

ビル風利用風力発電モデルの発電特性と 実装可能性評価



(三重大学大学院) 西村 顕*, 柿田 将信, 北川 諭,
村田 淳介, 安藤 俊剛, 鎌田 泰成, 廣田 真史

研究背景

化石燃料の枯渇
CO₂増大による温暖化
エネルギー需要の増大



再生可能エネルギー

風力発電導入目標

日本 2014年: 2.7 GW⁽¹⁾ 2030年(目標): 28 GW⁽²⁾

アメリカ 2013年: 61 GW⁽¹⁾ 2030年(目標): 305 GW⁽²⁾

中国 2013年: 91 GW⁽¹⁾ 2030年(目標): 440 GW⁽³⁾



⁽¹⁾エネルギー白書2015 ⁽²⁾日本風力発電協会「風力発電長期導入目標とロードマップ」 ⁽³⁾中国風力発電発展報告2010



スマートシティ

研究目的

スマートシティについて

本研究では、
再生可能エネルギーを予め
組み込んだ街を造ることを目指す



設置制約がなく、最適発電が可能



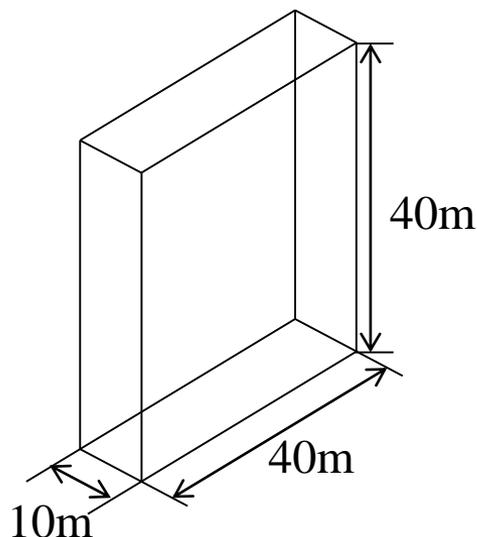
図: バーレーンワールドトレードセンター

本研究目的

- ビルの形状や配置, 風車設置位置等について発電電力量が多く得られる設置条件の提案(特にビル間角度について)
- 流れ解析の結果と任意の土地(福島市, 津市)の気象データを用いた風力発電電力量の概算, および対象ビルモデルの電力需要をどの程度賄えるか検証

モデリング

ビルモデルデザイン



全国住宅平均延べ面積 = 94.13 m²

総務省 統計局・政策統括官・統計研修所
平成20年住宅・土地統計調査

ビル1階の世帯数 = 4 世帯

ビル1階の高さ = 4 m

風車の全長 = 39 m

ビル1棟の世帯数



1世帯当たりの床面積
= 100 m² (=10 m × 10 m)



ビル1階の床面積 = 400 m²



ビル高さ = 40 m



40 世帯

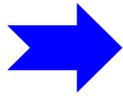
Specification of AEOLOS 50kW class wind turbine



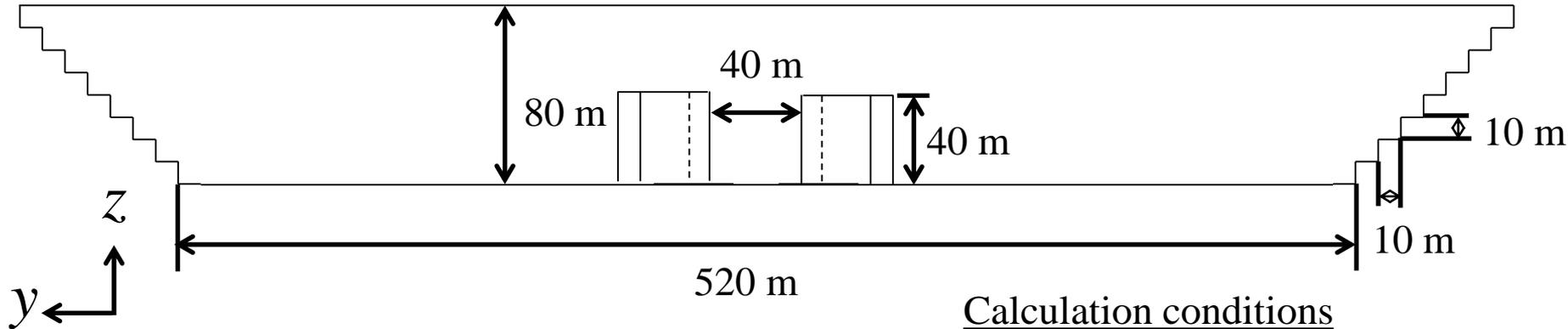
Rated power	50 kW
Cut-in wind speed	3.0 m/s
Rated wind speed	10 m/s
Cut-out wind speed	25 m/s
Rotor diameter	18 m
Hub height	30 m
Total height of wind turbine	39 m

計算モデル

提案ビル
モデル



ビル寸法: 10 m × 40 m × 40 m, ビル間角度 (α): 90, 135, 180°,
ビル間隔: 40 m, ビル配置: ノズル状, ビル数: 2



Calculation conditions

Density of wind [kg/m ³]	1.166
Temperature of wind [K]	293
Pressure of wind at inlet [MPa]	0.1
Kinetic viscosity of wind [m ² /s]	1.56×10^{-5}
Velocity of wind at inlet [m/s]	$U_0 \times (z/30)^{0.25}$ ($U_0=3.00\sim 12.00$)
Turbulent flow model	RNG $k-\varepsilon$ model
Slip on side wall of building	$V = (0.41 \times y)^{0.25} U^{(1)}$
Turbulent energy [m ² /s ²]	0.025 ⁽¹⁾
Dissipation rate [m ² /s ²]	$(1.58 \times 10^{-3})/z^{(1)}$
Calculation state	Steady

wind

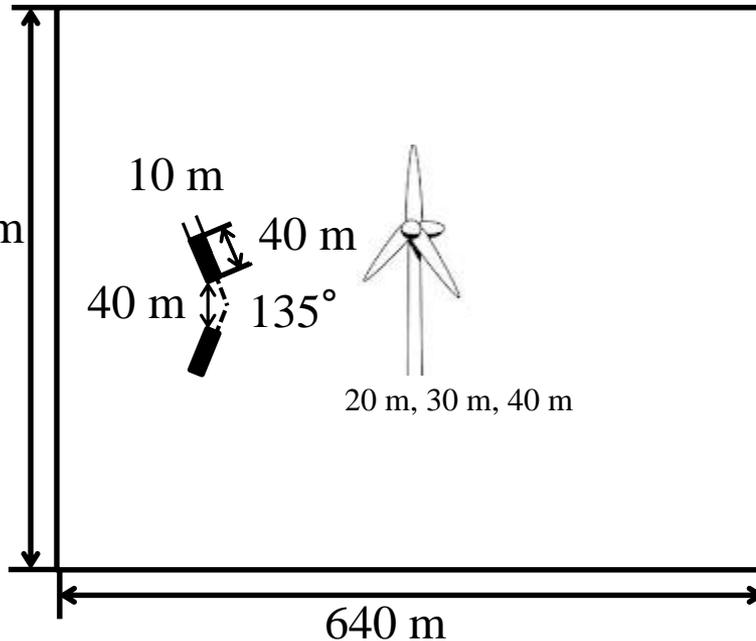


660 m

y



x

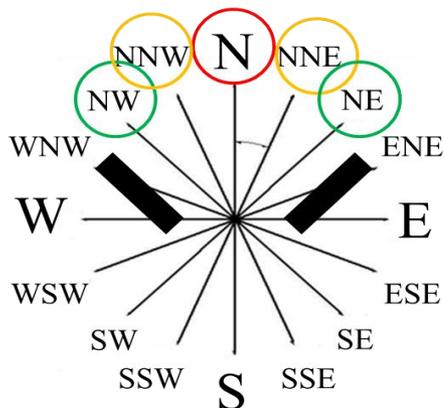


⁽¹⁾建物近傍拡散の予測に関する基礎的研究その2 $k-\varepsilon$ モデルによる数値シミュレーション

発電可能流入風条件(主風向を北とした場合)

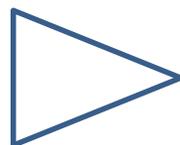
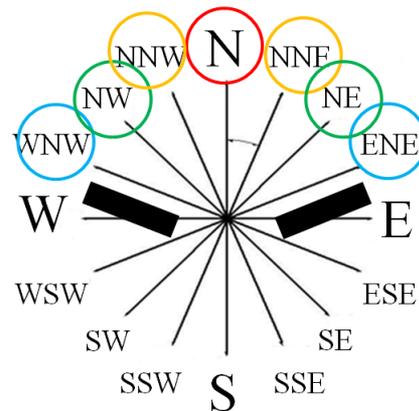
$$\alpha = 90^\circ$$

Main wind flow direction



$$\alpha = 135, 180^\circ$$

Main wind flow direction



Wind flow direction	x direction wind velocity U [m/s]	y direction wind velocity V [m/s]
Main wind flow direction (N)	$U_0 \times (z/30)^{0.25}$	0
NNW, NNE	$U_0 \times (z/30)^{0.25} \times \cos 22.5^\circ$	$U_0 \times (z/30)^{0.25} \times \sin 22.5^\circ$
NW, NE	$U_0 \times (z/30)^{0.25} \times \cos 45^\circ$	$U_0 \times (z/30)^{0.25} \times \sin 45^\circ$
WNW, ENE	$U_0 \times (z/30)^{0.25} \times \cos 67.5^\circ$	$U_0 \times (z/30)^{0.25} \times \sin 67.5^\circ$

ビル間に流入しない風向からの風は発電に利用できないと仮定

風力発電出力算出方法

風車の受風面の平均風速 $U_{h,ave}$ の算出

x 方向風速 U の受風面全体の風力エネルギー Q_x を求める

$$Q_x = \sum_{i=1}^N Q_{x,i} = \sum_{i=1}^N \frac{1}{2} \rho U_i^3 dA$$



受風面の x 方向平均風速 U_{ave} を求める

$$U_{ave} = \left(\frac{2Q_x}{N\rho A} \right)^{1/3}$$



受風面の y 方向平均風速 V_{ave} を同様に求める



受風面の水平面平均風速 $U_{h,ave}$ を求める

$$U_{h,ave} = \sqrt{U_{ave}^2 + V_{ave}^2}$$

風力発電出力算出方法

AEOLOS社50kW級風車のパワーカーブを利用

$U_{h,ave} = 3.00 \sim 10.00$ [m/s] の時

$$E = 59.075 U_{h,ave}^3 - 62.619 U_{h,ave}^2 - 33.433 U_{h,ave}$$

$$R^2 = 0.999$$

$U_{h,ave} = 10.00 \sim 19.00$ [m/s]
の時

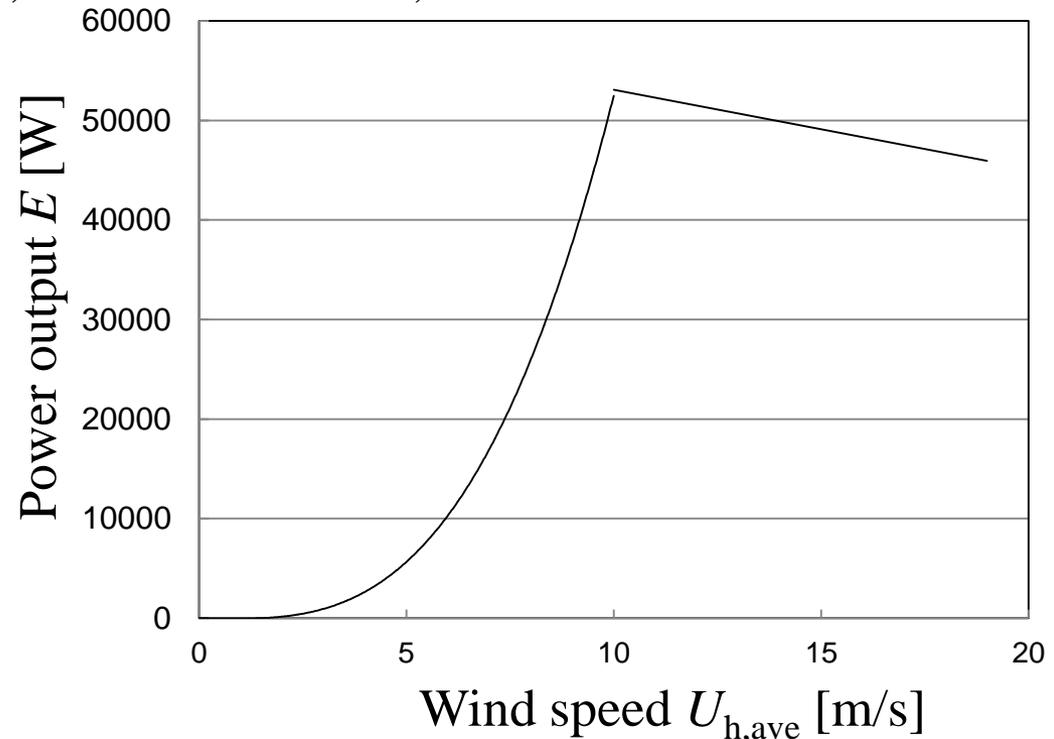
$$E = -793.94 U_{h,ave} + 61012$$

$$R^2 = 0.972$$

風車受風面の平均風速



風力発電出力



ビル周囲風速分布計算結果の一例

Main wind flow direction



$$\alpha = 135^\circ$$

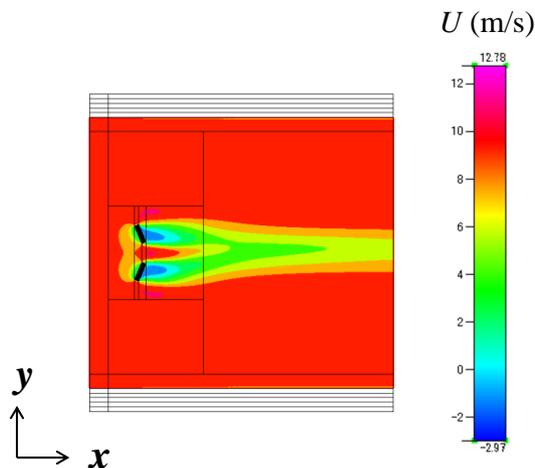


Figure. Contour of wind speed U distribution around buildings at $z = 30$ m on x - y cross section ($\alpha = 135^\circ$, $\beta = 0^\circ$, $U_0 = 10.0$ m/s)

L (Representative length) = 16 m

U_0 (m/s)	3.0		4.0	
x/L (-)	$U_{h, ave} / U_0$ (-)	P (kW)	$U_{h, ave} / U_0$ (-)	P (kW)
1.25	1.09	1.29	1.09	3.56
1.875	1.08	1.24	1.08	3.45
2.5	1.05	1.12	1.06	3.24
U_0 (m/s)	5.0		6.0	
x/L (-)	$U_{h, ave} / U_0$ (-)	P (kW)	$U_{h, ave} / U_0$ (-)	P (kW)
1.25	1.09	7.52	1.08	13.23
1.875	1.08	7.30	1.07	12.84
2.5	1.06	6.86	1.05	12.08
U_0 (m/s)	7.0		8.0	
x/L (-)	$U_{h, ave} / U_0$ (-)	P (kW)	$U_{h, ave} / U_0$ (-)	P (kW)
1.25	1.09	22.34	1.09	34.12
1.875	1.08	21.69	1.07	32.18
2.5	1.05	19.83	1.04	29.41
U_0 (m/s)	9.0		10.0	
x/L (-)	$U_{h, ave} / U_0$ (-)	P (kW)	$U_{h, ave} / U_0$ (-)	P (kW)
1.25	1.08	48.01	1.09	52.39
1.875	1.06	45.27	1.08	52.48
2.5	1.03	41.37	1.05	52.68
U_0 (m/s)	11.0		12.0	
x/L (-)	$U_{h, ave} / U_0$ (-)	P (kW)	$U_{h, ave} / U_0$ (-)	P (kW)
1.25	1.08	48.01	1.09	52.39
1.875	1.06	45.27	1.08	52.48
2.5	1.03	41.37	1.05	52.68

主風向流入風では、ビル間後方直近で漏れなく加速風が得られる

U_0 に関係なく、ビル近傍の方が $U_{h, ave}$ は大きい

ビル周囲風速分布計算結果の一例

ビル角度 135°

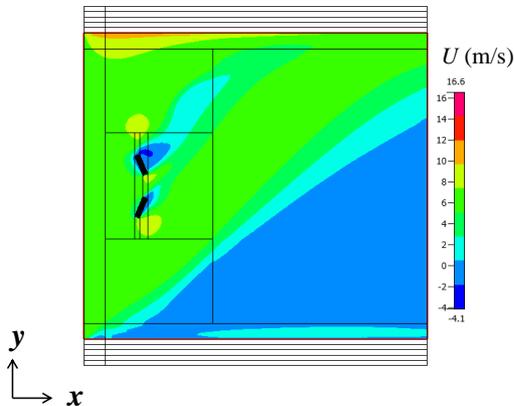


Table Comparison of P under different b conditions among $a = 90, 135$ and 180° ($U_0 = 10.0$ m/s, $x/L = 1.25$)

β ($^\circ$)	22.5	45	67.5
α ($^\circ$)	P (kW)	P (kW)	P (kW)
90	5.29	0.62	-
135	5.29	1.26	0.21
180	5.34	0.21	0.37

Figure. Contour of wind speed U distribution around buildings at $z = 30$ m on x - y cross section for angular inflow condition ($\alpha = 135^\circ$, $\beta = 45^\circ$, $U_0 = 10.0$ m/s).

斜め流入風では、ビル間加速風は得にくい

α によって P に違いが生じる

任意の土地の発電電力量算出

気象庁の気象データ (2010~2014年のデータ使用)  1時間毎の風況データ(風向・風速)

評価地(観測データ使用地)

福島県福島市

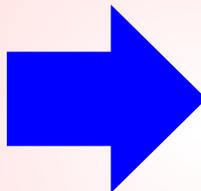
所在地 緯度:北緯37度45分, 経度:東経140度28分

風速計の地上高:2.6m

数値解析ではハブ高さ30mを基準  風速を換算

流入風の一般式

$$U=U_0 \times (z/30)^{0.25}$$



$$U_0=U/(z/30)^{0.25}$$

U_0 :ハブ高さ30mの風速[m/s] (ただし整数)

z =2.6m(福島市の場合)

U :観測地点で得られた風速の実測値[m/s]

Ref: E. Firtin *et al.*, Applied Energy, 88, 4097-4105, 2011

発電電力量 Q の算出方法

例：福島市に本研究のモデルを設置想定した場合

(ビル角度 135° , 使用可能風向：西南西, 西, 西北西, **北西**, 北北西, 北, 北北東)

Time (h)	U (m/s)	Wind flow direction	Corrceted U_0 (m/s)	Power output P (kW)	Power energy Q (kWh)
1	3.8	WNW	6.0	10.93	10.93
2	3.2	NW	5.0	7.52	7.52
⋮					
23	0.8	NE	0	0	0
24	4.5	N	7.0	3.89	3.89

NWから風が流入した場合の数値計算結果による風力発電出力[kW]の見積もり

U_0 (m/s)	3.0	4.0	5.0	6.0	7.0	8.0	9.0	10.0	11.0	12.0
$x/L = 1.25$	1.29	3.56	7.52	13.23	22.34	34.12	48.01	52.39	51.58	50.83

WNW・**NNW**から風が流入した場合の数値計算結果による風力発電出力[kW]の見積もり

U_0 (m/s)	3.0	4.0	5.0	6.0	7.0	8.0	9.0	10.0	11.0	12.0
$x/L = 1.25$	1.00	2.81	5.99	10.91	17.95	27.47	39.85	52.93	52.12	51.21

W・**N**から風が流入した場合の数値計算結果による風力発電出力[kW]の見積もり

12

U_0 (m/s)	3.0	4.0	5.0	6.0	7.0	8.0	9.0	10.0	11.0	12.0
$x/L = 1.25$	0	0	1.18	2.29	3.89	6.10	8.99	12.67	17.22	22.74

福島市と津市に設置想定した場合の 発電特性の比較

福島市に設置想定した場合

津市に設置想定した場合

α (°)	January (kWh)	February (kWh)	March (kWh)
90	8044	5545	6978
135	8193	5734	7216
180	5512	5940	9516
α (°)	April (kWh)	May (kWh)	June (kWh)
90	6430	3417	1033
135	6685	3826	1034
180	7608	6100	855
α (°)	July (kWh)	August (kWh)	September (kWh)
90	354	333	1412
135	361	341	1518
180	299	1600	1177
α (°)	October (kWh)	November (kWh)	December (kWh)
90	4993	4969	8086
135	5367	5037	8342
180	3294	3634	3604
α (°)	Year (kWh)		
90	51595		
135	53655		
180	49140		

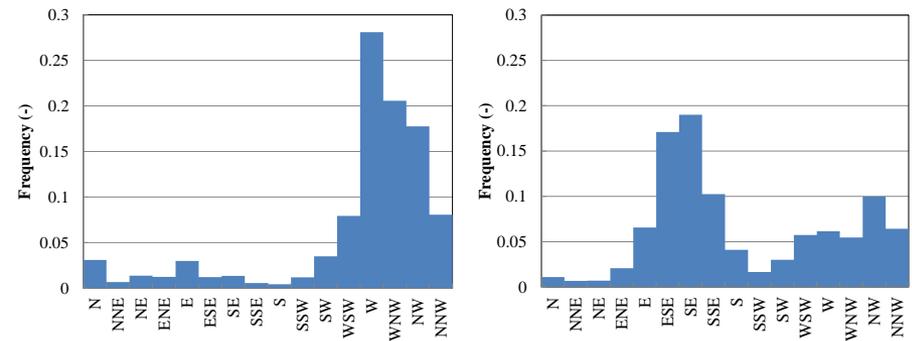
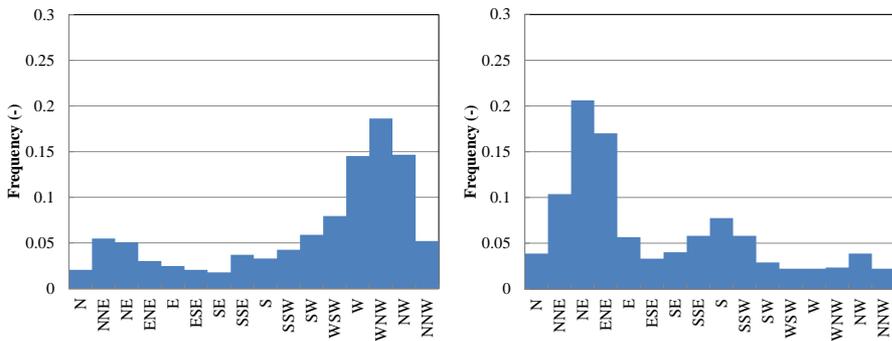
α (°)	January (kWh)	February (kWh)	March (kWh)
90	14900	13220	12696
135	15898	14608	13367
180	14408	12249	12022
α (°)	April (kWh)	May (kWh)	June (kWh)
90	11212	9004	936
135	12164	9954	958
180	10376	8563	843
α (°)	July (kWh)	August (kWh)	September (kWh)
90	4761	5223	3953
135	4833	5438	4258
180	4418	4824	3792
α (°)	October (kWh)	November (kWh)	December (kWh)
90	7506	8756	13866
135	7905	9130	14719
180	6980	8158	13020
α (°)	Year (kWh)		
90	106034		
135	113233		
180	99652		

- ★ 福島市, 津市いずれも日中が発電電力量大
- ★ 福島市, 津市いずれも $\alpha = 135^\circ$ で年間発電電力量最大
- ★ 冬の方が夏より発電電力量大

福島市と津市に設置想定した場合の 発電特性の比較

福島市の風向分布データ(左:1月, 右:8月)

津市の風向分布データ(左:1月, 右:8月)



★ 冬の方が夏より発電電力量大

➡ 福島市, 津市いずれも年間主風向は北西(NW)

➡ 福島市の1月の主風向はWNW, 8月の主風向はNE
津市の1月の主方向はW, 8月の主風向はSE

★ 福島市, 津市いずれも $\alpha = 135^\circ$ で年間発電電力量最大

➡ 福島市, 津市いずれも $\beta = 45^\circ$ (N, W)までの流入風多い

提案モデルでの電力需要量の算出

東京電力のでんき予報⁽¹⁾の時間変動データに

まず家庭部門のエネルギー消費構成41.6%⁽²⁾を乗ずる

家庭部門におけるエネルギー消費に占める電気の割合50.5%⁽³⁾を乗ずる

東京電力管内の一般家庭の世帯数1900万世帯⁽²⁾で除して、1世帯当たりの一般家庭の電力需要量を算出⇒ビルモデル2棟分(80世帯)に換算

2010～2014年の5年間の1世帯当たりの平均電力需要量[Wh](1日の時間変動, 月平均)

Time\Month	January	February	March	April	May	June	July	August	September	October	November	December
0:00	367	372	331	301	281	301	335	346	318	289	303	346
1:00	347	352	316	288	269	285	313	322	299	274	290	329
2:00	333	339	307	282	264	278	300	307	288	269	284	318
3:00	325	330	300	278	262	276	295	300	285	268	281	310
4:00	321	328	299	276	259	273	292	298	285	268	281	309
5:00	336	344	310	281	258	272	292	297	287	273	291	323
6:00	377	386	338	300	278	289	311	316	300	285	314	359
7:00	434	421	364	320	294	315	344	353	329	305	335	388
8:00	444	453	392	346	322	348	389	404	367	331	357	414
9:00	458	471	408	364	345	380	431	449	404	355	373	426
10:00	448	466	406	367	353	392	450	470	421	363	374	419
11:00	436	457	402	367	356	397	460	482	429	367	371	411
12:00	434	453	382	351	344	383	451	475	418	352	354	391
13:00	420	441	392	363	357	398	462	485	429	367	367	399
14:00	417	437	390	363	357	400	465	488	432	368	367	398
15:00	419	436	387	360	355	397	461	483	428	367	368	401
16:00	444	449	395	365	357	397	461	481	429	375	390	431
17:00	479	479	410	369	356	391	450	469	428	391	410	454
18:00	482	490	428	388	365	392	447	471	456	389	406	452
19:00	472	479	421	384	367	394	447	466	421	374	395	442
20:00	461	466	409	372	353	379	428	445	400	359	381	430
21:00	448	447	393	356	335	359	405	421	378	341	364	414
22:00	426	429	379	344	323	348	393	407	368	331	351	398
23:00	401	402	356	323	303	326	367	380	344	310	329	375

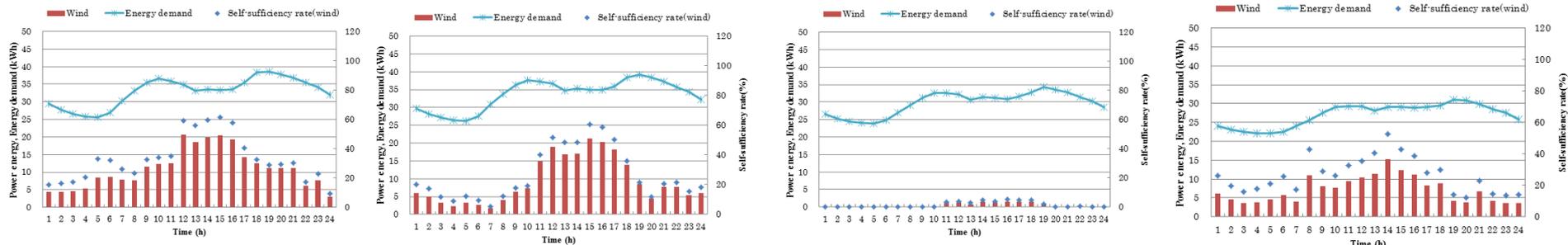
(1): <http://www.tepco.co.jp/forecast/index-j.html>

(2): 資源エネルギー庁, 「夏季最大電力使用日の需要構造推計」

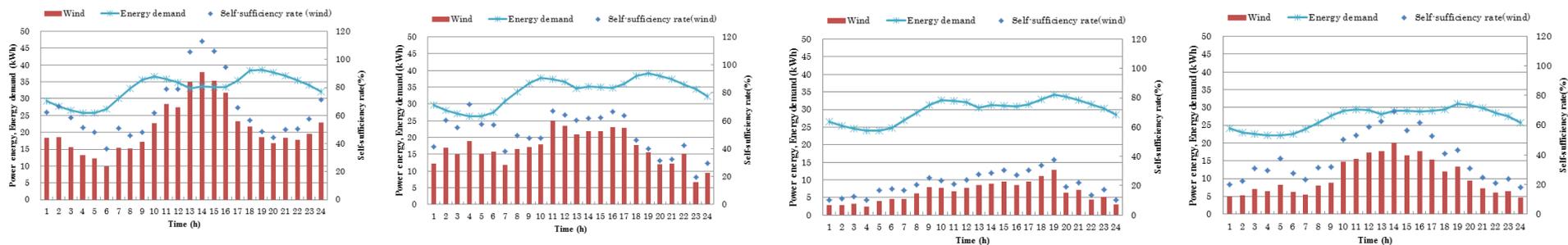
(3): 資源エネルギー庁, 「エネルギー白書2013」

提案モデルでどれだけ電力需要を賄えるか

福島市(左から1月, 4月, 7月, 10月)



津市(左から1月, 4月, 7月, 10月)



★ 1月の自給率が最大(1日平均 福島市:33%, 津市:65%)

★ 7月の自給率が最小(1日平均 福島市:2%, 津市:22%)

➡ ビルモデルの設置方向を決める年間主風向と各月の主風向の位置関係が影響

まとめ

- ✿ 提案ビルモデルについて、主風向からモデルに風が流入する場合、ビル間角度 α ($90, 135, 180^\circ$)および流入風速 U_0 によらず、**ビル間後方直近で加速風が得られる。**
- ✿ 本モデルについて、斜め流入風では十分な加速は得られないが、最適 α の決定には影響を及ぼし、**最適 α は 135°** である。
- ✿ 本モデルを福島市と津市に設置想定した場合、**発電電力量は1日当たりでは日中、年間では冬季に多くなった。**1日当たりの自給率は1月に最大、7月に最小となった。
- ✿ 本モデルの発電特性はビルモデルの設置方向を決定する年間主風向と風向の時間変動、季節変動との相関によって決まることが明らかとなった。

謝辞

本研究は、一般財団法人前川報恩会平成26年度
研究助成を受けて行われた。
ここに謝意を表す。