

# 港湾空港技術研究所 資料

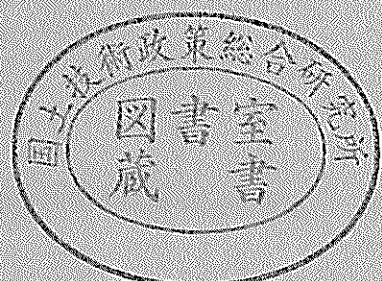
TECHNICAL NOTE  
OF  
THE PORT AND AIRPORT RESEARCH INSTITUTE

No.1083      June 2004

石垣空港における窒素酸化物の排出および濃度分布ならびに低減対策に関する調査

小 牟 禮 建 一  
濱 田 秀 則

独立行政法人 港湾空港技術研究所  
Independent Administrative Institution,  
Port and Airport Research Institute, Japan



## 目 次

要 旨 .....	3
1. はじめに .....	4
2. 大気中の窒素酸化物に関して .....	4
2.1 大気中における窒素酸化物の問題点 .....	4
2.2 空港内の窒素酸化物主要発生源および排出係数 .....	4
2.3 窒素酸化物の測定方法 .....	5
2.4 光触媒（酸化チタン）を用いた窒素酸化物低減技術 .....	6
2.5 過去に実施した東京国際空港における窒素酸化物濃度測定結果 .....	8
3. 石垣空港における窒素酸化物濃度測定の方法 .....	9
3.1 石垣空港選定の理由 .....	9
3.2 石垣空港における窒素酸化物濃度測定の方法 .....	10
4. 石垣空港における窒素酸化物濃度測定の結果 .....	13
4.1 1回目の測定結果 .....	13
4.2 2回目の測定結果 .....	16
4.3 1回目および2回目の測定時における降雨の影響 .....	20
4.4 空港内における瞬間的高濃度の推定 .....	20
5. 空港内での窒素酸化物濃度低減技術の適用に関する実験的検討 .....	25
5.1 実験の方法 .....	25
5.2 実験の結果 .....	25
5.3 空港内における窒素酸化物低減技術の適用法に関する考察 .....	26
6. まとめ .....	27
謝辞 .....	27
参考文献 .....	27
付録 .....	28

# Investigation on NO<sub>x</sub> Emission, Local Concentration and Reduction at the Area of Ishigaki Airport

Kenichi KOMURE\*  
Hidenori HAMADA\*\*

## Synopsis

This report is related to nitrogen oxide (NO<sub>x</sub>) emission, concentration and reduction at the area of Ishigaki Domestic Airport. Field investigation to grasp NO<sub>x</sub> concentration around the Ishigaki Airport and examination of an effectiveness of photo catalysis on NO<sub>x</sub> reduction were carried out.

From the investigation, following conclusions are obtained.

- 1) It is found that the NO<sub>x</sub> concentration along the main runway is related to aircraft moving direction.
- 2) Airport is one of the largest emission sources of NO<sub>x</sub>.
- 3) It is confirmed that the NO<sub>x</sub> concentration can be reduced about 10 percent by an application of TiO<sub>2</sub>-photo catalysis.
- 4) High-concentration of NO<sub>x</sub> are also detected at the parking area in the airport, due to cars passing near the measurement points at a low speed.

**Key Words:** airport, nitrogen oxide (NO<sub>x</sub>), NO<sub>x</sub> emission coefficient, NO<sub>x</sub> concentration, photo catalysis

---

\* Visiting Researcher of Materials Division, Geotechnical and Structural Engineering Department  
\*\* Head of Materials Division, Geotechnical and Structural Engineering Department

# 石垣空港における窒素酸化物の排出および濃度分布

## ならびに低減対策に関する調査

小牟禮 建一 \*

濱田 秀則 \*\*

### 要 旨

本研究では、最終的には空港から排出される窒素酸化物濃度の低減を目指し、空港内における窒素酸化物濃度の現状を把握する目的で、第三種空港である石垣空港において、滑走路周辺、エプロン周辺、ならびに空港近辺での窒素酸化物濃度の実態調査を行った。さらに、光触媒技術の適用による窒素酸化物濃度低減の可能性を模索するため、光触媒の一種である酸化チタンを用いた実験装置によって、空港周辺での窒素酸化物低減効果確認実験を行った。

一連の調査・検討により、以下の知見を得た。

1) 空港内においては、航空機の挙動に関連した高濃度の窒素酸化物が検出され、空港が大きな窒素酸化物排出源となっていることがほぼ明らかとなった。

2) エプロン、および滑走路の運用時間内において、エプロンでは運用時間中常時、滑走路上では航空機の離陸時に、瞬間的ではあるが非常に高い窒素酸化物濃度となる危険性が示唆された。

3) 窒素酸化物低減効果確認実験の結果から、酸化チタン混入塗料の効果が認められた。その低減効果は10%程度である。

4) 空港外では、空港の駐車場や船舶港などからも高濃度の窒素酸化物が検出され、低速で常時通過する自動車車輛、ならびに船舶の影響が大きいと推測された。

キーワード：空港，窒素酸化物，排出係数，窒素酸化物濃度，光触媒

---

\* 地盤・構造部材料研究室 客員研究員

\*\* 地盤・構造部材料研究室 室長

〒239-0826 横須賀市長瀬3-1-1 独立行政法人港湾空港技術研究所  
電話：046-844-5061 Fax：046-844-0255 e-mail：[hamada@pari.go.jp](mailto:hamada@pari.go.jp)

## 1. はじめに

窒素酸化物は、主に石油精製物などの燃焼をはじめとする人の産業活動によって排出される。ここで、窒素酸化物（以降、 $\text{NO}_x$ と表記する）は、一酸化窒素（以降、 $\text{NO}$ と表記する）と二酸化窒素（以降、 $\text{NO}_2$ と表記する）の総和を意味している。この $\text{NO}_x$ は人体への影響、酸性雨、光化学オキシダント生成への関与など、環境大気に対する有害物質として認識されている。我が国においては、 $\text{NO}_2$ の濃度基準という形で環境基準値が定められているが、大都市地域では環境基準の達成率は依然として低く、大気環境の改善には厳しい状況が続いている。

現在、空港施設は国内外の輸送に対して欠かすことのできないものとなっている。しかし、航空機、空港外からの交通アクセス車両、空港内のサービス車両や工事車両などによる排気ガスは $\text{NO}_x$ の大きな排出源ともなっている。

本業務では、空港周辺の $\text{NO}_x$ 削減対策を推進することを最終目的とし、近年実用化への研究が進められている光触媒による $\text{NO}_x$ 低減技術の空港施設への適用可能性について考察することを目的としている。その前段階として、2000年に東京国際空港において空港周辺での $\text{NO}_x$ 濃度測定を行っている<sup>1)</sup>。さらに今回の報告では、石垣空港における、滑走路周辺の $\text{NO}_x$ の排出源、および大気環境中の $\text{NO}_x$ の測定結果について述べる。また、東京国際空港、石垣空港を対象として、光触媒（酸化チタン）を用いた $\text{NO}_x$ 濃度低減実験を行っており、その結果についても報告する。

## 2. 大気中の窒素酸化物に関して

### 2.1 大気中における窒素酸化物の問題点

$\text{NO}_x$ の主な生成要因として、以下の2つが挙げられる。

①石油をはじめとする燃料の燃焼時に、これらに含有されている窒素分が大気中の酸素と結合して生成するもの。

②高温における物質の燃焼時、大気中に約80%含まれる窒素（ $\text{N}_2$ ）が大気中の酸素（ $\text{O}_2$ ）と化学反応を起こして発生するもの。

いずれも燃料の高温燃焼が条件となっており、これらの燃料を高温で燃焼させる際に $\text{NO}$ が発生し、さらにこれが酸化されてより安定な $\text{NO}_2$ となる。また、発生源としては発電所や工場のボイラー、自動車や航空機のエンジンなどが考えられるが、これらは既に我々の生活に不可欠のものとなっている。

通常、この一酸化窒素（ $\text{NO}$ ）と二酸化窒素（ $\text{NO}_2$ ）の総量を指して窒素酸化物（ $\text{NO}_x$ ）と呼んでいる。 $\text{NO}_x$ は環境汚染物質として知られており、その影響は以下に示すとおりである。

①人体への影響として、特に $\text{NO}_2$ は呼吸器の感染抵抗の低下、肺胞の形態的变化などを引き起こし、喘息をはじめとする疾患の原因となることが指摘されている。

②排出された $\text{NO}_x$ が大気中の水蒸気と反応し、硝酸等を生成する。これが雨と混ざり、酸性雨となって地上に降り注ぐことで森林衰退を引き起こすことが指摘されている。

③ $\text{NO}_x$ が太陽光に含まれる紫外線の照射を受けることで、オゾン、ペルオキシアセチルナイトレートなどの光化学オキシダントを生成する。これは人体の粘膜や呼吸器系に影響を与えるほか、植物に対する毒性が強く、森林衰退の原因となる。

このため、 $\text{NO}_x$ は代表的な大気汚染物質の一つとして、各種施設ごとに排出基準値が設けられ、大気汚染防止法による規制・監視の対象となっている。その基準は、 $\text{NO}_2$ に対して以下の通りである。

・1時間値の1日平均値が0.04～0.06(ppm)までのゾーン内またはそれ以下。

また、WHO（世界保健機構）も人体への影響を考慮して、以下の勧告を行っている<sup>2)</sup>。

・喘息患者およびその他のハイリスクグループのヒトを対象とした管理された暴露研究に基づき、 $\text{NO}_2$ の短期指針値として、1時間値の日平均最高濃度の $200 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 以下（～0.11ppm）

・小児における呼吸器疾患のリスク増加を示す疫学的研究に基づいた $\text{NO}_2$ の長期指針値は、年平均値として $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$ （0.023ppm）

### 2.2 空港内の窒素酸化物主要発生源および排出係数

空港に関係する $\text{NO}_x$ 排出源は、主に以下のような車両、機体、施設であると考えられる。

①航空機（離着陸時、空港内移動時、待機時）

②サービス車両（空港内で移動する車両）

③アクセス車両（空港に出入りする車両）

④ばい煙発生施設

⑤（場合によっては）船舶（航空機用燃料運搬船）

これらの内、航空機、サービス車両、アクセス車両に関する $\text{NO}_x$ の排出係数について以下に記述する。

#### (1)航空機

航空機に関して、参考文献<sup>3)</sup>を参考にして求めた、航空機別、運行モード別の $\text{NO}_x$ 排出係数を表-1に示した。



表-1より、離陸時・上昇時に最も排出係数が大きくなり、さらに大型の航空機ほど排出係数は大きいことがわかる。

(2) サービス車両

表-2は、参考文献<sup>2),3)</sup>を参考にして求めた、空港内のサービス車両によるNO<sub>x</sub>の排出係数である。なお、ここで連絡車はガソリン車、その他は全てディーゼル車とし、空港内の走行速度は30km/hと仮定している。

(3) アクセス車両

表-3に自動車走行に関するNO<sub>x</sub>の排出係数を示す<sup>2),3)</sup>。同表よりわかるように、空港内での走行速度に近いと思われる低速での走行時の方がNO<sub>x</sub>の排出は大きくなる。

2.3 窒素酸化物の測定方法

環境大気中のNO<sub>x</sub>を計測する方法として、各種試薬にNO<sub>x</sub>を吸収させ、それを分析する方法や、NO<sub>x</sub>にオゾンを接触させ、NOから酸化された励起状態のNO<sub>2</sub>が基底状態に戻る際の発光を測定する方法などがある。このうち、空港内のNO<sub>x</sub>を採取するにあたり、同時に多数の測点を設けようとする場合には、NO<sub>x</sub>を吸収する物質を空港内に設置し、一定期間暴露した後にそれらを回収し、吸収されたNO<sub>x</sub>量を分析する方法が最も経済的かつ効果的であると考えられる。

そこで、本業務におけるNO<sub>x</sub>測定では、写真-1、写真-2に示すようなNO<sub>x</sub>捕集装置（以下、エアサンプラーと称する）を用いることとした。これらのNO<sub>x</sub>捕集装置を空港内に設置することで、大気中に拡散しているNO<sub>x</sub>を吸収させ、分析することができる。

また、写真-1の面状エアサンプラー、写真-2の筒状エアサンプラーの構造を図-1、図-2に示した。図-1における拡散層、図-2における捕集エレメントには、NO<sub>x</sub>の吸収剤として以下のようなものが含まれたろ紙が使用されている。

①面状(写真-1、図-1)のエアサンプラー（寸法：50×38×10mm）

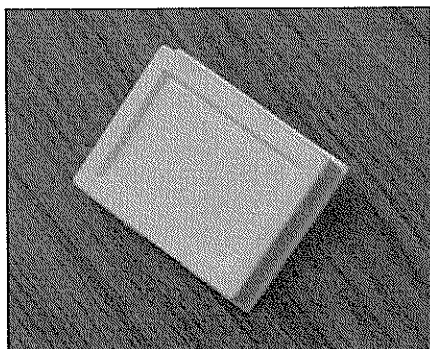


写真-1 面状エアサンプラー

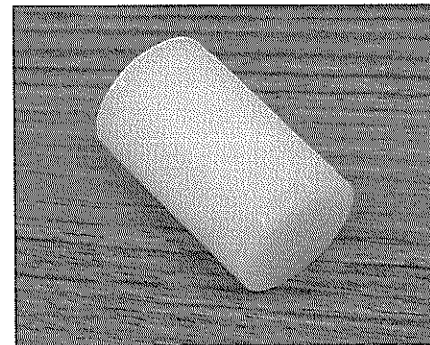


写真-2 筒状エアサンプラー

表-1 航空機クラス別・運行モード別 窒素酸化物排出係数

クラス	運行モード	窒素酸化物排出係数 (g/s/機)
ジャンボⅡ級	タキシング・アイドル	3.4
	離陸	384.4
	上昇	242.5
	進入	26.1
ジャンボ級	タキシング・アイドル	2.7
	離陸	299.0
	上昇	188.6
	進入	20.3
エアバス級	タキシング・アイドル	2.4
	離陸	223.8
	上昇	148.3
	進入	18.5
中型ジェット級	タキシング・アイドル	1.5
	離陸	158.4
	上昇	101.2
	進入	11.7
小型ジェット級	タキシング・アイドル	0.9
	離陸	45.8
	上昇	29.3
	進入	4.1

表-2 サービス車両の窒素酸化物排出係数

種別	排出係数 (g/min/台)		備考 (車両重量など)
	アイドル時	走行時	
バス	0.51	5.24	10tと想定
連絡車	0.01	0.17	乗用車(ガソリン車)
ウォーターサービスカー	0.49	2.86	7t
ラバトリーサービスカー	0.49	2.86	7t
航空機牽引車	0.66	2.86	30t
パッセンジャーステップ車	0.48	2.86	6.5t
フードローダー車	0.49	2.86	7tもしくは4t
キャビンクレーニング車	0.49	2.86	7tもしくは4t
ハイリフトローダー	0.27	2.86	排気量 3200cc
ベルトローダー	0.27	2.86	排気量 3200cc
ダグ車	0.27	2.86	排気量 3200cc
カーゴトラック	0.32	2.86	2t
フォークリフト	0.51	2.86	10tと想定

表-3 アクセス車両の窒素酸化物排出係数

車種	走行時		アイドル時
	走行速度 (km/h)	窒素酸化物排出係数 (g/km/台)	窒素酸化物排出係数 (g/10min/台)
小型車 (乗用車ガソリン車)	20	0.29	0.1
	30	0.24	
	40	0.20	
	60	0.23	
	80	0.27	
	30	2.75	
大型車 (10t, ディーゼル車)	40	0.41	5.1
	60	1.90	
	40	0.41	
	80	2.29	

・NO<sub>2</sub>吸収剤 …… トリエタノールアミン (NO<sub>2</sub>を吸収する試薬)

②筒状 (写真-2, 図-2) のエアサンプラー (寸法: φ19×30mm)

・NO<sub>2</sub>吸収剤 …… トリエタノールアミン (NO<sub>2</sub>を吸収する試薬)

・NO<sub>x</sub>吸収剤 …… PTIO (2-Phenyl-4,4,5,5-tetramethyl imidazoline-3-oxide-1-oxyl: NOを吸収する試薬) およびトリエタノールアミン

すなわち、面状エアサンプラーはNO<sub>2</sub>、筒状エアサンプラーではNO<sub>2</sub>とNO<sub>x</sub>の双方を採集することができる。これらの使い分けに関し、面状サンプラーは捕集面積、吸収剤の容積ともに大きいため、精度的にも優れ、またNO<sub>2</sub>が多く検出されると予想される箇所での測定にも適していると考えられる。一方、筒状サンプラーの方は、NO<sub>x</sub>およびNO<sub>2</sub>の同時測定が可能であり、小型であることから測定条件の比較的厳しい箇所でも測定しやすい。これらの使用にあたっては、測定条件等を考慮して、いずれを用いるかを決定する必要がある。

また、このようにして採取したNO<sub>x</sub>の測定方法は、JIS K 0104によって規定されている。この規格は排ガス中のNO<sub>x</sub>濃度の分析方法について規定したもので、各種の分析方法が示されている。これらの分析方法の概要を表-4に示した。この中で、最も取り扱いが簡易で汎用性に優れているものは、ザルツマン吸光光度法である。本報告における空港内でのNO<sub>x</sub>測定でも主にこの手法を用いて行っており、以下にその簡単な手順を示した。

①トリエタノールアミン、PTIO水溶液を含ませたる紙 (本文の中ではエアサンプラー) を大気中に放置し、NO<sub>x</sub>を吸収させる。

②吸収させたNO<sub>x</sub>を規定量の溶液に溶かし、ザルツマン試薬を加える。ザルツマン試薬はNO<sub>x</sub>と反応して赤色を呈する試薬で、NO<sub>x</sub>濃度が高いほど強く呈色する。

③ザルツマン試薬とNO<sub>x</sub>の反応によって呈される赤色の濃さを調べることによって、吸収されたNO<sub>x</sub>の量を推定する。なお、このとき簡易的には比色表を使う方法があり、定量的に行うには545nmの周波数での吸光光度を調べる方法がある。本業務では吸光光度法で行っている。

#### 2.4 光触媒 (酸化チタン) を用いた窒素酸化物低減技術

本業務では、最終的にはNO<sub>x</sub>低減技術の空港施設への適用可能性について検討することを目的としている。空港施設に対してNO<sub>x</sub>低減を行おうとする場合、概ね以下のようなアプローチの方法が考えられる。

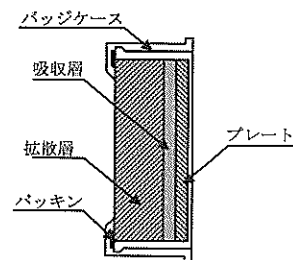
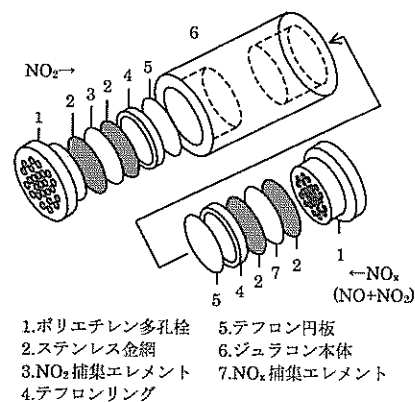


図-1 面状エアサンプラーの構造



1. ポリエチレン多孔栓
2. ステンレス金網
3. NO<sub>2</sub>捕集エレメント
4. テフロンリング
5. テフロン円板
6. ジュロン本体
7. NO<sub>x</sub>捕集エレメント

図-2 筒状エアサンプラーの構造

表-4 窒素酸化物の分析方法 (JIS K 0104 より抜粋)

分析方法の種類	分析方法の概要
亜鉛還元ナフチルエチレンジアミン吸光光度法 (Zn-NEDA法)	試料ガス中の窒素酸化物をオゾンで酸化し、吸収液に吸収させて硝酸イオンとする。亜鉛粉末で亜硝酸イオンに還元した後、スルファニルアミド及びナフチルエチレンジアミン溶液を加えて発光させ、吸光度 (545nm) を測定する。
ナフチルエチレンジアミン法 (NEDA法)	試料ガス中の窒素酸化物をアルカリ性吸収液に吸収させて亜硝酸イオンとし、スルファニルアミド及びナフチルエチレンジアミン溶液を加えて発光させ、吸光度 (545nm) を測定する。
イオンクロマトグラフ法	試料ガス中の窒素酸化物をオゾンまたは酸素で酸化し、吸収液に吸収させて硝酸イオンとする。イオンクロマトグラフに注入してクロマトグラムを得る。
フェノールジスルホン酸吸光光度法 (PDS法)	試料ガス中の窒素酸化物をオゾンまたは酸素で酸化し、吸収液に吸収させて硝酸イオンとする。フェノールジスルホン酸を加えて発色させ吸光度 (400nm) を測定する。
ザルツマン吸光光度法	試料ガス中の二酸化窒素を吸収発光液に通して発色させ、吸光度 (545nm) を測定する。

- ①燃料中の窒素化合物を減らす (燃料のN化合物低減)。
- ②燃焼温度を下げる (大気中の窒素-酸素の反応低減)。
- ③排出時間を短くする。
- ④NO<sub>x</sub>を分解・処理する。
- ⑤航空機の廃止。

ここで、①については、現在使用されている航空燃料は化石燃料であり、本来窒素化合物を含んでいる。これを除去することは非常に困難である。また、②について

は燃料の高温燃焼時に大気中に約80%含まれる窒素と約20%含まれる酸素の結合を少なくするものであり、エンジンにおける燃焼温度を低くすることで対策が可能である。これは、エンジンメーカーで精力的に行われており、既に一定の効果をあげている。③については、航空機のアイドル時間や滑走時間を短くするものであるが、運航上の制約等との整合が必要であり、場合によっては空港施設の機能そのものを大きく見なおす必要がある。④については、何らかの方法を用いて排出されたNO<sub>x</sub>を分解、除去するものであり、例えば近年実用化に向けて研究が進められている光触媒技術などを用いて一度排出されたNO<sub>x</sub>を低減することを指す。この方法は、他の方法などと組み合わせる用いることができ、今回の業務の中で行ったアプローチ法である。⑤については、現代社会において航空機が移動・輸送手段として欠かすことのできないものとなっており、例えば航空機を廃止したとしても、他の交通手段に移行することで、NO<sub>x</sub>の排出という観点から見れば全く意味をなさない。

以上から、今回の業務において、NO<sub>x</sub>の低減技術とは光触媒を用いたNO<sub>x</sub>の除去を指すものとする。

ここで、「光触媒」について説明する。まず、「触媒」とは、それ自体は変化せずに何らかの反応速度を速める働きをすることを意味する。反応によって触媒自身の変化がないため、繰り返し作用することができる。つまり光触媒作用は、何らかの物質に光を照射することで化学反応を促進するものであり、本多・藤嶋効果と呼ばれる酸化チタン (TiO<sub>2</sub>) を用いた水の分解反応で初めて発見された、我が国の独創技術である。

したがって、本業務において最終的に目的とするNO<sub>x</sub>の低減方法とは、空港施設から排出されたNO<sub>x</sub>を光触媒物質の表面で硝酸に変化させ、環境から除去することである。

ここで、以下に光触媒メカニズムの概略を説明する。  
 昨今、最も精力的に研究開発が進められている光触媒物質は酸化チタンであるが、それ以外にも光触媒の性質を示す半導体物質は多い。図-3に代表的な半導体のエネルギーダイアグラムを示す<sup>4)</sup>。酸化チタンの半導体は、電子が充填した荷電子帯と空の伝導帯がバンドギャップ(禁制帯)で隔てられたエネルギー構造を持っていると説明されている。バンドギャップの大きさが各半導体物質ごとに異なり、酸化チタンの場合、約3.2eV、光の波長で約380nmに相当するとされている。この意味するところは、380nmより短い波長(より高いエネルギー)の光、すなわち図-4から判断できるように紫外線を照射した場合、荷電子帯に存在する電子が励起され、伝導帯に移動

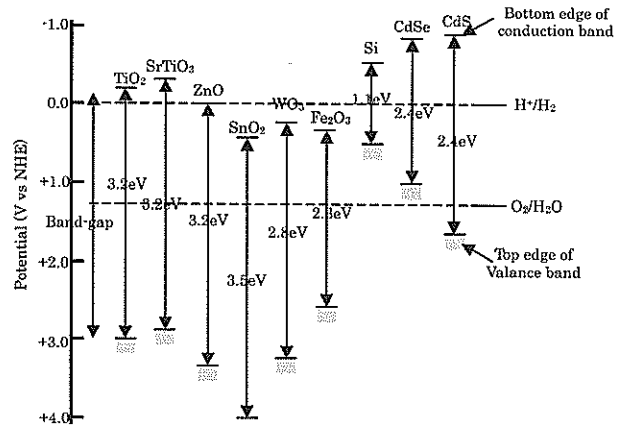


図-3 代表的な半導体のエネルギーダイアグラム (参考文献<sup>4)</sup>より引用)

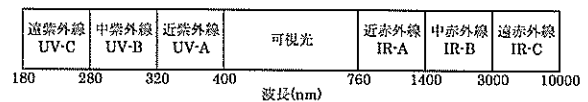


図-4 波長とそれに対応する光の種類

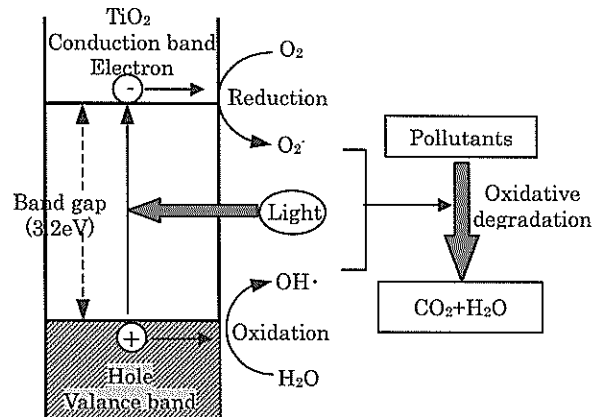


図-5 光触媒の基本原則 (参考文献<sup>4)</sup>より引用)

するというのである。光励起に伴って荷電子帯には電子の抜けた孔(正孔)が残る。この生成した電子・正孔を外部回路に取り出さず、半導体表面で反応物質と作用させると、電子は還元(電子を与える)反応を、正孔は酸化(電子を奪い取る)反応を行う。これが一般に光触媒反応と呼ばれているものである。

光触媒作用は様々な半導体において確認されているが、現在まで最も多用されているのは酸化チタンである。その理由は、

- ①太陽光、室内光あるいは適当な人工光源からの紫外線によって十分な光触媒活性を示す。
- ②化学的に安定である。
- ③環境、人体に対して無害である。
- ④安価で経済的である。



などの理由による。

酸化チタンの光触媒反応の基本原理を図-5に示す<sup>4)</sup>。荷電子帯に生じた正孔は、極めて酸化力が強く、水を酸化して活性酸素の一つであるOHラジカルを生じさせる。OHラジカルは極めて強い酸化力を有し、空気中や水中のほとんど全ての有機化合物を酸化することが可能である。一方、伝導帯に移動した電子は酸素を還元し、活性酸素の一種であるスーパーオキシドアニオン ( $O_2^-$ ) を生じさせる。 $O_2^-$ も比較的強い酸化力を有している。これらの活性酸素の酸化作用によって、有機化合物や有機系の汚染物質は最終的に二酸化炭素と水にまで分解される。

酸化チタンにはアナターゼ型、ルチル型、ブッカイト型の3つの結晶形態があり、この中で光触媒として適しているのはアナターゼ型である。これはアナターゼ型のバンドギャップが3.2eV、ルチル型が3.0eVであり、アナターゼ型の伝導帯の位置が負側にあるため、還元力が強く酸素を還元しやすいためと言われている。ブッカイト型も光触媒作用は確認されているが、他に比べて不安定で合成も困難であることからほとんど利用されていない。

酸化チタンのこのような機構を応用することによりNO<sub>x</sub>を酸化し、硝酸として環境中から除去することが可能となる。現在、NO<sub>x</sub>により都市環境が悪化しつつあることを背景に、光触媒技術の工学的応用方法の開発が精力的に進められている。

上記のように、ほとんどの有機物を酸化・分解できることから、酸化チタンの現在の主な使用方法には、主に以下のようなものがある。

- ①脱臭と有害物質の除去を目的とした空気清浄器、便器、衣類、ティッシュなど
  - ②防汚を目的とした建物の外壁、建材など
  - ③酸化チタンの超親水性を利用した硝子の曇り止めなど
  - また、NO<sub>x</sub>の除去を目的とした場合、
  - ①粉末状の酸化チタンをコンクリートやアスファルトに混入し、打設する
  - ②粉末状の酸化チタンを塗料に混入し、塗布する
- のような方法が考えられる。

## 2.5 過去に実施した東京国際空港における窒素酸化物濃度測定結果

本業務に関連して、平成12年に東京国際空港において3日間に渡ってNO<sub>x</sub>濃度の測定を行っている<sup>3)</sup>。東京国際空港は、深夜まで施設が運用されており、安全の観点から滑走路周辺での計測が困難であった。そのため、最も航空機に近い場所として、エプロン（駐機場）での計測を行い、さらにその他の場所として、管理事務所脇のエプ

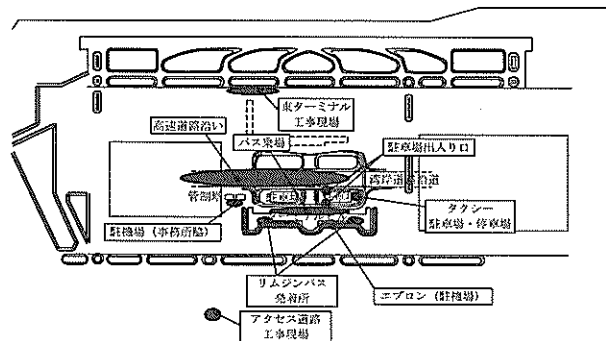


図-6 東京国際空港における窒素酸化物濃度測定箇所

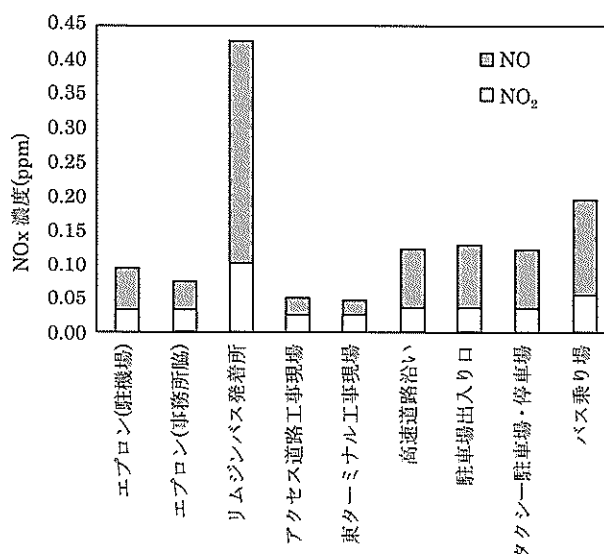


図-7 東京国際空港におけるNOおよびNO<sub>2</sub>の計測結果(計測期間中平均値)

ロン部、空港ビルから航空機までの空港内リムジンバス発着所、空港アクセス道路の工事現場、東ターミナルの工事現場、空港にアクセスする高速道路沿い、空港近傍の駐車場出入り口、タクシーの駐停車場、空港内外を結ぶアクセスバス乗り場の計9箇所にて計測を行った。それらの測定箇所の概略図を図-6に示す。なお、計測は図-1、図-2の面状および筒状の両エアサンプラーを用いて、二重測定を行っている。

図-7にその結果を示す。図-7の結果は、計測期間3日間の平均値であり、各日ごとの計測値は面状、筒状エアサンプラーの結果のうち、値が大きい方を採用している。同図に示されるとおり、空港内リムジンバス発着所において最も高い濃度となった。この発着所は半屋内にあり、バスが待機する位置には排気ガスの吸引装置が設置されているものの、吸引能力不足のためNO<sub>x</sub>が高濃度で滞留しているものと思われる。

バス乗り場は空港内リムジンバス発着所に次いで高濃度を示し、高速道路沿い、駐車場出入り口、タクシー駐

車場・駐車場はほぼ同等の値を示した。この付近の濃度は、エプロンあるいは工事現場の濃度よりも高いことから、空港にアクセスする自動車からの排ガスの影響によりNO<sub>x</sub>濃度が高くなったものと思われる。

以上の結果を含め、自動車が通行する箇所では、エプロン周辺よりもNO<sub>x</sub>濃度が高い結果となっている。この原因としては、NO<sub>x</sub>の排出源すなわち自動車そのものと計測装置の距離が短いこと、いずれも建物の周辺であり、風の影響でNO<sub>x</sub>が拡散される割合が比較的小さくなること、航空機と比較すると低排出ではあるが、常時連続的にNO<sub>x</sub>の排出がおこなっていること、などが挙げられる。

いずれにしても、これらの計測箇所でのNO<sub>x</sub>濃度は、前述の大気汚染防止法、WHOの基準値と比較すると、人体への健康被害を無視できない値となっている可能性もあり、悪化した環境であることが伺える。

また、面状、筒状両方のエアサンプラーを使用した二重測定を行っていることから、各々のエアサンプラーを使用した場合の測定誤差について検討を行った。その結果を図-8に示す。同図より、筒状エアサンプラーを使用した場合の方が、面状エアサンプラーを使用した場合に比べ、おおよそ20%程度計測値が大きく評価される傾向があるものの、両者の計測値はほぼ良く整合しており、NO<sub>2</sub>分布の傾向を調べるためには、いずれのエアサンプラーを用いても大きな差はない結果となっている。

### 3. 石垣空港における窒素酸化物濃度測定の方法

#### 3.1 石垣空港選定の理由

前述のように、東京国際空港では施設の運用が深夜に

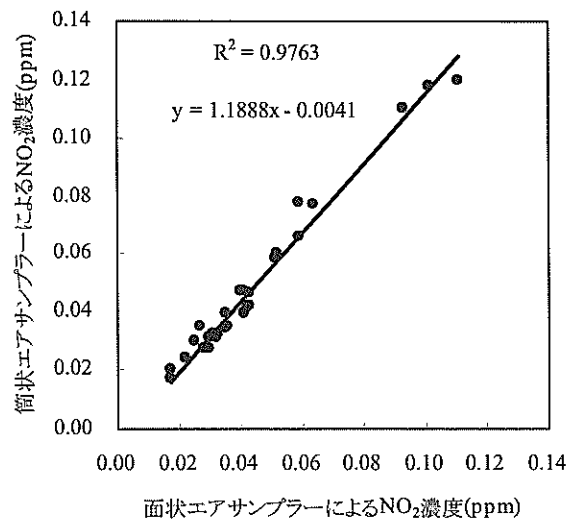


図-8 面状および筒状エアサンプラーによる計測結果の比較

まで至るため、滑走路周辺でのNO<sub>x</sub>濃度測定が不可能であった。滑走路周辺では、航空機から排出されるNO<sub>x</sub>を最も効率良く測定できるものと思われ、空港施設に起因するNO<sub>x</sub>の影響を把握する上で非常に大きな意味を持つ。そこで、今回、滑走路周辺でのNO<sub>x</sub>濃度測定を行うこととし、対象空港の選定を行った。滑走路周辺でNO<sub>x</sub>濃度測定を行うためには、以下の条件が必要となる。

- ①離着陸の時間が昼間に限られ、夜間に計測装置の取り付けが可能なこと。
- ②空港の規模が比較的小さく、滑走路周辺でくまなく計測ができること。
- ③空港の規模に比較し、発着便数もしくは利用者数が多いこと。

表-5 全国の第三種空港における滑走路長さ、利用者数

空港名	滑走路長(m)	利用者数	空港名	滑走路長(m)	利用者数	空港名	滑走路長(m)	利用者数
利尻	1,800	24,000	石見	2,000	160,000	奄美	2,000	(28便/日)
礼文	800	3,600	岡山	3,000	947,000	喜界	1,200	(10便/日)
奥尻	800	17,600	佐賀	2,000	330,000	徳之島	2,000	(8便/日)
中標津	2,000	214,000	大島	1,800	103,000	沖永良部	1,200	(10便/日)
紋別	2,000	62,600	新島	800	31,900	与論	1,200	(20便/日)
女満別	2,500	1,034,000	神津島	800	10,100	粟国	800	27,000
青森	2,500	1,616,500	三宅島	1,200	27,800	慶良間	800	8,000
大館能代	2,000	144,300	八丈島	1,800	248,100	久米島	2,000	280,000
花巻	2,000	528,200	佐渡	890	8,300	南大東	1,500	37,000
庄内	2,000	428,200	隠岐	1,500	(4便/日)	北大東	1,500	1,300
福島	2,500	709,600	対馬	1,900	(14便/日)	伊江島	1,500	600
富山	2,000	1,004,000	福江	2,000	(4便/日)	宮古	2,000	1,000,000
福井	1,200	(運休)	上五島	800		下地島	3,000	(運休)
松本	2,000	190,000	壱岐	1,200	(運休)	多良間	1,500	370,000
南紀白浜	1,800	86,000	小値賀	800		石垣	1,500	1,400,000
鳥取	2,000	290,000	種子島	1,500	(16便/日)	波照間	800	5,000
出雲	2,000	498,400	屋久島	1,500	(14便/日)	与那国	1,500	63,000

※利用者数は原則としてH12年のデータを使用

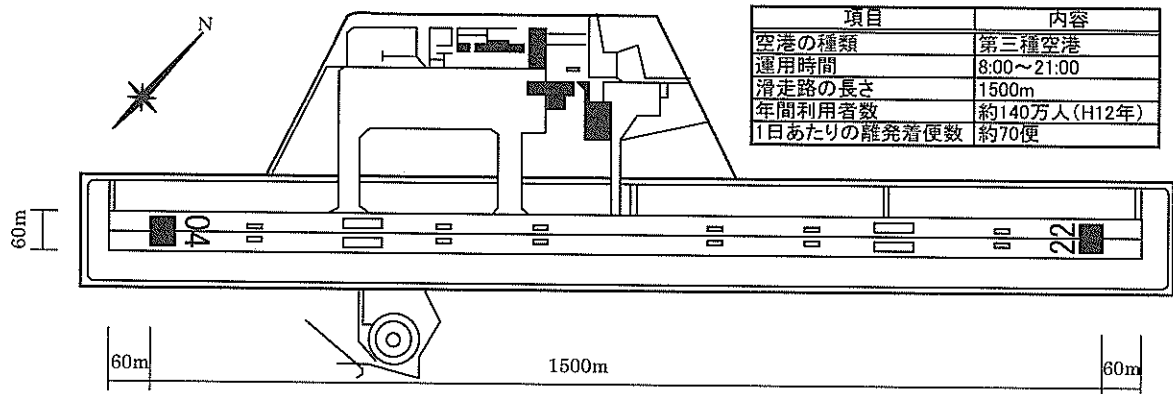


図-9 石垣空港の概要

これらの条件を考慮して、空港の規模が小さい第三種空港に限定して検討を行うこととし、これらの第三種空港の滑走路長さ、利用者数を調べたものを表-5に示す。

同表より、利用者数は青森空港、石垣空港、女満別空港、富山空港、宮古空港の順に多い結果となっている。さらにその中で滑走路の長さを基準にとると、滑走路長が最も短いのは石垣空港であった。以上の情報から、沖縄県の石垣空港を取り上げ、石垣空港での計測を行うこととした。図-9に石垣空港の平面図、ならびに概要を示す。同図に示されるように、石垣空港は1500mという短い滑走路を持つ第三種空港でありながら、年間の利用者数が140万人を超え、1日の離着陸便数も70便を超える。さらに、運用時間が8:00~21:00であり、夜間に計測装置を空港内に取りつけておくことで、運用時間中における空港内のNO<sub>x</sub>濃度を取得することが可能となる。

### 3.2 石垣空港における窒素酸化物濃度測定の方法

#### (1)エアサンプラーの選定および取付け治具の作成

石垣空港でのNO<sub>x</sub>濃度測定は、前述のエアサンプラーを滑走路周辺の着陸帯に設置して、エアサンプラーに吸収されたNO<sub>x</sub>量を分析することで行うこととした。しかし、着陸帯にはエアサンプラーを固定できる物件がなく、また安易な取付け方法を採用した場合、エアサンプラーが航空機に巻き込まれ、事故につながる恐れがある。そこで、着陸帯にエアサンプラーを設置できるよう、専用の治具を作成した。図-10に作成した治具の概要を示す。

詳細は割愛するが、本治具は、航空機の排気によって破損することがないように設計している。石垣空港に離着陸する航空機は、全てが小型ジェット級以下であるため、小型ジェット機が最もエンジン出力を強める離陸時の排気を基準に検討した。図-11は該当する小型ジェット機の排気による圧力分布を示している<sup>5)</sup>。同図より、航空機の背面側15m程度まで、200MPaの圧力が作用する可能

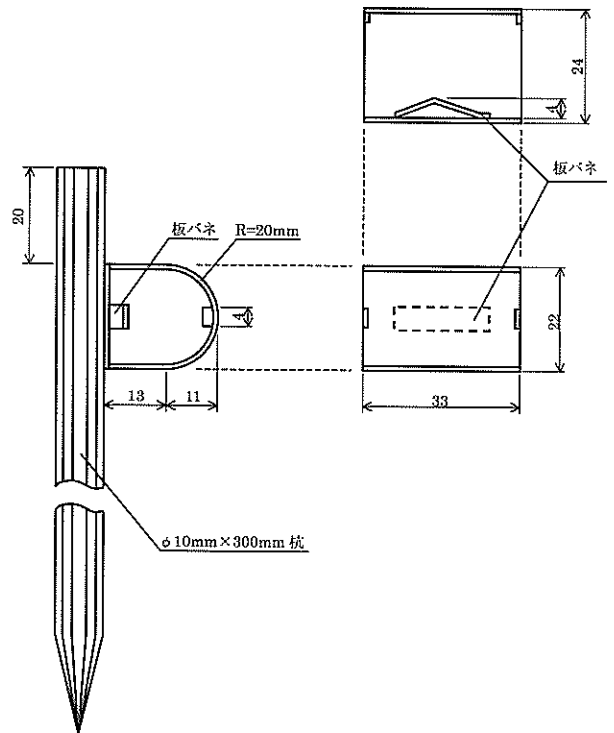


図-10 作成したエアサンプラー取付け治具

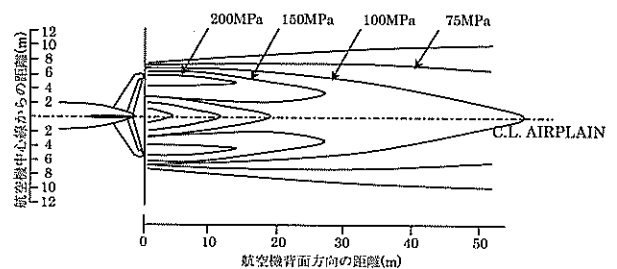


図-11 小型ジェット機の離陸時の排気による風圧

性があることがわかる。そこで、取付け治具は滑走路脇15mの位置に設置することとし、200MPaの風圧に耐える設計とした。本来、航空機の安全上、設置物は脆弱なも

のである方が望ましいが、航空機の排気によって破損が生じた場合、安全面から見てより危険であると判断し、また、万が一航空機が滑走路から外れた場合でも、車輪が上載した時には地中に埋没することを期待して杭状のものとしている。

また、図-10の治具は図-2の筒型エアサンプラー用のものであり、石垣空港では筒状エアサンプラーのみを用いることとした。これは、面状エアサンプラーは平面的に排気の圧力を受け、また表面積も大きいため、上記の検討を行うと非常に強固な設計とする必要が生じたためであり、前述の2.5の結果を踏まえ、筒状エアサンプラーのみでも十分な計測が行えるものと判断したためである。

なお、治具の設置に関し、本来航行目的のために必要かつ脆弱でない固定物件は、法令により着陸帯の中には設置できない<sup>6),7)</sup>。今回の業務においては、航空局との協議の上、一時的な物件として設置を許可されたものであることをここに記しておく。

(2)滑走路周辺での窒素酸化物濃度測定の概要

測定は2回に分けて行っている。沖縄県八重山地方(石垣島)は年間を通して降水量が多く、1mm以上の降雨がある日数は年間約230日となる。また台風も比較的多く接近するため、これらを極力避ける必要がある。データは省略するが、過去30年間の気象統計データを基に、台風の接近が少なく、かつ降水量も比較的少なくなる3月、および10月の計測とした。

計測は24時間を1サイクルとしており、空港施設の運用が終了する21:00にエアサンプラーを設置、滑走路周辺で一昼夜NO<sub>x</sub>を吸収させた後、翌日の21:00に回収した。測定を行ったスケジュールを以下に示す。なお、各回とも東京国際空港の場合と同様、3サイクルずつ測定を行った。

①1回目

1サイクル目：平成15年3月17日～平成15年3月18日(天

候：曇一時雨)

2サイクル目：平成15年3月18日～平成15年3月19日(天候：曇一時雨)

3サイクル目：平成15年3月19日～平成15年3月20日(天候：曇のち雨)

②2回目

1サイクル目：平成15年10月7日～平成15年10月8日(天候：晴れ)

2サイクル目：平成15年10月8日～平成15年10月9日(天候：曇時々雨)

3サイクル目：平成15年10月9日～平成15年10月10日(天候：晴れ)

1回目の測定では、期間中3サイクルとも降雨が確認されたが、2回目の測定では全く降雨のない日が2日間得られた。また、1回目の測定時には、着陸帯の植生は地表から50～80cm程度まで成長した状態であったが、2回目の測定時にはこれらがほとんど刈り取られた状態となっていた。

測定地点を以下に示す。

①計測1回目(平成15年3月)

1回目の計測でエアサンプラーを設置した地点を図-12に示した。その詳細を以下に記す。

1)滑走路周辺・・・滑走路端から15m(滑走路中心から42.5m)の距離にある着陸帯植生地に設置を行った(R-1～R-44)。また滑走路延長方向に対しては150mピッチで設置し、1ヶ所あたり2つづつ治具およびエアサンプラーを取り付けており、滑走路周辺の測点数は44点である。

2)場周道路沿い・・・着陸帯を囲む場周道路南東側において、道路端から南東側に1m(滑走路中心から80.5m)の植生地に設置を行った(R-45～R-64)。また、場周道路の北西側では、南東側の道路端から15m(滑走路中心から62.5m)の距離にある着陸帯植生地に設置を行った(R-65

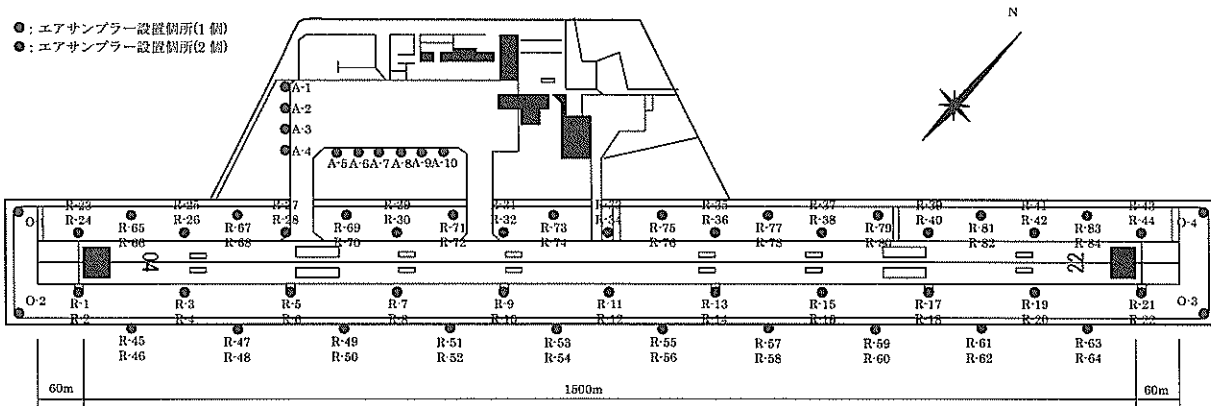


図-12 1回目(平成15年3月実施)の計測地点

～R-84)。これらは上記の滑走路周辺に設置したものと千鳥配置となるよう設置し、150mピッチで1ヶ所あたり2つつつ治具およびエアサンプラーを取付けており、場周道路沿いの測点数は40点である。

3) エプロン周辺・・・エプロン南西部では、エプロン端から10mの距離にある植生地に、約50mピッチで設置を行った(A-1～A-4)。また、エプロン南東部では、同じくエプロン端から10mの距離にある植生地に、約30mピッチで設置を行った(A-5～A-10)。これらの箇所では、1箇所あたり1つつつ治具およびエアサンプラーを取付けており、エプロン周辺での設置数は10点である。

4) 着陸帯端部・・・着陸帯を囲む場周道路の南西、南東、北東、北西の端に、それぞれ場周道路から約5mの距離に設置を行った(O-1～O-4)。

これらの箇所での設置数は1箇所あたり1つつつであり、着陸帯端部での設置数は4点である。

5) その他・・・図には示さないが、空港内の計測結果との比較を行うため、空港駐車場に3箇所3点(O-6～O-8)、空港から約100m離れたところにある民間駐車場に1箇所1点(O-9)、さらに石垣港の棧橋上面に1箇所1点(O-10)、合計5点設置を行った。

以上より、1回目の計測でエアサンプラーの設置を行った箇所は1サイクルあたり103点である。なお、この測点数で計測を行ったのは2サイクル目までであり、3サイクル目は滑走路周辺で8点(R-5, R-9, R-14, R-18, R-27, R-31, R-35, R-39)、その他の箇所5点であり、合計13点とした。

## ②計測2回目(平成15年10月)

2回目の計測でエアサンプラーを設置した地点を図-13に示した。その詳細を以下に記す。

1) 滑走路周辺・・・滑走路脇から15m(滑走路中心から42.5m)の距離にある着陸帯植生地に設置を行った(R-2～R-13, R-16～R-27)。なお、滑走路の末端部における4

箇所(R-1, R-14, R-15, R-28)では、滑走路脇から5m(滑走路中心から32.5m)の距離としている。また、滑走路延長方向に対しては100mおよび150mピッチで設置しており、1ヶ所あたり1つつつの設置で滑走路周辺の測点数は28点である。

2) エプロン周辺・・・エプロン南西部では、エプロン端から10mの距離にある植生地に、50mピッチで設置を行った(A-1～A-3)。また、エプロン南東部では、同じくエプロン端から10mの距離にある植生地に、約50mピッチで設置を行い(A-4～A-7)、エプロン北西部もエプロン端から10mの距離にある植生地に約30mピッチで設置した(A-8～A-11)。これらの箇所は、1箇所あたり1つつつであり、エプロン周辺での設置数は11点である。

3) その他・・・図には示さないが、空港の北西部にある大阪航空局事務所前に1箇所1点(O-1)、空港の送迎デッキに1箇所1点(O-2)、空港駐車場に3箇所3点(O-3～O-5)、空港から南西に約300m離れた空き地に1箇所1点(O-6)、同様に空港から約500m南東へ離れた道路沿いに1箇所1点(O-7)、空港から約100m北東へ離れた空き地に1箇所1点(O-8)、空港から約1km西へ離れた公園内に1箇所1点(O-9)、さらに石垣港の棧橋上に1箇所1点、合計10点設置を行った。

以上より、2回目の計測でエアサンプラーの設置を行った箇所は1サイクルあたり49点である。この測点数で3サイクルの計測を行った。

なお、滑走路周辺での測定において、滑走路脇から原則として15m地点としたのは、各種法令等を参考に、航空機に対する安全を最優先する目的から、航空局と折衝の結果定めたものである。

## (3)測定の方法

以下に測定の方法を記す。

### ①エアサンプラー取付治具の設置

エアサンプラーを設置する箇所を決定し、金属探知機

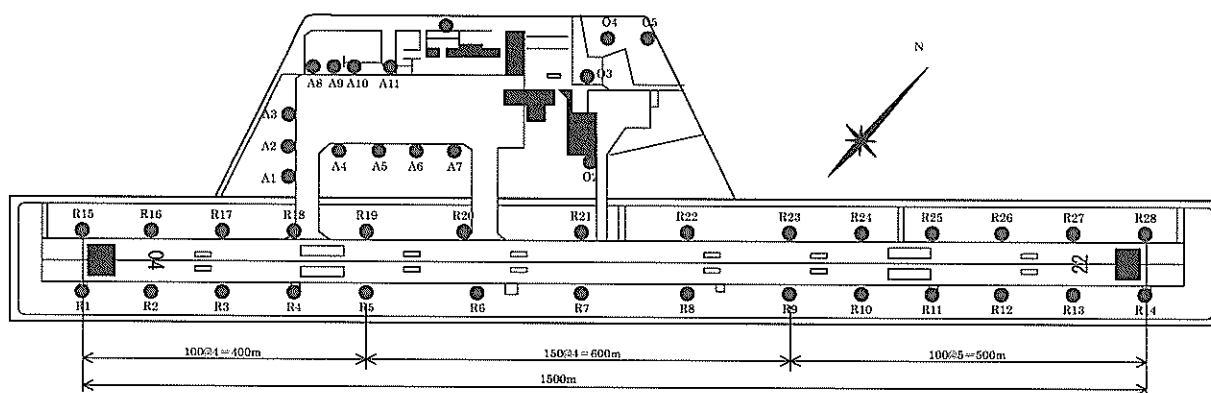


図-13 2回目(平成15年10月実施)の計測地点



を用いてその箇所に空港内施設の埋設ケーブルや不発弾等がないことを確認した後、ハンマーを用いてエアサンプラー取付治具を所定位置に打込んだ。

#### ②エアサンプラーの設置、回収

打込んだエアサンプラー取付治具に、エアサンプラーを取り付けた。取り付けたエアサンプラーは、24時間NO<sub>x</sub>を吸収させた後取り外し、所定のサイクル数になるまで新たなエアサンプラーと交換した。

#### ③回収したエアサンプラーの分析

2.3で記述したザルツマン吸光光度法によって、エアサンプラーに吸収されたNO<sub>x</sub>量の分析を行った。

### 4. 石垣空港における窒素酸化物濃度測定の結果

#### 4.1 1回目の測定結果

##### (1)気象条件、運用条件

表-6に、1回目の測定期間中における気象データをまとめたものを示す。表-6からわかるように、全てのサイクル中に1.5mm～4.0mmの降雨が確認された。降雨があった場合、NO<sub>x</sub>濃度測定に対して、

①エアサンプラーの多孔栓(図-2参照)の孔が雨水で塞がれることにより、気体であるNO<sub>x</sub>が捕集エレメントに到達せず、計測値が著しく小さくなる。

②NO<sub>x</sub>、特にNO<sub>2</sub>が雨水に吸収され、検知されるNO<sub>x</sub>濃度が低くなる(なお、NO<sub>2</sub>は水に溶けやすく、硝酸および亜硝酸となるが、NOは比較的水に溶けにくく、その溶解度は水100lに対して4.6l(20℃)程度である)。

といった不都合が生じることが考えられ、解析に注意を要することとなる。

期間中の気温はおおよそ18℃程度であり、大きな変動は見られない。風速に関しては、期間中3.3～5.7m/sとなっており、石垣地方が比較的風の強い地域であることがわかる。

図-14に測定期間中の風配図を示した。同図より、測定期間中はほとんど北、もしくは北北東の風向きであり、こちらもあまり変動はない。

表-7は測定期間中における石垣空港の運用状況を表したものである。石垣空港では、1日あたり約35機程度の離陸および着陸があり、運用時間は約12時間である。また、航空機がエプロン上に停留している時間は平均で47分程度、運用時間中の平均停留機数は2機程度となっている。

##### (2)窒素酸化物濃度の測定結果

図-15(1)～(4)にNO<sub>x</sub>濃度の測定結果を示し、表-A.1(1)～(4)に全ての測定結果のデータを示す。表-A.1(1)～(4)にはNO<sub>2</sub>の結果、およびNO<sub>x</sub>、NO<sub>2</sub>の結果か

表-6 1回目測定期間中の気象データ

項目	単位	1サイクル目	2サイクル目	3サイクル目
気温(1日平均)	(℃)	18.9	17.3	18.0
気温(運用中平均)	(℃)	18.3	17.5	18.8
降水量	(mm)	4.0	1.5	3.0
風速(1日平均)	(m/s)	5.7	3.6	3.3
風速(運用中平均)	(m/s)	6.2	3.9	3.3
日射量	(kJ)	4.3	4.2	6.9

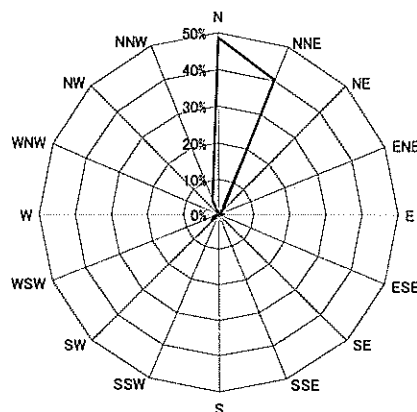


図-14 1回目測定期間中の風配図

表-7 1回目測定時の石垣空港の運用状況

項目	単位	1サイクル目	2サイクル目	3サイクル目
離陸数	(機)	35	35	35
着陸数	(機)	34	36	38
平均停留時間	(分)	49.1	48.1	44.0
運用時間	(時間)	12.1	12.0	12.2
停留数平均	(機)	1.97	2.00	1.87

ら算出されるNOの計算値も併記してある。

1サイクル目の滑走路およびエプロン周辺での最大値は、滑走路南西側(R-3)の0.030ppm、最小値は測定下限値以下(<0.001ppm)であった。また滑走路周辺での平均値は0.009ppm、エプロン周辺では0.012ppmである(測定下限値以下は0として算出)。同様に2サイクル目は最大値が滑走路南東側の0.030ppm(R-60)、最小値が測定下限値以下であり、滑走路周辺の平均値が0.008ppm、エプロン周辺が0.015ppmとなっている。3サイクル目は最大値が0.003ppm(R-5, R-9, R-27, R-31)、最小値が0.001ppm(R-13, R-35)となっている。これらの結果から、総じて滑走路周辺よりもエプロン周辺の方がNO<sub>x</sub>濃度が高い傾向を示している。エプロン部では、大気中の航空機が低排出ながら長時間、NO<sub>x</sub>を排出することになる。これに関して一般的に、アイドル状態の航空機のエンジン出力は最大出力の5%程度といわれている。一方、この計測期間中における航空機の停留時間の平均は47分間であり、平均してエプロン上には2機の航空機が待機す

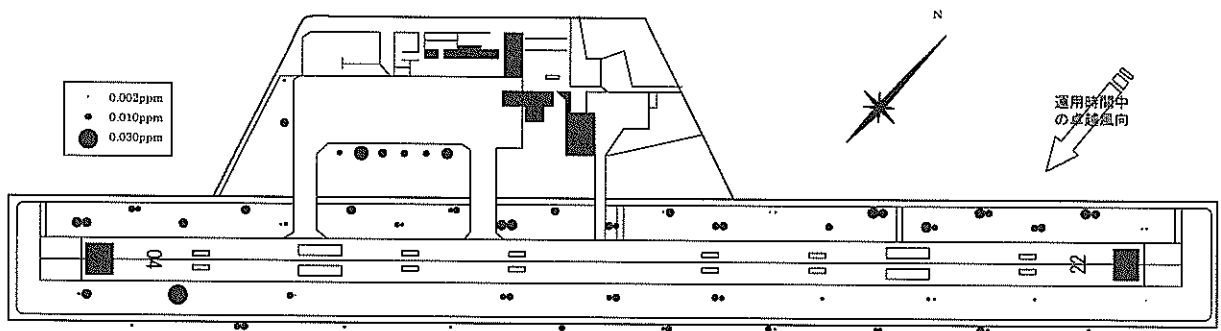


図-15(1) 滑走路およびエプロン周辺の窒素酸化物濃度測定結果 (1回目, 1サイクル目)

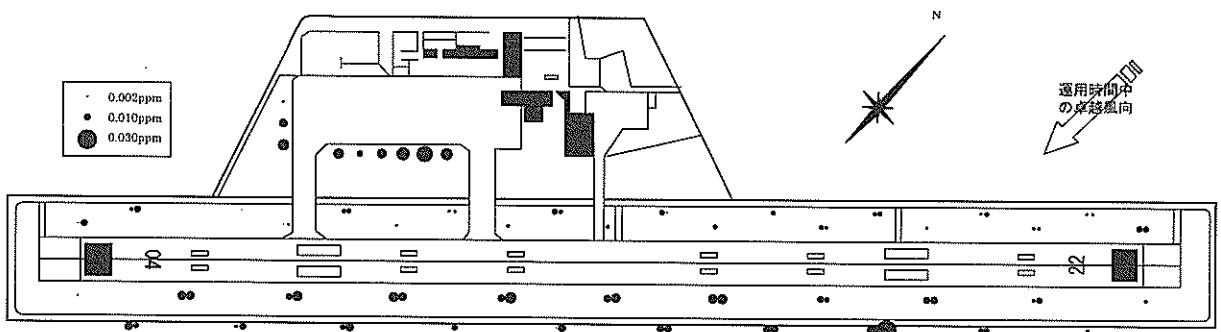


図-15(2) 滑走路およびエプロン周辺の窒素酸化物濃度測定結果 (1回目, 2サイクル目)

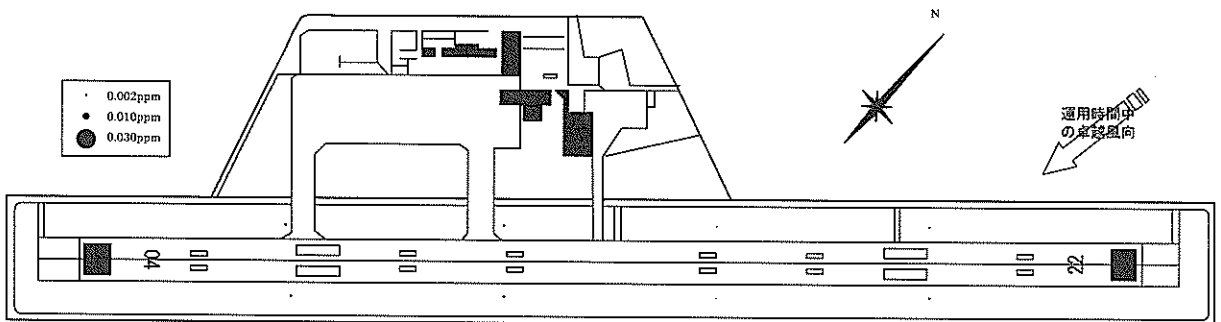


図-15(3) 滑走路およびエプロン周辺の窒素酸化物濃度測定結果 (1回目, 3サイクル目)

る状態であった。したがって、滑走路では離着陸時のみに、非連続的に高濃度のNO<sub>x</sub>が排出されるが、エプロン周辺では低濃度ながら連続的にNO<sub>x</sub>が排出されているものと思われる。

ここで、①の降雨の影響について検討する目的で、各サイクルの全測点の計測値を平均してみると、1サイクル目が0.010ppm、2サイクル目が0.009ppm、3サイクル目が0.002ppmとなる。それぞれのサイクルの降水量を見てみると、1サイクル目が4mm、2サイクル目が1.5mm、3サイクル目が3mmであり、降水量との相関は見られない。したがって、降雨の影響がどの程度あるのかについては明確に把握することは難しい。

さらに、滑走路周辺では1箇所あたり2点の計測を行っているが、例えば1サイクル目の最大値を記録した箇所では、もう一つのエアサンプラーの測定結果は測定下限値以下となっており、雨水によりエアサンプラーが目詰ま

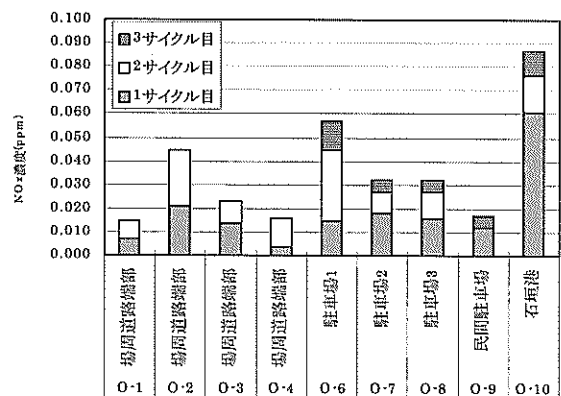


図-15(4) 空港外での窒素酸化物濃度測定結果

は、もう一つのエアサンプラーの測定結果は測定下限値以下となっており、雨水によりエアサンプラーが目詰ま

りを起こしていた可能性が否定できない。

そこで、このような目詰まりを起こしたデータを除外する目的で、3サイクルの条件が全て同じと仮定し、各計測地点における2点、3サイクルのNO<sub>x</sub>の最大値をとった

ものを図-16に示した。図-16では上記の最大NO<sub>x</sub>濃度を点の大きさで表しているが、同図より、測定されたNO<sub>x</sub>濃度は滑走路の南側で比較的多く、またエプロン南東部でも多く観測されている。ここまでも示したように、

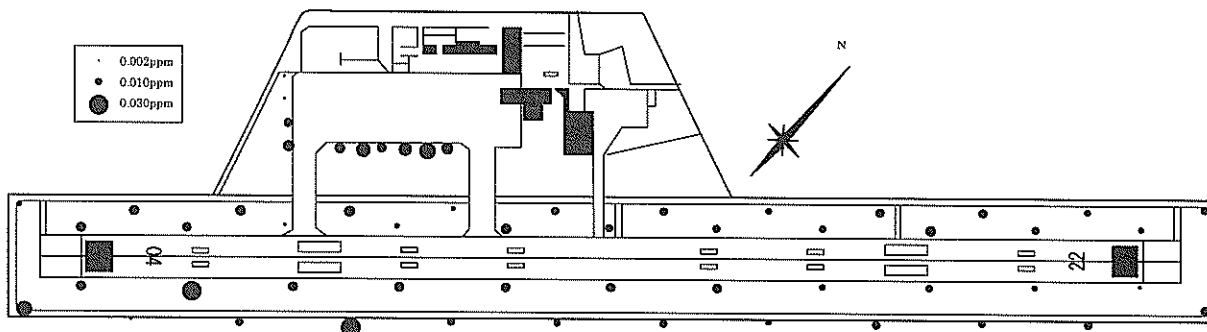


図-16 窒素酸化物濃度測定結果の3サイクル最大値

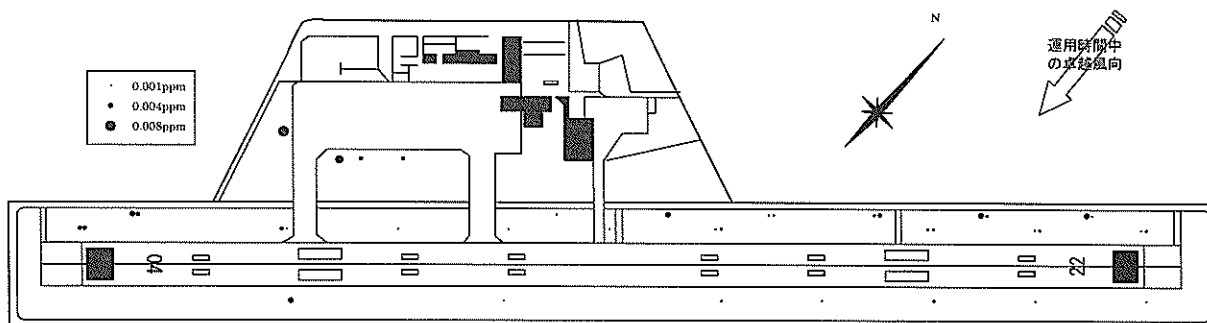


図-17(1) 滑走路およびエプロン周辺の二酸化窒素濃度測定結果 (1回目, 1サイクル目)

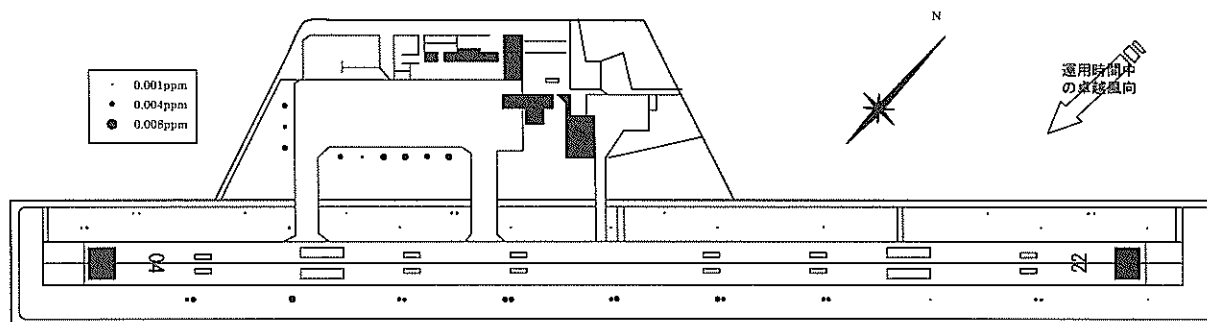


図-17(2) 滑走路およびエプロン周辺の二酸化窒素測定結果 (1回目, 2サイクル目)

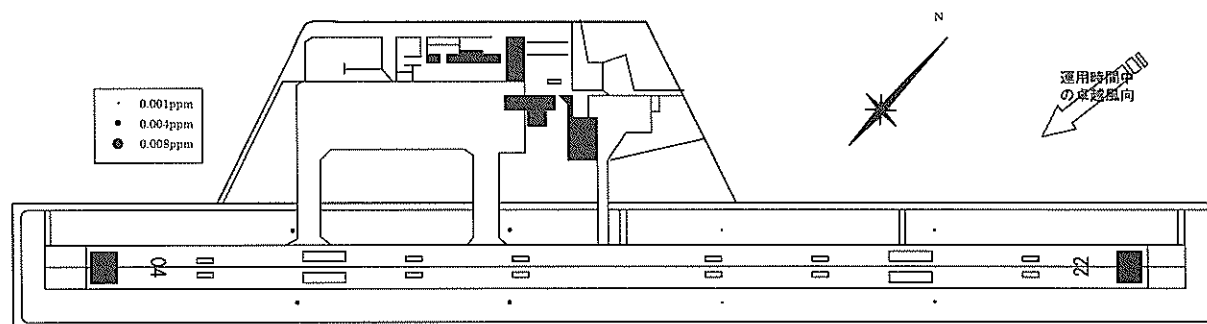


図-17(3) 滑走路およびエプロン周辺の二酸化窒素測定結果 (1回目, 3サイクル目)

測定期間中の風向はほぼ北風となっている。このような風向の場合、航空機は図中04側（南西側）から図中22側（北東側）に向かって着陸し、離陸の時は04側から22側に向かって離陸することとなる。また、離陸の際には04側に停止した航空機が、エンジンを最大出力まで起動させ、徐々に速度を上げながら22側から離陸することとなる。したがって、04側ではエンジン出力が最大でかつ低速の航空機が通過することとなるため、滑走路周辺では最もNO<sub>x</sub>濃度が高くなることが予想される。さらに、風向の影響で、大気中のNO<sub>x</sub>は南側へ拡散しやすいと思われる。図-16の結果はこれらの推測を裏付ける結果となっている。

以上の結果より、航空機の離着陸方向、ならびに風向による拡散の影響が把握できる結果が得られた。

また、図-15(4)は空港外で計測された各サイクルごとのNO<sub>x</sub>濃度を積み上げて表しているが、空港内の測定結果と比べて、いずれも比較的高濃度となっている。特に空港の駐車場、および石垣港では濃度が高い。空港駐車場では、乗用車が常時低速で多数往来している。前述の表-3によると、乗用車の場合、低速時の方が単位距離あたりのNO<sub>x</sub>排出量が多い結果となっており、また測定点を駐車場の植生地としたために、車両と測定点が近接していることが原因と考えられる。また、図-15(4)の結果うち、最もNO<sub>x</sub>濃度が高いのは、石垣港の棧橋に設置したものの(O-10)の1サイクル目である。その測定値0.061ppmは、滑走路周辺と比較してもかなり高濃度であると言える。石垣港では、離島航路が多く開かれており、1日あたり200隻程度の船舶の往来がある。したがって、これらの船舶から排出されるNO<sub>x</sub>が計測されたものと思われる。

### (3) 二酸化窒素濃度の測定結果

図-17(1)～(4)にNO<sub>2</sub>濃度の測定結果を示す。

これらの図より、空港内で測定されたNO<sub>2</sub>濃度自体は比較的小さいことがわかる。1サイクル目では、エプロン南西側における0.008ppm(A-3)が最大で、滑走路周辺では滑走路北西側の0.004ppm(R-65, R-76, R-81, R-83)が最大である。同様に、2サイクル目は滑走路およびエプロンの複数箇所(R-5, A-7, A-8, A-10)で0.005ppmが最大、3サイクル目は滑走路の04側両脇(R-5, R-9, R-27, R-31)で0.003ppmが最大となっている。その最大量の分布に関して規則性は全く認められず、4.1で触れたように、水に溶解しやすいNO<sub>2</sub>が雨水に溶解したことも考えられる。また、3サイクル目の測定結果は、NO<sub>x</sub>の値と全く同値である。つまり、測定されたNO<sub>x</sub>は、100%がNO<sub>2</sub>によるものであったこととなる。この理由については、デー

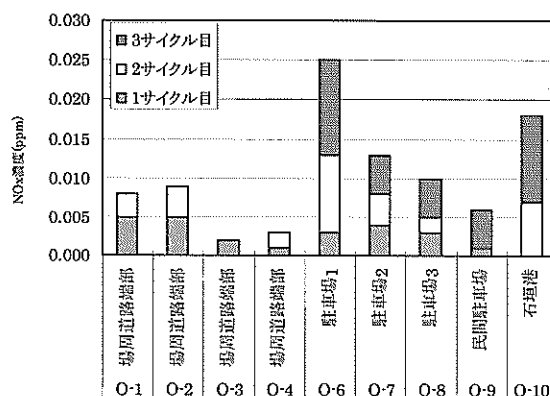


図-17(4) 空港外での二酸化窒素濃度測定結果

タが不充分であり、本文中で説明することは困難である。

また、図-17(4)に示した空港外の結果は、空港内駐車場1(O-6)および石垣港(O-10)において他よりも高いNO<sub>2</sub>濃度を示す結果となり、図-15(4)のNO<sub>x</sub>の場合と同様であった。

## 4.2 2回目の測定結果

### (1) 気象条件、運用条件

表-8に、2回目の測定期間中における気象データをまとめたものを示す。表-8から、2サイクル目に若干の降雨が見られるが、1回目測定時のようにエアサンプラーの多孔栓が雨水で塞がれた形跡はなかった。1サイクル目、3サイクル目では降水量が0であり、降雨の影響はないものと思われる。

また、期間中の気温はおおよそ27℃程度、1日平均気温の差は最大で1℃程度であり、大きな変動は見られない。風速に関しては、1日平均が3.5～4.4m/sとなっているが、運用中の平均は3.9～5.3m/sであり、日中風が強い状態であったことがわかる。さらに、図-18に測定期間中の風配図を示したが、同図より、測定期間中はほとんど北北西～北東の風向きで変動は少なく、1回目の測定を行った時と同様である。

表-9は2回目の測定期間中における石垣空港の運用状況である。2回目の測定時も1回目同様、1日あたり36機程

表-8 2回目測定期間中の気象データ

項目	単位	1サイクル目	2サイクル目	3サイクル目
気温(運用中平均)	(℃)	28.1	26.4	28.0
気温(1日平均)	(℃)	27.0	25.9	26.5
降水量	(mm)	0.0	1.0	0.0
風速(運用中平均)	(m/s)	5.3	3.9	5.0
風速(1日平均)	(m/s)	4.4	3.5	4.0
日射量	(kJ)	19.5	6.6	20.5

度の離陸および着陸があり、運用時間は約12時間強である。

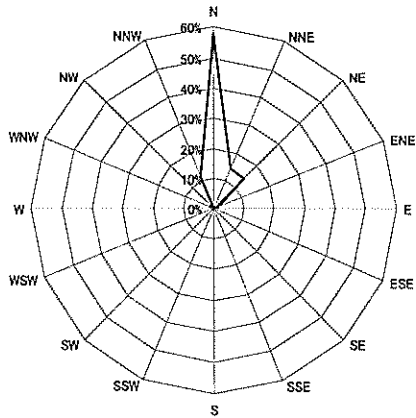


図-18 2回目測定期間中の風配図

また、航空機がエプロン上に停留している時間は平均で46分程度、運用時間中の平均停留機数は1.9機程度となっている。

(2) 窒素酸化物濃度の測定結果

図-19(1)～(4)にNO<sub>x</sub>濃度の測定結果を示し、表-A.2(1)～(3)に全ての測定結果のデータを示す。なお、

表-9 2回目測定時の石垣空港の運用状況

項目	単位	1サイクル目	2サイクル目	3サイクル目
離陸数	(機)	37	35	35
着陸数	(機)	34	36	39
平均停留時間	(分)	43.4	46.5	47.9
運用時間	(時間)	12.0	12.1	12.3
停留数平均	(機)	1.80	1.86	2.02

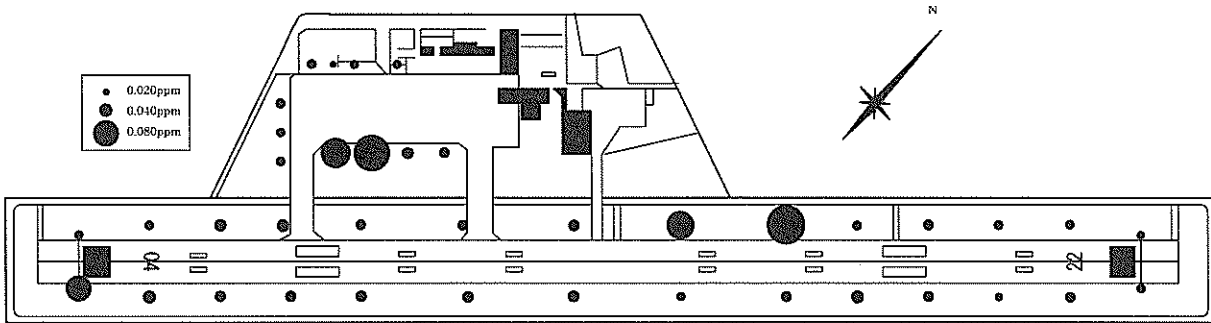


図-19(1) 滑走路およびエプロン周辺の窒素酸化物濃度測定結果 (2回目, 1サイクル目)

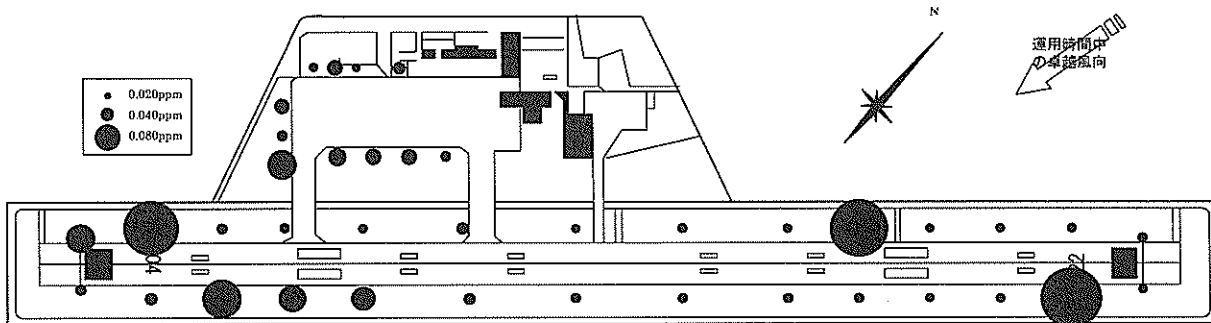


図-19(2) 滑走路およびエプロン周辺の窒素酸化物濃度測定結果 (2回目, 2サイクル目)

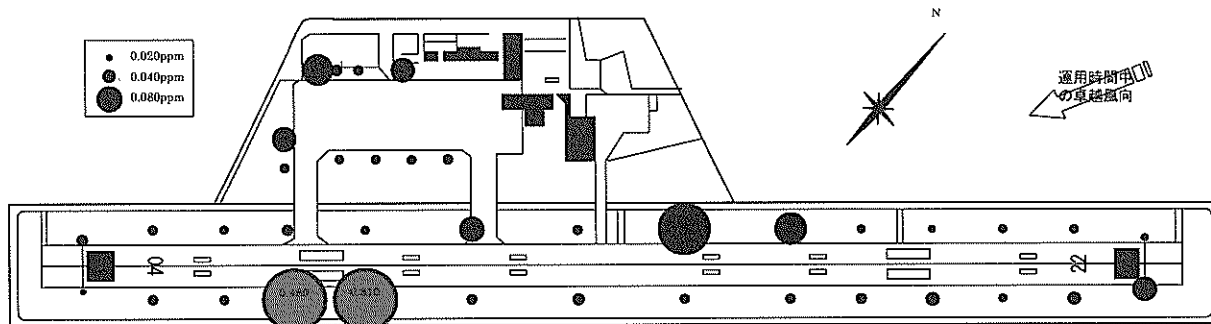


図-19(3) 滑走路およびエプロン周辺の窒素酸化物濃度測定結果 (2回目, 3サイクル目)



表-A.2(1)～(3)には、NO<sub>2</sub>のデータおよびNO<sub>x</sub>、NO<sub>2</sub>のデータから算出されるNOの計算値も併記している。

これらの図-19(1)～(3)から、部分的にNO<sub>x</sub>濃度が極めて高濃度になっている箇所が見うけられる。これらを以下に列記すると、1サイクル目の滑走路およびエプロン周辺のNO<sub>x</sub>濃度のうち、滑走路南東側 (R-1) が0.080ppm、滑走路北西側 (R-22, R-23) が0.086ppm, 0.120ppm, エプロン東側 (A-4, A-5) が0.093ppm, 0.113ppmとなっている。同様に2サイクル目では滑走路南東側 (R-3, R-4, R-5) で0.123ppm, 0.086ppm, 0.074ppm, 滑走路南西側 (R-15, R-16) で0.090ppm, 0.173ppm, 滑走路北東側 (R-13) で0.192ppm, 滑走路北西側 (R-24) で0.182ppm, エプロン南西部 (A-1) で0.091ppmである。3サイクル目は滑走路南東部 (R-4, R-5) で0.480ppm, 0.810ppm, 滑走路西部 (R-20) で0.079ppm, 滑走路北西部 (R-22, R-23) で0.165ppm, 0.101ppm, 滑走路北東部 (R-14) で0.077ppm, エプロン南西部 (A-2) で0.076ppm, エプロン北西部 (A-8, A-11) で0.095ppm, 0.074ppmである。これら高濃度部は、ある傾向を持って配置していると思われる。すなわち、滑走路04側の南側、滑走路22側端部から約500mの地点の北西側、エプロン周辺の風下である。これらの地点が高濃度域となった理由について、図-20に図示すると共に、以下に記述する。2回目の測定期間中の風向きはほぼ北風であり、航空機の離着陸は04側から22側に向けて離陸し、同じく04側から22側に向けて着陸する。したがって、04側の南側で高濃度となった理由については、離陸時に低速かつエンジン出力が最大となることによって、大量のNO<sub>x</sub>が排出され、さらに風によって南側に拡散したものと考えられる。また、滑走路22側端部から約500mの地点の北西側に関して

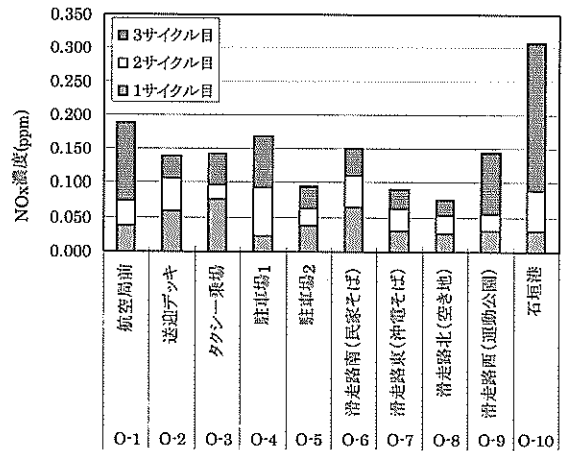


図-19(4) 空港外の窒素酸化物濃度測定結果

は、着陸した航空機がこの付近でUターンしてエプロンに向かう際、エアサンプラーが設置された箇所が直接排気を受けた可能性がある。これは、滑走路04側のエプロン入り口付近の南東側にも当てはまる。さらに、エプロン周辺については、停留中の航空機から排出された、比較的低濃度ではあるが連続的な排気が風の影響を受けて風下に拡散したものと考えられる。

なお、これらの高濃度箇所を除く箇所のNO<sub>x</sub>濃度平均値は、1サイクル目が滑走路周辺で0.032ppm、エプロン周辺で0.029ppm、2サイクル目が滑走路周辺で0.032ppm、エプロン周辺で0.040ppm、3サイクル目が滑走路周辺で0.031ppm、エプロン周辺で0.031ppmとなり、おおよそ0.030ppm程度の値となっている。この値は、1回目の計測結果と比較すると、かなり高い値であると言える。この点については、4.3において説明を加える。

図-19(4)に示した空港外でのNO<sub>x</sub>濃度について見てみ

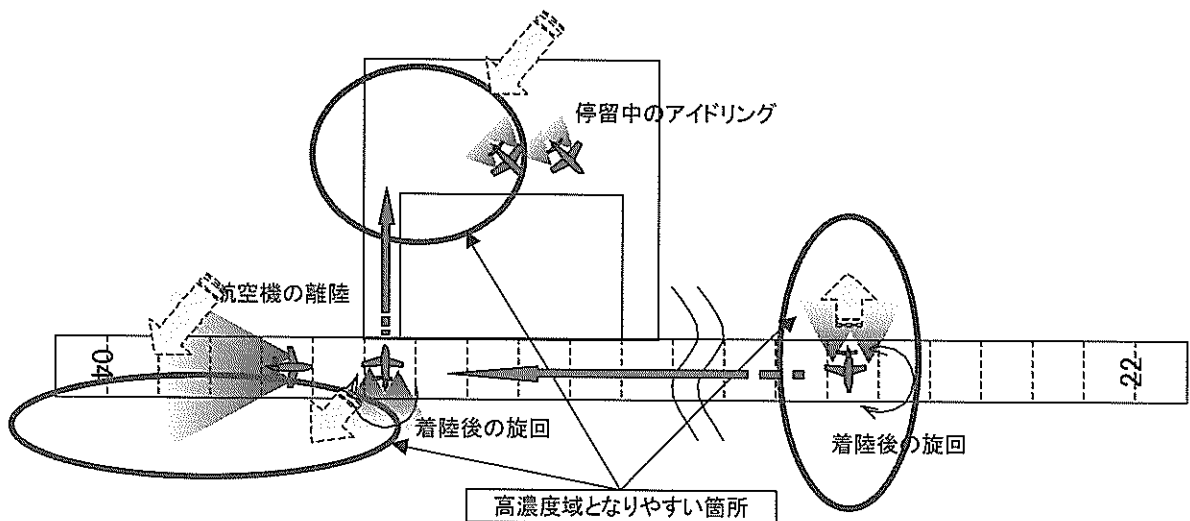


図-20 滑走路およびエプロン周辺における窒素酸化物高濃度域の推察

ると、大阪航空局前（O-1）の3サイクル目、送迎デッキ（O-2）の1～2サイクル目、空港駐車場1（O-3）の2～3サイクル目、滑走路南側（O-6）の1サイクル目、滑走路西側（O-9）の3サイクル目、石垣港（O-10）の2～3サイクル目が比較的高濃度となっているが、その他の箇所を平均すると0.0031ppmであり、ほぼ滑走路周辺のNO<sub>x</sub>濃度平均値と一致する。このことから、この数値を好天時の石垣空港周辺における環境大気NO<sub>x</sub>濃度と考えることができるものと思われる。なお、後述するが、石垣島の環境大気測定局の調べたNO<sub>x</sub>濃度はおよそ0.010ppm程度であり、空港周辺ではNO<sub>x</sub>濃度が全体的に上昇している可能性もある。なお、1回目の測定において、空港内外合わせて最もNO<sub>x</sub>濃度の高かった石垣港では、3サイクル

目のNO<sub>x</sub>濃度が0.221ppmという高濃度となっており、やはり船舶からの排気の影響が強いことを示唆している。

(2) 二酸化窒素の測定結果

図-21(1)～(4)にNO<sub>2</sub>濃度の測定結果を示す。

これらの図より、空港内で測定されたNO<sub>2</sub>濃度自体は比較的小さいことがわかる。1サイクル目では、滑走路周辺では滑走路南東側（R-1）の0.005ppmが最大で、エプロン周辺ではエプロン東側（A-6）の0.005ppmが最大である。同様に、2サイクル目も滑走路周辺では滑走路南東側（R-1）の0.005ppm、エプロン南東部（A-1）の0.006ppmが最大、3サイクル目は滑走路南東側（R-3、R-4）の0.010ppm、エプロン周辺ではエプロン西側（A-11）の0.009ppmが最大となっている。その最大量の分布は、ほ

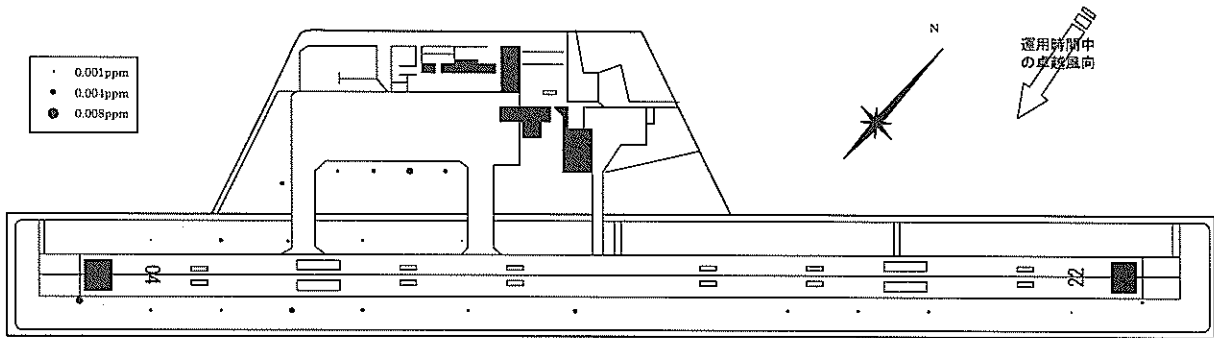


図-21(1) 滑走路およびエプロン周辺の二酸化窒素濃度測定結果（2回目、1サイクル目）

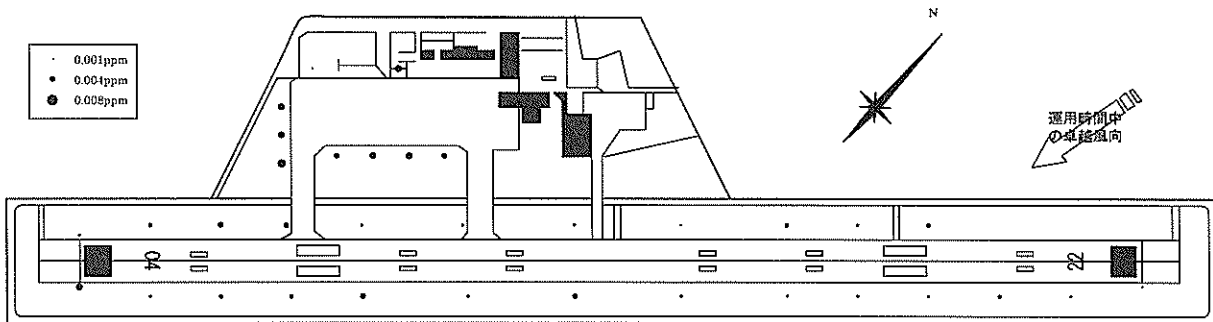


図-21(2) 滑走路およびエプロン周辺の二酸化窒素濃度測定結果（2回目、2サイクル目）

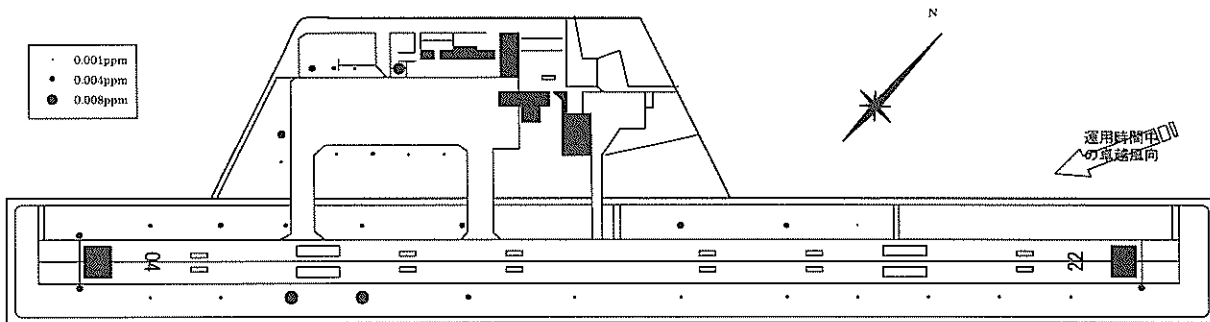


図-21(3) 滑走路およびエプロン周辺の二酸化窒素濃度測定結果（2回目、3サイクル目）

ばNO<sub>x</sub>濃度の分布に近く、図-20に示したように航空機の挙動との関連が強いものと思われる。

また、2.5において前述の東京国際空港の結果では、全ての箇所においてNO<sub>2</sub>の割合が20%を超えているが、今回の測定におけるNO<sub>2</sub>の割合はいずれもNO<sub>x</sub>濃度に比べると極めて小さく、NO<sub>x</sub>濃度に対するNO<sub>2</sub>濃度の割合は、おおよそ4%程度となっている。これに関し、燃焼発生源から排出された直後のNO<sub>x</sub>に対するNO<sub>2</sub>の割合は、通常5～10%程度であり<sup>8)</sup>、この下限値とほぼ等しい数値となっている。一方、我が国におけるNOのNO<sub>2</sub>への酸化率は70%と言われている。これは、排出されたNOが、時間の経過に伴い、オゾン、有機化合物などとの光化学反応によってNO<sub>2</sub>に酸化されることを意味しており、今回の測定において、空港内でのNO<sub>x</sub>は、排出後された後NOからNO<sub>2</sub>への酸化が起こる前に、極短時間のうちに拡散、吸収されたことが伺える。しかし、空港内から発生したNO<sub>x</sub>は大気中を拡散しながらNO<sub>2</sub>に酸化されることが自明であり、測定結果ではNO<sub>2</sub>濃度は小さかったものの、空港がNO<sub>2</sub>の大きな排出源となっている可能性は否定できない。

また、図-21(4)に示した空港外での測定結果から、最もNO<sub>2</sub>濃度が高くなったのは、石垣港(O-10)であり、その3サイクルの平均値は0.011ppmである。これは空港内の全ての測点、全てのサイクルでの最大値を上回っており、やはり船舶からの排気による影響が大きいことを表している。

#### 4.3 1回目および2回目の測定時における降雨の影響

前述のように、1回目の計測結果から、エプロンおよび滑走路周辺でのNO<sub>x</sub>濃度は、1サイクル目と2サイクル目がいずれも平均値でおおよそ0.01ppmであり、2回目の計測では3サイクルとも0.03ppm程度となっている。この原因に関して、降雨の影響、ならびに植生の状態が異なることが挙げられる。特に、若干ではあるが降雨のあった2サイクル目とそれ以外のサイクルを比較して、その差が顕著ではないため、植生の影響、つまり植生が刈り取られたことによって、航空機からの排気がエアサンプラーに直接触れやすい状態にあったことが主たる要因であると推察される。植生の有無は、航空機から排出されるNO<sub>x</sub>濃度そのものに影響をあたえることはない。しかし、排出されたNO<sub>x</sub>は植生によって物理的に遮蔽される可能性が考えられ、植生のない2回目の計測値の方が1回目の計測値よりも実態に近い値を得ているものと思われる。

#### 4.4 空港内における瞬間的高濃度の推定

ここまで示した石垣空港でのNO<sub>x</sub>およびNO<sub>2</sub>濃度に

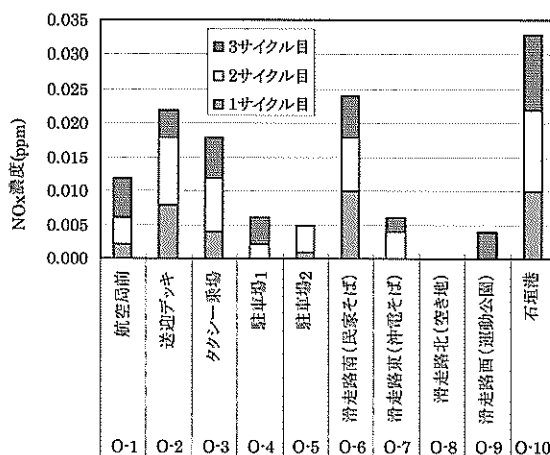


図-21(4) 空港外の二酸化窒素測定結果

関し、これらは所定箇所に設置したエアサンプラーに吸収された24時間の平均値である。すなわち、これらの値は空港の運用時間だけでなく、運用時間外のものも含まれている。したがって、特にエプロン周辺、滑走路周辺では、空港の運用時間内、もしくは航空機の通過時に、計測値よりも瞬間的に高濃度となる可能性がある。その概念を図-22(1)～(3)に示し、以下にその個々について検討を加える。

##### (1) 排出源から離れた箇所での窒素酸化物濃度

まず、排出源から離れた箇所では、図-22(1)に示すように計測されるNO<sub>x</sub>量は常に同じと考える。実際には人間の活動時間と関連する可能性もあるが、計測されるNO<sub>x</sub>は遠く離れた排出源から拡散してきたものであり、時間による変化はごく小さいと見なせる。

ここで、石垣一般環境大気測定局から得た、環境大気中のNO<sub>x</sub>濃度についての測定結果を図-23に示した。同図には2001年までのデータしか示されていないが、このデータを基に、本報告においては環境大気中のNO<sub>x</sub>濃度C<sub>at</sub>(ppm)を0.010ppmと定める。

##### (2) エプロン周辺での窒素酸化物濃度

また、前述のように石垣空港において航空機がエプロン上に待機している時間がほぼ12時間であり、その間平均して2機程度の航空機がアイドル状態にあるため、エプロン周辺では図-22(2)に示すように運用時間中のみにNO<sub>x</sub>の排出が起こり、運用時間外では一般大気濃度と等しいものと想定できる。このように考えた場合、計測されたNO<sub>x</sub>平均値は、以下の式(1)のように表される。

$$C_{me} = \frac{C_{at} \times 24 + C_{ex} \times 12}{24} \quad (1)$$

ここで、 $C_{me}$ ：計測されたNO<sub>x</sub>濃度平均値 (ppm)、 $C_{ex}$ ：航空機がアイドル状態にある場合のNO<sub>x</sub>濃度と環境大気中のNO<sub>x</sub>濃度の差(ppm)、であり、さらに、図-22 (2)より、運用中のエプロン周辺のNO<sub>x</sub>濃度は、環境大気中のNO<sub>x</sub>濃度と航空機から排出されるNO<sub>x</sub>濃度の和であり、以下の式(2)であらわされる。

$$C_{op} = C_{at} + C_{ex} \quad (2)$$

ここで、 $C_{op}$ ：運用中のエプロン周辺のNO<sub>x</sub>濃度、である。したがって、式(1)、式(2)より、運用中のエプロン周辺のNO<sub>x</sub>濃度について整理すると、以下の式(3)を得る。

$$C_{op} = 2C_{me} - C_{at} \quad (3)$$

表-10に式(3)を用いて計算した、運用時間内に高濃度となるエプロン周辺での窒素酸化物濃度を示した。同表より、1回目の計測では2サイクル目のA-9を最大として、平均0.020ppm程度のNO<sub>x</sub>濃度となる。一方2回目では、1サイクル目のA-5における0.216ppmを最高に、いずれのサイクルも平均して0.080ppm程度のNO<sub>x</sub>濃度となっていることがわかる。

### (3)滑走路周辺での窒素酸化物濃度

さらに、滑走路周辺について検討してみると、前述の表-7、表-9に示したように、滑走路では航空機の離陸、着陸はそれぞれ平均40数分おきに発生する。ここでは特に、離陸時における滑走路周辺の高濃度域について考えることとし、その検討に用いた条件、仮定等を以下に整理する。

①滑走路周辺では図-22 (3)に示すように、運用時間内に断続的に航空機の離陸に伴うNO<sub>x</sub>の排出が起こる。その際のNO<sub>x</sub>濃度は、瞬間的ではあるが非常に高濃度のピークを示すと考える。一方、運用時間外ではエプロンと同様に環境大気濃度と同程度と考える。

②航空機は滑走路をある一定の加速度で加速し、時速300km/hで離陸する。その際、滑走路距離は石垣空港からの聞き取り調査に従い、800mとした。これによって、航空機の加速度は4.34m/s<sup>2</sup>と算出される。

③航空機から排出される排気は、文献6)を参考に、航空機からの距離と排出される排気の種類が反比例するものと仮定し、さらにその係数は同文献からの読み取り値で1500m<sup>2</sup>/sとした。

④航空機からの排気は、簡略のため、航空機の最後部中心位置から450m/sで排出され、速度が一定であれば半筒状に直進するものと仮定した。しかし、③で仮定した

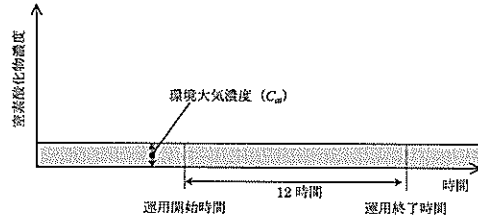


図-22 (1) 排出源から離れた箇所での窒素酸化物濃度

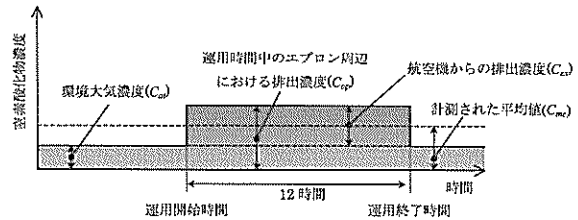


図-22 (2) エプロン周辺での窒素酸化物濃度の推移

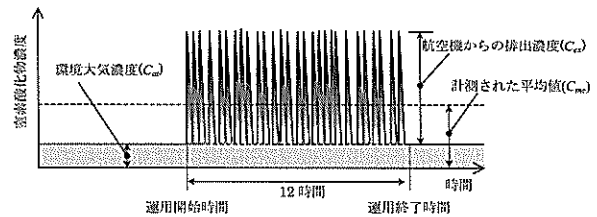


図-22 (3) 滑走路周辺での窒素酸化物濃度の推移

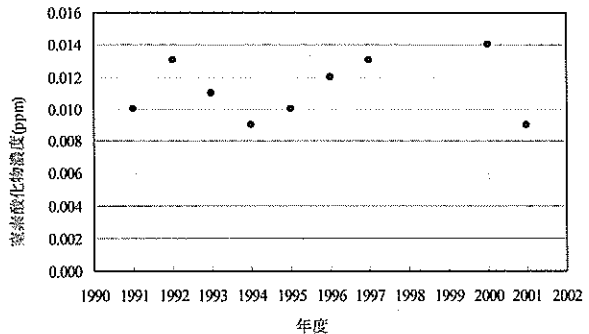


図-23 石垣地方の環境大気中の窒素酸化物濃度

表-10 エプロン周辺での高濃度時の窒素酸化物濃度

測点	1回目のNO <sub>x</sub> 濃度(ppm)		2回目のNO <sub>x</sub> 濃度(ppm)		
	1サイクル目	2サイクル目	1サイクル目	2サイクル目	3サイクル目
A-1	-	-	0.044	0.172	0.050
A-2	-	-	0.046	0.056	0.142
A-3	0.016	0.016	0.050	0.082	-
A-4	-	0.024	0.176	0.100	0.046
A-5	0.006	0.022	0.216	0.088	0.050
A-6	0.034	0.008	0.062	0.086	0.050
A-7	0.016	0.020	0.056	0.054	0.054
A-8	0.012	0.030	0.050	0.046	0.180
A-9	0.010	0.040	0.032	0.086	0.060
A-10	0.024	0.026	0.044	0.042	0.052
A-11	-	-	0.044	0.066	0.138
平均	0.017	0.023	0.075	0.080	0.082

ように、排気の種類は距離が大きくなるほど遅くなるた

め、筒の断面が徐々に広がることになる。このとき、同一断面の風速は全て同じと考えた。

⑤排気は図-24に示すように自然風の影響を受け、排気速度ベクトルと自然風の速度ベクトルの和で表されるものとした。これによって、滑走路中心から数十m離れた位置のエアサンプラーに排気が到達することとなる。

⑥エアサンプラーにおけるNO<sub>x</sub>の吸収・拡散が極めて短時間に起こるものと仮定し、あるNO<sub>x</sub>濃度を持つ空気にエアサンプラーが晒された時、そのNO<sub>x</sub>吸収量は排気速度に比例するものと考えた。さらに、滑走路開始後のエンジン出力が一定であるならば、航空機の速度が遅いほど、単位距離を移動するための所要時間が長くなり、その分排出量も多くなることから、NO<sub>x</sub>濃度は排出時の航空機速度に反比例するものと考えた。

これらの仮定から、滑走路周辺におけるエアサンプラーのNO<sub>x</sub>吸収量を相対比較する指標（以降、本文ではNO<sub>x</sub>吸収指標と称する）を算出した。詳細は割愛するが、以下にその基本的な算出手順を記す。

(a)航空機が停止しており自然風の影響がない時の排気に関する検討

まず、航空機が停止しており、風の影響がない場合について考える。③の仮定より、航空機最後部からの滑走路方向の距離と排気風速の関係は、以下の(4)式で表される。

$$v = \frac{1500}{L} \quad (4)$$

ここで、 $v$ は排気風速(m/s)、 $L$ は航空機最後部からの排気の滑走路方向距離(m)、 $v_{ex}$ は排気風速(m/s)である。また、排気速度 $v$ を、排気が距離 $L$ に到達する時間 $t$ を用いて表すと、

$$v = \frac{dL}{dt} \quad (5)$$

であり、式(4)、式(5)より $L$ 、 $v$ は以下の式(6)、式(7)で表される。

$$L = \sqrt{3000t} \quad (6)$$

$$v = \frac{1500}{\sqrt{3000t}} \quad (7)$$

したがって、排気が排出されてから経過したある時間 $t_{ex}$

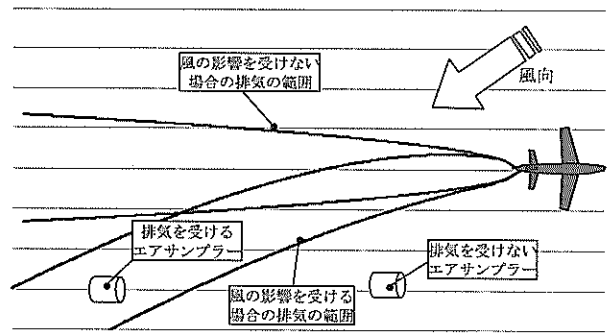


図-24 排気に対する風の影響

における排気の距離 $L_{ex}$ と排気速度は $v_{ex}$ は、以下の式(8)、(9)で表される。

$$L_{ex} = \sqrt{3000t_{ex}} \quad (8)$$

$$v_{ex} = \frac{1500}{\sqrt{3000t_{ex}}} \quad (9)$$

また、④の仮定より、単位距離あたりの排気の半円状となる断面積は、以下の式(10)のようになる。

$$A_{ex} = \frac{2V}{v_{ex}} = \frac{V\sqrt{3000t_{ex}}}{750} \quad (10)$$

ここで、 $A_{ex}$ は排気の断面積(m<sup>2</sup>)、 $V$ は単位時間あたりに航空機が排出する排気量(m<sup>3</sup>/s)である。したがって、排気の半径 $R_{ex}$ (m)は、

$$R_{ex} = \sqrt{\frac{A_{ex}}{\pi}} = \sqrt{\frac{V\sqrt{3000t_{ex}}}{750\pi}} \quad (11)$$

で表される。

(b)排気に対する自然風の影響

⑤の仮定より、排気は風の影響を受ける。このとき、滑走路に水平な方向の排気距離は式(8)を用いて、以下の式(12)で表される。

$$L_H = L_{ex} + t_{ex}v_w \cos\theta = \sqrt{3000t_{ex}} + t_{ex}v_w \cos\theta \quad (12)$$

ここで、 $L_H$ は滑走路に水平な方向の排気到達距離(m)、 $v_w$ は自然風の風速(m/s)、 $\theta$ は自然風の風向が滑走路水平方向に対してなす角度(°)である。また、風によって排気の流される方向を正とすると、排気範囲の両端における滑走路中心からの距離は、以下の式(13)で表される。



$$L_V = t_{ex} v_w \sin \theta \pm R_{ex} = t_{ex} v_w \sin \theta \pm \sqrt{\frac{V \sqrt{3000} t_{ex}}{750\pi}} \quad (13)$$

ここで、 $L_V$ は排気範囲の両端の滑走路中心からの距離(m)である。

(c)航空機が移動するときの排気に関する検討

式(13)において、 $L_V$ に滑走路中心からのエアサンプラーの距離を代入し、その時の $t_{ex}$ を求める。さらに、この $t_{ex}$ を式(12)に代入することで、エアサンプラーから航空機までの滑走路方向の距離が算出される。なお、このとき $t_{ex}$ は2つの解を持ち、小さい値の方を $t_{ex1}$ 、大きい方の値を $t_{ex2}$ とすると、 $t_{ex1}$ がエアサンプラーに排気範囲が到達する時間、 $t_{ex2}$ が排気範囲が通りすぎる時間となる。

次に、滑走路端から航空機が発進するとき、滑走路端からの航空機の距離は、②の仮定にしたがって、以下の式(14)で表される。

$$L_{ap} = \frac{1}{2} a t_{ap}^2 \quad (14)$$

ここで、 $L_{ap}$ は滑走路端からの航空機の距離(m)、 $a$ は航空機の加速度(4.34m/s<sup>2</sup>)、 $t_{ap}$ は航空機発進からの経過時間(s)である。したがって、航空機から排出された排気がエアサンプラーに影響を及ぼすためには、航空機は少なくとも、

$$L_{ap} = L_{as} + L_H \quad (15)$$

だけ移動している必要がある。ここで、 $L_{as}$ はエアサンプラーの滑走路端からの水平距離(m)である。なお、このとき式(15)において $L_H$ は2つの値を持つ。それぞれの $L_H$ は、そこから排気が排出された場合、エアサンプラーがその排気範囲に入り始める、もしくは排気範囲から外れる点を示している。

この式(14)、式(15)より航空機の移動時間 $t_{ap}$ が算出できる。式(15)で $L_{ap}$ が2つの値を持つため、 $t_{ap}$ の値も2つとなり、小さい値を $t_{ap1}$ 、大きい値を $t_{ap2}$ とすると、 $t_{ap1}$ はそこから排気が排出された場合にエアサンプラーが排気範囲に入り始める位置に航空機が到達する時間、同様に $t_{ap2}$ はそこから排気が排出された場合にエアサンプラーが排気範囲から外れる位置に航空機が到達する時間を表す。

また、このときの航空機の速度は、式(16)に示すとおりである。

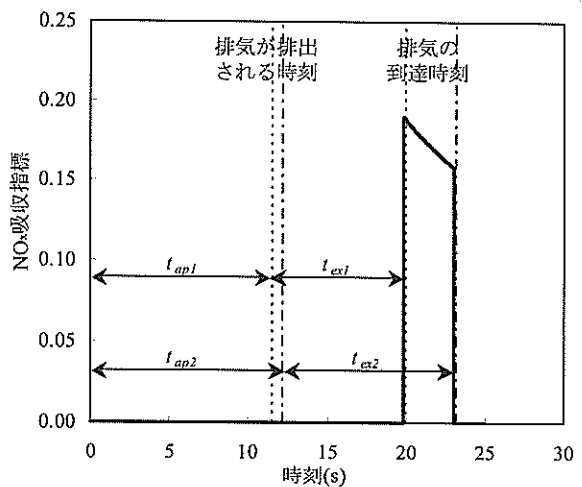


図-25 設定したNO<sub>x</sub>吸収指標と時間の関係

$$v_{ap} = a t_{ap} \quad (16)$$

ここで、 $v_{ap}$ は航空機の速度(m/s)を表す。

以上の内容から、エアサンプラーが排気の影響を受け始める時間は $t_{ap1} + t_{ex1}$ 、排気の影響から外れる時間は $t_{ap2} + t_{ex2}$ となり、この範囲においてエアサンプラーは排気に晒されることになる。

(d)NO<sub>x</sub>吸収指標の算出

前述の仮定⑥から、NO<sub>x</sub>の吸収量は排気速度に比例し、航空機速度に反比例するものとした。したがって、このNO<sub>x</sub>吸収量を相対比較する指標であるNO<sub>x</sub>吸収指標は、式(9)および式(16)から以下の式(17)で表され、また航空機の滑走路開始からの時間は式(18)で表される。

$$E(t) = \frac{v_{ex}}{v_{ap}} = \frac{1500}{a t_{ap} \sqrt{3000} t_{ex}} \quad (17)$$

$$t = t_{ap} + t_{ex} \quad (18)$$

ここで、 $E(t)$ はNO<sub>x</sub>吸収指標、 $t$ は航空機の滑走路開始からの時間(s)である。このようにして、計算されたNO<sub>x</sub>吸収指標について、 $t_{ap1} + t_{ex1}$ から $t_{ap2} + t_{ex2}$ の範囲において算出した一例を図-25に示す。同図より、NO<sub>x</sub>吸収指標は、排気が到達した時点でピークを示し、その後時間の経過に伴って減少していくことがわかる。

また、航空機から排出され、エアサンプラーで吸収されたNO<sub>x</sub>は、実際にはこのNO<sub>x</sub>吸収指標の総和 $E_s$ と比例するものと思われる。 $E_s$ は以下の式(19)で表される。

$$E_s = \int_{t_{sp1}+t_{ex1}}^{t_{sp2}+t_{ex2}} E(t) dt \quad (19)$$

また、簡便のためこの $E_s$ を $\text{NO}_x$ 吸収指標の最大値とその最大値の持続時間で以下の式(18)のように表した。

$$E_s = E_{max} \times t_{em} \quad (20)$$

ここで、 $E_{max}$ は $\text{NO}_x$ 吸収指標の最大値、 $t_{em}$ は $E_s$ を $E_{max}$ で除し、 $E_{max}$ を維持したと仮定した場合の吸収時間(s)である。

(e)滑走路周辺における瞬間的 $\text{NO}_x$ 高濃度値

さらに、この $\text{NO}_x$ 吸収指標の総和に離陸機数を掛けたものが航空機から排出された $\text{NO}_x$ 濃度の総量と比例すると考えると、瞬間的な滑走路付近での高濃度値は以下の式(21)で表される。

$$C_{ex} = \frac{(C_{me} - C_{at}) \times 24 \times 60 \times 60}{t_{em} \times N} \quad (21)$$

ここで、 $C_{ex}$ は滑走路周辺での航空機からの $\text{NO}_x$ 排出濃度値(ppm)、 $N$ は航空機の離陸数(機)である。

さらに、滑走路周辺で計測される $\text{NO}_x$ の瞬間的高濃度値 $C_{emax}$ は、

$$C_{emax} = C_{at} + C_{ex} \quad (22)$$

このようにして算出した、滑走路周辺での瞬間的 $\text{NO}_x$ 高濃度値を表-11に示す。なお、表-11では主に航空機の離陸に関する $\text{NO}_x$ 濃度情報が得られると思われる、航

空機の離陸開始側(04側)近辺に限り検討している。

同表から、滑走路周辺で測定された $\text{NO}_x$ が、環境大気中の $\text{NO}_x$ および航空機が離陸する際に発生した $\text{NO}_x$ だけに限定されるとすると、瞬間的な値としての $\text{NO}_x$ 濃度は非常に高濃度であることが示唆される。特に降雨、植生の影響の少なかった2回目の測定結果のみについて見てみると、少なくとも3ppm、多い場合で50ppmを超える値が得られている。

参考までに、排気の移動や拡散を一切考慮しない場合の純粋な排気中の $\text{NO}_x$ 濃度について考える。表-1に示した小型ジェットの離陸時の排出係数45.8g/s/機、前述の航空機の排気量450m<sup>3</sup>/sから、航空機1機からの排気1m<sup>3</sup>あたりには約0.1g/m<sup>3</sup>の $\text{NO}_x$ が含まれる。これは約80ppmに該当し、航空機から排出される $\text{NO}_x$ 濃度の最大値を表している。この数値は上記の算定結果とは次元を異にするが、航空機の背後に近い位置では、これに近い $\text{NO}_x$ 濃度となる可能性もある。

ここで、明確な基準は存在しないものの、 $\text{NO}_x$ の人体への影響として20ppmを超えると目などの粘膜に刺激があるとされている。また、 $\text{NO}_2$ について考えてみると、今回の計測結果では $\text{NO}_2$ 濃度の測定値が非常に小さかったため、上記の手法による検討は行わないが、4.2で前述のように、今回の測定の結果から、 $\text{NO}_x$ に対する $\text{NO}_2$ の割合が4%程度と考えると、瞬間的ではあるが、 $\text{NO}_2$ も1ppmを超える可能性がある。2.1において示したとおり、大気汚染防止法では0.06ppm以下、またWHOの基準では、人体への短期指針として、平均最高濃度の0.11ppm以下が挙げられており、滑走路周辺ではこれを大きく上回る危険性を表している。実際に航空機の離陸時に滑走路周辺に人間が立ち入る事はないと思われるが、空港で作業を

表-11 滑走路周辺での瞬間的 $\text{NO}_x$ 高濃度値に関する検討

測点		運用時間中の風速平均値(m/s)	運用時間中の風向-滑走路角度(°)	$\text{NO}_x$ 吸収指標総和 $E_s$	最大 $\text{NO}_x$ 吸収指標 $E_{max}$	$E_{max}$ 維持の時間 $t_{em}$ (s)	測定 $\text{NO}_x$ 濃度 (ppm)	離陸機数 N	瞬間的高濃度値 $C_{emax}$ (ppm)
測定時期 サイクル数	測点								
1回目	1サイクル目	R-1~2平均	6.24	33.57	0.743	0.187	3.985	35	3.11
		R-3~4平均			0.563	0.146	3.868		12.77
	2サイクル目	R-1~2平均	3.92	46.43	0.822	0.171	4.805	35	-
		R-3~4平均			0.626	0.133	4.705		1.57
2回目	1サイクル目	R-1	5.32	55.71	0.853	0.299	2.854	37	57.28
		R-2			0.553	0.190	2.908		24.10
		R-3			0.466	0.163	2.852		19.66
	2サイクル目	R-1	3.89	34.29	1.065	0.177	6.030	35	9.84
		R-2			0.756	0.118	6.383		11.61
		R-3			0.667	0.105	6.334		42.88
	3サイクル目	R-1	4.96	20.71	1.120	0.144	7.793	35	3.18
		R-2			0.817	0.098	8.317		6.54
		R-3			0.734	0.089	8.274		5.98

行う関係者は、この結果に関し十分な配慮を行う必要があるものと思われる。

## 5. 空港内での窒素酸化物濃度低減技術の適用に関する実験的検討

### 5.1 実験の方法

本研究の最終目的は、酸化チタンを用いて空港施設起因の $\text{NO}_x$ 濃度を低減させることにある。空港施設に酸化チタンを導入する方法としては様々考えられるが、その中で最も適用範囲が広く、汎用性のあるものとして、酸化チタン混入塗料の効果について検討を行った。

#### (1)実験対象

実験を行ったのは、東京国際空港と石垣空港の2箇所である。以下にその実験箇所について説明する。

##### ①東京国際空港

東京国際空港では、以前行った測定の結果において、最も高い $\text{NO}_x$ 濃度が観測された空港ターミナルビル内のリムジンバス乗場を選定した。このバス乗場には庇が設けられており、乗客は庇の奥にあるターミナルビル内からバスに乗り込むことになる。さらに、庇の外側に向かってバスが停留するため、排気ガスは庇内部に向かって排出され、また風の流れも少ないと予想されるため、庇の内部の方が $\text{NO}_x$ 濃度が高くなることが予想される。一方の庇の外側はバスの出入り時以外に直接的な排気を受けず、内部から拡散してきたものが主となると予想される。また、比較的風の影響を受けやすく、さらに時間帯によっては日射を受けるため、酸化チタンによる $\text{NO}_x$ 除去が有効に作用する可能性もある。これらを考慮して、東京国際空港ではバス乗場の内部と外部の2箇所で行った。実験を行った日程を以下に示す。

1サイクル目：平成15年8月7日～平成15年8月8日（天候：快晴）

2サイクル目：平成15年8月8日～平成15年8月9日（天候：快晴）

##### ②石垣空港

次に、石垣空港で実験を行ったのは、空港駐車場内に位置するバス乗場付近、および送迎デッキ付近である。空港駐車場は、空港にアクセスする自動車両の影響により、図-15(4)や図-19(4)からもわかるように、空港内部とも遜色ない $\text{NO}_x$ 濃度を示す。同様に送迎デッキにおいても、計測される $\text{NO}_x$ 濃度は決して低いとは言えず、エプロンに駐機している航空機の排気ガス、もしくはエプロンから滑走路に向かってタキシングする航空機の排気を受ける可能性のある場所である。その上、一般の空港

利用客が容易に立ち入ることができる施設の中で、最も航空機に近い場所でもある。実験のスケジュールに関しては、前述の空港内での $\text{NO}_x$ 測定と同じである。

#### (2)実験の手法

以下に試験の方法について説明する。

実験装置は図-26に示すものを用いた。すなわち、長さ500mm、直径100mmの筒状の亚克力パイプを樋状に切断し、その内面に酸化チタン混入塗料を塗布したものと塗布しないものの2つである。その中央部にはエアサンプラーを取り付け、さらに紫外線透過性亚克力板で蓋をした後、所定位置に設置し、空港内の $\text{NO}_x$ 測定同様、24時間ごとにエアサンプラーを交換した。

大気中に含まれる $\text{NO}_x$ は、この半筒状の試験装置の内部を通過し、エアサンプラーに吸収される。その過程で酸化チタン混入塗料を塗布したものでは $\text{NO}_x$ が除去され、塗料を塗布しないものと比較すると吸収される $\text{NO}_x$ 量に変化が生じるという仕組みである。これらの2種類の試験装置は、2つ1組で必ず同じ場所に設置し、極力両者の環境条件に変化が生じないように配慮した。

なお、試験装置の蓋に紫外線透過亚克力板を使用したのは、通常の亚克力板は紫外線を遮断するが、酸化チタンが強い酸化還元反応の活性を示すのが380nmという紫外線領域の光を受けたときであり、紫外線が透過し、酸化チタン混入塗料に到達することが必要となるためである。なお、今回使用した紫外線透過亚克力板は、380nmの紫外線の透過率が約90%程度のものである。

### 5.2 実験の結果

#### (1)東京国際空港での結果

表-12に東京国際空港のリムジンバス乗場における結果を示す。

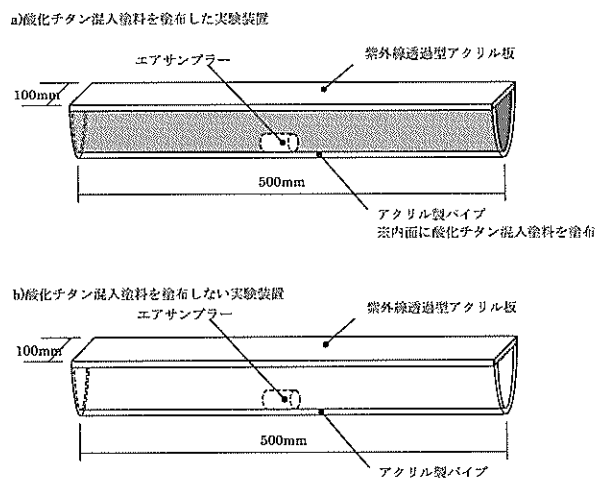


図-26 酸化チタン混入塗料の効果確認用試験装置

まず、表-12より、東京国際空港のリムジンバス乗場では非常に高いNO<sub>x</sub>濃度が検出されている。特にバス乗場の内側では、酸化チタン混入塗料を塗布しない場合に0.590~0.670ppmという値になっており、平成12年に行った測定結果よりも50%程度大きな値である。バス乗場の外側では、おおよそ0.350ppm程度の値となっており、内部よりは小さいものの、依然高濃度であるといえる。なお、東京国際空港近隣の一般環境大気測定局（品川、目黒、大田）のNO<sub>x</sub>濃度は、おおよそ0.047~0.064ppmであり、これらと比較して、バス乗場内部では10倍強、外部でも5倍強の高濃度となっていることになる。

また、酸化チタンの効果について見てみると、酸化チタン混入塗料を使用した箇所では、1.7%から11.9%、平均して8.2%のNO<sub>x</sub>低減効果が確認される。2サイクル2測点の結果からは、いずれも酸化チタン混入塗料を使用したものでのNO<sub>x</sub>低減効果が確認された。

#### (2)石垣空港での結果

表-13に石垣空港の駐車場内バス乗場と送迎デッキでの実験結果を示す。まず駐車場内バス乗場の結果に注目してみると、バス乗場では酸化チタン混入塗料なしの場合で0.038~0.088ppmのNO<sub>x</sub>濃度が観測されている。これは、滑走路近辺やエプロン周辺と比較しても決して小さな値ではなく、図-15(4)および図-19(4)のタクシー乗場や駐車場の値よりも若干多い。これは、アイドル状態のバスがほぼ常時付近に停車していることが原因と考えられる。また、送迎デッキにおいても酸化チタン混入塗料なしの場合で0.038~0.050ppmとなっており、これも滑走路やエプロン周辺の高濃度域以外の平均値と同等以上である。

酸化チタン混入の効果について見てみると、バス停付近の3サイクル目において、酸化チタン混入塗料ありの方がなしの方よりもNO<sub>x</sub>濃度が高くなっているが、その他では酸化チタン混入塗料ありの方が9.1%~29.5%、平均して14.8%のNO<sub>x</sub>が低減されている結果となった。

以上より、東京国際空港ならびに石垣空港での酸化チタン混入塗料を用いた実験では、通算10回の測定のうち9回での実験結果で酸化チタンによってNO<sub>x</sub>が低減されていた。今回の実験の範囲ではデータのばらつき等について考慮していないため、明確にNO<sub>x</sub>低減効果があると断言はできないが、仮にデータのばらつきのみで10回中9回がNO<sub>x</sub>低減側の結果を出す確率は0.2%以下であり、概ね酸化チタン混入塗料のNO<sub>x</sub>低減効果が確認できたと考えて差し支えないものと思われる。ただし、より明確に判断を加えるためには、今後さらにデータを集積していく必要がある。

表-12 東京国際空港における実験結果

日付	測定結果(ppm)					
	リムジンバス乗場内側			リムジンバス乗場外側		
	塗料なし	塗料あり	低減効率	塗料なし	塗料あり	低減効率
1サイクル目	0.590	0.580	1.7%	0.340	0.300	11.8%
2サイクル目	0.670	0.590	11.9%	0.350	0.320	8.6%

表-13 石垣空港における実験結果

日付	測定結果(ppm)					
	駐車場内バス乗場付近			送迎デッキ		
	塗料なし	塗料あり	低減効率	塗料なし	塗料あり	低減効率
1サイクル目	0.071	0.060	15.5%	0.050	0.045	10.0%
2サイクル目	0.088	0.080	9.1%	0.044	0.031	29.5%
3サイクル目	0.038	0.050	-31.6%	0.038	0.032	15.8%

### 5.3 空港内における窒素酸化物低減技術の適用法に関する考察

5.2において、酸化チタン混入塗料のNO<sub>x</sub>低減効果について、酸化チタンはNO<sub>x</sub>低減効果があり、その低減効果は、今回試みた方法では10%程度であった。現時点で10%という数値が実用的に満足のいくものであるとは考えられず、ここではその低減効率増大の方法について考察してみる。

今回の実験においては、半筒状の試験装置内面に酸化チタン混入塗料を塗布し、そこを通過する空気中のNO<sub>x</sub>を除去する方法を採用している。この場合、2次元的な酸化チタン面に対し、空気は3次元的に存在しているため、その接触効率が問題となる。試験装置の酸化チタン面の面積は785cm<sup>2</sup>、空気の容積は7850cm<sup>3</sup>であるが、試験装置内を並行に空気が移動した場合、酸化チタン面に接触しないまま通過するNO<sub>x</sub>も多いものと考えられる。

しかし実際問題上、構造物などの固定された施設に酸化チタンを施しても、その接触効率はさらに小さくなるものと考えられ、そのためにNO<sub>x</sub>低減効率も小さくなる。したがって、酸化チタン面に対する接触効率を可能な限り上昇させる、もしくは3次元的に酸化チタンを機能させる必要がある。その方法としては、

①例えばバス乗場などでは、周辺の施設に酸化チタンを施すと共に、排出源の極近傍に吸引装置を設け、吸引された排気ガスをそのまま他の箇所に排出せず、酸化チタンを使用したNO<sub>x</sub>低減装置を経由させた後、排出する。

②同様に、駐機中の航空機に対しては、移動式のNO<sub>x</sub>除去装置をエンジン付近に設置し、排出と同時にNO<sub>x</sub>を除去できるようにする。

③空港施設内のサービス車両に酸化チタンを施し、車両の移動に伴い、3次元的に大気と接触し、NO<sub>x</sub>を除去させる。

などが考えられる。

また、2.4で記したように、酸化チタンは触媒作用によりNO<sub>x</sub>を除去する。この場合、酸化チタンの触媒機能が飽和状態に達するまでは、その触媒作用はNO<sub>x</sub>濃度に比例するものと考えられる。したがって、NO<sub>x</sub>濃度が高い箇所において酸化チタンを適用することが、NO<sub>x</sub>除去効果を高めることに繋がるものと思われる。すなわち、

④エプロン、滑走路の舗装に酸化チタンを混入させ、排出されたNO<sub>x</sub>を高濃度のうちに処理し、絶対量を低減させる。

という方法も考えられる。

## 6. まとめ

本研究では、石垣空港における空港内外の窒素酸化物濃度測定、ならびに東京国際空港および石垣空港において、酸化チタン混入塗料を用いた窒素酸化物濃度低減に関する実験を行った。その結果、以下の知見を得た。

1) 空港内においては、航空機からの排出により、環境大気と比較して高濃度の窒素酸化物が検出された。特にエプロンの風下、滑走路の離陸側の風下、滑走路上の航空機が方向転換する箇所において、高いNO<sub>x</sub>濃度となる傾向があり、これは航空機の挙動と関連がある。

2) 空港内で計測されたNO<sub>2</sub>は比較的低濃度であり、航空機から排出された直後、NO<sub>2</sub>濃度が低い時に計測されたものと思われる。しかし、排出されたNO<sub>x</sub>は大気拡散中に酸化されてNO<sub>2</sub>となるため、健康被害をもたらすNO<sub>2</sub>に対し、空港が大きな排出源となっている可能性は否定できない。

3) 空港外では、空港の駐車場や港などからも高濃度のNO<sub>x</sub>が検出された。これは低速で常時通過する自動車両、ならびに船舶の影響によるものと思われる。

4) エプロン、および滑走路の運用時間内において、瞬間的に高濃度となり得るNO<sub>x</sub>濃度について検討したところ、エプロンでは運用時間中常時0.080ppm程度、滑走路上では航空機の離陸時に3~60ppm程度となる結果を得、非常に高いNO<sub>x</sub>濃度となる危険性が示唆された。

5) 酸化チタン混入塗料のNO<sub>x</sub>低減効果については、10回中9回で酸化チタン混入の方がNO<sub>x</sub>が小さい値で検出され、酸化チタンのNO<sub>x</sub>低減効果が認められた。また、その低減効果は10%程度である。

(2004年2月10日 受付)

## 謝辞

本研究の遂行にあたり、大阪航空局石垣出張所の森田氏をはじめとする皆様方、沖縄県土木建築部空港課の武田氏をはじめとする皆様方、石垣市役所都市建設部空港課石垣空港管理事務所の桃原氏をはじめとする皆様方、石垣地方気象台石垣空港出張所、国土交通省関東地方整備局東京空港整備事務所の方々に、多大なるご協力を頂きました。特に石垣空港管理事務所の皆様には、深夜から連日の調査であるにも関わらず、常駐の上、大変よくご指導を頂きました。末尾ではありませんが、ここに記し、感謝の意を表します。

また、株式会社環境管理センターの小野田氏には、常に貴重な情報、ご指導を頂き、化工建設株式会社の中野氏には空港内作業の安全管理に関して十分な協力を頂きました。その他、困難な作業であるにも関わらずご参加頂いた材料研究室の山路氏、Tarek氏、高橋氏、平崎氏、ならびに株式会社環境管理センター、化工建設株式会社、八建実業株式会社の皆様方にこの場を借りて厚く御礼申し上げます。

## 参考文献

- 1) 濱田秀則・山路徹・坂本明・佐々木俊明・大坪貴明：東京国際空港における窒素酸化物の排出に関する研究、港湾空港技術研究所資料、No.980、2001年3月
- 2) 社団法人環境情報科学センター；環境影響評価技術マニュアル（暫定版）～大気環境・水環境・土壌環境～、1999年2月
- 3) 環境庁大気保全局大気規制課編・公害研究対策センター；窒素酸化物総量規制マニュアル（増補改訂版）、1995年
- 4) 里隆幸・野村繭一・前川昌三・山崎曜・中山俊介・石田則之：光触媒酸化チタン塗料による大気中のNO<sub>x</sub>浄化、第22回鉄鋼塗装技術討論会発表予稿集、1999年10月
- 5) 機体作業基準：全日本空輸株式会社、2000年11月
- 6) 財団法人港湾空港建設技術サービスセンター：空港土木施設設計基準、平成2001年4月
- 7) 財団法人航空振興財団：国際民間航空条約第14付属書、第I巻、第3版、1999年7月
- 8) 公健協会：環境保険クライテリア・窒素酸化物、LATTICE、1999年5月

付録

以下の表-A.1(1)～(4), ならびに表-A.2(1)～(3)に,  
本文中に示さなかった石垣空港における窒素酸化物, 二  
酸化窒素の全ての測定データを示す.

表-A.1(1) 滑走路周辺の窒素酸化物濃度測定結果 (1回目その1)

測点位置	滑走路中心か らの距離(m)	NO <sub>x</sub> 計測値(ppm)(A)			NO <sub>2</sub> 計測値(ppm)(B)			NO計測値(ppm)(A-B)		
		1サイクル目	2サイクル目	3サイクル目	1サイクル目	2サイクル目	3サイクル目	1サイクル目	2サイクル目	3サイクル目
R-1	42.5	0.004	0.002		<0.001	<0.001		0.004	0.002	
R-2	42.5	0.015	<0.001		<0.001	<0.001		0.015	<0.001	
R-3	42.5	0.030	0.013		0.001	0.003		0.029	0.010	
R-4	42.5	<0.001	0.013		<0.001	0.004		<0.001	0.009	
R-5	42.5	0.010	0.009	0.003	0.003	0.005	0.003	0.007	0.004	0.000
R-6	42.5	0.001	0.015		<0.001	<0.001		0.001	0.015	
R-7	42.5	<0.001	0.015		<0.001	0.003		<0.001	0.012	
R-8	42.5	<0.001	0.013		<0.001	0.003		<0.001	0.010	
R-9	42.5	0.009	0.011	0.003	0.001	0.004	0.003	0.008	0.007	0.000
R-10	42.5	0.010	0.017		<0.001	0.004		0.010	0.013	
R-11	42.5	0.008	0.011		<0.001	0.003		0.008	0.008	
R-12	42.5	0.011	0.014		<0.001	0.004		0.011	0.010	
R-13	42.5	0.010	0.014	0.001	<0.001	0.004	0.001	0.010	0.010	0.000
R-14	42.5	0.008	0.015		0.002	0.003		0.006	0.012	
R-15	42.5	0.005	0.010		0.001	0.003		0.004	0.007	
R-16	42.5	<0.001	0.008		<0.001	0.003		<0.001	0.005	
R-17	42.5	0.005	0.010	0.002	<0.001	0.001	0.002	0.005	0.009	0.000
R-18	42.5	0.004	0.011		0.001	<0.001		0.003	0.011	
R-19	42.5	0.004	0.005		0.001	0.002		0.003	0.003	
R-20	42.5	<0.001	0.009		<0.001	0.002		<0.001	0.007	
R-21	42.5	<0.001	<0.001		<0.001	<0.001		<0.001	<0.001	
R-22	42.5	0.001	0.005		0.001	0.001		0.000	0.004	
R-23	42.5	0.015	0.001		0.003	0.001		0.012	0.000	
R-24	42.5	0.014	0.010		0.003	0.002		0.011	0.008	
R-25	42.5	0.014	<0.001		<0.001	<0.001		0.014	<0.001	
R-26	42.5	<0.001	<0.001		<0.001	<0.001		<0.001	<0.001	
R-27	42.5	0.003	0.001	0.003	0.003	<0.001	0.003	0.000	0.001	0.000
R-28	42.5	0.005	0.003		0.001	0.002		0.004	0.001	
R-29	42.5	0.008	0.004		0.001	0.001		0.007	0.003	
R-30	42.5	0.005	<0.001		<0.001	<0.001		0.005	<0.001	
R-31	42.5	0.015	<0.001	0.003	<0.001	<0.001	0.003	0.015	<0.001	0.000
R-32	42.5	0.016	0.005		0.001	0.001		0.015	0.004	
R-33	42.5	0.012	0.005		0.001	0.001		0.011	0.004	
R-34	42.5	0.009	<0.001		<0.001	<0.001		0.009	<0.001	
R-35	42.5	0.011	0.007	0.001	0.001	0.001	0.001	0.010	0.006	0.000
R-36	42.5	0.012	<0.001		0.002	<0.001		0.010	<0.001	
R-37	42.5	<0.001	0.007		<0.001	0.001		<0.001	0.006	
R-38	42.5	0.011	0.005		<0.001	<0.001		0.011	0.005	
R-39	42.5	0.016	0.004	0.002	0.002	<0.001	0.002	0.014	0.004	0.000
R-40	42.5	0.009	<0.001		0.002	<0.001		0.007	<0.001	
R-41	42.5	0.010	0.005		0.001	<0.001		0.009	0.005	
R-42	42.5	0.012	0.005		0.002	0.001		0.010	0.004	
R-43	42.5	0.004	0.009		0.001	<0.001		0.003	0.009	
R-44	42.5	0.006	0.009		0.002	0.001		0.004	0.008	

表-A.1(2) 滑走路周辺の窒素酸化物濃度測定結果 (1回目その2)

測点位置	滑走路中心からの距離(m)	NO <sub>x</sub> 計測値(ppm)(A)			NO <sub>2</sub> 計測値(ppm)(B)			NO計測値(ppm)(A-B)		
		1サイクル目	2サイクル目	3サイクル目	1サイクル目	2サイクル目	3サイクル目	1サイクル目	2サイクル目	3サイクル目
R-45	80.5	<0.001	<0.001		<0.001	<0.001		<0.001	<0.001	
R-46	80.5	0.005	0.005		0.001	<0.001		0.004	0.005	
R-47	80.5	0.006	0.008		0.002	<0.001		0.004	0.008	
R-48	80.5	0.012	0.007		<0.001	<0.001		0.012	0.007	
R-49	80.5	0.006	0.030		0.001	0.003		0.005	0.027	
R-50	80.5	0.006	0.015		0.001	<0.001		0.005	0.015	
R-51	80.5	0.004	0.011		0.001	0.003		0.003	0.008	
R-52	80.5	0.009	0.012		0.003	0.001		0.006	0.011	
R-53	80.5	0.010	0.011		0.002	<0.001		0.008	0.011	
R-54	80.5	0.005	0.011		0.002	0.002		0.003	0.009	
R-55	80.5	0.009	0.012		0.001	<0.001		0.008	0.012	
R-56	80.5	<0.001	0.001		<0.001	<0.001		<0.001	0.001	
R-57	80.5	<0.001	0.009		<0.001	0.003		<0.001	0.006	
R-58	80.5	0.004	<0.001		<0.001	<0.001		0.004	<0.001	
R-59	80.5	0.004	0.013		0.002	0.003		0.002	0.010	
R-60	80.5	<0.001	0.008		<0.001	0.002		<0.001	0.006	
R-61	80.5	0.011	0.010		<0.001	0.003		0.011	0.007	
R-62	80.5	0.010	0.005		0.002	<0.001		0.008	0.005	
R-63	80.5	0.003	0.008		<0.001	0.001		0.003	0.007	
R-64	80.5	<0.001	0.013		<0.001	<0.001		<0.001	0.013	
R-65	62.5	0.013	0.004		0.001	0.001		0.012	0.003	
R-66	62.5	0.016	0.004		0.004	0.002		0.012	0.002	
R-67	62.5	0.011	0.007		0.002	0.001		0.009	0.006	
R-68	62.5	0.016	0.004		0.004	<0.001		0.012	0.004	
R-69	62.5	0.014	0.007		0.003	<0.001		0.011	0.007	
R-70	62.5	0.017	0.006		0.002	<0.001		0.015	0.006	
R-71	62.5	0.003	0.007		0.001	<0.001		0.002	0.007	
R-72	62.5	0.002	<0.001		0.001	<0.001		0.001	<0.001	
R-73	62.5	0.013	0.002		0.004	<0.001		0.009	0.002	
R-74	62.5	0.003	0.008		<0.001	0.001		0.003	0.007	
R-75	62.5	<0.001	0.006		<0.001	<0.001		<0.001	0.006	
R-76	62.5	0.013	0.009		0.001	<0.001		0.012	0.009	
R-77	62.5	0.010	0.004		<0.001	0.002		0.010	0.002	
R-78	62.5	0.007	0.004		<0.001	0.002		0.007	0.002	
R-79	62.5	0.014	0.007		<0.001	<0.001		0.014	0.007	
R-80	62.5	<0.001	0.006		<0.001	0.001		<0.001	0.005	
R-81	62.5	0.014	0.001		<0.001	0.001		0.014	0.000	
R-82	62.5	<0.001	<0.001		<0.001	<0.001		<0.001	<0.001	
R-83	62.5	0.008	0.010		0.003	0.001		0.005	0.009	
R-84	62.5	0.010	0.005		0.004	0.001		0.006	0.004	

表-A.1(3) エプロン周辺の窒素酸化物濃度測定結果 (1回目)

測点位置	エプロン端からの距離(m)	NO <sub>x</sub> 計測値(ppm)(A)		NO <sub>2</sub> 計測値(ppm)(B)		NO計測値(ppm)(A-B)	
		1サイクル目	2サイクル目	1サイクル目	2サイクル目	1サイクル目	2サイクル目
A-1	10.0	0.004	<0.001	<0.001	<0.001	0.004	<0.001
A-2	10.0	<0.001	0.004	<0.001	0.004	<0.001	0.000
A-3	10.0	0.013	0.013	0.008	0.003	0.005	0.010
A-4	10.0	<0.001	0.017	<0.001	0.004	<0.001	0.013
A-5	10.0	0.008	0.016	0.006	0.004	0.002	0.012
A-6	10.0	0.022	0.009	0.003	0.002	0.019	0.007
A-7	10.0	0.013	0.015	<0.001	0.005	0.013	0.010
A-8	10.0	0.011	0.020	<0.001	0.005	0.011	0.015
A-9	10.0	0.010	0.025	0.003	0.004	0.007	0.021
A-10	10.0	0.017	0.018	<0.001	0.005	0.017	0.013

表-A.1(4) 空港外の窒素酸化物濃度測定結果 (1回目)

測点位置	地点	NO <sub>x</sub> 計測値(ppm)(A)			NO <sub>2</sub> 計測値(ppm)(B)			NO計測値(ppm)(A-B)		
		1サイクル目	2サイクル目	3サイクル目	1サイクル目	2サイクル目	3サイクル目	1サイクル目	2サイクル目	3サイクル目
O-1	場周道路端部	0.007	0.008	-	0.005	0.003	-	0.002	0.005	-
O-2	場周道路端部	0.021	0.024	-	0.005	0.004	-	0.016	0.020	-
O-3	場周道路端部	0.014	0.009	-	0.002	-	-	0.012	0.009	-
O-4	場周道路端部	0.004	0.012	-	0.001	0.002	-	0.003	0.010	-
O-6	駐車場1	0.015	0.030	0.012	0.003	0.010	0.012	0.012	0.020	0.000
O-7	駐車場2	0.018	0.009	0.005	0.004	0.004	0.005	0.014	0.005	0.000
O-8	駐車場3	0.016	0.011	0.005	0.003	0.002	0.005	0.013	0.009	0.000
O-9	民間駐車場	0.012	<0.001	0.005	0.001	<0.001	0.005	0.011	<0.001	0.000
O-10	石垣港	0.061	0.015	0.011	<0.001	0.007	0.011	0.061	0.008	0.000



表-A.2(1) 滑走路周辺の窒素酸化物濃度測定結果 (2回目)

測点位置	滑走路中心からの距離(m)	NO <sub>x</sub> 計測値(ppm)(A)			NO <sub>2</sub> 計測値(ppm)(B)			NO計測値(ppm)(A-B)		
		1サイクル目	2サイクル目	3サイクル目	1サイクル目	2サイクル目	3サイクル目	1サイクル目	2サイクル目	3サイクル目
R-1	32.5	0.080	0.034	0.020	0.005	0.005	0.005	0.075	0.029	0.015
R-2	42.5	0.040	0.040	0.032	0.002	0.002	0.002	0.038	0.038	0.030
R-3	42.5	0.034	0.123	0.030	0.002	0.003	0.002	0.032	0.120	0.028
R-4	42.5	0.034	0.086	0.480	0.004	0.003	0.010	0.030	0.083	0.470
R-5	42.5	0.034	0.074	0.810	0.003	0.004	0.010	0.031	0.070	0.800
R-6	42.5	0.035	0.037	0.033	0.002	0.002	0.004	0.033	0.035	0.029
R-7	42.5	0.035	0.032	0.037	0.003	0.004	0.002	0.032	0.028	0.035
R-8	42.5	0.028	0.032	0.031	<0.001	0.002	0.002	0.028	0.030	0.029
R-9	42.5	0.032	0.032	0.032	0.002	0.002	0.002	0.030	0.030	0.030
R-10	42.5	0.039	0.032	0.034	0.002	0.002	0.002	0.037	0.030	0.032
R-11	42.5	0.033	0.029	0.043	0.002	0.002	0.002	0.031	0.027	0.041
R-12	42.5	0.025	0.030	0.027	<0.001	0.003	0.002	0.025	0.027	0.025
R-13	42.5	0.032	0.192	0.041	0.001	0.002	0.002	0.031	0.190	0.039
R-14	32.5	0.029	0.029	0.077	0.002	0.001	0.005	0.027	0.028	0.072
R-15	32.5	0.028	0.090	0.035	<0.001	0.002	0.005	0.028	0.088	0.030
R-16	42.5	0.029	0.173	0.031	0.001	0.003	0.003	0.028	0.170	0.028
R-17	42.5	0.037	0.034	0.029	0.003	0.004	0.004	0.034	0.030	0.025
R-18	42.5	0.038	0.032	0.035	0.002	0.004	0.003	0.036	0.028	0.032
R-19	42.5	0.031	0.030	0.028	0.002	0.002	0.003	0.029	0.028	0.025
R-20	42.5	0.031	0.038	0.079	0.001	0.002	0.004	0.030	0.036	0.075
R-21	42.5	0.034	0.028	0.032	<0.001	0.002	<0.001	0.034	0.026	0.032
R-22	42.5	0.086	0.031	0.165	<0.001	0.001	0.005	0.086	0.030	0.160
R-23	42.5	0.120	0.030	0.101	<0.001	0.003	0.004	0.120	0.027	0.097
R-24	42.5	0.029	0.182	0.027	<0.001	0.002	0.001	0.029	0.180	0.026
R-25	42.5	0.032	0.028	0.024	<0.001	0.003	<0.001	0.032	0.025	0.024
R-26	42.5	0.029	0.029	0.028	<0.001	<0.001	<0.001	0.029	0.029	0.028
R-27	42.5	0.028	0.030	0.029	<0.001	<0.001	<0.001	0.028	0.030	0.029
R-28	32.5	0.025	0.031	0.025	<0.001	<0.001	<0.001	0.025	0.031	0.025

表-A.2(2) エプロン周辺の窒素酸化物濃度測定結果 (2回目)

測点位置	エプロン端からの距離(m)	NO <sub>x</sub> 計測値(ppm)(A)			NO <sub>2</sub> 計測値(ppm)(B)			NO計測値(ppm)(A-B)		
		1サイクル目	2サイクル目	3サイクル目	1サイクル目	2サイクル目	3サイクル目	1サイクル目	2サイクル目	3サイクル目
A-1	10.0	0.027	0.091	0.030	0.003	0.006	0.002	0.024	0.085	0.028
A-2	10.0	0.028	0.033	0.076	<0.001	0.005	0.006	0.028	0.028	0.070
A-3	10.0	0.030	0.046		<0.001	0.004	<0.001	0.030	0.042	0.000
A-4	10.0	0.093	0.055	0.028	0.002	0.004	0.002	0.091	0.051	0.026
A-5	10.0	0.113	0.049	0.030	0.003	0.005	0.003	0.110	0.044	0.027
A-6	10.0	0.036	0.048	0.030	0.005	0.005	0.002	0.031	0.043	0.028
A-7	10.0	0.033	0.032	0.032	0.003	0.004	0.002	0.030	0.028	0.030
A-8	10.0	0.030	0.028	0.095	<0.001	0.001	0.005	0.030	0.027	0.090
A-9	10.0	0.021	0.048	0.035	<0.001	<0.001	0.003	0.021	0.048	0.032
A-10	10.0	0.027	0.026	0.031	<0.001	<0.001	0.002	0.027	0.026	0.029
A-11	10.0	0.027	0.038	0.074	<0.001	0.005	0.009	0.027	0.033	0.065

表-A. 2(3) 空港外の窒素酸化物濃度測定結果 (2回目)

測点位置	地点	NO <sub>x</sub> 計測値(ppm)(A)			NO <sub>2</sub> 計測値(ppm)(B)			NO計測値(ppm)(A-B)		
		1サイクル目	2サイクル目	3サイクル目	1サイクル目	2サイクル目	3サイクル目	1サイクル目	2サイクル目	3サイクル目
O-1	航空局前	0.037	0.037	0.116	0.002	0.004	0.006	0.035	0.033	0.110
O-2	送迎デッキ	0.058	0.047	0.034	0.008	0.010	0.004	0.050	0.037	0.030
O-3	タクシー乗場	0.075	0.022	0.044	0.004	0.008	0.006	0.071	0.014	0.038
O-4	駐車場1	0.023	0.070	0.076	<0.001	0.002	0.004	0.023	0.068	0.072
O-5	駐車場2	0.038	0.025	0.032	0.001	0.004	<0.001	0.037	0.021	0.032
O-6	滑走路南(民家そば)	0.064	0.046	0.039	0.010	0.008	0.006	0.054	0.038	0.033
O-7	滑走路東(沖電そば)	0.030	0.033	0.027	<0.001	0.004	0.002	0.030	0.029	0.025
O-8	滑走路北(空き地)	0.027	0.026	0.023	<0.001	<0.001	<0.001	0.027	0.026	0.023
O-9	滑走路西(運動公園)	0.031	0.024	0.089	<0.001	<0.001	0.004	0.031	0.024	0.085
O-10	石垣港	0.030	0.058	0.221	0.010	0.012	0.011	0.020	0.046	0.210

港湾空港技術研究所資料 No.1083

2004.6

編集兼発行人 独立行政法人港湾空港技術研究所

発行所 独立行政法人港湾空港技術研究所

横須賀市長瀬3丁目1番1号  
TEL.046(844)5040 URL <http://www.pari.go.jp/>

印刷所 株式会社 シーケン

Copyright © (2004) by PARI

All rights reserved. No part of this book must be reproduced by any means without the written permission of the President of PARI.

この資料は、港湾空港技術研究所理事長の承認を得て刊行したものである。したがって、本報告書の全部または一部の転載、複写は港湾空港技術研究所理事長の文書による承認を得ずしてこれを行ってはならない。