

# 風荷重が作用する枠組足場の片方向FSI解析

## One-Way FSI Analysis of Prefabricated Scaffolds under Wind Loads

多湖拓海<sup>1)</sup>, 磯部大吾郎<sup>2)</sup>

Takumi Tago and Daigoro Isobe

1) 筑波大学大学院 (〒305-8573 茨城県つくば市天王台1-1-1, E-mail: s2120868@s.tsukuba.ac.jp)

2) 博(工) 筑波大学 教授 (〒305-8573 茨城県つくば市天王台1-1-1, E-mail: isobe@kz.tsukuba.ac.jp)

In this paper, numerical evaluation on displacement of prefabricated scaffolds and axial force of wall ties are conducted under assumed wind loads based on fluid analysis and the safety technical guidelines of prefabricated scaffolds. OpenFOAM, which is an open-source numerical solver, is used for fluid analysis. The Adaptively Shifted Integration (ASI)-Gauss code, which can stably calculate nonlinear phenomena such as member fracture, is used as a structural analysis code in this research. As a result, assumed wind loads based on fluid analysis induced more complicated behavior in prefabricated scaffolds.

**Key Words :** Prefabricated Scaffolds, Wind Loads, ASI-Gauss Code, OpenFOAM

### 1. 序論

建設・解体現場の足場は、建物に近接して容易に作業を行えるように、多くの現場で設置されている。足場には多くの場合、養生シートや防音パネルが取り付けられている。しかし、シート類によって風の受圧面積が増加することで足場の風荷重が増大し、足場を建物壁面に固定している壁つなぎが引き抜かれ倒壊するという事例が起きている[1]。

風荷重に対する足場の安全技術指針[2]には、足場に作用する風荷重の算定方法が示されているが、風が足場の側面側から作用するような複雑な問題については不明瞭な点が多く、そのような場合の定性的に正確な風荷重を得ることは足場の安全性向上に際して極めて重要であると考えられる。

そこで本研究では、一般的によく用いられている枠組足場に対し流体解析を行い、枠組足場に作用する風荷重を算出する。流体解析から得られた分布に基づいて仮定した風荷重と、風荷重に対する足場の安全技術指針をもとに得られた風荷重をそれぞれ外力とし構造解析を行い、枠組足場の変位および壁つなぎの軸力を比較する。流体解析には、オープンソースの流体解析ソルバーであるOpenFOAM[3]を用いる。構造解析には、最小限の要素分割で大規模構造物を解析することが可能であるASI-Gauss法[4]を用いる。

### 2. OpenFOAMによる流体解析

#### (1) 解析モデル

解析形状の作成にはFreeCAD[5]を用いた。作成した解析形状を図-1に示す。解析対象の枠組足場は5層4スパンとし、防音シートが取り付けられているものとした。枠組足場と建物の間は250 [mm]とし、シート部分の厚さは2 [mm]とした。作成した解析形状にOpenFOAMでメッシュ

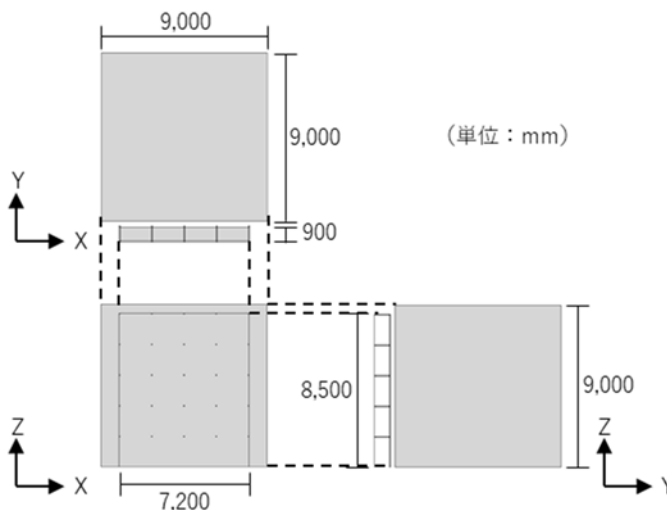


図-1 解析形状

化を施す。解析領域は15,000[mm]×15,000[mm]×15,000[mm]とした。総メッシュ数は37,648,304である。

#### (2) 解析条件

地表面および解析モデル表面は滑りなし条件とし、解析領域上面および側面は対称条件としている。流入条件には、次式のような風速の高さ方向分布[6]を導入している。

$$V_z = V_0 \left( \frac{z}{z_0} \right)^\alpha \quad (1)$$

$V_z$ は高さ $z$  [m]における風速 [m/s]である。 $z_0$ ,  $V_0$ ,  $\alpha$ はそれぞれ基準高さ[m],  $z_0$  [m]における風速 [m/s], 風速の高さ方向分布を表す指数である。本解析では、基準高さを $z_0 = 10$  [m]とし、 $V_0 = 20$  [m/s]とする。指数 $\alpha$ は4~9階の中層建築物が主となる地域を仮定して $\alpha = 0.27$ とする。流入方向は、X軸正方向に向かって流入、すなわち枠組足場の側面側から流入することとした。乱流モデルは標準 $k - \epsilon$

$\epsilon$ モデル, 時間増分は0.001 [s], 解析時間は1 [s]とし, 非常乱流解析を実施した.

### (3) 解析結果

枠組足場のシート前面および背面からそれぞれ1 [mm] 離れた面での2 [s]時における圧力分布を図-2に示す. 図-2(a)から, 枠組足場のシート前面では, 風上側で大きな負圧が生じている. 中央部分では, 上層では負圧, 下層では正圧が生じている. 風下側では, 負圧が生じている. 一方, 図-2(b)から, 枠組足場のシート背面では, どの部分でも負圧が生じているが, 風上側において特に大きな値となっている.

前面と背面を合わせて考えると, 風上側においては, 負圧が背面より前面の方が大きい. 足場が建物から引きはがされる方向に風荷重が作用する. 中央部の上層では, 負圧が背面より前面の方が大きい. 足場が建物から引きはがされる方向に風荷重が作用するが, 中央部下層では, 前面に正圧, 背面に負圧が生じるため, 足場が建物側に押される方向に風荷重が作用する. 風下側では, 前面と背面の負圧の差が小さいため, 作用する風荷重の大きさは風上側よりも小さくなる.

## 3. ASI-Gauss法による構造解析

### (1) 解析モデル

枠組足場には多くの部材が用いられているが, 本研究では, 足場の強度に寄与していると考えられる建柱, 床付き布柱, 交差筋交い, 壁つなぎのみをモデル化した. 建柱は, 足場の構造に対し柱の役割を担う部材であり, 脚柱, 横架材および補剛材を溶接したものである. 床付き布柱は, 建柱間に渡し, 作業床となるものである. 壁つなぎは, 足場を建物壁面に固定させるものであり, アンカーを介して固定されている.

枠組足場全体の解析モデルを図-3に示す. 解析対象の枠組足場は, 5層4スパンの枠組足場とする. 各部材の詳細な寸法は各メーカーによって異なるため, 解析モデルを作成する際には既存の研究[7]で用いられていた寸法および規格[8]を参考にした. 建柱と床付き布柱, 建柱と交差筋交い, 建柱と壁つなぎの結合部はピン接合とし, 壁つなぎの主材と取付金具の場合と同じ方法で模擬した.

防音シートはモデル化していないが, シートの単位面積当たりの質量を1.2 [kg/m<sup>2</sup>]とし, 枠組足場の第1構面側に密度として加えることで重量のみ考慮した. なお, 第1構面とは, 建物から見て外側の面のことである.

壁つなぎの本数は10本とし, 図-4に示すように各層の端部に取り付けた. 壁つなぎの引き抜き条件として, 壁つなぎの取付金具に2,000 [N]の引張軸力が作用したらその要素を破断させることとした[9]. また, 建柱間について

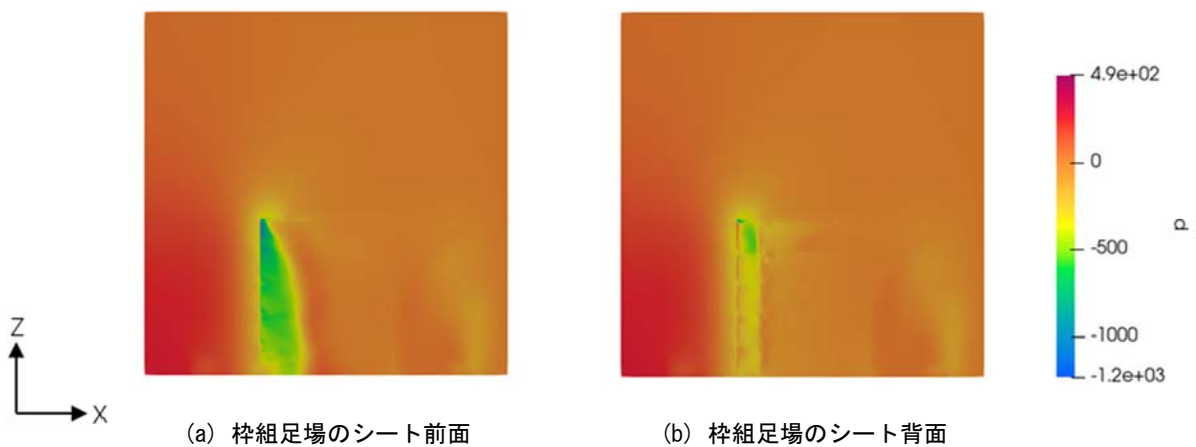


図-2 圧力分布

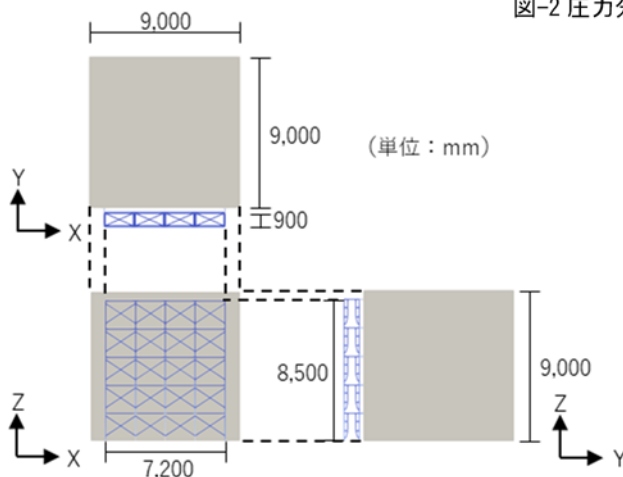


図-3 構造解析モデル

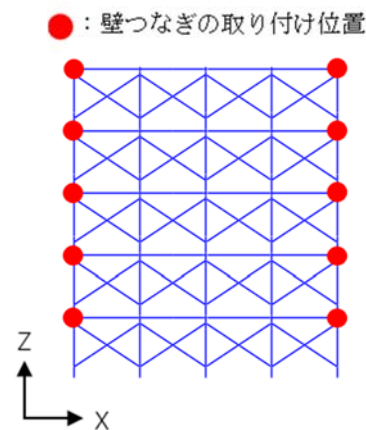


図-4 壁つなぎの取り付け位置

も引き抜きを考慮して、微小要素を用いて脚柱ジョイントを表現し、9,807 [N]の引張軸力が作用したら破断させることとした[10]. 最下層の脚柱下端の拘束条件は最も危険と考えられるピン接合とし、壁つなぎの取付金具は完全固定とした。

## (2) 風荷重の設定

本解析では、桝組足場の第1構面側の脚柱と横架材の交点および最下点の計30点に風荷重を与える。安全技術指針および2 [s]時の流体解析から得られた分布に基づいて仮定した風荷重、各々から得られる風荷重による違いを評価する。足場の安全技術指針をもとに、桝組足場に作用する風荷重 $P$  [N]は次のように求めた。

$$P = Cq_zA \quad (2)$$

$C$ ,  $q_z$ ,  $A$ はそれぞれ風力係数, 速度圧 [N/m<sup>2</sup>], 作用面積 [m<sup>2</sup>]である。速度圧 $q_z$ は次式で与えられる。

$$q_z = \frac{1}{2}\rho V_z^2 \quad (3)$$

ここで、 $\rho$ は空気密度 [kg/m<sup>3</sup>] である。空気密度は大気気圧や温度によって異なるが、ここでは一般的に風荷

重の概算で用いられている $\rho = 1.25$  [kg/m<sup>3</sup>]とする。 $V_z$ は式(1)に従う。

次に、桝組足場の風力係数 $C$ を求める。既存の研究[11]では、風洞実験によって足場全体の平均風力係数 $C$ が風向角に依存することが示されている。既存の研究の風洞実験および仮設工業会が定めている、建物に併設された足場の設置位置による補正係数を参考にし、 $C=0.3$ と決定した。

作用面積 $A$ は、風荷重を加える節点が負担する面積とする。同じ高さにある節点であっても、端部の節点の作用面積はそれ以外の節点の半分となる。

以上から風荷重に対する足場の安全技術指針に基づいた風荷重を算出する。

安全技術指針から算出した風荷重と、流体解析から得られた分布に基づいて仮定した風荷重をそれぞれ外力とし構造解析を行い、桝組足場の変位および壁つなぎの軸力を比較する。各節点に作用する風荷重の大きさおよび向きを矢印で表したものが図-5である。図-5(a)から、安全技術指針から算出した風荷重の大きさは、端部の節点、内部の節点それぞれにおいて、各層ごとに同じ値である。ま

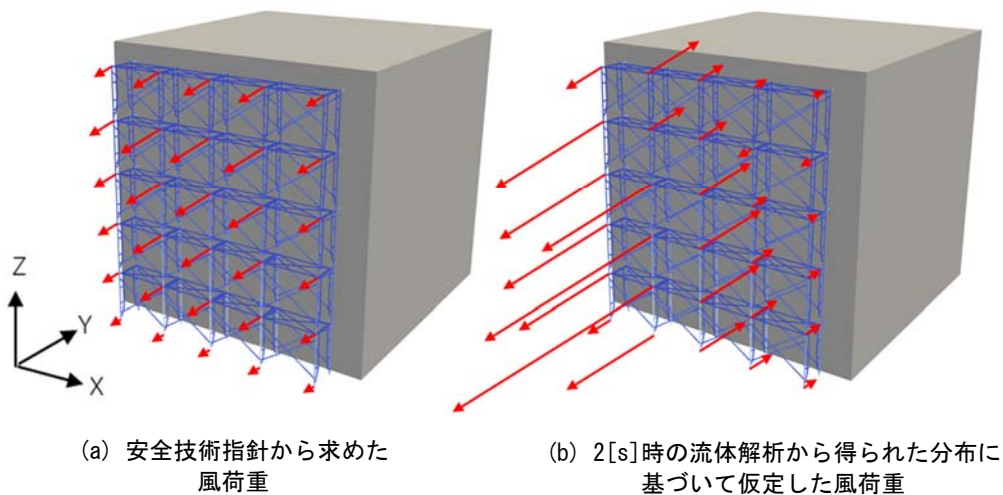


図-5 各節点における風荷重の最大の大きさと向き

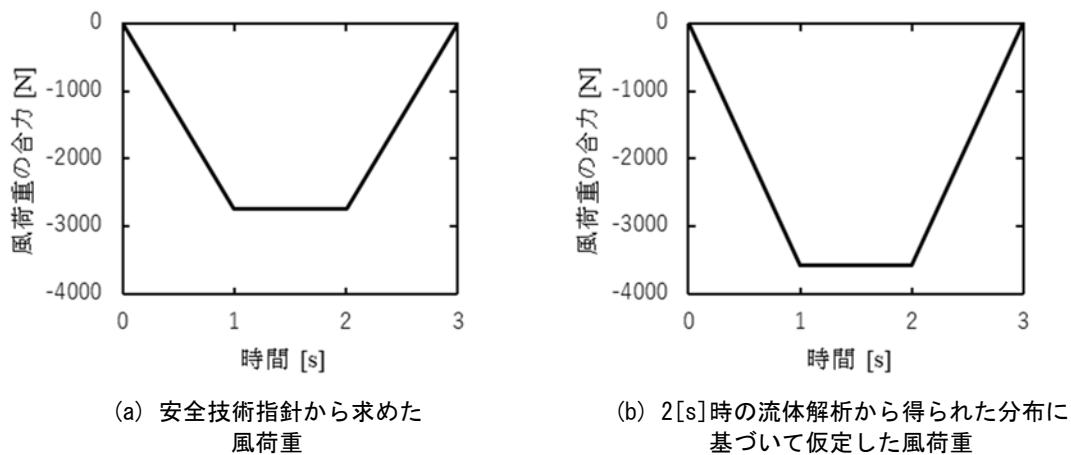


図-6 桝組足場に作用する風荷重の合力

た、どの節点においても風荷重は桝組足場が建物から引きはがされる方向に作用している。一方、2[s]時の流体解析から得られた分布に基づいて仮定した風荷重は節点によって大きさおよび向きが異なっている。

時間増分を0.001[s]、解析時間を3[s]とする。桝組足場全体に作用する風荷重の合力の時刻歴波形は図-6のように、どちらの場合も風荷重の大きさが1[s]かけて最大になり、その後1[s]定常で、1[s]で除荷される台形波とする。

### (3) 解析結果

足場最上部の端点および中央点のY軸方向変位を図-7に示す。図-7(a)(b)から、どちらにおいても端点は壁つなぎが取り付けられているので変位はほとんど生じていない。図-7(a)から、中央点の変位は、安全技術指針から求めた風荷重を用いた場合では、桝組足場のどの部分であっても建物から引きはがされる方向に力を受けるため、Y軸負方向に変位が生じている。一方、図-7(b)から、2[s]時の流体解析から得られた分布に基づいて仮定した風荷重を用いた場合は、桝組足場の中央部分は建物側に押される力を受けるため、中央点の変位は、Y軸正方向に生じている。

ている。

安全技術指針から求めた風荷重を用いた場合、2[s]時の流体解析から得られた分布に基づいて仮定した風荷重を用いた場合における、壁つなぎに作用する軸力を図-8に示す。ここで、壁つなぎを区別するための記号として、「層番号-左端から数えた番号」を用いた。安全技術指針から算出した風荷重を外力とした場合、図-8(a)から、どの壁つなぎも引張力を受け、軸力のばらつきはあまり大きくなかった。2[s]時の流体解析から得られた分布に基づいて仮定した風荷重を用いた場合、図-8(b)から、風上側に取り付けられた壁つなぎは引張力、風下側に取り付けられた壁つなぎは圧縮力を受けていた。また、風上側の壁つなぎは、取り付け層が低い程、引張力が大きい傾向が見られた。

このような違いが生じた原因は以下のことが考えられる。安全技術指針から得た風荷重を外力とした場合は、図-5(a)から、どの節点でも桝組足場が建物から引きはがされる方向に力を受ける。また、風荷重の大きさは各層によって異なるが、局所的に大きな風荷重が作用する節点は

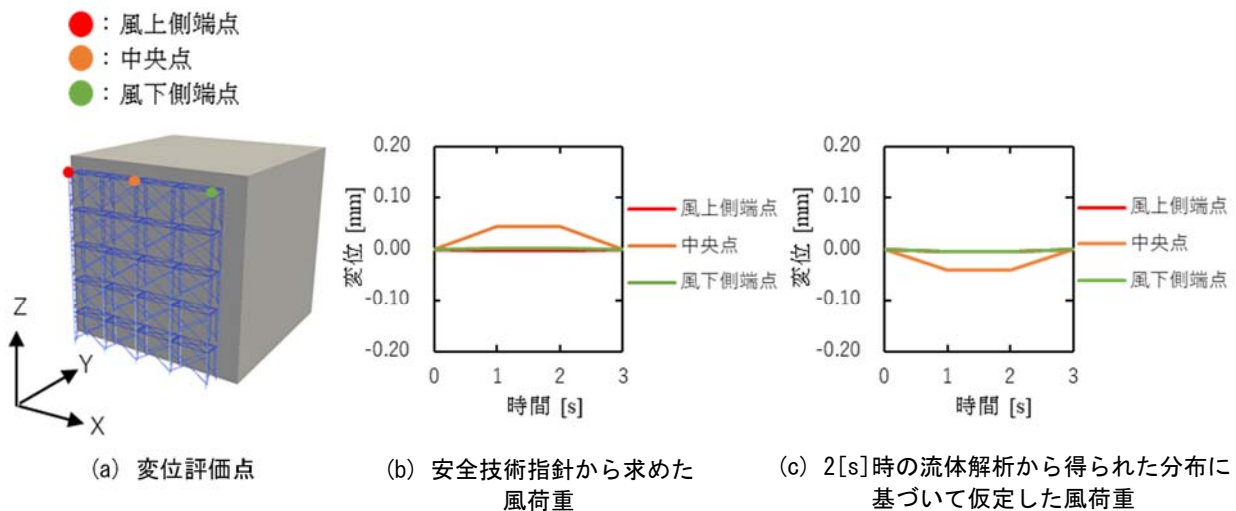


図-7 桝組足場最上部のY軸方向変位

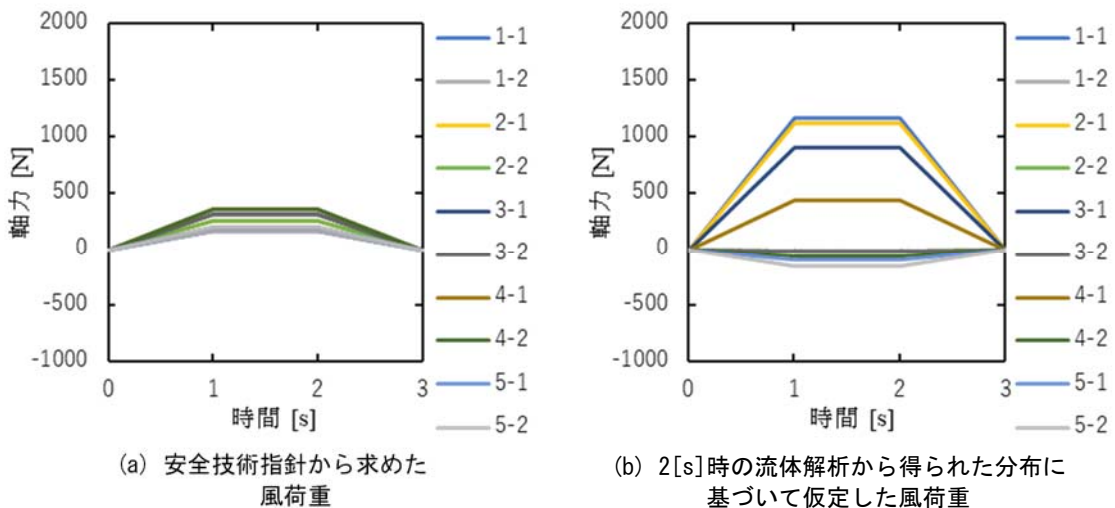


図-8 壁つなぎに作用する軸力

ない。そのため、どの壁つなぎも引張力を受けるが、ばらつきは小さくなっている。一方、2 [s]時の流体解析から得られた分布に基づいて仮定した風荷重を用いた場合は、風上側では足場が建物から引きはがされる方向に風荷重が向くが、中央部から風下側にかけては主に足場が建物側に押される方向に向く。そのため、風上側の壁つなぎは引張力、風下側の壁つなぎは圧縮力を受けたと考えられる。さらに、局所的に大きな風荷重が作用する節点が見られるため、安全技術指針から風荷重を得た場合よりも壁つなぎの軸力のばらつきが大きくなったと考えられる。

#### 4. 結論

本研究では、安全技術指針から風荷重を求めた場合、2 [s]時の流体解析から得られた分布に基づいて仮定した風荷重を用いた場合のそれぞれにおいて、得られた風荷重を外力とし枠組足場の構造解析を行い、枠組足場最上部のY軸方向変位および壁つなぎの軸力を比較した。その結果、2 [s]時の流体解析から得られた分布に基づいて仮定した風荷重は、安全技術指針から算出したものと比較すると、大きさや向きが大きく異なっていることが確認された。そのため、枠組足場最上部のY軸方向変位に違いが生じた。また、安全技術指針から風荷重を得た場合と比べると、2 [s]時の流体解析結果をもとに風荷重を得た場合は、壁つなぎの軸力のばらつきが大きく、圧縮力や大きな引張力を受ける壁つなぎを確認することができた。

本研究の今後の展望としては、流体解析で得られた各時間における風荷重を時々刻々と加え、それによる枠組

足場の変位や壁つなぎの軸力の時刻歴を確認していく予定である。

#### 参考文献

- [1] 東京新聞：線路脇足場崩落の東横線、電車そろりと運転再開 17万人に影響，2021年3月3日，  
<https://www.tokyo-np.co.jp/article/89171>
- [2] 仮設工業会：改訂風荷重に対する足場の安全技術指針，2019.
- [3] OpenFOAM：<https://openfoam.org/>
- [4] 磯部大吾郎：はり要素で解く構造動力学 建物の崩壊解析からロボット機構の制御まで，丸善出版，2020.
- [5] FreeCAD：<https://www.freecadweb.org/?lang=ja>
- [6] 日本建築学会：日本建築学会荷重指針・同解説，1993.
- [7] 高橋弘樹，大嶋勝利，高梨成次：標準わく組足場の耐荷強度に関する評価方法の検討，労働安全衛生研究，第1巻，第3号，pp.211-218，2008.
- [8] 株式会社千歳商会：<http://www.chitose-g.co.jp/index.html>
- [9] ゼン技研株式会社：[https://www.zen-g.co.jp/product\\_2paa.html](https://www.zen-g.co.jp/product_2paa.html)
- [10] JISA8951：鋼管足場，2016.
- [11] 吉田正邦，眞田早敏，本郷剛，中村修：建設足場に設置された養生シート及び防音パネルに作用する風荷重に関する実験的研究，鹿島技術研究所年報，第28号，1980.