

筑波大学大学院博士課程

システム情報工学研究科修士論文

HPFRCC における繊維の配向性に関する  
解析的研究

万 子銘

修士（工学）

（構造エネルギー工学専攻）

指導教員 金久保 利之

2016年 3月

# HPFRCCにおける繊維の配向性に関する解析的研究

## 論文概要

高性能繊維補強セメント複合材料（以下 HPFRCC）とは、モルタルマトリックス内に短繊維を混入した材料であり、引張応力作用下において繊維がひび割れ面を架橋し、複数の微細なひび割れを発生させながら耐力が上昇する「擬似歪硬化性状」といった特長を有する、靱性が普通モルタル材料に比べて格段に優れているセメント系複合材料である。

HPFRCC の特性を十分に発揮させるためには、擬似歪硬化性状の特性を解明することが重要である。その性状はひび割れ面に架橋する繊維の配向性および繊維とモルタルマトリックスの間の付着性能に強く依存することが知られている。繊維がランダムに配向している場合は、HPFRCC の特性は等方的となり、繊維が特定の方向に配向している場合は、その方向に性能を有する材料になることが指摘されている。

本研究では、HPFRCC における繊維配向性の把握を目的として、型枠のサイズ、打込み時間などをパラメータとし、計算機による繊維の配向挙動の解析を行う。試験体の形状が繊維配向性に与える影響、および打込み速度の差異による流体速度差と繊維配向角の関係を検討する。

本論文は、全 5 章から構成される。各章の概要は以下の通りである。

第 1 章では、本研究の背景について整理し、目的を明確にした。

第 2 章では、解析の方法、マトリックスの粘性の設定および繊維配向角の計算方法を説明した。

第 3 章では、試験体のサイズ、形状および打設方向が繊維配向性に与える影響を検討することを目的とした。引張試験体および曲げ試験体（大、小）に対して、打設方向（縦打ち、横打ち）を検討因子とし、流動解析を行った。繊維配向を既往の研究による配向強度と主配向角により評価し、解析結果を既往研究の可視化実験で得られた実験結果と比較した。

解析結果より、各試験体において、横打ちの方が縦打ちに比べてより流動方向に対して強く配向し、特に引張試験体において、横打ちと縦打ちの配向強度の違いが顕著であった。解析における横打ちの配向強度は、水ガラスによる可視化実験の結果より 2 倍以上大きく、縦打ちの場合は実験結果より小さくなっている。

第 4 章では、曲げ試験体および引張試験体を対象として、打込み時間を因子とした解析を行い、流体速度差と繊維配向角の関係を検討した。

解析結果より、曲げ試験体では、計算メッシュの流体速度の大きさの差  $\Delta v$  が大きくなるほどすなわち打込み時間が短くなるほど、平均流動方向  $\theta_v$  と繊維配向角  $\theta_f$  との差である  $|\theta_f - \theta_v|$  の値が小さくなり、流動方向に沿う繊維の配向性が強まる傾向があった。引張試験体では、最大でも  $|\theta_f - \theta_v|$  の値は  $20 \sim 30^\circ$  であり、試験体の形状の違いにより、繊維の配向性が影響を受けると考えられる。

第 5 章では、本論文の結論について述べた。

# HPFRCCにおける繊維の配向性に関する解析的研究

## 目次

第1章 序論	1
第2章 解析方法	3
2.1 流動解析の方法	3
2.2 マトリックスの粘性の設定	6
2.3 繊維配向角の計算	7
第3章 試験体の形状が繊維配向性に与える影響	8
3.1 はじめに	8
3.2 解析対象試験体	9
3.3 解析条件	10
3.4 繊維配向角の評価方法	11
3.5 解析結果	13
3.6 まとめ	24
第4章 打込み速度が繊維配向性に与える影響	25
4.1 はじめに	25
4.2 解析対象試験体	26
4.3 解析条件	27
4.4 流体速度と繊維配向角の評価方法	28
4.5 解析結果	30
4.6 まとめ	45
第5章 結論	46
謝辞	47
参考文献	48

# 第1章 序論

コンクリートは引張強度が圧縮強度に対して極めて小さく、韌性に乏しい脆性的な性状を示す材料である。繊維補強セメント複合材料 FRCC (Fiber-Reinforced Cementitious Composites) は、コンクリートの引張に対する脆性的な破壊を改善するために、モルタルに十数ミリ程度の短繊維を混入した材料である。FRCC は曲げ、引張および圧縮破壊時の韌性が大幅に向上した材料である。

高性能繊維補強セメント複合材料 HPRCC (High Performance Fiber-Reinforced Cementitious Composites) は、FRCC のうち、初期ひび割れ発生以降、繊維の架橋効果によりひび割れが局所化せず複数ひび割れが生じ、数%の歪に至るまでひび割れ間の架橋応力によって引張応力を保つという「擬似歪硬化性状」を示す材料である。図 1-1 に示すように、一軸引張応力下において高密度の複数ひび割れが発生し、初期ひび割れ以降に応力が上昇する歪硬化性状を示す。

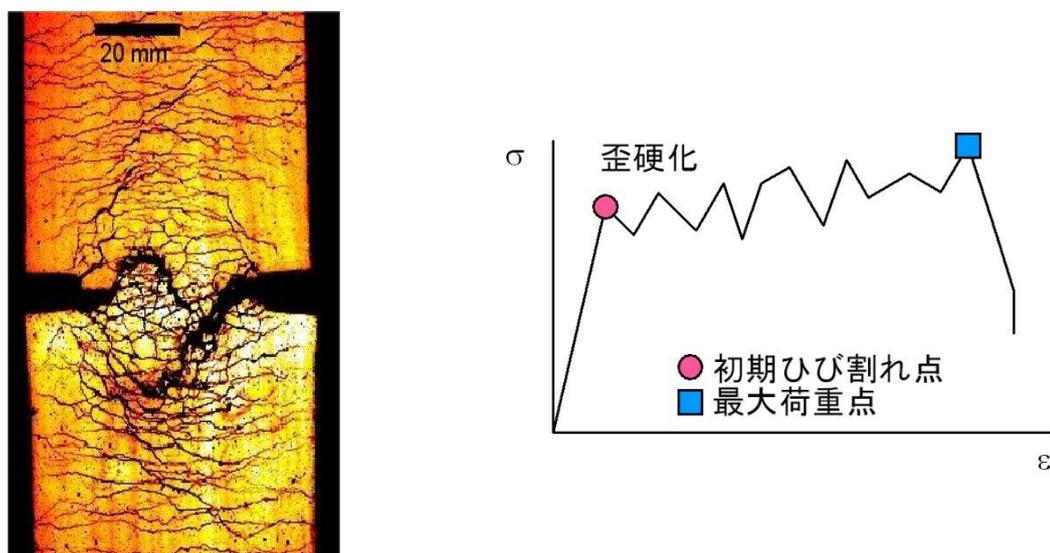


図 1-1 複数ひび割れ性状および歪硬化性状<sup>1)</sup>

HPRCC を構造部材に適用した場合、ひび割れ抑制や引張韌性といった特長を活かすことで、高耐久な部材を実現することが可能となる。例えば、トンネルや橋梁などの建造物の表面に HPRCC を施工し、剥落防止やひび割れの発生を抑制し、建造物の耐久性を向上させることを目的とした適用例がある<sup>2)</sup>。また、高い変形能力を与えて高性能耐震部材とし、図 1-2 に示す RC 建造物のコア壁とコア壁を連結する梁（境界梁）に適用された例もある<sup>3)</sup>。

HPRCC の構造物への利用を考える上で、HPRCC の擬似歪硬化性状の特性を解明することが重要である。その性状はひび割れ面に架橋する繊維の配向性および繊維とモルタルマトリックスの間の付着性能に強く依存することが知られている。繊維がランダムに配向している場合は、セメント複合材料の特性は等方的となり、繊維が特定の方向に配向している場合は、その方向に性能を有する材料になることが指摘されている。繊維の配向挙動に関する知見の蓄積が必要と考える。

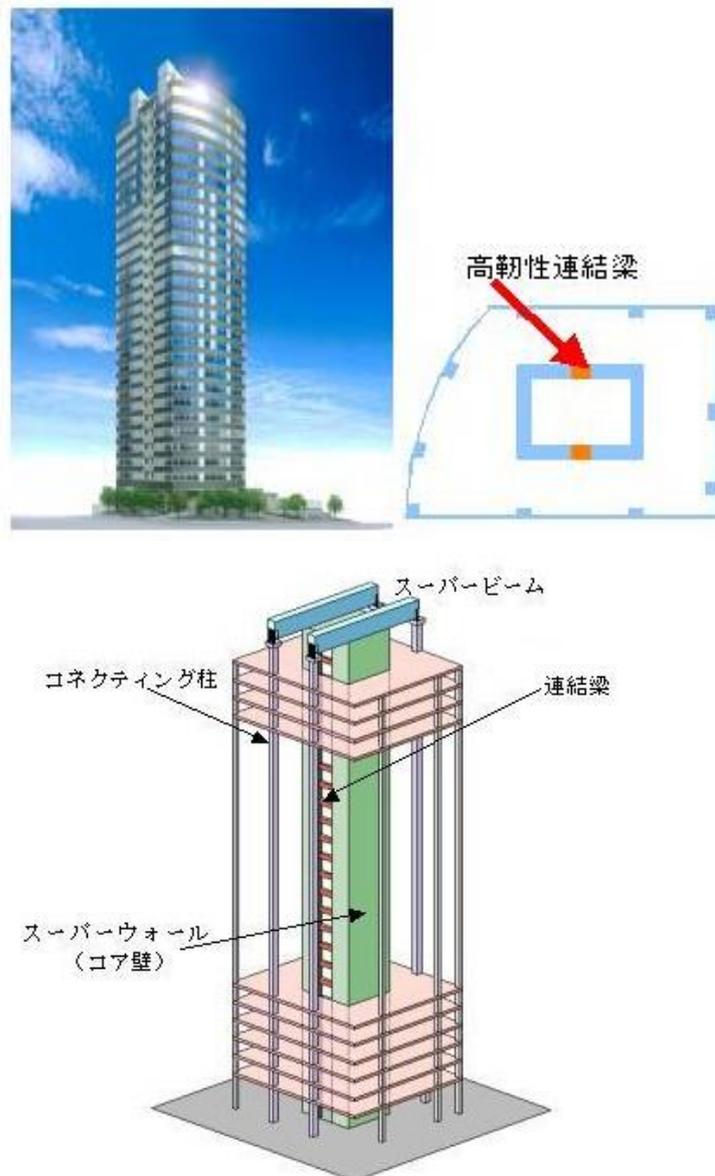


図 1-2 コア壁を用いたチューブ構造<sup>3)</sup>

HPFRCC の練り混ぜや型枠への打込みの際に、モルタルマトリックスの流動の影響を受けて繊維の配向状態が異なってくる。既往の研究では繊維配向状態を観察するために、硬化後の HPFRCC に対して、X 線 CT 装置による透過試験からマトリックス中の繊維配向を可視化する<sup>4)</sup>ことで評価を行っているが、この方法では評価に手間が掛かり、また供試体に対し限定的な範囲でしか評価することができない。

本研究では、HPFRCC における繊維配向性の把握を目的として、型枠のサイズ、打込み時間などをパラメータとし、計算機による繊維の配向挙動の解析を行う。試験体の形状が繊維配向性に与える影響、および打込み速度の差異による流体速度差と繊維配向角の関係を検討する。

## 第 2 章 解析方法

### 2.1 流動解析の方法

本研究では、繊維の配向挙動を把握するため、汎用 3 次元流体解析ソフト FLOW-3D を用いて、HPFRCC のマトリックス流体中の繊維の挙動を模した数値解析を行う。解析のフローを図 2-1 に示す。流動解析の一例を図 2-2 に示す

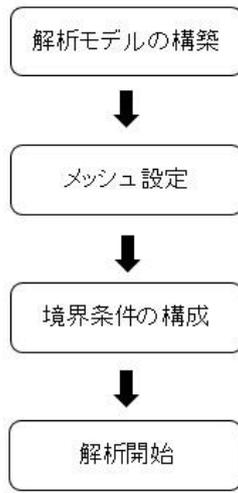


図 2-1 流動解析のフロー

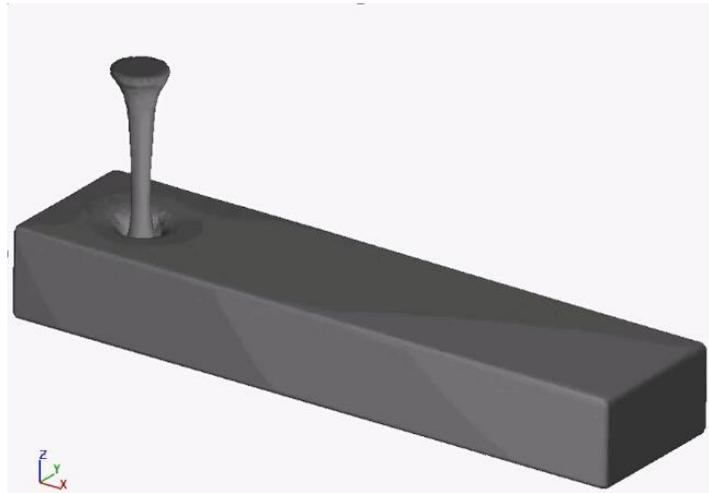
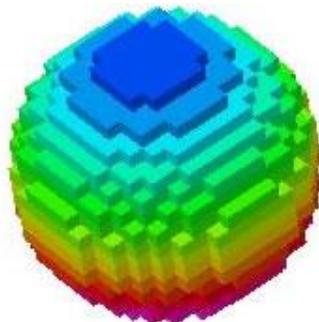
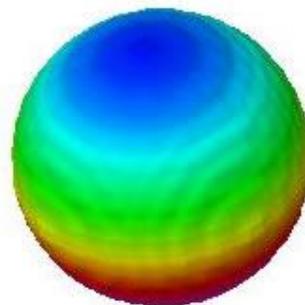


図 2-2 流動解析の一例

FLOW-3D では、FAVOR<sup>5)</sup> (Fractional Area/Volume Obstacle Representation) というメッシュ生成手法が用いられる。この手法はコントロールボリュームによる有限差分法に基づいて、生成が容易な直交格子を生成し、直交格子をベースに計算セルの一部をカットして滑らかな形状を表現する手法である。FAVOR 法と直交メッシュ生成手法の形状表現を図 2-3 に示す。HPFRCC の打込み出口モデルの形状表現を図 2-4 に示す。



直交メッシュ生成手法



FAVOR 法モデル

図 2-3 形状表現<sup>6)</sup>

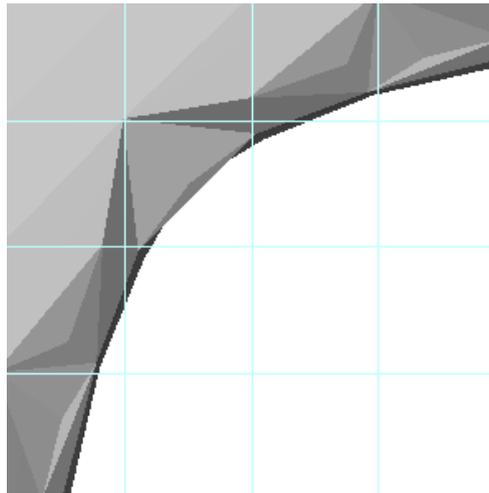


図 2-4 打込み出口モデルの形状表現

FLOW-3D では、VOF<sup>7)</sup> (Volume of Fluid) 体積追跡法という流体表面を表現する計算手法を用いている。この手法は流体の体積を追跡し、表面形状を流体と気体の境界面として間接的に追跡するアプローチであり、大変形を伴う液体が激しい挙動を示しても自由表面は精度良く再現される。VOF 法では直交メッシュに存在する流体率を関数として扱う。図 2-5 に示すように、流体で満たされた計算セルを「1」、全く存在しない計算セルを「0」、流体が部分的に存在する計算セルをその体積占有率に応じて「0」から「1」の間の値 (F 値) で表現する。

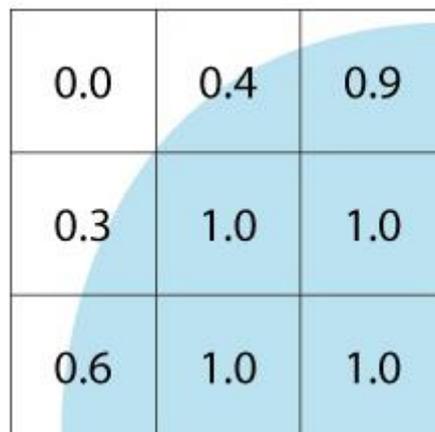


図 2-5 F 値の分布例<sup>8)</sup>

流動解析には、質量保存式として連続式(2-1)、運動量式として Navier-Stokes 方程式(2-2)、流体率輸送式として VOF 移流式(2-3)を基礎式として使用する。

$$\nabla \cdot \rho \mathbf{U} = 0 \quad (2-1)$$

$$\frac{\partial \mathbf{U}}{\partial t} + (\mathbf{U} \cdot \nabla) \mathbf{U} = -1/\rho \nabla P + \mathbf{G} + \mathbf{S} \quad (2-2)$$

$$\frac{\partial F}{\partial t} + \nabla \cdot \mathbf{F} \mathbf{U} = 0 \quad (2-3)$$

ここで,

$\rho$ : 流体密度       $t$ : 時間       $U$ : 流速ベクトル       $P$ : 圧力  
 $G$ : 体積力の加速度       $S$ : 粘性力の加速度       $F$ : VOF関数

## 2.2 マトリックスの粘性の設定

流動解析においては、ニュートン流体の粘性係数を設定する必要がある。HPFRCCのモルタルマトリックスの粘度を示す指標として、**図2-6**に示すJP漏斗の流下時間を用いている<sup>9)</sup>。流下時間の実験結果（37秒）と等しくなるように粘性係数を決定するため、**図2-7**に示すJP漏斗モデルを作製し、流下実験と同一の境界条件を設定して解析を行った。粘性係数を変動因子とした解析結果を**図2-8**に示す。粘性係数と流下時間は直線関係にあり、流下時間が37秒となるときの粘性係数は $4.07\text{Pa}\cdot\text{s}$ であった。本章以降の流動解析では、流体の粘性係数はこの値として解析を行う。



図 2-6 JP 漏斗

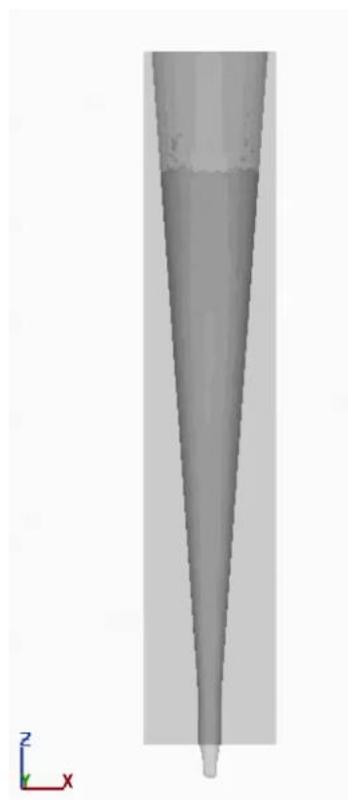


図 2-7 JP 漏斗解析モデル

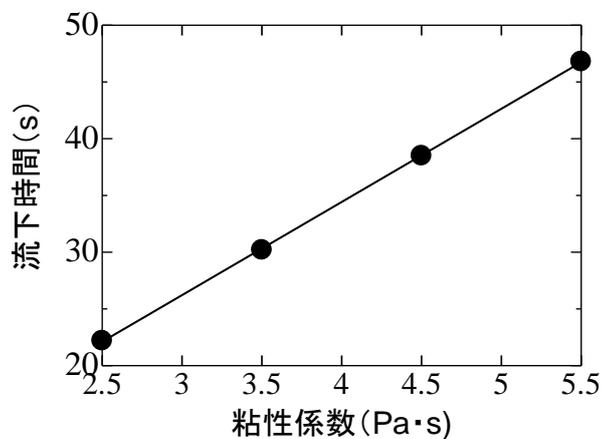


図 2-8 粘性係数と漏斗流下時間の関係

## 2.3 繊維配向角の計算

FLOW-3D における繊維配向の計算は、実際に繊維要素を配置して解くのではなく、各解析メッシュにおいて、一本の繊維を大きさ 1 の方向ベクトル  $\mathbf{p}$  に置き換えることにより得られる<sup>10)</sup>。流体の流動計算結果から Jeffery 式(2-4)によって方向ベクトル  $\mathbf{p}$  の X, Y, Z 方向の成分が求められ、方向ベクトル  $\mathbf{p}$  の向きを計算する。

$$d\mathbf{p}/dt = \boldsymbol{\Omega}\mathbf{p} + k(\mathbf{D} - \mathbf{p}^T\mathbf{D}\mathbf{p})\mathbf{p} \quad (2-4)$$

$\boldsymbol{\Omega}$  : 回転速度テンソル

$\mathbf{D}$  : せん断歪速度テンソル

$k$  : 繊維特性係数 :  $= (\text{アスペクト比}^2 - 1) / (\text{アスペクト比}^2 + 1)$

解析においては、繊維のプロパティとして、アスペクト比、配合量、密度を設定する必要がある。しかし、繊維配向角の計算には以下の制限がある。

- ・ メッシュサイズ以上の繊維の長さは考慮していない。
- ・ 繊維同士の衝突は考慮しない。
- ・ 繊維の流動は、周囲の流体に影響を与えない。
- ・ メッシュ内の繊維は曲がったりねじれたりしない。
- ・ 一つのメッシュごとに、規格化した繊維の方向ベクトル X, Y, Z 成分を出力する。
- ・ 繊維のプロパティ (アスペクト比, 配合量, 密度) は一定とする。

## 第3章 試験体の形状が繊維配向性に与える影響

### 3.1 はじめに

型枠によって繊維の配向が二次元的に制限されるというウォールエフェクトがある。したがって、型枠のサイズ、形状の違いにより繊維の配向性が影響を受ける。本章では、試験体のサイズ、形状および打設方向が繊維配向性に与える影響を検討するため、流動解析を行う。また、解析結果と珪酸ナトリウム水溶液（水ガラス）を用いた可視化実験で得られた繊維配向性の実験結果<sup>1)</sup>と比較する。

## 3.2 解析対象試験体

水ガラスを用いた可視化実験で得られた実験結果と本解析の結果を比較するため、試験体は可視化実験で使用された断面が  $40\text{mm} \times 40\text{mm}$  の曲げ試験体（小）、断面が  $100\text{mm} \times 100\text{mm}$  の曲げ試験体（大）および引張試験体の3種類の型枠を対象とした。試験体のサイズおよび形状の検討に加えて、打設方向（縦打ち、横打ち）も検討因子とした。解析対象とした試験体を図 3-1 に示す。実験での型枠を写真 3-1 に示す。

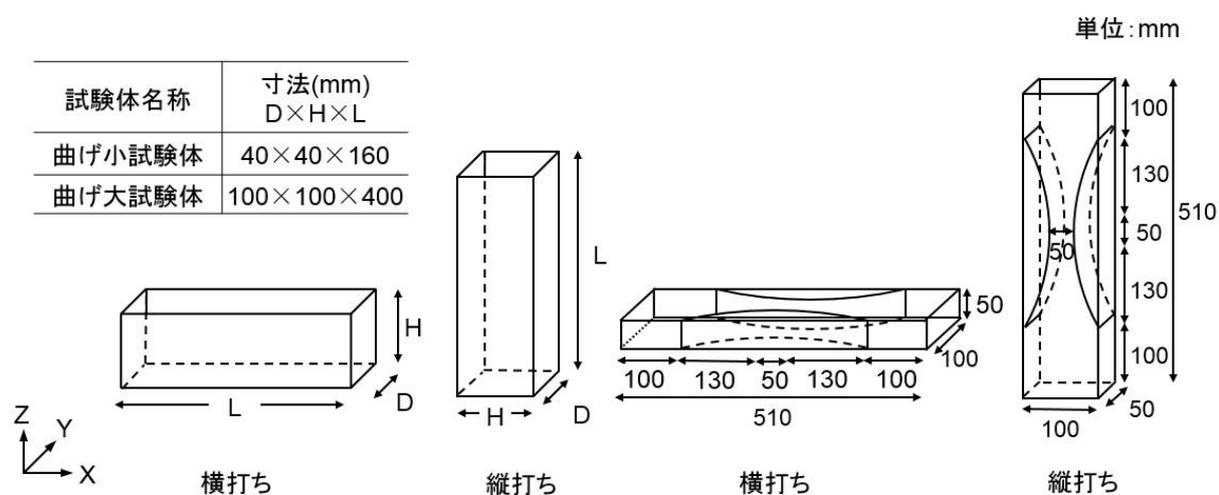


図 3-1 解析対象試験体



写真 3-1 実験での型枠（上：曲げ試験体 下：引張試験体）

### 3.3 解析条件

流体の密度は可視化実験で用いた水ガラスの  $1.62\text{g/cm}^3$  とし、粘性係数は第 2 章における JP 漏斗の解析結果から得られた  $4.07\text{Pa}\cdot\text{s}$  に設定した。

モルタルマトリックスの打込み完了時間は、実際の打設を参考に、曲げ試験体(大)では 42 秒、曲げ試験体(小)では 15 秒、引張試験体では 23 秒とした。これらの時間を目標値として、解析による打込み時間を合致させるように、打込み位置の流体出口の半径  $R$  および流速  $V$  を決定した。流体出口中心の位置は実験条件とあわせて、型枠軸線上端部から  $d$  の位置で、高さは  $h$  とする。曲げ試験体の流体出口位置を図 3-2 に、各試験体のこれらの値を表 3-1 に示す。各試験体において、横打ちおよび縦打ちの流体出口の半径、高さ、位置  $d$  は同一とした。

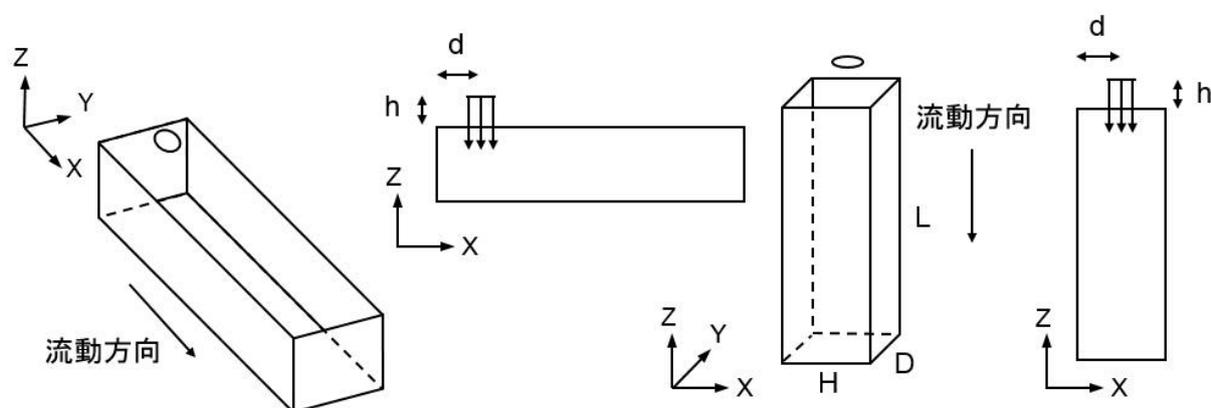


図 3-2 曲げ試験体の流体出口位置

表 3-1 流体出口の寸法および位置

	流体出口の 半径 $R(\text{mm})$	流体出口の 高さ $h(\text{mm})$	流体出口の 位置 $d(\text{mm})$
曲げ大試験体	17.5	50	50
曲げ小試験体	15	60	20
引張試験体	15	60	35

### 3.4 繊維配向角の評価方法

第2章で述べた方法で得られる繊維の配向角の定義を図3-3に示す。流動方向に対して、反時計回りを正、時計回りを負とした。角度が $0^\circ$ に近づくほど、流動方向に繊維が配向していることを意味する。

繊維配向角の評価対象領域は、水ガラスを用いた可視化実験と同様に、曲げ試験体では中央部（3等分点曲げ試験における純曲げ区間）、引張試験体では中央部110mm（歪計測用変位計検長区間）とした。繊維配向角の分布を定量的に評価する手法として、既往の研究<sup>4)</sup>より、図3-4に示す配向強度 $k$ と、主配向角 $\theta_r$  ( $-45^\circ \leq \theta_r \leq 45^\circ$ )を採用する。配向角分布の各階級の相対度数に対して、配向角を偏角とする平面座標に変換した後、楕円による近似を行い、楕円の径( $a$ および $b$ )と、径と座標軸のなす角である主配向角 $\theta_r$ を得る。配向強度 $k$ は楕円の2つの径の比である( $k = a/b$ )。図3-5に示すように、配向角分布が一様であると楕円による近似は円となり、配向強度は $k=1$ となる。配向角分布が $0^\circ$ 付近でピークを持つ分布となると、近似楕円は横長の楕円になり、配向強度は $k > 1$ となる。本章では、横打ち試験体の場合はZX平面とXY平面、縦打ち試験体の場合はZX平面とYZ平面について評価する。

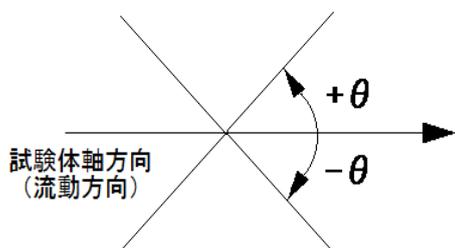


図 3-3 繊維配向角の定義

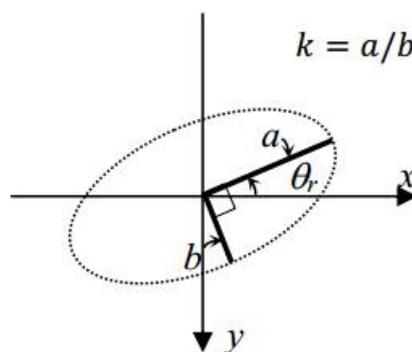


図 3-4 配向強度および主配向角

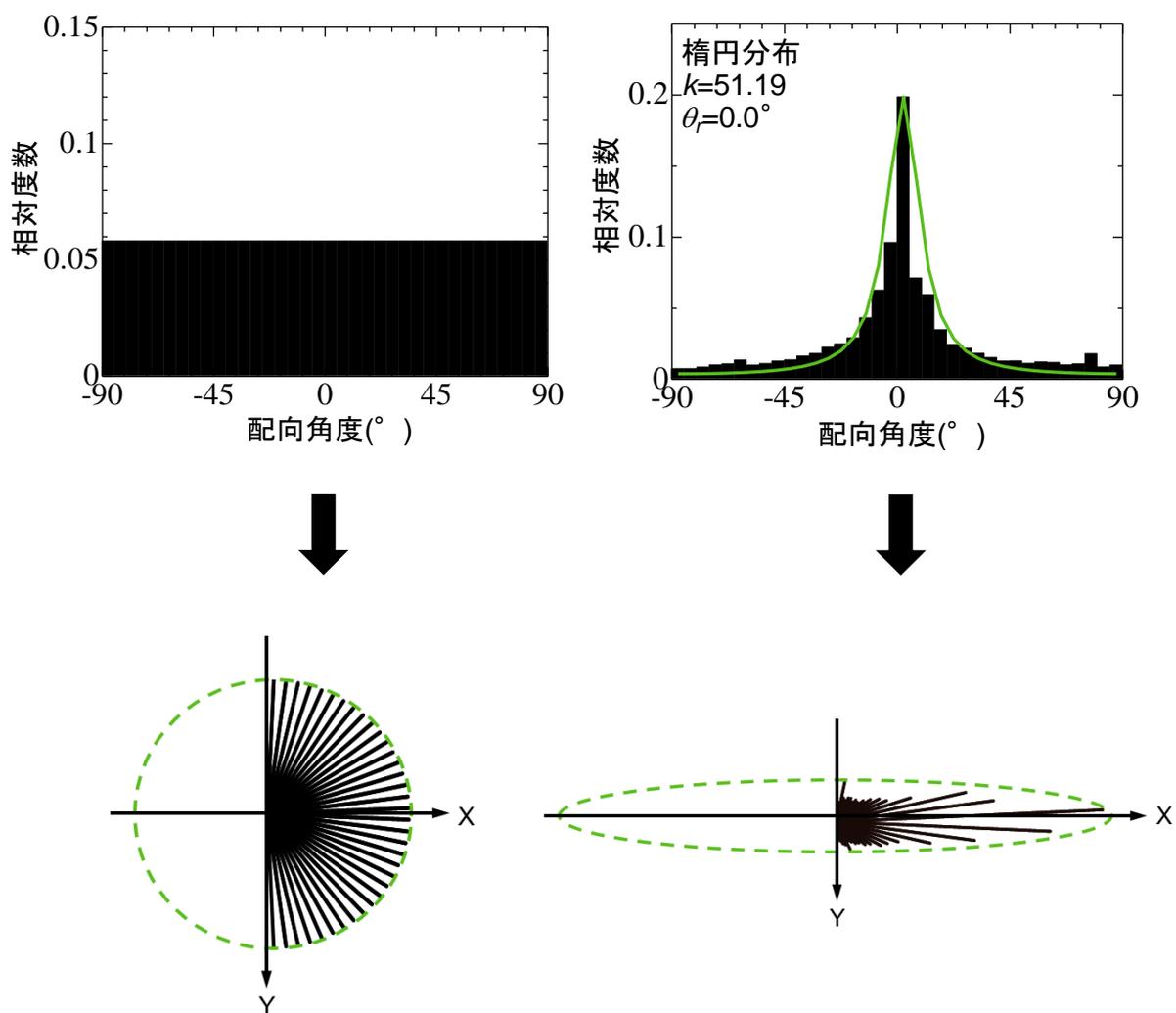


图 3-5 椭圆分布的定义

### 3.5 解析結果

図 3-6 に示すように、流体の打込み完了時点の各試験体の中央の平面における繊維配向性を検討するため。これらの平面における解析結果を、図 3-7～図 3-12 に示す。繊維の流動方向は実線で示されている。また、繊維配向角分布を図 3-13～図 3-18 に示す。

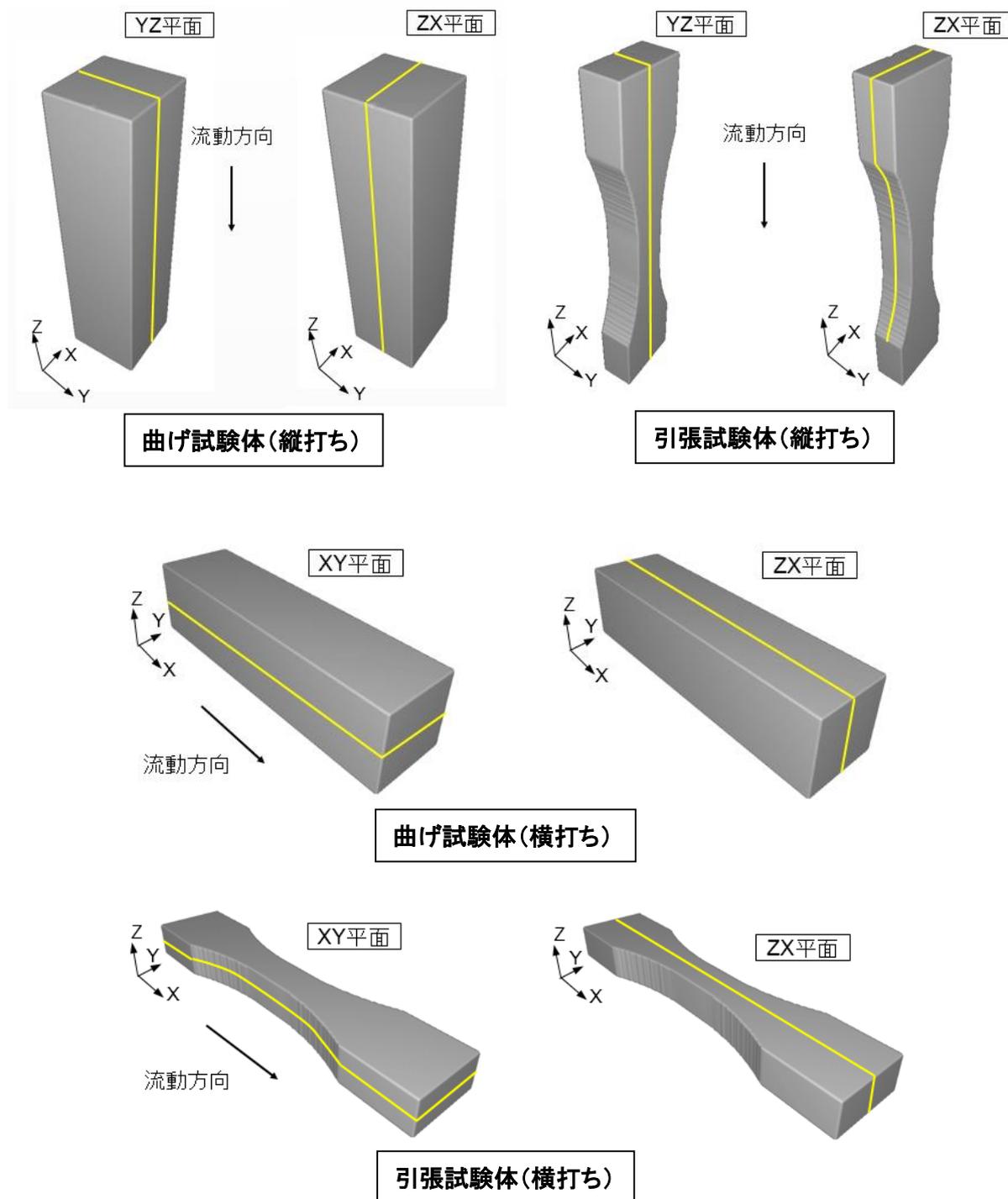


図 3-6 各試験体の解析結果の評価平面

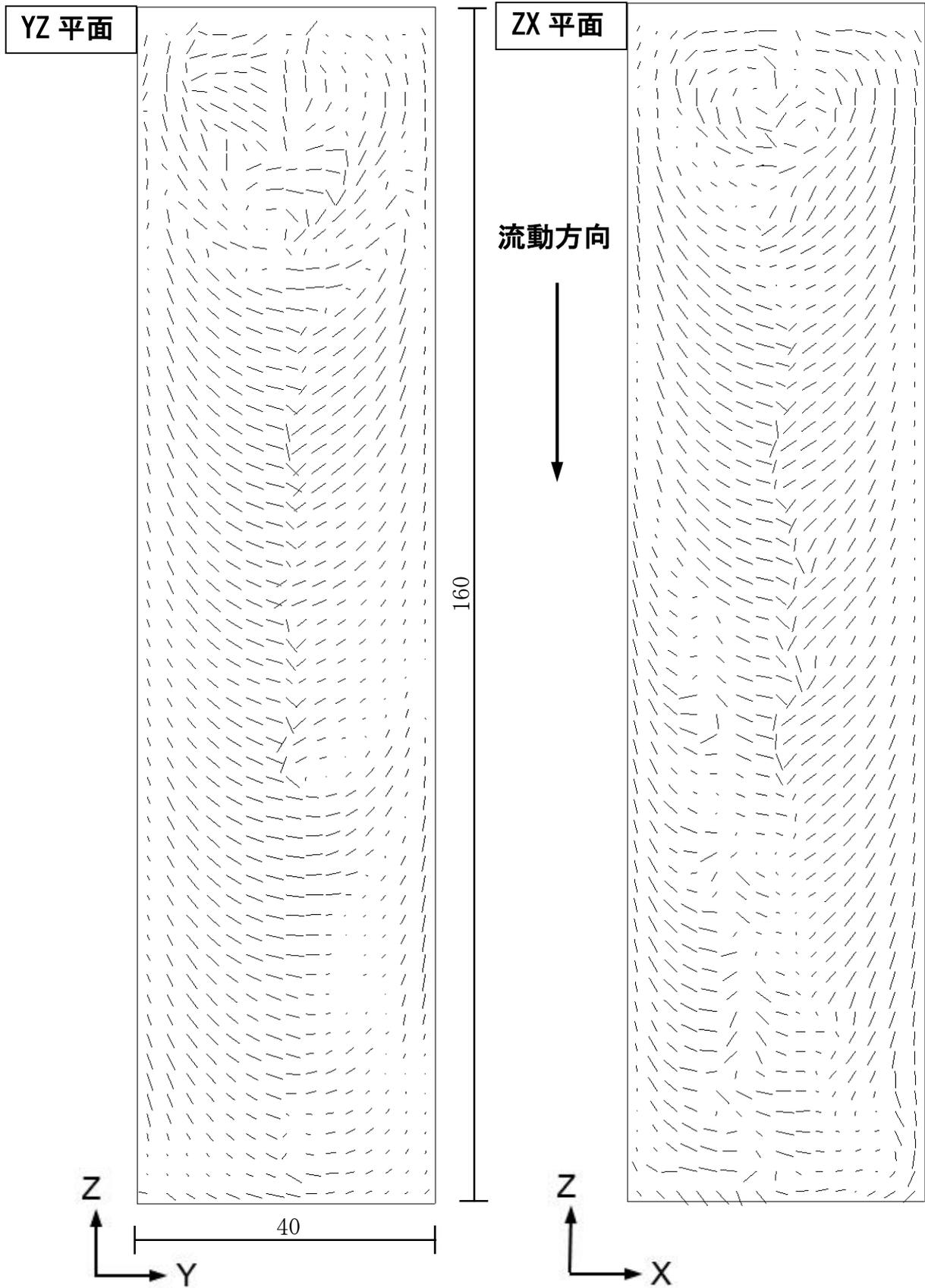


図 3-7 曲げ小試験体の解析結果（縦打ち）

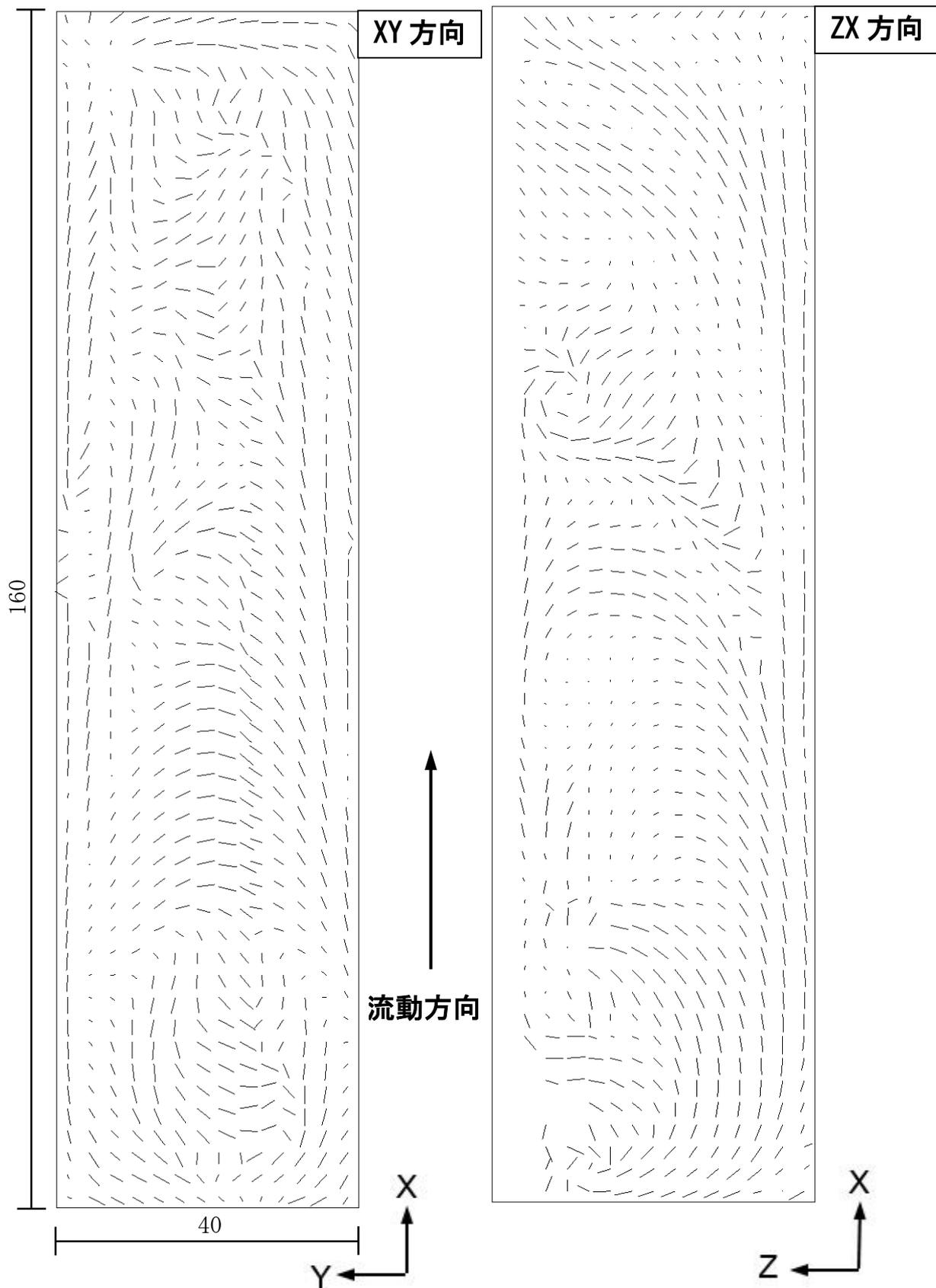


図 3-8 曲げ小試験体の解析結果（横打ち）

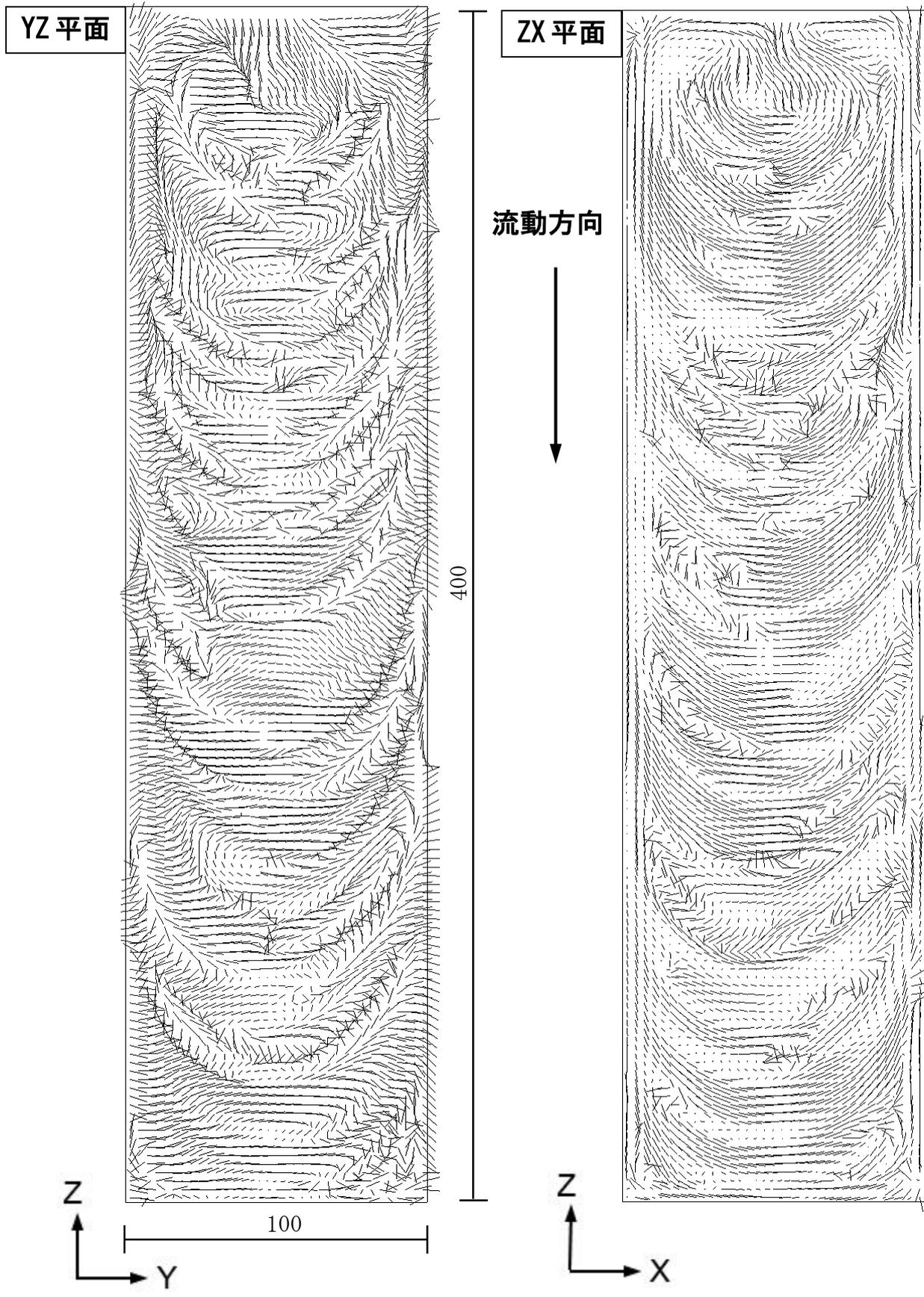


図 3-9 曲げ大試験体の解析結果（縦打ち）

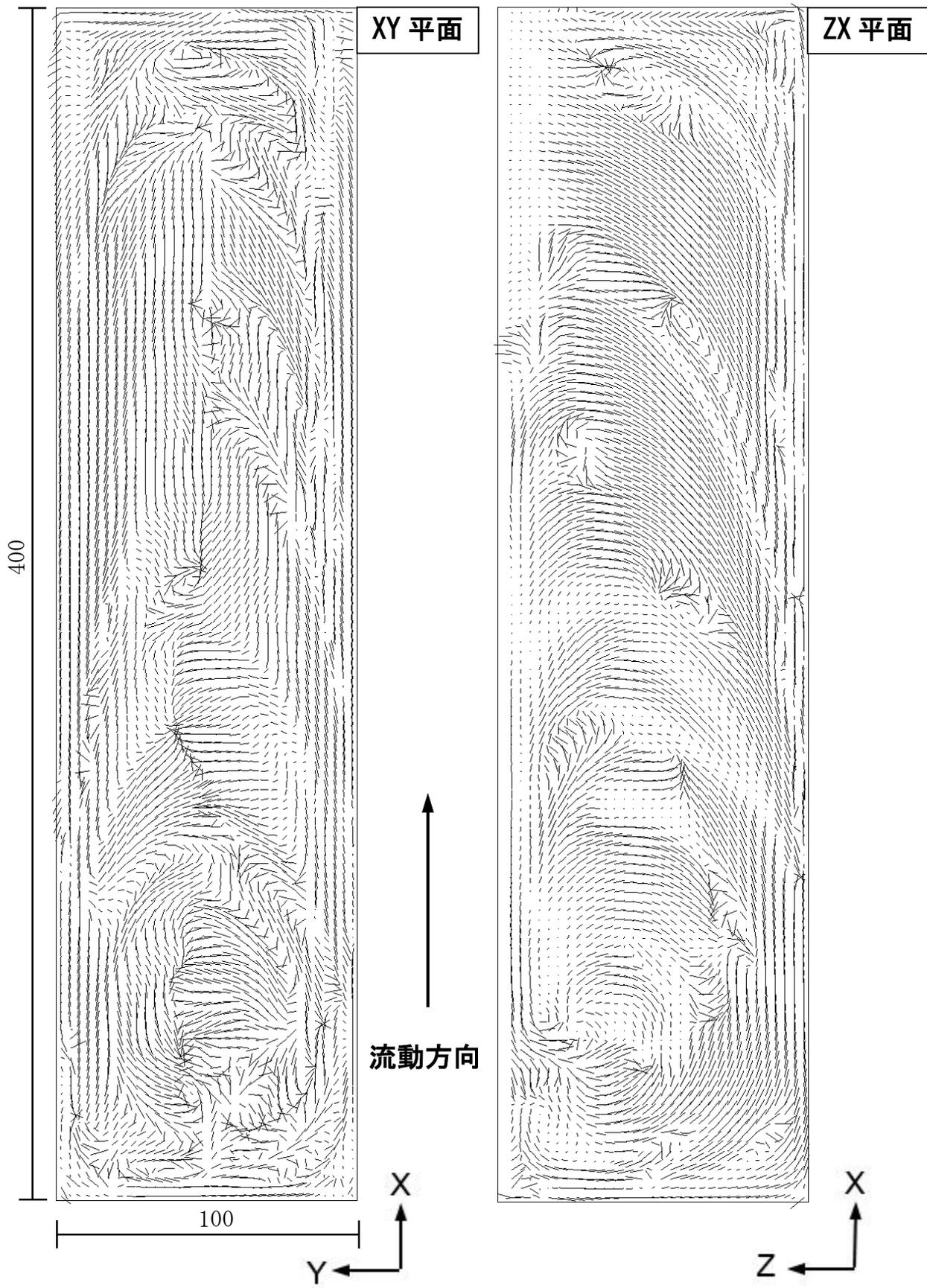


図 3-10 曲げ大試験体の解析結果（横打ち）

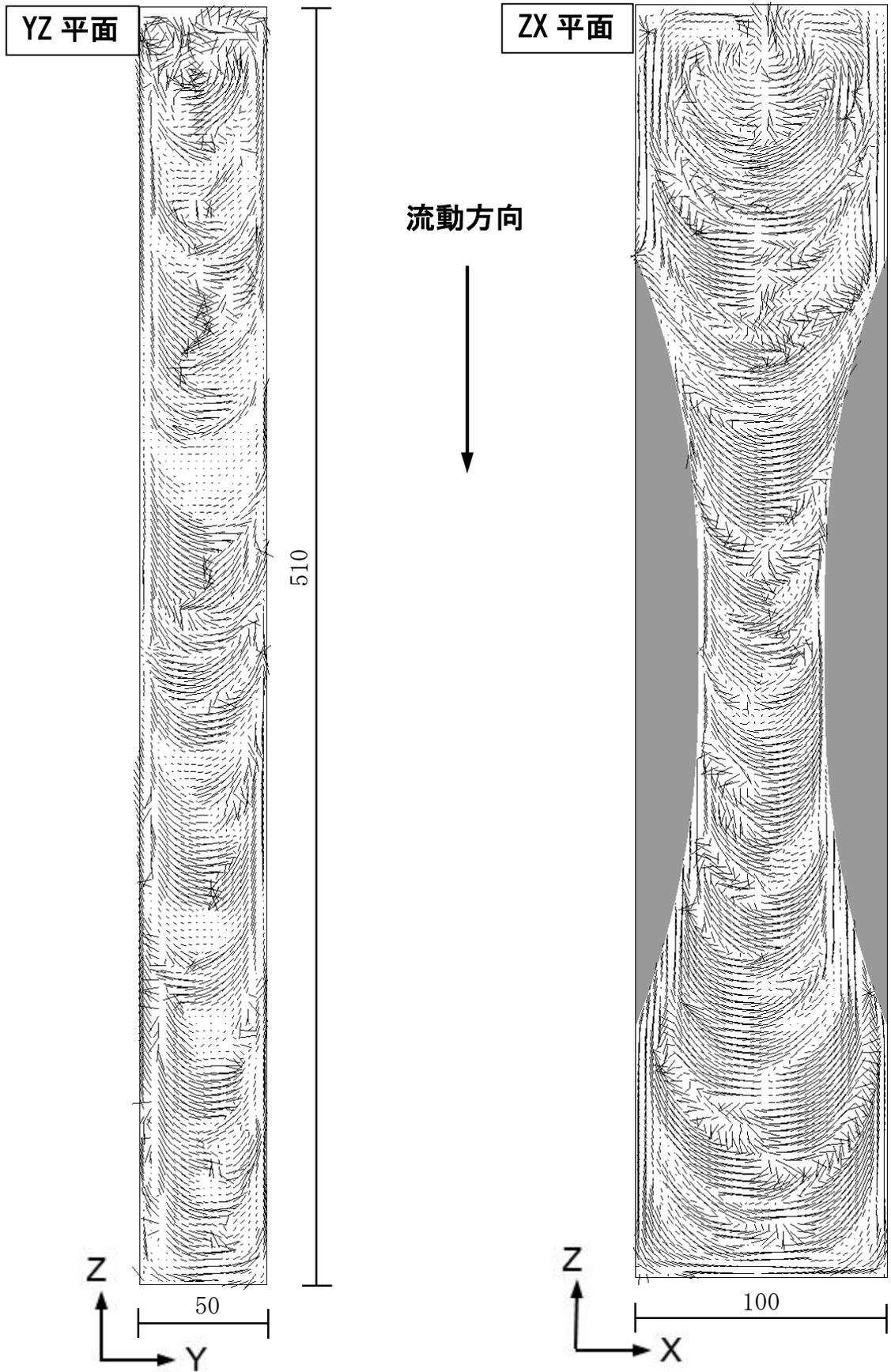


図 3-11 引張試験体の解析結果（縦打ち）

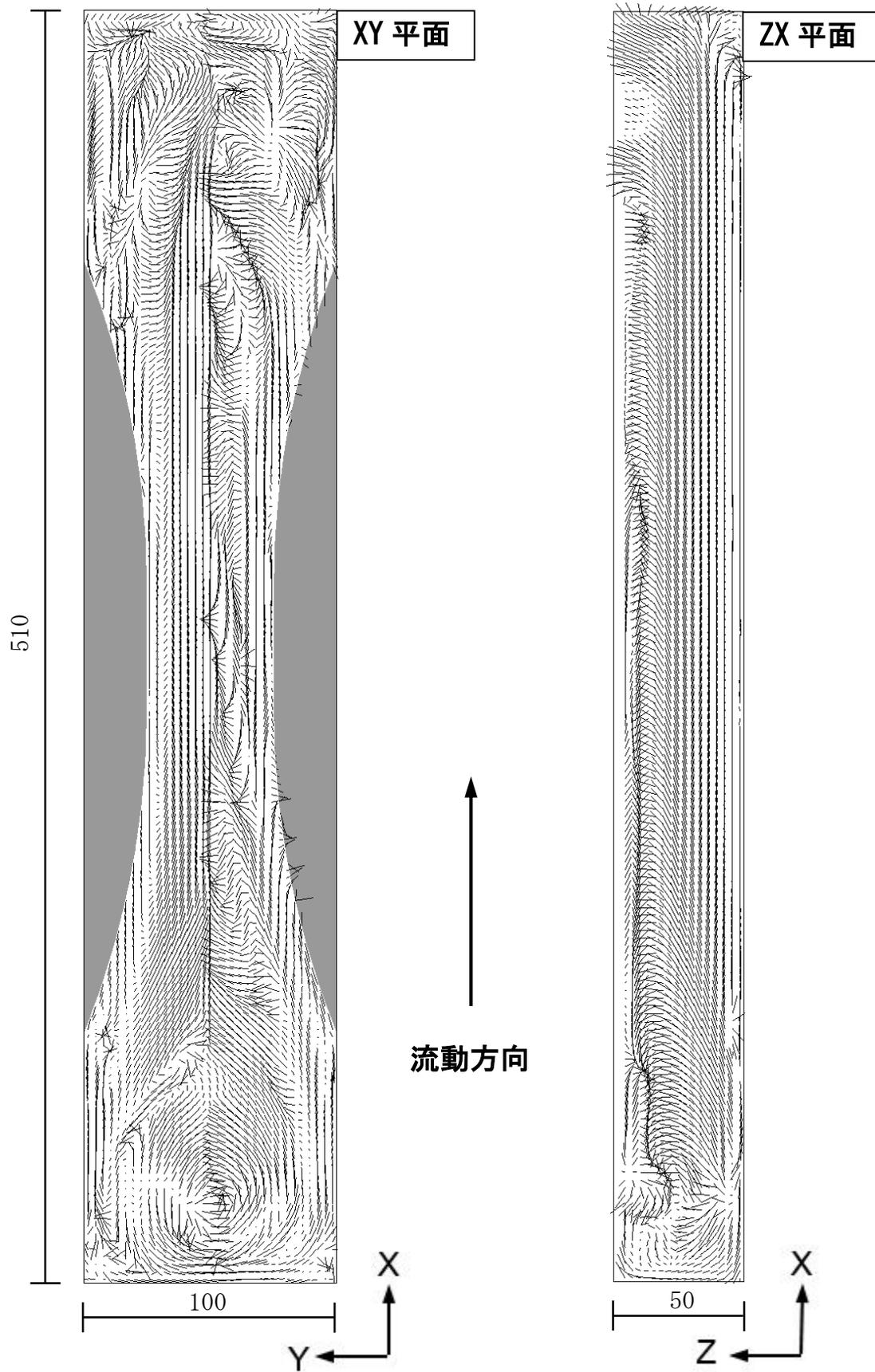


図 3-12 引張試験体の解析結果（横打ち）

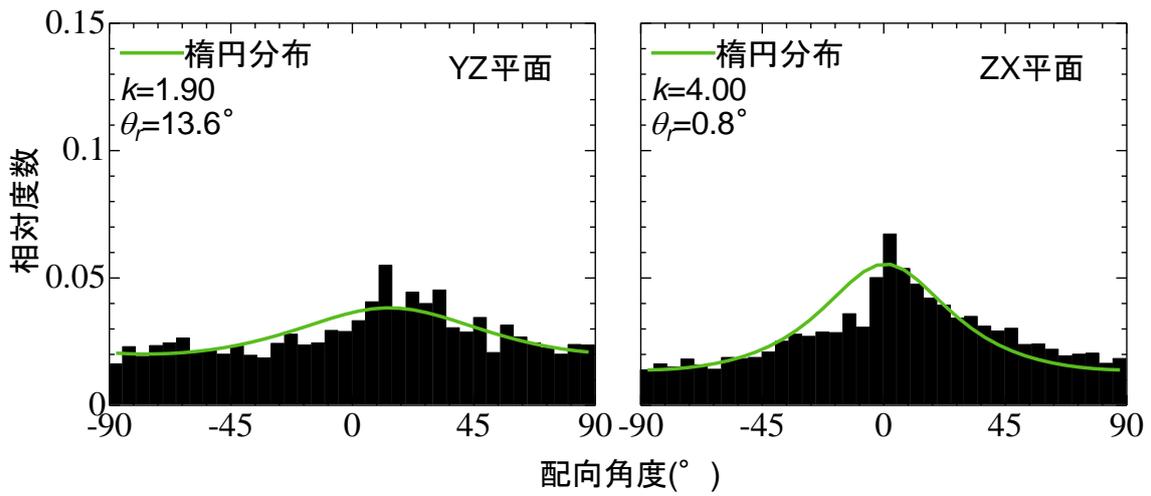


図 3-13 曲げ小試験体（縦打ち）

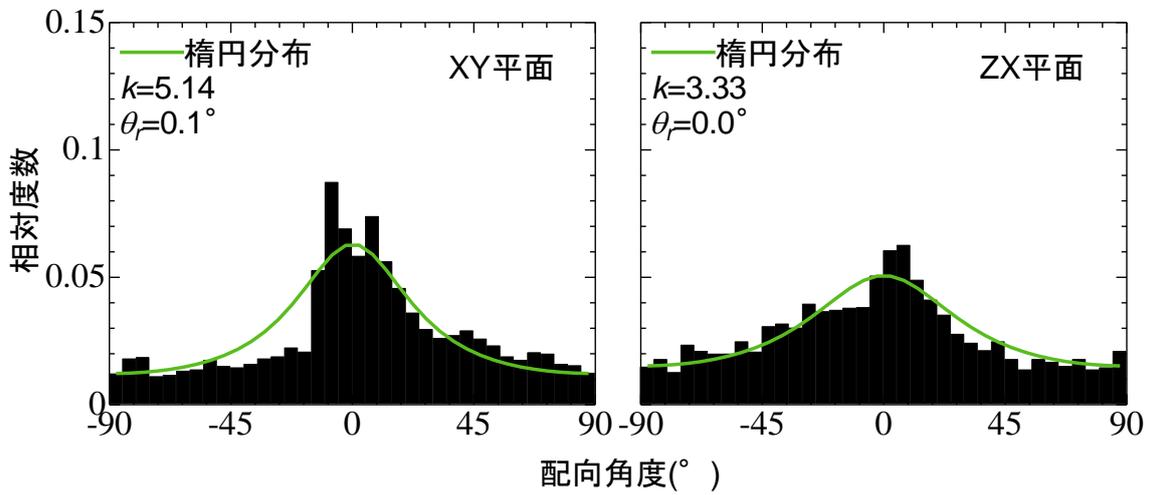


図 3-14 曲げ小試験体（横打ち）

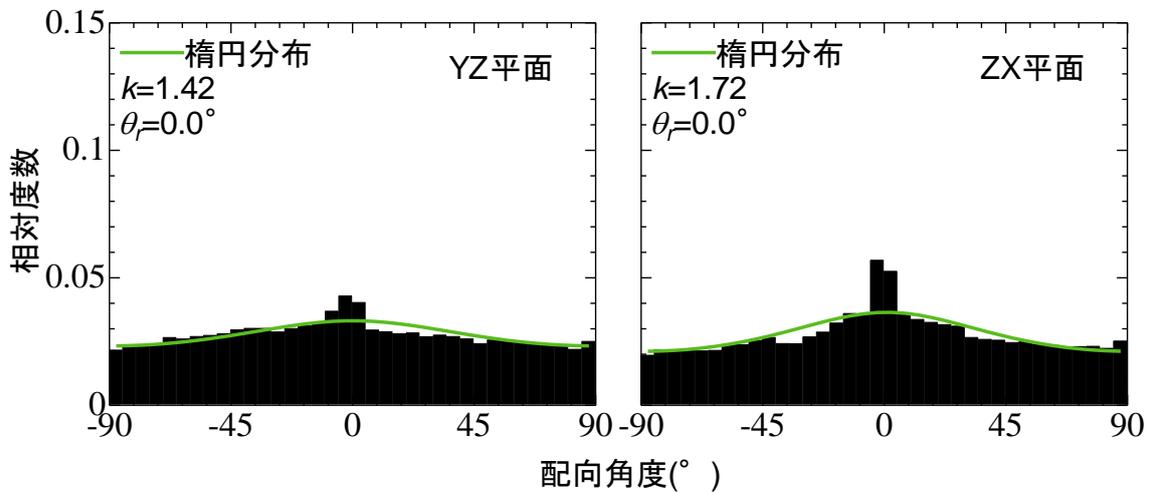


図 3-15 曲げ大試験体（縦打ち）

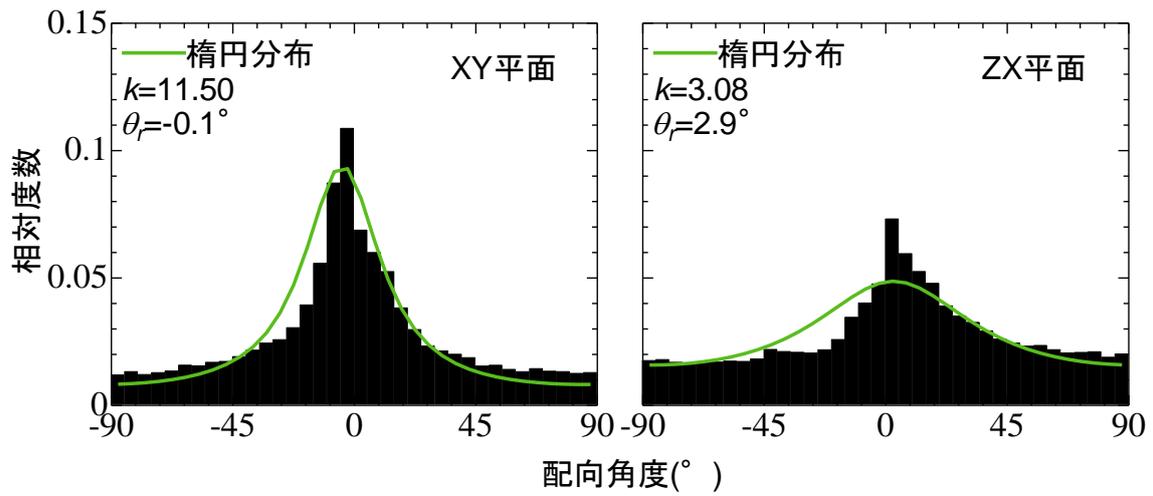


図 3-16 曲げ大試験体（横打ち）

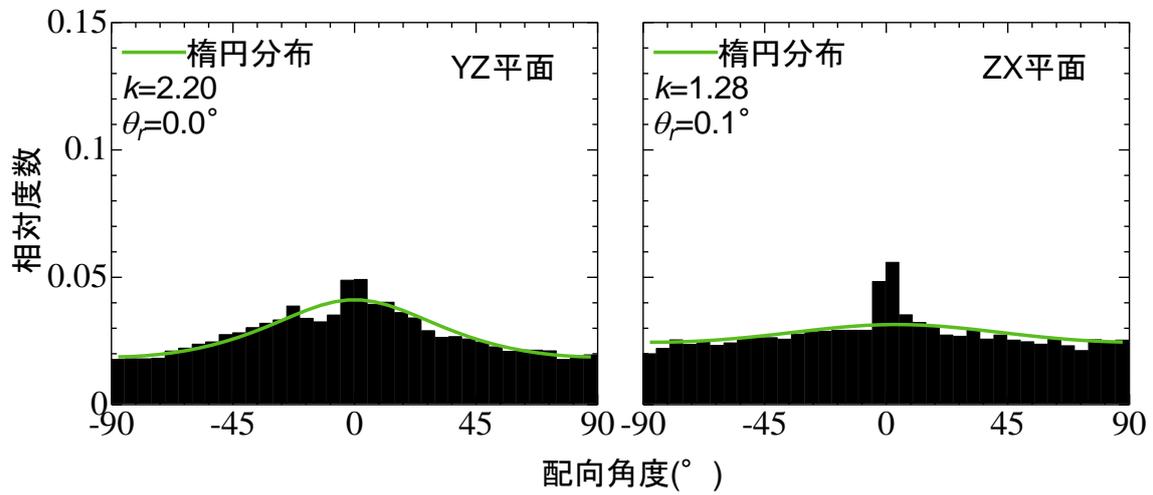


図 3-17 引張試験体（縦打ち）

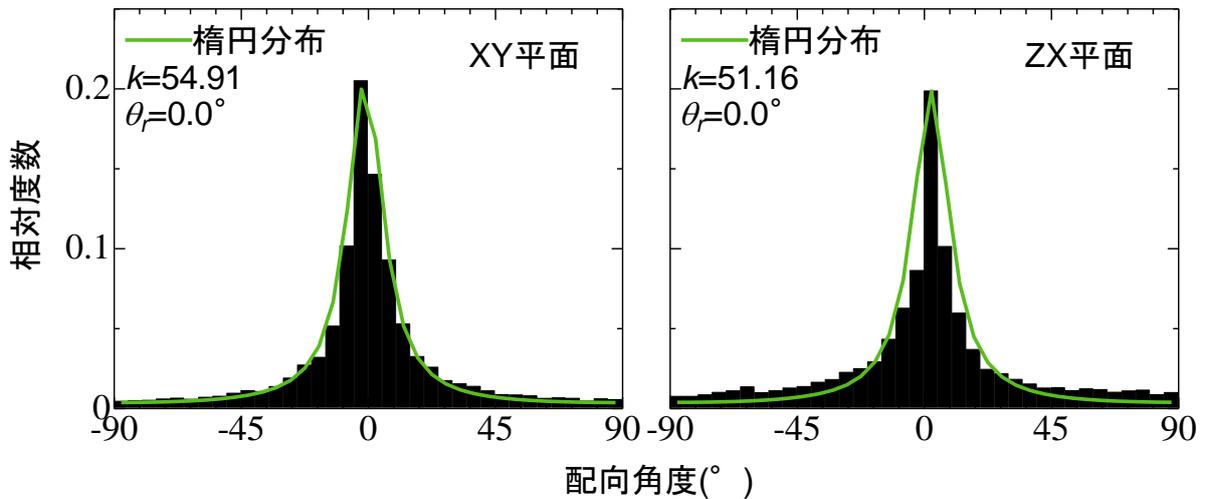


図 3-18 引張試験体（横打ち）

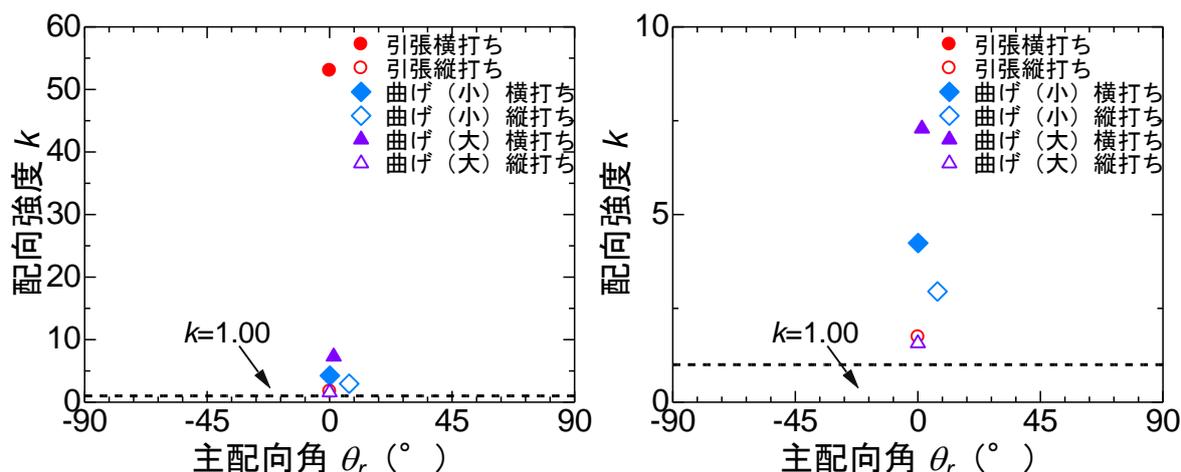


図 3-19 配向強度と主配向角の関係 (右：拡大図)

図 3-13～図 3-18 より、曲げ試験体の縦打ちの場合の配向強度  $k$  は  $YZ$  平面より  $ZX$  平面の方が大きく、引張試験体の縦打ちの場合には  $YZ$  平面の配向強度  $k$  が大きいことがわかる。横打ちの場合には、各試験体において配向強度  $k$  が  $ZX$  平面より  $XY$  平面の方が大きいことがわかる。曲げ大試験体（横打ち）の 2 つ平面の配向強度  $k$  の差が一番大きく、8 程度の差がある。引張試験体の横打ちの場合の配向強度は  $k > 50$  で流動方向に強く配向している。曲げ大試験体および引張試験体の縦打ちの場合の配向強度は  $k = 1 \sim 2$  程度で、ランダム配向に近い。

各試験体の配向強度  $k$  と主配向角  $\theta_r$  の関係を図 3-19 に示す。右図は  $k \leq 10$  の範囲の拡大を示す。なお、各試験体の 2 平面の配向強度および主配向角を平均した。図 3-19 より、各試験体の横打ちの場合の配向強度  $k$  は縦打ちの場合より大きく、横打ちの場合は繊維がより流動方向に配向し、各試験体の主配向角  $\theta_r$  がほぼ同じであることが確認できる。横打ちの場合、引張試験体では曲げ試験体に比べ、配向強度  $k$  の違いが顕著である。曲げ試験体の大小を比較すると、横打ちの場合は大試験体の方は配向強度が大きい、縦打ちの場合は小試験体の方が大きい結果となった。

水ガラスを用いた可視化実験による主配向角－繊維体積混入率関係および配向強度－繊維体積混入率関係と、解析結果から得られた配向強度  $k$  および主配向角  $\theta_r$  を比較して、図 3-20 および図 3-21 に示す。図 3-20 より、可視化実験においても、引張試験体および曲げ試験体（大）の配向角は  $0^\circ$  に近い。図 3-21 より、解析における各試験体の横打ちの値は実験結果より 2 倍以上大きく、縦打ちの値は実験結果より小さくなっている。本解析では繊維同士の接触および繊維の流動が流体に及ぼす影響を考慮できないことが理由として考えられる。縦打ちでは流体の可動範囲が横打ちより狭く、実験ではその範囲内の繊維同士が接触して繊維配向性に影響を及ぼしている可能性がある。

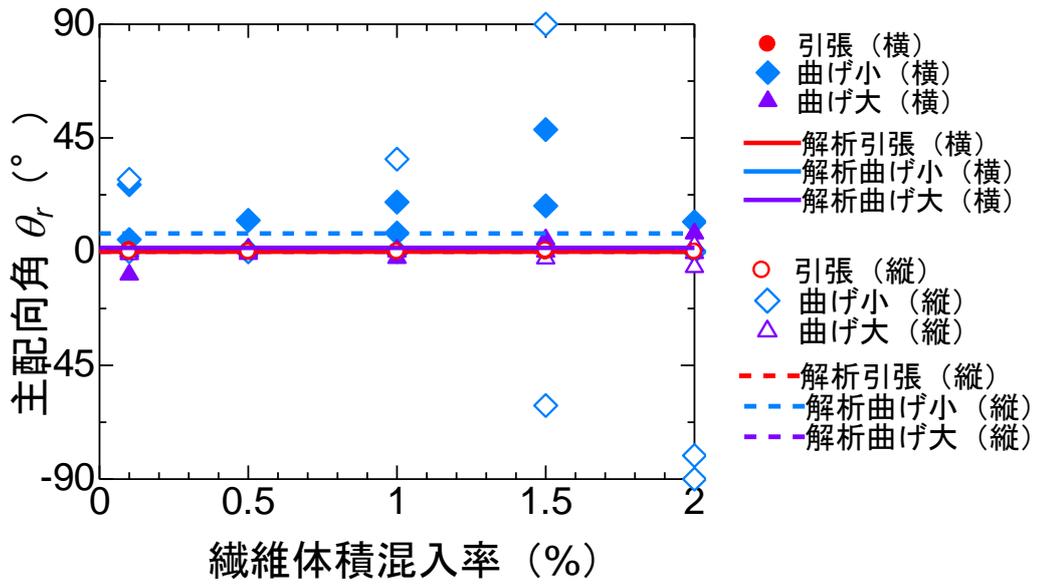


図 3-20 主配向角の水ガラスによる可視化実験との比較

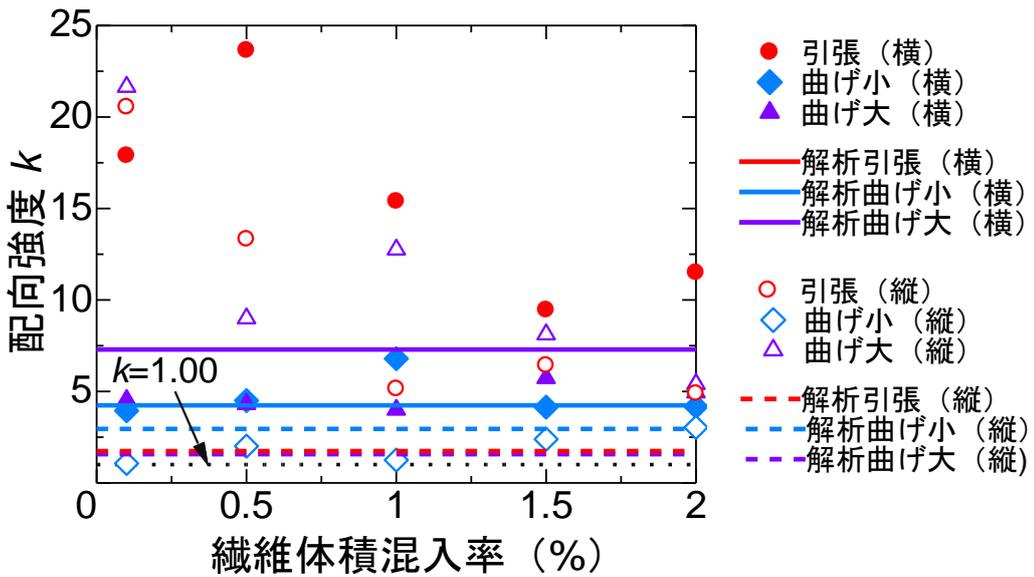


図 3-21 配向強度の水ガラスによる可視化実験との比較

## 3.6 まとめ

試験体のサイズ，形状および打設方向が繊維配向性に与える影響を検討するため流動解析を行い，繊維配向を既往の研究による配向強度と主配向角により評価した。また，解析結果と水ガラスを用いた可視化実験で得られた実験結果と比較した。検討の結果，以下の知見が得られた。

- (1) 各試験体において，横打ちの方が縦打ちに比べてより流動方向に対して強く配向することを確認した。
- (2) 引張試験体は曲げ試験体に比べ，横打ちと縦打ちの配向強度の違いが顕著であった。
- (3) 解析における横打ちの配向強度は，水ガラスによる可視化実験の結果より2倍以上大きく，縦打ちの場合は実験結果より小さくなっている。本解析では繊維同士の接触および繊維の流動が流体に及ぼす影響を考慮できないことが理由として考えられる。

## 第 4 章 打込み速度が繊維配向性に与える影響

### 4.1 はじめに

第 3 章の検討より，型枠の形状および打設方向が繊維の配向性に与える影響が大きいことが確認できた。特に引張試験体の横打ちの場合，配向強度が大きくなった。試験体中央部でくびれている形状のため，その区間において流体速度が大きくなり繊維配向性に強い影響を及ぼしていることが考えられる。

本章では，曲げ試験体および引張試験体を対象として，打込み時間を因子とした解析を行い，流体速度差と繊維配向角の関係を検討する。

## 4.2 解析対象試験体

図 4-1 に示す，曲げ試験体（大：断面  $100\text{mm}\times 100\text{mm}$ ）および引張試験体を対象とした。打設方向は横打ちとした。検討因子は，打込み時間である。

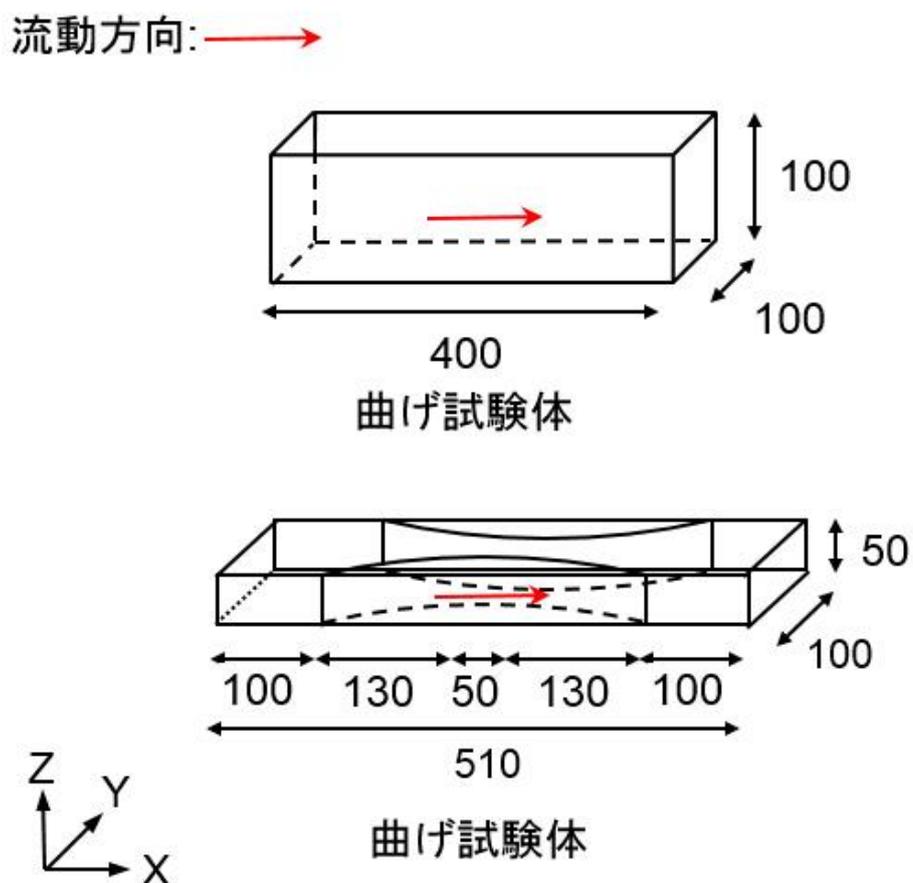


図 4-1 解析対象試験体

### 4.3 解析条件

流体の密度は、第3章と同様に可視化実験で用いた水ガラスの  $1.62\text{g/cm}^3$  とし、粘性係数も同様に第2章における JP 漏斗の解析結果から得られた  $4.07\text{Pa}\cdot\text{s}$  に設定した。

解析パラメータを表 4-1 に示す。流体出口の位置は第3章と同一であり、流体出口の半径を変化させ、打込み時間を調整する。打込み時間は、曲げ試験体では 30~90s、引張試験体では 20~40s とした。打ち込む過程での途中状態での解析結果を評価の対象とし、図 4-2 に示すように、曲げ試験体では流体表面から型枠底面までの距離が 70mm となった時点、引張試験体では 40mm となった時点とした。その時点の評価対象時間は表 4-1 に示す通りである。

表 4-1 解析のパラメータ

		流体出口の半径(mm)	打込み時間(s)	評価対象時間(s)
曲げ試験体	M-1	20.8	30	22
	M-2	18.0	40	28
	M-3	12.0	90	65
引張試験体	H-1	17.8	20	17
	H-2	14.5	30	25
	H-3	12.6	40	34

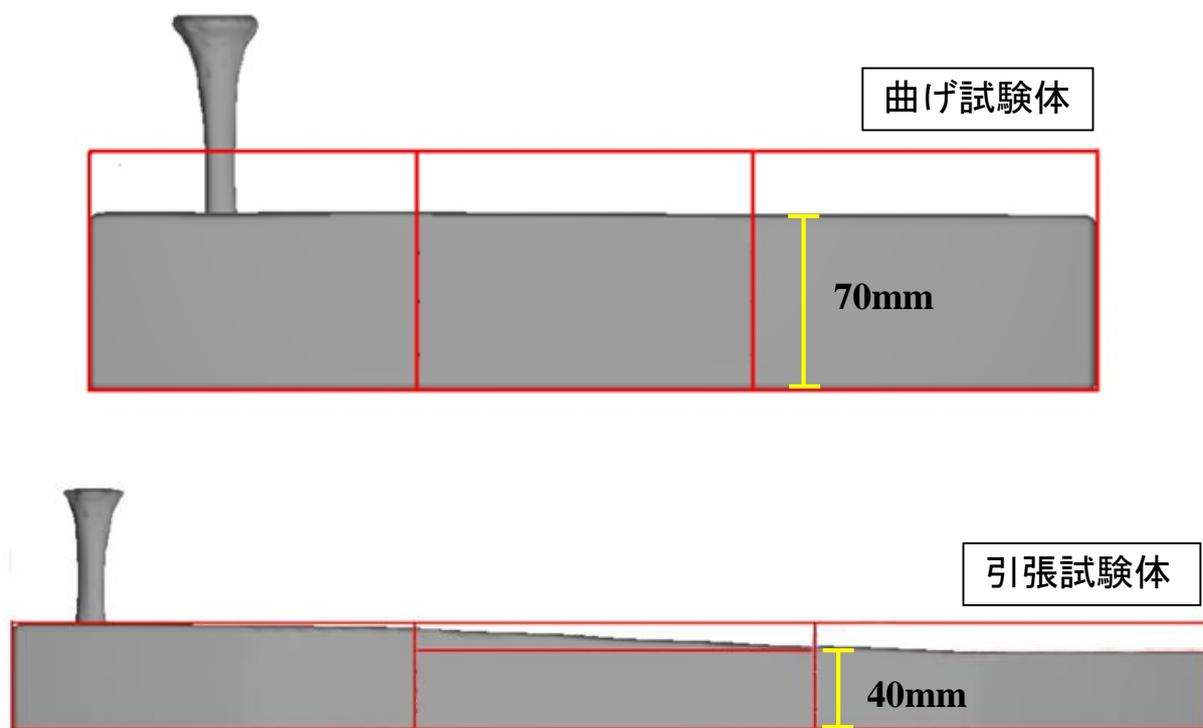


図 4-2 解析結果を評価する時の流体表面位置

## 4.4 流体速度と繊維配向角の評価方法

打込み時間から生じる流体間の速度差と繊維配向角の関係の評価を XY 平面および ZX 平面の 2 次元平面で行う。速度差の計算方法の例を図 4-3 に示す。計算メッシュごとの代表流体速度を出力し、隣り合うメッシュ A2 と B2 の X 方向の速度差  $\Delta v_x$  および隣り合うメッシュ B1 と B2 の Y 方向の速度差  $\Delta v_y$  より、B2 メッシュにおける流体の速度差の大きさ  $\Delta v$  および速度差の角度  $\theta_v$  を算出する。繊維配向角  $\theta_f$  には、第 2 章で述べたように、解析による B2 メッシュにおける大きさ 1 の方向ベクトル  $\mathbf{p}$  (一本の繊維) の X, Y 方向の成分より、方向ベクトル  $\mathbf{p}$  の向き、すなわち XY 平面の繊維配向角  $\theta_f$  を算出する。評価する平面における境界メッシュ以外の全てのメッシュの速度差の大きさ  $\Delta v$ 、繊維配向角  $\theta_f$  および速度差の角度  $\theta_v$  を計算し、 $\theta_f$  と  $\theta_v$  の差の絶対値である  $|\theta_f - \theta_v|$  と  $\Delta v$  の関係を検討する。 $|\theta_f - \theta_v|$  の値が小さいと流動方向に沿う繊維の配向性が強いことを示す。

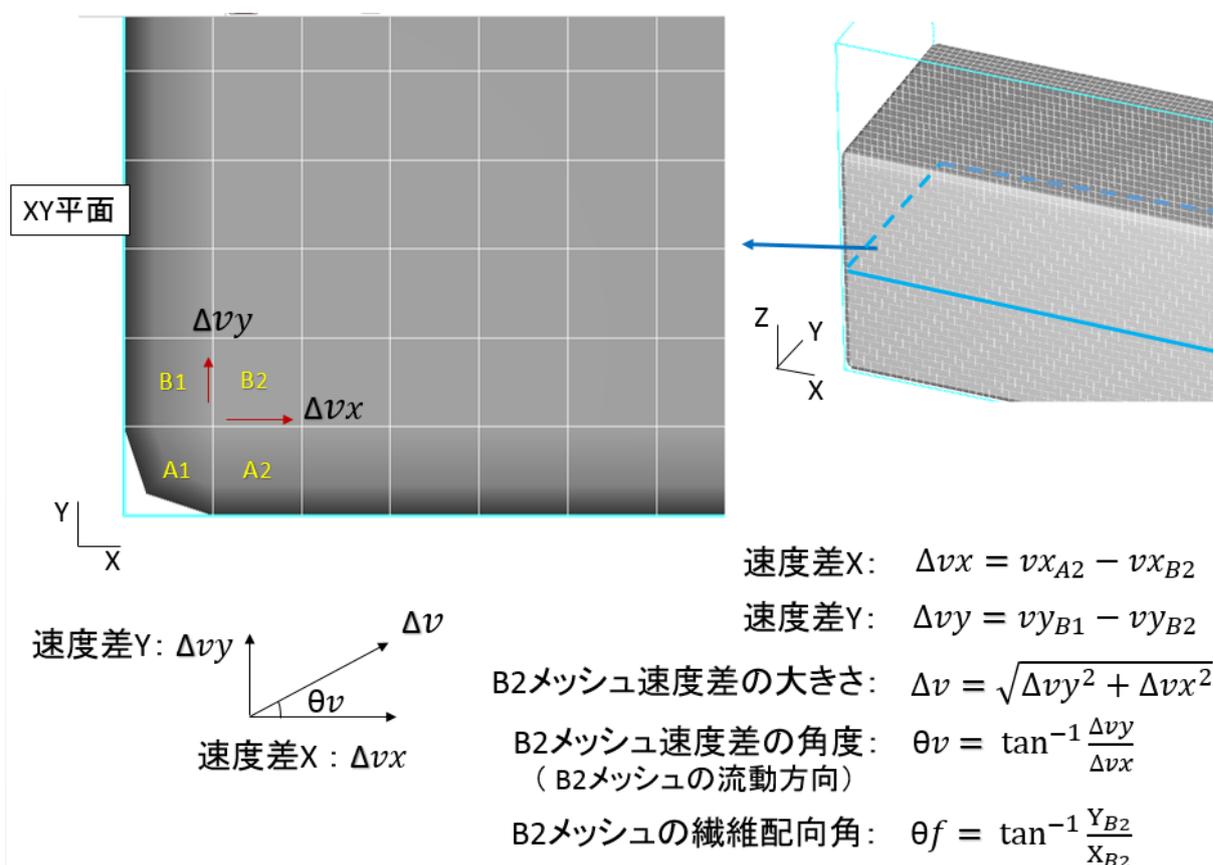


図 4-3 速度差および繊維配向角の計算

評価対象領域は、曲げ試験体では中央部 100mm (3 等分点曲げ試験における純曲げ区間)、引張試験体では中央部 110mm (歪計測用変位計検長区間) とした。繊維配向角は、型枠および流体表面の境界条件の影響を受けることが考えられるので、Y 方向および Z 方向に対して座標位置が異なるいくつかの平面を対象とした。曲げ試験体における評価対象平面を図 4-4 に、引張試験体の

評価対象平面を図 4-5 に示す。曲げ試験体の評価対象平面間の距離は 20mm である。引張試験体の評価対象平面の距離は、XY 平面では 10mm、YZ 平面では 15mm である。

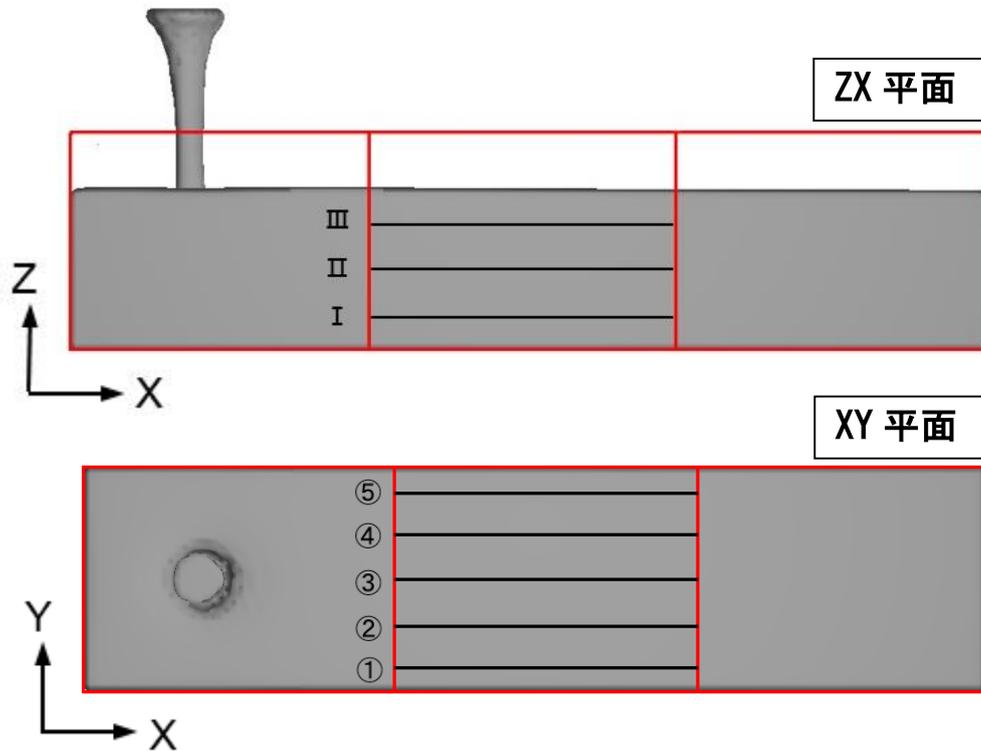


図 4-4 曲げ試験体の評価対象平面

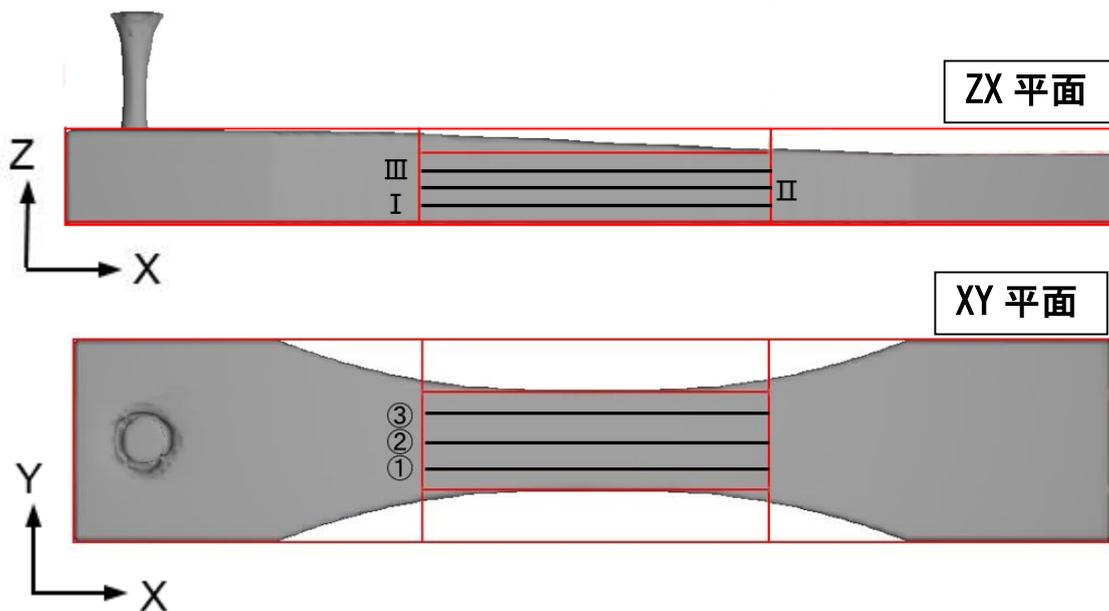


図 4-5 引張試験体の評価対象平面

## 4.5 解析結果

曲げ試験体における  $|\theta_f - \theta_v|$  と  $\Delta v$  の関係を図 4-6 に、引張試験体における同関係を図 4-7 に示す。曲げ試験体では速度差 0.0005m/s ごと、引張試験体では 0.0015m/s ごとにデータをグループ化し、各グループでの平均値および標準偏差を計算した  $|\theta_f - \theta_v|$  と  $\Delta v$  の関係を図 4-8 および図 4-9 に示す。プロット点は解析データの平均値を、上下誤差棒は±標準偏差を示す。

図 4-8 より曲げ試験体では、打込み時間が長くなるほど流体速度の大きさの差  $\Delta v$  の分布は小さくなる。打込み時間が短い場合でも流体速度の差は 3~4mm/s 程度である。XY 平面、ZX 平面ともほぼ右下がりの傾向がみられ、流体速度の差が大きいほど  $|\theta_f - \theta_v|$  の値が小さい、すなわち流動方向に繊維が配向する傾向があるものと考えられる。XY 平面では型枠底面に近いほど、ZX 平面では型枠側面に近いほど  $|\theta_f - \theta_v|$  の値が小さく、ウォールエフェクトによるものであると考えられる。

図 4-9 より引張試験体では、打込み時間が短い場合には流体速度の差は 12mm/s 程度である。引張試験体中央のくびれ部分において速度差が大きくなっているものと考えられる。しかしながら、XY 平面においては、 $\Delta v$  の分布による  $|\theta_f - \theta_v|$  の値に曲げ試験体のような傾向はみられず、最大でも繊維角度の差は 20~30°であった。また、型枠の位置による影響も小さい。ZX 平面では右下がりの傾向がみられるが、ウォールエフェクトは大きくない。

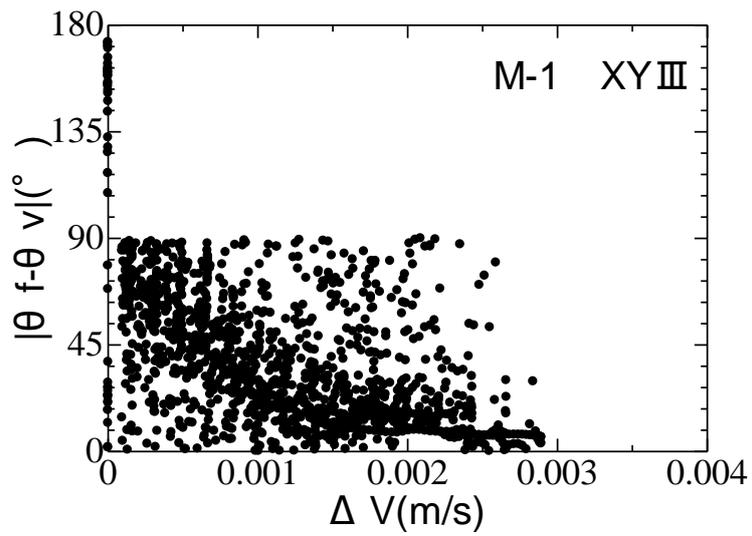
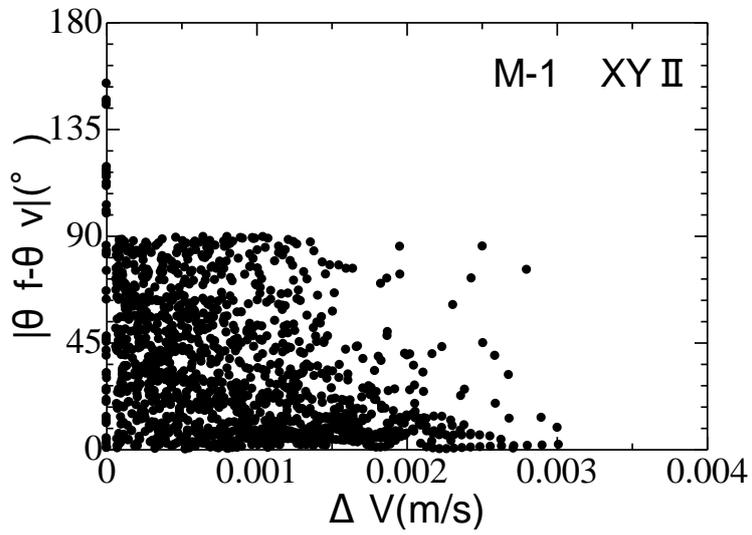
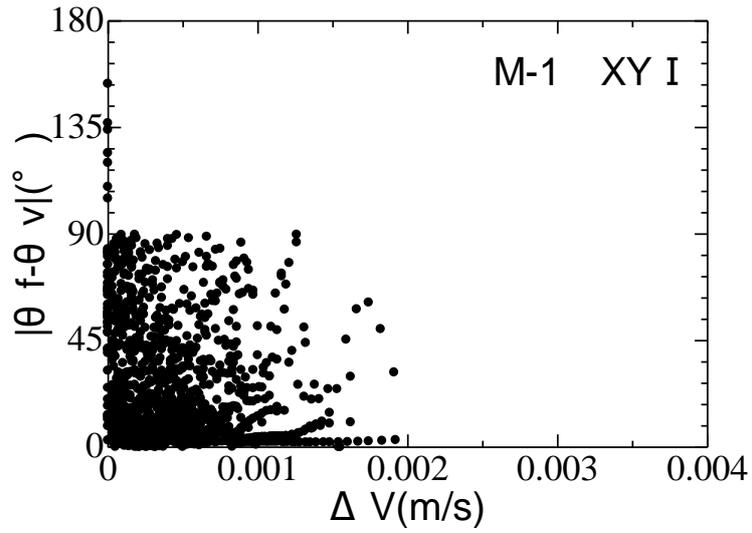


図 4-6 (a) 曲げ試験体の解析結果

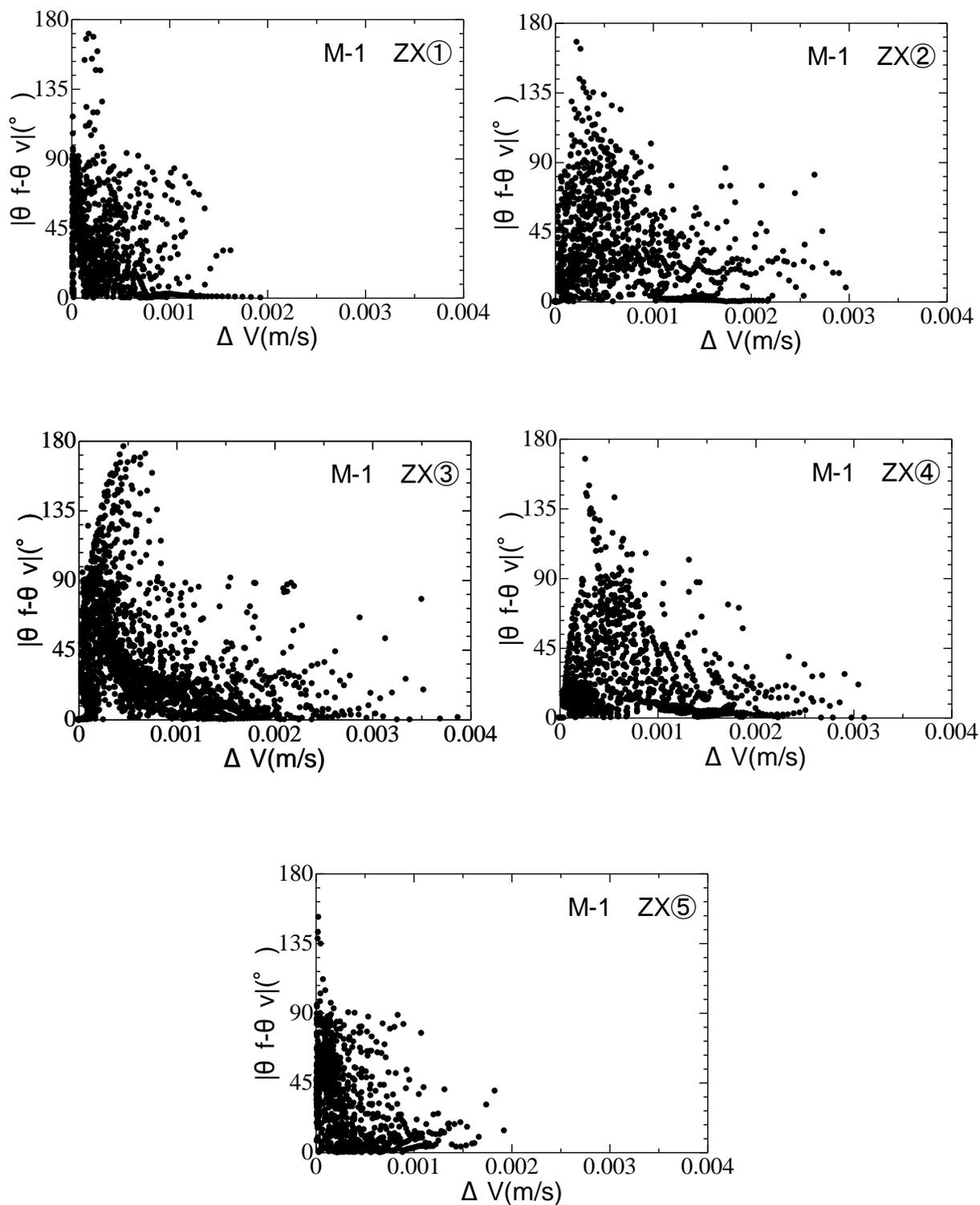


図 4-6 (b) 曲げ試験体の解析結果

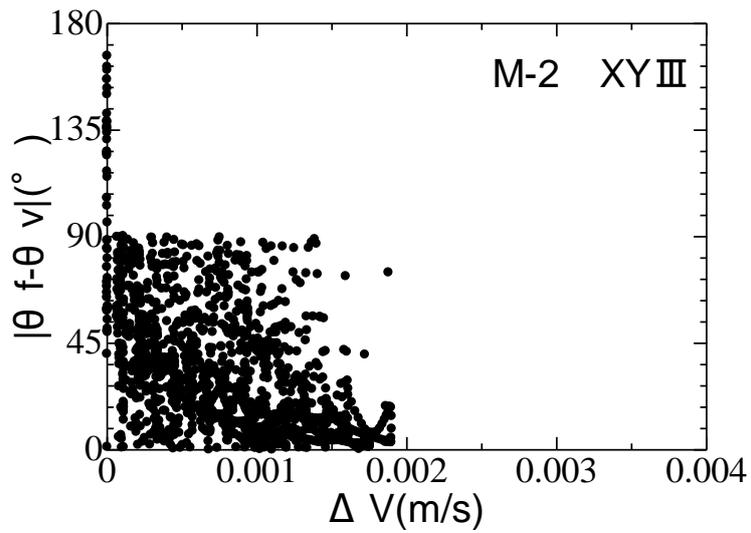
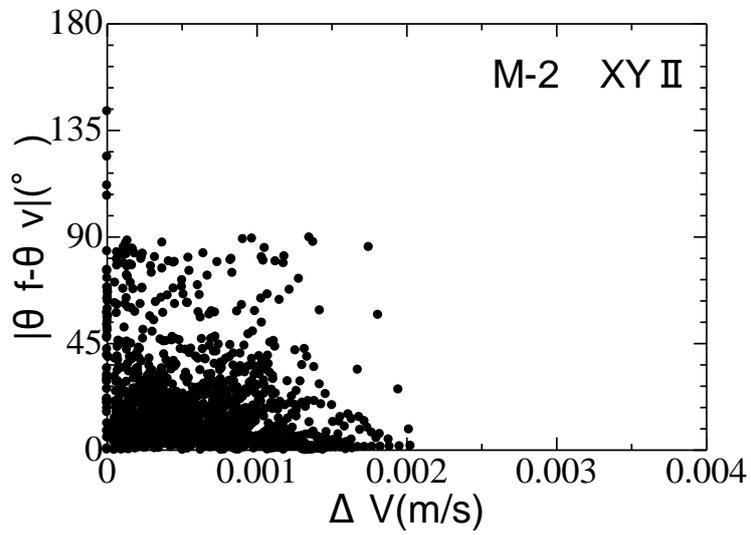
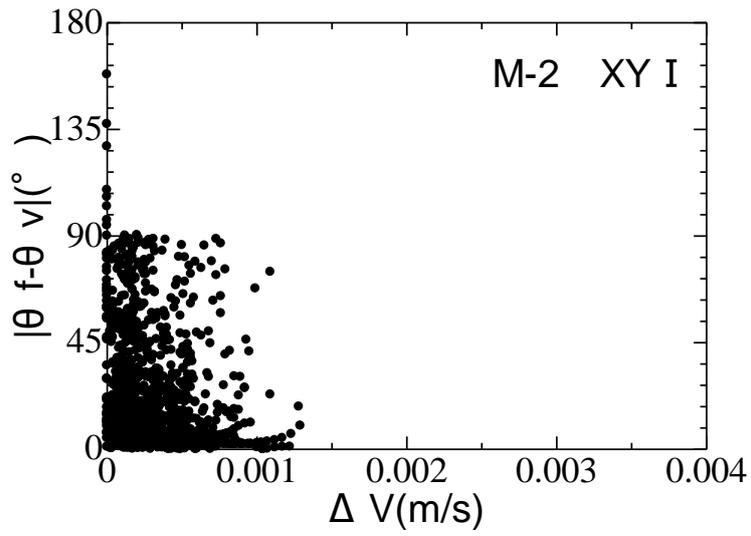


図 4-6 (c) 曲げ試験体の解析結果

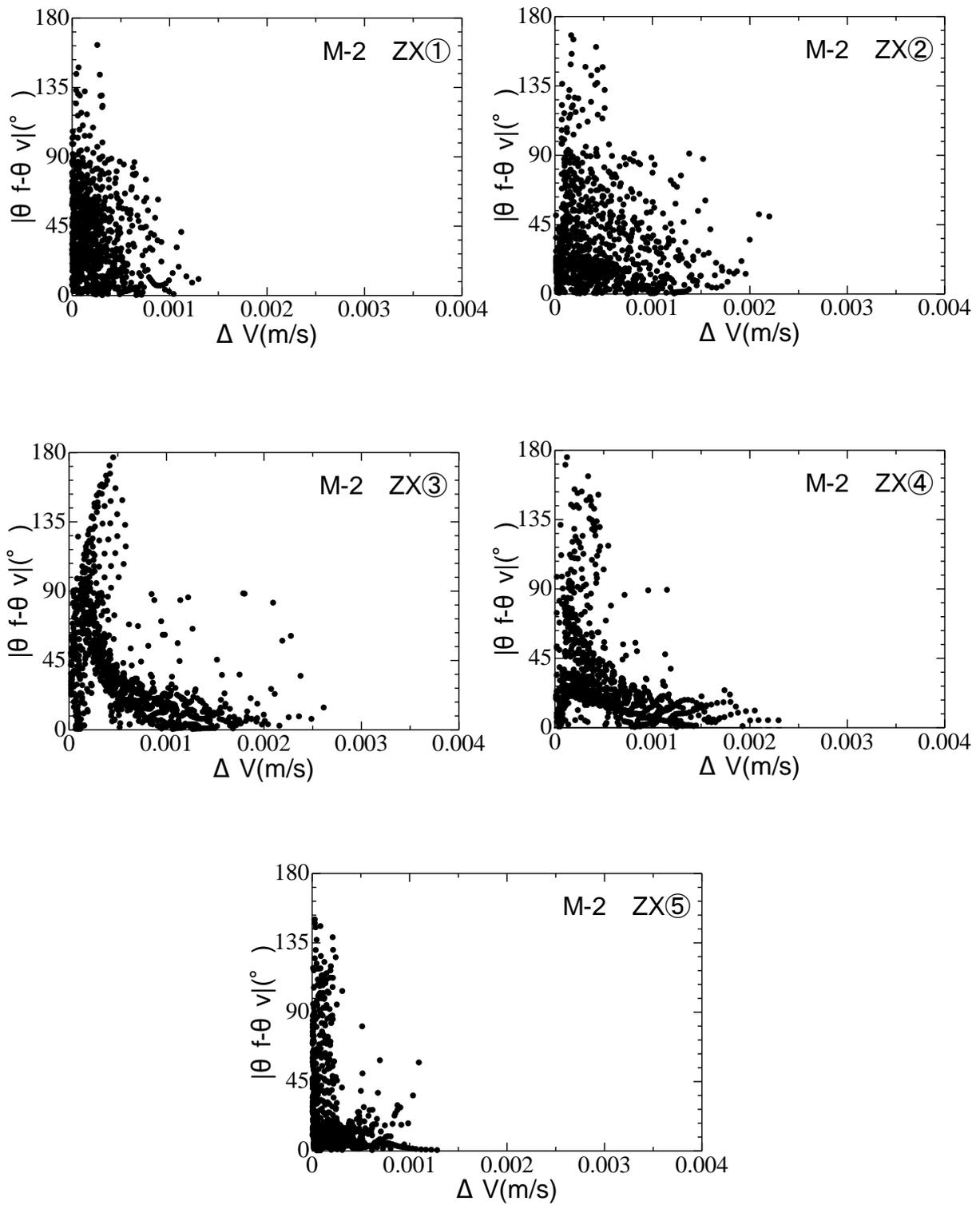


図 4-6 (d) 曲げ試験体の解析結果

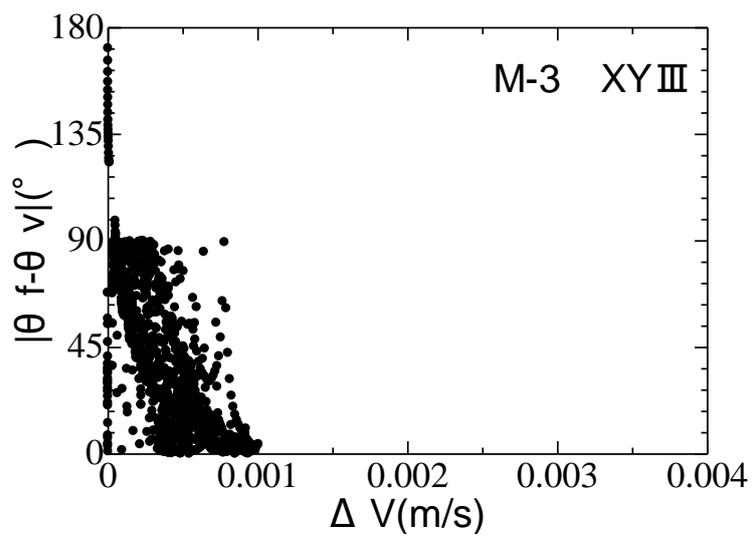
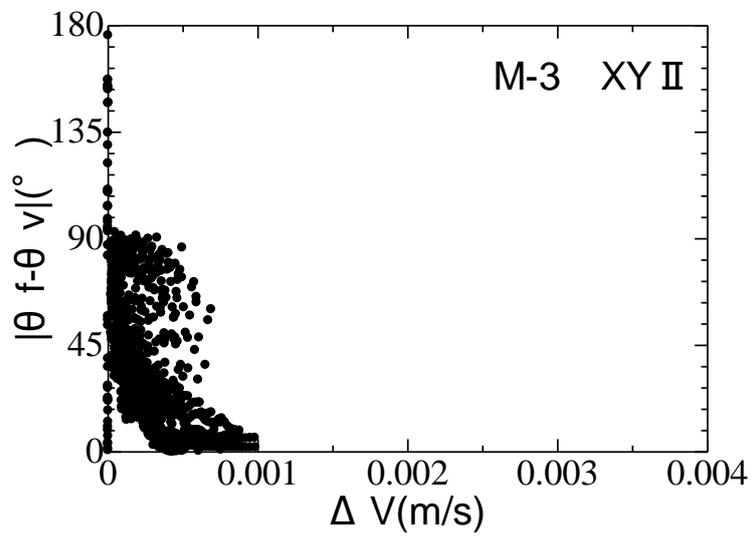
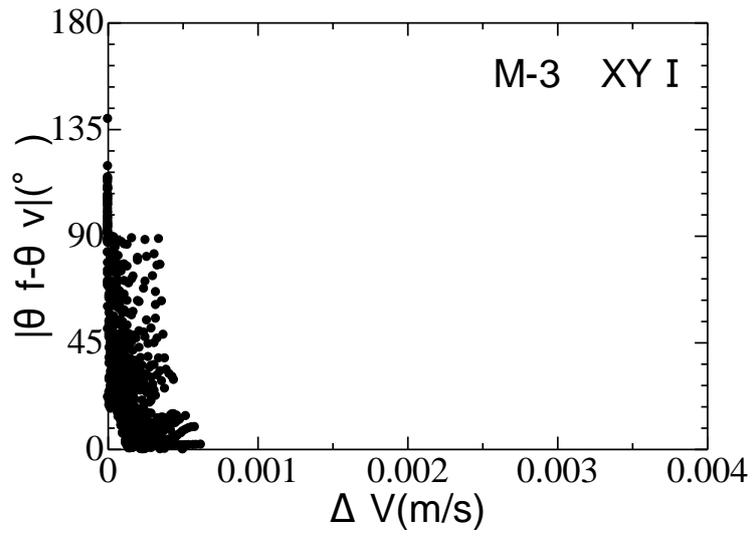


図 4-6 (e) 曲げ試験体の解析結果

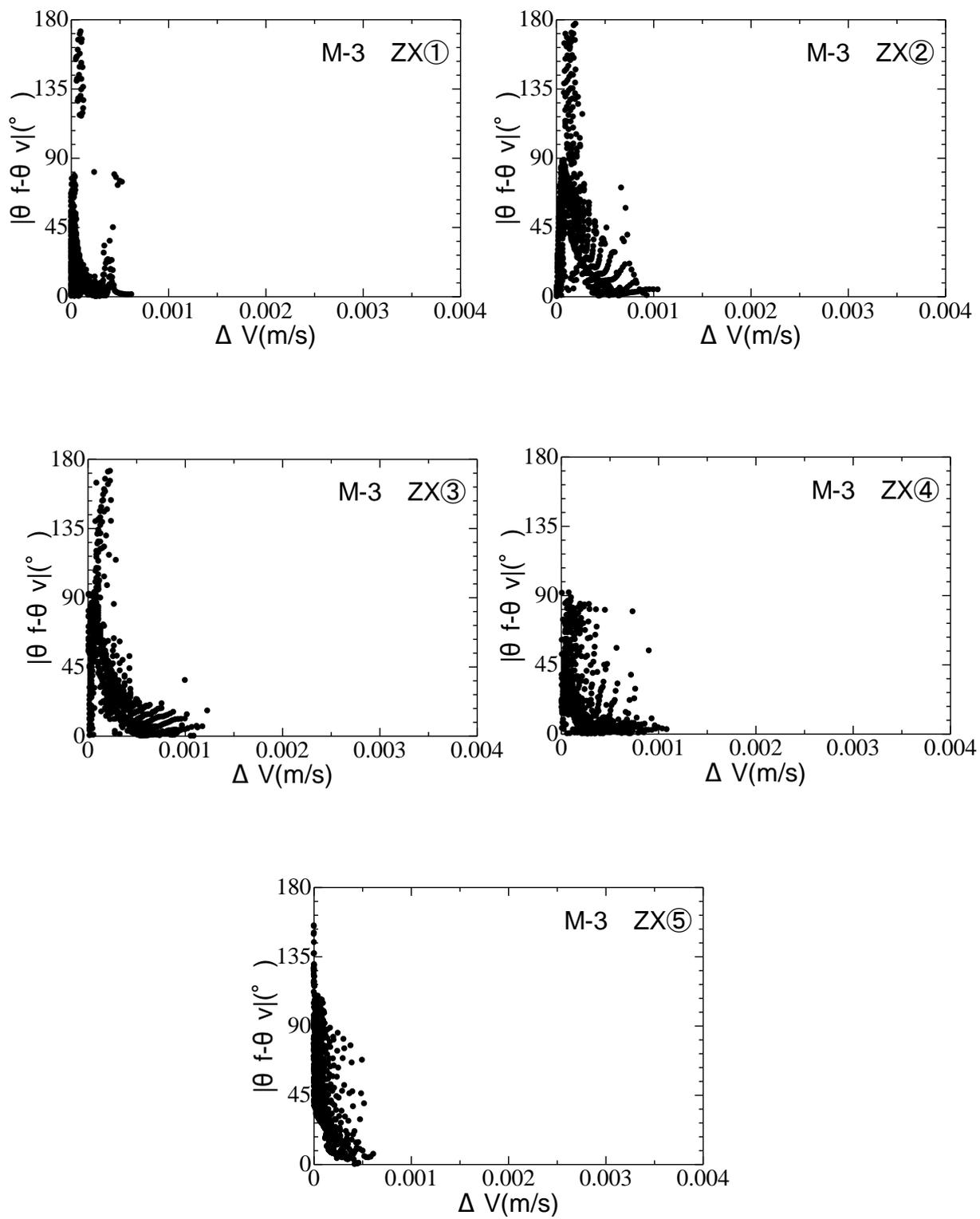


図 4-6 (f) 曲げ試験体の解析結果

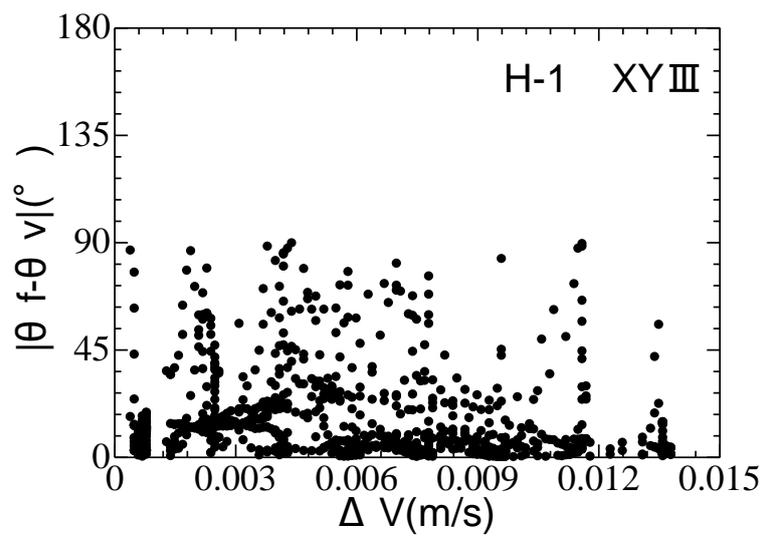
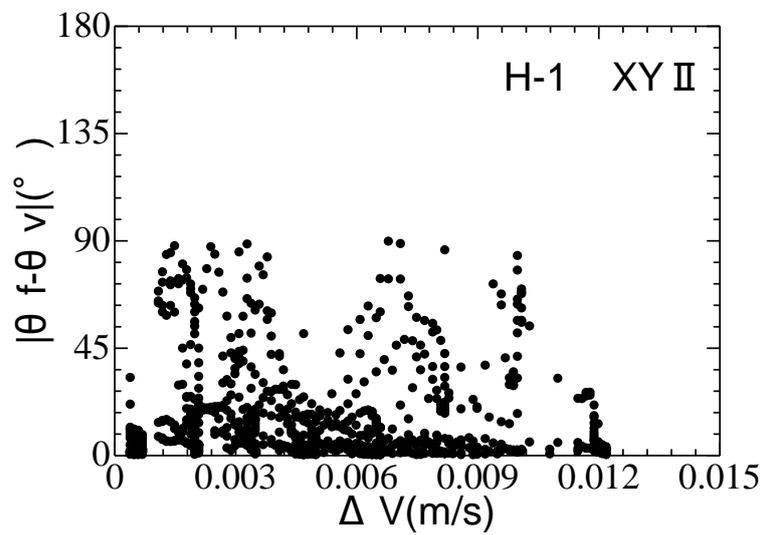
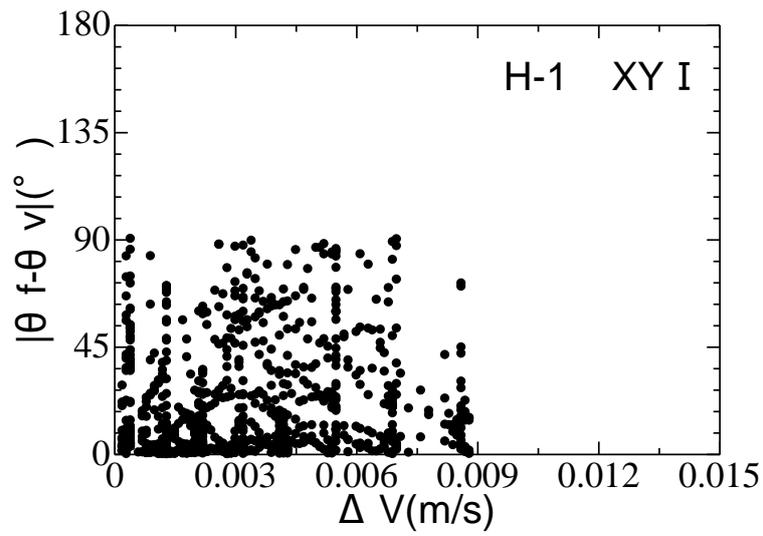


図 4-7 (a) 引張試験体の解析結果

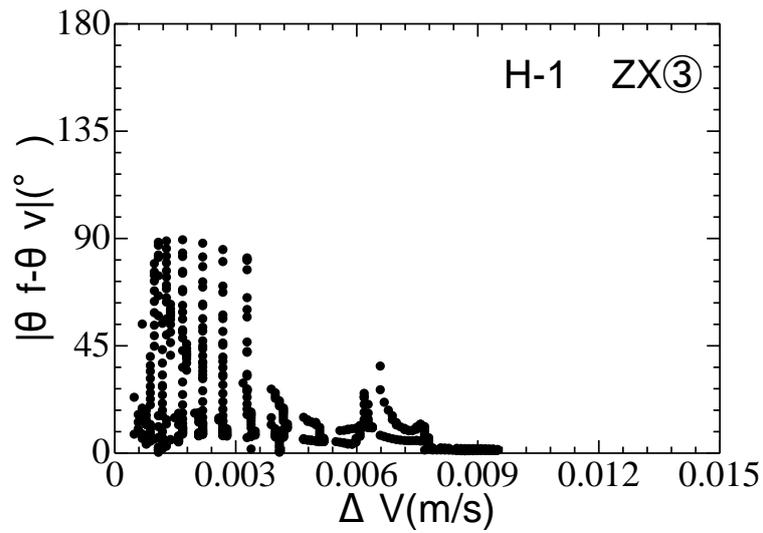
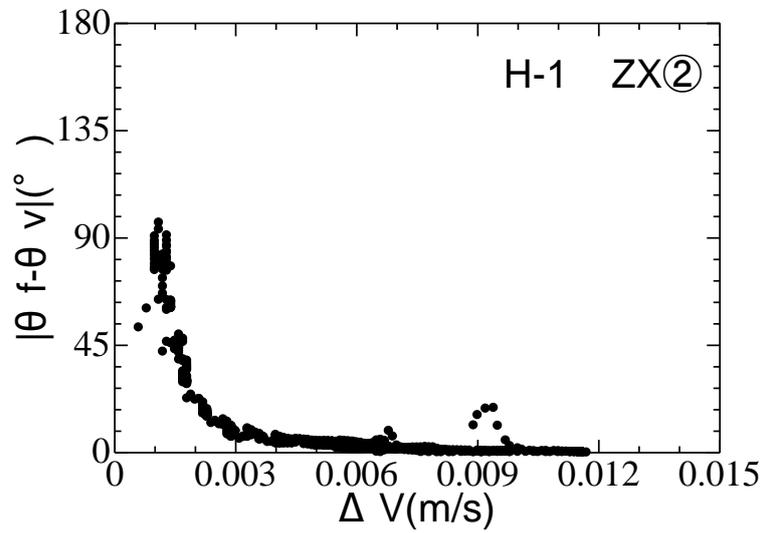
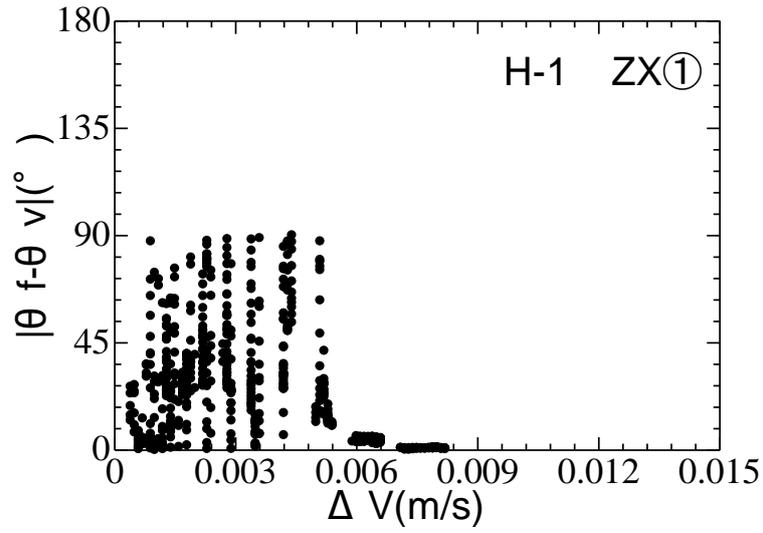


図 4-7 (b) 引張試験体の解析結果

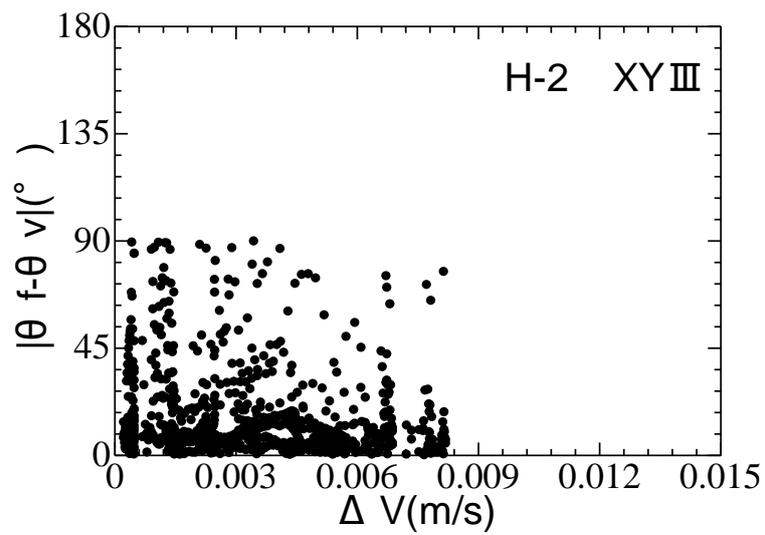
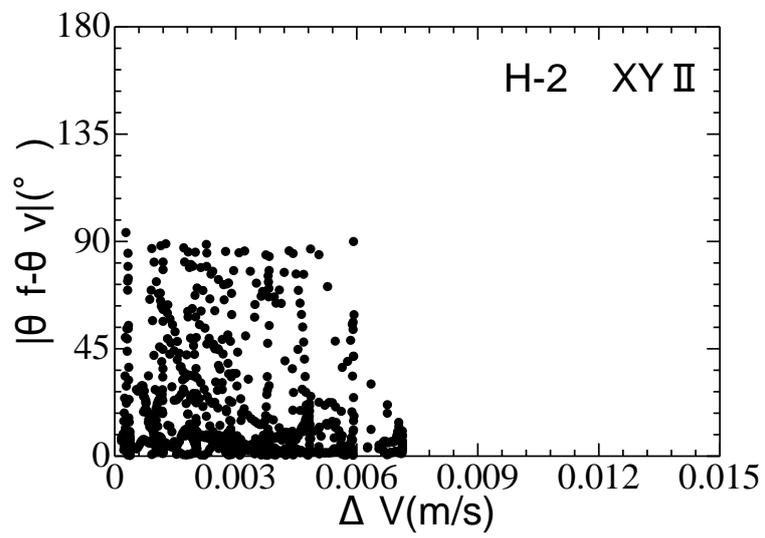
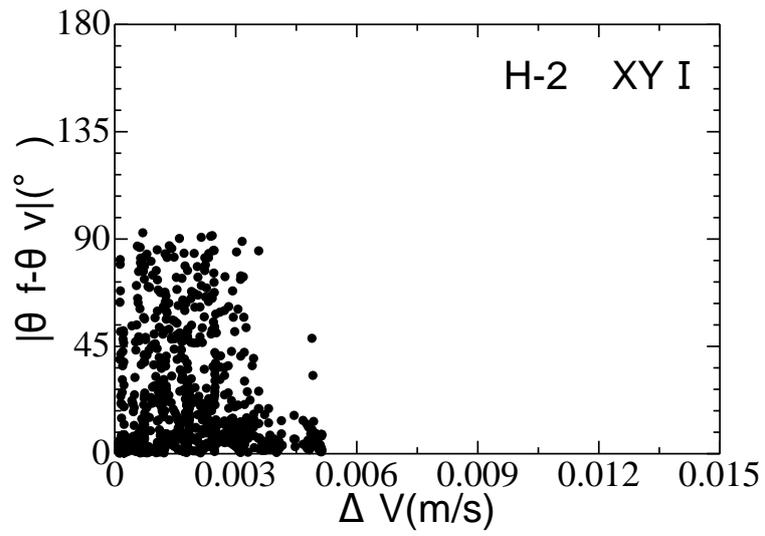


図 4-7 (c) 引張試験体の解析結果

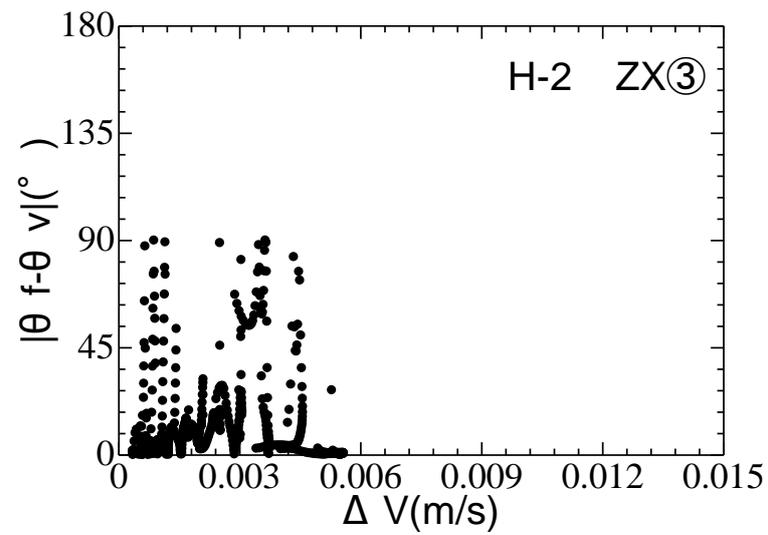
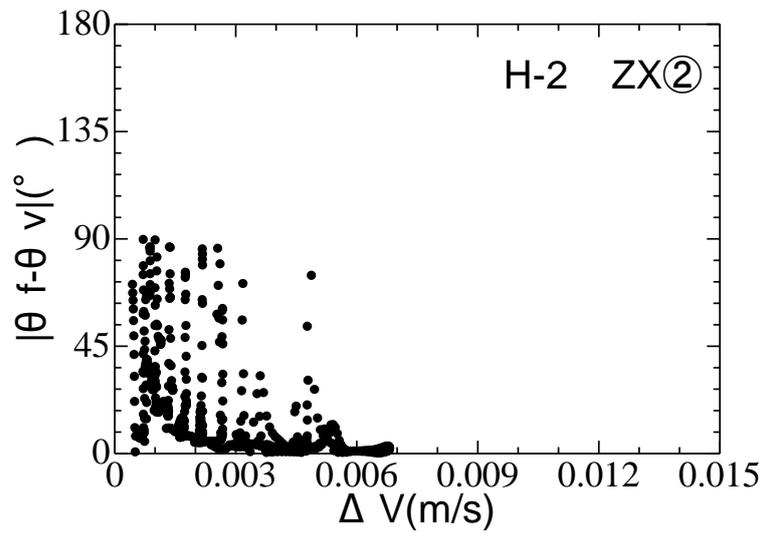
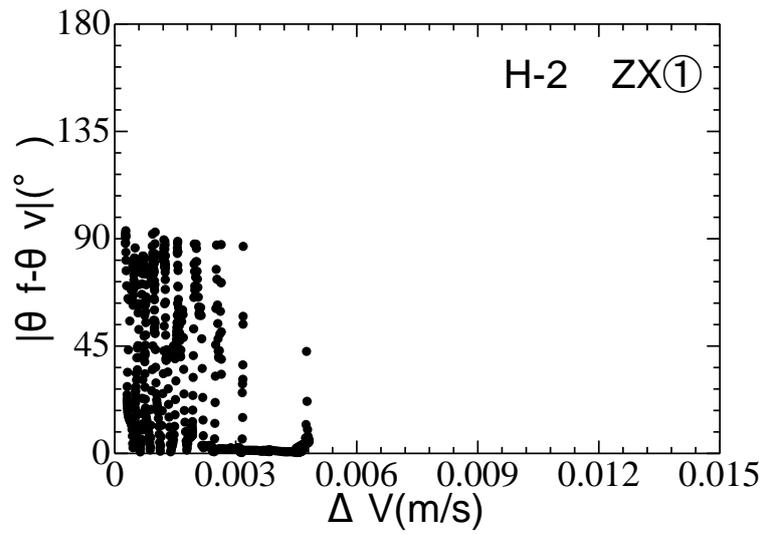


図 4-7 (d) 引張試験体の解析結果

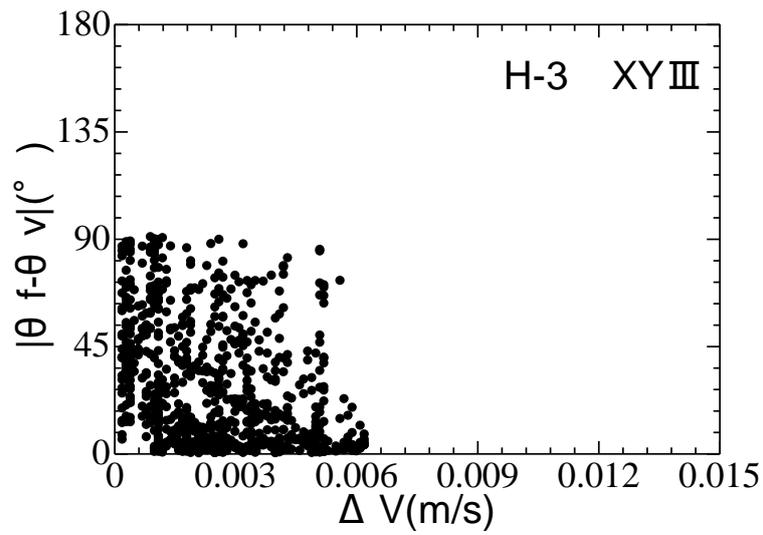
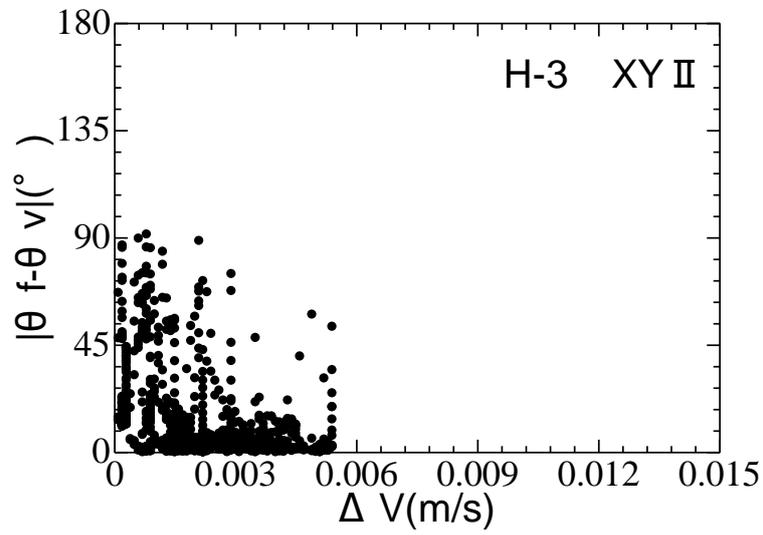
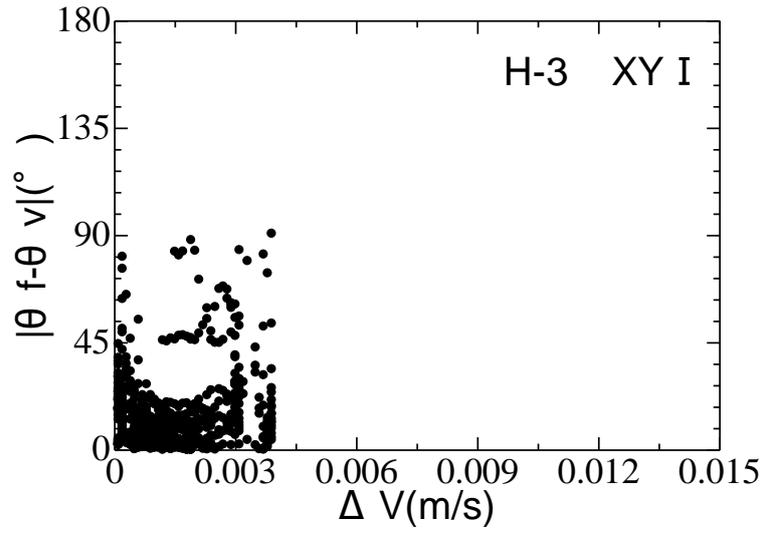


図 4-7 (e) 引張試験体の解析結果

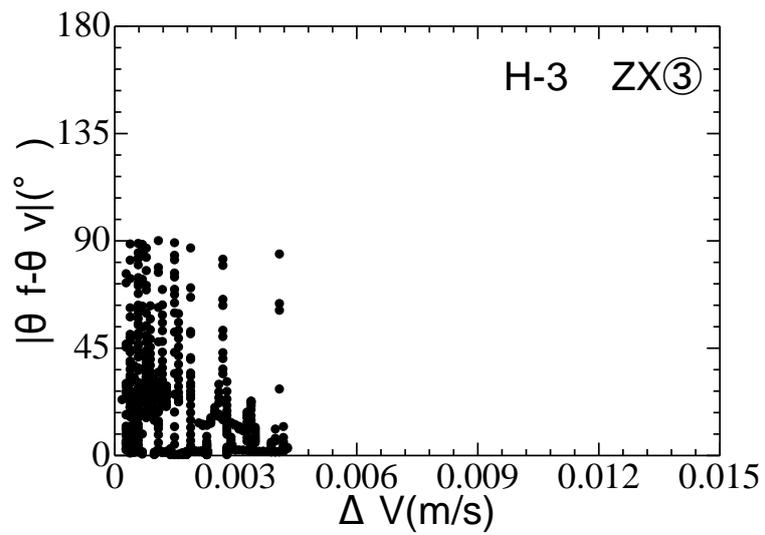
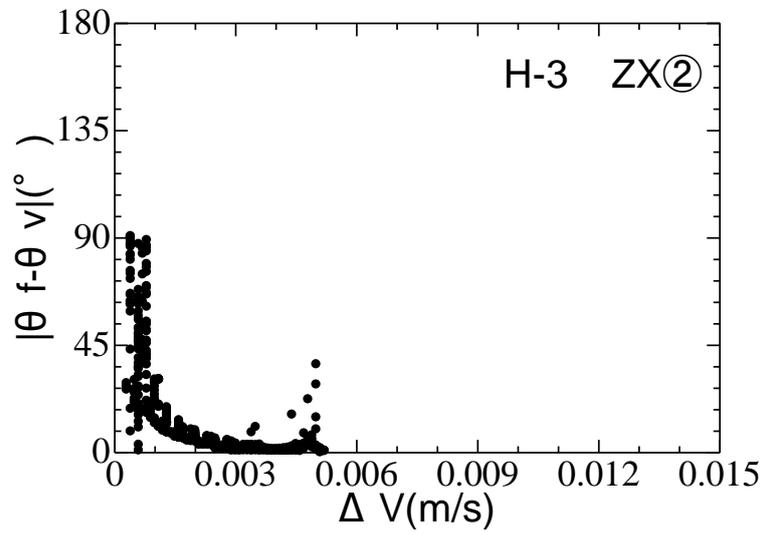
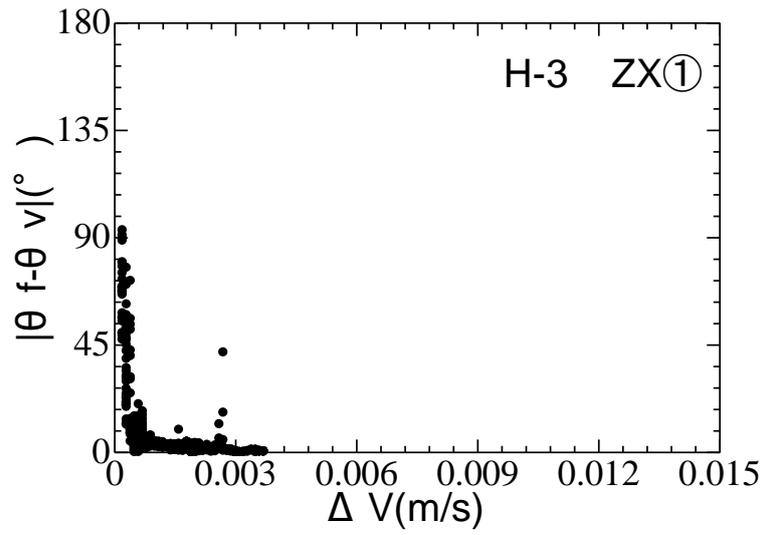


図 4-7 (f) 引張試験体の解析結果

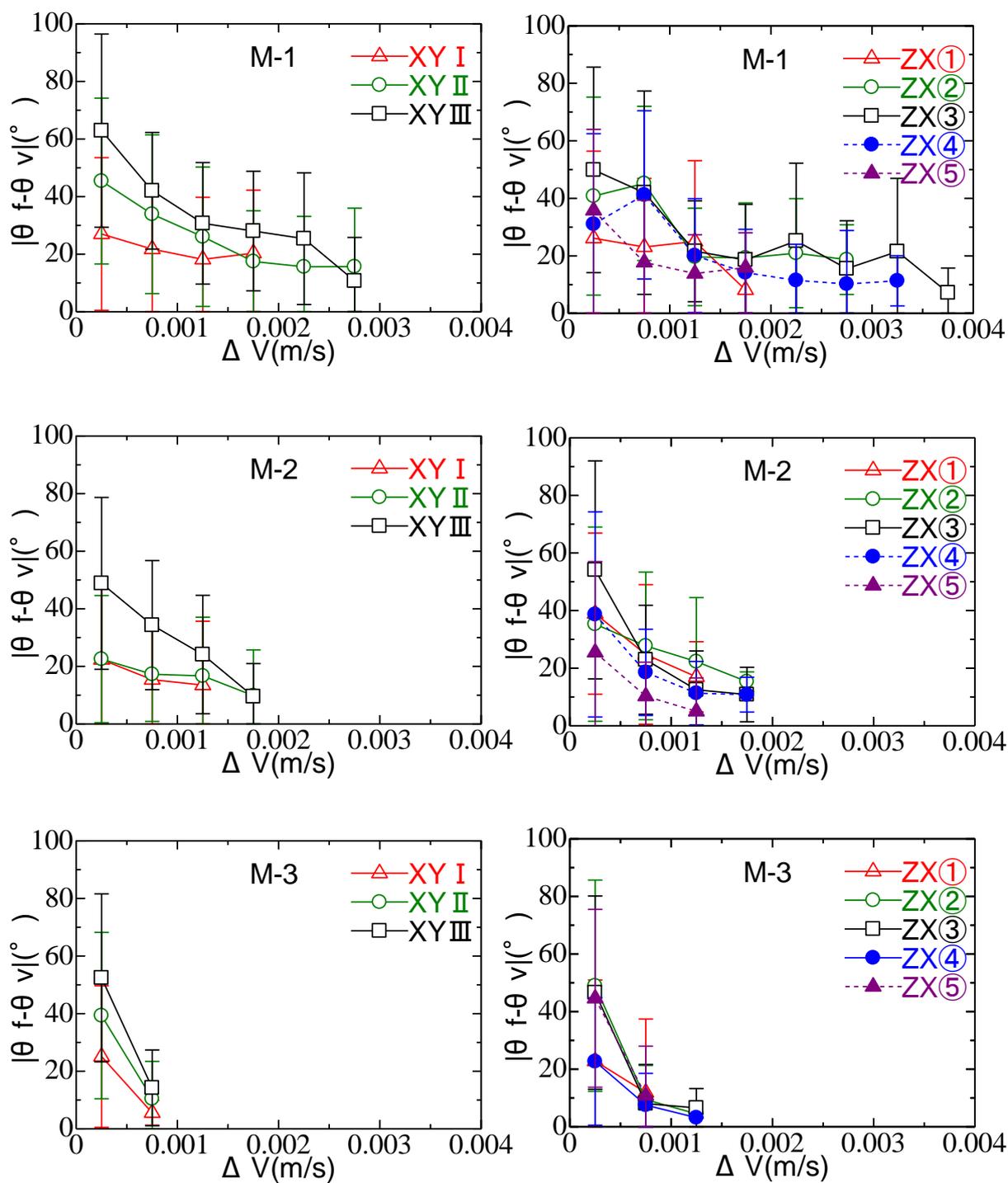


図 4-8 曲げ試験体の解析結果

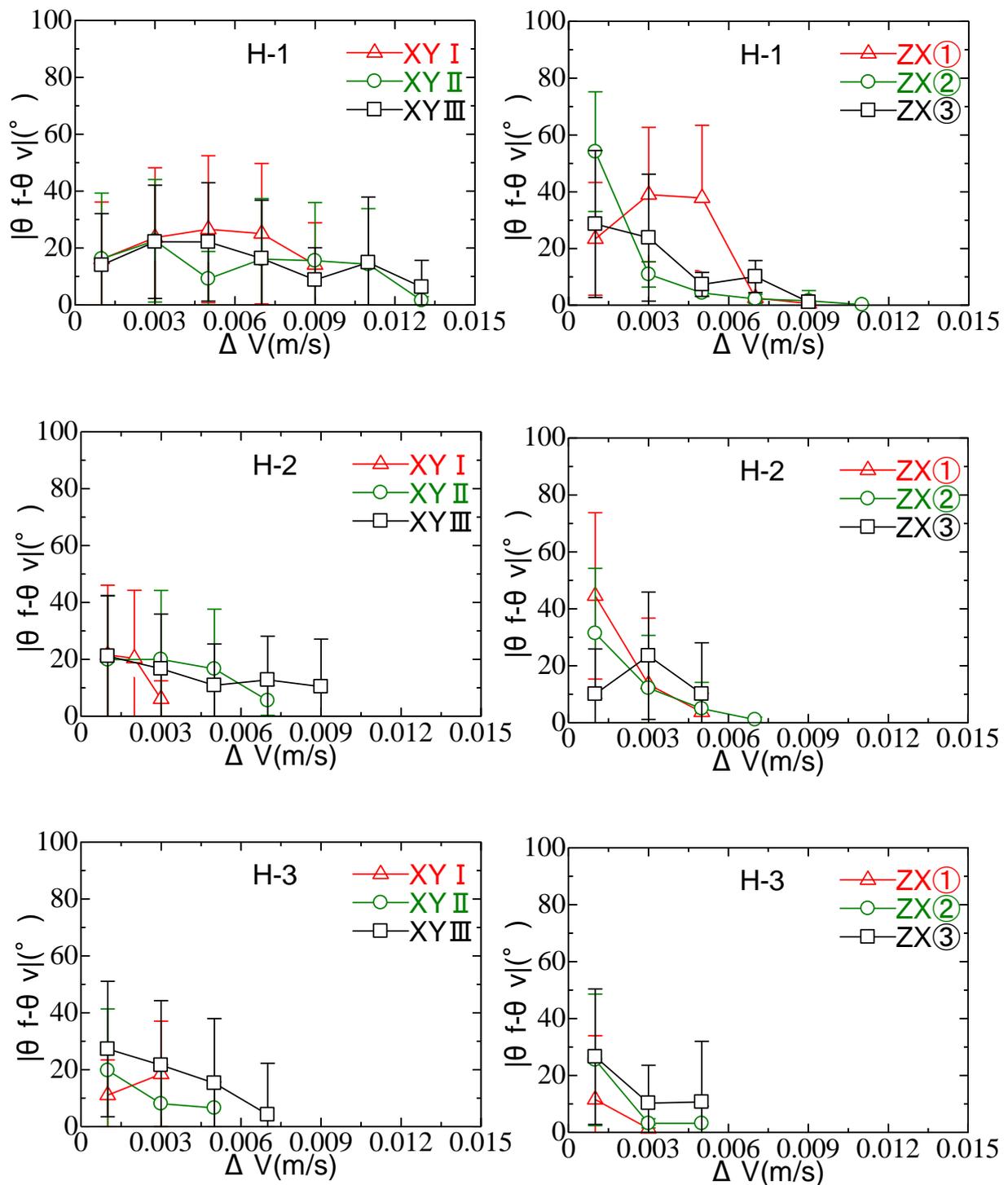


図 4-9 引張試験体の解析結果

## 4.6 まとめ

曲げ試験体および引張試験体を対象として、打込み時間を因子とした解析を行い、流体速度と繊維配向角の関係を検討した。検討の結果、以下の知見が得られた。

- (1) 曲げ試験体では、計算メッシュの流体速度の大きさの差 $\Delta v$ が大きくなるほど、平均流動方向 $\theta_v$ と繊維配向角 $\theta_f$ との差である $|\theta_f - \theta_v|$ の値が小さくなり、流動方向に沿う繊維の配向性が強まる傾向があった。ウォールエフェクトも確認できた。
- (2) 引張試験体では、最大でも $|\theta_f - \theta_v|$ の値は $20\sim 30^\circ$ であった。試験体の形状の違いにより、繊維の配向性が影響を受けると考えられる。

## 第5章 結論

本研究では、HPFRCCにおける繊維配向性の把握を目的として、型枠のサイズ、打込み時間などをパラメータとし、計算機による繊維の配向挙動の解析を行った。試験体の形状が繊維配向性に与える影響、および打込み速度の差異による流体速度差と繊維配向角の関係を検討した。

試験体のサイズ、形状および打設方向が繊維配向性に与える影響について、

- (1) 角柱である曲げ試験体および中央部にくびれを有する引張試験体の両者において、横打ちの方が縦打ちに比べてより流動方向に対して強く繊維が配向することを確認した
- (2) 張試験体では曲げ試験体に比べ、横打ちと縦打ちの配向強度の違いが顕著であった。
- (3) 解析における横打ちの配向強度は、水ガラスによる可視化実験の結果より2倍以上大きく、縦打ちの場合は実験結果より小さくなっている。本解析では繊維同士の接触および繊維の流動が流体に及ぼす影響を考慮できないことが理由として考えられる。

打込み時間が繊維配向性に与える影響について、

- (1) 曲げ試験体では、計算メッシュの流体速度の大きさの差 $\Delta v$ が大きくなるほど、平均流動方向 $\theta_v$ と繊維配向角 $\theta_f$ との差である $|\theta_f - \theta_v|$ の値が小さくなり、流動方向に沿う繊維の配向性が強まる傾向があった。ウォールエフェクトも確認できた。
- (2) 引張試験体では、最大でも $|\theta_f - \theta_v|$ の値は $20\sim 30^\circ$ であった。試験体の形状の違いにより、繊維の配向性が影響を受けると考えられる。

今後の課題として、繊維配向性を評価するため、様々な断面形状を有する試験体および打込み方法を変化因子とする解析を行う必要があると考えられる。

# 謝辞

本論文は、筆者が筑波大学大学院博士課程システム情報工学研究科の大学院生として、在学中の3年間に行った研究の成果をまとめたものです。

本論文を作成するにあたり、多くの方々のご指導、ご協力を頂きました。指導教員であります筑波大学准教授金久保利之先生には、研究に着手する際から論文推敲に至るまで、終始懇切丁寧なご指導を賜りました。ここに心より深く感謝の意を表します。副指導教員であります筑波大学教授境有紀先生、筑波大学助教八十島章先生、筑波大学技官小島篤志先生には、研究に対する有益なご意見を頂きましたことを心より感謝致します。

本研究は、筑波大学金久保研究室の多くの学生のご協力の下に行われました。多くの時間を共有し、切磋琢磨し合った仲間である余劍華氏、牟雨氏、佐野直哉氏、墨野倉駿氏、宮口大氏、村井凌氏、郝帥氏、藻川哲平氏、山田大氏、渡邊啓介氏、大冢友梨子氏、安藤麻衣氏、掛川萌子氏、佐野達彦氏、橋本裕子氏、橋本京介氏、に心から感謝致します。金久保研究室の卒業生である浅野浩平氏、張偉氏、佐野貴之氏、木村太一氏、鈴木健二氏、月崎良一氏、五十嵐大騎氏、管祥瑋氏、岡崎仁美氏、武田惇志氏、高田怜史氏には数々の御協力を頂きました。ここに感謝の意を表すると共に、今後のご活躍を期待しております。

最後に、私事で誠に恐縮ではありますが、大学院での生活および研究活動を常に温かく支えて下さった家族に改めて深く感謝すると共に、今後の成長を見守って頂きたいと存じます。

2016年1月  
万 子銘

## 参考文献

- 1) Li, V. C. , Mohamed Maalej: Toughening in Cement Based Composites, Part II: Fiber Reinforced Cementitious Composites, Journal of Cement and Concrete Composites, Vol. 18, No. 4, pp. 239 - 249, 1996
- 2) 高靱性セメント複合材料の性能評価と構造利用研究委員会報告書（Ⅱ），日本コンクリート工学協会，2004.5
- 3) 丸田誠，閑田徹志，永井覚，山本幸正：プレキャスト ECC 連結梁を用いた高層 RC 新架構，コンクリート工学，Vol.43, No.11, pp.18-26, 2005.11
- 4) 浅野浩平，金久保利之：HPFRCC における繊維の配向性が引張性状に及ぼす影響－繊維配向角分布の評価と曲げ性状における寸法効果，日本建築学会構造系論文集，第 78 巻，第 692 号，pp.1673-1678, 2013.10
- 5) Mampaey, F. and Xu, Zhi-An: Simulation and Experimental Validation of Mould Filling, Proc. Modeling of Casting, Welding and Advanced Solidification Processes VII, London, September 10-12, p.3, 1995
- 6) 株式会社テラバイト，<http://www.terabyte.cn/flow3dcast-3-j.html>，2015
- 7) Hirt, C.W. and Nichols, B.D.: Volume of Fluid (VOF) Method for the Dynamics of Free Boundaries, Journal of Computational Physics 39, 201, 1981.
- 8) VOF (volume of fluid) method, <http://www.cradle-cfd.com/tec/column02/003.html>，2015
- 9) 金久保利之，浅野浩平：高性能繊維補強セメント複合材料における繊維の配向性に関する研究，日本建築学会梗概集，材料施工，pp.691-692, 2013.8
- 10) 株式会社テラバイト，FLOW-3D 繊維配向モジュール，2015
- 11) 宮口大：HPFRCC における繊維混入率と打設方向が繊維配向性に与える影響，筑波大学工学システム学類卒業論文，2014.3