通気遷移図を利用した通気網管理に関する研究*

富 長 勇 作¹ 岩 本 隆 義²
駒 村 康 弘³ 田 中 威⁴

Ventilation Control Using a Ventilation Transition Diagram

by Yuusaku TOMINAGA¹, Takayoshi IWAMOTO¹, Yasuhiro KOMAMURA² and Takeshi TANAKA¹

1. Faculty of Engineering, Hokkaido University, Kita-ku, Sapporo 060
2. Chiyoda Kako Co., Ltd.

In order to enhance the safety in ventilation, a ventilation transition diagram was derived from the macroscopic characteristics of a complex ventilation network.

Main results are as follows;

- 1) The combination of two branches with linear relationship in airflow rates can be detected by computer simulations varying aerodynamic resistances of each branch in the network.
- 2) Airflow rates in a specified branch, coal face, advancing face, etc. are given as a linear function of the airflow rate in two branches with a regulator.
- 3) The airflow rate in a specified branch can be controlled using a ventilation transition diagram, which has a coordinate of airflow rates in two branches with a regulator and the airflow rate in the specified branch as a parameter.
- 4) A safety factor in the specified branch can be estimated by a decreased value of methane concentration with increasing airflow rate in the ventilation transition diagram.
- 5) The ventilation transition diagram, which shows changes of the airflow rate/direction in the network, can be utilized to decide the possible evacuation route in case of spontaneous combustion, mine fire and so on.

KEY WORDS: Ventilation Control, Macroscopic Characteristics, Ventilation Transition Diagram

1. 緒 言

坑内気象の評価・予測システムに関する研究は、坂井ら¹⁾、佐々木ら²⁾、井上ら³⁾ならびに天野ら⁴⁾により報告されており、これらの研究成果は各鉱山での通気の計画・管理に利用されている。また、パーソナルコンピュータを用いた山元での通気シミュレーションを行うシステムについては井上⁵⁾により紹介されている。

コンピュータおよび計測機器の発達は、実時間通気制御システムの中で通気網解析を行うことも可能としているので、著者らは通気制御手段の一つである通気抵抗値変化を利用する手法⁶⁾の開発に取り組んでいる。

通気網の中の1本の枝の通気抵抗値の変化に起因する風量分布の変化特性には、通気網全体の通気に及ぼす影響が関与するので、この特性を通気網のマクロ特性と本研究では呼んでいる。このマクロ特性を通気シミュレーションから求めておくと、風量の計測

値から1) 通気抵抗が変化した枝の判定ならびに2) 通気抵抗が変化した後の特定の枝での風量推定とが行えることを著者らは既に報告⁶⁾した。

本論文では、鉱山で使用されていた通気網を解析例に用いて、通気網データから構成されるすべての枝の組合せについてのマクロ特性と、本特性を利用して作られる通気遷移図について述べた後、これらの通気網管理への応用例について報告する。

2. 通気網のマクロ特性

本研究で用いた幌内炭鉱の通気網(坑道数191, 分岐点の数127, 排気坑口数1, 入気坑口数3)を図1に示す。グラフ理論での表記法に従い「坑道」と「坑道の分岐点」とをそれぞれ「枝」・「点」と本文では表記している。

通気網計算には修正ハーディクロス法⁷⁾を用いており、計算での条件等については前報⁶⁾と同じであるので、ここでの説明は省略する。

通気網中の1本の枝の通気抵抗変化に起因する通気量の変化特性(以下、マクロ特性と呼ぶ)の例を図2, 3に示す。図中の丸印は、図1で示された通気網において、一本の枝のみ通気抵抗値を種々変えた条件(通気抵抗変化枝以外の各枝の通気抵抗は現状

* 1993年4月26日受付 9月21日受理

1. 正会員 工博 北海道大学助教授 工学部資源開発工学科

2. 学生会員 北海道大学大学院 修士課程2年

3. 正会員 千代田化工建設(株)

4. 正会員 工博 北海道大学教授 工学部資源開発工学科

キーワード: 通気網, マクロ特性, 通気制御, 通気遷移図

図1 幌内炭鉱での通気ネットワーク

通気網内の各枝毎通気抵抗を2,000ミルグまで増加した場合の風量制御枝(枝174)での風量変化 dQ_{174} (横座標は通気抵抗増加枝(枝*i*)での風量変化 dQ_i)

図2 直線で近似できるマクロ特性の例

値を維持)での通気シミュレーション結果である。図2は、通気抵抗変化枝*i*での通気抵抗値を現状値から2, 20, 200, 2,000ミルグまでそれぞれ増加した場合について、枝*i*と切羽(枝174)との現状からの風量変化(dQ_i , dQ_{174})を表している。図2では、通気抵抗が増加すると通気抵抗変化枝での風量値は減少しているが、切羽風量については増加と減少の両方が示されている。図中の直線は直線回帰を当てはめた場合であり、図中の直線の相関係数は総て0.990以上である。なお、図2では切羽風量の現状値からの変化特性を調べるために、両座標値は風量の変化量で表しているが、以後本論文でのマクロ特性の表示はすべて風量値を用いることにする。

図3にマクロ特性が曲線となる例を示す。図中の丸印は、通気

図3 二次曲線となるマクロ特性の例

図4 マクロ特性値の相関係数の相対度数分布図

抵抗変化枝として枝1を選び、この枝の通気抵抗値として0.001, 10, 100, 1,000, 100,000ミルグをそれぞれ与えた通気シミュレーション結果での枝2と枝146とでの通気量の組合せを示している。

図中の実線は、枝2と枝146とでの通気量の関係に2次曲線回帰(相関比⁸⁾0.999)を当てはめた場合であり、参考として直線回帰(相関係数0.977)を当てはめた場合を破線で示してある。

なお、図1に示した通気網において、一本ずつすべての枝について通気抵抗値を20段階(0.001, 0.01, 0.02, 0.05, 0.1, 0.2, 0.5, 1, 1.5, 2, 3, 4, 5, 10, 20, 100, 200, 1,000, 10,000, 100,000ミルグ)変えた条件下で通気シミュレーションを実施した。通気網の中の2本の枝のすべての組合せ(変化させた通気抵抗値の最小値と最大値における通気量の差が3(m³/s)以下のものを除いた1573016組)について相関係数を調べ、その相対度数分布を図4に示した。図中の破線は相関係数の高い値から低い方への累積相対度数を示しており、横座標の相関係数の値が0.999, 0.995, 0.990以上となる組合せの占める割合は、それぞれ44%, 71%, 81%であった。

3. 通気遷移図

切羽での通気量制御には、局部扇機の利用など種々の方法が考えられるが、本研究では通気量計測と調量扉の開閉量設定とを組み合わせた通気制御を想定している。

図2に示されている枝の通気抵抗変化に起因する切羽(枝174)風量のマクロ特性については、2で述べた相関係数値を用いて線形性が判定できる。本研究では数式上の取扱いの簡便さからマクロ特性が直線で近似できる枝を調量扉設置候補としている。なお、図1の枝の配置等から主要入・排気立坑など調量扉の設置が難しいと判断される枝(例:枝3, 156, 159)を避けて、本研究では枝106と枝186にそれぞれ調量扉を設置するものとした。この2本の枝に設置された調量扉の開閉程度を変えることによる切羽(枝174)での風量制御可能範囲は、枝106と186での通気抵抗値を同時に種々変えた通気シミュレーションから求めることができる。図5にシミュレーションの結果を示す。図中の黒丸は現状での通気量の組合せである。図では枝106と枝186での風量を両座標に取り、切羽での風量値はパラメータとして表示されているので、本図は切羽(枝174)についての通気遷移図を表すことになる。図中の切羽風量の等値線は(1)式で表される重相関の回帰式から描いたものである。

$$Q_{174} = A \cdot Q_{106} + B \cdot Q_{186} + C \quad \dots\dots\dots (1)$$

上式は Q_{106} , Q_{186} 上での Q_{174} の回帰平面と呼ばれ⁸⁾、係数 A , B , C は図5の通気シミュレーション結果(図中の丸印)での通気量(Q_{106} , Q_{186} , Q_{174})を用いた最小二乗法⁸⁾から求められる。本例での係数 A , B , C の値はそれぞれ0.998, -0.154, 18.253となり、本係数値を用いて(1)式から Q_{174} を推定した場合の近似の

図5 切羽風量 Q_{174} をパラメータとした通気遷移図

図6 通気量制御領域に及ぼす他の枝の通気抵抗値の影響

程度を表す重相関係数の値は0.998であった。なお、重相関係数 $r_{174 \cdot 106, 186}$ は(2)式⁸⁾から求めた。

$$r_{174 \cdot 106, 186} = (1 - S_{174 \cdot 106, 186} / S_{174})^{0.5} \quad \dots\dots\dots (2)$$

上式において $S_{174 \cdot 106, 186}$ および S_{174} はそれぞれ(3), (4)式で計算される変動の平方和である。

$$S_{174 \cdot 106, 186} = \sum_{i=1}^{36} (Q_{174, i} - Q_{174, i, E})^2 \quad \dots\dots\dots (3)$$

$$S_{174} = \sum_{i=1}^{36} (Q_{174, i} - Q_{174, M})^2 \quad \dots\dots\dots (4)$$

上式において $Q_{174, i}$ および $Q_{174, i, E}$ は i 番目のシミュレーション結果と(1)式から推定した Q_{174} をそれぞれ表しており、 $Q_{174, M}$ は $Q_{174, i}$ の平均値である。

図5での切羽風量 Q_{174} の変動範囲は約10.0~21.5となっているので、枝106と枝186とに調量扉・風量センサをそれぞれ設置すれば、切羽風量は本範囲内で制御可能となる。

通気遷移図の利用では、調量扉を設置した枝以外の枝での通気抵抗は現状と同じと仮定しているので、この仮定が維持できない場合には、通気遷移図の形状・パラメータの変動範囲などが変わるので、新たな通気抵抗値を用いたシミュレーションを実施して通気遷移図を作り直すことが必要となる。通気遷移図の形状変化を図6に示す。本例での調量扉設置枝は枝100と102である。枝100と枝102の通気抵抗値として、0.0001ミルグおよび100,000ミルグから作られる4通り組合せを選び、通気シミュレーションを行った結果での風量値の組合せを、図中に白丸でそれぞれ表している。この白丸から通気遷移図の存在領域を近似したとき、この領域の占める範囲と形状は、枝101の通気抵抗値(現状は3.72ミルグであり、斜め奥行き方向の通気抵抗値の座標は図の比較を容易にする目的で自然対数目盛りを用いている)により大きく変わっている。本例から、通気遷移図を利用して通気制御を行う場合には、通気網中の枝の通気抵抗変化についての監視が必要であることが分かる。

本研究では、枝106と枝186に通気量センサが設置されていると

図7 風量測定枝106と167により判定可能な通気抵抗変化枝の例

仮定しているので、図7のような各枝の通気抵抗変化に対応したマクロ特性図をあらかじめ作成しておく、センサでの計測値から通気抵抗が変化した枝の判定が可能となる。図中の数字は枝番号であり、記載番号の各枝において通気抵抗値が現状値から2, 20, 200, 2,000ミルグそれぞれ増加した場合のシミュレーション結果を白丸で表している。

さらに、風量計測値から抵抗変化枝での新たな通気抵抗値の推定は、抵抗変化枝での通気抵抗値とセンサ設置枝の風量値との間の関連曲線を作成しておくことにより、可能となる⁶⁾。

4. 通気の余裕度・影響度の評価

採炭切羽・掘進坑道等でのメタンガスが予想値より多く湧出した場合には、調量扉の開閉状態を変更して通気量を増加し、安全なレベルにメタンガス濃度を保つことができると、切羽に設置されている重機等を停止することなく採炭が継続可能となる。

通気遷移図からは、切羽稼働時の通気量 Q_P と最大通気量 Q_{MAX} とを読み取ることができる。いま、切羽稼働時のメタンガス濃度(%)が $C_{CH_4, P}$ であったと仮定する。将来、メタンガスが予想より多く湧出した際には、通気遷移図での最大通気量を切羽に割り当てるものとする。このとき、メタンガス濃度を現在のレベル $C_{CH_4, P}$ に保つための許容湧出量の最大値 $Q_{CH_4, MAX}$ は、次式から求められる。

$$Q_{CH_4, MAX} = C_{CH_4, P} \cdot Q_{MAX} / (100 - C_{CH_4, P}) \quad \cdots (5)$$

上式において、 Q_{MAX} を Q_P で置き換えることにより現在のメタンガス湧出量 $Q_{CH_4, P}$ が求まる。ここで $Q_{CH_4, MAX}$ と $Q_{CH_4, P}$ との比をメタンガス湧出についての通気の余裕度 S_F と呼ぶものとする、 S_F は(5)式の関係から次式で表される。

$$S_F = Q_{CH_4, MAX} / Q_{CH_4, P} = Q_{MAX} / Q_P \quad \cdots (6)$$

図5では切羽での現状の風量(図中の黒丸印)および最大通気量がそれぞれ15.8と21.5 m³/sと読み取れる^{a)}ので、本切羽での通気の余裕度 S_F は、(6)式から1.36となる。これより、本切羽での将来のメタンガス湧出量が現状の1.36倍以内であれば、図5の座標で示されている枝に設置された調量扉の開閉により、現状のメタンガス濃度が維持されることになる。

現場ではガス湧出量より、メタンガス濃度が一般に用いられているので、前述の許容最大湧出量を現状の風量を基準としたメタンガス濃度で表す方法について述べる。切羽でのメタンガス濃度が0.7%の場合を説明例として仮定する。この場合の許容最大湧出量を(6)式から求めた後、次式に代入すると現状の風量値でのガス濃度は0.95%となる。

$$C_{CH_4, MAX} = Q_{CH_4, MAX} / (Q_P + Q_{CH_4, MAX}) \cdot 100 \\ = S_F \cdot C_{CH_4, P} / \{100 + (S_F - 1) \cdot C_{CH_4, P}\} \quad \cdots (7)$$

メタンガスの湧出量 $Q_{CH_4, P}$ が変わらないと仮定できる場合には、現在ガス濃度 $C_{CH_4, P}$ から通気増加による最低濃度 $C_{CH_4, MIN}$ は次式で表され、上述の例では0.52%となる。

$$C_{CH_4, MIN} = Q_{CH_4, P} / (Q_{MAX} + Q_{CH_4, P}) \cdot 100 \\ = C_{CH_4, P} / \{S_F - (S_F - 1) \cdot C_{CH_4, P} \cdot 100\} \quad \cdots (8)$$

もし、切羽(枝174)でのメタンガス湧出についての通気の余裕度 S_F を1.5以上確保する必要がある場合には、図2に示された枝を用いた通気遷移図を種々作り、所定の条件を満たす組合せとなる枝に調量扉・センサを設置するとよい。例として、枝167と枝186設置された調量扉の組合せによる通気遷移図を図8に示す。図において切羽(枝174)での最大風量は27.5 m³/sと読み取れ

図8 枝167, 186に調量扉を設置した場合の切羽風量 Q_{174} , Q_{172} , Q_{89} に関する通気遷移図

る^{b)}ので、本調量扉の組合せにより通気の余裕度 S_F は1.74まで上昇することになる。

切羽(枝174)での風量制御を行う場合には、制御対象となる切羽での風量増加に伴う他の稼働切羽(枝172と枝89)での通気変動を知ることが保安を確保する上で必要である。図8には稼働切羽での通気変動範囲(枝172: 7.5~14.6, 枝89: -1.0~27.0)についてもパラメータの等値線として表示してある。これらの等値線は前章で述べた重相関の回帰式から描かれており、風量に関して切羽(枝174, 枝172, 枝89)に対する枝167と枝186の重相関係数は、それぞれ0.9998, 0.9991, 0.9990であった。

図8から枝167と枝186での調量扉の組合せによる各稼働切羽での風量値を知ることができるので、切羽(枝174)での風量増加に伴う他の切羽(枝*i*)が受ける通気の影響度 $E_{F, i}$ を次式により表すものとする。

$$E_{F, i} = Q_{C, i} / Q_{P, i} - 1 \quad \cdots (9)$$

上式において $Q_{P, i}$ と $Q_{C, i}$ は、切羽(枝174)での風量増加の前後での切羽(枝*i*)風量をそれぞれ表している。図中の破線は切羽(枝174)での風量増加経路の一例を示しており、この経路での他の切羽(枝172と枝89)に対する通気の影響度の最大値は、それぞれ0.27, 0となる。図において制御対象となる切羽での風量増加経路は種々選ぶことができるので、他の切羽での通気の影響度が負とならないように風量増加経路を定めることが必要となる。

5. 火災発生時の初期対策および退避経路判定

炭鉱において石炭の自然発火または坑内火災が発生した場合には、初期対策を迅速に実施することが必要である。この対策の中には通気遮断および人員の作業箇所からの退避経路の確保等も含まれる。

自然発火の発生が予想される区域内に位置している枝での通気遮断並びに退避予定経路に含まれる枝での通気確保等にも通気遷移図が利用できる。このためには、枝の組合せを種々変えた通気遷移図の中から調量扉を設定すべき枝を選び出すことになる。説明例として炭層中に位置する枝100の通気遮断の例として枝101と枝102とに調量扉を設置した場合の通気遷移図を図9に示す。図中の白丸は、枝101と枝102での通気抵抗値として、0.001, 10, 100, 1,000, 100,000ミルグの値の組合せで通気シミュレーションを行った場合の枝101と枝102での風量値の組合せを示しており、黒丸は通気抵抗の現状値での組合せを表している。図から枝100の通気

a) この値は Q_{174} の等値線の分布から目測した場合であり、通気遷移図の分布限界($R_{186}=100,000$ ミルグと $R_{106}=0.001$ ミルグの組合せで近似)での Q_{174} の値である。

b) この値は、脚注a)と同様 Q_{174} の等値線の分布から目測した場合であり、通気遷移図の分布限界($R_{167}=100,000$ ミルグと $R_{186}=100,000$ ミルグの組合せで近似)での Q_{174} の値である。

図9 炭層内に位置する枝100での通気を遮断する場合の通気遷移図の例

図10 退避経路中の枝101の風向きを反転させる通気遷移図の例

遮断を行うには、枝101と枝102との通気抵抗を同時に高抵抗値とすることが必要であり、調量扉を片方のみ閉じても枝100の通気遮断には効果の無いことが分かる。

排気経路に含まれている枝についても調量扉を設置する枝の組合せを種々変えた通気遷移図を作成して、通気方向を反転させる枝の組合せが特定できると、その枝に調量扉を設置すれば、退避経路候補の組合せが増えることになる。通気方向の反転例として、図1での排気坑道(枝101)での通気遷移図を図10に示す。図中にパラメータ表示されている風量から枝101の風向は変わることが分かるので、調量扉を枝102と枝131に設置すると枝101を退避経路候補の中に入れることが可能となる。退避経路は、退避経路候補の中から火災の発生箇所、通気網全体の風量分布、通気が逆転する際の通気が0になる場合の当該箇所でのガス湧出特性、爆発性ガスの火災箇所への逆流の可能性の有無等の状況を考慮して決定されなければならない。

6. 結 論

複雑な通気網の macroscale 特性の応用例として、通気網管理を目的とした通気遷移図の利用について紹介した。本研究の結果を以下に記す。

1) 複雑な通気網では、通気制御対象枝についての macroscale 特性が直線性を示す枝を通気遷移図での調量扉設置枝として選ぶことにより、通気遷移図での通気制御対象枝での風量は重回帰式によ

りパラメータ表示できる。

2) 調量扉設置枝以外の枝での通気抵抗が変わると、通気遷移図も変わるので、通気量の計測から通気抵抗値が変化した坑道を判定する等、通気遷移図の利用においては通気抵抗値の管理が必要である。

3) 通気遷移図での座標として、調量扉を設置した枝の通気量を取り、パラメータとして複数の注目する枝での風量を表示することにより、風量を増加したい注目枝 a での通気余裕度並びに注目枝 a の風量増加時の注目枝 b の風量影響度を知ることができる。

4) 自然発火・坑内火災の発生可能性が高い枝での通気量が0となる通気遷移図を通気シミュレーションの実施から求め、本遷移図での座標に選ばれた枝に調量扉と通気量センサを設置しておく、本災害発生時の初期対策として利用できる。

5) 作業箇所からの退避経路において、通気方向の逆転が必要な場合には、通気シミュレーションから通気遷移図を種々作成して、逆転の有無の判定と逆転が可能な場合の調量扉・通気量センサ設置枝の選定ができる。

今後の課題と展望について以下に述べる。

1) マクロ特性が直線性を示す場合の条件の特定

各枝での風量は、枝の両端に作用する見かけの扇風機特性曲線と枝の特性曲線の交点と考えることができる。通気抵抗変化枝での通気抵抗変化の影響は、通気抵抗変化枝以外の枝には見かけの扇風機特性曲線の変化として作用し、通気抵抗変化枝では枝の特性曲線の変化として作用することになる。この抵抗変化後の各枝での風量の変化量を求めたとき、変化風量が異なる枝 p 、 q の間で比例関係 $((Q_{p1}-Q_{p2}) \propto (Q_{q1}-Q_{q2}))$ が成立するとき、マクロ特性が直線性を示すことになる。本報告では数値計算による手法でマクロ特性を抽出しているの、理論的な面からもマクロ特性の解明に取り組むことが必要である。

2) マクロ特性が曲線で表される場合の通気遷移図の利用手法の開発

マクロ特性が曲線で表される場合には特性曲線の単調性の有無の判定が問題となる。単調曲線の場合には、本論文で述べた手法の応用で通気遷移図が作成できる。単調でない場合には多価関数となる場合が発生するので、本手法を応用するだけでは通気遷移図を作成することはできない。応用範囲をより広げるためには、マクロ特性が曲線となる場合についての研究が必要である。

本研究を行うに当たり、通気網データを提供して頂いた幌内炭鉱に謝意を表す。

引 用 文 献

- 1) 坂井・柴田・竹村・水田：高温岩盤内の新鉱床開発に効果的な通気システムの拡充－岩盤開発設計のための予測とモニタリング－，資源と素材，Vol. 109，p. 9-15，(1990)
- 2) 佐々木・宮腰・小野塚・木下：地下通気網における気流温度・湿度予測解析システム，資源と素材，Vol. 108，p. 378-388，(1992)
- 3) 井上・内野：節点解法による通気網解析の高速化について，資源と素材，Vol. 105，p. 532-538，(1989)
- 4) 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，Vol. 102，p. 753-761，(1986)
- 5) 井上雅弘：資源と素材，現場指向型通気シミュレーションソフトの開発と実施成果，Vol. 108，p. 78-81，(1992)
- 6) 富長勇作・梅木裕一：通気網 macroscale 特性の鉱山通気制御への応用，資源と素材，Vol. 107，p. 261-264，(1991)
- 7) 富長・磯部・根元・林・山口：通気網制御のための基礎的研究，日本鉱業会誌，Vol. 101，p. 9-14，(1985)
- 8) 林 周二：統計学講義 第2版，p. 34-64，(1973)，丸善