

(II-5)

地下鉄工事のサイト・オートメーションの事例紹介

Site Automation in Subway Construction

清水建設(株)○菊池雄一*

同上 寺島武嗣**

同上 小石 忠***

同上 河野重行*

By Yuichi KIKUCHI, Takeshi TERASHIMA, Tadashi KOISHI and Shigeyuki KOHNO

地下開発の需要増にともない、設計および施工に関する技術の進歩は著しい。しかしながら、建設産業は近年、3Kに代表される若者の建設業、特に現場離れや熟練工の高齢化への対処、人間尊重や環境重視などの社会のニーズの取り込み、省人化、安全性の向上、品質の向上、生産性の向上などが、大きな課題となっており、自動化・ロボット化が進められている。しかしながら、都市部における地下開発の中心的存在である地下鉄の駅部の工事は主に開削工法で行われており、工種が多岐にわたると同時に作業箇所が広く分散しているせいもあり、自動化はあまり進んでいないのが現状である。これらの現状に対し、営団7号線後楽園1工区土木工事において前述の問題に対処すべく自動化の推進を図り、山留鋼材ハンドリング装置(リキシー)、労務管理システム(板脳)、照明制御システム、ファジィ制御による換気システムの4つの自動化技術を導入し、その効果を確認した。

1. はじめに

近年、地下開発の急激な需要の増加にともない、シールド工法、NATM、TBM、ECL工法など地下掘削技術の進歩は著しい。しかしながら、都市部における道路下の地下鉄駅部の大断面掘削においては、開削工法が一般的であり、今後ともこの傾向はつづくものと考えられる。

昨今の、3Kに代表される若者の建設業、特に現場離れや熟練工の高齢化、人間尊重や環境重視などの社会のニーズ、省人化、安全性の向上、品質の向

上、生産性の向上などに対処するためには建設業の自動化の推進は必要不可欠なものとなっている。前述のトンネル掘削の各工法に対する自動化、機械化はかなり進んできている一方、開削工法における自動化は工種が多岐にわたると同時に作業箇所が広く分散しているせいもあり、あまり進んでいないのが現状である。

これらの現状に対し、営団7号線後楽園1工区土木工事において前述の問題に対処すべく以下の4つの自動化を進めており、またその効果が確認されたのでこの紙面をお借りしてその概要を報告する。

* 土木本部技術第一部 TEL 03-5441-0556

** 土木東京支店 後楽園地下鉄作業所

TEL 03-5689-2345

*** 土木東京支店 OAシステム部 TEL 03-5441-0605

2. 山留鋼材ハンドリング装置(リキシー)の導入

(1) 導入の経緯

地下鉄工事などの地下工事においては、切梁などの山留め用鋼材の運搬・設置作業は、まずクレーンで鋼材の運搬を行うが、運搬中、作業員2人が鋼材

の両端に取り付けたロープで鋼材の荷ふれ防止や角度調整を行い、吊り荷の安定を図らなければならない。また運搬後、鋼材の設置位置が高所の場合、作業員が細かい鋼材上に昇りクレーンのワイヤーを外す作業も加わり、これらの作業は、作業効率が低いうえ危険な要素も多く作業方法の改善が求められていた。また、障害物（切梁、逆打スラブ、既設埋設物など）が多く作業空間が狭いため、鋼材などの地上からのクレーン作業および地下空間におけるクレーン作業に不都合があった。このため、直接鋼材

等を掴んで運搬し、所定の位置に設置するコンパクトで機動性に富む機械が望まれていた。

本装置はこれに対応すべく開発されたもので、油圧式小型パワーショベルをベースにして重量物であるH型鋼等を直接把持するべくショベルアタッチメントを改造したハンドリングアームを備えたものである〔1〕。これによりクレーン作業に伴う玉掛けを不要とし、省力化、安全性の向上を計り、生産性の向上に寄与して行くものである。

（２）装置の概要

本装置は、油圧式小型パワーショベルをベースとしたH型鋼などの鋼材ハンドリング装置である。パワーショベルのバケットに代え、アームの先端に上下・左右・回転などの3次元的な動きが自在に行える鋼材把持装置を備えており、油圧を利用して鋼材をつかむ。切梁・腹起こしなどの運搬・設置に威力を発揮し、最大2トン（400×400H型鋼で約10メートル相当）の鋼材を運搬して高さ約4メートルの高所に設置することができる。図-1に本装置の主要の動作姿図を図-2に把持部の動きを示す。また、表-1に本装置の主要諸元・性能をまとめた。

本装置の特徴を、まとめると以下の様になる。

- ① 地下鉄工事現場など、鋼材等の搬入位置が限定されたり、クレーン作業が行いにくい狭くて低い作業空間でも、長尺重量物を効率良く安全にハンドリングでき、しかも水平・垂直・斜めなどの方向を問わず、自在に設置できる。

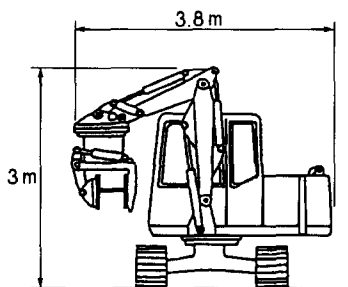


図-1 (a) 運 搬

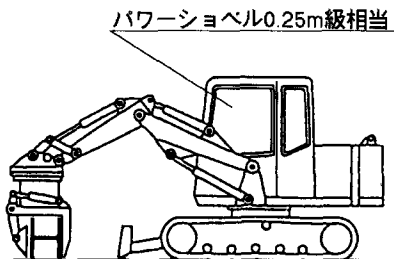


図-1 (b) 運 搬

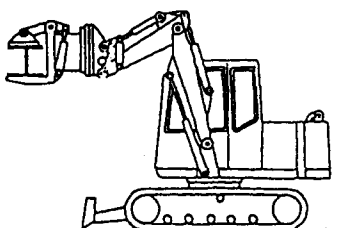


図-1 (c) 運 搬

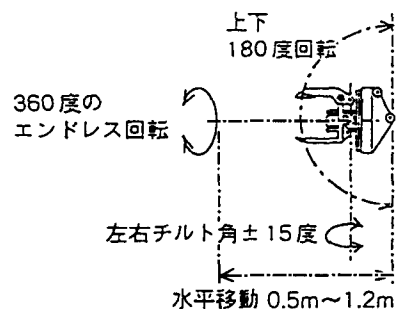


図-2 把持部の動き

表-1 主要諸元・性能

項 目	諸 元 ・ 性 能
重 量	9.3ton
寸 法	L4.8×H2.6m×W2.5m
走 行 速 度	5.0/3.7/km/hr
走 行 時 全 高	Min 2.9m
走 行 時 専 有 幅	Min 3.9m
作 業 半 径	Min 4.4m
水平部材取付高さ	-0.5m~4.0m
ハンドリング能力	Max 2 ton
把 持 部 動 作	エンドレス 360 回転
	上下 回 転 角 180 度
	左右チルト角±15 度
	水平(前後)移動0.5~1.2m
安 全 装 置	ア ウ ト リ ガ ー
	アーム自然降下防止機構
	鋼材落下防止装置
	過 負 荷 警 報 装 置
	微 速 度 運 転 機 構

- ② 切梁・腹起こしなどの運搬・設置で、クレーンによる不安定な吊作業がなくなることや、パワーショベルの運転速度の1/10という微速度運転ができるので、安全性が大幅に向上する。
- ③ パワーショベル同様、アーム・把持部の操作は2本のレバーだけで行えるので、1～2日の訓練だけで容易に操作方法をマスターできる。
- ④ 操作レバーを切り替えると、鋼材を把持した状態のまま手で押して動かすこともでき、鋼材の微妙な位置合わせを行う場合には、機械操作と手作業を組み合わせることも可能となる。

(3) 導入効果について

本装置を1992年1月に制作し、本地下鉄駅部工事に導入し、その有用性を確認した。写真-1に本装置の作業状況を示す。効果の詳細については紙面の都合上、ここでは省略するが、講演において述べる予定である。

今後、本装置を土木工事だけでなく建築の山留め工事においても採用していくとともに、擁壁の石積みや作業パネル型枠の運搬・取り付け、さらにはヒューム管の設置や資材の運搬・整理など広範な作業に適用できるように、把持機構の開発を行う計画である。

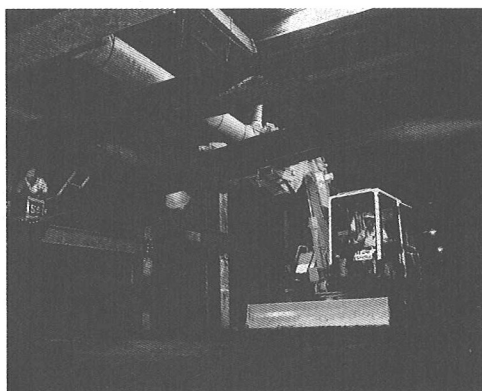


写真-1 切梁設置位

3. 労務管理システム（板脳）の導入

(1) 導入の経緯

当現場では工事開始当初に、板脳の盤面に作業内容チップとその作業に従事する作業員のチップを貼るだけで、日報データ（作業内容・職種・人数・開始終了時間）がパソコンに入力されるシステムを導入した。しかし、現場近くに板脳の設置場所がなく現場から離れた事務所の下に置いた為、作業進行に合わせたチップの移動が出来なかった。また、開始当初は毎日の新規作業員が多くデータ登録・チップ作成が遅れた。このため使える日報データが作成できなかったので作業員データの管理部分のみシステムを動かすにとどめた。

本システムはその後、登録した作業員のデータと板脳を使って坑内入場者の管理と照明制御をしたいという現場の要望があり。また、導入時期には坑内出入口の近くに板脳の設置場所を確保できことより開発が始まった。

(2) システムの概要

本システムの機器構成は、板脳 (BN-6: 内田洋行) とそれを制御するパソコン (PC-386M: EPSON) そして作業員データを管理するパソコン (C-250LT: PFU) である。

板脳とは、ホワイト・ボードの盤面にセンサーを持った新しい形状の入力装置の商品名であり、I Cメモリーチップを盤面に貼付け電波でデータを読み書きするものである。

坑内出入口の近くに設置した板脳には、ブロックコード、階層コードを持ったチップを貼付け盤面に坑内の作業エリアを割り付ける。作業員は坑内に入るとき自分のチップを作業するエリアに貼付け、坑内から出たとき盤面からチップを外す。

事務所に設置した制御パソコンはモデム間通信で常に板脳を監視し、チップの取外しに応じ作業エリアの人数を変更する。監視時画面は坑内作業エリア割り付け図を表示し、作業員のいるエリアにはヘルメット記号と人数を表示する。ヘルメットをクリックすると窓が開き人数分の氏名・会社名・貼付け時刻を確認できる。氏名・会社名は作業員データ管理パソコンが送信したデータから作業員チップの登録コードで検索し表示する。貼付け時刻は板脳からチップデータと共に受信する。なお、このパソコンで次の4章での照明制御装置も同時に監視制御している。

作業員データを管理するパソコンは制御用パソコンの横にあり、新規作業員のデータ登録・会社別作業員名簿整理・有資格者の検索等処理する。新規作業員データはその都度RS-232Cケーブルで制御用パソコンに送信する。この時、一緒に新規作業員のチップを作成する。

以上が本システムの概要である。

(3) 導入効果について

現在は導入直後であり、これから効果を把握していく予定である。前のシステムも今回のシステムも「チップを板脳に貼付ける」のがポイントである。

今回は板脳の設置条件がよく、かつ板脳が照明のスイッチになっているので現在順調に運用されている。

今後、当現場の実績をもとに同種工事には展開していく予定である。

4. 照明制御システムの開発

(1) 導入の経緯

一般に地下鉄駅舎部は幅が広く、また数層の階からなっており、全体的な掘削容積はトンネルなどの線形構造物に比べて大きい。特に当地下鉄工事においては土圧への対処から5層の全スラブを逆巻工法で打設している。したがって各階は逆巻床版で区切られており、数段掘削時には前回打設した逆巻床版の下で掘削していることになり、掘削中はその床版より上の階は特に主だった作業が行われていない。

従来の照明システムでは常時点灯しており、このような逆巻床版で区切られ、作業が行われていない階も掘削箇所と同様に点灯していることは効率的ではない。一般的に、全スラブの構築完了時には、全消費電気量の約2/3が照明に対するもので、残りが動力に対するものである。したがって、不必要な箇所の照明を消灯させることはエネルギーの有効活用から非常に有効である。本システムは、前述した労務管理システム（板脳）と組み合わせ、作業が行われている箇所のみを照明を点灯させ、それ以外は常時点灯している保安灯のみとすることにより、照明の効率を向上させる。本システムは平成4年9月に導入し、現在稼働中である。ここに、その概要を紹介する。

(2) システムの概要

当地下鉄の掘削状況の概念図を図-3に示すが、1ブロックの長さを約20mとし、深さ方向に1ブロックのB1階、1ブロックのB2階のように各区分を規定し、この各々の部分を照明制御の対象区分とする。板脳と制御コンピューターの配置に関する概念図を図-4に示す。作業員は現場に入る前には現場上の詰所に設置された板脳で自分の作業予定場所にチップを貼り付けることにより、作業員の情報が専用回線を通して事務所に置かれたパソコンに送られる。パソコンでは労務情報として記録するとともに、チップの貼られた場所に対する照明制御信号が出力され、専用回線を通して詰所にあるLANサーバーに送られる。その後、各階に設置されたLANステーションを通して、各区分に設置された分電盤(LM盤)に信号が送られ照明がONになる。作業終了

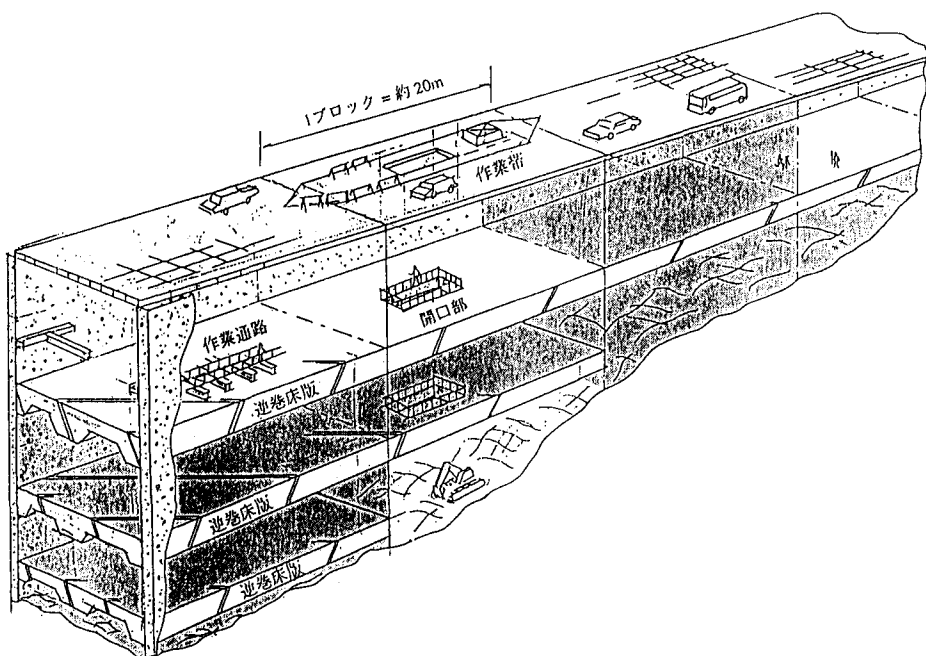


図-3 照明制御概念図

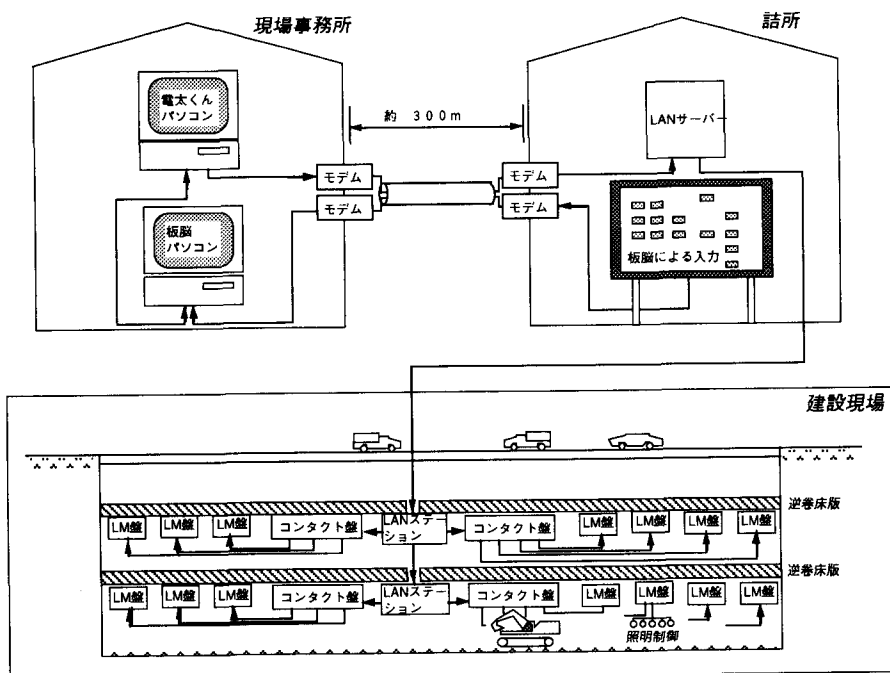


図-4 照明制御システム配置図

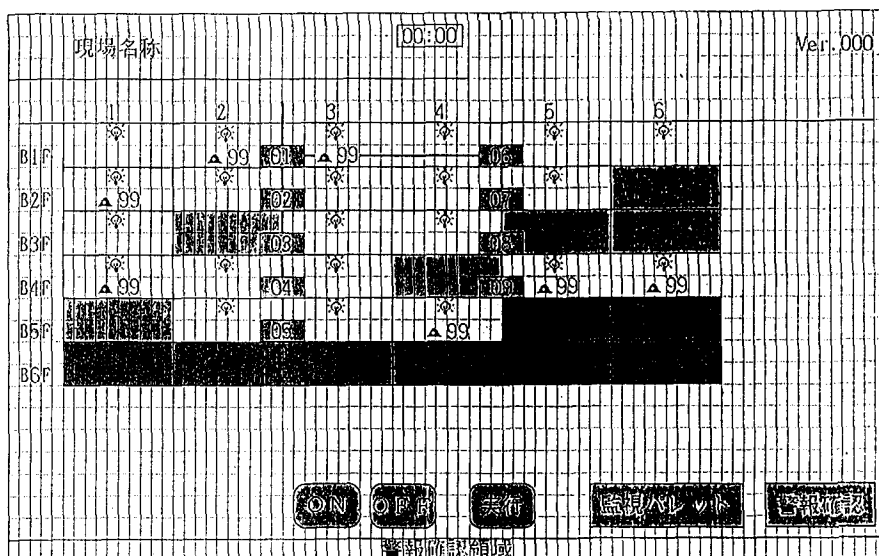


図-5 照明制御集中管理画面

後は、作業員が地上に上がり、板脳からチップをはずすことになるが、対象区分においてすべての作業のチップがはずされた状態(誰もいなくなった状態)になり、はじめて照明が自動的にOFFになる。また照明のON、OFFは便宜上、分電盤で直接マニュアルで操作も可能である。ただし、安全のために保安灯は照明制御とは別回線で常時点灯している。

以上の照明制御状況は事務所にあるパソコンで常時集中管理されており、参考までにメイン画面を図-5に示す。画面上で照明がついているところは色およびランプの絵で表示され、また、作業員がいる場所はヘルメットの絵で表示される。したがって、作業員がいるため照明がついている場所と作業員がいないのにマニュアル操作で照明がついている場所の区別ができる。また、ヘルメットの絵をクリックすれば、その場所にいる作業員の情報が得られる。

(3) 導入効果について

現在は導入直後であり、これから本格的に効果を把握していく予定である。しかしながら、板脳に関してはすでにその効果が確認されており、また、作業員も慣れてきている。本システム導入のメリットとして、エネルギーの効率使用はもちろんのこと、

作業管理の面からも、チップを貼らなければ照明はつかないため作業員はチップを貼らなければならず、結果として作業員の教育におおいに貢献するとともに、精度の高い労務管理が実現するものと確信する。

5. ファジィ制御による換気システムの導入(予定)

(1) 導入の経緯

開削工法による地下鉄工事においては、地山掘削のためのバックホーなどの内燃機関から発生するNoxやCOなどの有毒ガス、はつり作業にともなう粉塵、覆工板を通しての地上からの車の排気ガス、コンクリートの硬化熱や水蒸気による霧の発生にともなう視界の低下など作業環境に悪影響を及ぼす要因は非常に多い。しかしながら、従来の換気においてはこれらの各々の影響について考慮せず、一定風量を送っていたため必ずしも効果的な換気ではなかった。

ところで、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

削用重機などの内燃機関からのNOx発生により坑内環境が悪化する。また、内燃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。NATMを主とした山岳トンネル掘削に対し、筆者らは、トンネルの切羽部などに設置した粉塵計、CO計、温度計、湿度計の各センサーによる計測値をもとに、ファジィ理論を用いてトンネル工事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〔2〕、その効果が充分確認されたのでそのシステムを同様の作業環境の低下をもたらす地下鉄の開削工事に適用することを検討した。以下に、参考までに、山岳トンネルの山梨県のリニア朝日トンネルに用いられた換気システムの概要を述べる。

（２）システムの概要

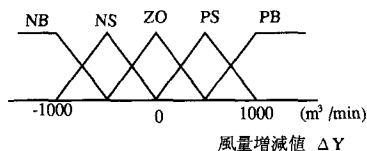
換気風量の制御に取り込む項目として、粉塵量やCOなどの有害物質の他に、温度や明るさなど作業環境に影響する要因を調査し、その結果、当トンネルにおいては粉塵量、CO濃度、温度、湿度の４つに絞った。トンネル切羽部に設置した粉塵計、CO計、温湿度計からの計測値をもとに、コントラファンの最適換気風量を制御・出力する。センサーからの情報が現場事務所にあるコンピュータへ制御盤を通して送られ、最適風量が計算され、制御盤を通して出力される。

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〔3〕、〔4〕、〔5〕を用いた。

- ① 複数の要因を同時に取り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。

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、シールド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。

本システムにおいては、粉塵量、CO濃度、温度、湿度およびコントラファンの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-6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-7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）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。また、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



NB: Negative Big 大きく減らす
NS: Negative Small 少し減らす
ZO: Zero 現状を維持する
PS: Positive Small 少し増やす
PB: Positive Big 大きく増やす

図-6 ファジィ集合の例

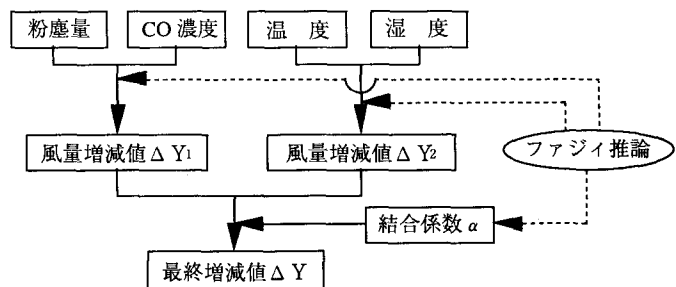


図-7 ファジィ推論フロー

塵量などの計測値を別途に定めたルールに照らし合せて推論されるが、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。そして ΔY_1 と ΔY_2 を結合して、最終換気出力増減値 ΔY を算出するが、結合係数は一定値ではなく、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ファジィ推論を用いて結合する。ただし、ここでは詳細は省略する。最後に、出力すべき最適換気風量は前回出力の換気風量 Y' に ΔY を加えることにより、求められる。

(3) 適用に際して

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。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、大風量で換気を行い、有害物質の減少とともに風量も追従して減少する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、午後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。

多くの苦渋作業が介在している地下鉄開削工事に際し、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。現在、地下鉄開削工事の特殊性を環境データをもとに解析中であり、地下鉄用のシステムとして改善を加える予定でいる。詳細は、導入後、別途報告する。

6. おわりに

地下鉄の開削工事において現実に導入(一部予定)されている4つの自動化事例について紹介した。前述したように、開削工事は他工法比べて作業箇所が分散し、また工種が多岐にわたっているため、従来自動化の導入が遅れていた。当現場においても、導入当時は作業員の間に多少戸惑いが一部見受けられたが、現在では各技術とも充分作業員に浸透しており、効果が発揮されている。

今後とも自動化を積極的に取り入れ、生産性の向上、安全性の向上、土木のイメージアップなどを推進していきたいと考えている。

最後に、これらの自動化技術の導入の機会を提供していただいた帝都高速度交通営団後樂園工事所の各位に対し、感謝の意を表する次第である。

参考文献

- [1] 菊池雄一他、山留の鋼材ハンドリング装置の開発、土木学会第47回年次学術講演会、平成4年9月
- [2] 菊池雄一他、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、平成4年9月
- [3] 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
- [4] 三矢直城、田中一男、C言語による実用フジブック、ラッセル社、1989
- [5] 菅野道夫、ファジィ制御、日刊工業新聞社、1988

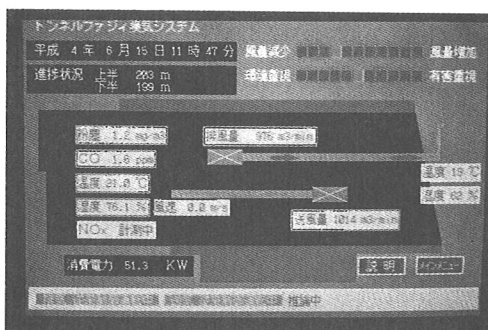


写真-2 トンネル坑内環境集中管理画面