

# 自然・交通条件を活用した 道路トンネルの新換気制御技術



SO \* HATSUI

国立研究開発法人土木研究所つくば中央研究所

(株)創発システム研究所

# 目次

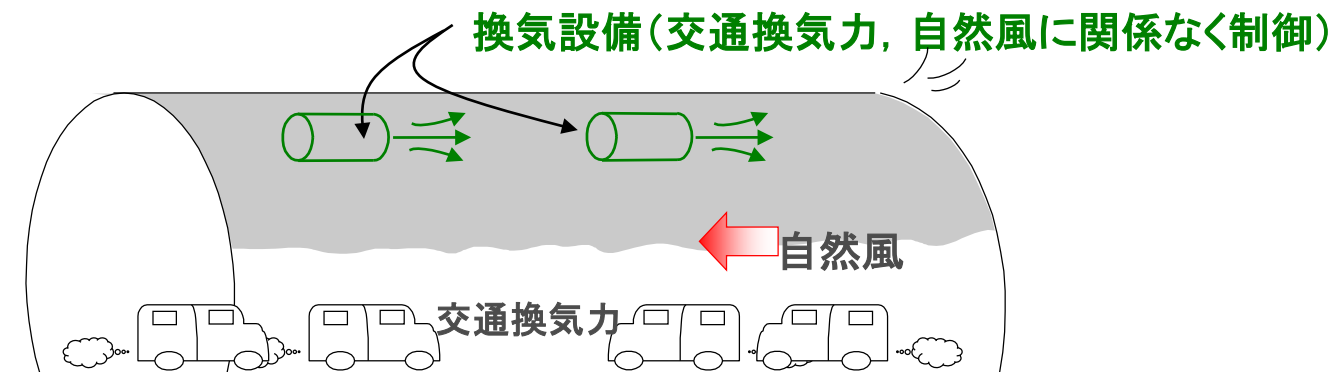
- ☑ 1. 道路トンネルの換気制御システムとは
- ☑ 2. 従来の換気制御方式 (FB制御) について
- ☑ 3. 新換気制御方式 (FCVC-N) の紹介
- ☑ 4. 実証実験の紹介
- ☑ 5. 省エネ効果の目安
- ☑ 6. 仮想トンネルでの検証
- ☑ 7. まとめ

# 1. 道路トンネルの 換気制御システムとは

- ☑ 自動車の排出ガスには、生理的に影響を及ぼす有害物質（一酸化炭素等）や、視界を妨げる煤煙（黒煙や粉じん）が含有
- ☑ 道路トンネルの換気目的  
トンネル利用者の安全で快適な通行の確保  
トンネル内各種管理業務のための環境確保  
良好な視野環境の確保  
→ 視野環境（煤煙透過率，以下VI）と一酸化炭素濃度（CO）を考慮
- ☑ 換気に必要な換気機台数は、換気施設設計時に下記条件から算出
  - ・トンネル延長
  - ・交通量
  - ・換気対象物質（煤煙やCO）の自動車排出ガス量
  - ・自動車の走行による交通換気力
  - ・自然風

# 2.従来の換気制御方式 (FB制御)について

- ☑ VI、COの許容値を超過しないように、換気機を駆動させる方式
- ☑ VI、COの制御目標値を下回ると、換気機を駆動し、換気を行う
- ☑ 短所: VIとCOの監視、制御のみ。  
(自然風や交通の状況は計測しない)  
そのため、換気作用に寄与する自然風, 交通換気力を活用できない

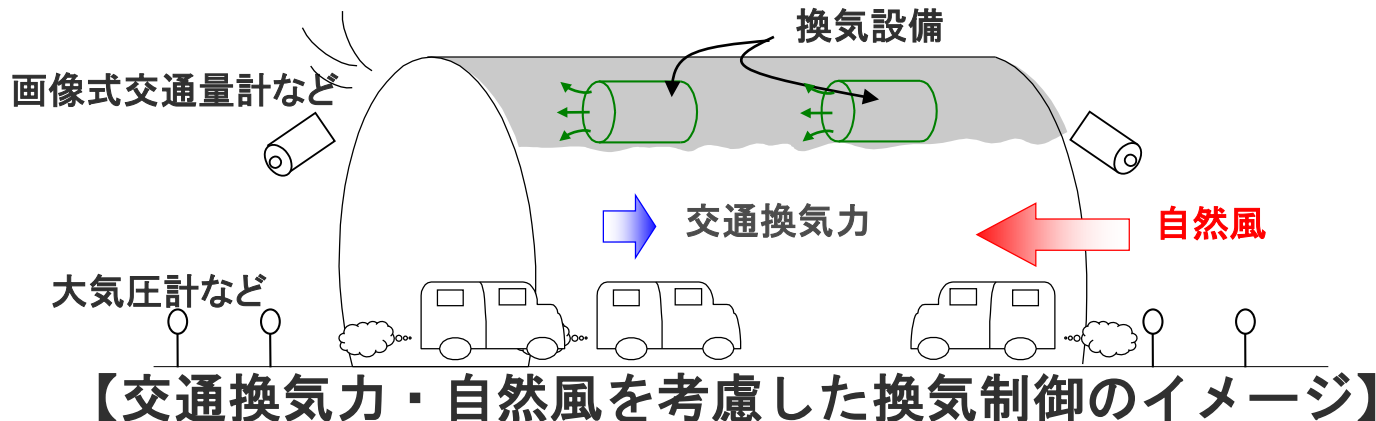


【従来の換気制御 (FB制御) イメージ】

# 3. 新換気制御方式の紹介

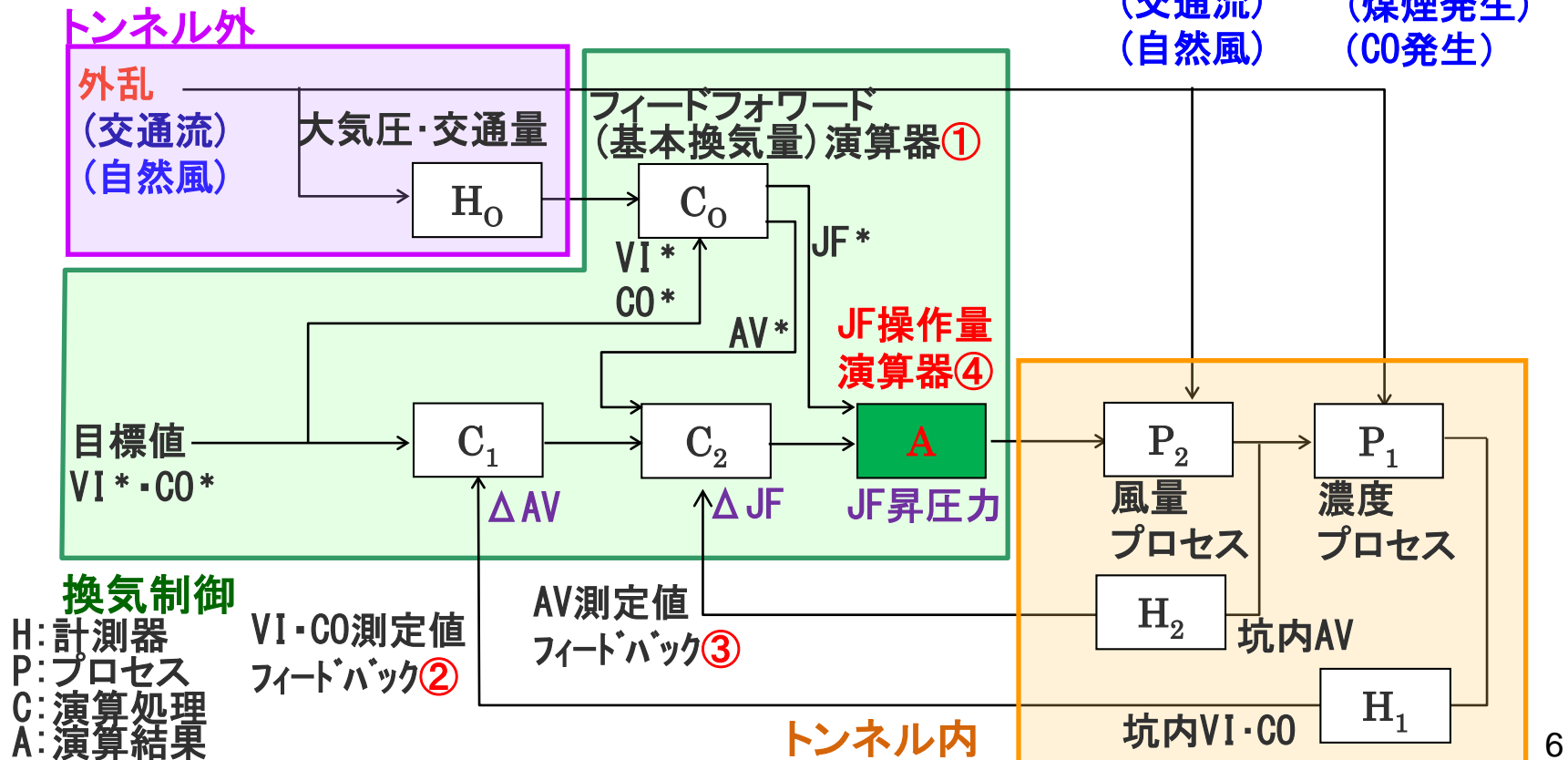
## (自然・交通条件を活用した新換気制御技術)

- ☑ 平成20～22年に共同開発
- ☑ 平成24年に第17回地下空間シンポジウム優秀講演論文賞<sup>1)</sup>
- ☑ NETIS登録製品(登録番号 KK-170019-A)
- ☑ 自然風や交通換気力を把握し、換気制御に活用
- ☑ 従来の制御を改良し、風速も考慮
- ☑ VI、COに比べて変化の速い風速で制御ができ、従来の換気制御より制御性が安定し、過剰換気、制御のハンチングを防止



# 3.新換気制御方式の紹介 (制御構成)

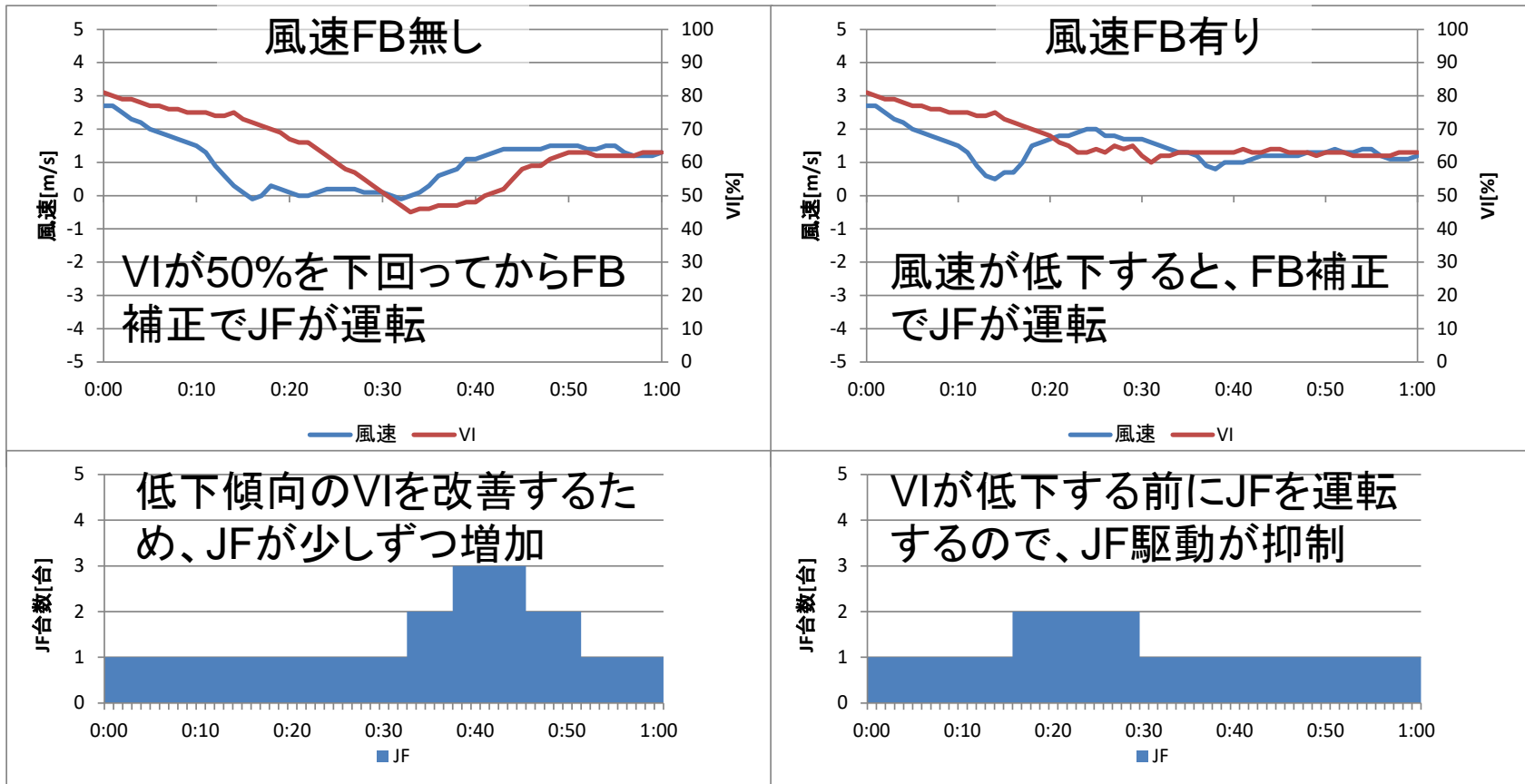
- ①交通流・自然風を基に、目標VI値(煤煙透過率)に対する基本換気量の演算
- ②VI値フィードバックによる風速修正演算
- ③トンネル内風速フィードバックによる換気量修正演算
- ④必要換気風量に対する適切な換気機操作量の算定



# 3. 新換気制御方式の紹介 (風速FBの利点)



FB制御にVI、COだけではなく、風速を制御に追加することで、従来制御よりもJF運転が安定し、過剰換気、制御のハンチングを防止  
(VI、COに比べて、変化の速い風速を制御する方式)



# 3. 新換気制御方式の紹介



## (NETIS登録)



「概要」「従来技術との比較」等のタブをクリックすることでそれぞれの内容を閲覧することができます。関連する情報がある場合は画面の上部にあるリンクをクリックすることができます。

|           |             |                        |                   |
|-----------|-------------|------------------------|-------------------|
| ものづくり日本大賞 | 国土技術政策総合研究所 | 他機関の評価結果               | 2018.08.22現在      |
| 技術名称      | 新FF換気制御システム |                        | 登録No. KK-170019-A |
| 事前審査      | 事後評価        | 技術の位置付け(有用な新技術)        |                   |
|           | 試行実証評価      | 活用効果評価                 | 活用促進技術            |
|           |             | 推奨技術                   | 活用促進技術            |
|           |             | 準推奨技術                  | 活用促進技術            |
|           |             | 評価促進技術                 | 活用促進技術            |
|           |             | 旧実証要領における技術の位置付け       |                   |
|           |             | 活用促進技術(旧)              | 活用促進技術            |
|           |             | 設計比較対象技術               | 少実験優良技術           |
|           |             | 活用効果調査入力様式             | 適用期間等             |
|           |             | 活用効果調査入力システムを使用してください。 |                   |

上記※印の情報と以下の情報は申請者の申請に基づき掲載しております。申請情報の最終更新年月日:2017.07.05

|           |   |                       |
|-----------|---|-----------------------|
| 特許実用新案    | 特許の有無   | 特許番号                  |
| 特許        | <input checked="" type="checkbox"/> 有り <input type="checkbox"/> 出願中 <input type="checkbox"/> 出願予定 <input type="checkbox"/> 無し |                       |
| 特許詳細      | 特許番号 特許 第4998732号 対面通行トンネルのシャットファンによるトンネル換気制御システム   | 実施権者 株式会社創発システム研究所    |
|           |   | 特許料等 同合 株式会社創発システム研究所 |
| 実用新案      | 特許の有無   |                       |
|           | <input checked="" type="checkbox"/> 有り <input type="checkbox"/> 出願中 <input type="checkbox"/> 出願予定 <input type="checkbox"/> 無し |                       |
| 備考        |   |                       |
| 第三者評価・表彰等 | 建築技術審査証明  | 建築技術評価                |
| 証明機関      |   |                       |
| 番号        |   |                       |
| 証明年月日     |   |                       |
| URL       |   |                       |
|           | その他の制度等による証明  |                       |
| 制度の名称     | 第17回地下空間シンポジウム  |                       |
| 番号        |   |                       |
| 証明年月日     | 2017.01.20  |                       |
| 証明機関      | 公益社団法人土木学会 地下空間研究委員会  |                       |
| 証明機関      | 優秀講演論文賞   |                       |
| URL       |   |                       |
|           | 評価・証明項目と結果  |                       |
| 証明項目      | 試験・調査内容   | 結果                    |

- ✓ 技術名称:新FF換気制御システム
- ✓ 登録No. :KK-170019-A
- ✓ 最終更新年月日 :2017年7月5日

- ①新規性  
従来技術(FF)に、自然風(大気圧)を加えた「風速フィードバック制御」
- ②効果
  - ・坑内風速の安定化
  - ・最少運転での換気制御(省エネ運転)
- ③適用可能な範囲
  - ・対面通行で縦流換気方式のトンネル
  - ・交通の変動が大きいトンネル
  - ・自然風の変動が大きいトンネル



# 4.実証実験の紹介

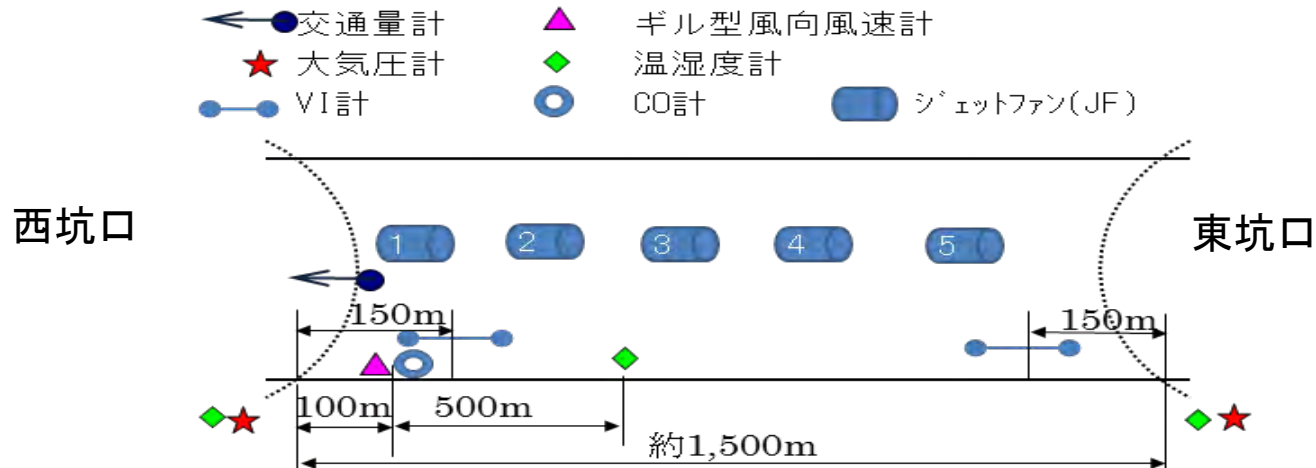
## (トンネル延長約1,500m)

### 実証実験トンネルの概要

| トンネル名 | 延長(m) | 断面積(m <sup>2</sup> ) | 交通形態 | 平面曲率R(m) | 縦断勾配(最大)(%) | 両坑口の標高差(m) | 坑口方位 |
|-------|-------|----------------------|------|----------|-------------|------------|------|
| Fトンネル | 約1500 | 62.3                 | 対面   | 4000     | -1.0        | 3.4        | 東-西  |

### 換気施設および制御方式

| 換気方式 | JF台数              | 換気制御方式             | トンネル内の計測器                | 概略交通量(台/日) |
|------|-------------------|--------------------|--------------------------|------------|
| 縦流JF | 高風速型5台<br>φ1250mm | VI値に基づく<br>フィードバック | VI計2台(両坑口)<br>CO計1台(片坑口) | 約23,000    |



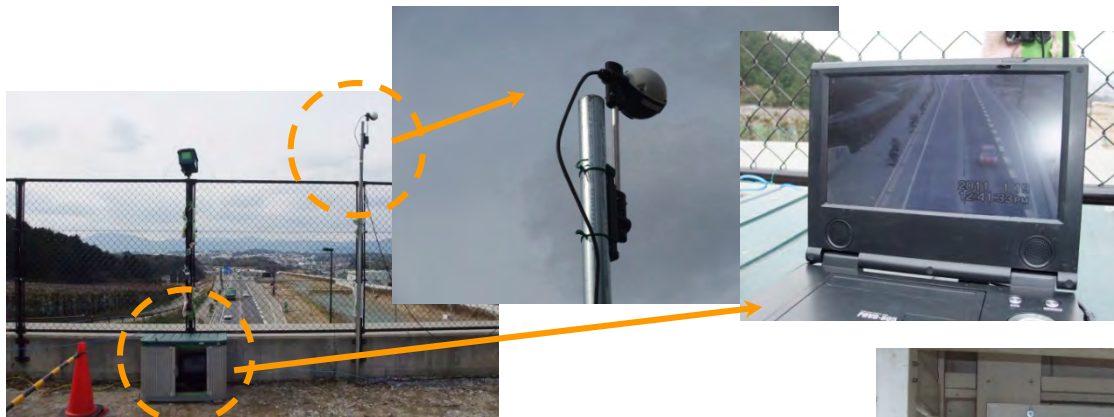
### 実証実験トンネルの概要図

# 4.実証実験の紹介

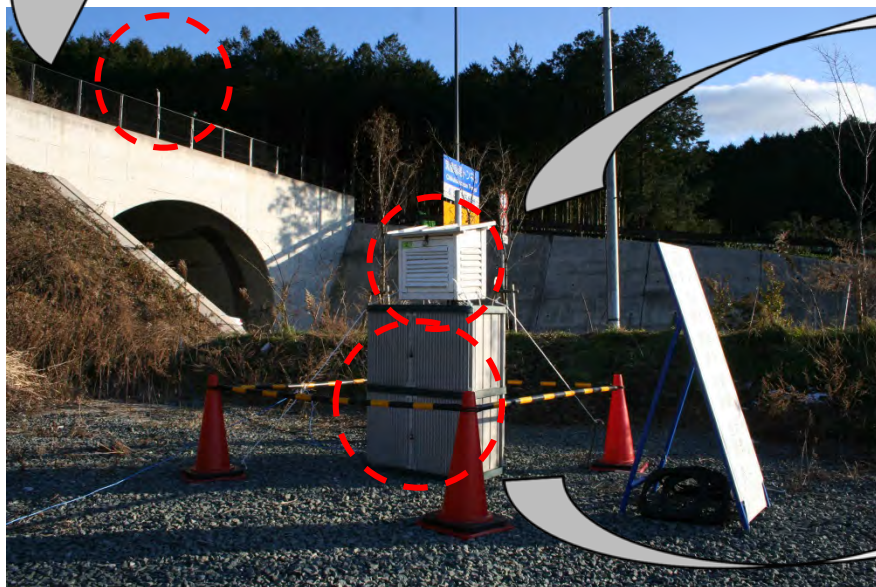
## 換気制御方式の比較

| 換気制御方式                     |       | 既設FB制御方式<br>(フィードバック)                    | 新換気制御方式   |
|----------------------------|-------|--|---|
| 制御の基本的<br>考え方              |       | 両坑口のVI値を基<br>に、VI値が低い方<br>向へJFを運転す<br>る。 | 両坑口間の大気圧差・<br>交通量をもとにトンネ<br>ル内の自然風、交通換<br>気力を推定し、JF運<br>転を行う。 |
| 具<br>体<br>的<br>な<br>手<br>法 | 制御ピッチ | 10分間隔で制御                                 |   |
|                            | 上限VI値 | 91%超 : JF2台停止<br>90%超 : JF1台停止           |   |
|                            | 下限VI値 | 80%未満 : JF1台追加運転<br>70%未満 : JF2台追加運転     |   |

# 4.実証実験の紹介



交通量把握(画像交通量計)



坑口部の計測状況



大気圧計センサー部

自然風把握  
(大気圧計)



大気圧計データ収録

# 4.実証実験の紹介



ジェットファン



トンネル内風向・風速



煤煙透過率VI計

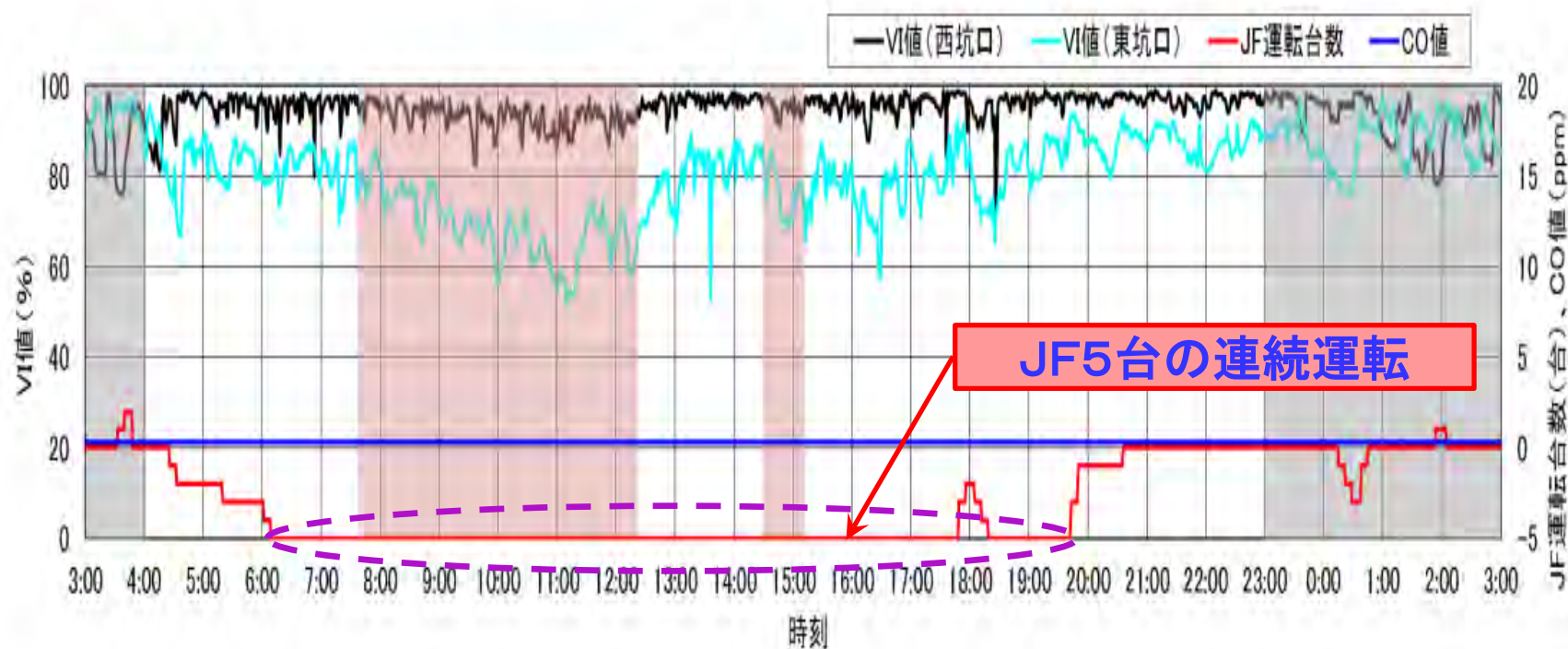


新換気制御の状況【電気室内】

## トンネル内・電気室内の状況

# 4.実証実験の紹介

## (1)既設FB制御方式 VI値・CO値・JF運転実績結果

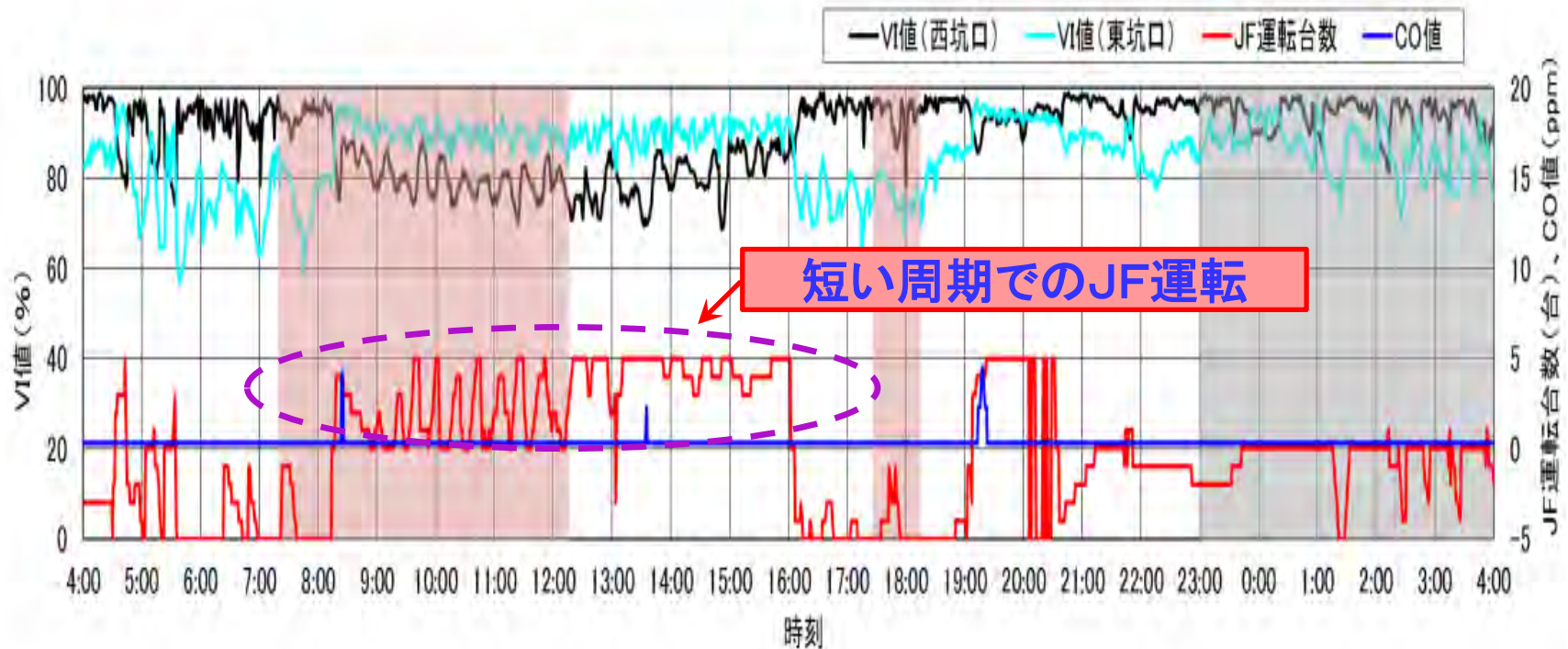


ピンク網掛け部:トンネル内全線交通渋滞発生  
グレー網掛け部:交通渋滞なし

- ☑ 設計濃度(VI値40%以上、CO100ppm以下)を確保
- ☑ 既設FB制御方式はJF5台の連続運転の時間帯が長い

# 4.実証実験の紹介

## (2)新換気制御方式 VI値・CO値・JF運転実績結果



ピンク網掛け部:トンネル内全線交通渋滞発生  
グレー網掛け部:交通渋滞なし

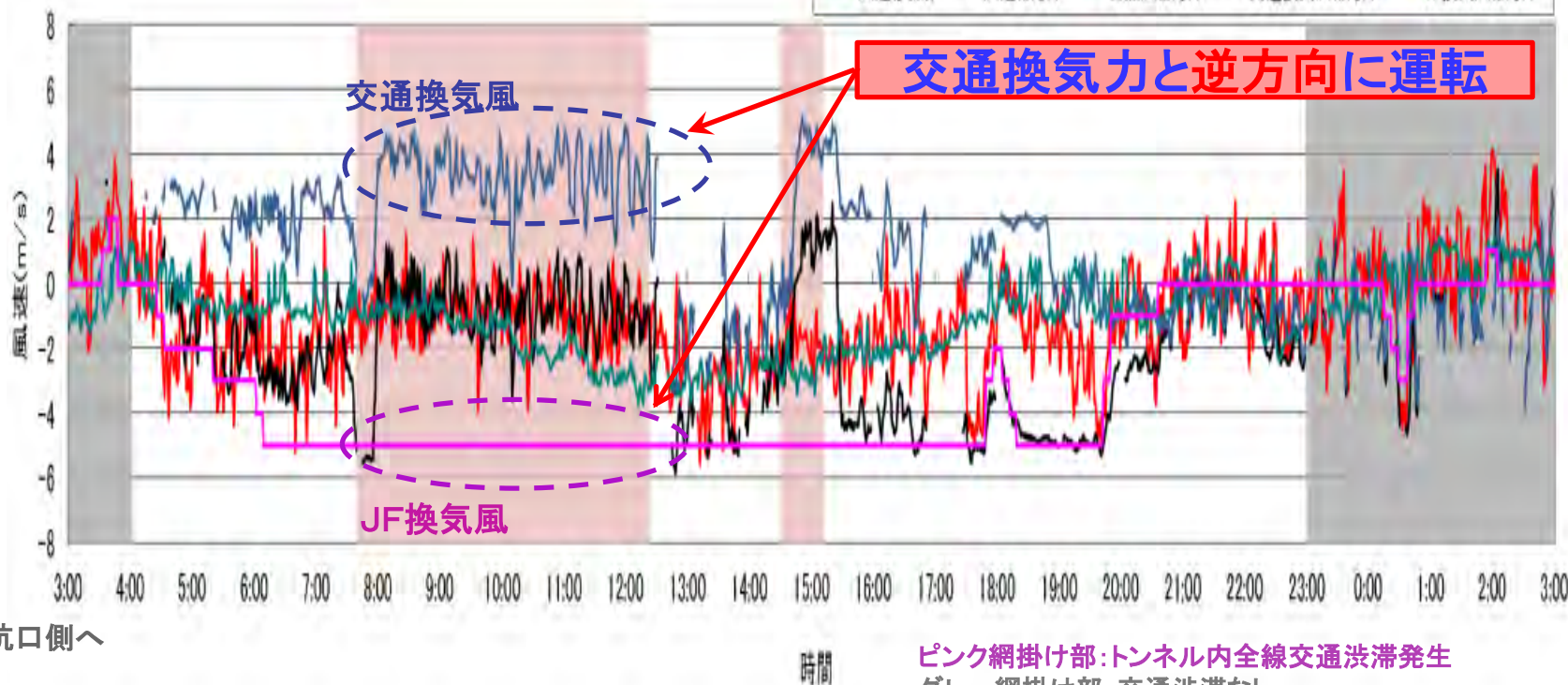
- ☑ 設計濃度(VI値40%以上、CO100ppm以下)を確保
- ☑ 新換気制御は短い周期でのJF運転

# 4. 実証実験の紹介

## (3) 既設FB制御方式トンネル内の風向・風速結果

西坑口側へ

— 風速(実測) — 風速(計算) — 自然風(計算) — 交通換気風(計算) — JF換気風(計算)



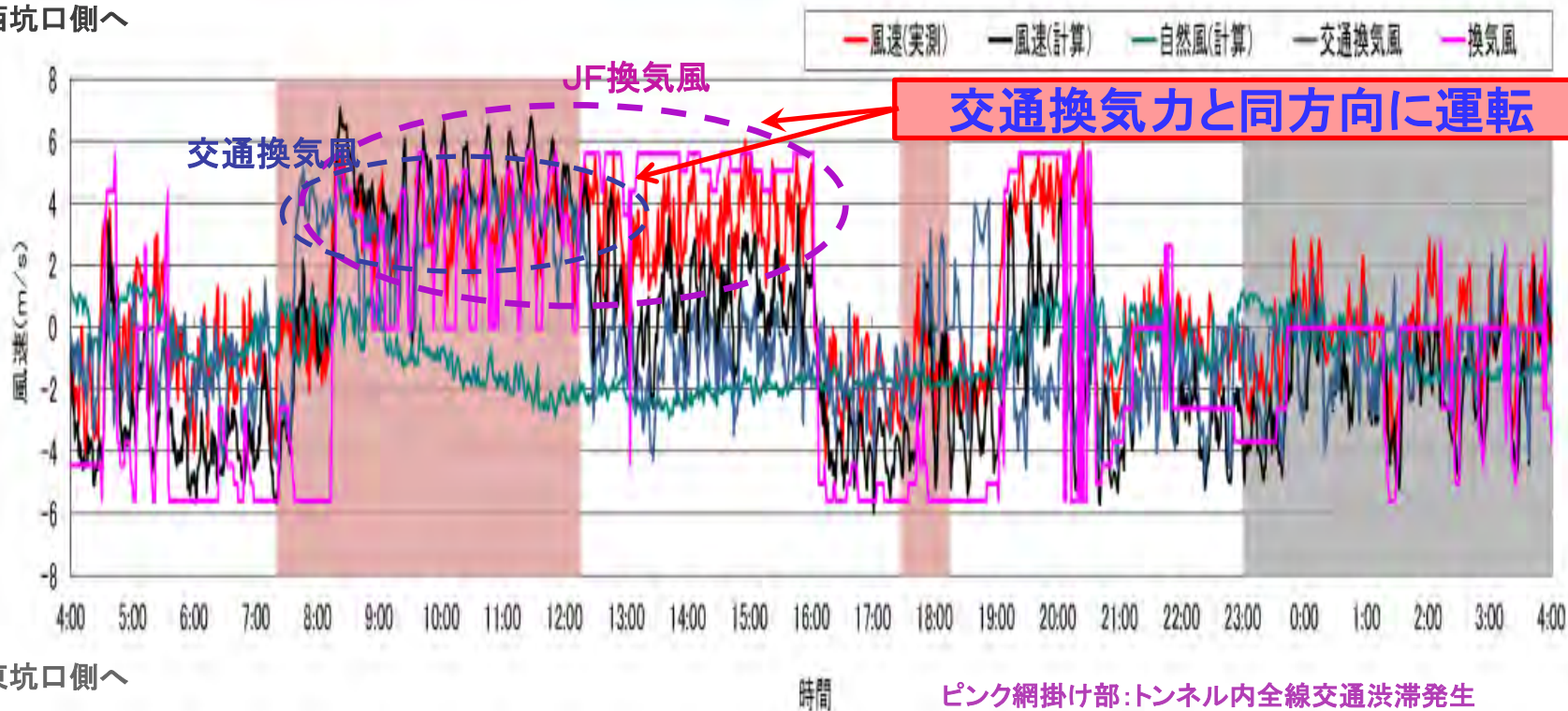
東坑口側へ

- ☑ 既設FB制御では、交通換気力と逆方向にJF運転を実施
- ☑ 実証試験中は、交通換気力・JF換気風がトンネル内風速に大きく影響

# 4.実証実験の紹介

## (4)新換気制御方式トンネル内の風向・風速結果

西坑口側へ



東坑口側へ

ピンク網掛け部:トンネル内全線交通渋滞発生  
グレイ網掛け部:交通渋滞なし

- ☑ 新換気制御方式では、交通換気力と同方向にJF運転を実施

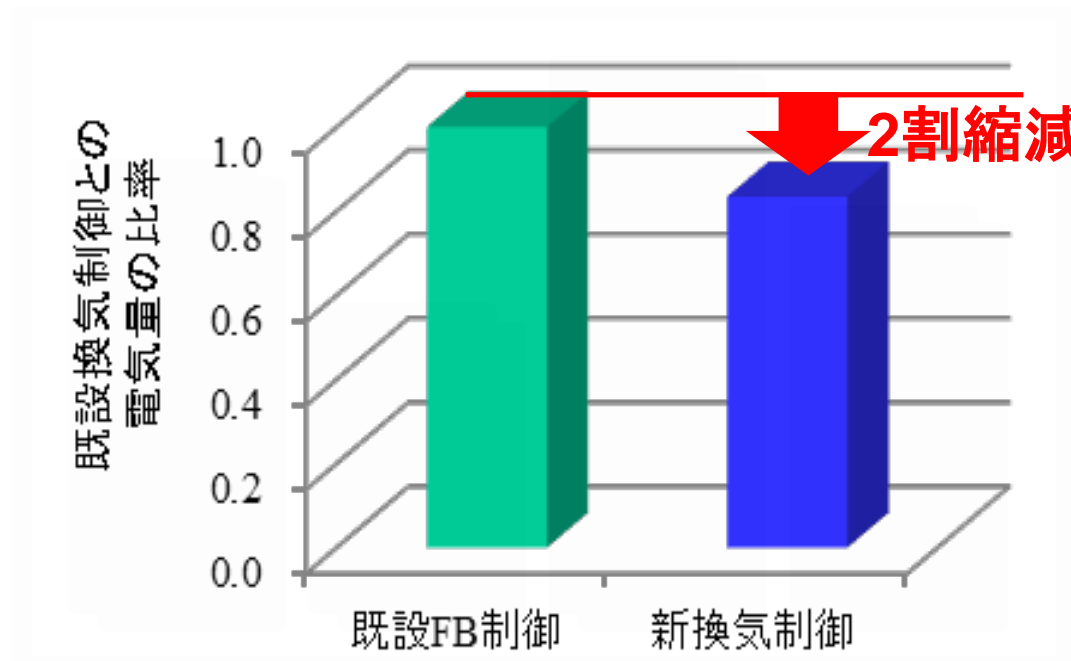


**新換気制御方式の機能を発揮**



# 4.実証実験の紹介

## (5) 使用電力量の比較



【使用電力量の比較/1日あたり】

- ☑ 新換気制御方式の電力量は、既設FB制御方式に比較して約2割削減できた



**新換気制御方式の機能を発揮**

# 5.省エネ効果の目安

## 新換気制御方式の適応範囲(トンネル延長,交通量規模)

- ☑ トンネル延長、交通量の規模を仮定し、新換気制御方式の適応範囲の目安を検討

### 【検討条件1】

- ☑ ジェットファン機種 : 50kW (JF1250X )
- ☑ 交通条件 : 地方部の設計時間交通量  
各日交通量から、山地部の設計時間交通量K値14%を採用
- ☑ 換気機運転時間 : 4時間と6時間(フルノッチ運転時間換算)  
フルノッチ運転時間...1日でのJF稼働合計時間から、JF台数で割ったもの  
4~6時間が、よく換気機が駆動する指標と言われる
- ☑ 初期投資額(差額) : 1,200万円  
次の合計金額  
換気計測制御盤差額500万円、交通量測定装置500万円、大気圧計200万円  
(100万 2式)

# 5.省エネ効果の目安

## 新換気制御方式の適応範囲(トンネル延長,交通量規模)

### 【検討条件2】

- ☑ 電気料金(基本料金) : 0.19万円/kW(月)  
契約電力量を、50kW×JF台数で算出
- ☑ 電気料金 : 年平均16円22銭  
東京電力 高圧電力500kW未満で、  
夏季=17円05銭、その他季=15円94銭 より、年平均電気代を算出
- ☑ FB制御方式と新換気制御方式 電力量の差 : 20%  
実証実験の結果より、新換気制御の方がFB制御より、JF運転が20%省エネ

# 5.省エネ効果の目安

## 新換気制御方式の適応範囲(トンネル延長,交通量規模)

(1) 検討結果(20,000(台/日)の場合)

4時間運転で2,500m以上、6時間運転で2,000m以上のトンネルが有効

| 換気機<br>運転時間            | TN延長(m) | ①基本料金(月/万円)<br>50kW×JF台数分 | ②電力料金(kWh/日)×16.22円 |           | 電気代(万円/20年),①+② |        | 差額合計<br>(万円/20年) | 償却年数 | 備考<br>(JF想定台数) |
|------------------------|---------|---------------------------|---------------------|-----------|-----------------|--------|------------------|------|----------------|
|                        |         |                           | FB制御(万円)            | 新換気制御(万円) | FB制御            | 新換気制御  |                  |      |                |
| 4時間<br>(フルノッチ<br>運転時間) | 1500    | 10                        | 0.39                | 0.32      | 5,121           | 4,648  | ▲ 726            | 50.7 | 1台             |
|                        | 2000    | 19                        | 0.78                | 0.65      | 10,243          | 9,296  | ▲ 253            | 25.3 | 2台             |
|                        | 2500    | 29                        | 1.17                | 0.97      | 15,364          | 13,943 | 221              | 16.9 | 3台             |
|                        | 3000    | 38                        | 1.56                | 1.30      | 20,485          | 18,591 | 694              | 12.7 | 4台             |
|                        | 3500    | 57                        | 2.34                | 1.95      | 30,728          | 27,887 | 1,641            | 8.4  | 6台             |

| 換気機<br>運転時間            | TN延長(m) | ①基本料金(月/万円)<br>50kW×JF台数分 | ②電力料金(kWh/日)×16.22円 |           | 電気代(万円/20年),①+② |        | 差額合計<br>(万円/20年) | 償却年数 | 備考<br>(JF想定台数) |
|------------------------|---------|---------------------------|---------------------|-----------|-----------------|--------|------------------|------|----------------|
|                        |         |                           | FB制御(万円)            | 新換気制御(万円) | FB制御            | 新換気制御  |                  |      |                |
| 6時間<br>(フルノッチ<br>運転時間) | 1500    | 10                        | 0.58                | 0.49      | 6,542           | 5,832  | ▲ 490            | 33.8 | 1台             |
|                        | 2000    | 19                        | 1.17                | 0.97      | 13,084          | 11,663 | 221              | 16.9 | 2台             |
|                        | 2500    | 29                        | 1.75                | 1.46      | 19,626          | 17,495 | 931              | 11.3 | 3台             |
|                        | 3000    | 38                        | 2.34                | 1.95      | 26,168          | 23,327 | 1,641            | 8.4  | 4台             |
|                        | 3500    | 57                        | 3.50                | 2.92      | 39,252          | 34,990 | 3,062            | 5.6  | 6台             |

# 5.省エネ効果の目安

## 新換気制御方式の適応範囲(トンネル延長,交通量規模)

(2) 検討結果(25,000(台/日)の場合)

4時間, 6時間運転で、それぞれ2,000m以上のトンネルが有効

| 換気機<br>運転時間            | TN延長(m) | ①基本料金(月/万円)<br>50kW×JF台数分 | ②電力料金(kWh/日)×16.22円 |           | 電気代(万円/20年),①+② |        | 差額合計<br>(万円/20年) | 償却年数 | 備考<br>(JF想定台数) |
|------------------------|---------|---------------------------|---------------------|-----------|-----------------|--------|------------------|------|----------------|
|                        |         |                           | FB制御(万円)            | 新換気制御(万円) | FB制御            | 新換気制御  |                  |      |                |
| 4時間<br>(フルノッチ<br>運転時間) | 1500    | 10                        | 0.39                | 0.32      | 5,121           | 4,648  | ▲ 726            | 50.7 | 1台             |
|                        | 2000    | 29                        | 1.17                | 0.97      | 15,364          | 13,943 | 221              | 16.9 | 3台             |
|                        | 2500    | 38                        | 1.56                | 1.30      | 20,485          | 18,591 | 694              | 12.7 | 4台             |
|                        | 3000    | 67                        | 2.72                | 2.27      | 35,849          | 32,534 | 2,115            | 7.2  | 7台             |
|                        | 3500    | 95                        | 3.89                | 3.24      | 51,213          | 46,478 | 3,536            | 5.1  | 10台            |

| 換気機<br>運転時間            | TN延長(m) | ①基本料金(月/万円)<br>50kW×JF台数分 | ②電力料金(kWh/日)×16.22円 |           | 電気代(万円/20年),①+② |        | 差額合計<br>(万円/20年) | 償却年数 | 備考<br>(JF想定台数) |
|------------------------|---------|---------------------------|---------------------|-----------|-----------------|--------|------------------|------|----------------|
|                        |         |                           | FB制御(万円)            | 新換気制御(万円) | FB制御            | 新換気制御  |                  |      |                |
| 6時間<br>(フルノッチ<br>運転時間) | 1500    | 10                        | 0.58                | 0.49      | 6,542           | 5,832  | ▲ 490            | 33.8 | 1台             |
|                        | 2000    | 29                        | 1.75                | 1.46      | 19,626          | 17,495 | 931              | 11.3 | 3台             |
|                        | 2500    | 38                        | 2.34                | 1.95      | 26,168          | 23,327 | 1,641            | 8.4  | 4台             |
|                        | 3000    | 67                        | 4.09                | 3.41      | 45,794          | 40,821 | 3,772            | 4.8  | 7台             |
|                        | 3500    | 95                        | 5.84                | 4.87      | 65,420          | 58,316 | 5,903            | 3.4  | 10台            |

# 6. 仮想トンネルでの試算

- ✓ 仮想トンネルを設定し、シミュレーションによる検討、試算を実施  
(トンネル延長:2,500[m] , 交通量:25,000[台/日] , JF:4台)

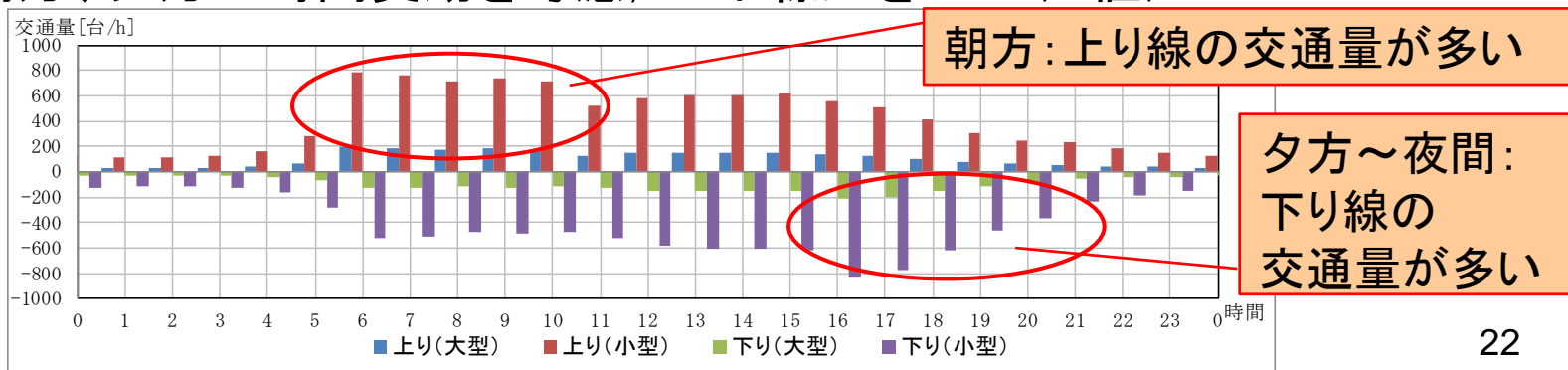
- ✓ 換気シミュレーションの概要

| 項目      | 概要         |
|---------|------------|
| 風速モデル   | 一次元非圧縮モデル  |
| 汚染濃度モデル | 一次元移流拡散方程式 |
| 交通モデル   | ミクロ交通モデル   |

- ✓ 車両走行速度:60km/h
- ✓ 大型車混入率:20%

- ✓ 交通パターン

交通量を25,000[台/日]とし「道路の交通容量日本道路協会」より地方部(幹線・平地部)の交通量の時間変動図を使用、作成  
朝方、夕方は時間変動を考慮, 上下線比を60%(D値)



# 6. 仮想トンネルでの試算結果

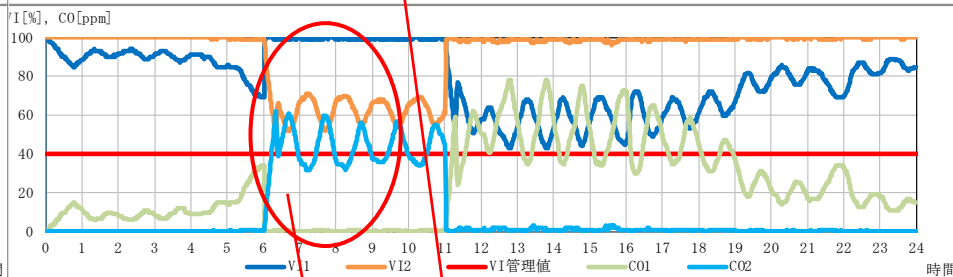
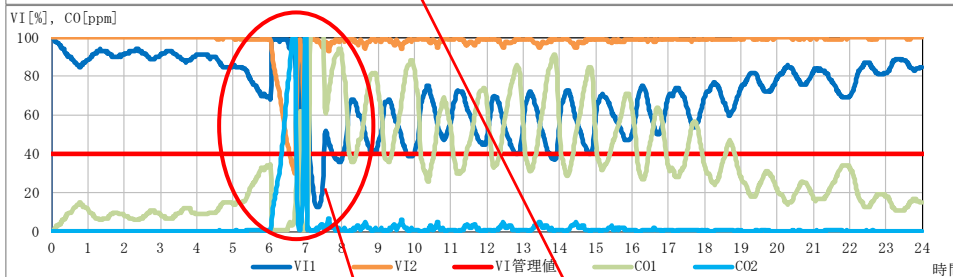
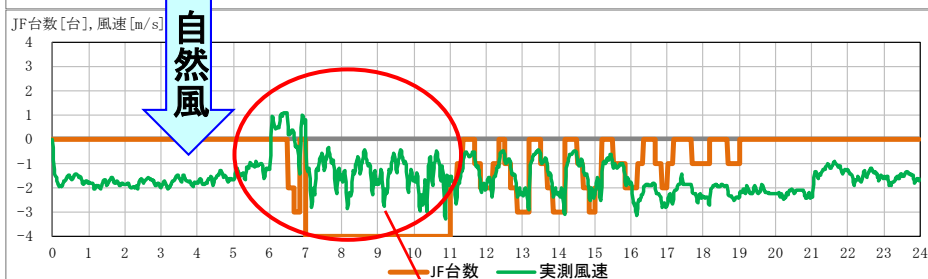
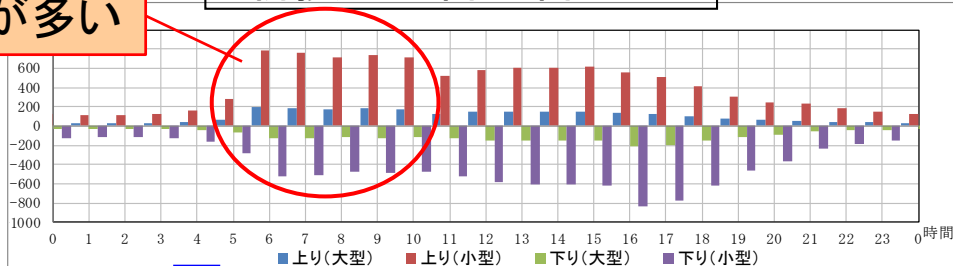
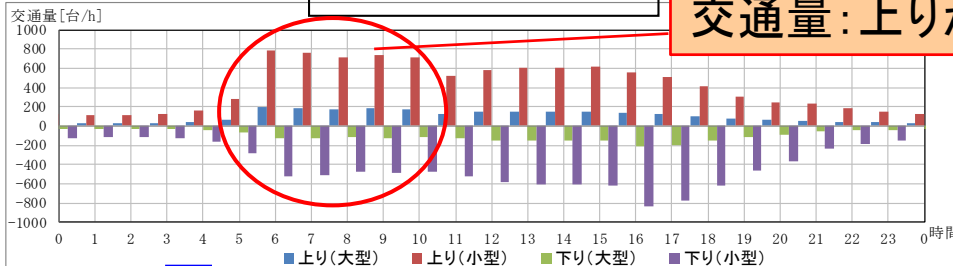
## 自然風-2.5(m/s)の例



FB制御方式

交通量:上りが多い

新換気制御方式



自然風と同方向にJF全台運転  
交通流とは逆のため、  
トンネル内環境は一時悪化

交通と同方向にJF最少運転  
トンネル内環境は良好

# 6. 仮想トンネルでの試算結果

- 自然風、換気制御方式の条件で、次の消費電力量、省エネ効果

| 自然風<br>(m/s) | 消費電力量(kWh) |       | 省エネ<br>効果 |
|--------------|------------|-------|-----------|
|              | FB制御       | 新換気制御 |           |
| 2.5          | 1267       | 875   | 44.8%     |
| 0            | 1697       | 1373  | 23.6%     |
| -2.5         | 1270       | 967   | 31.3%     |
| 平均           | 1411       | 1072  | 31.7%     |

- 省エネ効果 31.7%(平均)で、次の経済効果  
 初期投資額の償却年数 : 6年  
 20年間の経済効果 : 2,821万円

| ①基本料金(月/万円)<br>50kW×JF台数分 | ②電力料金(kWh/日)×16.22円 |           | 電気代(万円/20年),①+② |        | 償却年数 | 差額合計<br>(万円/20年) |
|---------------------------|---------------------|-----------|-----------------|--------|------|------------------|
|                           | FB制御(万円)            | 新換気制御(万円) | FB制御            | 新換気制御  |      |                  |
| 38                        | 2.29                | 1.74      | 25,828          | 21,807 | 6.0  | 2,821            |



# 7.まとめ

- ☑ 両坑口間の大気圧差からトンネル内の自然風が把握可能です
- ☑ 両坑口の大気圧差・交通換気力を把握することで、トンネル内風速が把握可能です
- ☑ 実証実験(延長約1500mの事例)
  - ・新換気制御の適用により、既設FB制御に比較して使用電力量を約2割削減できる可能性がある
- ☑ 省エネ効果の目安として、トンネル延長と交通量規模で新換気制御の適応範囲を次のように示した
  - ・20,000(台/日)の場合、2,000m以上又は2,500m以上で有効である
  - ・25,000(台/日)の場合、2,000mで有効である
- ☑ 仮想トンネルでの試算  
新換気制御方式の適用により、FB制御と比較して、次の効果が得られた
  - ・消費電力量 : 約32%削減
  - ・初期投資額(差額分) : 約6年で償却
  - ・経済効果(20年間) : 2,821万円

# 連絡先



- ☑ 国立研究開発法人土木研究所  
つくば中央研究所 道路技術研究グループ トンネルチーム  
〒305-8516 茨城県つくば市南原1-6  
TEL:(029)879-6791  
FAX:(029)879-6796
  
- ☑ 株式会社 創発システム研究所  
〒650-0035 兵庫県神戸市中央区浪花町64  
三宮電電ビル3階A-2  
TEL: (078)325-3220  
FAX: (078)325-3221