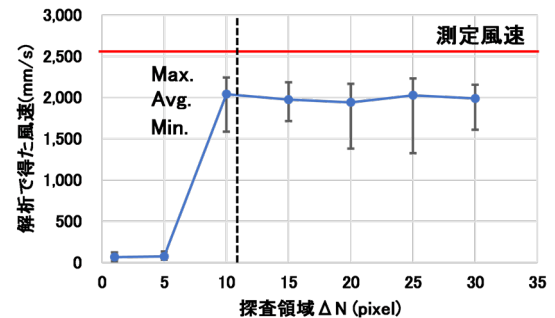
表4に示すように, 測定風速に対する解析で得た風速の相対誤差は10~30%程度となった。



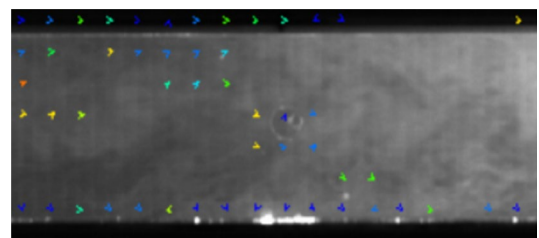
(a) 測定風速1880mm/s



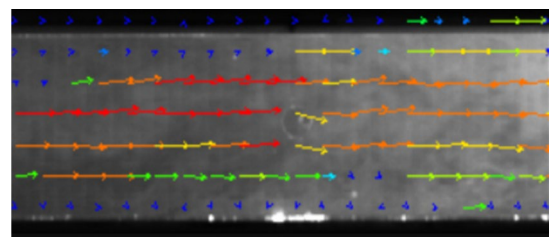
(b) 測定風速2270mm/s



(c) 測定風速2530mm/s

図11 探索領域 ΔN と解析で得た風速の関係

(a) 探索領域 1pixel 検査領域 32pixel



(b) 探索領域 10pixel 検査領域 32pixel

図12 探索領域ごとの速度分布図
(測定風速 1880mm/s)

表4 条件ごとの測定結果に対する解析結果の相対誤差

測定風速(mm/s)	探査領域 (pixel)	相対誤差(%)
1880	10	24.9
	15	23.1
	20	24.5
	25	24.9
	30	31.4
2270	10	19.7
	15	13.6
	20	18.3
	25	12.5
	30	10.7
2530	10	19.3
	15	21.9
	20	23.2
	25	19.9
	30	21.3

4. 結 言

本研究では、木材乾燥庫を想定したモデル装置を対象に、PIV法における解析精度に影響を与えるパラメータである1フレームあたりの画素移動量、検査領域、探査領域の適正範囲を確認し、その結果以下のことがわかった。

- 1) 1フレームあたりの画素移動量は約5～12pixel、検査領域は8～32pixel、探査領域は1フレームあたりの画素移動量の約1.5～2.0倍以上に設定するのが適切である。
- 2) 1)で示した範囲から外れると、解析精度の低下や速度分布図のベクトルデータ欠落の増大を招き、空気の流れの検証に悪影響を与える。特に1フレームあたりの画素移動量約5pixel以下あるいは約20pixel以上、探

査領域5pixel以下に設定した場合、測定した風速と解析で得られる風速との隔たりがより顕著になる。

今後の課題として、以下のことが挙げられる。本研究では取り上げられていない要素が解析精度に与える影響を検証し解析精度を向上する。これらの要素として散布するトレーサーの量、高速度カメラの絞り量などが挙げられる。加えて、今回の木材乾燥庫以外の事例に対しても当センターでPIV法を活用する。

参 考 文 献

- 1) 一般社団法人 可視化情報学会：“PIVハンドブック（第2版）”，森北出版（2018）p.5
- 2) PIV 粒子画像流速測定法
https://www.japanlaser.co.jp/technology/beamtech_piv/
- 3) PIVとは 計測の原理やメリット・トレーサー粒子について解説 <https://www.kk-co.jp/visible/piv/>
- 4) 一般社団法人 可視化情報学会：“PIVハンドブック（第2版）”，森北出版（2018）p.414-415
- 5) 笈田健次ら：可視化情報学会誌，**25**，2，p.329-330（2005）
- 6) 横森剛ら：計測と制御 特集，**57**，5，p.313-317（2018）
- 7) 一般社団法人 可視化情報学会：“PIVハンドブック（第2版）”，森北出版（2018）p.118-119
- 8) 大川原真一：日本バイオレオロジー学会誌，**12**，3，p.1-9（1998）
- 9) 一般社団法人 可視化情報学会：“PIVハンドブック（第2版）”，森北出版（2018）pp.108-109
- 10) 小林敏雄ら：生産研究 研究速報，**51**，4，p.173-176（1999）
- 11) 一般社団法人 可視化情報学会：“PIVハンドブック（第2版）”，森北出版（2018）p.154