

トンネル制御への知識工学の応用と効果

Application of the Knowledge Engineering to Road Tunnel Control and Its Effects

地域社会を結ぶ幹線道路網として、大量の自動車交通需要を充足する高速道路の役割は大きい。高速道路整備事業の順調な進捗(ちよく)によって、日本列島を貫く縦貫道がほぼ完了して、近年は横断道の建設にその重心が移りつつある。一方、山岳部の道路延長の増加に伴い、道路トンネルの数量も増加し、長大化する傾向にある。道路トンネルに要求される課題としては、ドライバーに対する安全確保と経済的な換気運転が挙げられる。このニーズはトンネルの長大化するにつれてトンネル設備の大規模化とともに、さらに強くなり、長大トンネルでは安全確保と経済的な換気運転の双方を実現するための手段として、より高度な制御機能が求められるようになってきた。

これにこたえて、知識工学を応用したトンネル換気制御システムを開発した。知識工学的手法とファジィ制御手法を複合することによって、柔軟で高信頼度な実時間制御エキスパートシステムを実現している。本システムは1988年3月稼動開始以来、高い制御性とそれによる動力費用低減の稼動実績を得ている。

長 滝 清 敬* *Kiyonori Nagataki*
小 辻 親** *Chikashi Kotsuji*
八 尋 正 和*** *Masakazu Yahiro*
佐 藤 良 幸*** *Yoshiyuki Satō*
大 久 保 和 敏**** *Kazutoshi Ôkubo*
井 上 春 樹***** *Haruki Inoue*

1 緒 言

自動車利用の増大に伴い、自動車用トンネルの建設が各地で進められている。これらのトンネルでは、利用者の安全で快適な環境を確保するために、トンネル内の空気の換気が必須(す)である。機械換気の場合は、換気装置を適正に動作させるために換気制御が必要とされるが、この換気制御の目的は、必要かつ十分な換気風量を交通状況に応じた最小の消費電力で供給することにある。特に、長大トンネルでの換気効率の追求は、ランニングコストの低減に結びつき重要である。従来の換気制御方式は、定量的な演算手法によって一定時間先の交通量を予測し、この予測結果に基づいて換気すべき風量を決定するものであった。しかし、トンネル内での汚染現象に関する不確定性、特に乱流拡散効果、車両からの汚染物質排出量の的確な計測の困難性を考えると、必ずしも定量的制御が適切とは言いがたい。このようなトンネル内の空気汚染現象の不確定性に対処するために、知識工学を応用したトンネル換気制御システムを開発した。

本稿では、知識工学応用換気制御システムの構成とその論理構造を説明し、実稼動中の九州自動車道福智山トンネル(3,600 m)、金剛山トンネル(2,200 m)での稼動実績をもとに知識工学応用の効果を述べる。

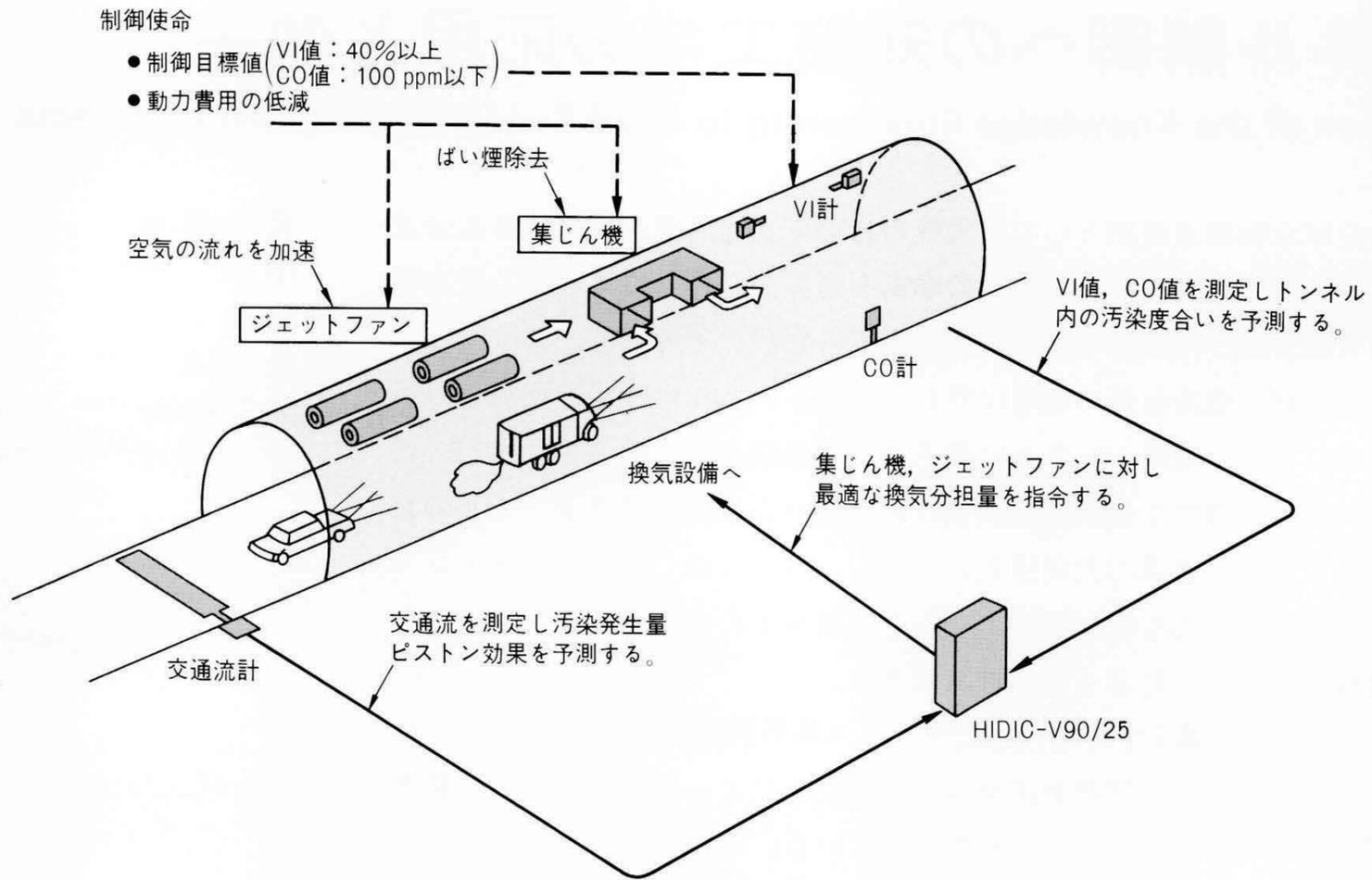
2 トンネル換気制御エキスパートシステム

2.1 換気制御の概要と使命

トンネル換気制御システムの概要を図1に示す。トンネル内には、汚染された空気の流れを出口に向かって加速するジェットファン、およびトンネルの途中で汚染濃度が許容値を超えないようにばい煙を除去する集じん機が設けられる。トンネル内の汚染度はVI(煙霧透過率)計、CO(一酸化炭素)計によって測定され、交通流計により大型車台数、小型車台数、速度が測定される。

換気制御は、これらのセンサ情報により、排ガスによる汚染発生量、車のピストン効果、またトンネル内の汚染度合いを予測し、この汚染度合いに応じて集じん機ジェットファンに対し最適な換気分担量を指令するものである。換気制御の使命は、汚染濃度が許容値を超えないこと、かつ動力費用がミニマムとなるような運転制御を行うことにある。従来は、これを定量的な数式モデルによる制御方式で対応していたが、トンネル内空気の乱流現象、車両からの汚染発生など、正確につかめない不確定要素が多いため、電力消費ミニマムとなる最適制御の実現が困難であった。その解決策として、不確定要素が多いプロセスという点に着目して、知識工学を応用した換気制御システムを開発した。

* 日本道路公団広島建設局 ** 日本道路公団福岡管理局 *** 日立製作所大みか工場 **** 日立製作所機電事業本部
***** 日立エンジニアリング株式会社



注：略語説明 VI (煙霧透過率), CO (一酸化炭素)

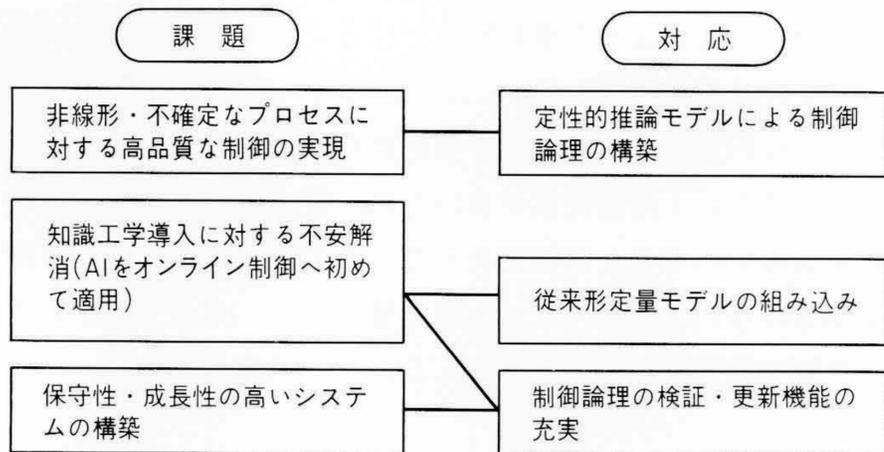
図1 トンネル換気制御システムの概要 トンネル内の汚染濃度が許容値を超えないように、ジェットファンと集じん機によって換気を行っている。

2.2 開発課題

開発課題を図2に示す。トンネル内の空気汚染現象の非線形性、さらに乱流現象や汚染負荷量の正確な把握の困難さといった不確実性に対処するために、定性的推論を取り込んだ。

今回、知識工学をオンライン制御に初めて適用するという点での不安解消策として、従来の定量形制御モデルを組み込み、複合推論形のエキスパートシステムを構成した。

また、知識処理システムには高い保守性、成長性が要求されるが、これに対してはEWS(Engineering Work Station)を活用して、制御論理・知識を容易に検証し更新できるようにした。



注：略語説明 AI (Artificial Intelligence : 人工知能)

図2 開発課題 トンネル内の空気汚染現象の非線形性に対処するため、定性的推論モデルを導入した。

2.3 制御エキスパートシステムの論理構造

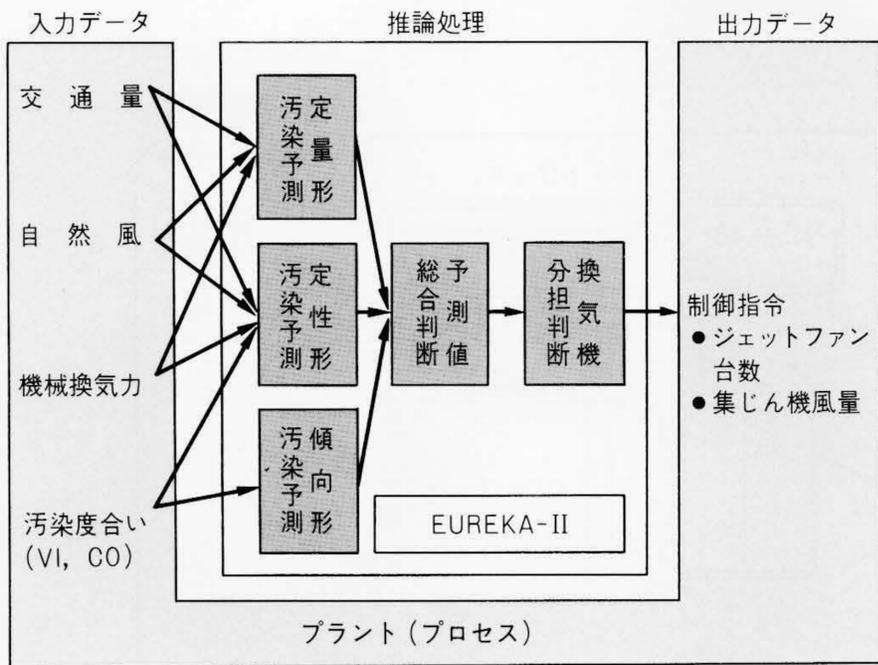
制御論理の全体構造を図3に示す。

制御の品質の決定要因はその論理構造にあるが、ここではトンネル内の汚染発生予測、最適な操作手段の選択といったプロセスを採った。

その特長は、次のとおりである。

- (1) 汚染発生が不確実な要因によって定まることから、種々の予測モデルを並行的に演算して、予測モデルの演算結果のうち最適なものを状況に応じて選択採用できる構造とした。
- (2) これらの汚染の予測モデルの一つとして、不確実な現象の記述をできるだけ的確に行うために、現象に対する定性的な知見を集約した、いわゆる定性的推論モデルを導入した。
- (3) 予見ファジィ制御の論理構造を基礎に置くトンネル換気制御の論理を開発した。予見ファジィ制御は、種々な操作案の仮定のもとに制御対象の将来状態を予測し、この中から最適な操作案を選択することを基本としている。このために、非線形現象への適合度が高い制御論理と言える。換気分担量決定での予見ファジィ制御の概念を図4に示す。

これらの制御論理の記述は、制御用計算機HIDICのための知識処理システム構築用ツールEUREKA-II (Electronic Understanding and Reasoning by Knowledge Activation-II)を用いた。このような知識処理言語によって制御論理を記述することは、さまざまな知識を容易に計算機に組み込むことができるという利点がある。



注：略語説明 EUREKA-II (Electronic Understanding and Reasoning by Knowledge Activation-II：知識処理システム構築支援ツール)

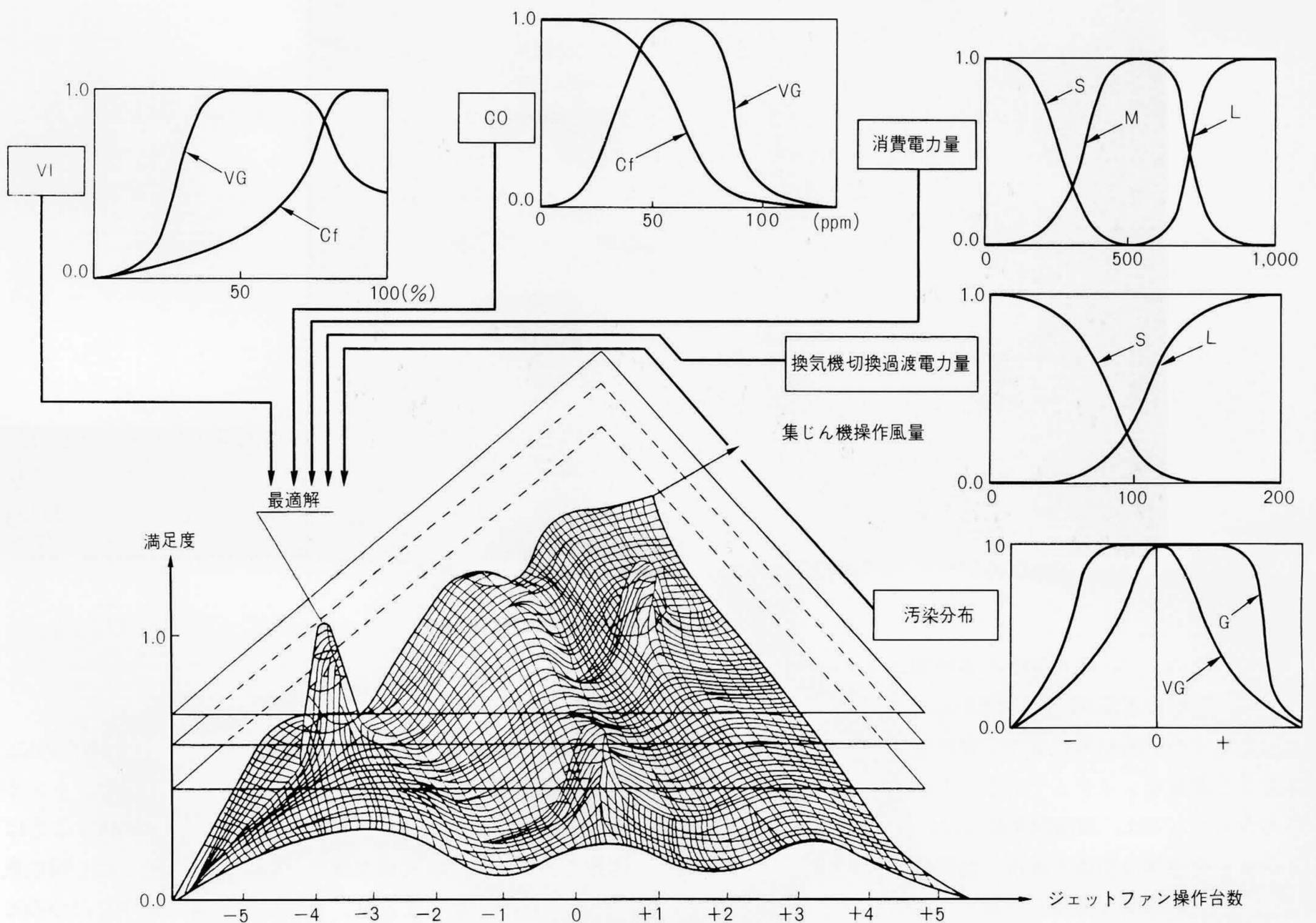
図3 制御論理構造図 複合推論形の論理構造にして、中間推論結果を見れるなど可視性を高め、信頼度の高い構成にしてある。

2.4 ハードウェア構成

本システムのハードウェア構成を図5に示す。実時間制御実行系として、HIDIC-V90/25を適用し、これに知識処理システム構築および実行ツール、EUREKA-IIを組み込んで、換気の自動制御を行わせている。一方、知識の検証・向上にはEWS ES-330を適用し、制御実行系と $\mu\Sigma$ Networkで接続し、知識の変更・更新を容易に行える構成とした。EWSにはシミュレータを組み込み、新たな知識を追加する場合や変更する場合に、実測データ入力を用いたシミュレーションによって検証した上で、実行系の知識を更新するようにして信頼度を高めてある。

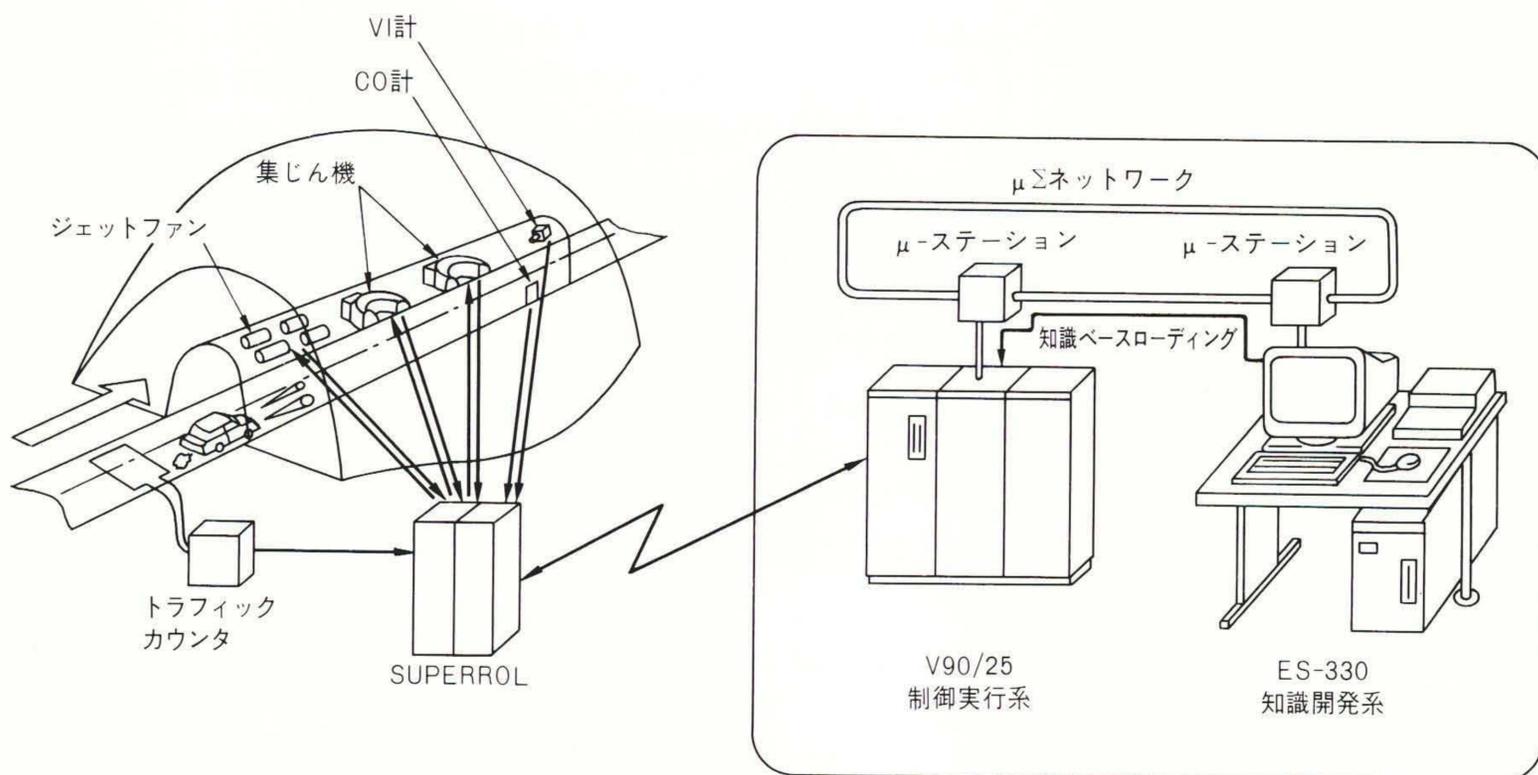
2.5 シミュレーションと実稼動システムでの運転結果

制御エキスパートシステムは、既存知識の洗練(成長)、新しく発見された知識の追加を容易に行えることが必要である。これによって、より高度で信頼性の高いシステムに近づいてゆく。また、稼動後でも、実際の制御がどのように行われているかをミクロ的、マクロ的に知ることが重要である。特に、



注：略語説明 VG (大変良い), M (普通), Cf (快適である), L (大きい), S (小さい), G (良い)

図4 換気分担量決定ファジィ推論の概念図 見通しの良さを示すVI値や消費電力量など、複数の条件が同時に良好となるように、換気機の操作量をファジィ推論で決めている。



注：略語説明 SUPERROL (遠方監視制御装置)

図5 ハードウェア構成図 実時間制御実行系として制御用計算機HIDIC-V90/25を、知識開発系としてEWS(Engineering Work Station)ES-330を適用して、知識の変更・更新を容易にしている。

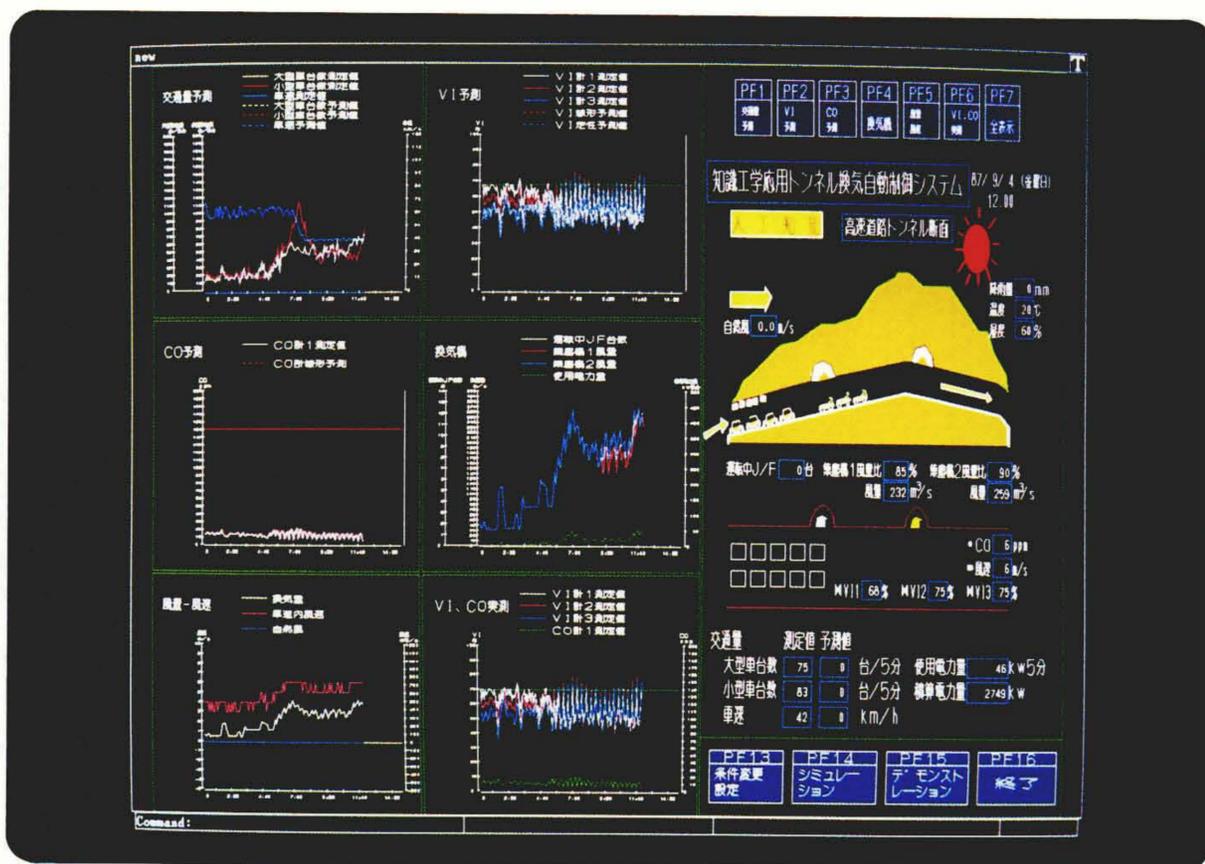


図6 シミュレーション画面例 EWS(ES-330)のマルチウィンドウ機能により、知識ベースの開発・検証が容易に行える。

本システムのように昼夜稼動の実時間エキスパートシステムでは、稼動後の運転実績を解析することが重要であり、供用開始後もその解析結果に基づく新たな知識を容易に反映できるような柔軟なシステムであることが必要である。

本システムでは、知識開発時には、EWSを用いてシミュレーションを主体に知識の獲得・検証を行い、また稼動後も実制御結果など必要な情報を収集して解析を行えるようにしている。シミュレーション画面例を図6に示す。EWSが持つマルチウィンドウ、マルチビュー機能によってトレンドグラフの拡大・縮小が行え、シミュレーション結果の解析を容易に

している。

2.5.1 検証手段

今回の知識工学応用制御モデルの効果性を確認するために、従来の定量形制御モデルとの制御結果比較を行った。トンネル換気制御システムの稼動実績の評価を定量的に行うことは困難である。それは交通流推移、自然状況がまったく同じ状態で再現しないからであり、したがって同一条件で二つのモデルを動作させることが、実質的に不可能であるからである。今回、システムの効果検証については、上記問題を踏まえ下記方法で実施した。

(1) シミュレーション

知識工学モデルと定量形制御モデルに、それぞれ同一の実測交通量データを入力として与え、シミュレーションを行い制御結果を比較した。

(2) 実稼動システムでの運転

1988年3月31日開通の九州自動車道福智山トンネル、および金剛山トンネルで、知識工学モデルによる換気運転を開始した。そして、効果検証のために7月23日から29日までの7日間は、定量形制御モデルによって換気運転を行った。

ここでは、福智山上りトンネルの運転結果を例に、知識工学モデルの効果性を紹介する。なお、比較データとしては、知識工学モデルによる運転期間の中から、定量形制御モデルの運転日と交通量推移が類似している7日間(6月18日, 19日, 20日, 24日, 7月11日, 15日, 8月1日)を選択した。

2.5.2 汚染予測の精度

図7は、知識工学モデルの制御性能を評価するために、汚染予測の精度を比較したもので、実稼動システムでのVIの予測値と実測値の相関を示している。定量形制御モデルはばらつきが大きいのに対して、知識工学モデルの場合は相関関係が高く、予測精度が高いことがわかる。予測精度の高さによって、換気機を的確に運転制御できるようになる。

2.5.3 シミュレーションによる制御結果と評価

(1) 交通量

図8は、入力として与えた交通量推移であり、現地での実測データを使用した。

(2) VI値の結果

VI値の推移を図9に示す。知識工学モデルは、VI目標値域40~70%内で安定しており、交通量増減の影響があまり見ら

れない。これに対して定量形制御モデルは、午前7時から9時までの交通量の急激な立ち上がりに追従できずに、VI許容下限値をしばしば下回ってしまっている。また、VI振幅も大であり不安定である。

(3) 換気機運転結果

換気機の運転結果を図10に示す。定量形制御モデルによる結果は、交通量の変動に追従して起動・停止を頻繁に繰り返している。それに対して知識工学モデルの場合は、換気機の起動頻度を考慮して総合的な判断を行っているため運転がスムーズである。

2.5.4 実稼動システムでの運転結果と評価

(1) VI値推移と換気機運転の比較

前述したように、実稼動システムではまったく同一の条件下で、二つのモデルを動作させることが不可能なため、条件が類似した日を選んで比較した。すなわち交通量、平均速度のパターンがほぼ同一で、自然風、天候なども近似している6月24日(知識工学モデル)と7月26日(定量形制御モデル)の制御結果を比較した。

(a) 交通量

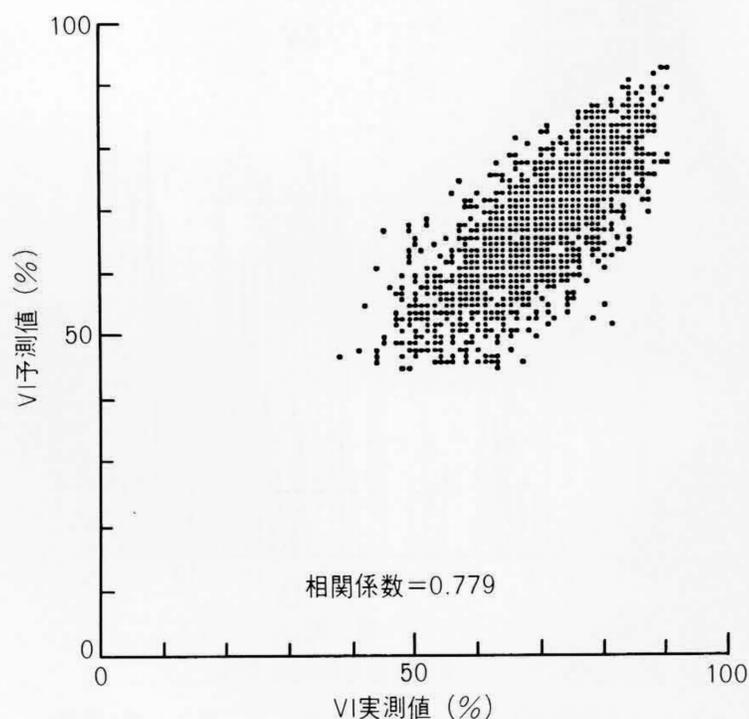
おのおのの日の交通量の推移を図11に示す。

(b) VI値の推移結果

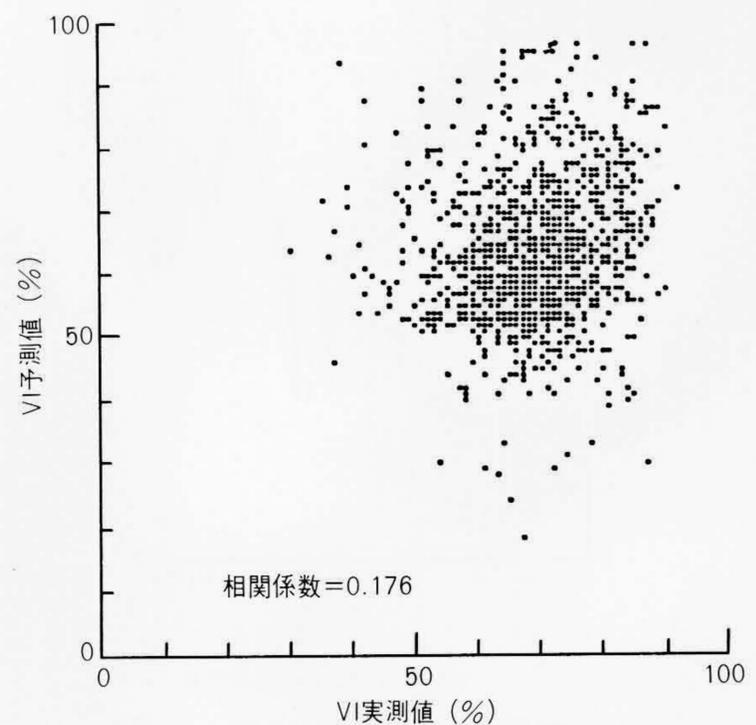
VI値の推移結果を図12に示す。VI値が許容値を超えないことを第一の制御目標としているため、両者ともVI許容値下限値以上を維持しており良好である。知識工学モデルのほうは、定量形制御モデルに比べてVI値が安定しているのがわかる。

(c) 換気機運転結果

換気機の運転結果を図13に示す。定量形制御モデルの場



(a) 知識工学モデル



(b) 定量形制御モデル

図7 実稼動システムでのVI予測～実測相関図
高いことがわかる。

知識工学モデルのほうVI予測値と実測値の相関が高く、予測精度が

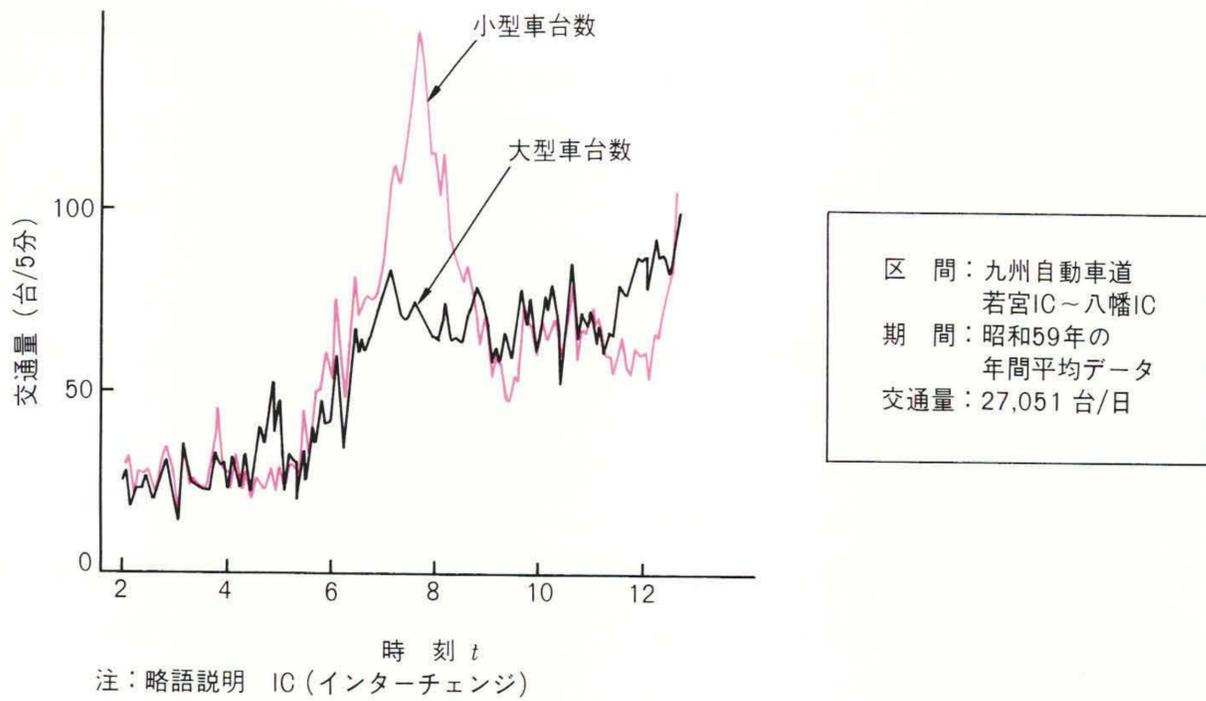


図8 シミュレーションに使用した交通量データ 交通量の変動が大きく、午前7時~9時の間が急激に増加している。

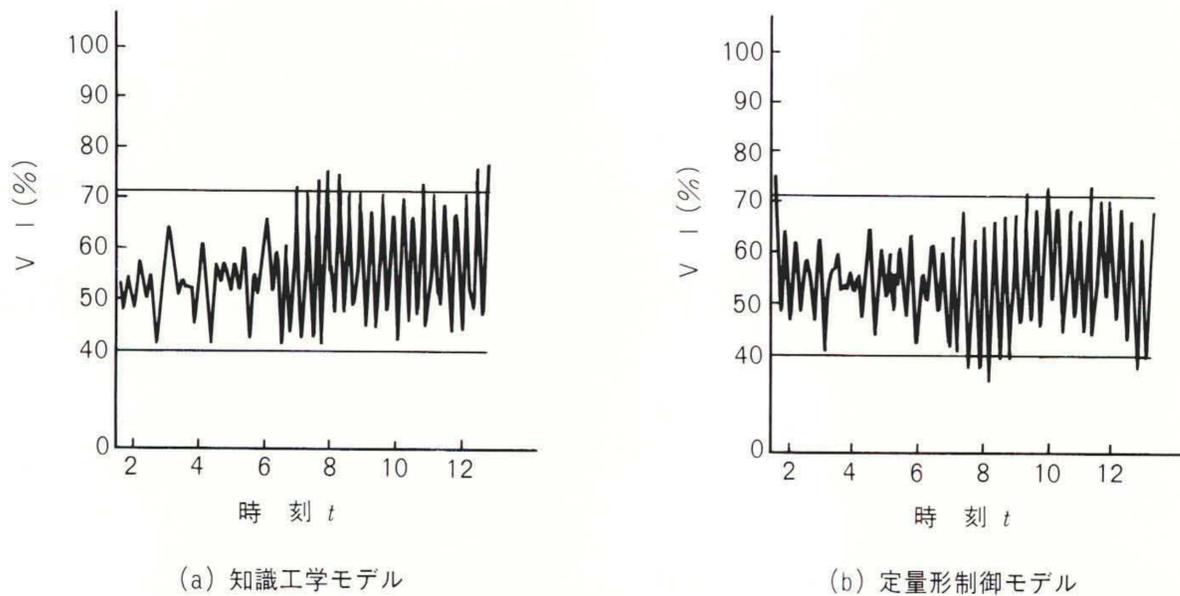


図9 シミュレーションによるVI値の結果 知識工学モデルは、VI目標値域40~70%内で安定している。

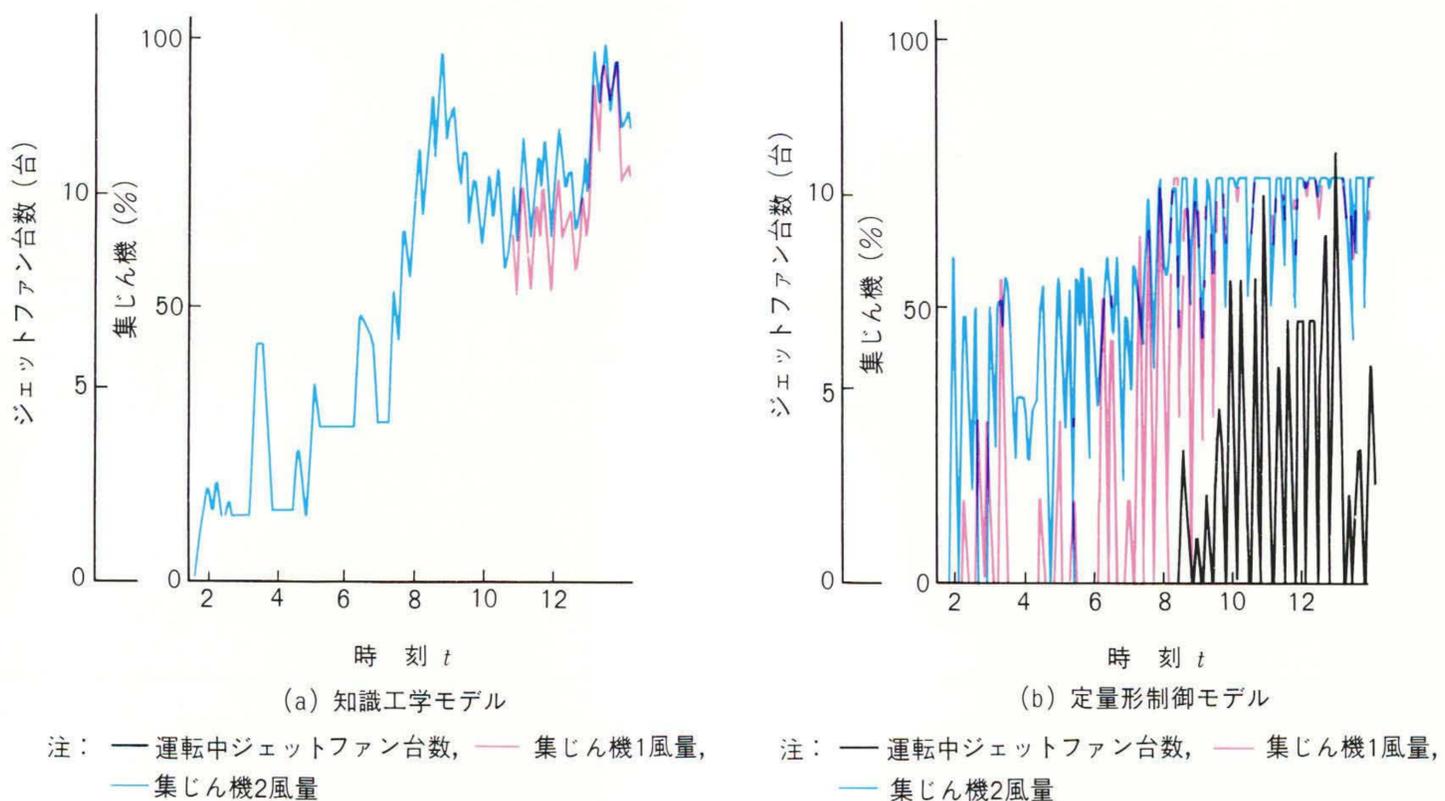


図10 シミュレーションによる換気機運転結果 知識工学モデルは、換気機の起動・停止が少なくスムーズに運転されている。

合、8時以降の交通量の変動に追従して、換気機の切り替え動作を頻繁に繰り返している。それに対して知識工学モデルの場合は、前もって換気機の運転を行うなど、長期予測も勘案した人間の思考に近い形の総合的判断によっているので、必要最少限の適切な運転となっている。その結果、前述のようにVI値も安定しており、また消費電力量も大きく低減している。

(2) VI値の度数分布

制御目標項目であるVI実測値の度数分布を図14に示す。これは制御システムの性能を示すもので、許容値を超えない範囲で経済運転を行うという意味で、VIの許容値(40%)に近い範囲の分布が大きいほど制御性能が優れていると言える。定量形制御モデルの場合は、VI値60%近傍の比較的高い値に大きく分布している。これに対し知識工学モデルの場合は、VI

値50~60%に分布が広がっており、許容値近くでの経済運転を図っていることがうかがえる。この結果、次に示すように消費電力量が大きく低減している。

(3) 消費電力量比較

経済性を評価するための目安として、車両1台、トンネル1kmあたりに要するEQ(電力量)(kWh/台・km)を比較した。知識工学モデルと定量形制御モデルのEQは次のようになる。

EQ(知識工学モデル)

$$= 9,800(\text{kWh}) / 6 \text{万}2,888(\text{台}) \cdot 3.588(\text{km})$$

$$= 0.0434 \text{ kWh/台} \cdot \text{km}$$

EQ(定量形制御モデル)

$$= 1 \text{万}3,700(\text{kWh}) / 6 \text{万}4,246(\text{台}) \cdot 3.588(\text{km})$$

$$= 0.0594 \text{ kWh/台} \cdot \text{km}$$

知識工学モデルは、定量形制御モデルに対し約26.9%の省

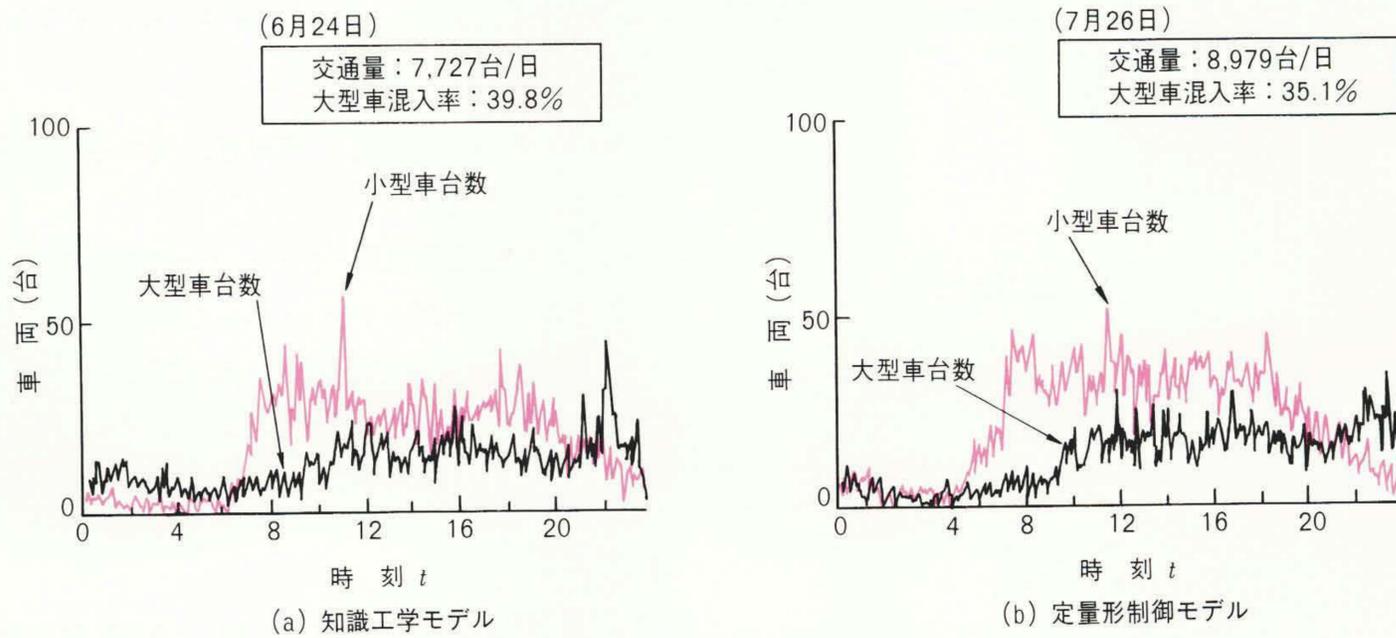


図11 実稼動システムでの交通量推移 交通量推移が類似している日を選んだ。

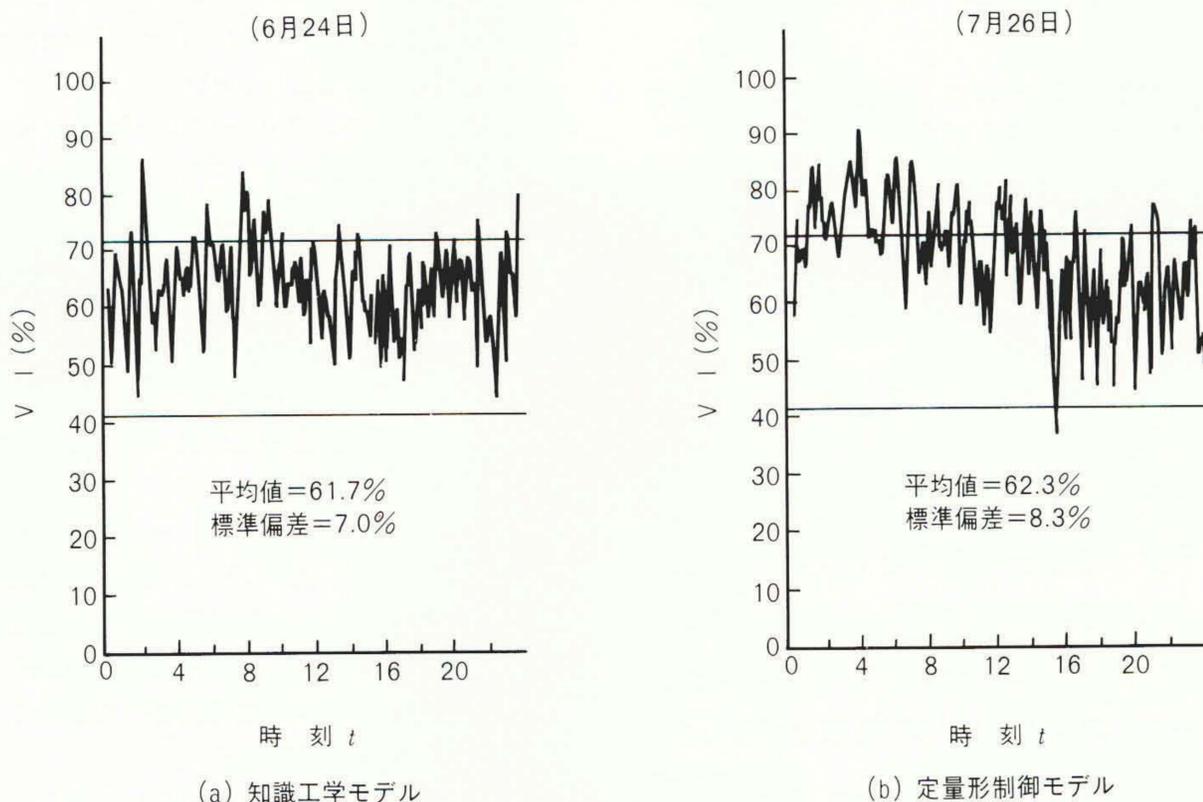


図12 実稼動システムでのVI値の結果 知識工学モデルのほうがVI値が安定している。

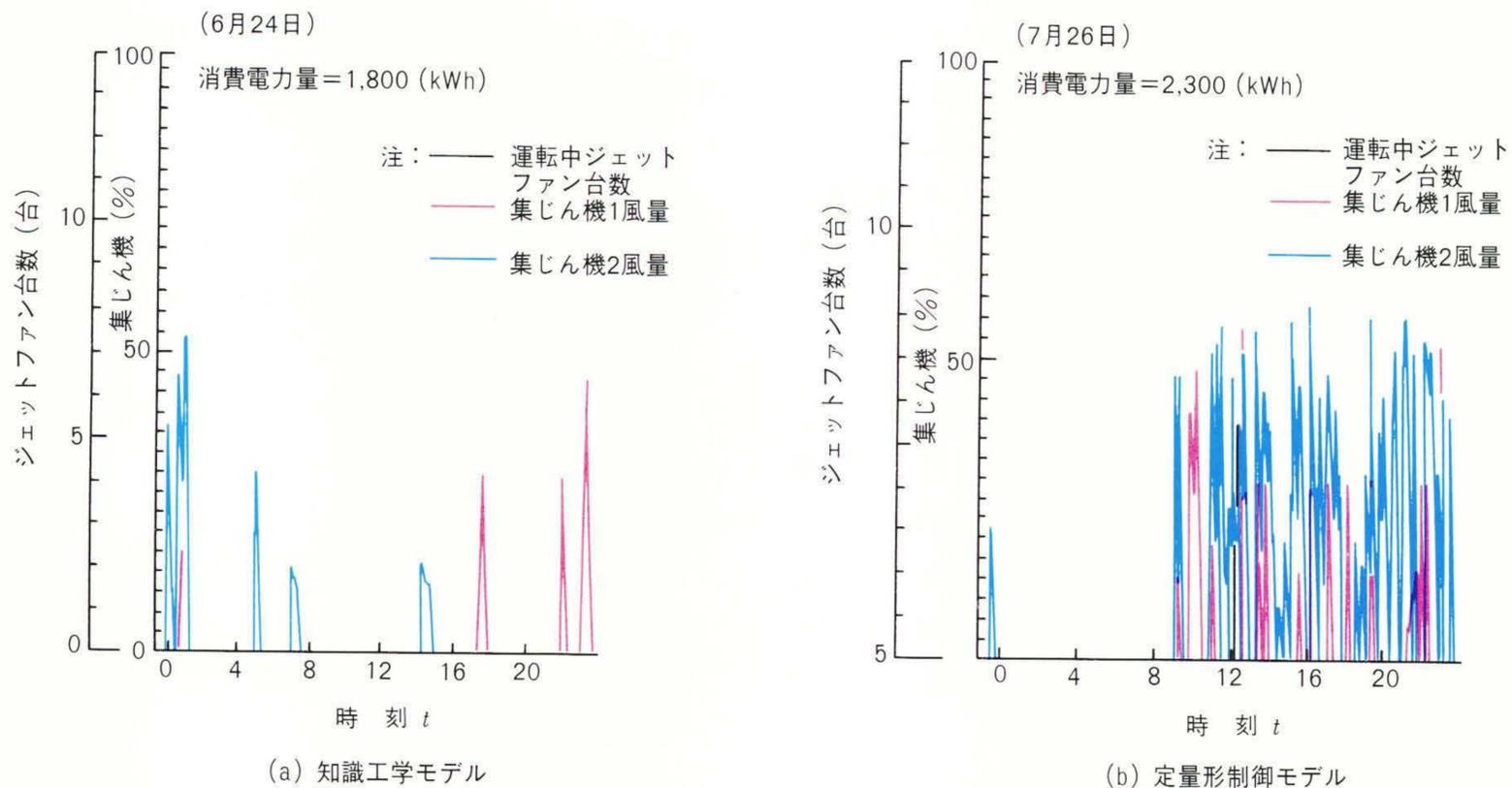


図13 実稼動システムでの換気機運転結果 知識工学モデルは、長期予測を勘案した総合的判断によって、必要最少限の運転となっている。

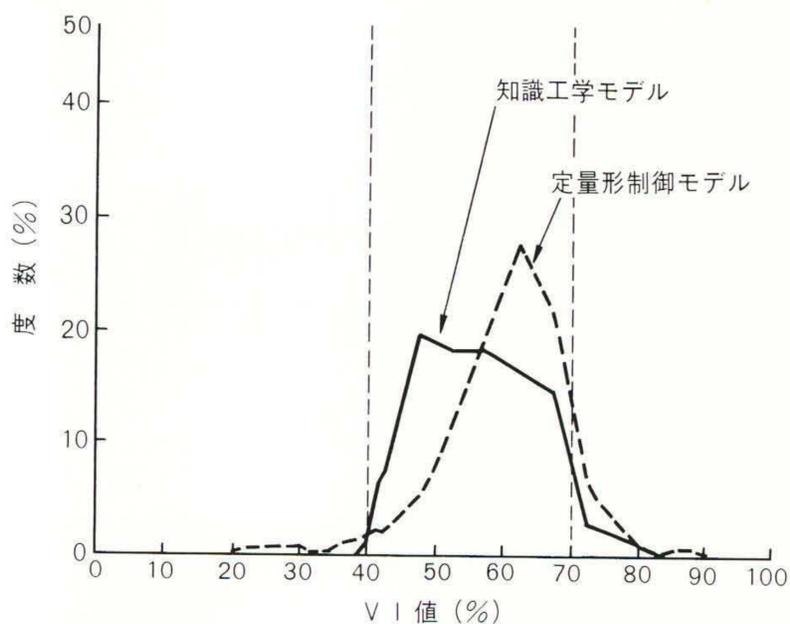


図14 VI値の度数分布 知識工学モデルは、許容値40%近くに分布が広がっており、経済運転を図っていることがうかがえる。

エネルギーが達成されている。

3 結 言

道路分野でのエキスパートシステムとして、トンネル換気制御システムへの応用例を紹介した。

トンネル内の汚染現象の不確定性に対する頑強性をねらいとして、知識工学とファジィ理論を導入したトンネル換気制御システムを開発した。知識工学応用の制御モデルと従来の定量形制御モデルに対して、シミュレーション比較実験を行い、換気機運転の柔軟性など知識工学応用の効果を確認した。また、供用中の九州自動車道福智山トンネルで、両制御モデルによる実稼動実験を行い、その解析結果によって適切な換

気運転指令、安定したVI値推移、省エネルギー効果を検証することができた。

最近の知識処理技術・ネットワーク技術の進展と道路分野での合理化のニーズとがあいまって、今後、さらに機能の高度化が要求されていくものと思われる。これらのニーズにこたえるため、知識工学、ファジィ理論、ニューロネットなどの新技術に取り組み、より高度なエキスパートシステムを開発していきたい。

参考文献

- 1) 社団法人日本道路協会：道路トンネル技術基準(換気編)・同解説(昭60-12)
- 2) J. de Kleer, et al. : Qualitative Physics Based on Confluences, Artificial Intelligence. 24.1(1984)
- 3) K.D. Forbus : Qualitative Process Theory Artificial Intelligence. 24.1(1984)
- 4) 古川, 外 : メンタルモデルと知識表現, 共立出版(昭61)
- 5) 宮本 : Fuzzy制御とその応用, 計測と制御, Vol.25, No.5(昭61)
- 6) 小林 : 多目的意志決定—理論と応用—VI, システムと制御, Vol.31, No.4(昭62)
- 7) 船橋, 外 : 知識処理システムとその構築支援ツール, 日立評論, 70, 5, 547~554(昭63-5)
- 8) 八尋, 外 : 高速道路集中監視制御システム, 日立評論, 70, 5, 489~494(昭63-5)
- 9) ファジィ制御の実用本格化—自律ロボや自動車などが先駆, 日経メカニカル, 1988.7.11, 28~36(昭63-7)
- 10) 寺内, 外 : トンネル換気制御における知識工学の導入, 日本道路公団技術情報, 第93号, 30~36(昭63-7)
- 11) 長滝, 外 : トンネル換気制御への知識工学の応用と効果, 電気学会, TER-88-27(昭63-12)
- 12) 小辻, 外 : トンネル換気制御における知識工学の応用と効果, 日本道路公団技術情報, 第98号, (平成-7)