

研究解説

海底トンネル用大規模換気塔周辺の気流性状および 排気拡散性状に関する研究

風洞実験による排気口の設置高さとは形状に関する検討

Study on Air Distribution and Gas Diffusion Discharged from Ventilation Tower of Undersea Tunnel
Wind Tunnel Tests on Examining the Best Position and Configuration of Exhaust Opening

加藤 信介*・村上 周三**・高橋 岳生**・近藤 靖史*

Shinsuke KATO, Shuzo MURAKAMI, Takeo TAKAHASHI and Yasushi KONDO

海底トンネル用の大規模換気塔周辺の気流性状および排気拡散性状に関して、縮尺1/300の模型を用いた風洞実験による検討を行った。実験は2段階に分けて実施された。第一段階では三種類の排気口設置位置案について、周辺の風速分布、換気塔壁面での排気拡散性状等について検討し、排気口の適切な設置高さを決定した。第二段階では有利と判断された排気口位置において、詳細な排気口の形状や排気方向について検討した。また、流れの可視化実験も合わせて実施した。

1. 目 的

海底トンネル中間部の換気塔に関し、風洞実験による基本性能の検討を行った。実験は排気口の設置位置を決定するための実験と排気口形状を決定するための実験の2段階に分けて行う。第1段階では、①周辺の風速分布、②周辺及び換気塔壁面での排気の拡散性状、③給排気のショートサーキットの有無、④小塔と大塔間の縮流効果（吸引強化による排気の促進、省エネ効果）の有無、について検討し、排気口の適切な設置高さを決定する。第2段階では、有利と判断された排気口位置において、詳細な排気口の形状、排気方向について検討する。なお、結果については換気塔壁面近くの濃度分布を中心に述べる。

2. 排気口の設置高さを決定するための実験

2.1 対象とした換気塔

図1に示す。排気口は小塔、大塔が向き合う面に設置され、給気口は大塔の東側（向き合わない面）下部に設置される。但し、ここでは小塔から排気する場合の結果のみを示す。小塔の排気口面積（実物）は 144m^2 （スリット幅 $1.2\text{m} \times$ 長さ 30m 、スリット数4本）、給気口面積（実物）は 480m^2 （幅 $64\text{m} \times$ 長さ 7.5m ）である。

2.2 相似条件

1) 模型の幾何学的相似、2) アプローチ・フローの相似、3) 排気風速/外部風速、給気風速/外部風速の一致。実物における（排気）/（外部） $=0.71$ 、（給気）/（外部） $=0.19$

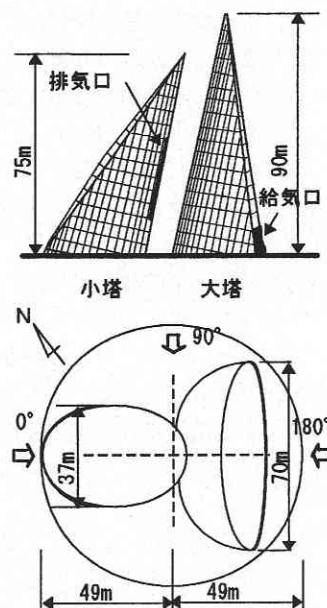


図1 換気塔配置図、実験風向

である。ここで外部風速とは大塔頂部高さの風速を指す。

2.3 実験装置

1) 風洞 境界層型風洞。2) 模型 縮尺は1/300。レイノルズ数依存性に関する予備検討結果より、壁面に $2\text{mm}\phi$ の丸棒を縦方向に 2mm 間隔^{注1)}ではり付ける。

2.4 実験方法

1) 境界層 $U \propto Z^{1/7}$ とする¹⁾。2) 実験風向（図1）南北軸方向（ 90° 、卓越風）と、東西軸方向（ 0° 、 180° ）の3風向とする。3) 外部風速 実物での大塔頂部高さに

*東京大学生産研究所 第5部

**東京大学生産研究所 計測技術開発センター

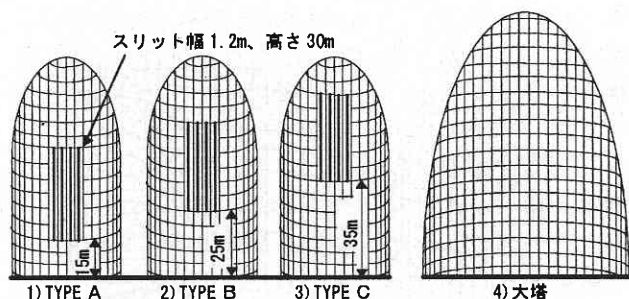


図2 小塔の排気口の位置 (3タイプ、大塔からの排気は無し)

おける風速は観測データより 7 m/s ^{注2)}となる。4) 排気風速・方向 実物での排気風速は 5 m/s 、排気方向は上向き 60° 一定とする。5) 排気口の位置 (図2) 大塔と向かい合う小塔の壁面に、高さ方向に位置の異なる TYPE A (排気口の下端が地盤上 15 m)、B (同 25 m)、C (同 35 m) の3種類とする。6) 実験風速 実験では頂部風速を 5.8 m/s ^{注3)}、排気風速は 4.1 m/s (給気風速は 1.06 m/s) とした。相似条件である (排気)/(外部)、(給気)/(外部) の値は実物と同じになる。7) 測定方法 濃度は排気口からトレーサガスとしてエチレン (C_2H_4 、密度 $=0.974$) を排気させ、各測定点におけるエチレン濃度を水素炎ガスクロにより測定する。圧力はバロトロン、風速はサーミスタ風速計による。8) 測定点数 風圧137点、風速223点、濃度319点。

2.5 実験結果

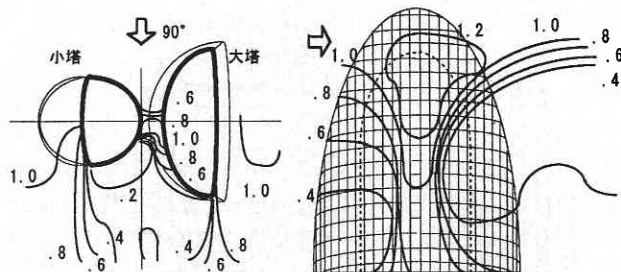
2.5.1 風速分布 (図3, 4)

1) 風向 90° の場合 (図3) 卓越風向に相当する風向 90° において、各 TYPE の排気口中央高さにおける水平分布、および両塔の隙間に平行な断面 (主流方向) 内の風速分布を示す。排気口の設置高さを変えても、風速分布はほとんど同じである。吹き出された排気は両塔間に吹き込む強い流れの影響を受け、風下では大塔に沿って流れる。TYPE A, B では小塔風下側に風速の弱い領域 (0.2 以下) が発生する (図3-1), 2) の①)。主流方向の断面分布を見ると、等風速線が塔間中央で落ち込み、大塔の左上より塔間中央に向かって斜めに風が吹き込んでいること、その後、等風速線は右上がりとなり、排気が右上方に流れていることが判る。

2) 風向 0° の場合 (図4) 小塔及び大塔の隅角部並びに小塔排気口部分に風速 1.0 の領域がある (図4-①)。また、塔間の隙間の断面分布は風向 90° に見られる吹き込みもなく、左右対称となる。

2.5.2 壁面濃度分布 (図5, 6)

壁面近くの排気流の濃度は排気による換気塔壁面の汚れの程度の目安になる。図中の数値は排気口の濃度で基準化した無次元濃度 (希釈率) を示す。

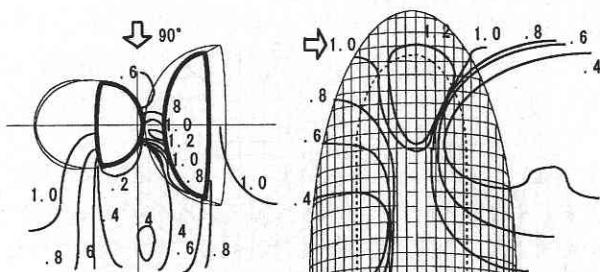


①水平分布 (高さ 34m)

②塔間の隙間に平行な断面 (主流方向) 内の風速分布

(図中の数値は大塔頂部の風速を1としたときの無次元風速)

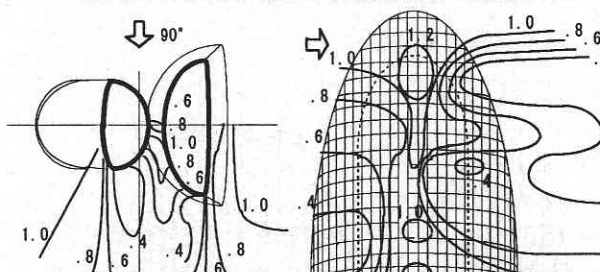
1) TYPE A



①水平分布 (高さ 45m)

②塔間の隙間に平行な断面 (主流方向) 内の風速分布

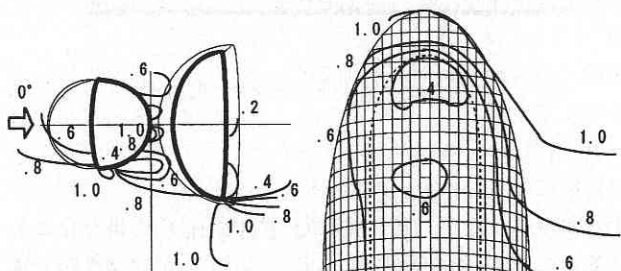
2) TYPE B



①水平分布 (高さ 50m)

②塔間の隙間に平行な断面 (主流方向) 内の風速分布

3) TYPE C

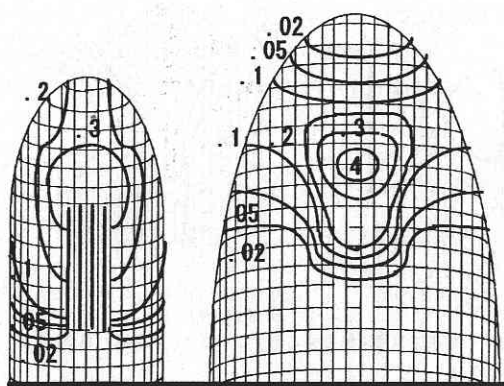
図3 風速分布 (風向 90° 、排気方向: 上向き 60° の場合)

①水平分布 (高さ 34m)

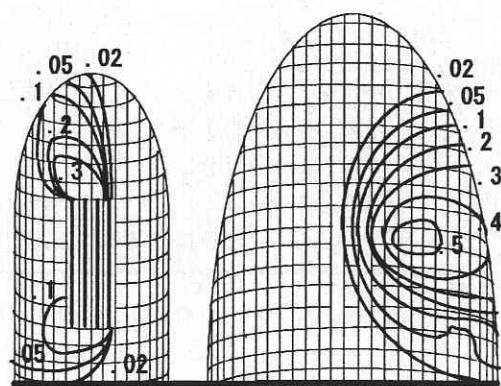
②塔間の隙間に平行な断面 (主流に直角な方向) 内の風速分布

(図中の数値は大塔頂部の風速を1としたときの無次元風速)

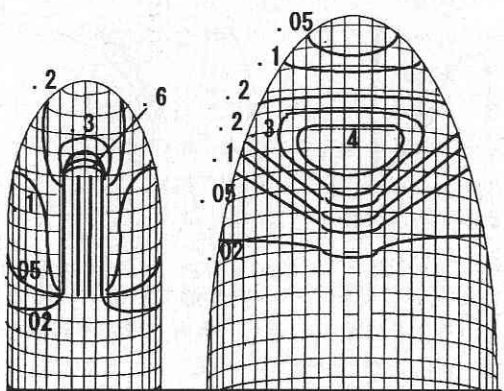
図4 風速分布 (TYPE A, 風向 0° 、排気方向: 上向き 60° の場合)



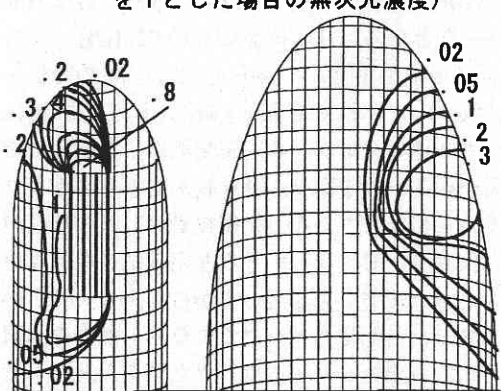
1) TYPE A



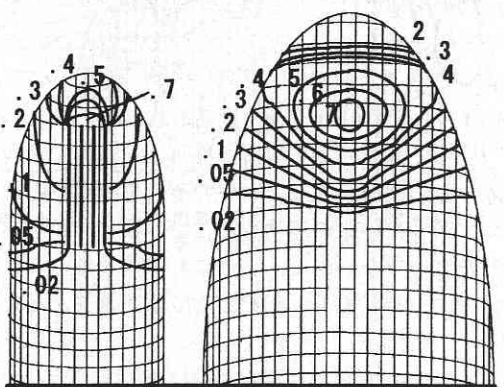
1) TYPE A (図中の数値は排気口の濃度を1とした場合の無次元濃度)



2) TYPE B

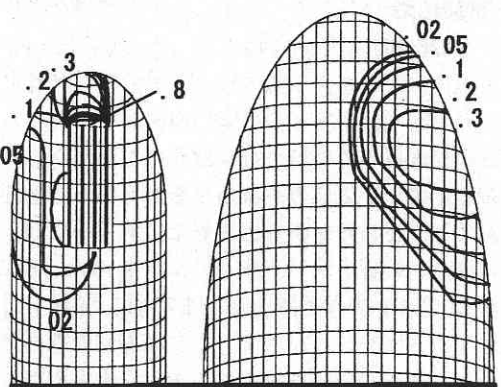


2) TYPE B



3) TYPE C

図5 壁面の無次元濃度分布 (風向0°)



3) TYPE C

図6 壁面の無次元濃度分布 (風向90°)

1) 風向0°の場合 (図5)

①小塔壁面 排気口直上部では TYPE B, C の場合に無次元濃度0.6以上の領域が生じるが, TYPE A にはない. 排気口直下の部分の濃度は0.02以下である.

②大塔壁面 景観上, 特に重要である大塔壁面の上部に, TYPE C の場合に濃度0.7以上の領域が生じるが, TYPE A, B にはなく, 0.4程度である. 小塔の排気口の位置が高

くなる程, 高濃度を示す領域が広がり, その領域は上方に移動する. 大塔の給気口は排気口の風下に位置するが, その濃度は TYPE A, B, C ともに0.02以下であった.

2) 風向90°の場合 (図6)

①小塔壁面 TYPE B, C の場合に排気口直上部に濃度が0.8以上となる領域が生じるが, TYPE A にはない. TYPE A, B, C ともに, 塔間に流れ込む風の影響で下方に

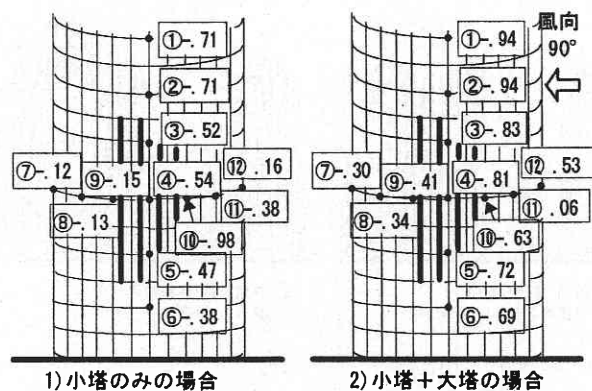


図7 大塔の有無による小塔壁面の風圧係数の変化

も拡散し、排気口直下の左下側に濃度0.1程度の領域が生じる。排気口の水平風下の領域では濃度0.1以下である。また、排気口の水平風上側領域の濃度は0.02以下である。

②大塔壁面 TYPE A の場合に濃度0.5以上となる領域が中央高さ付近に生じるがTYPE B, Cにはない。TYPE B, Cでは濃度は高くても0.3程度である。中央より風上では排気の影響はない。小塔の排気口位置が高くなる程、高濃度を示す領域が上方に移動する。

全体として、TYPE A が最も濃度が低いので、壁面の汚れの恐れも少ないと判断される。

2.5.3 縮流効果について

図7に風向90°において、小塔単体の場合と小塔と大塔が建設された場合の、小塔の排気口位置周辺での風圧係数の比較を示す。小塔単体の場合、排気口位置(①②③④⑤⑨⑩)における風圧係数の平均値は-0.58であるのに対して、両方が建設された場合には-0.75と負圧が大きくなり、縮流による吸引効果の増加が認められる。

2.6 結論

1) 小塔の排気口の設置高さの違いにより、周辺風速分布には明瞭な差は生じない。2) 大塔壁面上部の濃度分布を見ると、TYPE A の場合の濃度が低い。3) 風向0°の場合でも、大塔の給気口における希釈率はTYPE A, B, Cの場合とも0.02以下であり、ショートサーキットに関しては特に問題はない。4) 大塔と小塔間に縮流効果が認められた。

3. 排気口の形状、排気方向に関する実験

3.1 目的

第1段階の実験および数値解析結果²⁾より、有利と判断された排気口の配置案(TYPE A)に基づき、排気口の形状、排気方向について壁面の排気濃度に着目し、風洞実験により検討する。

3.2 模型

縮尺1/300。選ばれた小塔の排気口位置はTYPE A (図

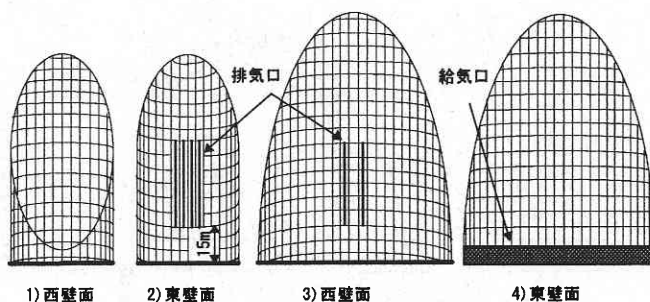


図8 換気塔(小塔の排気口位置TYPE A)

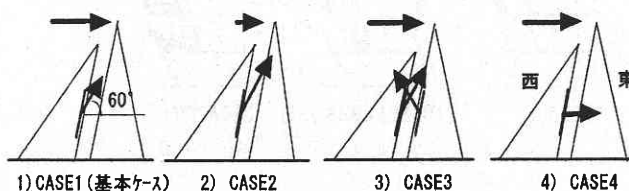


図9 実験CASE

表1 実験条件

CASE	条 件
1	基本ケース : 小塔からのみ排気 外部風速 7 m/s、排気風速 5 m/s 上向き 60° の吹出、排気ペーンのみ有り
2	外部風速が排気風速より小さい場合
3	大塔と小塔の両方から排気した場合
4	水平吹出の場合
5	排気ペーン・整流壁ともに無の場合(図10参照)
6	排気ペーン・整流壁ともに有の場合(")

8). 大塔の排気口面積(実物)は72m²(スリット幅1.2m×長さ30m, スリット数2本)。(小塔については2.1参照)

3.3 実験条件 表1, 図9~11参照。

1) 外部風速(表1, 図9) ①外部風速(=大塔の頂部高さの風速)が排気風速より大きい場合(実物で外部風速7 m/s, 排気風速5 m/sとして(排気)/(外部)=0.71)と, ②外部風速が排気風速より小さい場合(実物で外部風速3 m/s, 排気風速9 m/sとして(排気)/(外部)=3.0)の2ケース。2) 排気風速 実物で①排気風速5 m/s(排気能力50%運転時)と②排気風速9 m/s(排気能力100%に近い運転時)の2ケース。給気量は排気運転と対応する。3) 排気口の使用状況(図9) 排気は①小塔のみの場合と②小塔と大塔の両方から排気した場合の2ケース。4) 排気方向(表1, 図9) 排気方向は①上向き60°の場合と, ②水平の場合の2ケース。5) 排気ダクト形状(表1, 図10) ①ペーン^{注4)}・整流壁^{注5)}とも無し, ②ペーンのみ有り(基本ケース), ③ペーン・整流壁とも有りの場合

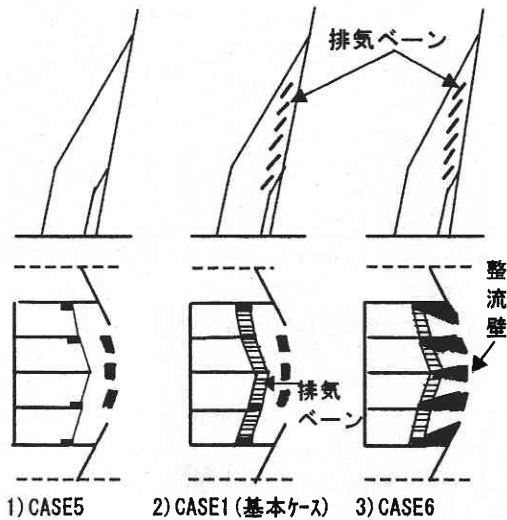


図10 排気ダクト断面と吹出口形状の変化
(水平断面)

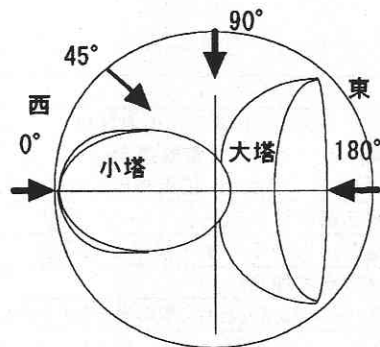


図11 実験風向

の3ケース. 6) 実験風向 (図11) 風向は0°, 45°, 90°, 180°の4風向とする. 7) 実験風速 (排気)/(外部) = 3.0の場合, 排気風速は9 m/s (給気風速2.38 m/s) と設定したので, 外部風速3 m/sとなる. また, (排気)/(外部) = 0.71の場合は第1段階と同様に, 排気風速は4.1 m/s (給気風速1.06 m/s) としたので, 外部風速5.8 m/sとなる.

3.4 実験結果

図12に各ケースにおける壁面濃度分布を示す. 以下, 主として卓越風向に相当する風向90°の場合に関して考察する.

1) 外部風速と排気風速の比が異なる場合の比較 (図12-1, 2)) (排気風速)/(外部風速) = 0.71の場合, 排気は塔間の強い風に流され, 小塔壁面の排気口直上部の濃度は0.3と小さいが, (排気)/(外部) = 3.0の場合には0.5と大きい. また, 大塔壁面では(排気風速)/(外部風速) = 0.71の場合, 濃度0.5以上の領域は壁面の中央より風下側に現れるが, (排気)/(外部) = 3.0の場合には風上側にも排気が拡散し, 高濃度域はほぼ中央に位置する. また, 最大値も

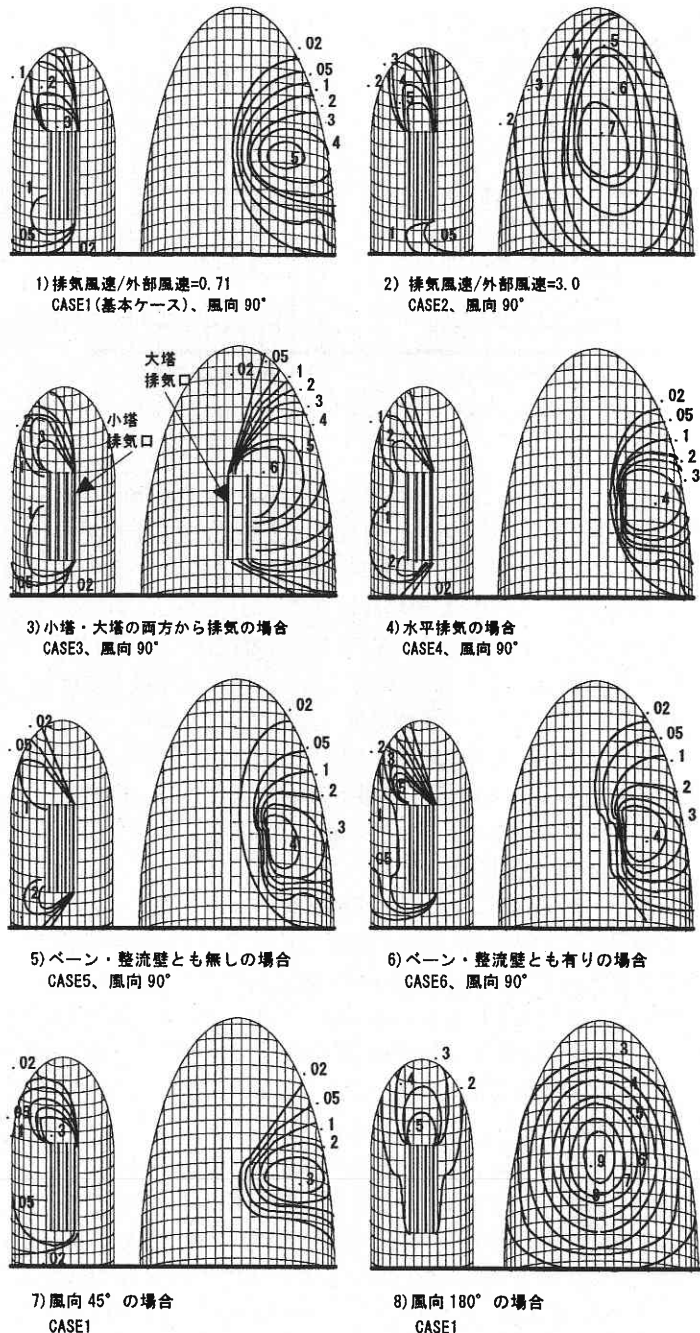


図12 壁面濃度分布 (図中の数値は排気口の濃度を基準とした無次元濃度)

0.7となる.

2) 小塔のみ排気と (小塔+大塔) 排気の比較 (図12-1, 3)) 小塔壁面の濃度分布はほとんど変わらない. 大塔壁面では, 小塔のみから排気する場合には濃度の最大値は0.5であるが, 両塔から排気する場合は0.6を示す. 0.5以上の領域も広くなり, 大塔自身からの排気の影響で大塔の排気口の右上部分の濃度がやや高くなる.

3) 排気方向の違いによる比較 (図12-1, 4)) 濃度分



写真1 可視化（風向 90°, TYPE A, 上向き 60° 排気, 手前が小塔, 奥が大塔）

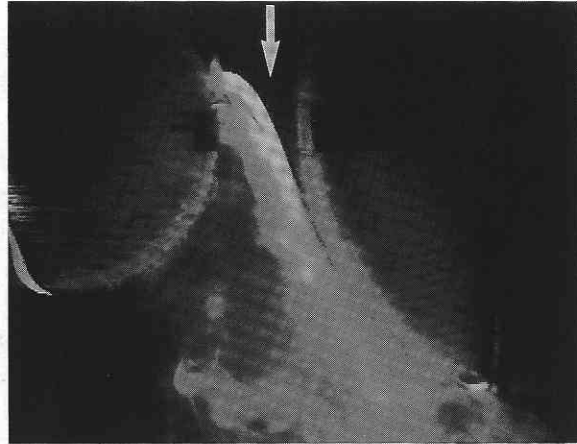


写真2 可視化（風向 90°, TYPE A, 上向き 60° 排気, 上空から見る. 左が小塔, 右が大塔）

布には排気方向の違いによる大きな差は見られない。大塔壁面では、上向き60°（図12-1）の場合に現れる0.5の領域は水平排気（図12-4）の場合にはない。しかし、図は省略するが、排気口中央高さの水平分布には、明らかに水平排気の場合にも壁面近くに0.5の領域が存在する。図に0.5の領域が現れないのは測定点位置との関連によるものと判断され、排気方向の違いはほとんど影響ないものと考えられる。

4) 排気ダクト形状の違いによる比較（図12-1, 5), 6)）小塔壁面の排気口直上部における濃度はベーン、整流壁ともに無しの場合0.1（CASE 5）、ベーンのみ有りの場合0.3（CASE 1）、ベーン、整流壁ともに有りの場合0.5（CASE 6）と徐々に高くなる。ベーン、整流壁を設けず排気口面に至るまでの流れを直接排気口に導いて排出する方が排気が良く拡散している。大塔壁面においては排気ダクト形状の違いによる大きな差は見られない。

5) 風向の違いによる比較（図12-1, 7), 8)）風向45°と90°の場合は両塔とも似た濃度分布を示す。大塔壁面では、風向90°の場合に生じる濃度0.5の領域は風向45°の場合にはない。風向180°の場合、濃度が最も高く、最大値は0.9を示す。

6) 気流の可視化結果 写真1から4に気流の可視化の例を示す。写真1は風向90°, TYPE A, 上向き60°排気の場合である。排気流が右上方に流れる様子が明確に観察される。また、塔間に吹き込む斜め下向きの気流により、小塔後方にも煙が巻き込まれる様子が観察される。写真2は風向90°, TYPE A, 上向き60°排気の場合を上空から見たものである。小塔（左側）から排気された煙は両塔間に吹き込む強い流れの影響で風下では大塔（右側）に沿って流れている。写真3は風向0°, TYPE A, 上向き60°排気の場合である。小塔頂部に回転流が発生していることがわかる。写真4は風向180°, TYPE A, 上向き60°排気の場合

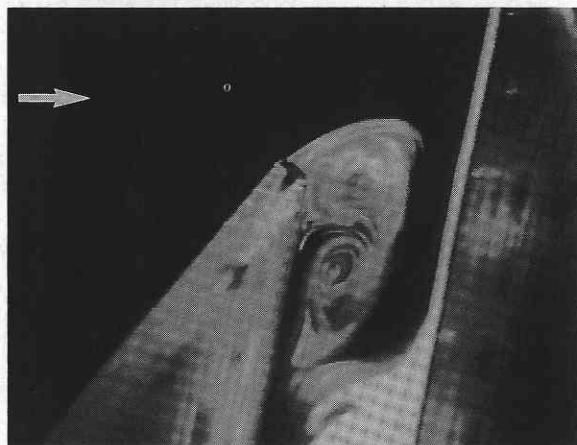


写真3 可視化（風向 0°, TYPE A, 上向き 60° 排気, 左が小塔, 右が大塔）



写真4 可視化（風向 180°, TYPE A, 上向き 60° 排気, 左が大塔, 右が小塔）

である。大塔（左側）頂部と小塔頂部に回転流が発生していることがわかる。

3.5 結論

1) 風向90°, (排気)/(外部)=3.0の場合は、大塔の風上

側にも排気が拡散し、高濃度域はほぼ中央に位置する。
 2) (排気)/(外部)=0.71の場合において、大・小両塔から排気すると、大塔自身からの排気の影響で大塔の排気口の右上部分の濃度がやや高くなる。3) 排気方向の違いによる差はほとんどない。4) 排気ダクト形状が変化した場合、小塔壁面の排気口直上部における濃度はベーン・整流壁ともに無しの場合0.1, ベーンのみ有りの場合0.3, ベーン・整流壁ともに有りの場合0.5を示す。大塔壁面においては排気ダクト形状の違いによる大きな差は見られない。
 5) 気流の可視化により、上方に拡散する流れが確認できた。
 (1996年6月5日受理)

- 注1) 換気塔が曲面で構成されているため、剝離位置がレイノルズ数の影響を受けやすい。実験では表面に適度な凹凸を付けた。これにより、レイノルズ数依存性を解消した。その際、丸棒のはり付けに際しては、表面圧力の計測に支障をきたさないように配慮した。
- 注2) 気象観測点：京葉シーバース（海面上32m）における12年間の風速データ（平均値5.7m/s）を高さ補正して求めた。
- 注3) 実験条件によっては極めて多量の給・排気量を模型において実現することが要求され、模型強度等、実験実施上困難な問題が発生する。従って風洞風速はなるべく低く設定することが必要とされる。そこで壁面風圧分布に大きな影響

を及ぼさない範囲でなるべく低い風速の選び方について予備測定を行った。

- 注4) 排気ベーンは上向き60°の吹出方向を安定させるために設ける。
- 注5) 整流壁はダクトから排気口面までを区画し、流れをなるべく乱さないよう設ける。

謝 辞

本報の結果は「東京湾横断道路 川崎人工島換気塔風洞実験検討会」でなされたものであり、以下に委員を記す。村上周三教授（東大生研）、宇都宮英彦教授（徳島大学）、大熊武司教授（神奈川大学）、横山功一氏（建設省土木研究所）、飯田裕氏（東京湾横断道路（株））、高野誠氏（同）、中村八寿男氏（同）、寺本隆幸氏（日建設計）、坂牛卓氏（日建設計）。

上記委員及び関係各位に多大なご支援を頂いた。ここに謝意を表す。

参 考 文 献

- 1) 高橋，村上：境界層型風洞において各種の鉛直風速分布を作成する方法に関する研究，建築環境工学論文集，昭和57年11月。
- 2) 永瀬，村上，加藤，近藤，高橋，寺本，坂牛：海底トンネル用大規模換気塔からの排気拡散性状に関する研究（その1）CFDによる排気口設置高さと同質質拡散性状に関する検討：日本建築学会大会，平成8年9月。