

可搬型ガスタービン発電機からの 高温排熱の拡散性状に関する研究

指導教員

青木翔吾
赤林伸一教授

電力は人類の生活にとって欠かせないエネルギーであるが、大規模な自然災害などの影響により発電所の発電設備等が破損し、電力供給量の不足が懸念される。



大型の可搬型ガスタービン発電機（可搬型GT）※¹により一時的に電力の供給を行うことが考えられる。

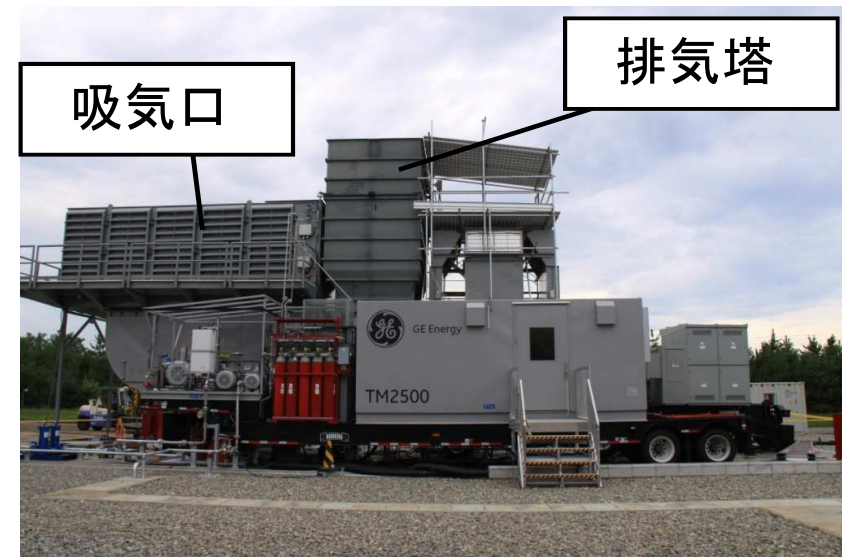


図 可搬型GT

※¹ 発電機の最大出力は2.5万kW

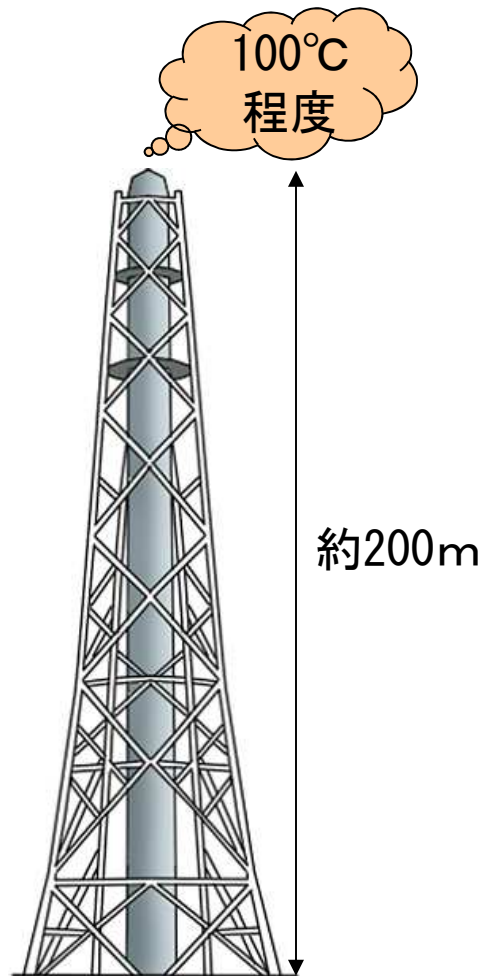


図 従来の発電所

従来の発電所では高さ約200mの煙突から100°C程度の排気を行うが、可搬型GTでは高さ約10mの排気塔から500°C以上の排気が行われ、周辺環境への影響が懸念される。

高温排熱の拡散性状を把握し、設置条件の検討を行う必要がある。

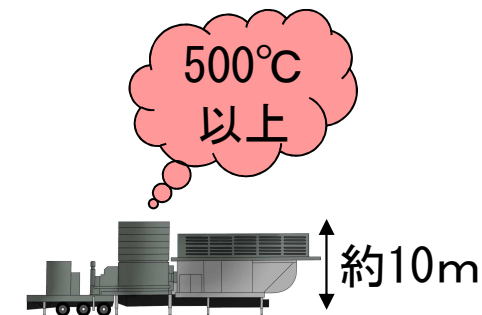


図 可搬型GT

- ・本研究では可搬型GTを対象に、数値流体解析(CFD)を用いて外気温や風向・風速による排熱の拡散性状の把握を行う。
- ・実在の発電所に設置された可搬型GT周辺の温熱環境実測を行う。



数値流体解析結果の妥当性の検討を行う。

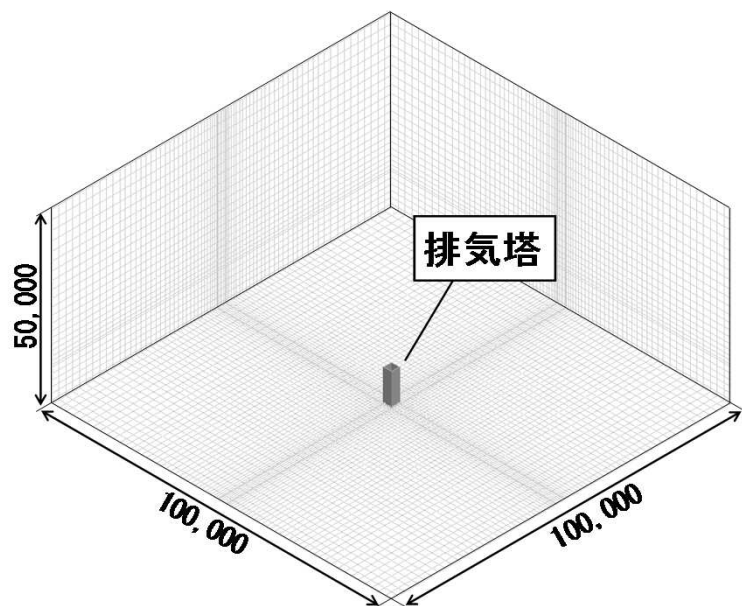
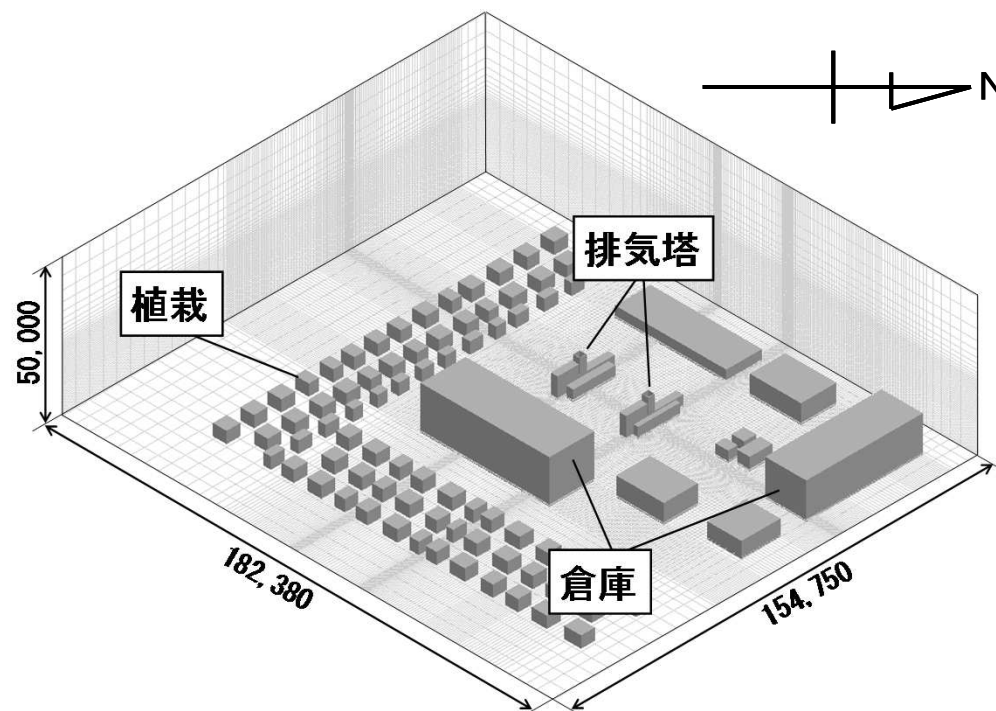


図1 排気塔単体モデル



(b)モデルパース 単位：[mm]
図2 実在発電所内モデル※2

※2 解析対象とする実在発電所は
新潟県S町の火力発電所。

解析概要

表1 解析条件

	排気塔単体モデル		実在発電所内モデル								
解析case	1-1	1-2	2-1	2-2	2-3	2-4	2-5	2-6	2-7	2-8	2-9
外気温[℃]	-1.0	40.0	40.0								
排気風速[m/s]	41.3	36.4	36.4								
排気流量[m ³ /s]	181.7	160.2	160.2								
排気温度[℃]	462.7	530.0	530.0								
外部風速[m/s]	流入1/4乗則(基準高さ9.4m)自由流出										
	30.0		6.0	9.0							
風向	1 風向		北東	北	北東	東	南東	南	南西	西	北西
メッシュ数	76(x)×26(y)×76(z)=150,176		164(x)×54(y)×143(z)=1,266,408								
乱流モデル	標準k-εモデル										

排気塔単体モデルにおいて外気温を-1.0°C、40.0°Cに設定して外気温の相違による拡散性状の把握を目的とした解析を行う。



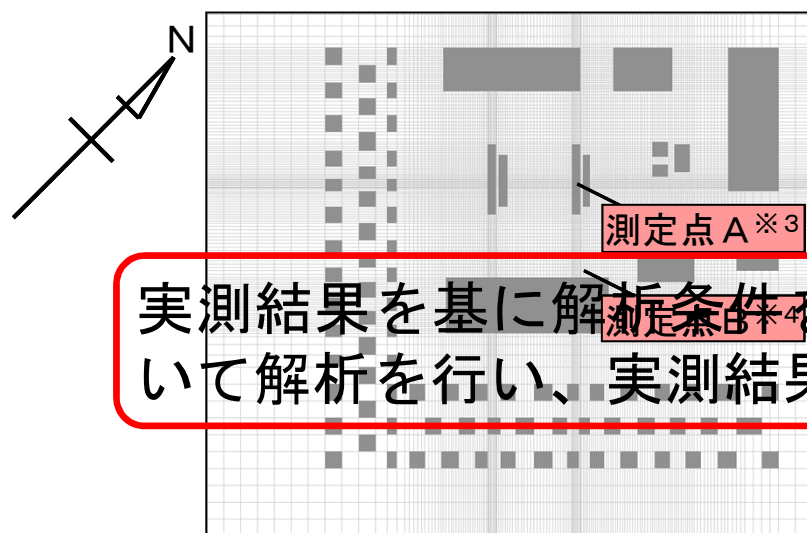
実在発電所内モデルを対象に風向・風速の変化による拡散性状の把握を目的とした解析を行う。



地上付近の温度変化や高温の排気の周辺への到達範囲等の検討を行う。

実測概要

- ・ 測定点 A ※ 3、測定点 B ※ 4 に熱電対を配置した測定用ポールを設置し、データロガーを用いて可搬型GT稼働時における温熱環境の実測を行う。
- ・ 対象敷地の風向・風速、可搬型GTからの排気温度の測定を行う。



(a) 平面図

図 2 実在発電所内モデル

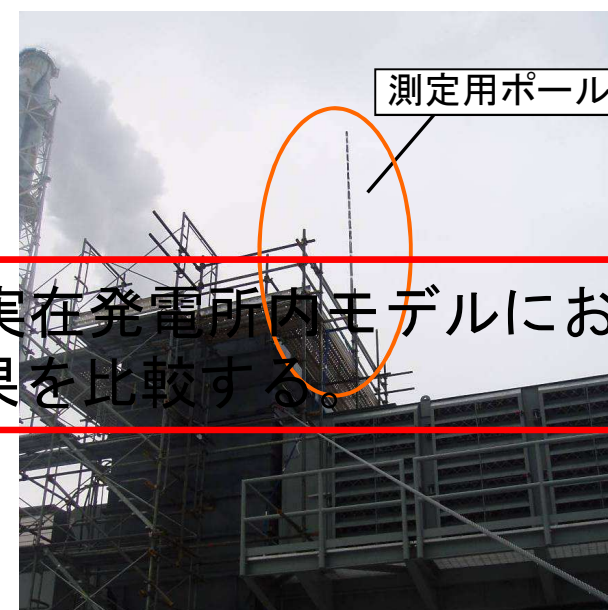


図 測定用ポール(測定点 A)

実測結果を基に解析条件を設定し、実在発電所内モデルにおいて解析を行い、実測結果と解析結果を比較する。

※ 3 測定点 A における測定点高さは、1.1、9.4、9.9、10.4、10.9、11.4、11.9、12.15、12.4、12.65、12.9、13.15、13.4、13.65、13.9、14.15、14.4m。

※ 4 測定点 B における測定点高さは、7.0、8.0、9.0、10.0、11.0、12.0、13.0、14.0、15.0、16.0m。

解析結果

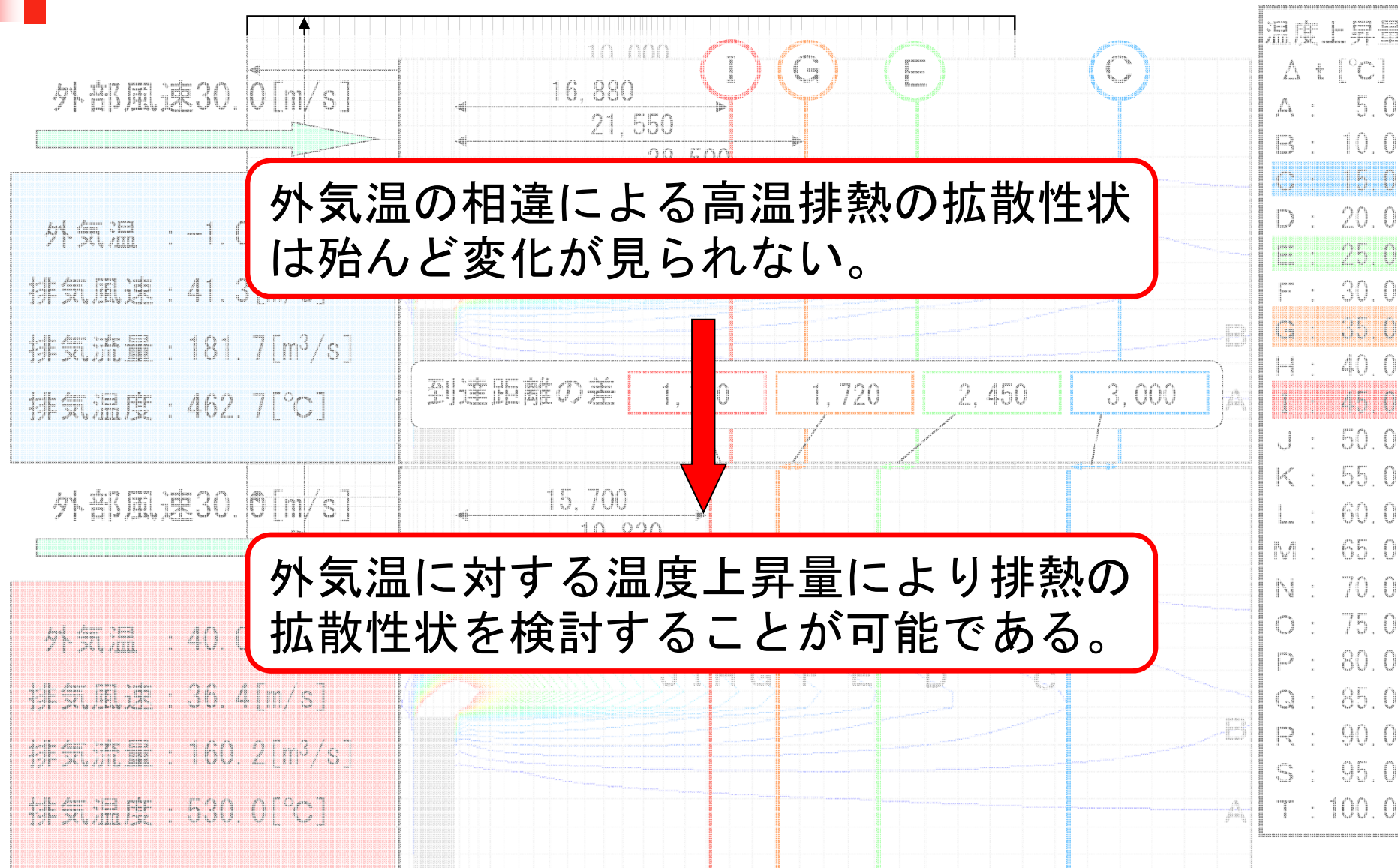


図3 排気塔単体モデルの温度分布

単位 : [mm]

解析結果

表 実在発電所内モデル解析条件

	実在発電所内モデル								
解析case	2-1	2-2	2-3	2-4	2-5	2-6	2-7	2-8	2-9
外気温[°C]	40.0								
排気風速[m/s]	36.4								
排気流量[m ³ /s]	160.2								
排気温度[°C]	530.0								
外部風速[m/s]	流入1/4乗則(基準高さ9.4m)自由流出								
	6.0	9.0							
風向	北東	北	北東	東	南東	南	南西	西	北西
メッシュ数	164(x) × 54(y) × 143(z)=1,266,408								
乱流モデル	標準k-εモデル								

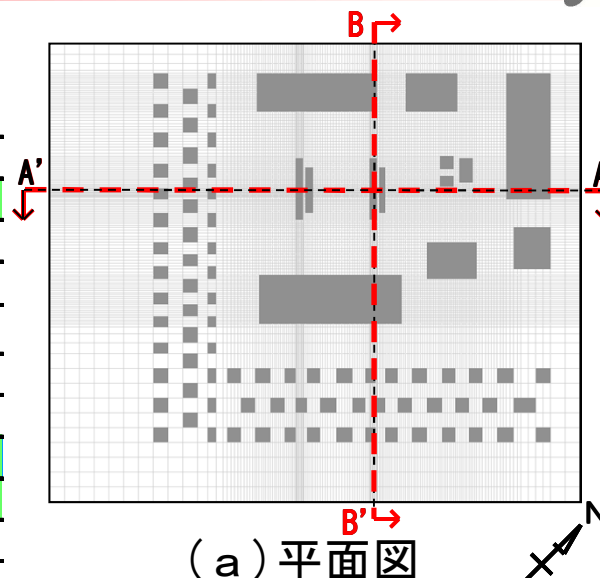


図2 実在発電所内モデル

温度上昇量 Δt [°C]	
A :	5.0
B :	10.0
C :	15.0
D :	20.0
E :	25.0
F :	30.0
G :	35.0
H :	40.0
I :	45.0
J :	50.0
K :	55.0
L :	60.0
M :	65.0
N :	70.0
O :	75.0
P :	80.0
Q :	85.0
R :	90.0
S :	95.0
T :	100.0

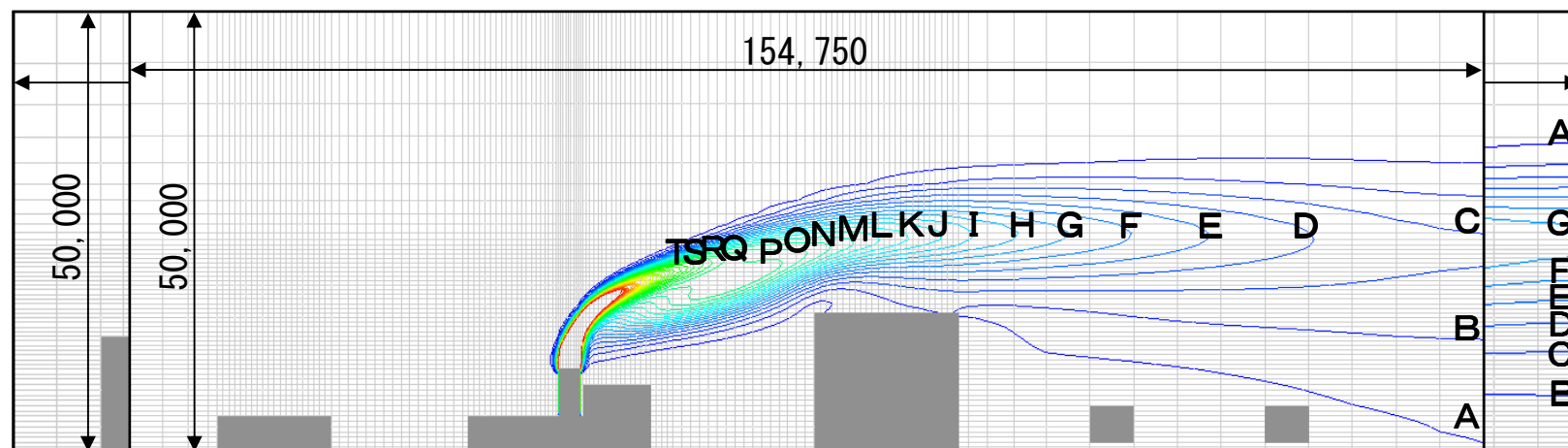


図4 実在発電所内モデルの温度分布

単位 : [mm]

解析結果

温度上昇量 Δt [°C]
A : 5.0
B : 10.0
C : 15.0
D : 20.0
E : 25.0
F : 30.0
G : 35.0
H : 40.0
I : 45.0
J : 50.0
K : 55.0
L : 60.0
M : 65.0
N : 70.0
O : 75.0
P : 80.0
Q : 85.0
R : 90.0
S : 95.0
T : 100.0

解析case2-1

A-A' 断面

風向北東

外部風速6.0[m/s]

高温排熱の地上付近への影響は極めて少ないが上空には大きな影響を与える。

地上付近の温度は外気温
+ 0 ~ 5 °C程度となる。

風向北東

外部風速9.0[m/s]

可搬型GTを設置する場合は周辺の高層建築物に対する配慮が必要である。

解析case2-9

B-B' 断面

風向北西

外部風速9.0[m/s]

風向北東では2台の高温排熱が重複し、高温排熱の到達範囲が広がる。

図4

実在発

[m]

実測結果

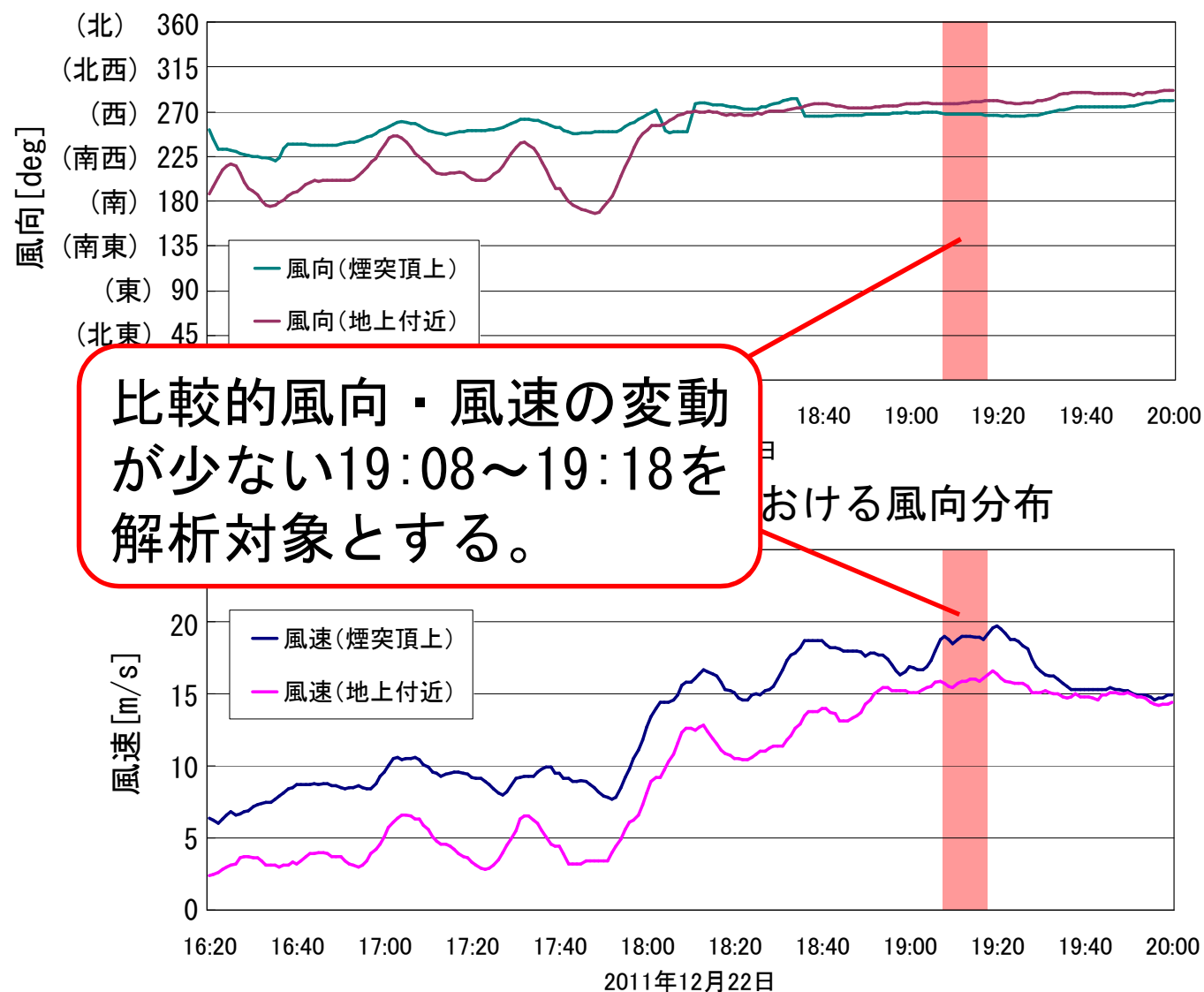


図 可搬型GT稼働時※における風速分布

※ 測定時の発電機の出力は約5,000kW(定格出力の約20%)で、稼働時間帯は16:22～19:44。

実測結果

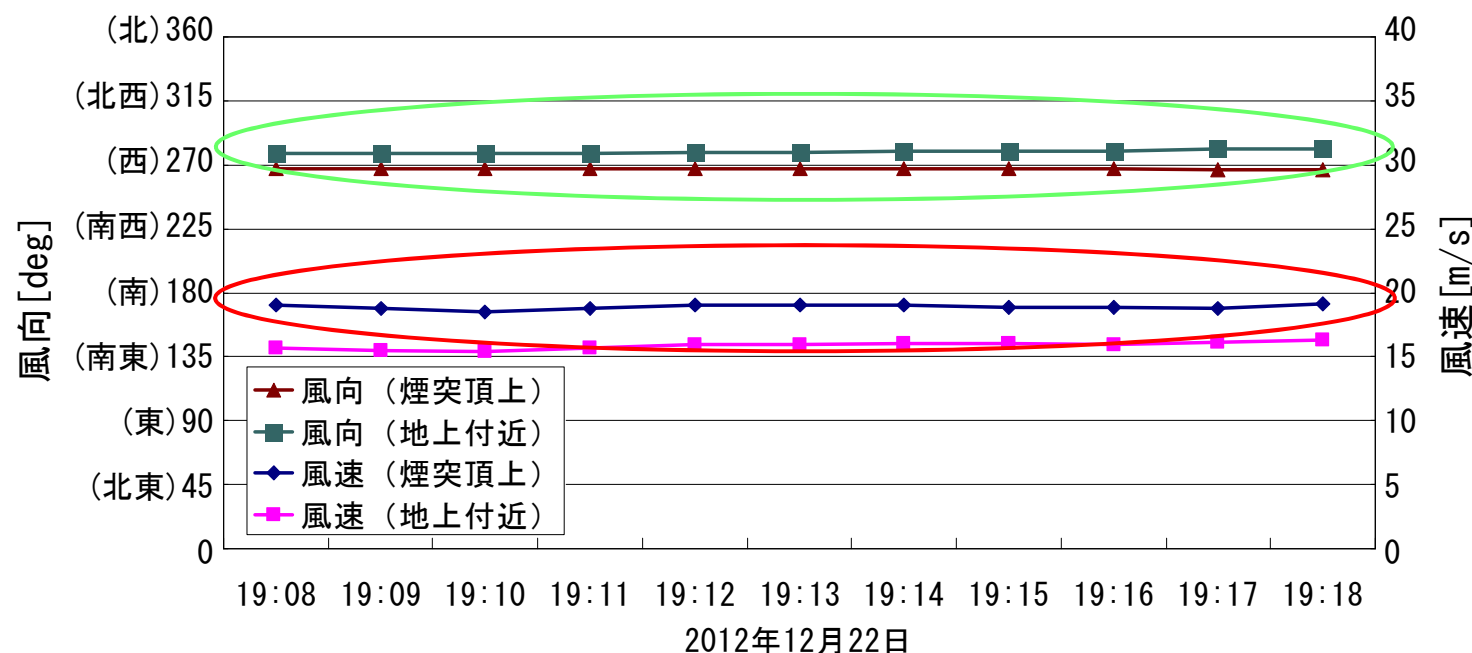


図 解析対象期間(19:08~19:18)における風向・風速

表2 実測値に基づく解析条件

	実在発電所内モデル(実測条件)
外気温[°C]	8.0
排気風速[m/s]	32.6
排気流量[m ³ /s]	143.4
排気温度[°C]	200.0
外部風速[m/s]	流入1/4乗則(基準高さ9.4m)自由流出
	18.9
風向	1 風向(西)
メッシュ数	164(x) × 54(y) × 143(z) = 1,266,408
乱流モデル	標準k-εモデル

解析結果(実測条件)

温度上昇量 Δt [°C] (解析結果)	
A :	5.0
B :	10.0
C :	15.0
D :	20.0
E :	25.0
F :	30.0
G :	35.0
H :	40.0
I :	45.0
J :	50.0
K :	55.0
L :	60.0
M :	65.0
N :	70.0
O :	75.0
P :	80.0
Q :	85.0
R :	90.0
S :	95.0
T :	100.0

単位 : [mm]

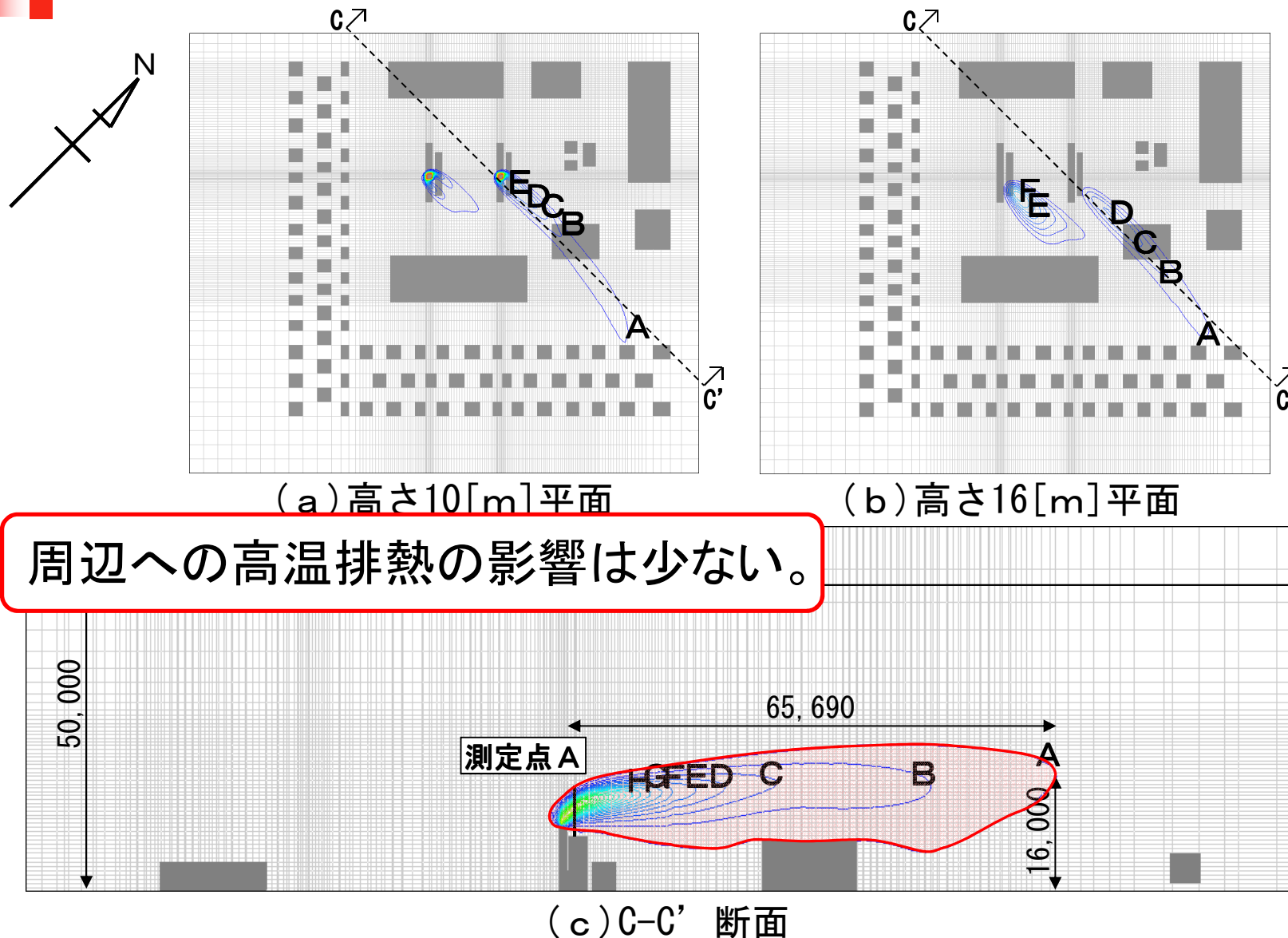
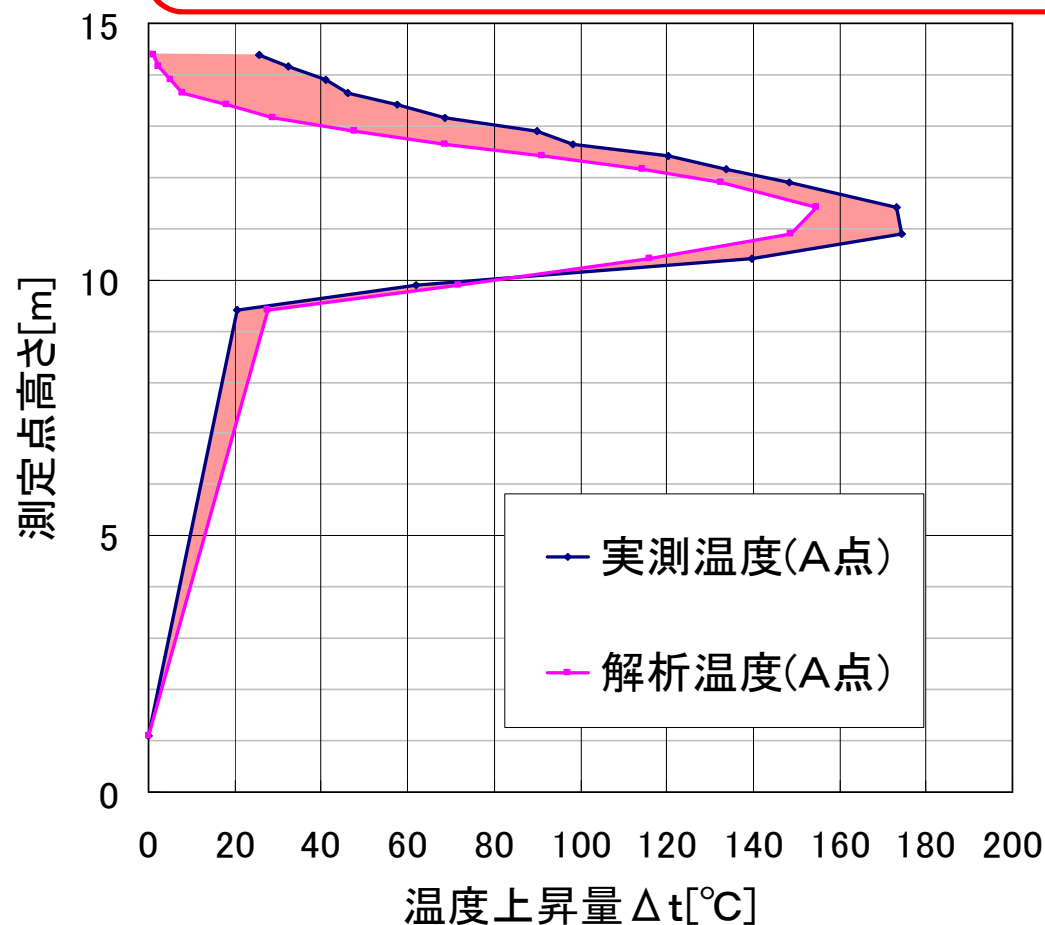


図5 実在発電所内モデルの温度分布(実測条件)

解析結果(実測条件)

解析結果は概ね妥当で可搬型GTの設置の検討に数値流体解析は有効である。



測定点 A では、全体で解析結果の方が実測結果に比べて温度上昇量が平均約23°C低い。

実測は外部風向・風速が時間的に変動するが、解析は境界条件が一定のため差が生じたと考えられる。

鉛直方向の実測結果と解析結果の比較

図6 実測結果及び解析結果の温度分布

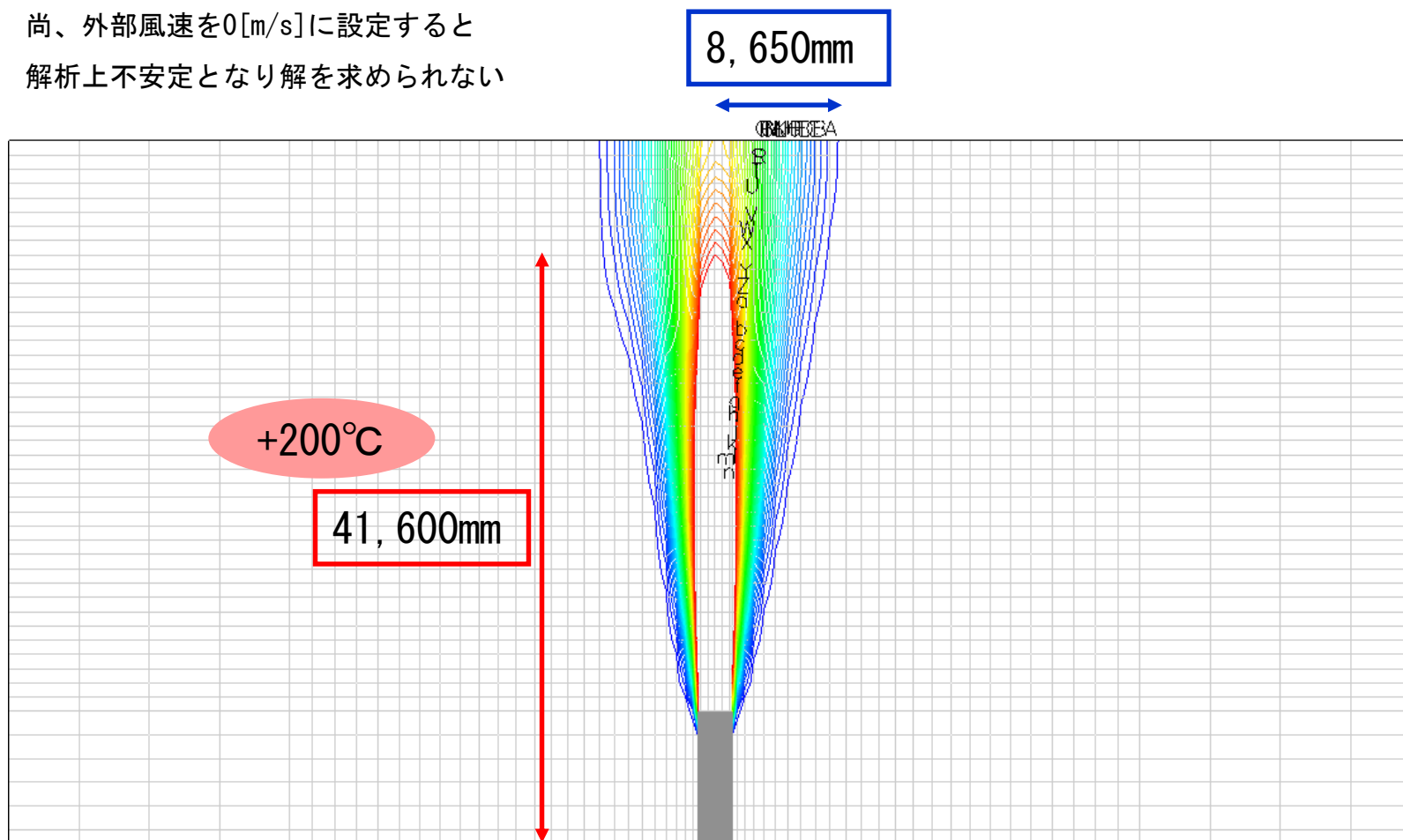
- ①外気温の相違によって高温排熱の拡散性状には殆んど変化が見られない。
- ②可搬型GT 2 台からの高温排熱が重複する風向では高温排熱の到達範囲が広がる。
- ③実測結果と解析結果はほぼ相似形の温度分布になるが、解析結果の方が実測結果に比べて温度上昇量が平均約23℃低い。
- ④解析結果は概ね妥当で可搬型GTの設置の検討に数値流体解析は有効である。
- ⑤可搬型GTからの高温排熱の地上付近への影響は極めて少ない。上空では影響が大きいため、周辺の高層建築物に対する配慮が必要である。

解析結果

無風の状態だと200℃の排気は40m以上上昇する

尚、外部風速を0[m/s]に設定すると

解析上不安定となり解を求められない



温度上昇量

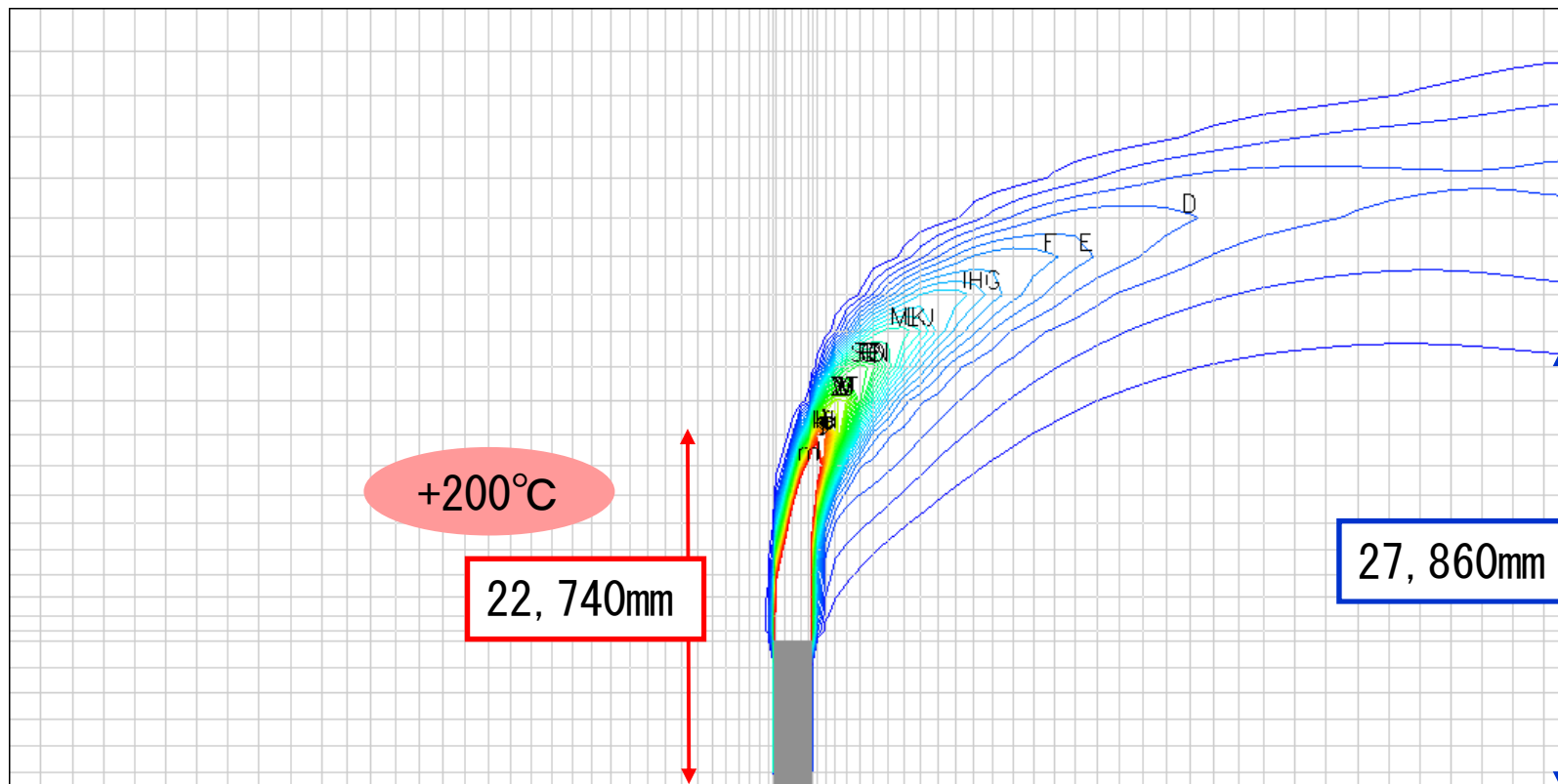
Δt [°C]

A :	5.0
B :	10.0
C :	15.0
D :	20.0
E :	25.0
F :	30.0
G :	35.0
H :	40.0
I :	45.0
J :	50.0
K :	55.0
L :	60.0
M :	65.0
N :	70.0
O :	75.0
P :	80.0
Q :	85.0
R :	90.0
S :	95.0
T :	100.0

図 排気塔単体モデル 外部風速0.01[m/s] 外気温39.1℃ 排気塔中心断面

解析結果

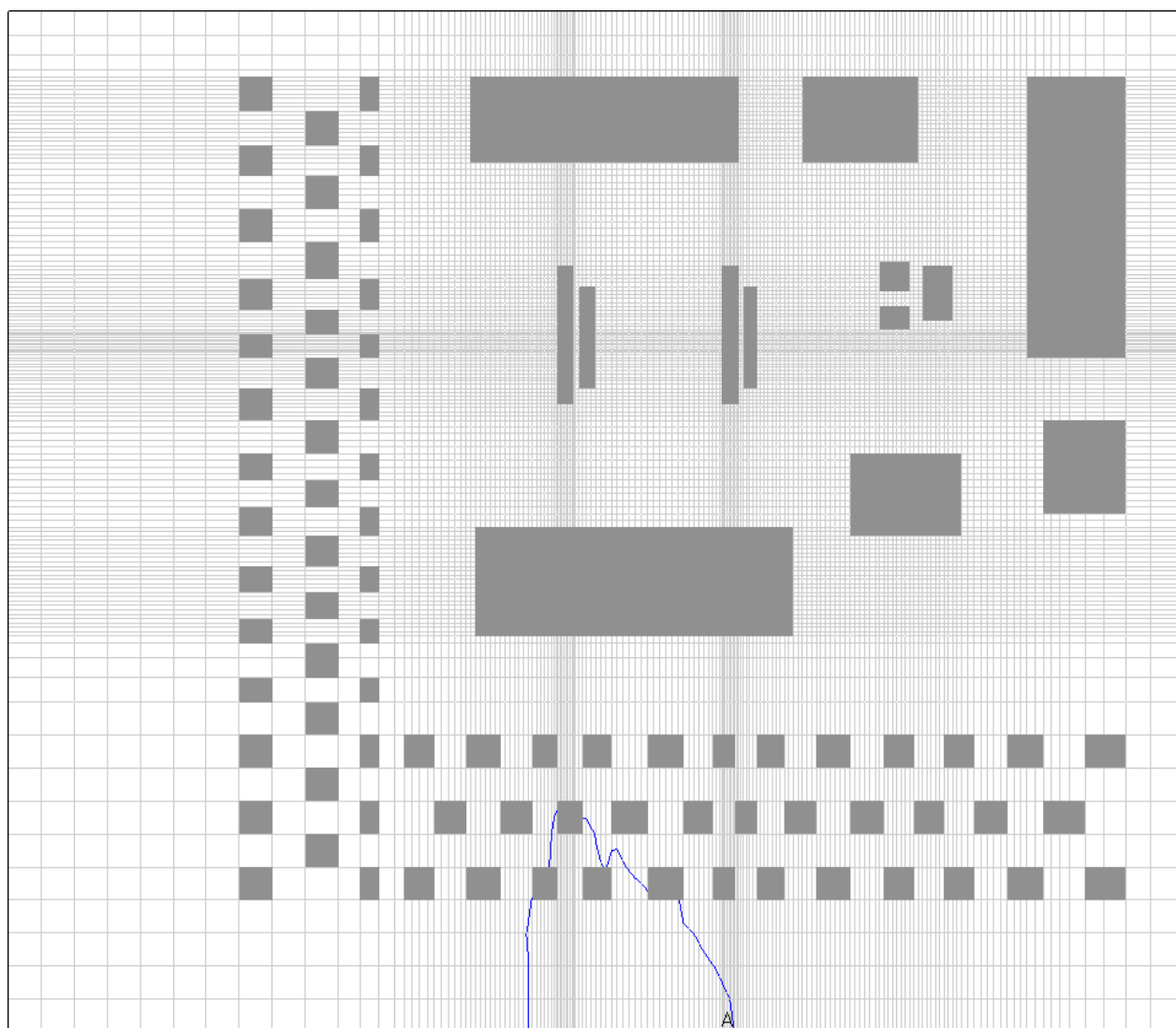
新潟の平均風速4.3[m/s]では上昇が強く地上付近の温度が分からない。
→排気速度と同程度の外部風速で解析を行えば地上付近まで排熱が届くのではないかと想定し外部風速を30.0 [m/s]と設定した。



温度上昇量	
Δt [°C]	
A :	5.0
B :	10.0
C :	15.0
D :	20.0
E :	25.0
F :	30.0
G :	35.0
H :	40.0
I :	45.0
J :	50.0
K :	55.0
L :	60.0
M :	65.0
N :	70.0
O :	75.0
P :	80.0
Q :	85.0
R :	90.0
S :	95.0
T :	100.0

図 排気塔単体モデル 外部風速4.3[m/s] 外気温39.1°C 排気塔中心断面

解析結果



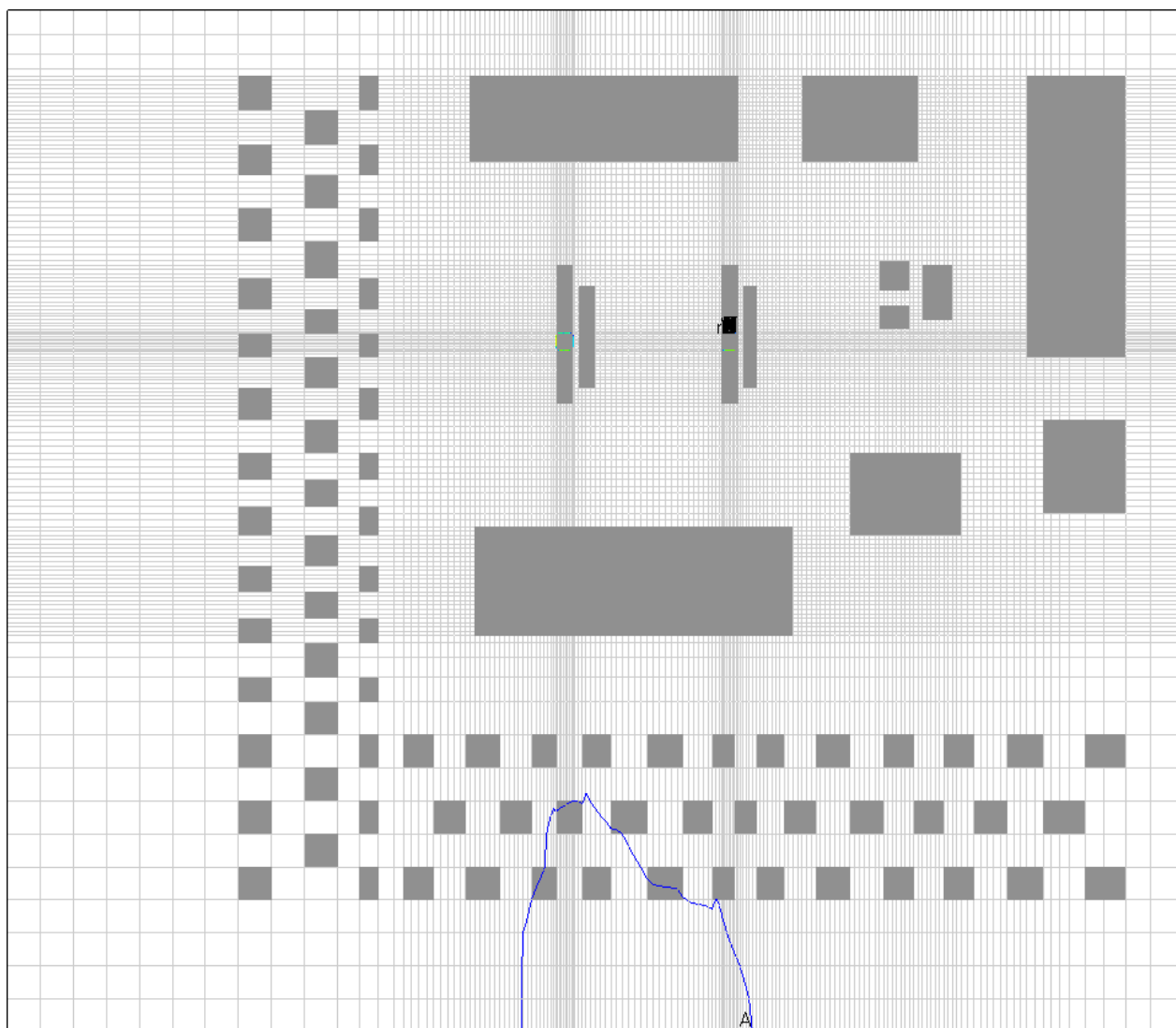
温度上昇量

Δt [°C]

A :	5.0
B :	10.0
C :	15.0
D :	20.0
E :	25.0
F :	30.0
G :	35.0
H :	40.0
I :	45.0
J :	50.0
K :	55.0
L :	60.0
M :	65.0
N :	70.0
O :	75.0
P :	80.0
Q :	85.0
R :	90.0
S :	95.0
T :	100.0

図 風向北西 外部風速9.0[m/s] 高さ2m水平断面

解析結果



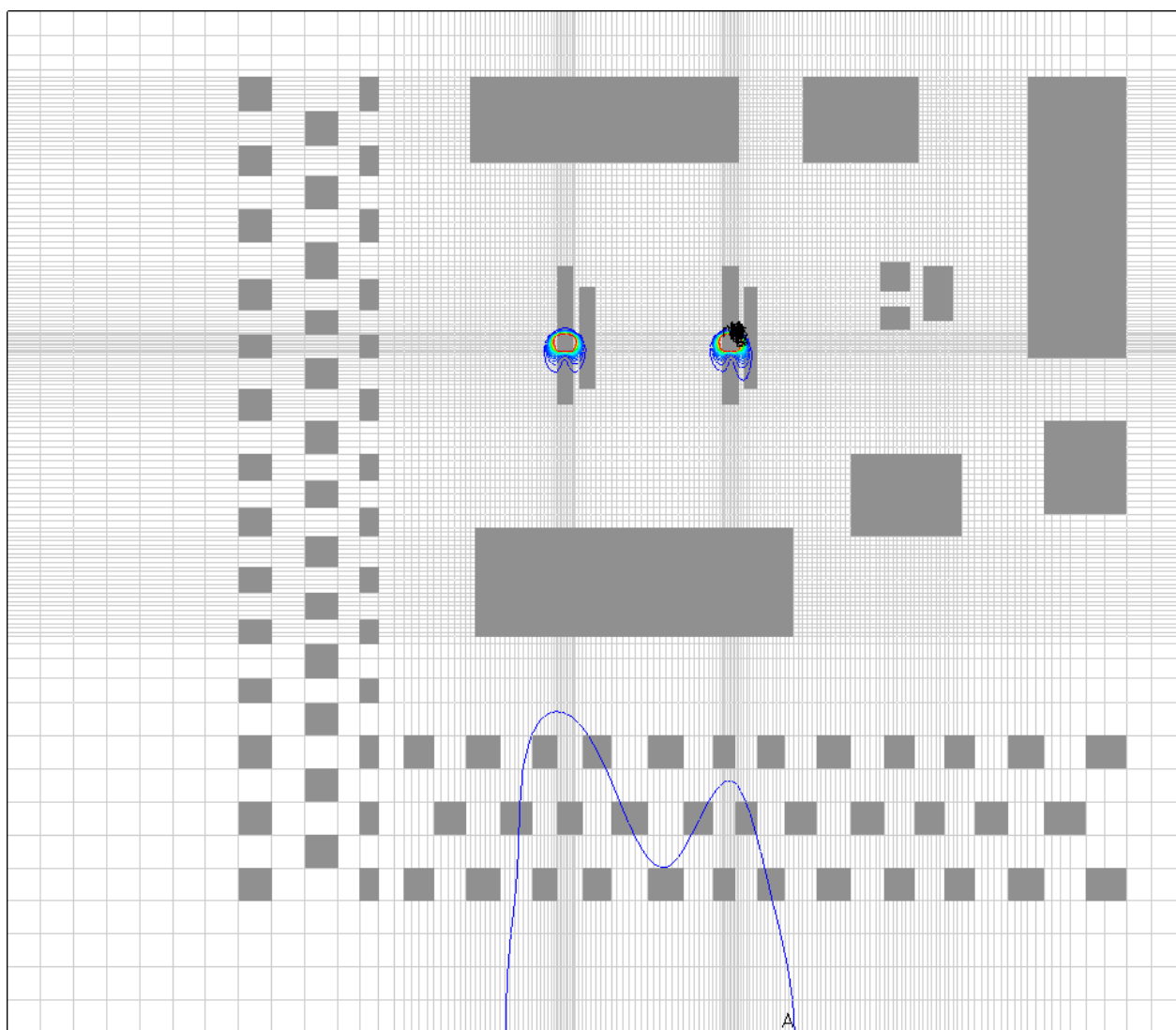
温度上昇量

Δt [°C]

A :	5.0
B :	10.0
C :	15.0
D :	20.0
E :	25.0
F :	30.0
G :	35.0
H :	40.0
I :	45.0
J :	50.0
K :	55.0
L :	60.0
M :	65.0
N :	70.0
O :	75.0
P :	80.0
Q :	85.0
R :	90.0
S :	95.0
T :	100.0

図 風向北西 外部風速9.0[m/s] 高さ5m水平断面

解析結果



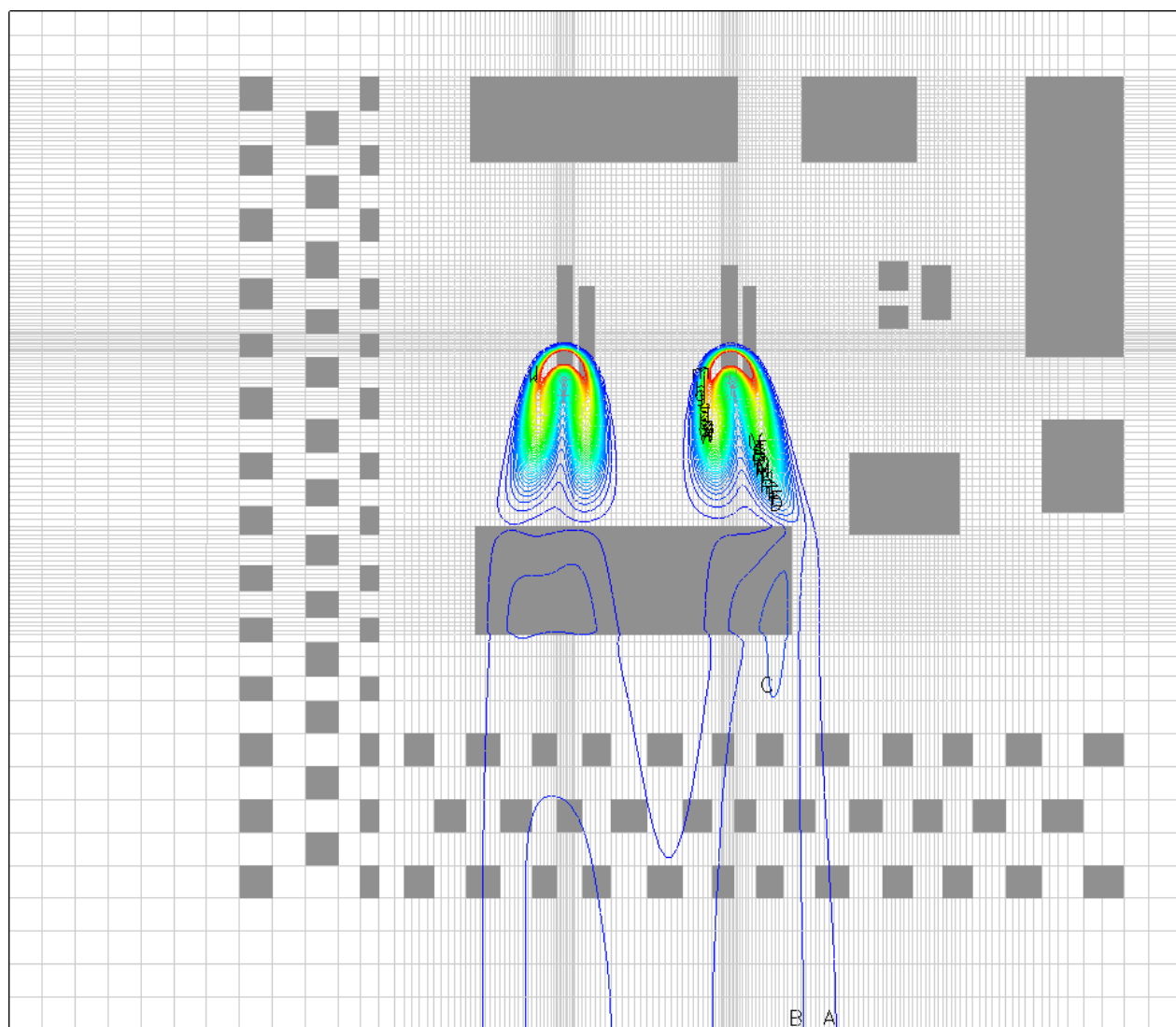
温度上昇量

Δt [°C]

A :	5.0
B :	10.0
C :	15.0
D :	20.0
E :	25.0
F :	30.0
G :	35.0
H :	40.0
I :	45.0
J :	50.0
K :	55.0
L :	60.0
M :	65.0
N :	70.0
O :	75.0
P :	80.0
Q :	85.0
R :	90.0
S :	95.0
T :	100.0

図 風向北西 外部風速9.0[m/s] 高さ10m水平断面

解析結果



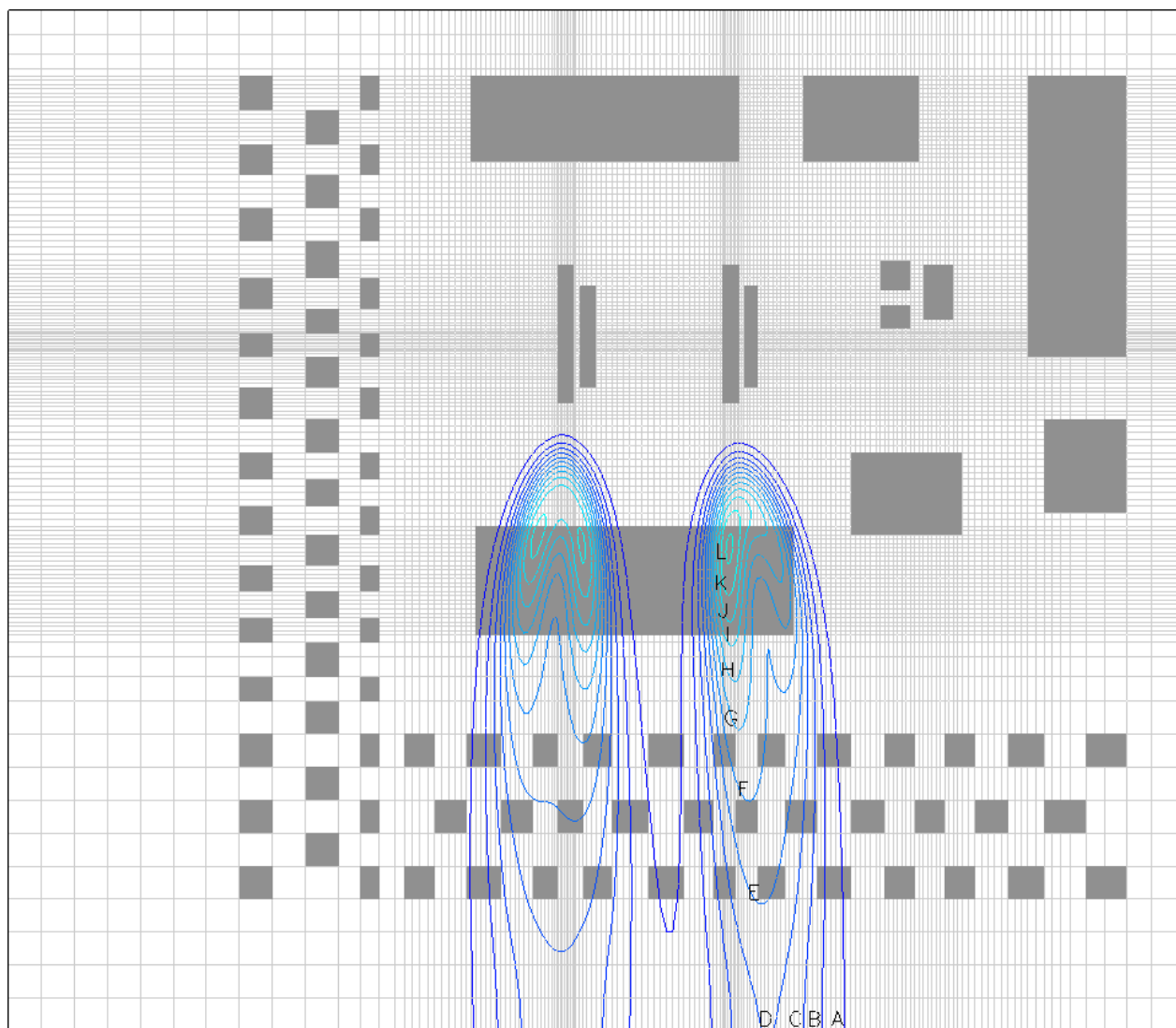
温度上昇量

Δt [°C]

A :	5.0
B :	10.0
C :	15.0
D :	20.0
E :	25.0
F :	30.0
G :	35.0
H :	40.0
I :	45.0
J :	50.0
K :	55.0
L :	60.0
M :	65.0
N :	70.0
O :	75.0
P :	80.0
Q :	85.0
R :	90.0
S :	95.0
T :	100.0

図 風向北西 外部風速9.0[m/s] 高さ16m水平断面

解析結果



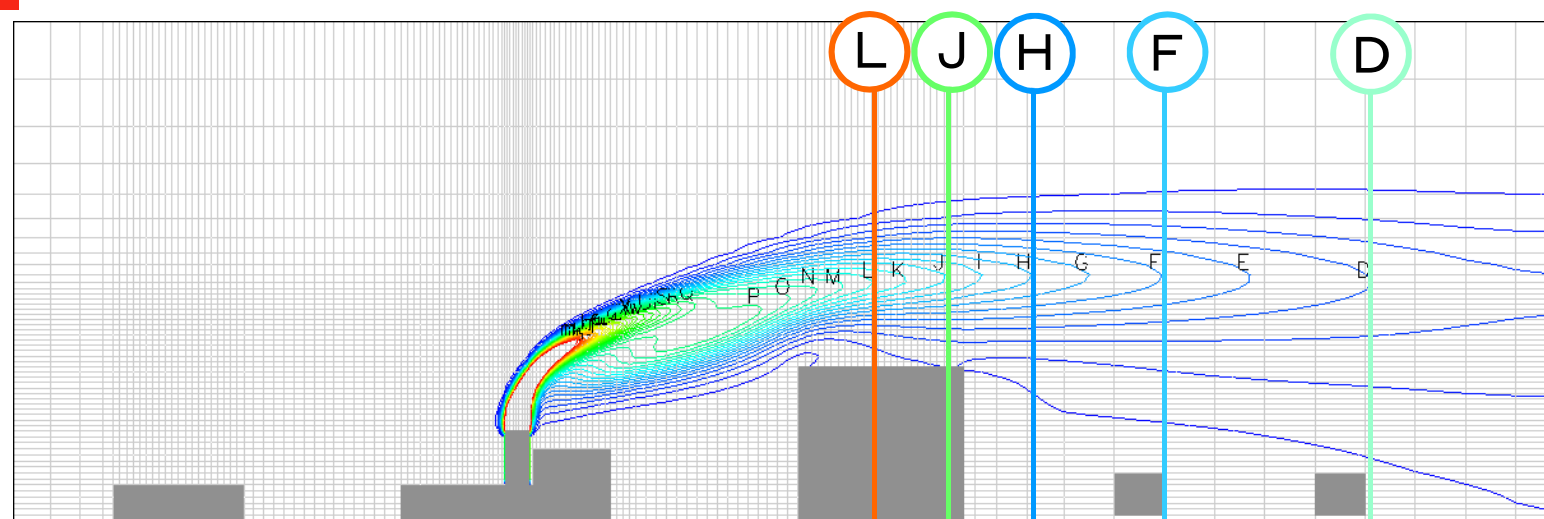
温度上昇量

Δt [°C]

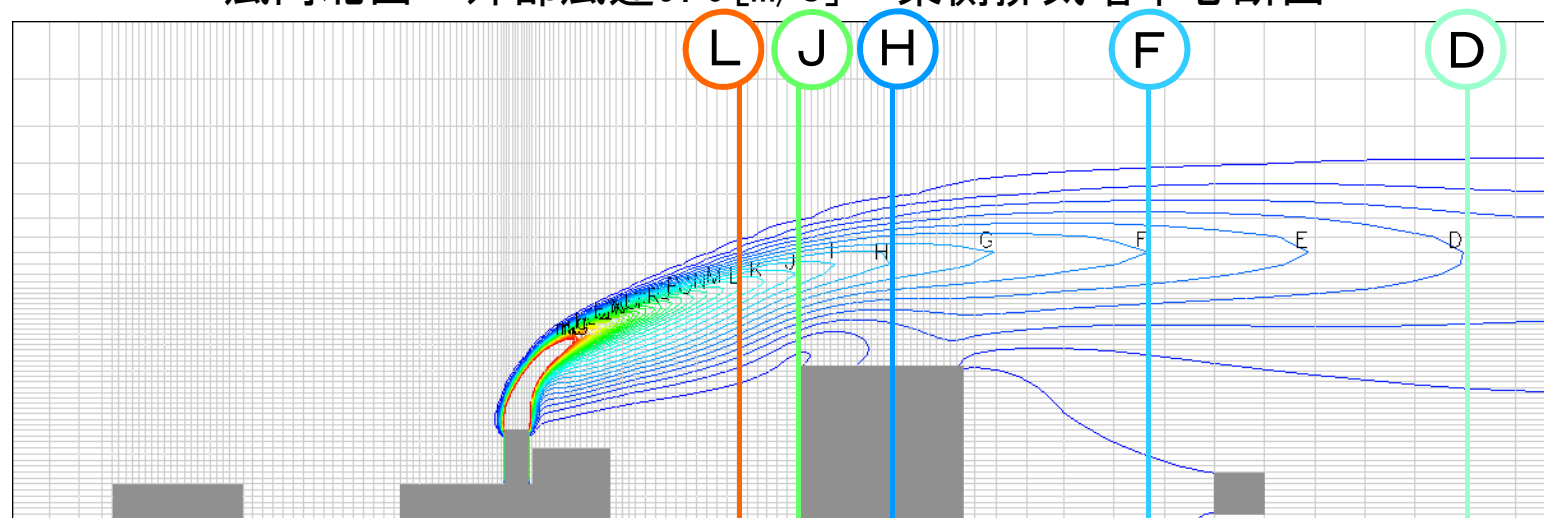
A :	5.0
B :	10.0
C :	15.0
D :	20.0
E :	25.0
F :	30.0
G :	35.0
H :	40.0
I :	45.0
J :	50.0
K :	55.0
L :	60.0
M :	65.0
N :	70.0
O :	75.0
P :	80.0
Q :	85.0
R :	90.0
S :	95.0
T :	100.0

図 風向北西 外部風速9.0[m/s] 高さ25m水平断面

解析結果



風向北西 外部風速9.0[m/s] 東側排気塔中心断面



風向北西 外部風速9.0[m/s] 西側排気塔中心断面

図 実在発電所内モデルの温度分布

温度上昇量

Δt [°C]

A : 5.0

B : 10.0

C : 15.0

D : 20.0

E : 25.0

F : 30.0

G : 35.0

H : 40.0

I : 45.0

J : 50.0

K : 55.0

L : 60.0

M : 65.0

N : 70.0

O : 75.0

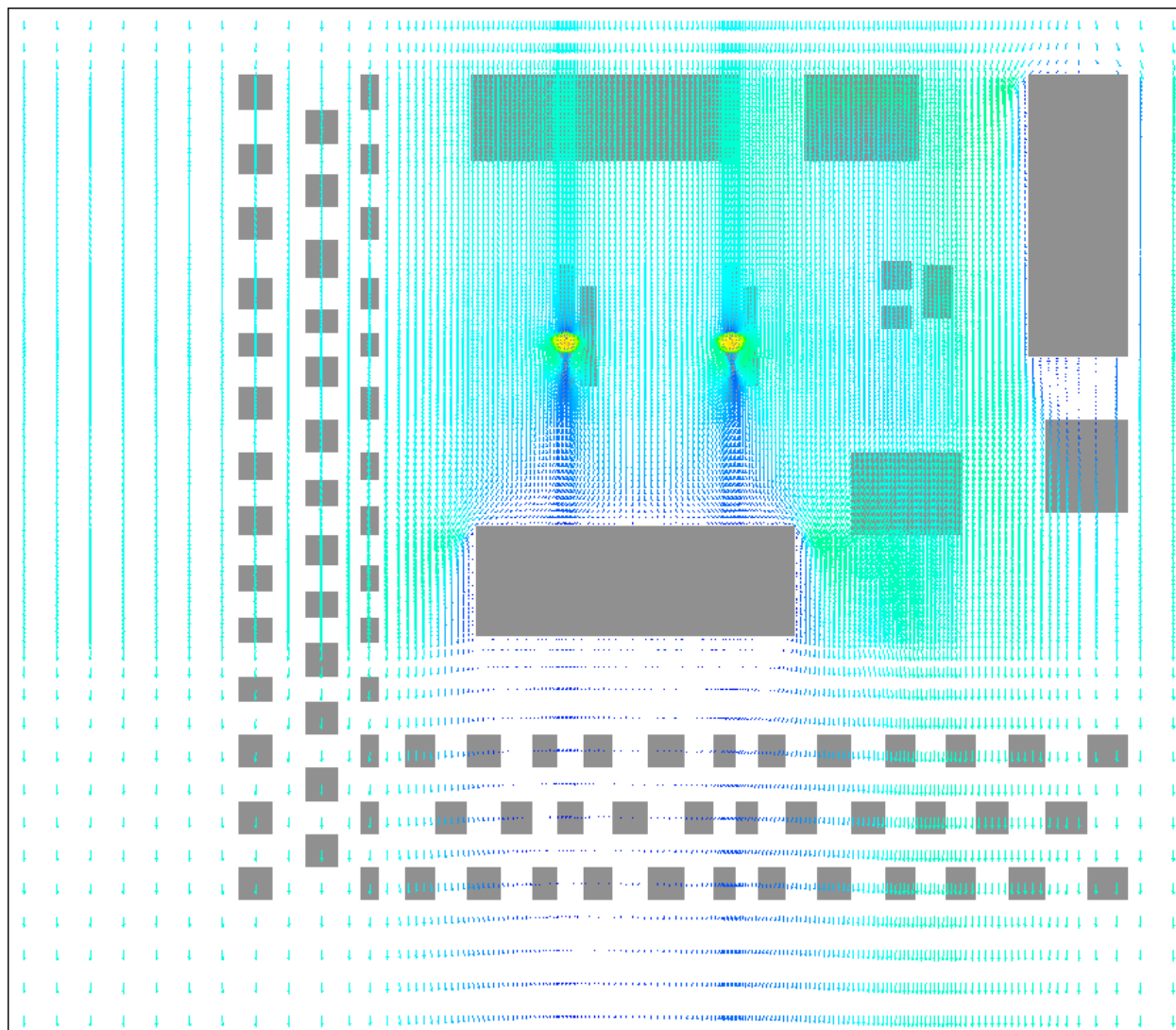
P : 80.0

Q : 85.0

R : 90.0

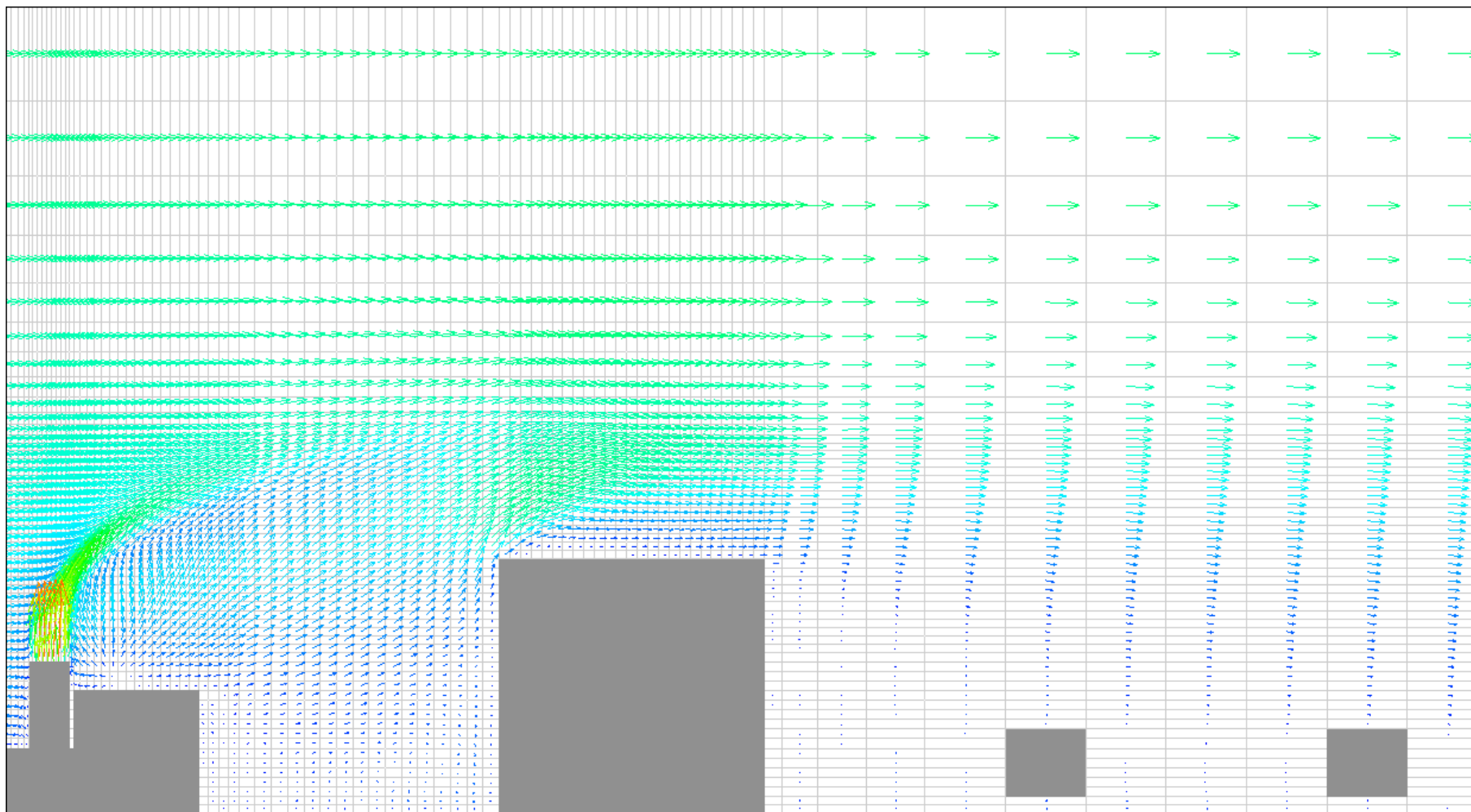
S : 95.0

T : 100.0



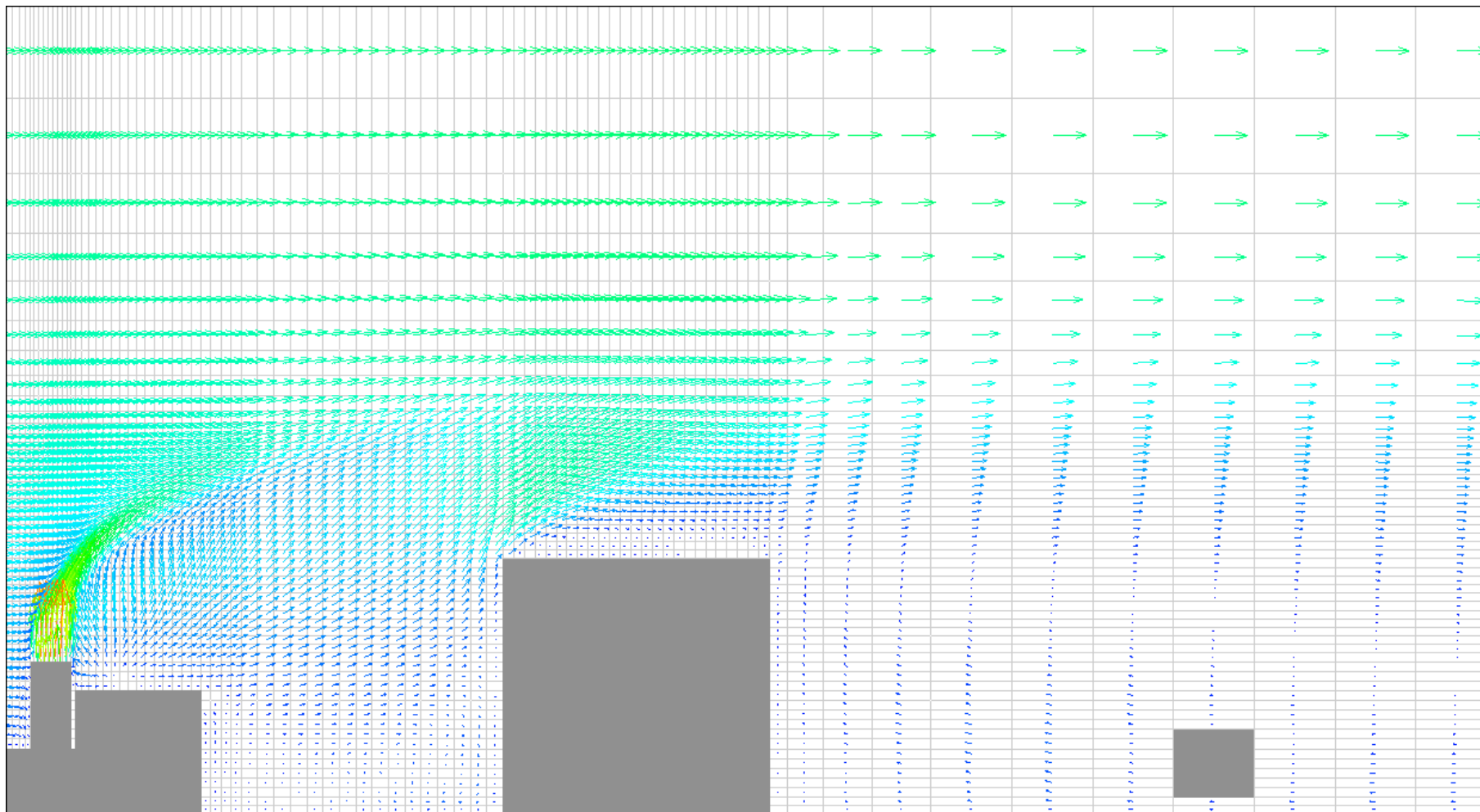
風向北西 外部風速9.0[m/s] 西側排気塔中心断面
図 実在発電所内モデルのベクトル分布

解析結果



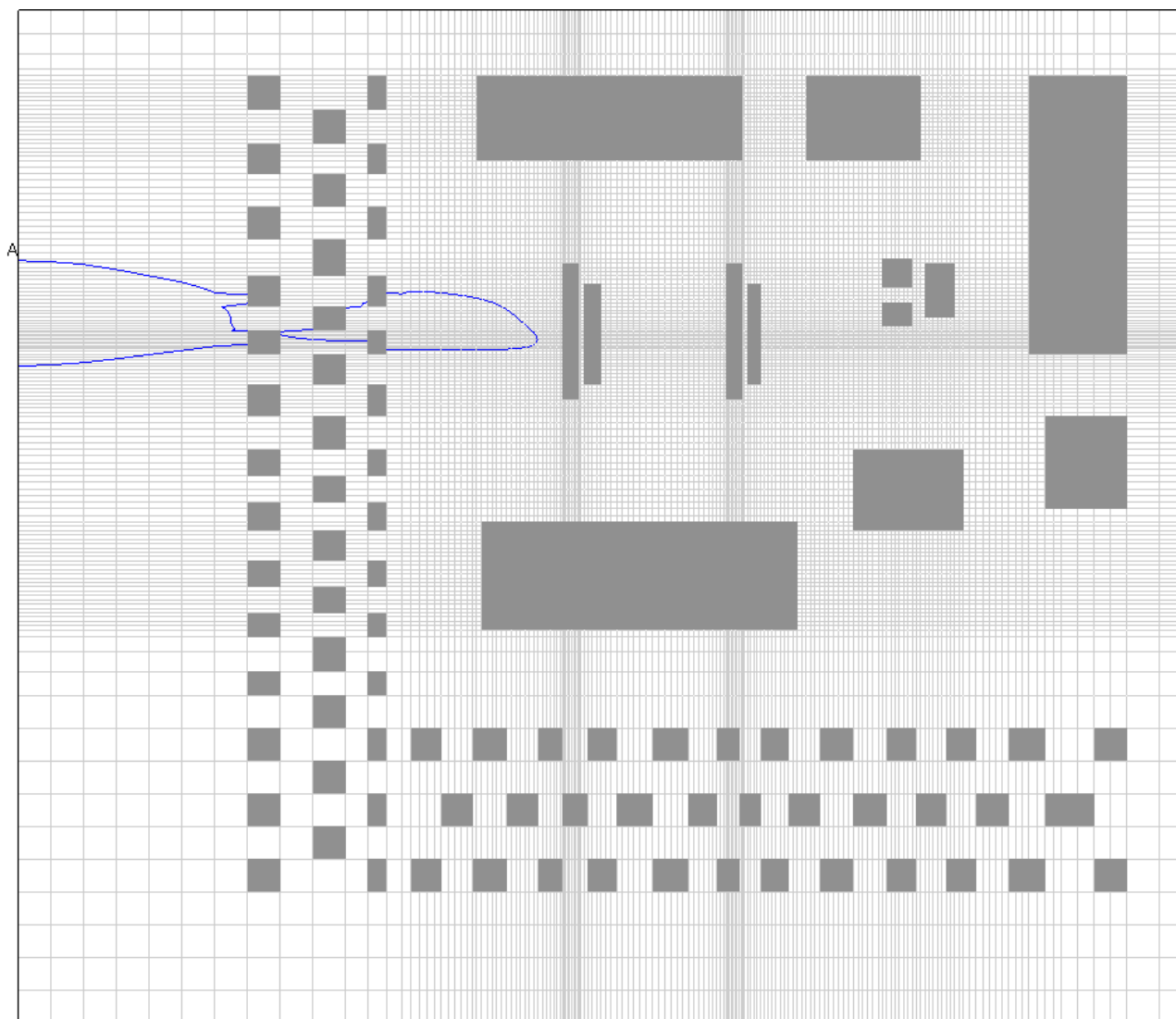
風向北西 外部風速9.0[m/s] 東側排気塔中心断面
図 実在発電所内モデルのベクトル分布

解析結果



風向北西 外部風速9.0[m/s] 西側排気塔中心断面
図 実在発電所内モデルのベクトル分布

解析結果



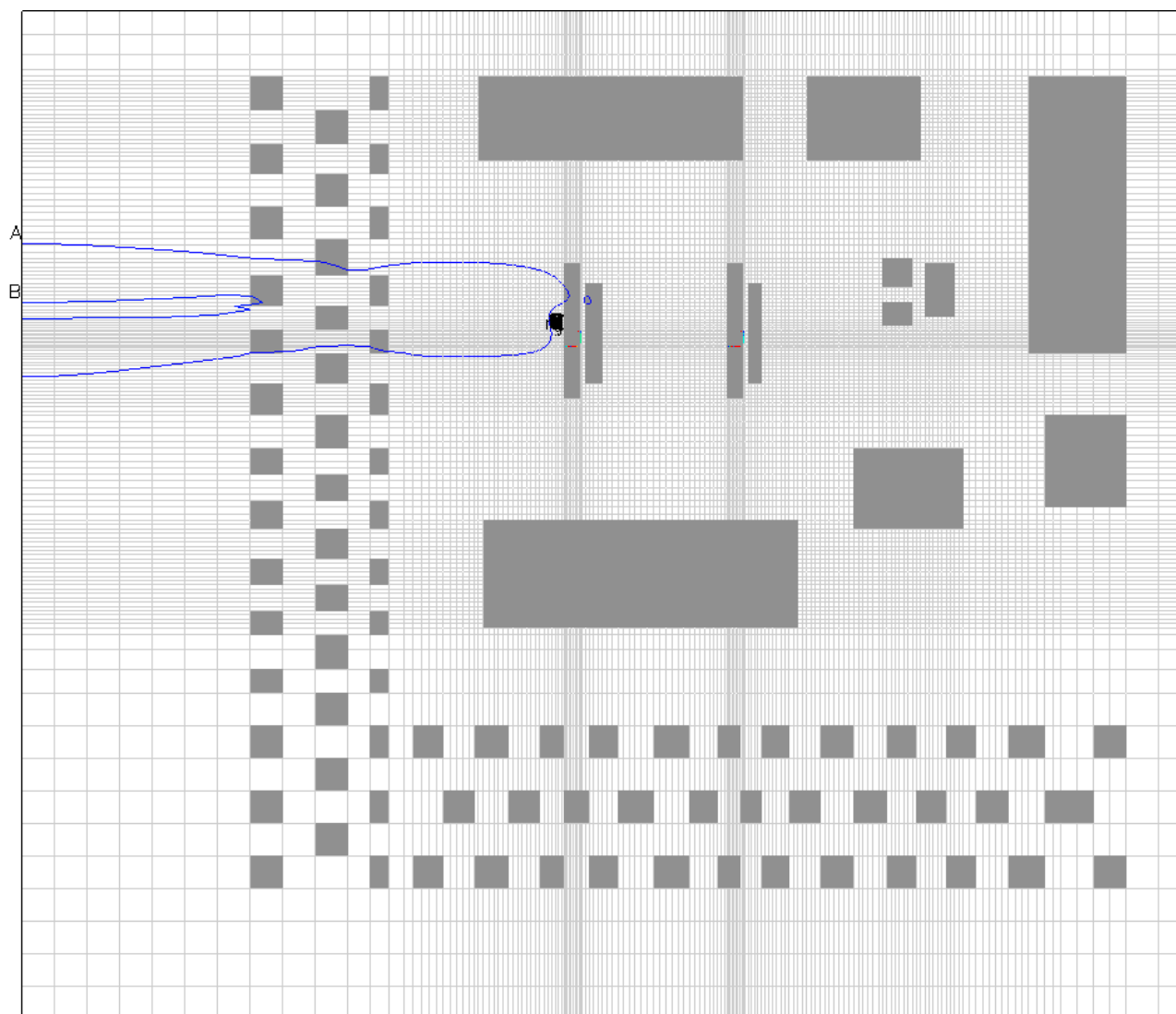
温度上昇量

Δt [°C]

A :	5.0
B :	10.0
C :	15.0
D :	20.0
E :	25.0
F :	30.0
G :	35.0
H :	40.0
I :	45.0
J :	50.0
K :	55.0
L :	60.0
M :	65.0
N :	70.0
O :	75.0
P :	80.0
Q :	85.0
R :	90.0
S :	95.0
T :	100.0

図 風向北東 外部風速9.0[m/s] 高さ2m水平断面

解析結果



温度上昇量

Δt [°C]

A :	5.0
B :	10.0
C :	15.0
D :	20.0
E :	25.0
F :	30.0
G :	35.0
H :	40.0
I :	45.0
J :	50.0
K :	55.0
L :	60.0
M :	65.0
N :	70.0
O :	75.0
P :	80.0
Q :	85.0
R :	90.0
S :	95.0
T :	100.0

図 風向北東 外部風速9.0[m/s] 高さ5m水平断面

解析結果

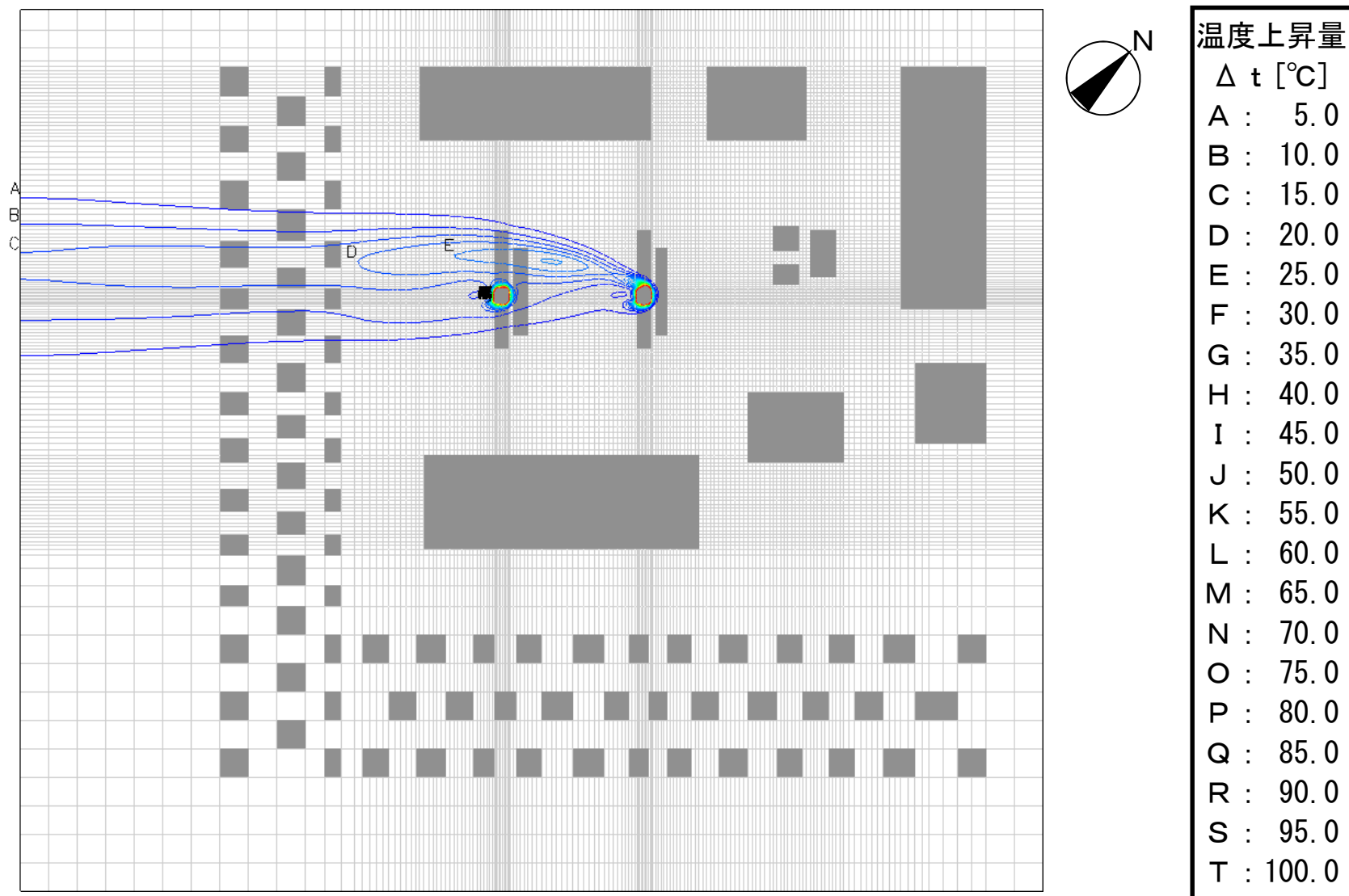


図 風向北東 外部風速9.0[m/s] 高さ10m水平断面

解析結果

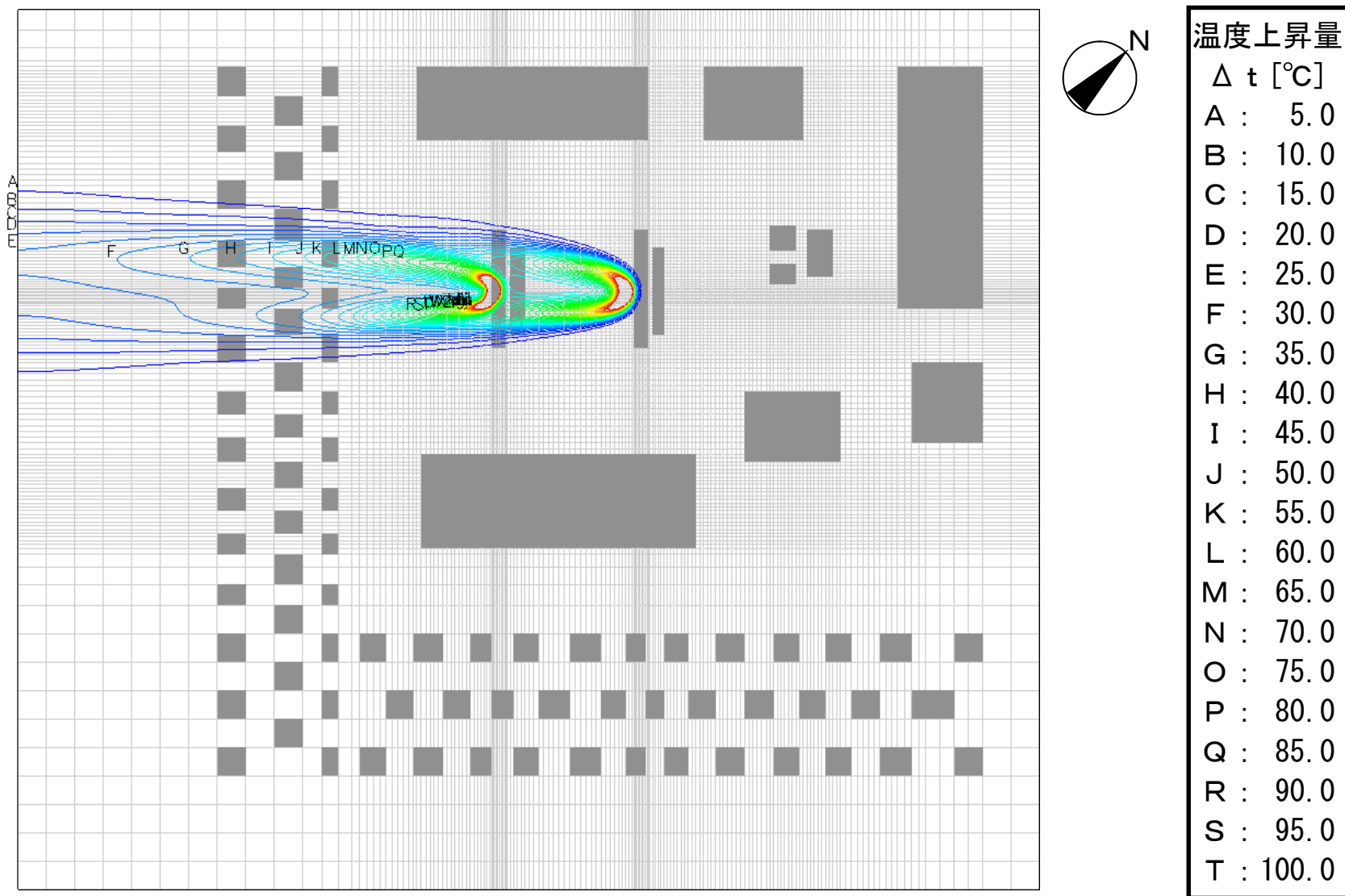


図 風向北東 外部風速9.0[m/s] 高さ16m水平断面

解析結果

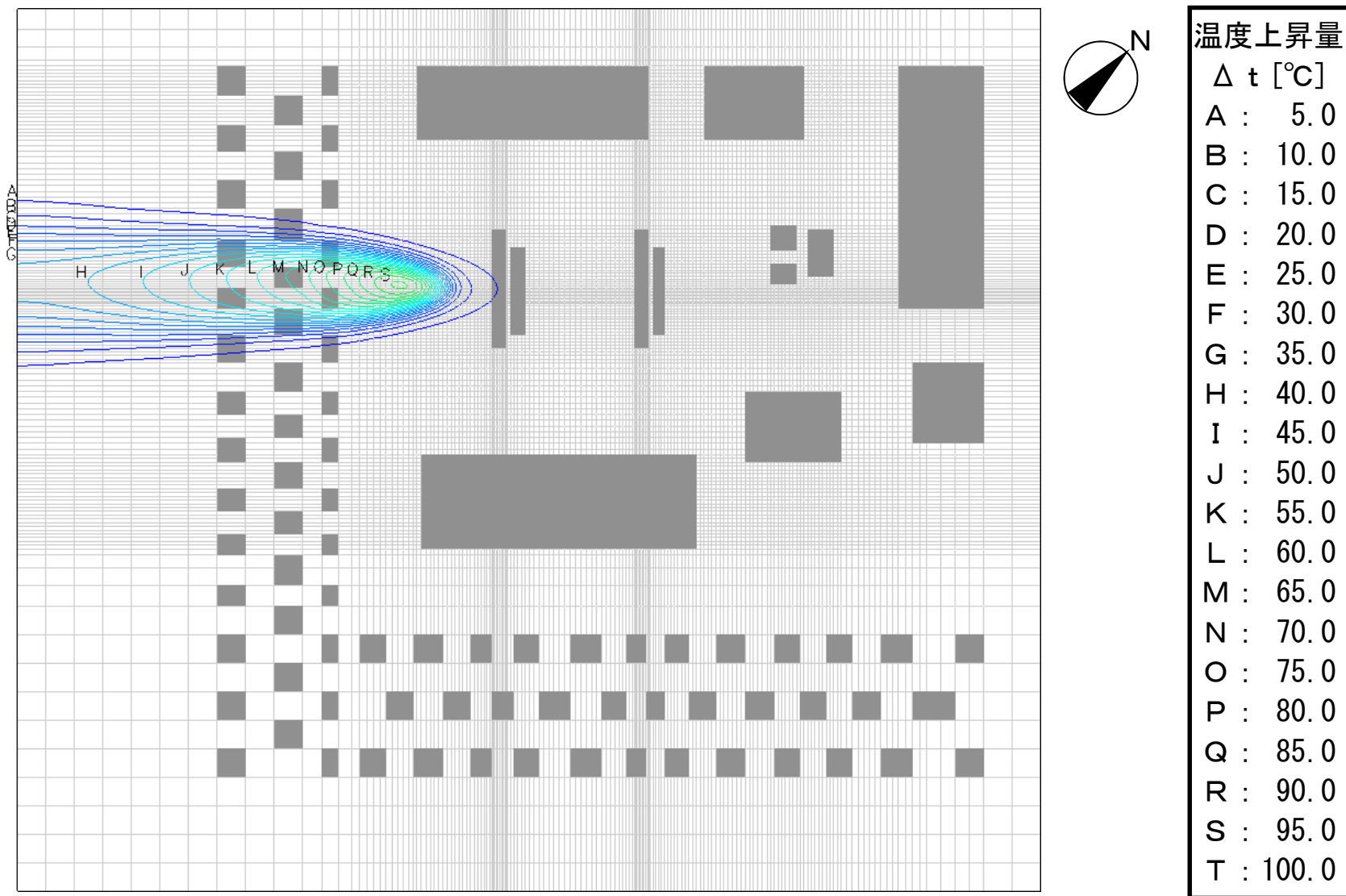
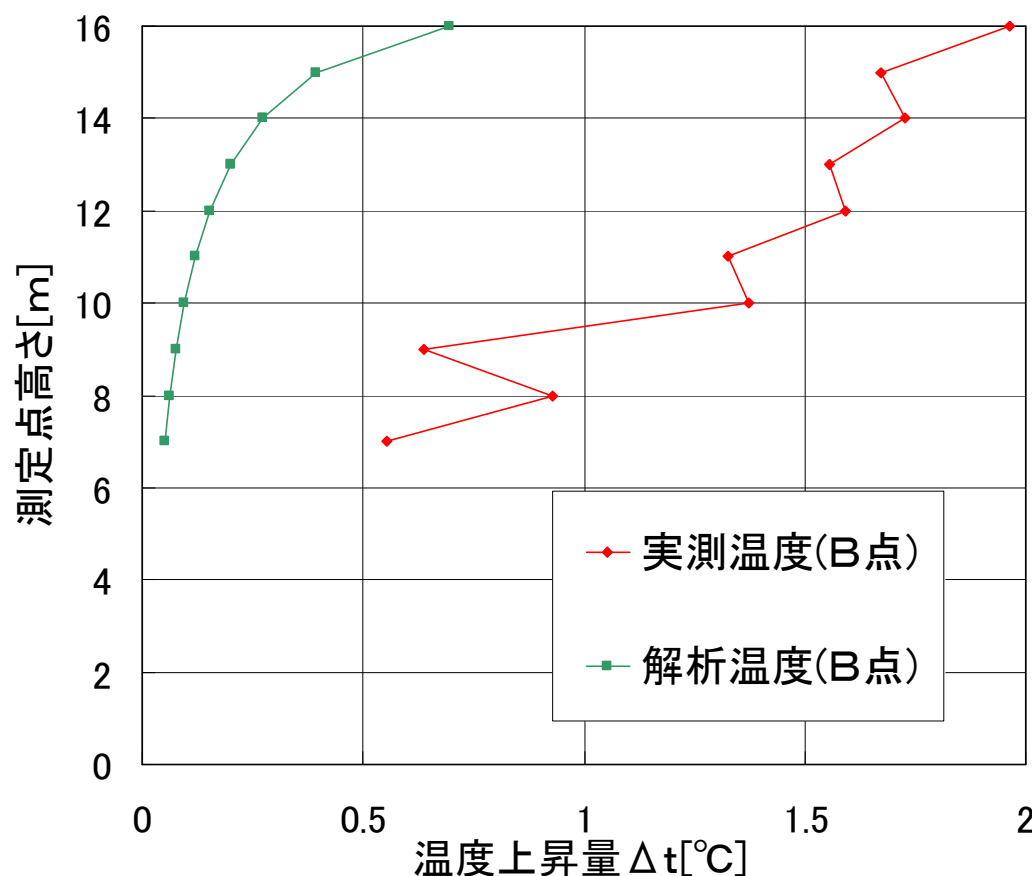


図 風向北東 外部風速9.0[m/s] 高さ25m水平断面

解析結果(実測条件)

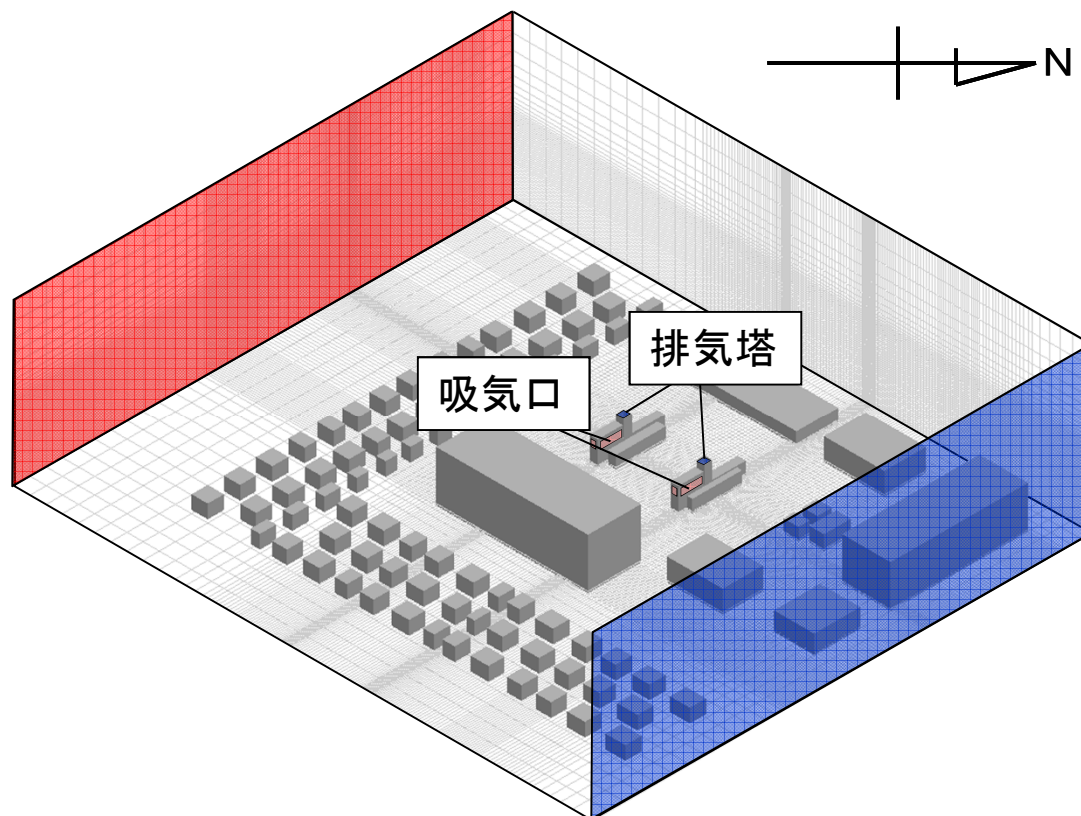


測定点Bでは、全体で解析結果の方が実測結果に比べて温度上昇量が平均約1.1°C低い。

実測結果と解析結果は相似とは言えないものの、測定点高さが高くなるにつれて温度上昇量が大きくなり、同じ傾向になっている。

鉛直方向の実測結果と解析結果の比較
図 実測結果及び解析結果の温度分布

境界条件



ノイマン条件

流入

排気塔

北東側敷地境界

自由流出

吸気口

南西側敷地境界

No Slip(摩擦有)

床

建物

植栽

Free Slip(摩擦無)

天井

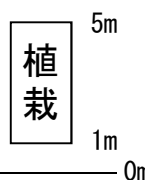
北西側敷地境界

南東側敷地境界

図 実在発電所内モデルの境界条件(風向北東)

建物は最高点高さを箱型として設置する

植栽は1m~5mの高さに箱型として設置する



解析条件(解析時間の設定)

解析時間

流入面

流出面

一番風速の遅い y 軸方向 1 セル目の風速で、流入の敷地境界から流出敷地境界まで到達する時間 + α を解析時間として設定。

時間刻み

クーラン条件を満たしていないので、発散する恐れがある。

クーラン条件を満たす Δt を設定する。

クーラン条件

$$\Delta t \leq \Delta t_{CR} = L_{min}/C$$

Δt_{CR} : 臨界時間増分

L_{min} : 要素の最小エッジ長さ

C : 応力波の伝播速度 $\Delta t_{CR} = L_{min}/C$

地上付近を吹く風の強さは、地表面との摩擦によって鉛直方向に変化し、地上付近ほど風速は減少する。この鉛直方向の風速の変化は地表面の状況により異なり、べき指数分布または対数分布で表される。

$$U_z = U_R \left(\frac{Z}{Z_R} \right)^a = U_R \left(\frac{Z}{Z_R} \right)^{\frac{1}{n}}$$

U_z : 高さ Z [m] での風速 [m/s]

U_R : 基準となる高さ Z_R [m] での風速 [m/s]

a : べき指数

本研究では解析対象地を市街地と設定し $n = 4$ 、基準高さを排気塔高さに合わせ、9.4mと設定して解析を行った。

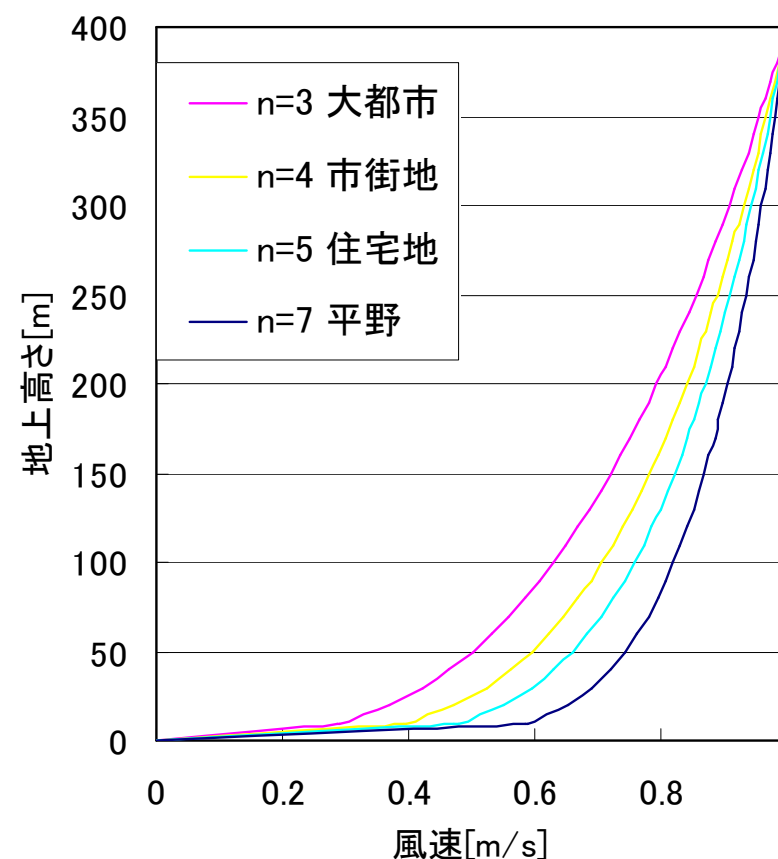


図 基準高さ400[m]、風速1.0[m/s]におけるべき指数分布

新潟の外部風速頻度

表 外部風速 5 m/s以上の頻度(新潟)

風向	北	北北東	北東	東北東	東	東南東	南東	南南東	南	南南西	南西	西南西	西	西北西	北西	北北西	合計
頻度	21	24	8	1	0	1	12	3	2	10	57	238	243	157	120	48	897
相対頻度	0.240%	0.274%	0.091%	0.011%	0.000%	0.011%	0.137%	0.034%	0.023%	0.114%	0.651%	2.717%	2.774%	1.792%	1.370%	0.548%	10.240%

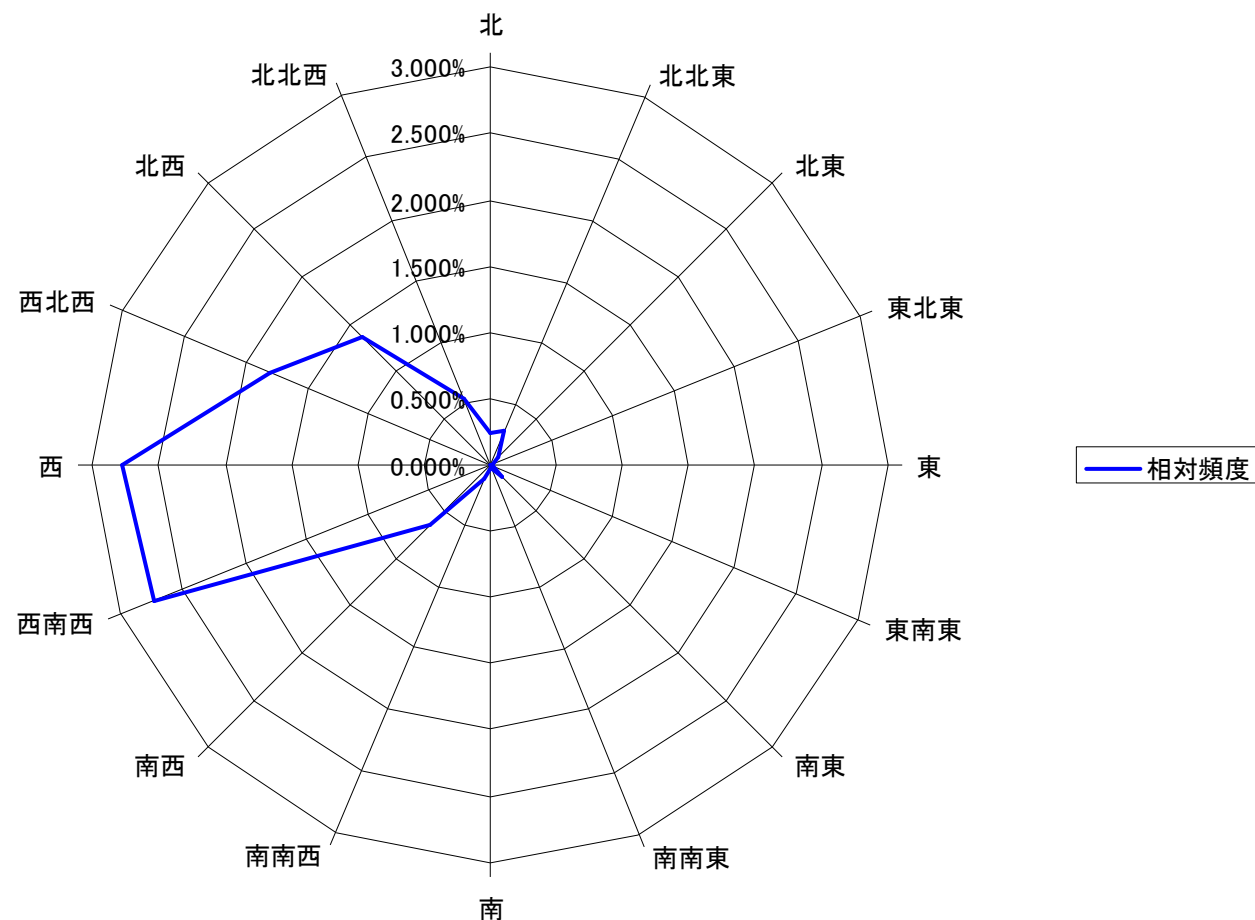


図 外部風速 5 m/s以上の相対頻度(新潟)

新潟の外部風速頻度

表 外部風速 6m/s以上の頻度(新潟)

風向	北	北北東	北東	東北東	東	東南東	南東	南南東	南	南南西	南西	西南西	西	西北西	北西	北北西	合計
頻度	9	8	1	1	0	0	4	0	1	6	37	159	158	103	75	22	562
相対頻度	0.103%	0.091%	0.011%	0.011%	0.000%	0.000%	0.046%	0.000%	0.011%	0.068%	0.422%	1.815%	1.804%	1.176%	0.856%	0.251%	6.416%

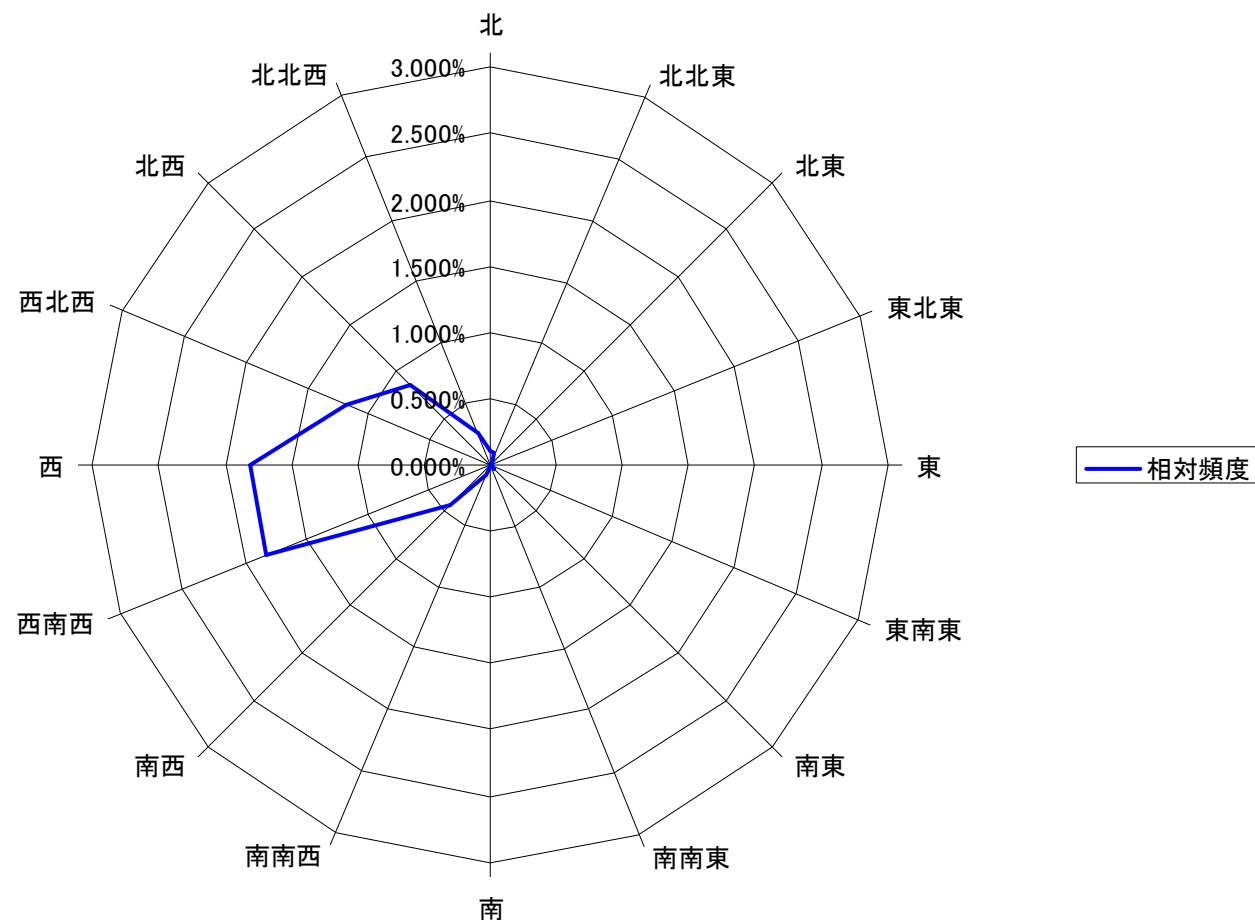


図 外部風速 6m/s以上の相対頻度(新潟)

新潟の外部風速頻度

表 外部風速 7 m/s以上の頻度(新潟)

風向	北	北北東	北東	東北東	東	東南東	南東	南南東	南	南南西	南西	西南西	西	西北西	北西	北北西	合計
頻度	1	0	1	0	0	0	0	0	0	5	8	43	82	31	15	7	186
相対頻度	0.011%	0.000%	0.011%	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%	0.057%	0.091%	0.491%	0.936%	0.354%	0.171%	0.080%	2.123%

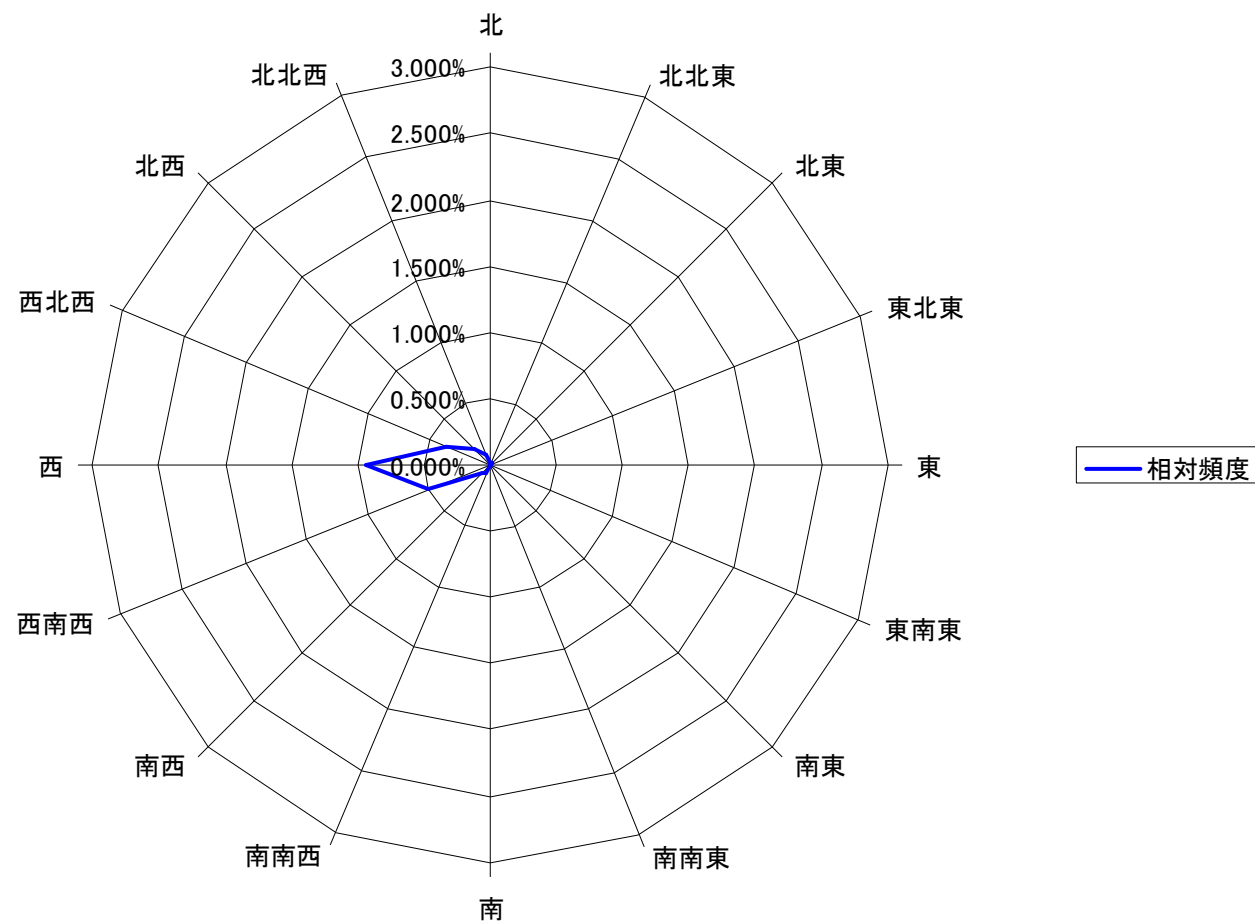
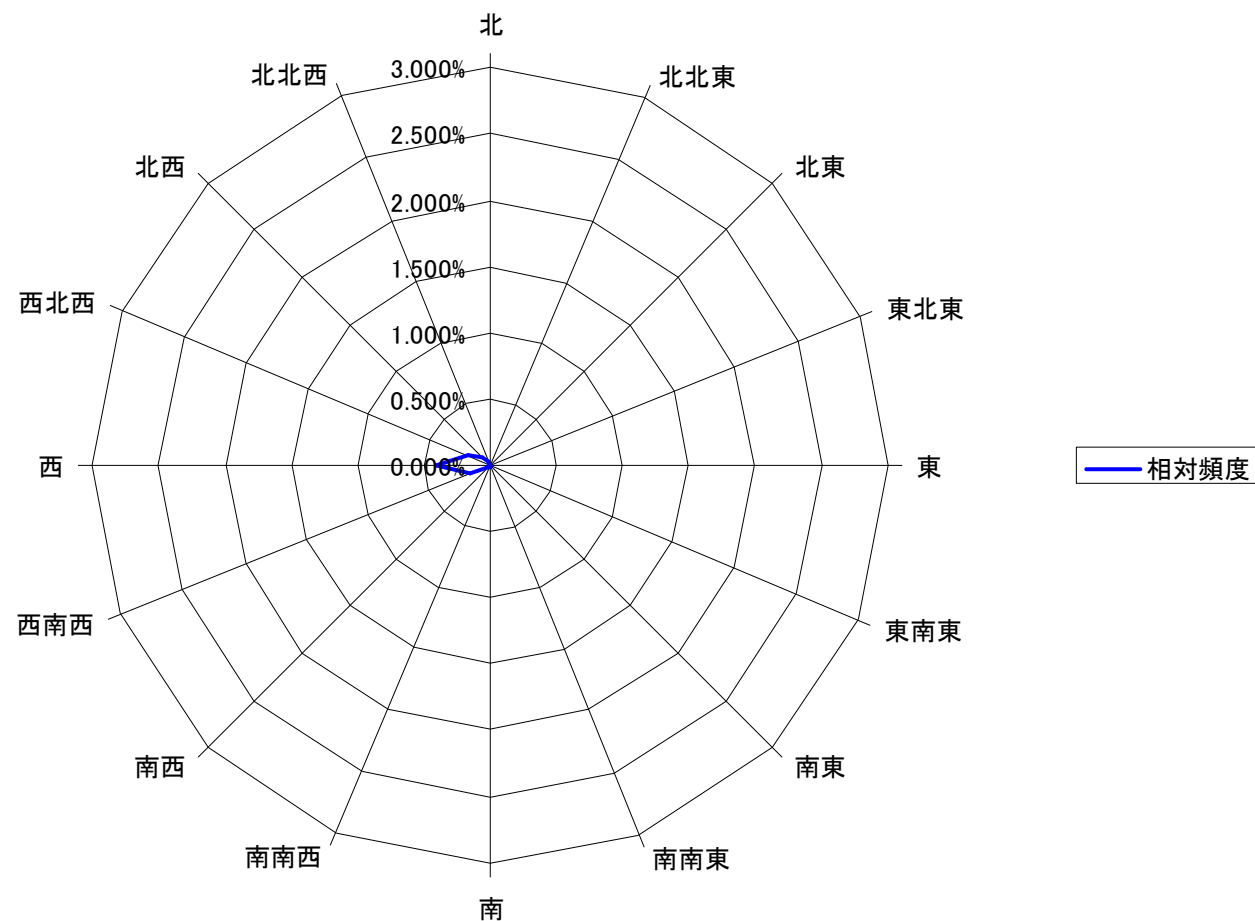


図 外部風速 7 m/s以上の相対頻度(新潟)

新潟の外部風速頻度

表 外部風速 8 m/s以上の頻度(新潟)

風向	北	北北東	北東	東北東	東	東南東	南東	南南東	南	南南西	南西	西南西	西	西北西	北西	北北西	合計
頻度	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	3	15	36	16	6	3	77
相対頻度	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%	0.011%	0.034%	0.171%	0.411%	0.183%	0.068%	0.034%	0.879%



新潟の外部風速頻度

表 外部風速 9 m/s以上の頻度(新潟)

風向	北	北北東	北東	東北東	東	東南東	南東	南南東	南	南南西	南西	西南西	西	西北西	北西	北北西	合計
頻度	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	6	19	5	2	0	33
相対頻度	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%	0.011%	0.068%	0.217%	0.057%	0.023%	0.000%	0.377%

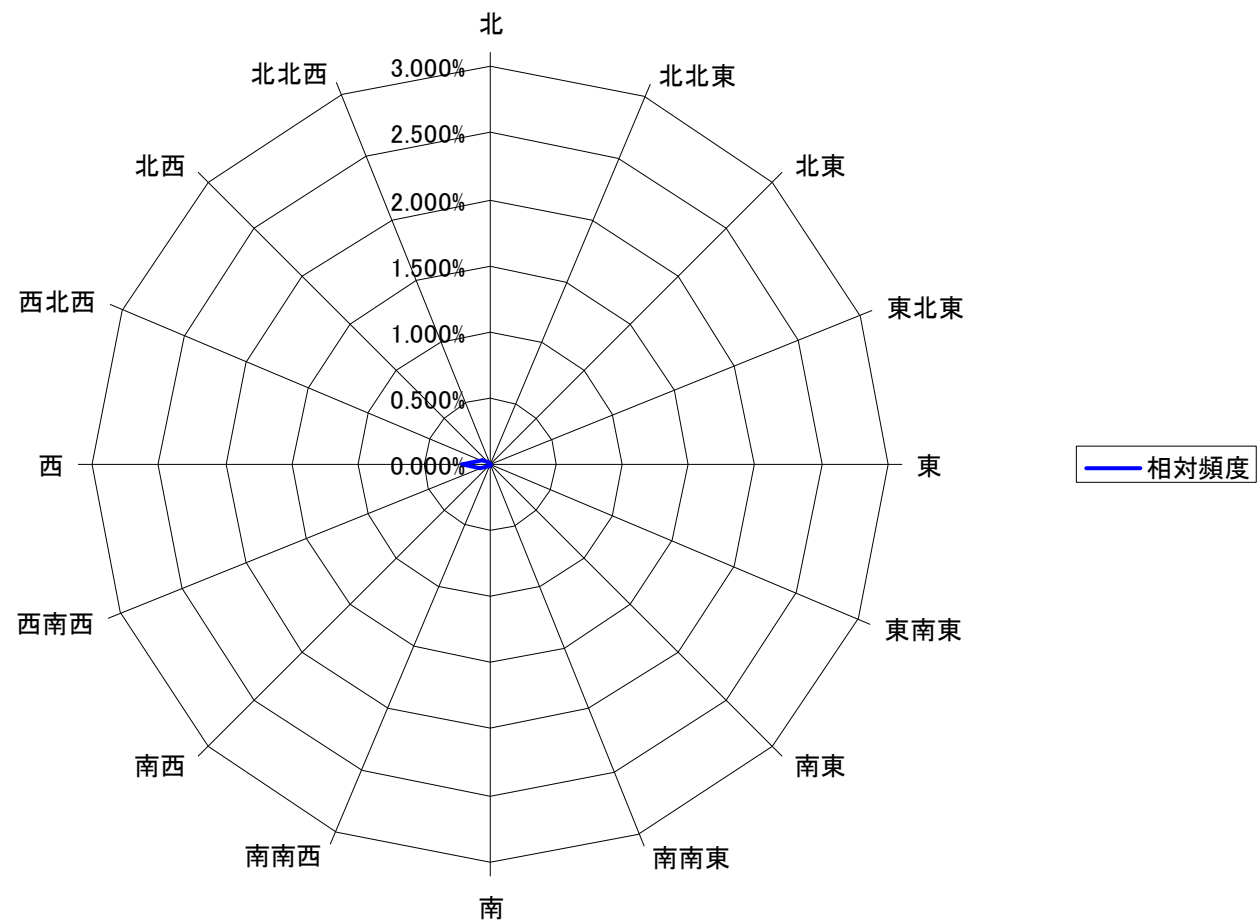


図 外部風速 9 m/s以上の相対頻度(新潟)

新潟の外部風速頻度

表 外部風速10m/s以上の頻度(新潟)

風向	北	北北東	北東	東北東	東	東南東	南東	南南東	南	南南西	南西	西南西	西	西北西	北西	北北西	合計
頻度	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	6	3	0	0	11
相対頻度	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%	0.023%	0.068%	0.034%	0.000%	0.000%	0.126%

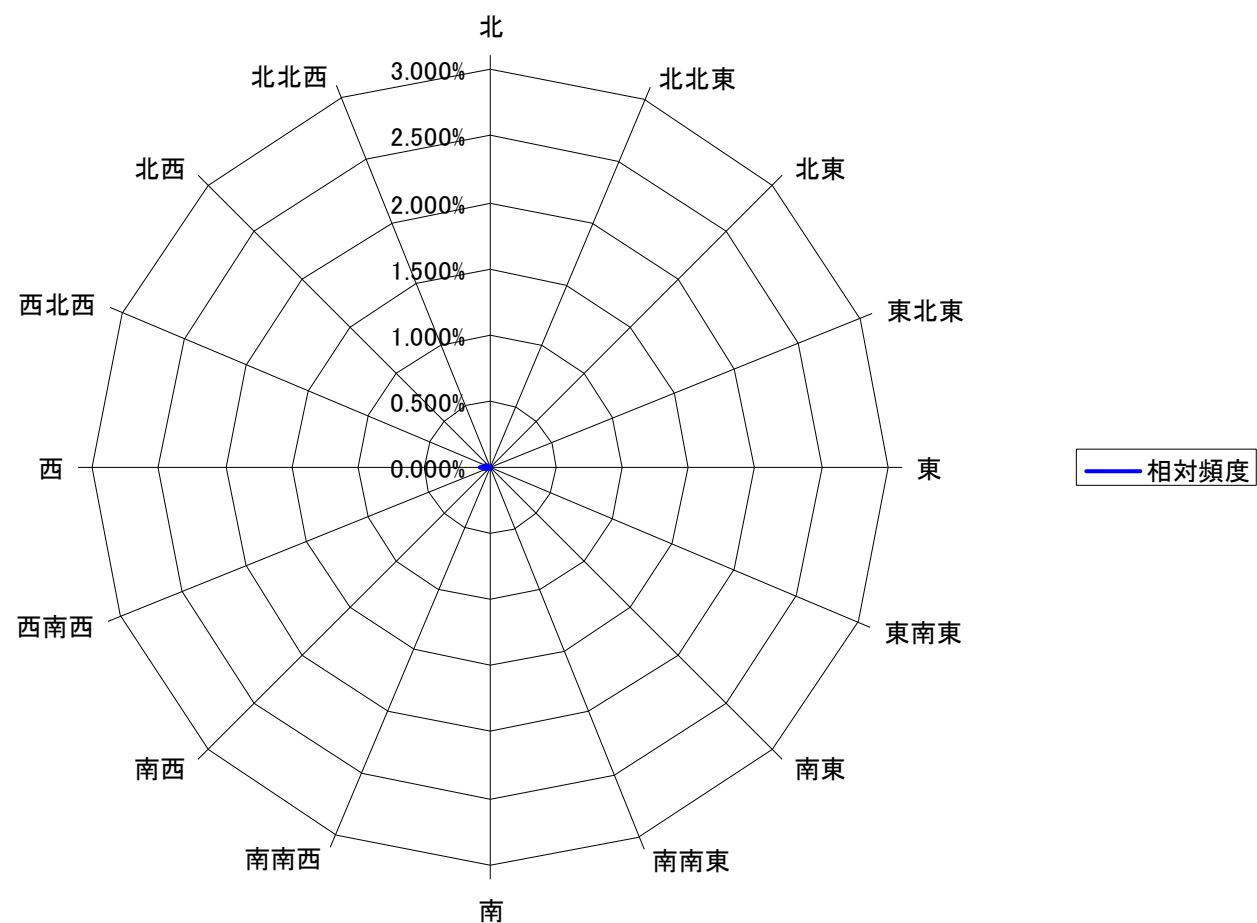


図 外部風速10m/s以上の相対頻度(新潟)