

論文 / 著書情報  
Article / Book Information

論題(和文)	荷重指針に基づく風応答時におけるベースシア係数の評価 その2 弾性すべり支承を有する免震建物での検討
Title(English)	Evaluation of base shear coefficient during wind response based on load guidelines Part 2 Consideration of seismically isolated buildings with elastic sliding bearings
著者(和文)	立元拓, 佐藤大樹, 牧平康也, 稲井慎介, 桑素彦, 川又哲也, 得能将紀, 丸尾純也, 三須基規
Authors(English)	Taku Tatsumoto, Daiki Sato, Koya Makihira, Shinsuke Inai, Motohiko Kuwa, Tetsuya Kawamata, Masaki Tokuno, Junya Maruo, Motoki Misu
出典 / Citation	日本建築学会関東支部研究報告集, , , pp. 477-480
Citation(English)	, , , pp. 477-480
発行日 / Pub. date	2024, 3
権利情報	一般社団法人 日本建築学会

## 荷重指針に基づく風応答時におけるベースシア係数の評価

## その2 弾性すべり支承を有する免震建物での検討

構造—振動

正会員 ○ 立元拓<sup>\*1</sup>正会員 佐藤大樹<sup>\*2</sup>〃 牧平康也<sup>\*1</sup>〃 稲井慎介<sup>\*3</sup>

超高層免震建物 高摩擦弾性すべり支承

〃 桑素彦<sup>\*4</sup>〃 川又哲也<sup>\*4</sup>

風応答 ベースシア係数

〃 得能将紀<sup>\*4</sup>〃 丸尾純也<sup>\*3</sup>〃 三須基規<sup>\*5</sup>

## 1 はじめに

本報その1では、アスペクト比、辺長比の異なる複数の高層建築物を対象に、風洞実験気流および風力特性について、風洞実験結果と荷重指針値との比較を行い、風洞実験の妥当性を示した。本報その2では、荷重指針と時刻歴解析によるベースシア係数の比較を行い、荷重指針の妥当性を確認する。また、弾性すべり支承を有する免震建物を対象とし、荷重指針に基づくベースシア係数を用いて、すべり材がすべり出す設計風速を推定し、その1で得られた風力を用いて、その設計風速での応答を時刻歴応答解析により確認する。

## 2 解析対象モデル

## 2.1 基礎固定建物

解析モデルは10質点せん断型モデルを用いる。フレームは、1次固有周期 ${}_1T_f (= 3.0 \text{ s})$ 、建物密度 $\rho_f (= 180 \text{ kg/m}^3)$ とし、質量 $m_i$ は高さ方向に一様であると想定した。構造減衰を剛性比例型とし、 ${}_1T_f$ に対して1次減衰定数 ${}_1\zeta_f (= 0.02)$ を用いる。

固有周期 $T$ は鉄骨造を想定し、(1)式で表される。また、 $i$ 質点目の質量 $m_i$ は(2)式により算出される。

$$T = 0.03H, \quad m_i = \frac{\rho_f \cdot H \cdot B \cdot D}{N} \quad (1), (2)$$

ここで、 $N$ ：層数 ( $N = 10$ )

$i$ 層のフレーム剛性 $k_i$ は、建物の1次固有モードが直線となるように式(3)より求められる<sup>1)</sup>。なお、フレームは弾性状態を保つものとする。

$$k_i = \frac{{}_1\omega^2 \cdot m_i \cdot ({}_1\varphi_i + k_{i+1}({}_1\varphi_{i+1} - {}_1\varphi_i))}{{}_1\varphi_i - {}_1\varphi_{i-1}} \quad (3)$$

ここで、 $\omega$ ：1次固有角振動数、 ${}_1\varphi_i$ ：1次モードベクトルを表す。

## 2.2 免震建物

解析モデルには、上部構造縮約10質点、免震層1質点の11質点等価せん断モデルを用いた。上部構造のフレー

ムの条件は基礎固定建物と同様である。免震層には積層ゴム(NRB)、弾性すべり支承(ESB)、オイルダンパー(OD)の3つの部材を入れた。このうち弾性すべり支承に弾塑性モデル(図1の解析モデル)を用意した。また、免振部材の復元力特性を図2に示す。

免震層の面密度は $\rho_0 = 3644 \text{ kg/m}^3$ とする。また、NRBの剛性 $K_{NRB}$ を用いて式(4)より算出される、免震周期 $T_0$ は6.08 sとなる。

$$T_0 = 2\pi \sqrt{(\rho_f BDH + \rho_0 BD) / K_{NRB}} \quad (4)$$

ESBのすべり出しせん断力係数 $\alpha_s$ 、1次剛性 $K_E$ は、それぞれ式(5)、(6)より算出される。

$$\alpha_s = Q_{ESB0} / \{(\rho_f BDH + \rho_0 BD)g\} \quad (5)$$

$$K_E = Q_{ESB0} / \delta_{ESBy} \quad (6)$$

ここで、 $Q_{ESB0}$ ：ESBのすべり出し荷重、 $\delta_{ESBy}$ ：ESBのすべり出し変形(7.7 cm)、 $g$ ：重力加速度を表す。

ODのリリーフせん断力係数 $\alpha_D$ 、1次減衰係数 $C_1$ はそれぞれ式(7)、(8)より算出される。

$$\alpha_D = Q_{OD0} / \{(\rho_f BDH + \rho_0 BD)g\} \quad (7)$$

$$C_1 = Q_{OD0} / v_D \quad (8)$$

ここで、 $Q_{OD0}$ ：ODのリリーフ荷重、 $v_D$ ：ODのリリーフ速度を表す。

免震層の復元力特性はNRBとESBの復元力特性の和で表される。免震層のすべり出し荷重 $Q_{0y}$ は式(9)、(10)より算出される。

$$Q_{0y} = \delta_{0y}(K_{NRB} + K_{ESB}) \quad (9)$$

$$\delta_{0y} = \delta_{ESBy} \quad (10)$$

ここで、 $Q_{0y}$ ：免震層のすべり出し荷重を表す。

さらに、免震部材の設定による違いを確認するために、すべり支承のみ増やした解析ケースも用意する。ここで、弾性すべり支承のすべり出しせん断係数が $0.01 \times n$ 、オイルダンパーのリリーフせん断係数が $0.01 \times m$ としたとき、その建物モデルをSmDnと呼称する。本報で取り扱う建物モデルはS1D1、S3D1とする。

Evaluation of base shear coefficient during wind response based on load guidelines  
Part 2 Consideration of seismically isolated buildings with elastic sliding bearings

Taku Tatsumoto, Daiki Sato, Koya Makihira, Shinsuke Inai, Motohiko Kuwa, Tetsuya Kawamata, Masaki Tokuno, Junya Maruo, Motoki Misu

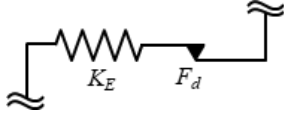


図1 弾塑性モデル

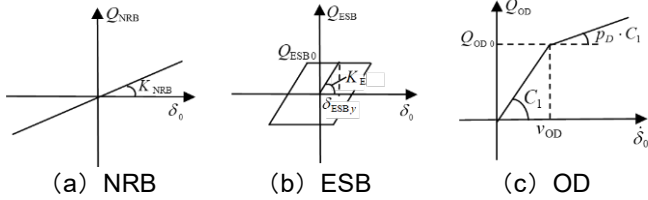


図2 免震部材の復元力特性

### 3 基礎固定建物のベースシア係数の評価

荷重指針と時刻歴解析による基礎固定建物のベースシア係数の比較を行う。なお、建物モデル風外力はその1で示した全てのモデルにおいて高さ  $H=50, 100, 150, 200, 250, 300$  m のものを用いる。荷重指針<sup>2)</sup>に基づく高さ  $Z$  (m) における風方向荷重  $W_D$ 、風直交方向荷重  $W_L$  は次式で表される。

$$W_D = q_H C_D G_D A \quad (11)$$

$$W_L = 3q_H C'_L A \frac{Z}{H} g_L \sqrt{1 + \phi_L^2 R_L} \quad (12)$$

ここで、 $q_H$ : 速度圧、 $C_D$ : 風力係数、 $G_D$ : ガスト影響係数、 $A$ : 見付面積、 $C'_L$ : 風直交方向変動転倒モーメント係数、 $g_L$ : 風直交方向振動のピークファクター、 $\phi_L$ : 振動モード補正係数、 $R_L$ : 風直交方向振動の共振係数を表す。

また、ガスト影響係数  $G_D$  は次式で表される。

$$G = 1 + g_D \frac{C'_g}{C_g} \sqrt{1 + \phi_D^2 R_D} \quad (13)$$

ここで、 $g_D$ : 風方向荷重のピークファクター、 $C'_g$ : 風方向変動転倒モーメントに関する係数、 $C_g$ : 風方向平均転倒モーメントに関する係数、 $\phi_D$ : 振動モード補正係数、 $R_D$ : 風方向振動の共振係数を表す。

また、風直交方向振動のピークファクター  $g_L$ 、共振係数  $R_L$  は次式で表される。

$$g_L = \sqrt{2 \ln(600f) + 1.2}, \quad R_L = \frac{\pi F_L}{4 \xi_f} \quad (14), (15)$$

ここで、 $F_L$ : 風直交方向転倒モーメントのスペクトル係数、 $\xi_f$ : 1次減衰定数を表す。

したがって風方向のベースシア係数  $C_{BD}$ 、風直交方向のベースシア係数  $C_{BL}$  は (16)、(17) 式で表される。

$$C_{BD} = W_D / Mg, \quad C_{BL} = W_L / Mg \quad (16), (17)$$

ここで、 $Mg$ : 建物重量を表す。

図3にそれぞれのモデルで算出した、建物高さとのベースシア係数の関係を示す。時刻歴応答(THA)では3波を用い、それぞれのベースシア係数とアンサンブル平均を算出した。図3より、荷重指針(AIJ)と時刻歴応答解析によ

て算出されるベースシア係数は全てのモデルにおいて概ね一致していることがわかる。

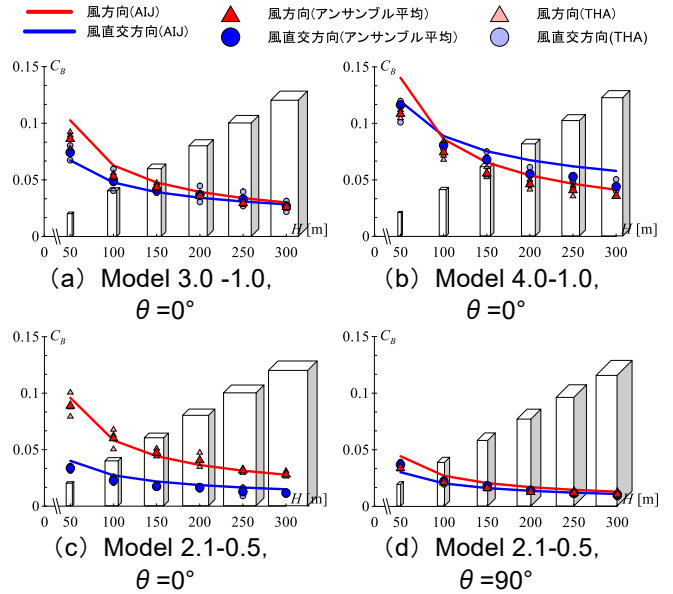


図3 ベースシア係数の比較

### 4 免震建物のベースシア係数の評価

#### 4.1 免震建物と基礎固定建物のベースシア係数の比較

免震建物の上部構造の建物モデルは、Model 3.0-1.0 とする。振動モード  $\mu(Z)$  は次式で表される。

$$\mu(Z) = \left(\frac{Z}{H}\right)^\beta \quad (18)$$

ここで、 $\beta$ : 振動モードを示す。

図4に基礎固定建物の荷重指針に基づき得られたベースシア係数と S1D1, S3D1 の免震建物の時刻歴解析によって得られたベースシア係数の比較を示す。荷重指針に基づくベースシア係数は  $\beta=0.3, 0.5, 0.7, 0.9, 1.0$  の振動モードの時の値を算出した。図4から風方向において設計風速が高くなるほど、基礎固定建物(荷重指針)は免震建物のベースシア係数より大きくなっているが、全体としては S1D1, S3D1 どちらも荷重指針と概ね一致していることがわかる。また、 $\beta$  の値を変化させても、ベースシアはほとんど変化しないことわかる。そのため、以降、基礎固定建物、基本振動モード ( $\beta=1.0$ ) を想定し、荷重指針に基づき算出したベースシア係数を用いてすべり材のすべりを予測する。

#### 4.2 最大および変動ベースシア係数の算出

風方向の平均荷重  $W_{mean}$  は、風方向の最大荷重  $W_D$ 、ガスト影響係数  $G$  を用いて、次式で表される。

$$W_{mean} = \frac{W_D}{G} \quad (19)$$

また、最大荷重は平均荷重  $W_{mean}$  と変動荷重  $W_r$  の和であるので、変動荷重  $W_r$  は次式で表される。

$$W_r = W_D - \frac{W_D}{G} \quad (20)$$

したがって、最大ベースシア係数 $C_{max}$ 、変動ベースシア係数 $C_r$ 、すべり出しベースシア係数 $C_{ESB0}$ はそれぞれ次式で表される。

$$C_{max} = W_D/Mg \quad (21)$$

$$C_r = W_r/Mg \quad (22)$$

$$C_{ESB0} = Q_{ESB0}/Mg \quad (23)$$

図5に設計風速と式(21)~(23)によって算出した最大ベースシア係数 $C_{max}$ 、変動ベースシア係数 $C_r$ の関係を示す。図5からS1D1では、風方向において、設計風速 $U_H = 40$  cm/sの以上で最大ベースシア係数がすべり出しベースシア係数を上回ることがわかる。風直交方向では、設計風速 $U_H = 45$  cm/sの以上で変動ベースシア係数がすべり出しベースシア係数を上回ることがわかる。また、S3D1では、風方向、風直交方向どちらも設計風速 $U_H = 50$  m/sの以下においては変動ベースシア係数がすべり出しベースシア係数を下回ることがわかる。そのため、設計風速30, 35, 40, 45 m/sの設計風速を用いて、時刻歴応答解析を行い、すべり材にすべりが発生しているかを確認する。

### 4.3 免震層履歴

図6にS1D1、図7にS3D1における風方向、風直交方向での弾塑性モデルの免震層の履歴曲線を示す。また、表1, 2にS1D1, S3D1での各設計風速での免震層の最大復元力と最大変位を示す。図6, 7より、S1D1では、最大ベースシア係数がすべり出しベースシア係数を上回る設計風速 $U_H = 40$  cm/sの以上ですべり材がすべっていることがわかる。風直交方向では、変動ベースシア係数がすべり出しベースシア係数を上回る、設計風速 $U_H = 45$  cm/sですべり材がすべっていることがわかる。また、S3D1では風方向、風直交方向どちらもいずれの設計風速においてすべり材にすべりが発生していないことがわかる。この結果は図5の予測と概ね一致しており、荷重指針に基づくベースシア係数を用いて、すべりの発生を概ね予測することができることがわかる。

## 5 まとめ

アスペクト比、辺長比の異なる複数の建物モデルでの荷重指針と時刻歴応答解析によるベースシア係数の比較を行った。また、弾性すべり支承を有する免震建物を対象とし、荷重指針に基づくベースシア係数を用いて、すべり材がすべり出す設計風速を推定し、その1で得られた風力を用いて、その設計風速での時刻歴応答解析を行った。全てのモデルで荷重指針と時刻歴応答解析によって算出したベースシア係数は概ね一致しており、荷重指針に基づく評価の妥当性が確認された。また、免震建物のすべり材がす

べり出すときの設計風速は荷重指針に基づくベースシア係数により予測したものと一致しており、荷重指針に基づいたベースシア係数を用いて、すべり材のすべりの発生を予測することができることがわかった。

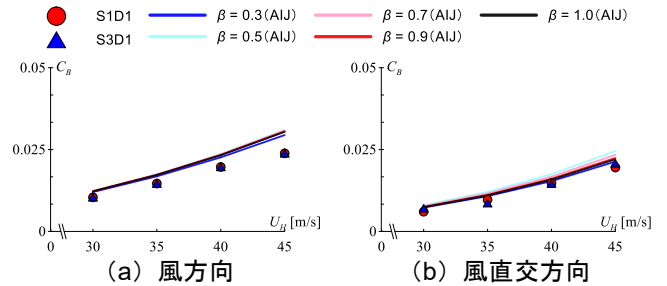


図4 免震建物と荷重指針の $C_B$ の比較

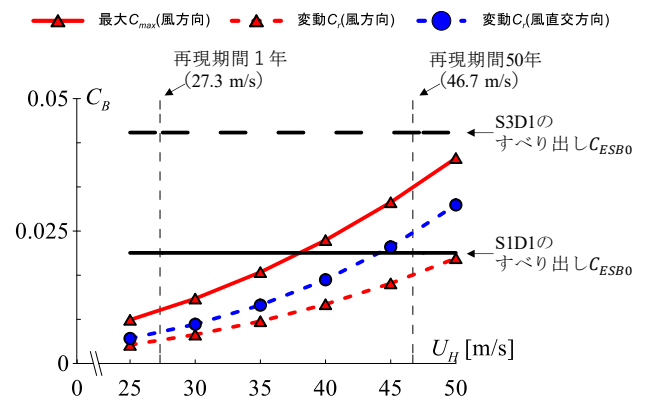


図5 設計風速—ベースシア係数

表1 免震層の応答 (S1D1)

設計風速 (cm/s)		30	35	40	45
風方向	最大復元力 (kN)	7196	10092	15771	19087
	最大変位 (cm)	4.0	5.6	10.0	14.0
風直交方向	最大復元力 (kN)	4660	7156	11267	14555
	最大変位 (cm)	2.6	4.0	6.2	8.4

表2 免震層の応答 (S3D1)

設計風速 (cm/s)		30	35	40	45
風方向	最大復元力 (kN)	6841	9919	15704	20950
	最大変位 (cm)	1.8	2.7	4.2	5.6
風直交方向	最大復元力 (kN)	4869	6788	10503	15581
	最大変位 (cm)	1.3	1.8	2.8	4.1

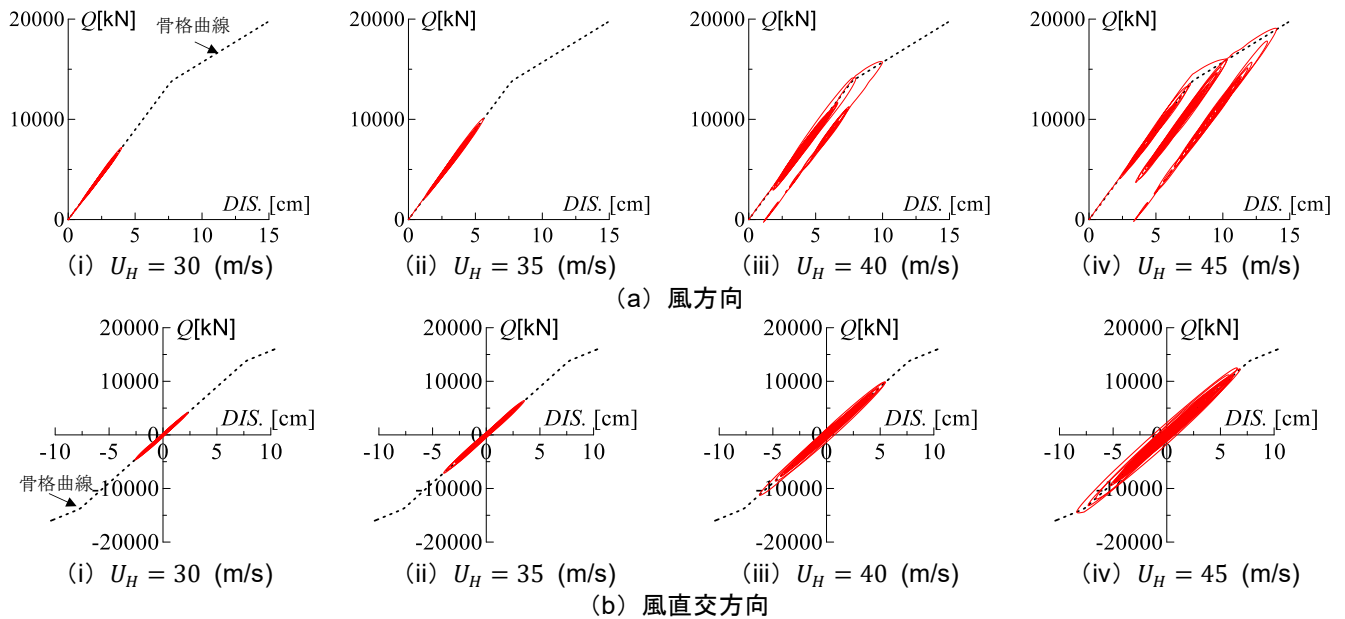


図6 履歴曲線 (S1D1)

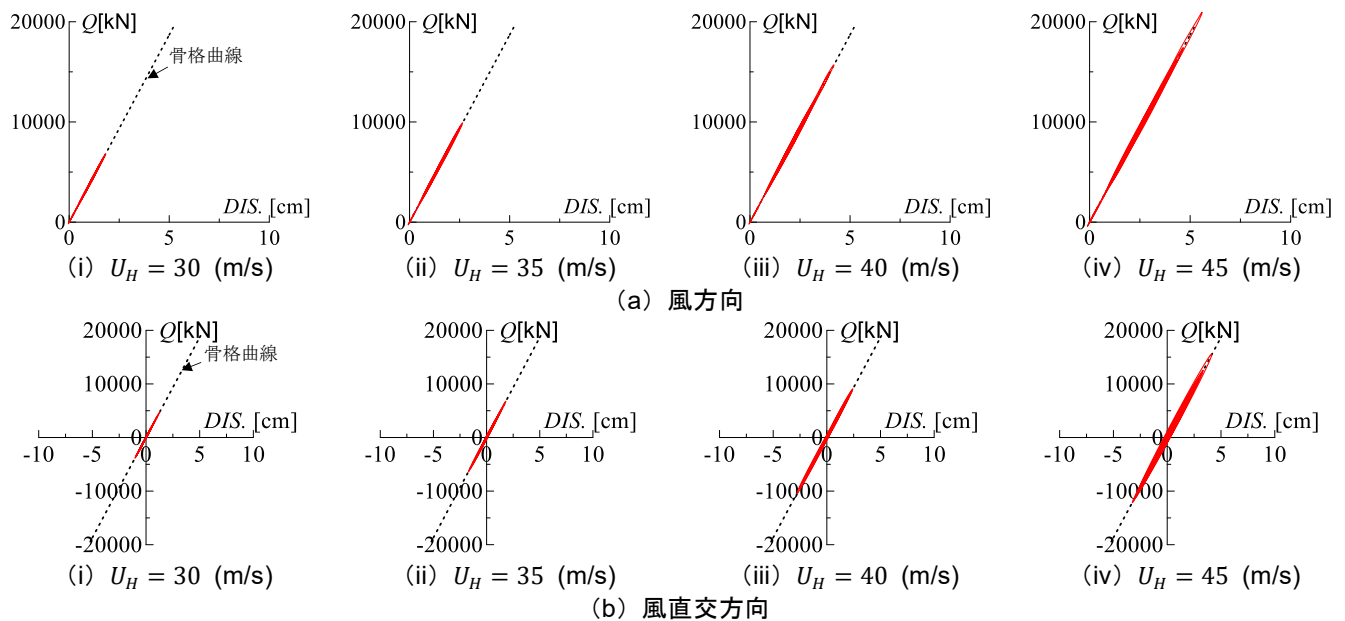


図7 履歴曲線 (S3D1)

謝辞

本報告は、戸田建設株式会社、SWCC 株式会社および東京工業大学佐藤研究室の共同研究の成果の一部をまとめたものです。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

1) 佐藤大樹, 笠井和彦, 田村哲郎: 粘弾性ダンパーの振幅依存性が風応答に与える影響, 日本建築学会構造論

文集, 第 635 号, pp.75-82, 2009.1

- 2) 日本建築学会: 建築物荷重指針・同解説 (2015), 2015
- 3) 日本建築学会: 建築物荷重指針を活かす設計資料 2 建築物の風応答・風荷重評価/CFD ガイドブック, 2017.2
- 4) 日本免震構造協会: 免震建築物の耐風設計指針(2023), 2023.3

*1 東京工業大学環境・社会理工学院 大学院生	Grad.Student, School of Environment and Society, Tokyo Institute of Technology
*2 東京工業大学 科学技術創成研究院 准教授・博士 (工学)	Associate Prof., IIR, Tokyo Institute of Technology, Dr. Eng.
*3 戸田建設株式会社 技術研究所	Technology Research Institute, TODA Corporation
*4 戸田建設株式会社 構造設計部	Structural Design Department, TODA Corporation
*5 SWCC 株式会社	SWCC Corporation