坑内火災の影響を考慮した通気網解析 —坑内火災のシミュレーションに関する研究(2)*—

井 上 雅 弘¹ 内 野 健 一²

Ventilation Network Analysis During a Mine Fire — Computer Simulation of a Mine Fire, Second Report —

by Masahiro INOUE^{a*} and Kenichi UCHINO^a

a. Dept. Mining Eng., Kyushu University, 6-10-1, Hakozaki, Higasi-ku, Fukuoka, 812-8581, Japan

(*Corresponding author : E-mail inoue@mine.kyushu-u.ac.jp)

A mine fire generates toxic gases and influences airflow in the mine ventilation network. Therefore, the knowledge of the effect of the mine fire on the network and the gas distribution in the roadways is indispensable for the management of escape, rescue and fire fighting activities. The ventilation network analysis during a mine fire will be one of the useful tools for these purposes. Also it is expected to give significant information to perform effectively mine ventilation control during a mine fire.

The authors developed a computer program to simulate airflow changes and gas concentration in a network during a mine fire. The program introduces the "ventilation pressure created by a fire (natural draft effect)" and the "throttling effect" into the analysis. The performance of the program has been investigated, using the data of actual mine ventilation network data and of a fire experiment in the Experimental mine. The program is proved to give useful results to make effective countermeasures to mine fire and to make effective education about mine fires for the people who work in underground.

KEY WORDS : Mine Fire, Subsurface Fire, Ventilation Network Analysis, Ventilation Changes

1. 結 言

鉱山などの地下空間では火災は最も注意すべき災害である。火災による燃焼生成物には一酸化炭素を主体とする有害なガスが含まれ、これが通気とともに拡散する。ここでは火災が発生している坑道箇所あるいは区間を通過した通気を、分流通気あるいは合流したものを含めて火災ガスと称することにする。火災ガスは有害な燃焼生成物を含んでおり、火災ガス中の一酸化炭素濃度は最大で7%程度にも達することが報告されている⁴⁾。これは10倍に希釈してもなお極めて危険である¹³⁾。すなわち、火災時の坑内においては、火災ガスに遭遇しないようにすることが何より大切である。このためには、一般には火災より風上に避難すればよいと考えるであろう。このことは避難場所が火災時においても確かに風上であれば正しい。しかしながら火災時には火災によって通気の流れが乱され、平常時と異なる通気の流れとなることが普通である。過去にも、全く予期しない通気の変化により多くの人命が失われた災害がある³⁾。

この通気変化に大きな影響を与えるのは坑内火災ガス温度であり、第1報ではこの予測方法について検討した¹²⁾。高低差が小さい通気網の場合には、火災による通気変動は小さく、火災直近の見かけ風量は変化するものの、質量流量は平常時の場合とあまり変化

しない。一方、高低差が大きな通気網の場合、その通気変動は大きく、コンピュータの利用なくしてはその変動の予測は不可能である。このため、パソコンが普及し始めた時期に既に坑内火災の影響を考慮した通気網解析プログラムの開発が行われている^{15,19)}。これらのなかで Greuer らによって開発された MFIRE がよく知られている。

筆者らもほぼ同時期に、この目的のプログラムを作成し公表した⁷⁾。以後、筆者らが入手したほとんど全ての通気網について、このプログラムによる火災時の通気網解析を実施し、合理的なシミュレーション結果が得られるか検討を続けている。

これら一連の検討の結果、同プログラムに用いている解析方法が多くの場合に信頼できることがわかったが、問題点も明らかになってきた。火災時の通気網解析は多岐にわたる現象の考慮が必要で、プログラミングまで含めて、これらを統合的に述べたものはない。そこで、本論文では、まず坑内火災の影響を考慮した通気網解析方法について検討した結果について述べる。次に作成した坑内火災シミュレーション・プログラムの実行結果を基に火災時の通気変動について論じる。さらに、いくつかの技術的問題に関して検討した結果について述べる。なお、本論文では火災時の通気網解析に対して、火災が生じていない場合の通気網解析を平常時の通気網解析と呼ぶことにする。

2. 火災が通気に及ぼす影響

火災はその放出する熱エネルギーによって通気網内の通気密度バランスを変化させる。また、温度上昇による通気密度の低下と風量の変化によって、坑道における通気抵抗や圧力損失を変化さ

* 2003年8月27日受付 2004年1月7日受理

1. 普通会員 九州大学大学院助教授 工学研究院 地球資源システム工学部門

2. 普通会員 九州大学大学院教授 工学研究院 地球資源システム工学部門
[著者連絡先] FAX 092-642-3614 (九大・井上)

E-mail : inoue@mine.kyushu-u.ac.jp

キーワード : 坑内火災, 地下空間火災, 通気網解析, 通気変動

せる。これが通気に与える影響のあり方はその通気網の構造と、火災が発生している場所によって変化し様々である。従来、火災時の通気網解析では、火災が通気に及ぼす影響として主に次の2つが考慮されている^{2,15,19)}。

- 1) 火災の浮力効果
- 2) 火災の絞り効果

火災時の通気網解析では、火災の位置が固定している場合でも、火災ガスは時間とともに通気網内を進行するので、このほか多くの条件を考慮する必要がある。例えば、坑内の通気温度は刻々と変化するので自然通気圧や通気抵抗も同時に変化する。このため、火災時の通気網解析は非定常解析を行わねばならない。特に坑内の人員の退避を考える場合には火災ガスの位置は極めて意味が大きい。このため、火災時の通気網解析では火災の発生場所と適当な時間毎の解析結果を検討の対象としなければならず、そのデータ量は極めて大量である。

2・1 火災の浮力効果

火災による浮力効果 (buoyancy effect) は、通気の密度差により発生する自然通気圧と同じ原理で発生するものである。従って、通気の密度変化を正しく知る必要がある。このためには火災ガスの距離的・時間的密度変化を正しく求めることが必要である。火災による通気の温度上昇は極めて大きく、火災通過直後の火災ガスの温度は平均で 1000°C にも達することがある⁹⁾。このため、通常の自然通気圧とは比較にならないほど大きな圧力を発生することがある。この力は上向きに通気されている坑道では、通気を増加する方向に働くが、下向きに通気されている場合には通気を抑制する方向に働き、場合によっては通気方向の逆転を引き起こす。また、この力は高温の火災ガスが通過する坑道に高度変化がない場合には発生しない。

2・2 火災の絞り効果

坑内火災実験によれば、坑道が水平な場合、すなわち火災による浮力効果が働かない場合、火災が発生すると質量流量が減少することが示されている⁹⁾。従って火災は、何らかの形で通気を絞る、通気抵抗のような性質があることがわかる。この性質は火災の絞り効果 (throttling effect) と呼ばれている。火災時の通気網解析を行うためにはこの大きさを定量的に評価する必要がある。

火災の絞り効果の扱い方としては、通気の温度上昇による坑道の摩擦抵抗の変化としてこれを考慮することでほとんどの文献が一致している^{2,15,19)}。この他に、通気の速度変化や燃焼生成物の通気への添加による運動量変化の影響も考えられている¹⁶⁾。しかしながらほとんどの文献、とくに解析プログラムでは後者は考慮されていない。

- (1) 通気の温度上昇による摩擦抵抗の変化

Darcy-Weisbach の式から坑道の摩擦による圧力損失 $\Delta P(\text{Pa})$ は次式で表される。

$$\Delta P = \rho \lambda (X/D) (V^2/2) \quad (1)$$

ここで、 ρ : 密度 (kg/m^3)、 λ : 管摩擦係数 (-)、 X : 坑道長さ (m)、 D : 坑道直径 (m)、 V : 流速 (m/s)。坑道内で温度変化により密度が変化する場合、圧力損失は以下のように積分で与えられる。

$$\Delta P = \int dp = \int \rho \lambda (1/D) (V^2/2) dx \quad (2)$$

ここで、積分範囲は 0 から X である。坑道内の温度を $T(\text{K})$ とし、温度 T_n での密度および速度を添字 n をつけて表すことにする。この場合、温度変化による密度変化に比して圧力による密度の変化はほとんど無視できるので、

$$V_n/T_n = V/T \quad (3)$$

$$\rho_n \cdot T_n = \rho \cdot T \quad (4)$$

であるから、

$$\Delta P = \rho_n \lambda (X/D) (V_n^2/2) (1/T_n) (1/X) \int T dx \quad (5)$$

T_m を坑道の平均温度とすると、

$$\Delta P = \rho_n \lambda (X/D) (V_n^2/2) (T_m/T_n) \quad (6)$$

このことから、坑道内の通気温度が一様でない場合、圧力損失は温度 T_n の場合の値の (T_m/T_n) 倍になることがわかる。この圧力損失の増加が一般に火災の絞り効果の原因と考えられている。

上式を流量 $Q (=A \times V)(\text{m}^3/\text{s})$ および、水力直径の考え方 $D (=4A/P)$ を用いて変形すると、

$$\Delta P = (\rho_n \lambda / 8) (XP/A^3) Q_n^2 \cdot (T_m/T_n) \quad (7)$$

ここで、 A : 断面積 (m^2)、 P : 坑道の周長 (m)。平均温度での流量 Q_m を用いると、

$$\Delta P = (\rho_m / \rho_n) (\rho_n \lambda / 8) (XP/A^3) Q_m^2 \quad (8)$$

上式で、 $T_m = T_n$ 、坑道の摩擦係数 $k = \rho_n \lambda / 8 [\text{kg/m}^3]$ とすれば通気学の基本式 Atkinson の式が導かれる。

上式を通気網解析でよく用いられる形式で表すと次のようになる。

$$\Delta P = R Q^2 \quad (9)$$

$$R = (\rho_m / \rho_n) R_n \quad (10)$$

$$R_n = k (XP/A^3) \quad (11)$$

ここで、 Q および R は原位置の状態 (温度 T_m) の風量と通気抵抗 ($\text{N} \cdot \text{s}^2/\text{m}^8$) である。 R_n は密度 ρ_n (温度 T_n) に対応する通気抵抗であり、一般には密度 1.2 の場合を標準とする。これは原位置の風量で式 (9) を考えるとき、通気抵抗は密度による補正式 (10) を行えばよいことを示している。

- (2) 通気の速度変化による影響

通気が火災部分を通過する際には温度が急激に上昇するので、体積が増加し通気速度が増加する。また、燃焼生成物が通気に加わる。この両者のために通気には運動量の変化が起こり、このために圧力損失が発生する。山尾ら¹⁶⁾はこの圧力損失について詳細に検討している。速度変化による絞り効果は、通気が火災区間を通過後、その温度が低下する場合には逆に働く。燃焼生成物の付加が無視できる場合で、坑道の出口で火災ガスの温度が平常の温度まで低下する場合にはこの絞り効果は存在しないことになる。

通気網解析で必要なのは、火災部分のみではなく火災を含んだ坑道全体の圧力損失である。この値は以下の式で表され¹⁶⁾、火災の最高温度には関係しない。

$$\Delta P_{12} = (1/\rho_1) (M_1/A)^2 \{ (1/m) (M_2/M_1)^2 (T_2/T_1) - 1 \} \quad (12)$$

ここで、

ΔP_{12} : 圧力損失 (Pa)

ρ_1 : 入気の密度 (kg/m^3)

M_1 : 入口の質量流量 (kg/s)

M_2 : 出口の質量流量 (kg/s)

m : 出口の火災ガスの分子量 / 入口の通気の分子量 (-)

T_1 : 入口の絶対温度 (K)

T_2 : 坑道の出口における絶対温度 (K)

燃焼生成物の付加が無視できる場合、 $M_1 = V \times A \times \rho_1$ であるから、

$$\Delta P_{12} = \rho_1 \cdot V^2 \{ T_2/T_1 - 1 \} \quad (13)$$

2・3 実規模火災実験結果による検討

Fig.1 は水平な実規模坑道を用いた火災実験⁹⁾により得られた、坑道の圧力変動を示している。太い実線 ($P_s\text{-all}$) は火災の数 m 風上側の A 点とこれより 300m 風下の坑道出口 C 点の間の圧力差であり、火災を含む坑道全体の圧力損失を示している。細い破線 ($P_s\text{-fire}$) は A 点とこれより 10m 風下の B 点の間の圧力差であり、火災区間の圧力損失を示している。いずれも火災の燃焼開始後、急激に圧力差が大きくなっているが、火災の終息とともに徐々に小さくなる。また、最終の圧力は火災前の圧力より低い。これは実

Fig. 1 Pressure changes in an actual size roadway during a fire.

験前は、燃料である背板の木積がかなりの通気抵抗となっていたため、実験終了時にはこれは焼失している。このため、火災発生前の風速は2.3m/sであるが、実験終了時の風速は2.5m/sと増加する。また火災が最も高温の時には風速は2.0m/s程度まで低下する。なお、ここで風速は火災より風上で測定した値である。細い実線 (P_{s-rd}) は火災風下のB点と坑道出口C点の間の圧力差であり、火災を含まない坑道区間のみの圧力損失を示している。

同図より火災発生前は風速2.3m/sで坑道全体の圧力損失 (P_{s-all}) は42Paなので、火災前の坑道全体の通気抵抗 R_{all} は $0.27(\text{Ns}^2/\text{m}^8)$ である。また、火災区間の圧力損失 (P_{s-fire}) は30Paなので火災前の火災区間の通気抵抗 R_{fire} は0.19である。両者の差から、木積を除く坑道のみの通気抵抗 $R_{rd}(R_{all}-R_{fire})$ は0.08となる。これは実験の最終時で、燃料が焼失したときの坑道全体の圧力 (P_{s-rd})16Pa および風速2.5m/s から得られる通気抵抗0.09とほぼ一致する。

火災開始後の早い時刻で、燃料の木積の状態が火災前とあまり変化していないと考えられる、図中矢印で示した箇所(時刻14.2min)を例に、火災による圧力損失について検討する。この場合の火災通過直後の火災ガス温度は782°C、これより風下の坑道300m区間(BC)の平均温度は292°Cである。区間ABとBCは管摩擦係数 λ が全く異なるので圧力損失を別々に求める。まず区間ABについて考え、式(6)に火災前のデータを与えて管摩擦係数 λ を求め、次にこの λ を用いて火災時の温度、風速を与えて摩擦による圧力損失を式(6)で見積もると55Paとなる。ただし、区間ABの平均温度は入気温度11°Cと782°Cの平均値(397°C)を用いた。同区間での速度変化による圧力損失は、式(13)によれば13Paとなる。従って火災の絞り効果による、区間ABの圧力損失は合計で68Paと見積もられる。測定値はほぼ88Paであり、見積もりは実測値よりも20Paほど小さい。

同様の計算によれば区間BCの摩擦による圧力損失は18Pa、通気速度の減少に伴う圧力の減少が12Paと算出され、火災の絞り効果による圧力損失は合計で6Paと算出される。しかしながら、実測ではこの値は火災前より若干増加して18Pa前後となっている。

区間ABとBCを合わせた、区間ACでは火災の絞り効果による圧力損失の合計の見積もりは76Paとなる。この場合、入口の温度と出口の温度差が小さいので、式(13)による通気速度変化に伴う圧力の増加は1.4Paと無視できるほど小さい。実測値は107Paであり、同様に実測値の方が大きい。これらの差は燃焼生成物の付加を無視したこと、および温度の見積もりが低すぎること等が原因と思われる。このような原因を考慮すれば、上記の方法で概ね

火災による圧力損失を見積もることが出来ると判断される。また、この数値例からも明かなように、速度変化による圧力損失の大きさは小さく、通常は無視しても差し支えないと考えられる。この値が大きくなるのは風速が大きく、かつ出入り口での温度差が大きい短い坑道の場合である。しかし、通気網という観点では、短い坑道も次の坑道につながっており、最終的には、温度は通常の温度程度まで低下することを考えると、ほとんどの場合、無視できることになる。

3. 火災ガスの温度

前報¹²⁾で火災時の火災ガスの温度について検討し、火災時の通気網解析シミュレーションの目的であれば次式で計算できることを示した。

$$T = t_v + (t_f - t_v) \exp(-Sz) \quad \text{前報・式(22)}$$

$$S = 2\pi k K_v / M_c \quad \text{前報・式(24)}$$

ここで、 T : 火災ガスの温度 (°C), t_v : 初期岩盤温度 (°C), t_f : 火災温度 (°C), z : 距離 (m), k : 岩盤の熱伝導率 (J/mK), K_v : 経時係数 (-), M_c : 坑道を流れる通気の熱容量 (J/Ks) である。

坑道の長さを Z とするとき、その坑道の平均温度は次式のようになる。

$$T_m = t_v + (t_f - t_v)(1 - \exp(-S \cdot Z)) / (S \cdot Z) \quad (14)$$

火災による通気温度の急変は、解析的には通常に通気温度の急変と同じと考えることができる。火災の温度は通常の温度に較べて極めて大きい。このような場合、急変前の通気温度の影響は無視しても大きな誤差とならない⁵⁾。また、このことを利用することにより通気温度計算を簡略化できる。従って、通気温度に関しては、火災が発生した時刻に通気を開始されたと考えて解析を行う。

4. 火災時の通気網解析

ここで述べる火災時の通気網解析は、すでに公表した平常時の通気網解析⁸⁾と通気温度計算⁶⁾を組合せ、さらに火災の解析に必要な計算手法を加えて発展させたものである。ここではこの計算手法について検討した結果を述べる。

4・1 火災ガスフロント

火災は初期には徐々に火勢を増し、急に数百°Cもの温度にはならないと思われるが、ここでは火災はある時刻に直ちに温度に達するものとする。このとき、火災ガスの先頭位置、即ち火災発生直後に火災箇所を通過した火災ガスの位置を火災ガスフロントと呼ぶことにする。火災ガスフロントが到達していない箇所では、温度は平常時と変わらない。任意の位置の温度は、火災ガスフロントが達した直後に平常時の温度から火災ガスの温度に変化する。従って、任意の場所の温度を計算する場合には、まず火災ガスフロントの到達を考え、これが到達していれば前述の式(22)で計算し、到達していなければ平常時の温度のままとする。Fig.2に火災ガスフロントの移動と通気温度についての概念的な説明図を示す。火災ガスは火災から遠ざかるにつれて温度が低下するが、その低下は時間とともに緩やかになる。

一般に通気は通気網内で分流合流を繰り返すので、Fig.3に示すように火災ガスフロントの数は増加する。また、これは坑外に達すれば消滅する。通気が再循環するような位置にファンが設置してある場合や、火災によって通気が再循環するような坑内構造になっている場合には、火災ガスフロントがその回路を循環する度にその数が増加する。このため、解析は終了しないことになる。また、複雑な通気網ではこの数がプログラムで定義したメモリを越えることもあり得る。このため実質的に意味のない火災ガスフ

Fig. 2 Conceptual diagram of progress of a fire gas front and fire gas temperature change.

Fig. 3 Progress and increase of fire gas fronts.

ロントを整理することが必要になる。

このため、火災発生箇所から、ある一定濃度のガスが発生しているものとし、火災ガスフロントにおけるこの濃度を計算する。通気が分岐して火災ガスフロントの数が増えた場合には、それぞれに対してその濃度を求める。1つの坑道において2つ以上の火災ガスフロントが存在することがある。このとき、それぞれの濃度を比較し、その濃度が予め決めた濃度以下の差しかない場合には、風上側の火災ガスフロントは削除する。ここではこの濃度を火災ガスフロント削除濃度と称することにする。こうすれば有害ガスの到達時間は正しく求められ、かつ火災ガスフロントの数を減らすことができる。一般に風上側の濃度の方が高いので、削除した火災ガスフロントが到達するはずの時間には多少濃度が上昇するはずであるが、その差はわずかである。また、安全側の結果を得る必要があれば、風上側の火災ガスフロントを削除する際に、その濃度を風下側の火災ガスフロントの濃度として与えればよい。

火災ガスフロント削除濃度を0にすれば解析は全ての火災ガスフロントの移動を考慮して行われる。この濃度を大きくすると削除される火災ガスフロントは多くなり、精度は多少低下することになるが、解析時間は短くなる。この濃度は利用者が任意に設定することができ、解析精度も解析時間を考慮しながら任意に設定することになる。この方法で500節点、800坑道程度の実際の炭鉱の通気網の、火災時の通気網解析が支障なく可能である。

4・2 風量計算方法

火災時の風量計算方法を検討するに当たり以下のような点を考慮する必要がある。

(1) 火災の温度

火災はその温度が最大の要素である。火災の燃焼は風量に左右され、燃焼により発生した熱が逆に風量を左右すると考えられ、両者は相互に影響する。この様な現象を考慮するためには、風量と火災の燃焼の関係を把握し、解析データとして与える必要がある¹⁷⁾。この関係は何が燃えるか、周囲の状況はどうなっているか、など個々の条件に大きく左右されると考えられる。これに関して

は未だ未知の部分が多く、また、火災のシミュレーションでは必ずしもこのような内容の正確な再現まで求められていないことが多い。このため、本解析では火災のデータとして任意の一定温度を与えることとした。この場合、風量が増えると火災が通気に与える熱量もこれに比例して増えることになる。

他に火災が発生する熱量を与える方法も考えられるが、風量が小さくなった場合、通気温度があり得ない高温になったり、逆の場合には低い温度になったりするなど現実的ではない状況が生じる可能性があるので注意が必要である。風量と温度の関係を与える方法はより現実に近いシミュレーションが可能であるので、必要なデータが得られれば解析に取り入れることが望ましい。

(2) 解析ステップ

火災時の通気網解析では、火災により変化し新しい通気条件に対応するために、一定時間毎に風量解析を繰り返す。この解析を繰返す時間間隔を解析ステップと呼ぶことにする。通気網解析そのものは定常状態の解析なので、数値解析上の解析ステップについての時間制限はない。従って、30分後の状態を1ステップで求めることも可能である。しかしながら、解析ステップが長すぎると、正しい風量が求められないことがある。例えば坑道の途中に最深部があり、この下向き通気になっている区間で火災が発生した場合である。このとき、下向き通気の区間では通気方向と逆向きの自然通気圧（火災の浮力効果）が発生し、最深部に至る手前で圧力がつりあい、通気がこれ以上この方向に流れない場合がある。すなわち火災ガスフロントは最深部を通過せず、この坑道では通気の逆転が生じる。しかし、解析ステップが長すぎると、火災ガスフロントがこの部分にきた条件での風量解析をすることなく、素通りしてしまうことがある。すると今度は、通り過ぎた部分では上向き通気であるので、通気を助長する方向に自然通気圧が作用し、結局この方向のまま計算が進行することがある。従って、このような構造の部分で火災が発生した場合には、解析ステップを短くする必要がある。

(3) 表示ステップ

火災の解析では時間的な変化が大きく重要なので、その結果の表示が重要である。例えばMFIREの場合には膨大な解析結果が数値でしか示されないのが結果の解釈が困難であった。すなわち、解析結果をテキストで出力するだけでは不十分である。このため、火災ガスの移動の様子を画面に表示することが望ましい。このため、筆者らのプログラムでは一定時間毎に火災ガスフロントの移動の表示を行えるようにした。この時間間隔を表示ステップと呼ぶことにする。表示ステップは解析ステップ以下の時間とする。

(4) 風向の変化

本解析で用いる火災ガス温度の計算式は、通気風量は一定という仮定で得られたものである。従って、風量が増えればこの仮定は正しくは成立しない。特に通気が逆転するような場合では、それ以後の計算結果の信頼性は低いと言うことに留意する必要がある。その場合には風量がどの程度変化したかという定量的な意味ではなく、火災時には逆転が生じるという定性的な結果が重要な意味を持つ。従って、解析結果は慎重に解釈されなければならない。

(5) 火災発生箇所

火災は任意の節点で発生することとした。坑道の途中で火災が発生させる場合には、そこに節点を作成すればよい。

(6) 通気の再循環

ファンがなくても、通気網の構造によっては火災の浮力効果により通気の循環が起こる。

(7) 対象通気回路

解析を支障なく行うためには、解析プログラムは考えられるどのような場合にも対処できなくてはならない。例えば火災発生地点においてさえ、風向の逆転の可能性を考慮しなければならない。一般的な坑内構造の中で、考えられる最も複雑な節点、坑道、ファンの組合せは Fig.4 に示すものであろう。このような条件となる場合はほとんど存在しないが、この様な場合でも、温度や風量の計算、火災ガスフロントの移動を支障なく行えるようにしておく必要がある。

(8) 定流坑道

坑内には定流風道と呼ばれ、通気の管理者が一定の風量を流すように調節している坑道がある。通常の通気網解析では、この坑道にはこの一定風量流れるという条件を与えて解析を行う。火災時には上述の調節を行うことはできないので、通気抵抗を条件として与え、普通の坑道と同じように解析する必要がある。その抵抗値は一般に求めていないことが多いが、通常の通気網解析を行って得られる坑道両端の圧力差と風量から求めることができる。

(9) 火災解析に必要なデータ

火災時の通気網解析には、従来の通気網解析よりも多くのデータが必要である。即ち、火災の発生地点や性状（温度）に関するデータ、坑道の長さ、断面積、坑道周囲の岩盤の熱物性値等の通気温度変化を計算するためのデータである。火災の解析では火災発生後、数 10 分から数時間の解析が重要である。このような場合、火災ガスの温度変化に関する岩盤の領域は坑道壁面から数 10cm 以内である。このため、岩盤の初期温度は実際の初期温度ではなく、火災開始前の通気温度とした。これはこの部分の岩盤の温度は火災開始前に通気温度に近くなっていると考えられるからである。

(10) 解析のフロー

火災時の通気挙動は非定常的であり、このため Fig.5 に示す手順で火災時の通気網解析を行うこととした。なお、火災のシミュレーションでは種々の条件で繰り返し解析して変化を検討したり、教育のために同じ解析を繰り返し、火災ガスフロントの移動の様子を見せることが多く、プログラムは実行中のままで必要に応じて解析と表示を行う。このため、必要なデータは入力済みで、設定の変更のみを行って解析を開始するフローとなっている。

また、次のような処理も行っている。

- ①同じ解析を繰り返すために、解析の最初に、保持すべきデータ以外の値を初期化する。
- ②時刻を 0 に設定する際に、火災ガスフロントを火災箇所を設定する。
- ③解析ステップ毎に、ある風量のもとでの火災ガスの移動を求め、新しい火災ガスフロント位置を決定する。この際次のような手順を使用した。
 - ・火災ガスフロントを含む坑道と、その出口の節点のリスト

Fig. 4 Complicated connection of ventilation elements which should be handled by a ventilation network analysis.

を作成

- ・リストから火災ガスフロントが出口に最短時間で達する坑道を取り出す
- ・解析ステップ時間内で火災ガスフロントが出口に到達するか判断

Yes : 火災ガスが流れる次の坑道を探し、その坑道と出口をリストに加える。

: 温度分布、坑道平均温度計算

No : いまの坑道と出口をリストに入れる。

: 火災ガスフロント位置、温度分布、坑道平均温度計算

- ・火災ガスフロントの移動を表示ステップ毎に表示する。
- ・不要な火災ガスフロントは省略する
- ・上記の操作を全ての火災ガスフロントの位置が、解析ステップ後の位置になるまで繰り返す。

④火災ガスフロントが存在しなくなれば、経過時間内でも終了する。

5. 解析例

Fig.6 のような通気網を考え、これを通気網 1 ということにする。円は通気網の任意の箇所を表すもので、ここでは節点と称する。各節点の位置を特定するために番号を付けている。節点 1 および 2 は地表（坑外）で、それ以外は坑内である。節点を結ぶ直線は坑道を表す。また 2 重円に 3 角形の記号はファンであり、3 角形が広がる方向がその風向である。

本通気網では説明を容易にするために、坑道長、坑道断面積、坑道周囲の岩盤の熱伝導率および平常時温度は全て同じで、それ

Fig. 5 Flow chart of a ventilation network analysis during a mine fire.

Fig. 6 A ventilation network used for an example.

ぞれ、200m, 10m², 2.33(J/mK)(=2kcal/mh°C), および 20°C としている。通気抵抗としては、通常の坑道は 0.0098Ns²/m⁸(10 Murgue), 目抜き坑道は 97.99(9999), 切羽を 0.98(100) または 0.49(50) としている。ここで、数値の後ろのかっこ内は従来、日本の多くの鉱山で使用されている、通気抵抗の単位 Murgue での数値を示している。また、以後の図中の単位は風量が m³/min, 圧力が mmAq, 抵抗は Murgue を使用している。

各節点の高度を節点番号の下括弧内に示す。坑道は図の横方向には水平であり、右上方向に高くなる。傾斜はほぼ 15 度であり、100m あたり高度が 25m 変化する。この通気網の 3 次元表示を Fig.7 に、ファンの特性曲線を Fig.8 に示す。

5・1 平常時の風量

Fig.9 は火災が生じていない、平常時の通気網 1 の状態を表したもので、風量 (標準状態 (20°C, 1 気圧)) を線上に、通気抵抗を線下に、坑道壁面の摩擦による圧力降下を節点下部括弧内に示している。

5・2 火災が発生した場合

(1) 火災発生後 5 分後

通気網 1 の節点 4 で火災が発生してから 5 分後の通気網の状態を Fig.10 に示す。火災の温度は火災初期を想定し、60°C とした。また解析ステップは全計算を通して 0.1 分毎とした。同図中の、節点よりやや小さい円は、一定の時間間隔 (表示ステップ: 0.1 分) ごとの火災ガスフロントの移動を示す。この場合、5 分間で火災ガスは図に示すように広がり、風量はこれに対応して変化する。火災ガスフロントの円の数から、火災ガスの移動に要する時間を知ることができる。同じ長さの坑道で、その画面上の表示長さも同じであれば、火災ガスフロントの円が密な箇所は風速が遅く、

Fig. 7 Three dimensional view of the network.

Fig. 8 A characteristic curve of a fan S-2 in the network.

Fig. 9 Airflow distribution in the network under normal condition.

疎な箇所は風速が早いことを意味する。

また同図には線上に風量、線下にガス濃度、節点下部に通気温度を示している。ここで、火災ガスは通気と同じ速度で移動すると仮定しており、濃度は坑道断面平均値である。風量は特に断らない限り全て標準状態 (20degC, 1 気圧) の値 (m³/min) に換算している。また、ガス濃度は火災箇所のガス濃度を 100(%) とした場合の値である。

火災温度がこのように低くても、温度による密度変化の影響で風量は次のように変化する。すなわち、火災箇所から

- ・上方に向かう坑道 (4-31) の風量は 397(m³/min) から 831 に増加、
 - ・この坑道と並列関係にある坑道 (3-30) の風量は減少、
 - ・これら 2 つの合計はやや増加、
 - ・下方に向かう坑道 (4-7) の風量は 453(m³/min) から 171 に減少、
 - ・この坑道と並列関係にある坑道 (3-6) の風量は増加
 - ・これら 2 つの合計はやや減少、
 - ・全体の風量はほとんど変化しない
- ことがわかる。

通気網に高度差がある場合には通気の密度変化による自然通気圧の影響が大きい。上記の変化の定性的な部分は自然通気圧を考慮すれば推論することができる。

自然通気圧の変化は火災ガスの温度変化が原因である。火災ガスの温度は、火災ガスとこれが通過する坑道周囲の岩盤との熱交換に依存する。この熱交換を左右する重要なパラメータの 1 つが岩盤の温度勾配 Kv である (前報式 (24) 参照)。本論文の火災シミュレーションではこの無次元値として 5 を用いた。この値には時間依存性があるがここでは同じ値を用いている。一般的な坑内条件であれば、5 という値は、岩盤坑道の場合、温度低下の割合が実際よりやや少ない、結果的に温度の影響がやや大きく現れる値と考えられる。本論文は火災の影響を論じることが目的であるという理由からこの値を用いた。

(2) 火災発生後 33 分後

火災発生後 33 分後には火災ガスが通過した坑道は Fig.11 のようになるが、火災ガスで汚染される範囲はこれ以上は広がらない。

Fig. 10 Fire gas, airflow, gas concentration and air temperature in the network 5 minutes after the fire outbreak at node 4.

Fig. 11 Fire gas, airflow, gas concentration and air temperature in the network 33 minutes after the fire outbreak at node 4.

火災温度が低いので下向き通気の坑道の流れを逆転するには至らない。各坑道の風量は火災発生後5分の場合とほとんど変わらないことがわかる。このような状態であれば消火活動も風上側坑道3-4から安全に実施できる。しかし、坑道3-30-31は火災温度が更に上昇すると、通気方向が逆転するので常に安全とは限らない。

(3) 高度差がない場合(5分後)

Fig.12は上述と同じ構造であるが、高度を全て0とした場合の解析結果である。この場合風量の変化は小さい。火災が通気におよぼす影響は主に自然通気圧によるものである。このため、通気網に高度差がない場合には火災の影響は火災の絞り効果によるもののみとなり、これによる変化は小さい。火災節点から通気が流れ出る坑道4-7、4-31、4-5を比較すると、坑道4-7へ流れる量が多いので、通気の平均温度も高くなる。このため、風量の減少は相対的にこの方向で大きい。しかし変化の絶対量は小さい。

6. 解析方法に関する検討

坑内火災のシミュレーションの主要な目的の1つは退避計画の立案^{10,11)}である。この際、火災より風下は直ちに通行不可とするのでは、退避の可能性を極めて限定してしまい、条件によっては、どんなことをしても退避できない箇所が生じる可能性がある。風下では火災ガスに遭遇するのは時間の問題であるが、火災ガスが来るまでは退避経路として利用可能である。また、火災より風上と考えられた場所でも火災ガスに遭遇し犠牲者を出した場合がある。このためには火災ガス移動を合理的に見積もる必要があり、火災のシミュレーションはこの目的に沿うものと思われる。

火災の現象は複雑である。本解析では通気温度計算に解析的方法を用いたために、解析時間は極めて短く、数多くの解析を容易に実施できる利点がある。その反面、複雑な条件に適切に対応できない短所がある。また、本解析では燃焼生成物や水の蒸発と凝縮等を考慮していない。これを解決するには通気温度計算を差分法などの数値的方法に置き換えることである。また、通気が逆転する場合には、通気温度の履歴が単純ではないので、正確な結果は期待できない。この解決には同様に岩盤温度計算の部分も差分法などの数値的方法に置き換えることが考えられる。この場合、条件にもよるが解析時間は現在の数秒程度から数時間程度以上へと増加すると考えられる。このようなプログラムはまだ開発されていないが、例え開発されても、短時間で多くの事例を検討できる解析的方法によるプログラムも同時に必要と考えられる。

火災時には坑道を通る通気速度は一樣であるという前提が近似的にでも成り立たない可能性がある。平常時であっても、正確に言えば坑道を通る通気速度は一樣ではない。通常の通気網解析はこのことを無視して解析を行っているが、その結果は通気管理を行う上で問題となっておらず、鉱山ばかりでなく、地下施設の開発においても風量分布シミュレーションの役割を十分果たしている¹⁸⁾。しかし、火災実験から火災ガスは通気と均等に混じって流れるのではなく、火災近傍では高温の層を形成して流れ、水平坑道であっても通気速度が遅いと坑道の上部では逆流の現象を示すことが明らかにされている¹¹⁾。このような1つの坑道内における反対方向の流れは、従来の通気網解析の理論では考慮できず、解析結果も全く異なるものとなると考えられる。すなわち、ある場合には通気速度は一樣という前提のシミュレーション結果は意味をなさない可能性がある。この解決のためにはCFDによる方法¹⁴⁾が