

31. ファジィ制御を用いたトンネル換気システムの開発とその成果

清水建設(株)：*菊池 雄一・岩城 修一
河野 重行

1. はじめに

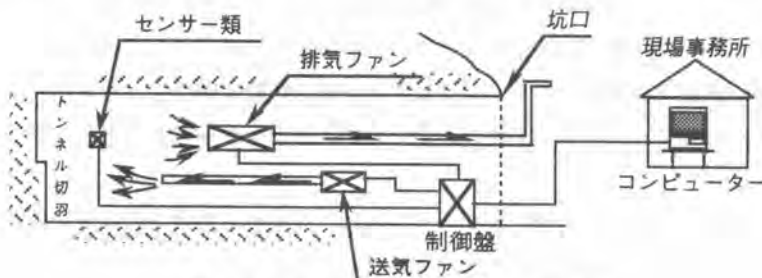
昨今の急激な地下開発の増加にともない、地下掘削技術の進歩はめざましい。特に最近では、従来以上の地下空間の大断面化、長大化、急速施工化が望まれており、設計・施工に関する技術開発には多くの投資が行われている。

NATMを代表とする一般的な山岳トンネル掘削においては発破やコンクリート吹き付けが日常的に行われ、粉塵やCOなどの有害物質が発生するだけでなく、ずり（掘削土砂）搬出用ダンプや掘削用重機などの内然機関からのNOx発生により坑内環境が悪化する。また、内然機関等からの放熱や地熱や湧水の発生により特に切羽部分は夏季において高温多湿な状態となり、作業環境は著しく低下する。

従来の換気システムは一定風量でファンを回しつづけていたが、最大風量で回し続ければ環境はよくなるが、環境良好時など換気が不必要時にも最大で回るため効率に問題があり、逆に小風量で回すと必要時に換気能力が足らなくなる。近年、これらの問題に対処するため開発されたシステムは、環境に悪影響を及ぼす要因のうち代表として粉塵量を検知し、粉塵濃度にともない、2段もしくは3段切り替え式で風量を制御している。しかしながら、他の項目は測定はしているものの直接風量制御に取り入れていないため、たとえば高温高湿度の環境下での換気システムは動作しないなど、作業環境の改善度は少ない。筆者らは、トンネルの切羽部に設置した粉塵計、CO計、温度計、湿度計の各センサーによる計測値をもとに、ファジィ理論（[1]、[2]および[3]）を用いてトンネル工専用コントラファンの最適換気風量を制御・出力するシステムを開発・実用化したので、以下にその概要を述べる。

2. システムの概要

本開発においては、換気風量の制御に取込む項目として、粉塵量やCOなどの有害物質の他に、温度や明るさなど作業環境に影響する要因を調査し、その結果、粉塵量、CO濃度、温度、湿度の4つに絞った（[4]）。トンネル切羽部に設置した粉塵計、CO計、温湿度計からの計測値をもとに、コントラファンの最適換気風量を制御・出力する。いま、例として、排気と送気の2台のファンを用いた場合のシステム



図一1 ファジィ換気システム概念図

概念図を図-1に示す。センサーからの情報が現場事務所にあるコンピュータへ制御盤を通して送られ、最適風量が計算され、制御盤を通して出力される。

ここで、制御手段としては、以下の理由により、ファジィ理論を用いた。

- 1) 複数の要因を同時に取入れて制御するため、従来制御では、大型コンピュータの必要性などシステムが複雑になり、実用的ではない。
- 2) 寒さや蒸し暑さなど人間の感覚を簡単に数式で制御することは困難であり、ファジィが適している。
- 3) トンネルの規模や場所の差異などによる制御度合いの違いに対し、ファジィ制御では簡単にチューニングできる。

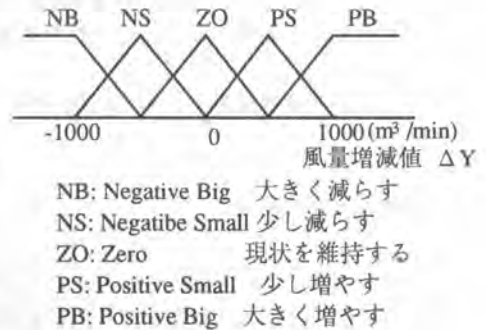


図-2 ファジィ集合の例

ファジィ理論とはカリフォルニア大学のL.A.Zadeh教授が1964年に提唱した理論であり、日本では「あいまい理論」とも呼ばれている。近年、ファジィ理論による制御が家電をはじめ、シール自動制御や仙台の地下鉄自動運転などに導入されており、その効果が確認されている。

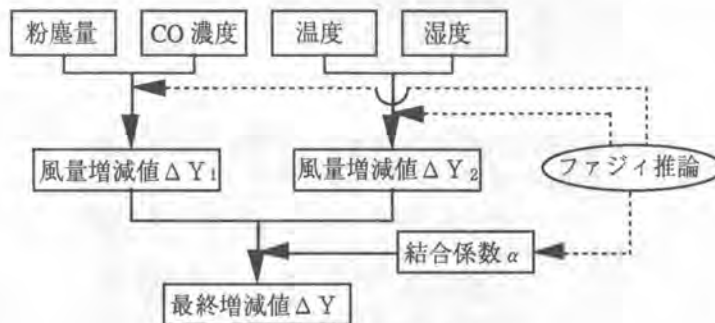


図-3 ファジィ推論フロー

本開発においては、粉塵量、CO濃度、温度、湿度およびコントラファン出力風量の現状よりの増減値 ΔY をファジィ集合で表した。例として、出力風量の増減値 ΔY のファジィ集合を図-2に示す。たとえば、PBはPositive Bigの略であり、現状より非常に大きく風量を増すというファジィ集合を表す。4つの要因の計測値からファジィ理論により最適な増減値 ΔY を出力する際、簡単のために図-3に示す様に、有害物質（粉塵とCO）希釈の為の換気出力増減値 ΔY_1 と作業環境（温度と湿度）の向上のための換気出力増減値 ΔY_2 をファジィ推論を用いて別々に計算する。ファジィ推論にはMAX-MIN合成を用いるが、紙面の都合上、詳細は割愛する。各々の増減値、 ΔY_1 および ΔY_2 は粉塵量などの計測値を別途に定めたルールに照らし合わせて推論されるが、このルールは一般に経験者や設計者の知識にもとづいて作成される。参考までに有害物質の量（粉塵量とCO濃度）と換気出力増減値 ΔY_1 に関するルールを図-4に示す。たとえば、“粉塵量PSでCO濃度NSの時の ΔY_1 がPS”は、“粉塵がやや多くてCO濃度がやや低いときは風量を今より少し増す”というルールを表す。

次に、以下の式により、 ΔY_1 と ΔY_2 を結合して、最終換気出力増減値 ΔY を算出する。

$$\Delta Y = \alpha \cdot \Delta Y_1 + (1 - \alpha) \cdot \Delta Y_2 \quad ; \quad 0 \leq \alpha \leq 1 \quad (1)$$

ただし、 α は結合係数であるが、一定値ではなく、有害物質の量と作業環境の程度により、両者のどちらかを重要視するように結合する。たとえば、 α が大きければ、有害物質排除を重視した制御となり、小さければ作業環境を重視した制御となる。ここでは、 α は図-5に示すファジィ集合で表し、 α の算定に際し、有害物質の粉塵量と作業環境の温度の2つの要因の程度から、図-6に示すようなルールをもって推論する。最終的に、出力された最適換気風量Yは、以下の式により表される。

$$\text{最適換気風量Y} = \text{前回出力の換気風量Y'} + \Delta Y \quad (2)$$

3. 実際への適用事例

本システムは、現在山梨県で施工中のリニア実験線朝日トンネルで稼働中である。当トンネルは断面積が約100m²で、延長が1800mのリニア新幹線用のトンネルである。図-1および写真-1に示すような排気と送気の2台のファジィ制御によるコントラファンを設置し、切羽部の環境を重点的に向上させることを目的とした。切羽部に設置した粉塵計、CO計、温度計、湿度計の4つのセンサーによる計測値および出力された最適風量値は写真-2に示されるように、コンピュータ画面でリアルタイムで集中管理できるとともに記録計で記録される。

制御状況としては発破や吹き付けコンクリートやズリ出しなど有害物質の急激な増加に俊敏にシステムが反応し、大風量で換気を行ない、有害物質の減少とともに風量も追従して追従性の良さが確認されている。また、夏季は午前中の温湿度ともまだ低い時間帯で粉塵など有害物質の発生が少ない時には風量が非常に少ないが、午前になり温湿度の増加とともに風量が増加し、作業環境が維持されていることが作業員の声からも確認された。これは、従来システムでは見られなかったことである。

平成4年5月のシステム導入時点から、継続してデータを収集、解析中であるが、次のような効果が期待される。

- 1) 従来の段階的にあらかじめ設定された風量を出力するのではなく、環境が劣悪時には最大風量で出力するため、環境改善の速度が速い。
- 2) 環境改善にともなって、換気風量が自動的に減少するため、エネルギーの無駄が少ない。
ただし、データ量がある程度そろい、統計処理が可能となった時点でまた、別途詳細を報告する。

		CO濃度				
		NB	NS	ZO	PS	PB
粉塵量	NB	NB	NS	ZO	PS	PB
	NS	NS	NS	ZO	PS	PB
	ZO	ZO	ZO	ZO	PS	PB
	PS	PS	PS	PS	PS	PB
	PB	PB	PB	PB	PB	PB

図-4 $\Delta Y1$ に関するファジィルール

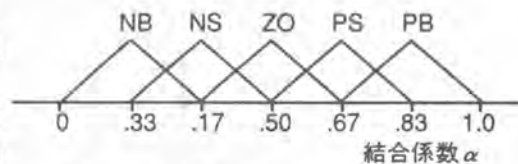


図-5 結合係数 α のファジィ集合

		粉塵量				
		NB	NS	ZO	PS	PB
温度	NB	ZO	PS	PS	PB	PB
	NS	NS	ZO	PS	PB	PB
	ZO	NB	NS	ZO	PS	PB
	PS	NB	NS	ZO	PS	PS
	PB	NB	NB	NS	ZO	PS

図-6 結合係数 α に関するファジィルール

4. おわりに

多くの苦渋作業が介在している山岳トンネル掘削工事に際し、作業環境の向上を目標にした本システムは人間尊重のシステムであるといえる。今後とも、引き続きデータを解析することにより本システムの効果をより多くの観点から把握するつもりである。

今後は、システムの一層の普及を計ることにより、多くのデータの蓄積・解析を通し、より実用的で使いやすいシステム構築を目指すものであるとともに、地下街の建設工事や建築の根切り工事などのより幅広い分野へと本システムを適用していく予定である。



写真-1 コントラファン全景

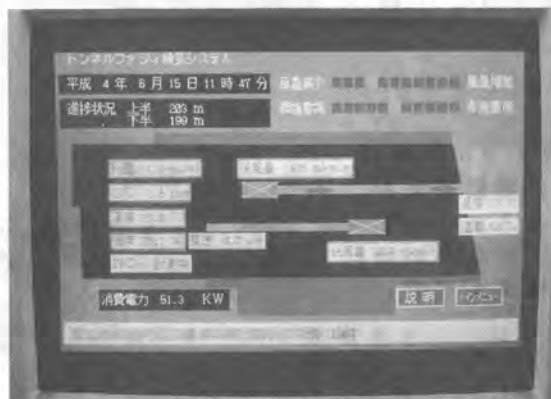


写真-2 コンピュータによる集中管理状況

5. 参考文献

- [1] 廣田薫：わかりやすいファジィシステム，株式会社テクノシステム，1989.
- [2] 三矢直城・田中一男：C言語による実用ファジィブック，ラッセル社，1989.
- [3] 菅野道夫：ファジィ制御，日刊工業新聞社，1988.
- [4] 菊池雄一・深井日出男・河野重行・岩城英朗・糸永泰彦：ファジィ理論を用いたトンネル換気システムの開発，土木学会第47回年次学術講演会