佐々木 久郎¹ 宮 腰 宏²
小野塚 徹³ 木 下 博⁴

A Prediction System for Airflow Temperature and Humidity in Underground Ventilation Networks

by Kyuro SASAKI¹, Hiroshi MIYAKOSHI¹, Toru ONOZUKA² and Hiroshi KINOSHITA³

1. Mining College, Akita University, Akita 010
2. Mining Section, Hanaoka Mining Co., LTD., Odate-shi, Akita 010
3. Mineral & Energy Resources Dept., Dowa Mining Co., LTD., Chiyoda-ku, Tokyo 100

This paper describes a new practical method for predicting environmental airflow-conditions, such as temperature and enthalpy, in underground ventilation networks. The calculation code "MIVENA" for mine ventilation networks has developed by authors using with a nodal head method^{1,7)} and the temperature-humidity prediction method. The equations and schemes fitted to the network calculations are presented clearly as a general form. The system was mostly compared with Amano et al.'s system^{1)~3)} and differences between two systems are discussed.

The prediction method is that the environmental airflow-conditions on nodes are calculated from inlet nodes to downstream nodes and ones on the fan node can be calculated at last. The environmental conditions of inflow airstream on airways connected to a node are calculated from upstream to downstream with a kind of one dimensional numerical-difference methods by dividing the airways to 5 m long spans before the calculations of the node.

The temperature and humidity on nodes consisting of the recirculation loop can be calculated by using a function which indicate a approximation degree of the calculation result. When absolute humidity in airflow becomes larger than saturation absolute humidity on airways or nodes, the methods and calculation schemes for revisions of temperature and humidity are also presented. These methods are effective for calculations on exhaust airways which are influenced by auto-expansion with temperature reduction.

The present calculation system was successfully applied to the Amano et al.'s network example, the Ezuri Mine and the Fukasawa Mine run by Hanaoka Mining Co. LTD.. Fan driving maps for main fans controlled by thyristers, which indicate the total inlet airflow-quantity on several seasons against the thyristor frequency, were made to find out the optimum driving thyristor frequency on each season.

KEY WORDS: Mine Ventilation, Network Analysis, Temperature, Humidity, Nodal Method, Personal Computer

1. 緒 言

高温岩盤を伴う鉱山あるいは地下利用施設では、適正な労働環境の確保や効果的な高温対策を行う上で通気流の温度・湿度などの環境予測は工学的に重要である。

このような通気風量や気流温度・湿度などに関する地下風道網

の環境予測を行うためには、ネットワークに対応した適切なモデル化および計算時間などを考慮した実用的なシステム構築が必要である。とくに、自然通気の影響が大きい通気網においては、通気風量および温度・湿度等を的確に予測するために、風道ネットワーク上の熱・物質（水分）移動と風量解析を相互に連結した解析システムを必要とする。

過去、単一風道についての温度・湿度解析法について数多くの報告があり^{5)7)~9)}、さらにこれらの成果を統合化した通気網における温度・湿度の解析システムが提案されている。これら解析システムのうち代表的なものとして、Amanoら¹⁾、天野ら²⁾³⁾およびDankoら⁶⁾のものが挙げられる。天野ら¹⁾²⁾のシステムは全般的にみてバランスよく構成されているように思われる。しかしな

* 1991年10月14日受付 1992年2月3日受理 資源・素材学会平成元年度春季大会および平成元年度東北支部秋季大会にて一部講演

1. 正会員 工博 秋田大学講師 鉱山学部資源・素材工学科
2. 正会員 工博 秋田大学教授 鉱山学部資源・素材工学科
3. 正会員 花岡鉱業(株) 鉱山部次長
4. 正会員 同和鉱業(株) 資源事業本部資源開発事業部

キーワード: 鉱山通気, 通気網解析, 温度, 湿度, 節点法, パーソナルコンピュータ

がら、通気網における温度・湿度解析システムの記述に関し、単一風道に関する解析基礎式は明確に記述されているものの、風道ネットワークの解析上必要とされる解析手法および計算スキームが必ずしも明確に記述されているとはいえない。また、ネットワーク解析における逐次近似過程の妥当性とその収束性についての検討が十分ではないように考えられる。なお、本論文作成時期に、井上・内野ら¹⁶⁾も温度・湿度解析システムを口頭発表しており、パーソナルコンピュータを用いたより実際のネットワーク解析システムの構築がなされてきている。

本論文は、通気網における温度および湿度の解析システムに関し、主に風道ネットワークに対応した温度・湿度の予測解析システムに必要な手法を明確に提示することを目的としたものである。とくに、天野ら¹⁾²⁾のシステムとの対比から、その相違を明らかにし、彼らが用いた通気網解析例に本システムを適用し、その妥当性を比較検討した。また、花岡鉱業(株)における深沢鉱山および餌釣鉱山の通気管理に実際に適用し、操業上重要と考えられる入気風量の年間変動およびサイリスタによる主要扇風機的主軸回転数制御に対応した運転マップの作成を試みたことが本報告の特徴である。なお、著者らが過去6年間にわたって独自に開発を行ってきた通気網解析システム“MIVENA”は、既報¹⁷⁾で述べたマトリックス節点法による風量解析と共に、本報告で述べる風道ネットワークに対応した気流温度・湿度の解析システムを統合したもので、現場技術者が容易に使用できるようにメニュー、スプレッドシート、グラフィックスおよび警告文等を適宜挿入した解析システムである¹⁴⁾。

2. 通気網における温度・湿度解析システム

2.1 通気網解析全般にわたる解析手順

通気網解析においては、厳密な意味で気流温度あるいは自然通気圧を既知の確定入力データとすることはできない。これは、通気風量と気流の温度・湿度が自然通気圧を通じて相互依存関係をもっているためであり、とくに高温岩盤内に掘削された傾斜風道を含む場合にはその関係が強い。従って、通気風量解析と温度・湿度解析を交互に繰り返しながら、それぞれを収束に導く逐次近似解法を行うシステムが合理的であると推測される。

以上の点を考慮して開発した通気網解析システム“MIVENA”における通気風量および気流温度・湿度予測のための基本的な解析手順を以下の(1)~(6)に示す。

(1) 各風道における年平均の気流温度・湿度の初期設定(本システムではすべて坑外の大気温度・湿度に設定)および節点圧力の初期設定¹⁷⁾をそれぞれ行う。

(2) マトリックス節点法を用いて、節点圧の逐次近似解析を行い、各風道における年平均の通気風量を求める¹⁷⁾。

(3) 各風道および節点において、年平均の風道気流温度・湿度に関するネットワーク解析を行う(2.7 a)~d)参照)。

(4) 年平均の通気風量および気流温度・湿度が一定値に収束するまで、(2)および(3)の解析を繰り返し、年平均の通気量および気流温度・湿度を収束させる(気流温度の修正方法および収束条件は2.8 e)を参照)。

(5) 各風道の年平均気流温度からの季節ごとの温度変動分を算定し、(4)で確定した年平均気流温度に線形加算することによって予測対象とする季節の風道気流温度を計算する(2.8参照)。

(6) (5)によって得られた対象とする季節の風道気流温度分布を用いて、通気網解析を行うことにより、その季節における各風道の風量を予測する。

以上(1)~(5)の概略の解析フローは天野ら¹⁾²⁾とほぼ同一である

図1 節点間の接続を表す模式図および主な記号の定義

が、本システムでは、主要扇風機の各季節ごとの運転マップの作成を1つの目的としていることから、(5)および(6)による季節ごとの風量変化を重視する構成とした。

なお、本システムでも、天野ら¹⁾²⁾と同様に各季節ごとの気流湿度の予測を実施していない。この理由としては、湿度が蒸発および凝縮を伴う非線形相変化現象に支配されるため、年平均の解析結果に線形加算することがきわめて困難であるためである。従って、本システムの湿度解析は年平均のみの予測解析である。

2.2 通気網解析における主な記号と節点間の接続関係の定義

本論文では、通気網(地下風道網)を風道、節点(分岐点あるいは接続点)および大気と接続する扇風機設置節点ならびに入気坑口節点から構成する。いま、総節点数 N からなる通気網を考え、任意の節点に付けた番号を i とする。このとき、節点 i に接続する風道および節点の接続を表す模式図を図1に示す。節点 i に接続する風道の本数を $m(i)$ とし、接続する風道を識別するための番号(風道識別番号)を $k(=1 \sim m(i))$ と定義する。温度・湿度のネットワーク解析に関連する基礎式の構成を円滑にするため、既報¹⁷⁾で用いた節点間の接続を表す簡単な係数行列(接続関数)を導入する。例えば、節点 i に接続する k 番目の節点番号が j であるとき、次式となる。

$$j = J(i, k) \quad \dots\dots\dots (1)$$

一般的な網目法などで用いられている節点間の接続関係を表す $N \times N$ 次のインシデント行列¹³⁾と比較し、本システムの接続関数 $J(i, k)$ を用いる場合は、 $m(i)$ の最大値 $m_{\max}$ が6程度であるため、 $N \times m_{\max}$ 次の行列に要するメモリーで済む利点がある。これによって、 $N=200$ 程度までの通気網について、一般的な640 KB パーソナルコンピュータを用いた場合でも、単一プログラム内で通気風量解析(マトリックス節点法)および温度・湿度解析を実行することが可能であった。

いま、節点 i と $j(=J(i, k))$ とを結ぶ風道を単位時間に通過する乾燥空気量を $Q_{ik}(\text{m}^3/\text{s})$ とし、風向が $i \rightarrow j$ のとき+、 $j \rightarrow i$ のとき-で定義する。また、節点間の風道における風道長、断面積、等価直径(水力平均深さの4倍)および周辺長をそれぞれ $L_{ik}(\text{m})$ 、 $A_{ik}(\text{m}^2)$ 、 $d_{ik}(\text{m})$ および $U_{ik}(\text{m})$ で表す。なお、節点 i のレベルを $h_i(\text{m})$ で定義する。

次に、気流の温度(乾球温度)を $\theta(\text{℃})$ 、絶対湿度(乾燥空気1 kg当たりの水分量)を $X(\text{kg} \cdot \text{water}/\text{kg} \cdot \text{dryair})$ 、比エンタルピーを $I(\text{J}/\text{kg} \cdot \text{dryair})$ 、比較湿度を $\varphi(\%)$ および乾燥空気密度を $\rho_d(\text{kg}/\text{m}^3)$ で表す。このとき、節点の状態量には節点番号のみを添字として用い(例えば θ_i)、風道に関する状態量については節点番号および風道識別番号の2つの添字を付けて用いるものとする(例えば θ_{ik})。

2.3 通気網解析における風量誤差

マトリックス節点法による通気風量解析を行うことにより、すべての節点において標準状態(添字0で表す)での流出および

流入風量 Q_{0ik} (m^3/s)の総和が、ある誤差 δQ_0 (m^3/s)の範囲内で、キルヒホッフの第一法則を満足しているものとする。

$$\left| \sum_{k=1}^m Q_{0ik} \right| \leq \delta Q_0 \quad \dots\dots\dots (2)$$

上式の δQ_0 が十分に小さい値となっていない場合には、後述する再循環流(車風)の検出が必要以上に多くなるため、本システムの温度・湿度解析を行う上で、 δQ_0 は十分小さく設定される必要がある。本システムでは、既報¹⁷⁾で示した δQ_0 を収束条件とするマトリックス節点法を用いた風量解析に要する計算時間も考慮し、 $\delta Q_0 = 0.0017 \text{ m}^3/\text{s}$ ($= 0.1 \text{ m}^3/\text{min}$)と設定した。

2・4 気流温度と飽和絶対湿度および比エンタルピーとの関係

いま、気流温度(乾球温度) θ ($^{\circ}\text{C}$)に対する飽和絶対湿度 X_S ($\text{kg}\cdot\text{water}/\text{kg}\cdot\text{dryair}$)との関係を $\theta = 0 \sim 35^{\circ}\text{C}$ の範囲で4次の多項式で近似した結果、次式に示す関係を得た。

$$X_S(\theta) = 6.209 \times 10^{-9} \cdot \theta^4 - 1.648 \times 10^{-9} \cdot \theta^3 + 1.177 \times 10^{-5} \cdot \theta^2 + 2.607 \times 10^{-4} \cdot \theta + 0.003785 \quad \dots\dots\dots (3)$$

このとき、飽和空気の水蒸気比エンタルピー I_S ($\text{J}/\text{kg}\cdot\text{dryair}$)は、 0°C における水の蒸発潜熱を r_0 ($= 2.501 \times 10^6 \text{ J}/\text{kg}$)、空気および水蒸気の定圧比熱をそれぞれ C_{Pa} ($= 1005 \text{ J}/\text{kg}\cdot^{\circ}\text{C}$)および C_{Pw} ($= 1846 \text{ J}/\text{kg}\cdot^{\circ}\text{C}$)とすると、次式で定義される。

$$I_S = C_{Pa} \cdot \theta + X_S (r_0 + C_{Pw} \theta) \quad \dots\dots\dots (4)$$

また、飽和空気 I_S とその気流温度 θ_S の関係を同じく $\theta_S = 0 \sim 40^{\circ}\text{C}$ の範囲で4次の多項式で近似したところ次式が得られた。

$$\theta_S(I_S) = -4.730 \times 10^{-20} \cdot (I_S)^4 + 2.366 \times 10^{-14} \cdot (I_S)^3 - 4.984 \times 10^{-9} \cdot (I_S)^2 + 6.682 \times 10^{-4} \cdot I_S - 5.855 \quad \dots\dots\dots (5)$$

この $\theta_S(I_S)$ の近似式は、後述する合流節点で過剰水分がある場合に必要となる。なお、式(3)および(5)の近似式と 2°C おきの入力データ²⁰⁾との相関係数は、いずれも0.9999であった。

乾燥空気の密度 ρ_d (kg/m^3)は、基準レベル($h=0\text{m}$)での標準大気圧を P_{a0} (Pa)とすると、次式で与えられる。

$$\rho_d = \frac{1.293}{1 + 0.00366 \cdot \theta} \cdot \frac{P_{a0}}{101.3 \times 10^3} \exp(h/8620) \quad \dots\dots\dots (6)$$

また、含湿空気の密度 ρ (kg/m^3)は、 X を考慮して次式で表される。

$$\rho(\theta, X) = \rho_d (1 + X) / (1 + 1.81 \cdot X) \quad \dots\dots\dots (7)$$

湿球温度 θ_{WB} ($^{\circ}\text{C}$)については、

$$\theta_{WB} = \theta - 1510 \left(\frac{X_S(\theta_{WB})}{0.622 + X_S(\theta_{WB})} - \frac{X}{0.622 + X} \right) \quad \dots\dots\dots (8)$$

で定義されるため¹⁵⁾、逐次近似計算によって求める必要がある。本解析では、第 U 次の近似値 $(\theta_{WB})^U$ を右辺に与え、得られた左辺の値を θ'_{WB} とすると、第 $(U+1)$ 次の近似値

$$(\theta_{WB})^{U+1} = (2 \cdot (\theta_{WB})^U + \theta'_{WB}) / 3 \quad \dots\dots\dots (9)$$

を再度右辺に与えるスキームを採用した。初期値として $(\theta_{WB})^0 = \theta - 10 \cdot (1 - X/X_S(\theta))$ を用いた場合、5回以下の繰返し計算で修正量が 0.01°C 以下(収束条件)となり、 θ_{WB} が求められた。

2・5 風道気流温度・湿度のネットワーク解析の条件

各節点の温度・湿度などの気流状態量を解析する場合には、以下の2つの方法が考えられる。

i) 風道始点および終点の温度・湿度をあらかじめ初期仮定し、各風道に任意に割り振った風道番号順にそれらを修正計算し、値が収束するまで繰返し計算する方法(反復計算法、天野ら¹²⁾)。

ii) 温度・湿度などが既知である入気坑口節点から気流方向を考慮して下流側へ解析を進めることにより、一度の解析によって各節点の値を順次確定する方法(以下、気流方向確定法と呼ぶ)。

i)の反復計算法に比較して、ii)の気流方向確定法はアルゴリズムが複雑となるが、計算時間が少なくすむ特徴がある。このため、本システムではii)の気流方向確定法を採用した。この方法

では、節点の気流状態量の計算を行うための解析条件として、「ある節点 i に流入する風道($Q_{ik} \leq 0$)の始点となるすべての節点 $J(i, k)$ の温度および絶対湿度などが既に決定されている」という条件が満足される必要がある。これは、節点 i に流入する風道に接続された節点($J(i, k)$)の状態量が始点の値として与えられたときに、その風道($J(i, k) \rightarrow i$)における熱・物質伝達量が計算可能となるためである。さらに、すべての流入風道の終点において気流が持ち込む顕熱量、水分量およびエンタルピー量等がわかれば、熱・物質バランスから当該節点の気流状態量を決定することができる。従って、入気坑口節点の状態量(一種の境界条件)が設定されることにより、それに接続する節点がまず決定され、その後順次上述した基本条件を満たす節点の状態量が決定される。最終的には、主要扇風機の設置節点の状態量が決定されることになる。従って、例外的条件(2.7 d)参照)を除けば、節点および風道の気流状態量は、それぞれ一度の計算で確定されるわけである。

気流方向確定法に関する計算スキームを具体化するため、各節点における気流状態量の解析状況を示すインジケータ変数 Y_i を導入する。このとき、 Y_i を次のように定義する。

$$Y_i = \begin{cases} 0 & ; \text{未決定} \\ 0.5 & ; \text{仮決定(再循環流用, 2.7 d)参照} \\ 1 & ; \text{決定} \end{cases} \quad \dots\dots\dots (10)$$

いま、温度・湿度などの状態量が未決定($Y_i \neq 1$)である節点 i があり、それに接続する風道の流量 Q_{ik} と接続節点の $Y_{J(i, k)}$ が、

$$Y_{J(i, k)} \neq 0 \text{ for } Q_{ik} \leq 0; k=1 \sim m(i) \quad \dots\dots\dots (11)$$

をすべて満足するとき、合流節点 i における気流状態量が解析可能である。これが、前述した解析条件を具体化したものとなる。なお、合流節点の状態量が計算される前に、各流入風道($Q_{ik} \leq 0$)の熱・物質伝達量とそれに伴う状態量の変化が計算される。

2・6 年平均の気流状態量の予測に関連した熱・物質伝達モデル

風道における温度・湿度などを算定するため、本システムにおいても天野ら¹²⁾とほぼ同様に以下の要素を考慮した。

- 1) 入気坑口節点における入気流の温度・湿度(年平均、各季節)
- 2) 各風道における岩盤と気流間の熱・物質(水分)伝達
- 3) 高低差による自己圧縮熱量および通気圧力損失に伴う発熱量
- 4) 1)~3)以外の風道気流への移流熱量(例えば、坑内機械設備等からの発生熱量、冷房設備などにおける吸熱量)

上記各項目の熱・物質伝達に関連した解析モデルについて、以下のa)~h)に説明する。

a) 入気流における温度および湿度 入気流の日平均温度 θ_{IN} は、1年周期の変動をしている。これにより気流温度および風道周辺の岩盤温度も周期変動し、入気坑口からの距離と経過時間によって影響を受けることはよく知られている。いま、 θ_m および θ_a をそれぞれ入気流温度の年平均値および変動振幅値とすると、 θ_{IN} は、

$$\theta_{IN} = \theta_m + \theta_a \cdot \sin(\omega t + \phi) \quad \dots\dots\dots (12)$$

で近似できる^{1)~4)8)}。ここで、 t (s)は当該年度の1月1日からの経過時間、 ω (rad/s)は角速度および ϕ (rad)は位相定数を表す。一年を周期とする変動が対象となるため、 $\omega = 1.964 \times 10^{-7}$ (rad/s)である。本システムで主な解析対象とした花岡鉱業(株)の2鉱山に最も近い気象台観測点(大館)の過去30年間の日平均気温データのフーリエ解析を行い、0次および1次の係数をもとに上記定数を決定したところ、 $\theta_m = 9.0 (^{\circ}\text{C})$ 、 $\theta_a = 13.3 (^{\circ}\text{C})$ および $\phi = 1.36 \pi$ となった(図10参照)。

次に、年平均の入気流の比較湿度を $\Psi_{IN}(\%)$ で表すとき、本シ

システムでは一定値 $\Psi_m (=60\%)$ として与えた。

$$\Psi_{IN} = \Psi_m \quad \dots\dots\dots (13)$$

いま、入気坑口における節点番号の1つを l とするとき、これらの節点（ネットワーク始点）での気流状態量の年平均値とインジケータ変数は次のように設定される。

$$\left. \begin{aligned} \theta_l &= \theta_m \\ \Psi_l &= \Psi_m ; X_l = X_s(\theta_m) \cdot \Psi_m / 100 \\ Y_l &= 1 \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots\dots (14)$$

b) 風道における区間分割 天野ら¹⁾²⁾は、風道始点、終点および風道中間地点における温度・湿度を反復計算する方式を採用している。しかしながら、解析例¹⁾²⁾の各風道長は37.5～270 mの範囲で異なっており、気流温度・湿度および風道壁面温度もそれぞれ非線形的に変化している状況で、代表的な風道3地点のみを考慮したモデルを用いる場合、風道長の適用可能範囲等に関する問題点が残る。本システムでは、式(11)に示した ($Q_{ik} \leq 0 \cap Y_{J(i,k)} \neq 0$) を満足する風道について解析が行われる。このとき、図2に示すように、節点間の風道（添字 ik で表される）を M 等分し、気流温度・湿度を既知の上流側起点節点 $J(i, k)$ から未決定の下流節点 i に向かって各区間での熱・物質伝達の計算を進める。風道長を短く分割することによって、相互依存性をもつ岩盤と気流間の熱・物質伝達量の計算において、それぞれの区間で温度・湿度をほぼ一定値として扱う一種の一次元差分近似解析モデルが導入できる。ただし、風道の分割数を M とするとき、分割区間の設定距離 $\Delta L_{ik} (=L_{ik}/M)$ にはおのずと制限がある。 ΔL_{ik} を大きく取り過ぎると計算された熱・物質伝達量は実際より過大に評価され、小さく取り過ぎると計算時間が増大する。このため、 ΔL_{ik} の実用的な設定を行うために、実際の風道を模擬したモデル（風道長=500m、断面積=10m²、気流速度=3 m/s、岩盤表面温度=22℃、風道起点温度=15℃）について、 M を1～100まで変化させ、気流温度変化の比較計算を試みた。この結果、 ΔL_{ik} が5m以下のとき風道終点の気流温度とそれに対する厳密解との誤差が初期温度差の0.3% (0.02℃)以下となったことから、本解析システムでは ΔL_{ik} を約5mと設定した。ただし、プログラム上は、 ΔL_{ik} が4.5～5.5mの範囲で分割数 M が整数になるように配慮した。

c) 岩盤と気流間の熱伝達量 いま、第 n 番目の風道分割区間において、風道内壁面（岩盤表面）と通気流との熱伝達を考える（図2参照）。分割区間の内表面積 $\Delta S_{ikn} (\text{m}^2)$ は、次式となる。

$$\Delta S_{ikn} = U_{ik} \cdot \Delta L_{ik} \quad \dots\dots\dots (15)$$

この区間内では、岩盤の表面温度が一定であると仮定するとき、壁面から気流へ伝達される単位時間当たりの熱量 $\Delta q_{Tikn} (n=1 \sim M)$ (W) は、次式で求められる。

$$\Delta q_{Tikn} = \alpha_{ik} \cdot (\theta_{wikn} - \theta_{ik(n-1)}) \cdot \Delta S_{ikn} \quad \dots\dots\dots (16)$$

ここで、 $\alpha_{ik} (\text{W/m}^2 \cdot \text{℃})$ は風道壁面における平均熱伝達率であり、 $\theta_{ik(n-1)} (\text{℃})$ は第 n 区間の始点（第 $(n-1)$ 区間の終端）温度および $\theta_{wikn} (\text{℃})$ は第 n 区間の乾燥および湿潤部分の平均風道壁面温

図2 風道における計算区間の分割

図3 風道内の平均流速 V_{ik} と平均熱伝達率 α_{ik} の関係

度である。また、気流の平均流速を $V_{ik} [=|Q_{ik}|/A_{ik} (\text{m/s})]$ 、気流の動粘性係数を $\nu [(1.36+0.001 \cdot \theta) \times 10^{-5} (\text{m}^2/\text{s})]$ とするとき、レイノルズ数 Re_{ik} は $V_{ik} \cdot d_{ik}/\nu$ で定義される。さらに、プラントル数を $Pr (=0.71)$ 、気流の熱伝導率を $\lambda_a [=0.0207 + 8.12 \times 10^{-5} \cdot \theta (\text{W/m} \cdot \text{℃})]$ とするとき、 α_{ik} に関する1つのモデルとして、滑面の場合の実験式¹²⁾を F (粗度係数) 倍した

$$\alpha_{ik} = F \cdot 0.023 \cdot Re_{ik}^{0.8} \cdot Pr^{0.43} \cdot \lambda_a / d_{ik} \quad \dots\dots\dots (17)$$

が知られている¹¹⁾。 α_{ik} に関しては、過去いくつかの提案された式があり³⁾、そのうちの3例を図3に比較して示す。従来、鉱山の風道に対して $F=1.7$ ⁴⁾ とした報告もあるが、これを幾世橋・石浜ら¹⁰⁾の実測値 ($F=6$ 程度に相当) と比較すると、かなり低い値であると考えられる。また、天野ら¹⁾²⁾が用いた式 ($\alpha_{ik}=6.2 + 4.2 V_{ik}$; $V_{ik}=0 \sim 5 \text{ m/s}$) は、 V_{ik} に自然通気圧を考慮した流速を用いる場合、流速が低い領域で α_{ik} を過大評価しているように考えられる。本システムでは、これらの点を考慮し、鉱山の通常の風道（アーチ枠等）で風速 V_{ik} が約2 m/sの場合において、式(17)の値が天野らの式による値とほぼ一致するように、

$$F=3 \quad \dots\dots\dots (18)$$

を採用した。ただし、比較的滑らかなコンクリートライニング坑道の場合には、通常推奨されている $F=1.7$ を用いた⁴⁾。

α_{ik} は通気網全体の気流温度に強い関連性をもつが、現在のところ鉱山の風道における α_{ik} に関する完全な予測式が確立されているとは言えない。そのため、気流温度の解析結果は α_{ik} の予測式にかなり左右されることを認める必要があるものと著者らは考えている。

d) 高低差による自己圧縮熱量および通気圧力損失による発熱量 天野ら¹⁾²⁾のシステムでは自己圧縮熱量については考慮されているものの、通気圧力損失に伴う発熱量は無視されている。しかしながら、高低差が少ない鉱山では後者が前者と同一程度となることが予測されるため、本システムではこれを考慮に入れた。

いま、 $Q_{ik} \leq 0$ の風道において、風道気流の起点の節点 $J(i, k)$ および終点となる節点 i のレベル差を $\Delta h_{ik} (=h_i - h_{J(i,k)}) (\text{m})$ で表し、重力加速度を $g (=9.8 \text{ m/s}^2)$ 、風道の比抵抗を $R_{ik} (\text{Pa} \cdot \text{s}^2/\text{m}^6)$ とするとき、各分割区間内における自己圧縮熱と通気圧力損失による発熱量の総和 $\Delta q_{Aikn} (\text{W})$ は、次式で近似される。

$$\Delta q_{Aikn} = \frac{-\rho_{ik} \cdot g \cdot \Delta h_{ik} |Q_{ik}| + R_{ik} |Q_{ik}|^3}{M} \quad \dots\dots\dots (19)$$

e) 坑内稼動機械等による発熱量および空調機の吸熱量の取扱い ある風道内（あるいはそれに接続している部分）に設置さ

れた稼働機械類（コンベヤ、補助扇風機、ポンプ等）および内燃機関からの発生熱量、排水溝などを流れる熱水と気流との熱交換量などの総和を $q_{Eik}(W)$ で定義する。天野ら¹⁾²⁾は排水溝での熱水との熱交換量を解析モデルに組み込んでいるが、入力データ項目がきわめて多くなることから、本システムではこれを単に q_{Eik} の項にまとめて処理した。なお、本解析で取り扱った花岡鉱業（株）の鉱山では、閉鎖風道および切羽からの流出熱量、坑井に集積された鉱石からの放熱量などを概算して加算した。また、空調機器における吸熱量は負の値として取り扱うことが可能である。

以上の各風道に割り当てられた熱量は、風道分割区間に等配分した。従って各分割区間に与えられる熱量は次式となる。

$$\Delta q_{Eikn} = q_{Eik} / M \quad \dots\dots\dots (20)$$

ただし、とくに発熱・吸熱量をある風道位置に限定する必要がある場合には、その前後に節点を配置し、節点間の風道長を短く設定するように配慮した。

f) 岩盤からの気流へ水分伝達量と気流湿度 湿度解析は、風道内の各分割区間で気流湿度の計算と同時になされる。気流の湿度は風道壁面上の濡れ面から気流への水分の拡散移動により行われる。いま、一様に湿潤した風道壁における物質伝達率 β_{ik} ($m^3/m^2 \cdot s \cdot (kg \cdot water/kg \cdot wetair)$)は、熱伝達と物質伝達のアナログ（ルイスの関係）から次式で表される¹²⁾。

$$\beta_{ik} = R_{wik} \cdot \alpha_{ik} / (\rho_{ik} \cdot C_{Pa}) \quad \dots\dots\dots (21)$$

ここで、 R_{wik} (m^2/m^2)は風道壁面における湿潤部分（濡れ面）が占める面積比率を表し、内野ら⁹⁾の用いた濡れ率とはほぼ同一の意味を持つ。さらに、平均岩盤表面温度 θ_{wikn} に対する飽和絶対湿度を χ_{sikn} ($kg \cdot water/kg \cdot dryair$) ($=\chi_s(\theta_{wikn})$) とするとき、風道の第 n 分割区間において気流へ伝達される単位時間当たりの水分質量を ΔW_{ikn} ($kg \cdot water/s$)で表す。このとき、 ΔW_{ikn} は、水分の質量濃度差に比例するので¹²⁾次式で表される。

$$\Delta W_{ikn} = \rho_{ik} \beta_{ik} \Delta s_{ik} \left(\frac{\chi_{sikn}}{1 + \chi_{sikn}} - \frac{\chi_{ik(n-1)}}{1 + \chi_{ik(n-1)}} \right) \quad \dots\dots\dots (22)$$

ただし、右辺が負の場合、 $\Delta W_{ikn} = 0$ である。なお、天野ら¹⁾²⁾の式では、質量濃度差ではなく、湿度差が取られている。また、本解析では一様な湿潤状況を想定したことから、岩盤表面温度を式(16)で用いた θ_w と等しく設定した。これに対し、天野ら¹⁾²⁾は、湿潤部分と乾燥部分が入り混ざった場合においても湿潤部分の温度が低くなるとして、異なった表面温度を設定し、濡れ率により平均化する多少複雑な解析モデルを導入している。これは、彼らが、単一の湿潤部分の面積がかなり大きく、湿潤と乾燥部分の入り混ざりが少ない状況で相互に熱移動がない場合を想定しているためと考えられるが、現実には面積比率が同一でも湿潤部分の面積・数などの発生パターンによって表面温度分布が異なることが推測され⁹⁾、そのモデル化は困難である。いま、単一の湿潤面積が比較的小さく、さらに、温度分布が一次元軸対称性をもつことを仮定して得られたGoch & Patterson¹⁸⁾の解(2.7 f)参照)を θ_w の算定に用いることを考慮するとき、湿潤した部分の θ_{wikn} を各区間の平均的な表面温度 θ_w に等しく設定するモデルが合理的であると考えられる。

g) 地山温度の評価と算定モデル 地山温度 $\theta_{\infty}(^{\circ}C)$ は、岩盤表面温度を算定する上で基準の温度となる。一般に、第 n 区間のレベル h_{ikn} [$=h_J(i,k) + n \Delta h_{ik}/M(m)$] とほぼ次式的関係があるとされている。

$$\theta_{\infty ikn} = \theta_{\infty 0} - \sigma \cdot h_{ikn} \quad \dots\dots\dots (23)$$

ここで、 $\theta_{\infty 0}(^{\circ}C)$ は $h_{ikn} = 0m$ における地山温度、 $\sigma(^{\circ}C/m)$ は地山温度の勾配であり、一般的には $\sigma = 0.03(^{\circ}C/m)$ 程度³⁾である。

花岡鉱業（株）の2鉱山においては、各レベルに対し

$$\left. \begin{aligned} \theta_{\infty ikn} &= 23.0(^{\circ}C) & ; h_{ikn} > 0 \\ \theta_{\infty ikn} &= 23.0 - 0.015 \cdot h_{ikn}(^{\circ}C) & ; h_{ikn} \leq 0 \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots\dots (24)$$

で与えた。これは、それらにおける湧水温度、切羽における初期的な岩盤温度を基に算定したモデルである。これらの鉱山の稼働レベルが比較的浅いため、温度勾配は一般的な場合 ($\sigma = 0.03(^{\circ}C/m)$) の1/2程度であった。

h) 風道における岩盤表面温度の算定モデル 気流と風道内壁面との熱・物質伝達量の計算を行うためには、2.7 f) でも議論したように、湿潤部分も含めて平均的な岩盤表面温度を適切に評価しなければならない。

いま、第 n 分割区間における風道壁の表面温度 $\theta_{wikn}(^{\circ}C)$ は、岩盤壁面から奪われる熱量 $\Delta q_{wikn}(W)$ と当該風道に通気を開始してから経過年数によって定まる。いま、 Δq_{wikn} が気流に伝達される顕熱と水分の蒸発に必要なとする潜熱の和に等しいものと考えると、 Δq_{wikn} は次式となる。

$$\Delta q_{wikn} = \Delta q_{Tikn} + \Delta W_{ikn} \cdot r_w \quad \dots\dots\dots (25)$$

ここで、 r_w ($= 2.501 \times 10^6 - 560 \cdot \theta_w$ J/kg · water) は蒸発潜熱である。いま、風道周囲の岩盤が熱的に均質で等方性を有する場合を考える。岩盤から気流へ与えられる熱量がすべて気流の顕熱として等方的に伝達されると仮定するとき、等価な熱伝達率 α_{wik} ($W/m^2 \cdot ^{\circ}C$)を次式で定義する。

$$\alpha_{wikn} = \Delta q_{wikn} / [\Delta s_{ik} \cdot (\theta_{wikn} - \theta_{ik(n-1)})] \quad \dots\dots\dots (26)$$

ただし、 Δq_{wikn} は α_{wik} の関数でもあるため、これらを完全に独立して求めることはできない。このため、天野ら¹⁾²⁾は熱伝達と水分伝達についての連立方程式を導き、これを反復解法することにより収束解を求めている。本システムでは、前区間の単位面積当たりの蒸発速度 $\gamma_{ik(n-1)} = \Delta W_{ik(n-1)} / \Delta s_{ik}$ ($kg/m^2 \cdot s$)を近似的に利用することによって α_{wik} を算定した。

$$\alpha_{wikn} = \alpha_{ik} + \frac{\gamma_{ik(n-1)} \cdot r_w}{\theta_{wik(n-1)} - \theta_{ik(n-1)}} \quad \dots\dots\dots (27)$$

これにより解析スキームが簡潔化し、区間幅が5m程度であることから解析精度もおおむね満足しうものと考えられる。

つぎに、 λ_R ($W/m \cdot ^{\circ}C$)を岩盤の熱伝導率とすると、湿潤した各風道区間に対するBiot数 B_{ikn} は次式で定義される。

$$B_{ikn} = (d_{ik}/2) \cdot \alpha_{wikn} / \lambda_R \quad \dots\dots\dots (28)$$

なお、 $\theta_{wik(n-1)} < \theta_{ik(n-1)}$ の場合には、 α_{wikn} および B_{ikn} は負の値となる確率が高い。また、初期岩盤温度を $\theta_{\infty ikn}$ および経時係数を η_i とすると、第 n 区間の風道壁面の表面温度 $\theta_{wikn}(^{\circ}C)$ は次式で与えられる。

$$\theta_{wikn} = \theta_{ik(n-1)} + \frac{\eta_i(\tau_{ik}) \cdot (\theta_{\infty ikn} - \theta_{ik(n-1)})}{B_{ikn} + \eta_i(\tau_{ik})} \quad \dots\dots\dots (29)$$

ここで、当該風道における通気開始からの経過時間を $y_{ik}(s)$ および岩盤の温度伝導率を κ_R (m^2/s)とすると、 $\tau_{ik} (= \kappa_R \cdot y_{ik} / (d_{ik}/2)^2)$ は無次元時間(Fourier数)を表し、 η_i は τ_{ik} の関数であることを示す。本システムでも天野ら¹⁾²⁾と同様に $\eta_i(\tau_{ik})$ ¹⁸⁾の近似式¹¹⁾を用いた。

2.7 年平均気流温度および気流湿度のネットワーク計算法

a) 風道の始点および各分割区間における気流の状態量 節点 i に接続する流入風道 ($Q_{ik} \leq 0$)を対象とする。このとき気流温度を設定する第1分割区間の始点（添字0で表す）における状態量は節点の値に等しいことから次式となる。

$$\theta_{ik0} = \theta_J(i,k); X_{ik0} = X_J(i,k); I_{ik0} = I_J(i,k) \quad \dots\dots\dots (30)$$

また、蒸発速度 γ_{ik0} についても、節点を介して接続される下流側風道の α_w に関する連続性を確保するため、次式に示すように気流の状態量と同様に取り扱う（式(43)参照）。

$$\gamma_{ik0} = \gamma_J(i,k) \quad \dots\dots\dots (31)$$

従って、これらの始点の状態量が決定されることによって、各分割区間の状態量が上流側から順次求められる。第 n ($=1 \sim M$) 分割区間の終端における気流温度 θ_{ikn} は、前区間の終端値と第 n 区間で気流に取り込まれるすべての顕熱量の総和から、

$$\theta_{ikn} = \theta_{ik(n-1)} + \frac{\Delta q_{Tikn} + \Delta q_{Aikn} + \Delta q_{Eikn}}{\rho_{dik} \cdot C_{Pa} \cdot |Q_{ik}|} \quad (32)$$

で求められる。同様に、第 n 区間の終端における絶対湿度 X_{ikn} は、第 n 区間で気流に取り込まれる水分量を考慮することによって、

$$X_{ikn} = X_{ik(n-1)} + \Delta W_{ikn} / (\rho_{dik} |Q_{ik}|) \quad (33)$$

となる。ただし、 X_{ikn} はその風道や節点の気流の温度における飽和絶対湿度 $X_{Sikn} (=X_S(\theta_{ikn}))$ を超えることはできないので、これを上まわる場合は過剰水分を霧等として放出することになる。

このような $X_{ikn} > X_{Sikn}$ の場合の取扱いを以下に示す。

いま、次式で表される過剰水分量の $1/K$ の量

$$\delta X_{ikn} = (X_{Sikn} - X_{ikn}) / K \quad (34)$$

についての潜熱が気流の顕熱に変換されるとき、

$$\left. \begin{aligned} (X_{ikn} - \delta X_{ikn}) &\rightarrow X_{ikn} \\ (\theta_{ikn} + r_w \cdot \delta X_{ikn} / C_{Pa}) &\rightarrow \theta_{ikn} \end{aligned} \right\} \quad (35)$$

のように X_{ikn} および θ_{ikn} が修正され、さらに、 $X_{ikn} = X_{Sikn}$ (θ_{ikn}) がほぼ満足されるまで式(35)の修正を繰り返す。この処理は、高湿度の気流が自己膨張等によって温度低下する排気立坑（斜坑）などにおいて必要となる。各分割区間での過剰水分量が非常に小さいことから本システムでは $K=20$ を採用した。この結果、修正後の比較湿度は 99.99～100% の範囲に修正され、この方法が妥当であると判断された。なお、比エンタルピー I_{ikn} および比較湿度 Ψ_{ikn} (%) は次式となる。

$$\left. \begin{aligned} I_{ikn} &= C_{Pa} \cdot \theta_{ikn} + X_{ikn} (r_0 + C_{PW} \cdot \theta_{ikn}) \\ \Psi_{ikn} &= 100 \times (X_{ikn} / X_{Sikn}) \end{aligned} \right\} \quad (36)$$

また、次式の各風道の間地点（第 $M/2$ 区間）での状態量を風道における平均値として通気量の解析にフィードバックした。

$$\left. \begin{aligned} \theta_{ik} &= \theta_{ikM/2} ; X_{ik} = X_{ikM/2} \\ \Psi_{ik} &= 100 \times X_{ik} / X_S(\theta_{ik}) \\ \rho_{ik} &= \rho(\theta_{ik}, X_{ik}) \end{aligned} \right\} \quad (37)$$

b) 節点における合流後の気流状態量の算定 節点 i における合流後の各状態量は、流入風道 ($Q_{ik} \leq 0$) の終点（第 M 区間の終端）の値 θ_{ikM} 、 X_{ikM} および風量 Q_{ik} によって求められる。また、節点 i に流入する乾燥気流質量の総和を G_{di} (kg/s)、水分量の総量を G_{Wi} (kg/s) および $\rho_{dikM} = \rho_d(\theta_{ikM})$ とするとき、 G_{di} および G_{Wi} は次式によって表される。

$$\left. \begin{aligned} G_{di} &= \sum_{k=1}^{m(i)} \delta_{ik} \cdot \rho_{dikM} \cdot |Q_{ik}| \\ G_{Wi} &= \sum_{k=1}^{m(i)} \delta_{ik} \cdot \rho_{dikM} \cdot |Q_{ik}| \cdot X_{ikM} \end{aligned} \right\} \quad (38)$$

ここで、 δ_{ik} は気流の方向によって次式で定義される。

$$\delta_{ik} = \begin{cases} 0 : Q_{ik} > 0 \\ 1 : Q_{ik} \leq 0 \end{cases} \quad (39)$$

合流節点で流入気流が一様に混合されると仮定するとき、節点 i の各状態量は、節点における熱・物質バランスから

$$\theta_i = \frac{\sum_{k=1}^{m(i)} \delta_{ik} \cdot \rho_{dik} |Q_{ik}| \cdot \theta_{ikM} (C_{Pa} + C_{PW} \cdot X_{ikM})}{C_{Pa} G_{di} + C_{PW} \cdot G_{Wi}} \quad (40)$$

$$X_i = G_{Wi} / G_{di} ; \Psi_i = 100 \times X_i / X_S(\theta_i) \quad (41)$$

$$I_i = \sum_{k=1}^{m(i)} \delta_{ik} \cdot I_{ikM} \cdot \rho_{dik} \cdot |Q_{ik}| / G_{di} \quad (42)$$

でそれぞれ求められる。ここで、式(40)～(42)が成立する条件は $\Psi_i \leq 100\%$ である。 $\Psi_i > 100\%$ ($X_i > X_S(\theta_i)$) となった場合における過剰水分の取扱いおよび状態量の修正方法は、次の c) で説明す

る。また、気流状態量と同様に、節点 i での蒸発速度 r_i (kg·water/m²·s) を便宜上定義すると、次式で表される。

$$r_i = \sum_{k=1}^{m(i)} \delta_{ik} r_{ikM} \rho_{dik} \cdot |Q_{ik}| / G_{di} \quad (43)$$

ただし、入気坑口節点 l では、 $r_l = 0$ kg/m²·s と設定した。

c) 合流節点における気流内過剰水分の取扱いと状態量の修正

b) で説明したように、合流節点において $X_i \leq X_{Si}$ である場合には、合流後の θ_i および X_i を独立して決定することができるが、 $X_i > X_{Si}$ の場合には過剰水分が気流中に霧として放出される必要がある。この場合、過剰水分量 ($X_i - X_{Si}$) がすべて放出されるわけではなく、潜熱による温度上昇とそれに伴う X_{Si} の増加があるため、その一部分のみが放出され、 $X_i = X_{Si} = X_S(\theta_i)$ となる。このとき、過剰水分が変化した霧のもつエンタルピーがかなり小さいことを考慮すると、式(42)で計算された I_i が過剰水分放出後の飽和空気比エンタルピー I_S とほぼ等しいとすることができる。すなわち、合流後の節点 i における I_i を式(5)で示した θ_S と I_S の関係式に代入することで、 $\theta_i = \theta_S(I_S)$ が求められる。さらに、合流後の X_i は、この温度に対する飽和水蒸気量 $X_S(\theta_i)$ となる。

d) 再循環気流の取扱い 金属鉱山の場合、図 4 に示すように、補助ファンを風道に対し直列に接続して、通気量を確保する方法がよく取られる。この場合、これらの設置風道を含む局所的な閉ループにおいてわずかな再循環気流（車風）を生ずることがある。これは、再循環気流量がわずかであることから保安上は全く問題とはならないものの、この再循環ループの構成節点では、2・1 で示した温度・湿度の解析条件が満足されず、計算がこれらの節点上でストップすることになる。このような解析対象となる節点が見つからない場合の対応策として、解析条件 $Q_{ik} \leq 0$ における設定値 0 (m³/s) を

$$Q_{ik} \leq -\delta Q_R \quad (44)$$

で示すわずかな負の流量 $-\delta Q_R$ (m³/s) に変更し、解析を再度試みるシステムを採用した。ただし、再循環ループを構成する節点および再循環気流量がプログラム上未知であることから、 Q_{ik} が式(44)を満足し温度・湿度計算が再開されるまで、 δQ_R の値を $0.01 \times G_{di} / \rho_{di}$ (m³/s) から同量のきざみ幅でわずかず増加させる試算方法を採用した。これにより、再循環流量の割合が最小であるループから順次解析対象となり、第 1 段階において再循環気流を省略した合流節点での近似計算が行われ、当該節点の状態量が仮決定 ($Y_i = 0.5$) される。これ以後は、 δQ_R を 0 (m³/s) に戻した上で、それ以後の再循環ループを構成する節点温度・湿度が順次決定される。このとき、流入節点の中に仮決定節点が存在する場合には、計算を行っている節点も仮決定節点とした。その後、再循

図4 再循環回路の模式図

環ループを一巡することで、仮決定した最初の節点温度が $Q_{ik} \leq 0$ の条件で再計算され、仮決定した節点の温度・湿度が修正される。厳密にはこのような閉ループの計算を繰り返す必要があるが、本解析で扱った再循環流量が小さかったことから、本システムでは仮決定値の修正は一度のみとし、修正した時点で決定節点に変更した ($Y_i = 0.5 \rightarrow 1$)。ただし、再循環流量の割合が大きい場合には、($Y_i = 0.5 \rightarrow 0.75 \rightarrow 1$) などのように3段階以上で決定する必要があるものと考えられる。

e) 年平均風道気流温度の修正量および収束判定 新たに式(47)で計算される気流温度の修正値 θ_{ik} をそのまま用いると、風量解析システムと温度解析のシステムの相互作用によって、解が振動する可能性がある。そこで本システムでは、風量解析と温度・湿度解析の計算サイクル数を A で表し、第 A サイクルの計算終了時における気流温度を $(\theta_{ik})'$ とするとき、前サイクルでの値との差 $(\delta\theta_{ik})^A$ は次式となる。

$$(\delta\theta_{ik})^A = (\theta_{ik})'^A - (\theta_{ik})^{A-1} \quad (45)$$

このとき、風量解析に引き渡す気流温度 $(\theta_{ik})^A$ を次式で与えた。

$$(\theta_{ik})^A = (\theta_{ik})'^A + \varepsilon \cdot (\delta\theta_{ik})^A \quad (46)$$

ここで、 ε は温度修正時の緩和係数であり、 ε を変化させて行った計算結果 (3.1 参照) に基づき、 $\varepsilon = 0.667$ を採用した。

さらに、 $|(\delta\theta_{ik})^A|$ の最大値を $|\delta\theta_{ik}|_{\max}$ で表すとき、

$$|\delta\theta_{ik}|_{\max} < 0.001^\circ\text{C} \quad (47)$$

を満足した時点解析値が収束したものと判定した。このときの温度修正量による風量変化は、著者らが行った例に対して 0.1% 程度で実用上問題ないと考えられる。これを用いて最終的な風量解析を行い、年平均風量および各気流状態量を確定した。

2.8 坑外気温の季節変化に起因する各風道気流温度の変動値

通気開始から数年程度経過するとき、式(12)に示した入気温度の周期変化 (振幅 θ_a 、位相定数 ϕ) に起因する各風道の気流温度の変動分 $\Delta\theta$ ($^\circ\text{C}$) は、次式で与えられる⁸⁾。

$$\Delta\theta = \theta_a \cdot \exp(-S_a \cdot \xi) \cdot \sin(\omega t + \phi - S_b \cdot \xi) \quad (48)$$

ここで、 ξ は、風道風量 Q (m^3/s)、気流密度 ρ (kg/m^3)、岩盤の熱伝導率 λ_R ($\text{W}/\text{m} \cdot ^\circ\text{C}$) および風道の入気口からの風道長を L_m (m) とするとき、次式で定義される⁸⁾。

$$\xi = \int_0^{L_m} \frac{2\pi \cdot \lambda_R}{\rho \cdot C_{Pa} \cdot |Q|} dL_m \quad (49)$$

式(48)で用いた S_a と S_b について、本システムでは内野ら⁸⁾ の計算結果を最小二乗法で近似した次式を用いた (B : Biot 数)。

$$S_a(B, \zeta) = C_a(B) \cdot \zeta^{0.28} \quad (50)$$

$$S_b(B, \zeta) = S_a - 0.43 \quad (51)$$

ここで、 $\zeta = \omega \cdot (d/2)^2 / \kappa_R$ であり、 $C_a(B)$ は次式で表される。

$$C_a(B) = -0.18 \cdot (\log_{10} B)^2 + 0.62 \cdot \log_{10} B + 0.60 \quad (52)$$

式(50)~(52)による S_a と S_b は、実際の風道に対して算定される範囲

図5 Biot数に対する S_a および S_b の近似式

をほぼ包含する $\zeta = 0.3 \sim 1.2$ および $B = 3 \sim 60$ の範囲で、その誤差が $\pm 3\%$ 以内である (図5参照)。これらの近似式は、天野ら¹⁾²⁾ のものに比較してかなり簡潔であるため、計算時間に関し有利である。また、以下の議論においては、 $\Delta\theta$ を構成する変数を考慮して、式(48)を $\Delta\theta(t, \xi, B, d)$ で表すことにする。

式(49)で定義した ξ は、単一の風道に対しては問題なく適用できるが、合流・分岐が存在するネットワーク上では近似的な取扱いが必要となる。いま、節点の温度・湿度などの状態量を入気風道の風量に応じて求めた場合と同様に ξ を取り扱うことにすれば、節点 i における ξ の値 (ξ_i) は次式で求められる。

$$\xi_i = \sum_{k=1}^{m(i)} \delta_{ik} \left(\xi_{J(i,k)} + \frac{2\pi \lambda_R L_{ik}}{\rho_{ik} C_{Pa} |Q_{ik}|} \right) \frac{\rho_{dik} |Q_{ik}|}{G_{di}} \quad (53)$$

従って、気流状態と同様に入気坑口節点 l (ネットワーク始点) で $\xi_l = 0$ を与え、その後下流側へ向かって順次決定していく。同様に、各入気坑口から当該節点 i まで気流が通過して来た種々の経路の平均的な距離 L_{mi} を便宜上次式で定義する。

$$L_{mi} = \sum_{k=1}^{m(i)} \delta_{ik} \frac{(L_{mJ(i,k)} + L_{ik}) \rho_{dik} |Q_{ik}|}{G_{di}} \quad (54)$$

また、風道の間接点に対する ξ_{ik} および $\Delta\theta_{ik}$ は、 $Q_{ik} \leq 0$ のとき、それぞれ次式で与えられる。

$$\xi_{ik} = \xi_{J(i,k)} + \frac{2\pi \lambda_R \cdot L_{ik}/2}{\rho_{ik} \cdot C_{Pa} \cdot |Q_{ik}|} \quad (55)$$

$$\Delta\theta_{ik}(t) = \Delta\theta(t, \xi_{ik}, B_{ik}, d_{ik}) \quad (56)$$

従って、対象とする季節 (t) における各風道の平均気流温度 $\theta_{ik}^*(t)$ は、年平均気流温度 θ_{ik} に $\Delta\theta_{ik}$ を線形加算することによって求められる。

$$\theta_{ik}^*(t) = \theta_{ik} + \Delta\theta_{ik}(t) \quad (57)$$

2.9 入力データおよび岩盤熱特性

本システムでは、温度・湿度解析に必要とするデータについて、節点に関するもの、風道に関するもの、入気温度・湿度および地山温度に関するものの3つに分類し、それぞれ追加・削除を自由に行うことができるスプレッドシート上での入力システムをとっている。このシステムは、 $J(i, k)$ と $m(i)$ を管理することによって実現した通気網専用のリレーショナルデータベース作成システムである。節点に関する主な入力データとしては h_i 、 $m(i)$ 、 $J(i, k)$ および東西・南北の測量データ (2, 3次元グラフィック用) であり、風道に関するデータとしては A_{ik} (m^2)、 L_{ik} (m)、 $y_{ik}(s)$ 、 q_{Bik} (W)、 R_{Wik} (m^2/m^2)、比抵抗 R_{ik} ($\text{Pa} \cdot \text{s}/\text{m}^6$) および坑道支保およびライニング状況の分類番号を示す O_{ik} (7種) である。なお、濡れ面の面積比率 R_{Wik} については、対象とした鉱山の風道状況および O_{ik} によって、おおむね次に示す程度の値を与えた。

$$R_{Wik} = \begin{cases} 0.1; & \text{入気立坑 (斜坑)} \\ 0.3; & \text{坑内風道} \\ 0.5; & \text{排気立坑 (斜坑)} \end{cases} \quad (58)$$

岩盤の熱伝導率 λ_R および温度伝導率 κ_R については、それぞれ $\lambda_R = 3.5 \text{ W}/\text{m} \cdot ^\circ\text{C}$ および $\kappa_R = 1.6 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ を用いた。

2.10 扇風機特性

既報¹⁷⁾でも述べたように花岡鉱業(株)では主要扇風機回転数をサイリスタ制御しており、夏期にその回転数を変更している。そのため、“MIVENA”では扇風機特性データをインプットすることで、扇風機風量 Q_f (m^3/s) と扇風機静圧 P_f (Pa) の関係を基準回転数 n_0 (rpm) と運転時の回転数 n_d (rpm) との比 n_d/n_0 をパラメータとする3次の多項式近似式¹⁷⁾で与えた。

$$P_f(n_d/n_0) = (n_d/n_0)^2 \cdot \sum_{H=0}^3 C_H \cdot (Q_f \cdot n_0/n_d)^H$$

..... 59

ここで、 C_H は H 次の係数である。従って、 n_d を変更することで、それに対する通気シミュレーションが可能である。

3. 解析結果と考察

3.1 天野らの通気網解析例との比較検討

天野ら¹⁾²⁾とほぼ同一の通気網解析例(図6)に関し、各データ($\theta_m=16^\circ\text{C}$, $\Psi_m=71.3\%$, $\theta_{\infty 0}=31^\circ\text{C}$, $\sigma=0.1^\circ\text{C}/\text{m}$, $R_{wik}=0.1$)の設定および解析を行った。ただし、データ構造等のシステムの相違から若干抵抗などに差異があるものと考えられる。まず式(46)における ε をパラメータとして、風量および温度・湿度解析の繰返し数 A に対する最大気流温度の修正量 $|\delta\theta_{ik}|_{\max}$ の減少過程を図7に示す。 $|\delta\theta_{ik}|_{\max}$ は、 A に対して安定に減少していることから、解の収束過程に関し問題はなく、解析システムが妥当であることを示している。次に、 ε に対する全解析解(年平均風量, 温度, 湿度)が収束するまでの繰返し数 A_C および計算時間(PC 286+80287 (10MHz), Quick Basic使用¹⁷⁾) T_{CPU} との関係を図8に示す。 $\varepsilon=0.6\sim 0.7$ のあたりで A_C および T_{CPU} がともに最小となっている。気流温度 θ および湿球温度 θ_{WB} の解析結果を天野ら¹⁾²⁾の結果と比較して表1に示す。ただし、年平均の計算に対しては、通気開始からの経過時間を $y_{ik}=3.6\times 10^7\text{s}$ とした。また、夏季, 秋季および冬季の計算における (y_{ik}, t) は、それぞれ($5.6\times 10^7\text{s}$, $2.0\times 10^7\text{s}$), ($6.4\times 10^7\text{s}$, $2.8\times 10^7\text{s}$)および($7.2\times 10^7\text{s}$, $4.8\times 10^6\text{s}$)とした。節点14を除くと、本システムの θ および θ_{WB} と天野らの計算結果との相違は、約 $\pm 1^\circ\text{C}$ 以内である。節点14において、 2°C 程度本解析結果が大きくなった原因としては、(8→14)風道の風速が約 7m/s と比較的大きく、本システムの熱伝達率 α_{ik} が、天野らの α_{ik} よりも約40%大きい値であることが原因と考えられる(図3参照)。また、紙数の都合

図6 天野らの通気網解析例¹⁾²⁾(図中の数字は、本システムで用いた R_{ik} を示し、()内は、年平均 Q_{ik} の解析結果を表す)

図7 年平均温度の最大修正量の減少過程(天野らの解析例¹⁾²⁾)

図8 年平均の温度解析における緩和係数 ε と収束までの繰返し回数 A_C の関係

上、風道気流の温度および風量についての比較等は省略したが、温度については $\pm 1^\circ\text{C}$ 以内(8→14風道を除く)、風量は $\pm 5\%$ 以内で一致した。全般的な本解析結果と天野らの結果との相違は、主に熱伝達率に関するモデル式の相違および風道の解析区間の大小の相違等が原因と考えられる。なお、天野らの論文¹⁾²⁾には、彼らのシステムにおける A_C および T_{CPU} 等については記述されていないため、それらについての比較検討はできなかった。

3.2 気流温度の変化過程および季節変動について

本システムを深沢鉱山($N=141$)および餌釣鉱山($N=51$)(文献17)の図5, 6参照)に適用した結果を以下に示す。

気流温度の変化が比較的大きい深沢鉱山の入気斜坑において、季節別の気流温度 θ^* の L_m に対する変化過程の計算結果を図9に示す。また、比較のため、ほぼ同一季節の実測値¹⁹⁾を同図中に示した。解析値と実測値とは傾向的には一致しているものの、季節

表1 天野ら^{1)~3)}の解析例に関する計算結果の比較

節点 番号 i	年平均気流温度 $y_{ik}=10000\text{hr}$				夏季 気流温度 $y_{ik}=15595\text{hr}$ $t=5595\text{hr}$		秋季 気流温度 $y_{ik}=17812\text{hr}$ $t=7812\text{hr}$		冬季 気流温度 $y_{ik}=19972\text{hr}$ $t=1390\text{hr}$	
	θ 乾球温度 ($^{\circ}\text{C}$)		θ_{WB} 湿球温度 ($^{\circ}\text{C}$)		θ^* 乾球温度 ($^{\circ}\text{C}$)		θ^* 乾球温度 ($^{\circ}\text{C}$)		θ^* 乾球温度 ($^{\circ}\text{C}$)	
	天野 ら ^{1)~3)}	本解析	天野 ら ^{1)~3)}	本解析	天野 ら ^{1)~3)}	本解析	天野 ら ^{1)~3)}	本解析	天野 ら ^{1)~3)}	本解析
1	16.00	16.00	13.00	13.02	26.00	26.00	16.00	16.00	6.00	6.00
2	17.55	17.63	13.82	13.93	27.17	27.05	17.73	17.81	7.93	8.05
3	18.90	19.02	14.51	14.64	28.23	28.02	19.21	19.30	9.56	9.72
4	21.10	21.25	15.57	15.79	29.91	29.52	21.46	21.62	12.29	12.43
5	25.76	26.23	17.84	19.16	33.00	32.44	26.58	26.68	18.52	18.80
6	26.48	27.30	26.48	19.88	33.22	33.03	27.24	27.60	19.75	20.18
7	26.12	27.44	19.01	20.12	32.74	32.78	26.55	27.88	19.49	20.65
8	23.70	24.59	17.59	18.84	30.65	30.28	24.02	25.12	16.75	17.59
9	19.83	19.80	15.01	15.51	28.16	27.65	20.30	20.05	11.50	11.24
10	19.80	19.70	14.96	15.28	28.35	27.95	20.35	19.86	11.26	10.84
11	21.63	21.83	15.86	16.58	29.73	29.45	22.14	21.99	13.53	13.38
12	21.07	21.22	15.57	16.06	29.54	29.16	21.56	21.52	12.59	12.60
13	23.45	23.94	16.71	17.52	31.09	31.20	24.09	23.90	15.81	15.69
14	22.59	23.90	17.17	19.00	29.37	29.20	22.82	24.56	15.80	17.24

図9 入気斜坑における気流温度の変化過程の解析結果 (深沢鉱山)

別にみると相違が見られる。これは、実測した時期・時間の入気温度が気象台データの日平均気温と必ずしも一致しないことが理由と考えられる。入気温度が高い夏季(8月1日)においては、 θ^* の L_m に対する変化は小さく、 $L_m=2000(\text{m})$ まではやや降下ぐみで、気流から岩盤への熱移動を示している。入気温度が低い冬季(1月1日)は、斜坑全域で岩盤から気流への熱移動があることを示している。なお、入気温度がほぼ同一となる春季(5月1日)と秋季(11月1日)を比較したところ、 L_m に対する θ^* の上昇過程が若干異なり、秋季のほうが春季よりも温度上昇率が大きく予測された。これは、夏季の熱量が岩盤に蓄積され、秋季に放出されたためである。

また、深沢鉱山の排気立坑における年平均の気流温度 θ は、最下部($h=-74\text{m}$)で 24.9°C 、最上部($h=+195\text{m}$)で 24.2°C と予測された。立坑内で約270m上昇する場合、自己膨張によって約 2.7°C 温度低下するとされているが、実際の温度低下量は非常に小さい。これは、自己膨張による冷却熱量が過剰水分の霧への変化によって放出された潜熱によって相殺されたためである。これらのことから、自然通気圧を正確に予測するためにも、解析モデルにおける過剰水分の取扱いが重要であると考えられる。また、餌釣鉱山の排気斜坑もほぼ同一の結果を示した。

深沢鉱山を例として、季節変動を受けやすい入気斜坑を主とした6節点位置(文献17)の図6参照)での年間気流温度変動の予測

図10 節点気流温度 θ の季節変動の解析結果(深沢鉱山, 節点1の○は気象台データの日平均値を表す)

解析を行った結果を4時期の実測値¹⁹⁾と比較して図10に示す。なお、入気坑口(節点1)の気流温度に関し、気象台データ(30年間の平均値)を参考のため○で示した。この図から、入気坑口からの距離 L_m が大きくなるに従い、気流温度の変動幅は減衰し、温度変動の位相が少しずつ遅れていることがわかる⁸⁾。位相の遅れは、主要扇風機の設置節点($L_m \approx 3000\text{m}$)において、約3カ月であると予測された。図10における実測値と解析値との相違は、入気坑位置での気象台データと実測時期の気流温度との差異がそのまま坑内の気流温度に及んだものと考えられる。

節点の気流温度変動 $\Delta\theta_{ik}(t)$ は ξ によって定まるものであるが、

図11 入気坑口からの距離 L_m と ξ の関係 (深沢鉱山, 餌釣鉱山)

実用的な側面から本システムで導入した坑口からの距離 L_m との関係を見たものが図11である。

式63および64から、単一風道に近い入気斜坑 ($L_m = 0 \sim 2500$ m) においてはほぼ $\xi/L_m = 2\pi \cdot \lambda_R / (\rho \cdot C_{p0} \cdot |Q|)$ の関係があるが、気流の分岐・合流を繰り返すごとにその関係が弱くなっていることがわかる。しかしながら、 L_m から ξ を求めることで、大まかな温度変動幅を推定することができるものと考えられる。

3.3 扇風機運転マップの作成

深沢鉱山および餌釣鉱山¹⁷⁾について、扇風機回転数 n_d をそれぞれ441 rpm および470 rpm (サイリスタ周波数 f_s では、32Hz および30Hz に相当する) に設定したときの総入気風量 Q_{IN} ($= Q_f$) (m^3/min) の年間変動の予測結果を図12に示す。両鉱山ともに、自然通気圧の影響により、坑内外の気温差が大きい冬季には Q_{IN} が増加するのに対し、気温差が小さい夏季には Q_{IN} の落込みが起きることがわかる。深沢鉱山の8月および2月における Q_{IN} は、それぞれ約5150 (m^3/min) および約6050 (m^3/min) であり、その差は、約900 (m^3/min) である。この夏季の風量の減少を補うためには、扇風機回転数を変更する必要がある。従って、目標とする Q_{IN} が設定された場合、各季節のサイリスタ周波数に関するデータがあれば工學上有用である。

本システムを利用し、季節をパラメータとして、扇風機回転数 n_d (サイリスタ周波数 f_s) と扇風機風量の関係を表す扇風機運転マップを作成した一例 (深沢鉱山) を図13に示す。例えば、余裕をみて Q_{IN} を5200 (m^3/min) 確保すると仮定した場合、図に示すように $Q_{IN} = 5200$ (m^3/min) ラインと各季節ラインの交点の f_s が設定すべき f_s を示す。なお、深沢鉱山 (1988年時点) では通常 $f_s = 32$ (Hz) で運転しており、夏季 (6, 7, 8月) には高温対

図12 入気総風量 Q_{IN} の季節変動の解析結果 (深沢鉱山 (1988), 餌釣鉱山 (1988), 図中のシンボルは解析点を示す)

図13 扇風機運転マップの作成例 (深沢鉱山 (1988))

策も考慮して34 (Hz) で運転している。この場合、夏季でも5400 (m^3/min) の風量が確保されていることになる。このように、季節ごとに対応した気流温度およびそれに伴う通気量の増減を予測し、主要扇風機制御を行う上で本システムを用いることが可能である。

なお、主要扇風機を持たない鉱山については、気流方向を大まかに決定するため、実際の通気排出坑口に仮想的な扇風機を設け、 n_d/n_0 を次第に0に近づけることによって、風量・温度等の解析が可能であった。このような場合を含めて種々の条件に対し、本システムを用いたシミュレーションが可能である。

4. 結 言

本論文では、地下風道ネットワークにおける温度および湿度などの解析システムを明らかにした。とくに、風道ネットワークに対応した風道における熱・物質伝達および節点における熱・物質バランスを考慮した解析システムおよびその構成式を提示し、天野ら¹⁾²⁾のシステムとの相違を明確にした。また、この解析システムを天野らの通気網解析例に適用し、システムの妥当性を比較検討した。さらに、実際の花岡鉱業 (株) 深沢鉱山および餌釣鉱山の通気網解析に適用し、工學上重要と考えられる気流温度の年間変動および主要扇風機の主軸回転数制御に対応した運転マップ等の作成例を示した。

以下に本論文の要約を示す。

- 1) 節点間の接続関数 (式1)) を用いることにより、計算機メモリの節約を計る一方、プログラムにおける具体的な計算スキームを一般化した構成式によって示した。
- 2) 本解析システムでは入気坑口から順次、それに接続する節点および風道の温度・湿度を決定する気流方向確定法の計算方法を明らかにした。また、各風道をほぼ一定距離で分割し計算を進める一種の一次元差分近似解法およびその計算スキームを示した。これにより、各分割区間ごとに、比較的簡潔なモデルで気流温度・湿度および岩盤表面温度の解析を可能とした。
- 3) 各風道区間および合流節点において、気流内の過剰水分が発生したときの具体的な処理方法を提示し、排気立坑あるいは斜坑の気流温度を予測する上で重要であることを明らかにした。
- 4) 温度・湿度解析に気流方向確定法を用いる場合において、通気網内の再循環流 (車風) ループが解析条件を満

たさないことから、インジケータ変数を利用した再循環ループの近似計算システムおよび仮決定を行う具体的な計算スキームを提示した。

5) 節点を介して連結された風道間の解析における連続性を確保するため、風道の単位面積当たりの蒸発速度 γ および坑外気温の周期変動に起因する温度補正を行う際の距離の熱的無次元数 ξ を通常の気流状態量と同様に取り扱う手法を採用した。

6) 深沢鉱山および餌釣鉱山の通気網の年平均および各季節ごとの気流温度・湿度の解析を実施した。とくに、気流温度の変化が大きい入気斜坑において、実際の測定値との比較を行ったところ、解析結果との一致は比較的良好であった。

7) 本解析システムを利用して、扇風機回転数を一定とした場合の季節ごとの年間風量変動を計算した。また、扇風機的主軸回転数に対応した風量変化を予測し、扇風機の回転数制御による通気量制御のための運転マップの作成例を示した。

最後に、本研究と並行して開発された解析システム“MIVENA”の温度・湿度解析部分のプログラム作成を分担していただいた角田普一郎君(現 石油資源開発(株))、成瀬 普君(現 小野田セメント(株))ならびに張曉明君(現 山口大学研究生)に謝意を表す。なお、本研究の一部は、文部省科学研究補助費(試験研究(B), No. 01850140)の補助を受けたことを付記する。

参 考 文 献

- 1) Amano, K., Sakai, K. and Mizuta, Y.: A Calculation System Using a Personal Computer for the Design of Underground Ventilation and Air Conditioning, Mining Sci. and Tech., 4, 193~208, (1987)
- 2) 天野・水田・内野・富長・幾世橋・橋本: パソコンによる坑内通気設計システムの開発, 日本鉱業会誌, 102 [1185], 753~761, (1986)
- 3) 昭和60年度日本鉱業会秋季大会分科研究会資料[C], 坑内通気設計システムの開発(1985), 日本鉱業会
- 4) 天野・水田: トンネル内気象の予測計算, 土木学会論文集, 387 [11-8], 161~170, (1987)
- 5) 天野・重野・平松: 電子計算機による風量, 温度および湿度の同時計算, 日本鉱業会誌, 86 [992], 841~846, (1970)
- 6) Danko, G., Mousset-Jones, P. and McPherson, M. J.: Air Temperature Calculation in Hot Airways (A Critical and a New Solution), Computer Applications in the Mineral Industry (Fytas, Collis and Singhal Eds.), 613~623, (1988), Balkema (Rotterdam)
- 7) 柳本・内野: 乾燥した坑道における通気温度計算, 日本鉱業会誌, 90 [1039], 583~587, (1980)
- 8) 内野・井上・柳本: 起点の温度が変動する場合の通気温度計算に関する研究, 日本鉱業会誌, 98 [1131], 405~410, (1982)
- 9) 柳本・井上・内野: 湿潤した坑道における通気温度および湿度の変化, 日本鉱業会誌, 98 [1137], 1123~1128, (1982)
- 10) 幾世橋・石浜: 坑道壁面から通気への熱伝達率予測計算式の提案, 日本鉱業会誌, 91 [1051], 595~600, (1975)
- 11) Starfield, A. M. and Bieloch, A. L.: A New Method for the Computation of Heat and Moisture Transfer in a Partly Wet Airway, J. S. African Inst. Mine Metal, 83 [Nov./Dec.], 263~269, (1983)
- 12) 甲藤好郎: 伝熱概論, 221~241, (1976), 養賢堂
- 13) Hartman, H. L., Mutmansky, J. M. and Wang, Y. J.: Mine Ventilation and Air Conditioning 2nd Ed., 483~545, (1982), John Wiley & Sons Inc. (New York)
- 14) 佐々木・宮腰: 通気網解析プログラムの開発について, 資源・素材学会東北支部平成元年度秋季大会講演要旨集, 1, (1989)
- 15) 平松良雄: 通気学, 160~167, (1974), 内田老鶴園新社
- 16) 井上・内野: 熱環境システムの開発, 平成3年度資源・素材学会春季大会講演要旨集, 67~68, (1991)
- 17) 佐々木・宮腰・小野塚・木下: マトリックス解法を用いた節点法による通気網解析, 資源・素材学会誌, 106 [10], 587~594, (1990)
- 18) Goch, D. C. and Patterson, H. S.: The Heat Flow into Tunnels, J. of Chem. Met. Min. Soc. of S. Afr., 41 [Sept.], 117~128, (1940)
- 19) 橋本 寛ほか7名: 深沢鉱山における通気増強について, 日本鉱業会誌, 98 [1130], 277~283, (1982)
- 20) 機械工学便覧(改訂5版), p. 11~89, (1970), 日本機械学会

新刊紹介

建設用原材料Vol.2 No.1 1992

廃棄物の骨材化

〈A4判・64頁・定価 2,500円(消費税・送料別)〉

目 次

巻頭言 骨材資源と環境と廃棄物	本多淳裕
論文・報文	
コンクリート廃材を利用した路盤材の評価	川久千雄・山下寿昭・椋本 宏
廃コンクリート柱の破砕機について	山室秀司・森 司
再生混合所の現状と舗装発生材の性状	高橋哲躬
コークスベッド式下水汚泥溶融再資源化プロセスについて	市川宗春・堤 福生・八木喜之雄
下水汚泥焼却灰の骨材としての有効利用	吉田恵男・神尾恵一

申込先: 〒185 東京都国分寺市光町2-8-38

(財)鉄道総合技術研究所 立松研究室気付

建設用原材料部門委員会 佐々木孝彦

電話 0425-73-7338 FAX 0425-73-7358

貝殻粉末のアスファルト混合物用フィラーとしての

適用性について 貝沼憲男・篠原俊彦

菅沼健嗣・壁谷紀郎・海老沢秀治

製紙スラッジ焼却灰のアスファルト混合物への有効利用

石川貴久・近松則雄・宮尾総一郎

石灰灰の有効利用—特に道路下層路盤への適用試験

松下正毅・原田俊之・小池章久

FRP廃材の骨材用微粉化 (FRP廃材の骨材化 その1)

小島 昭・古川 茂・浅田俊彦

FRP廃材微粉末の骨材としての利用

(FRP廃材微粉末の骨材化 その2)

古川 茂・小島 昭・宮本正雄・浅田俊彦

文献リスト (1991 国内)