通気網の風量解析を利用する通気システムの最適化*

李 ビ ン ル イ¹ 井 上 雅 弘² 内 野 健 一³

Optimization of Ventilation System Using Ventilation Network Analysis

by Bingrui LI^{a*}, Masahiro INOUE^a and Kenichi UCHINO^a

a. Department of Earth Resources Engineering, Kyushu University, 6-10-1, Hakozaki, Higashi-ku, Fukuoka, 812-8581, Japan (*Corresponding author : E-mail li@mine.kyushu-u.ac.jp)

This paper discusses a new method for optimization of mine ventilation system. The method is based on criteria as follows: (1) minimize the size of each regulator; (2) minimize the number of regulators; and (3) minimize the total power consumption of fans. Based on this theory, the optimization problem of the ventilation system is classified as optimization of mine ventilation network and calculation of operating points of fans. Furthermore an algorithm that determines the economical operating point of fans while calculating the optimum controls of ventilation network is proposed. The main features of this method are that it does not require the analysis of a large-scale nonlinear programming problem, and the optimal solution can be obtained by means of existing programs for mine ventilation network analysis.

KEY WORDS : Optimization of Ventilation System, Total Cost, Control of Ventilation Network, Operating Point of Fan

1. 緒 言

作業個所などに必要な量と質の空気を供給するためには、風量の調節が必要である。調節方法（例えば抵抗増加、抵抗減少の調節）及び調節個所が違えば通気のための動力コストのみならず調節に必要な工事コストも異なる。また、巨大化した通気網に対しては経験による調節は困難であるので、風量調節のための有効な技術指針を与えるような計算方法が要求されている。

1980年代から、通気調節の最適化に関しては多くの研究が報告されているが、最適化の基礎的観点の一つではないので、その数学モデル及び解析方法は様々である。従来の代表的な基本的観点としては、通気に要するエネルギーの最小化があり、その数学モデルは非線形計画あるいは線形計画である²⁾⁴⁾。しかしこれらの方法では調節に要する工事コストを考慮していないので、実際にこれによる調節に多額の工事コストを要すれば、その結果は必ずしも最も経済的であるとは言えない。

したがって通気システムの最適化は通気のための動力コストのみならず調節に要する工事コストも考慮する必要がある。この観点から筆者らは、全コストに基づく最適化を提案した⁷⁾。その後、筆者らは最適化に関する技術的条件と経済的条件の取り扱いについてのいくつかの新しい知見を得た。これらの結果を利用すれば大規模非線形計画問題を解析する必要がなく、通気網の風量解析を利用して通気システムの最適化が可能となる。本論文では、その方法について述べる。

2. 基本理論及び解析方法

通気システムは通気網とメインファンからなるので、通気システムの最適化は通気網の最適調節とファンの経済的運転の問題である。しかしながら、従来これは特に区別されず単に通気網の最適化と言われていることが多い。

2・1 システム変数と制約条件

従来、通気網の最適化は通気に要するエネルギー消費を最小にするという方針で行われてきた。これをもって最も経済的な調節としていたが、実際にはこの調節のために多額の工事コストを要すればこれは必ずしも最も経済的とは言えない。従って、通気網の最適化は通気のためのエネルギー消費の最小化のみならず、調節に要する工事コストを含んだ全コストの最小化でなければならない。調節方法や調節個所などが違えば工事コストが違い、通気網の風量分布やファンの作動点が違えばエネルギー消費が違っているので、調節個所と抵抗の調節値、風量分布とファンの作動点が求まるべき未知数である。制約条件としては、風量バランス式と圧力バランス式及び次の2・1・1～2・1・3がある。

2・1・1 調節個所と抵抗の調節値 坑道は、その通気網における位置、用途などが異なることにより、通気抵抗が調節可能な坑道もあれば調節不可な坑道もある。通気抵抗が変更可能であるかどうかは通気網調節のための最も基本的な技術的条件であり、次式で表す。

$$L_s \leq s \leq U_s \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 s は抵抗の調節値、 L_s と U_s はそれぞれ調節許容値の下限と上限である。 $L_s = U_s = 0$ は抵抗の調節不可、 $L_s = 0$ と $U_s > 0$ は抵抗増加の調節のみ可能、 $L_s = -\Delta R$ と $U_s > 0$ は抵抗増減の調節可能、 $L_s = -\Delta R$ と $U_s = 0$ は抵抗減少の調節のみ可能であることを意味する。ここで、 ΔR は抵抗減少の調節の許容値である。

2・1・2 所要風量 通常、多くの最適化方法では作業個所などの所要風量を一定の風量としている。しかしながら、鉱山

* 2003年5月30日受付 9月3日受理
1. 普通会員 工博 九州大学大学院助手 工学研究院 地球資源システム工学部門
2. 普通会員 工博 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
3. 普通会員 工博 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・地球資源システム)
E-mail : li@mine.kyushu-u.ac.jp
キーワード : 通気システムの最適化, 全コスト, 通気網の調節, ファンの経済的作動点

の通気における実質的な意味から、また鉱山保安規則との対応という観点からも、所要風量を固定値とするよりもむしろ、ある幅 $[Lq, Uq]$ を持った値とするほうが適切である。ここで、 Lq と Uq はそれぞれ所要風量の下限と上限である。本論文ではこのような区間風量を採用する。こういう意味で、所要風量を一定の風量とする最適化は本方法の特例であると言える。本論文では、作業箇所などのような区間風量が要求される坑道を目的坑道と呼ぶことにする。

2・1・3 ファン特性 理論上、通気網の最適総風量と最適総抵抗は目的坑道の所要風量及び抵抗の調節値に決められ唯一である。従って、通気網の最適化を行うとき、ファンの効率を考慮しなければどのようなタイプ（遠心か軸流）のファン、どのような特性曲線方程式を用いても求められるファンの最適作動点は同じである。しかし計算上何らかの特性曲線方程式を用いる方が便利なので、本計算方法においては架空のファンを使ってその特性曲線を次のような直線で表示することにする。

$$h_f = a_1 q_f + a_2 \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここで、 h_f と q_f はファンの圧力と風量、 a_1 と a_2 は定数である。

一般に、メインファンは調節可能である。その圧力の調節可能範囲を

$$Lh_f \leq h_f \leq Uh_f \quad \dots\dots\dots (3)$$

で表す。ここで、 Lh_f と Uh_f はそれぞれファン圧力の調節可能範囲の下限と上限である。

2・2 目的関数

通気システムの最適化は通気のためのエネルギー消費の最小化及び調節に要する工事コストの最小化でなければならない。この観点から最適化の目的関数は次式で表わされる。

$$Z_1 = \sum_{j=1}^f h_{ff} q_{ff} \quad \dots\dots\dots (4)$$

$$Z_2 = \sum_{j=1}^d u_j + \sum_{j=1}^d v_j \quad \dots\dots\dots (5)$$

ここで、 f はファン数、 d は調節数、 u_j は工事・材料コスト、 v_j は維持コストである。

式 (5) は調節方法のみならず、調節施設の位置、仕様と寿命など数多くの要素にも関係するので、正しく解析することは極めて困難である。従って、式 (5) を代替できるほかの目的関数を探し求める必要がある。調節施設の寿命を考えると一般に言われている通気網の最適化はある期間における最適化である。

通気網の最適化は結局、所要の通気を行うために必要な全コストが最小となる調節条件を求める問題である。例えば、坑道の風量が一定という条件のもとで、抵抗増加の調節を行う場合、抵抗の増加値は大きいほど通気のための動力コストは大きくなり、調節箇所は多いほど工事コストは大きくなる。従って、抵抗の調節値は小さいほど、調節箇所は少ないほど、調節は経済的である。

抵抗減少の調節を行う場合は、坑道断面の拡大にしても、既存坑道に並列する新しい坑道の掘進にしても、全コストを最小にする新しい坑道の断面積と長さを求める問題である。

例えば、既存坑道と並列な新しい坑道を掘進する場合、掘進コストと通気のための動力コストは新しい坑道の長さ按比例するので、新しい坑道の開さくによって全コストが節約されるかどうかは、新しい坑道の長さによってほとんど無関係であり、主に掘進単価と動力単価の比、坑道を流れる風量、坑道の寿命などに依存する。多くの計算によると⁷⁾、風量が相当大きい排気坑道を除けば、一般に工事コストはいつも動力コストの節約より大きい。したがって、抵抗減少の調節の場合でも抵抗の調節値が小さいほど調節は経済的であると考えられる。

ここで、通気計画における通気専用坑道の経済的断面積は最適化における並列坑道による抵抗減少の調節と違うことを特に強調する必要があると思われる。前者では、ある作業個所に通気するのに新しい坑道の掘進は技術的に必要不可欠であり、この前提条件のもとで全コストが最小となる坑道の断面積を求める。後者は、既存坑道の抵抗を減らし、通気のための動力消費を減少することを目的とし、新しい坑道の掘さくによって全コストが節約されればその掘さくは可能となるが、そうではなければ必要がない。

以上の検討によって、坑道の風量が一定の場合、抵抗増加にしても抵抗減少にしても、抵抗の調節値が小さいほど、また抵抗を変化させる坑道数が少ないほど、通気網の調節は経済的であると考えられる。言い換えれば調節をせず所要の風量を配分できる通気網は最も理想的である。このような観点によれば、工事コストの最小化の目的関数を、式 (5) の代わりに以下の 2 つの目的関数で表すことができる。

(a) 抵抗を変化させる量(抵抗の調節値)をできるだけ小さくする。

(b) 抵抗を変化させる坑道数(調節数)をできるだけ少なくする。

数式で表示すれば、

$$\min J_1 = \sum_{j=1}^b |s_j| \quad (j=1, 2, \dots, b) \quad \dots\dots\dots (6)$$

$$\min J_2 = N_r \quad \dots\dots\dots (7)$$

ここで、 b は坑道数、 N_r は抵抗を変化させる坑道数である。

グラフ理論によれば、グラフの節点をすべて含み、メッシュを持たない連結グラフ (connected graph) を生成木 (spanning tree) といい、その補グラフを補木 (cotree) という。これを通気学に適用すれば、一般に補木に属する坑道を基本坑道、生成木に 1 つずつ基本坑道を加えてできるメッシュの集合を基本メッシュと言うことにする。目的坑道を基本坑道とすれば、基本メッシュはそれぞれ目的坑道を 1 つ以下有することになる。一般に、通気網における目的坑道は相互並列の関係である。直列関係の目的坑道が存在すればそのどちらかの坑道を目的坑道とし、他の目的坑道は一般坑道とする。このように整理すれば目的坑道は必ず基本坑道に属するようにできる。風量調節の基本原則に基づけば、メッシュが目的坑道を有する場合、このメッシュを調節する必要があるが、そうではなければ必要がない。ここで、 nk を目的坑道数とすれば、目的坑道に所要の風量を配分するために要する最大の調節数は

$$N_r \leq nk \quad \dots\dots\dots (8)$$

さらにファンが調節可能であれば、一般に最大の調節数は

$$N_r \leq nk - f \quad \dots\dots\dots (8')$$

最大の調節数が式 (8) で求められるので、式 (6) を目的関数として残り、式 (7) を制約条件として取り扱うことにする。

式 (6) と (7) は技術的目的であり、ファンの特性曲線が一定の場合の、通気網の最適調節の問題である。式 (4) は経済的目的であり、通気網の調節が一定の場合の、ファンの経済的運転の問題である。通気の目的は目的坑道に必要な量と質の空気を供給し、その安全と良好な環境を維持することであるので、通気網の調節を優先し、さらに、ファンの余裕があれば、経済的条件を加味することが望ましい。このように目的関数を階層化できる。この階層化によって、通気網の最適調節を先に、ファンの最適作動点を後で計算することができる。通気網を調節しながらファンの最適作動点を決める必要があるので、本論文では、最適化を 2 つのステップに分け、(1) 通気網の最適化調節、(2) ファンの経済的作動点の計算として、両者を組み合わせたアルゴリズムを考えた。

2・3 通気網の最適化

目的関数の階層化を行ったので、通気網の最適調節を行うときには、ファンの調節を考慮しなくてもよい。このとき最適化の数

学モデルは次のように定式化することができる。

$$\min J = \sum_{j=1}^b |s_j| \quad \dots\dots\dots (9)$$

$$\text{s.t.} \quad \sum_{j=1}^b a_{ij} q_j = 0 \quad (i=1, 2, \dots, p-1) \quad \dots\dots\dots (10)$$

$$\sum_{j=1}^b b_{ij} (r_j + s_j) q_j |q_j| - h_{fi} - h_{ni} = 0 \quad (i=1, 2, \dots, m) \quad \dots\dots\dots (11)$$

$$Lq_j \leq q_j \leq Uq_j \quad (j \in NK) \quad \dots\dots\dots (12)$$

$$Ls_j \leq s_j \leq Us_j \quad (j=1, 2, \dots, b) \quad \dots\dots\dots (13)$$

$$0 \leq N_r \leq nk \quad \dots\dots\dots (14)$$

ここで、 m は基本メッシュ数、 p は節点数、 NK は目的坑道の集合、 h_{ni} はメッシュ i における自然通気圧力である。 a_{ij} は接続マトリックスの要素、 j 坑道が i 節点に接続しかつ i は j の終点であれば $a_{ij} = 1$ 、起点であれば $a_{ij} = -1$ 、そうでなければ $a_{ij} = 0$ である。 b_{ij} は基本メッシュマトリックスの要素、 j 坑道が i メッシュに属しかつ i の方向と同じであれば $b_{ij} = 1$ 、反対であれば $b_{ij} = -1$ 、そうでなければ $b_{ij} = 0$ である。

式 (9) ～ (14) は非線形計画の問題で、非線形計画の手法で解析できる。また目的関数も制約関数ともに加法形で、配分問題であるので、動的計画の手法でも解析できる。しかしながら、通気網最適化の数学モデルは大規模な非線形計画の問題で、実際にはこれらの手法を使う解析はそう簡単ではない。式 (9) ～ (14) に示された数学モデルを解析する目的は抵抗の調節値を求めることである。通気網の風量解析の知識によれば、定風量を与える坑道の抵抗は通気網の風量解析によって求めることができる。当然なことであるが、この求められた抵抗は坑道の真の抵抗ではない。両者の差を、所要の通気を供給するために要求された抵抗の調節値と見なすことができる。このように考えると、通気網の風量解析に基づいて上記モデルを解析することも可能である。本論文では、この方法を提案する。

全然抵抗の調節を行ってない状態を初期状態といい、その風量分布を $Q_0 = (q_{01}, q_{02}, \dots, q_{0n})$ で表す。また上記数学モデルは唯一の最適解 $S_m = (s_{m1}, s_{m2}, \dots, s_{mn})$ 、 $Q_m = (q_{m1}, q_{m2}, \dots, q_{mn})$ を持つとすれば、抵抗の調節による各坑道の初期状態からの圧力変化 Δh_j は次式で表すことができる。

$$\Delta h_j = (r_j + s_{mj}) q_{mj}^2 - r_j q_{0j}^2 \quad (j=1, 2, \dots, b) \quad \dots\dots\dots (15)$$

ここで、ある仮定の抵抗 s_j が存在して $\Delta h_j = s_j q_{mj}^2$ が成立するとすれば、式 (15) は次のように書き直される。

$$s_{mj} = s_j + r_j \left(\frac{q_{0j}^2}{q_{mj}^2} - 1 \right) \quad (j=1, 2, \dots, b) \quad \dots\dots\dots (16)$$

この式は抵抗の調節値を求めるための基本式である。式 (16) において、初期状態の風量分布 Q_0 は自然配分 (natural splitting) の風量解析によって求められるが、 Q_m は未知量である。しかし、 Q_m は式 (12) に示した制約条件を満足しなければならないので、次の方法で求めた風量分布を Q_m の近似値とすることができる。

まず、目的坑道に対して

$$q_{kj} = \begin{cases} Lq_j & q_{0j} < Lq_j \\ q_{0j} & Lq_j \leq q_{0j} \leq Uq_j \\ Uq_j & q_{0j} > Uq_j \end{cases} \quad (j \in NK) \quad \dots\dots\dots (17)$$

と置く。次に $q_{kj} (j \in NK)$ を定風量として部分制御配分 (semi-controlled splitting) の風量解析を行い、この解析風量 $Q_k = (q_{k1}, q_{k2}, \dots, q_{kn})$ を Q_m の近似値とする。 Q_k は必ずしも Q_m に等しくないため、抵抗の調節値 S_m の計算は式 (17) と (16) のサイクル計算となる。収束を速くするために、 s_j を含む抵抗を次の計算の坑道抵抗とする。すなわち、

$$s_j^k = s_j^{k-1} + r_j^{k-1} \left(\frac{q_j^{k-1}}{q_{kj}^{k-1}} - 1 \right) \quad \dots\dots\dots (18)$$

$$r_j^k = r_j^{k-1} + s_j^k \quad \dots\dots\dots (19)$$

$$s_{mj} = \sum_{k=1}^K s_j^k \quad \dots\dots\dots (20)$$

ここで、 k はサイクル回数であり、また $k=1$ のとき $q_j^{k-1} = q_{0j}$ である。

式 (20) で求めた s_{mj} は調節範囲の制約である式 (13) と (14) を自動的に満足するわけではない。したがって、サイクルごとに式 (13) で抵抗の調節値 s_{mj} を必要に応じて修正し、また基本メッシュはそれぞれ 1 つ以下の調節を含むかどうかを確認する必要がある。もし 2 つ以上の調節を有するメッシュが存在すれば、 $|s_{mj}|$ が最大の調節を有効とし、他の調節はその値を 0 に設定する。理論上、 k 回目のサイクルで $q_j^k = q_{kj}^k (j \in NK)$ のとき、 s_j^k は 0 に収束し、 s_{mj} は最適調節となる。 k 回目の計算を行った後、すべての $j \in NK$ の目的坑道に対して $\max\{|q_j^k - q_{kj}^{k-1}|\} < \varepsilon_q$ を満足したが $q_j^k < Lq_j$ の坑道が存在すれば、 q_j^k は Lq_j に収束することは不可能である。この場合、ファンの圧力を増やして再び計算する必要がある。ここで ε_q は風量の計算精度である。

式 (17) に示した計算方法によると、 q_j^k は q_{kj}^k に収束するとき q_{mj} は所要風量の下限 Lq_j との差が最も小さい風量分布であるので、 Q_m は最適風量分布である。一般に抵抗の調節値を条件として与え風量分布を求める場合、その解は唯一であるが、調節前後の風量を条件として与えそれに要する抵抗の調節値を求める場合、その解は無数に存在する。しかしながら、基本坑道 (補木に属する坑道) を、抵抗の調節ができる坑道とすればその解は唯一である。また調節前後の風量変化は小さいほど求められる抵抗の調節値は小さいので、式 (20) で求めた S_m はファンが一定の場合の最適解である。従って、以上の方法で求めた S_m と Q_m はファンが一定の場合の最適解である。

2・4 ファンの調節

以上の方法で求めた抵抗の調節値 S_m と風量分布 Q_m はファンを一定とした場合の最適解である。ファンに調節の余裕があれば Q_m はかならずしも最も経済的風量分布ではないので、真の最適風量分布を求めるためには、ファンの調節を行わなければならない。まず、ファンが一台の場合について考えてそれから複数台の場合に拡張する。

目的坑道自身が調節できる坑道と、その自身は調節不可であるがそれに直列する坑道が調節可能である坑道の集合を CS で、 CS を除いた目的坑道の集合を NS で表すことにする。また、入気坑から出発し、通気方向に沿って排気坑までたどった坑道の連鎖を通気網に関するパス (path) と言うことにする。ただし、同一の節点を 1 つのパスは 2 回以上通過することができない。基本パスの数は基本メッシュの数と等しい。ファンの最適作動点を求めることは、即ち調節値 S_m が一定の条件で、最小の風量分布を求めることである。風量調節の基本原理解に基づいて、風量分布と抵抗の調節値が最適解となる必要十分条件はそれぞれ次の通りである⁸⁾。

- $j \in CS$ であれば j 目的坑道の風量はその所要風量の下限に等しい。また NS に属する坑道の中にその風量が所要風量の下限に等しい坑道が少なくとも 1 つ存在する。
- ファンの調節が可能であれば、調節を含まないパスが少なくとも 1 つ存在する。

条件 (a) によって、 Q_m が最適風量分布でなければ、ファン風量の調節可能量は

$$dq = \sum_{j \in CS} (q_{mj} - Lq_j) + \min\{(q_{mj} - Lq_j), j \in NS\}$$

となる。しかし実際の計算において、これをファン風量の調節可能量とすれば 2・3 に示した計算が収束しない可能性がある。計算の収束性及び収束の速度を守るため、本論文では逐次漸近の方法を用いた。

まず、CS に属する坑道に対して、 $(q_{mj} - Lq_j)$ が最も大きい坑道を求め、その坑道の番号を u で記す。次に NS に属する坑道に対して、 $(q_{mj} - Lq_j)$ が最も小さい坑道を求め、その坑道の番号を v で記す。それから

$$dq_1 = \max\{(q_{mu} - Lq_u), (q_{mv} - Lq_v)\}$$

をファン風量の調節可能量とする。この場合、ファン圧力の調節可能量は

$$dh_1 = h_f - \frac{h_f}{q_f^2} (q_f - dq_1)^2 \quad (21)$$

となる。

同様に条件 (b) によって、 S_m が最適調節でなければ、目的坑道を基本坑道とするすべてのパスに対して、

Fig. 1 Multiple-fan ventilation system.

Fig. 2 Optimization strategy for mine ventilation system.

$$dh_2 = \min \left\{ \sum_{j=1}^b c_{ij} s_{mj} q_{mj}^2, (i=1, 2, \dots, m) \right\} \quad (22)$$

を求める。 dh_2 を条件 (b) に基づくファン圧力の調節可能量とする。ここで、 c_{ij} はバスマトリックスの要素で、 j 坑道が i パスに属すれば $c_{ij} = 1$ 、そうでなければ $c_{ij} = 0$ 。

実際の計算においては、式 (21) あるいは式 (22) のどちらかが先に 0 に収束する可能性があるため、条件 (a) と (b) を統合して考慮すれば、

$$dh = \max\{dh_1, dh_2\} \quad (23)$$

をファン圧力の調節可能量とする。調節後のファン特性曲線は $h_{fm} = h_f - dh$ である。

すでに求めた抵抗の調節値 S_m は h_f に対応する最適調節で、ファンの特性曲線を h_{fm} に変更すると、 S_m は必ずしも最適調節とは言えなくなる。従って式 (24) を式 (11) に代入し、さらに S_m を計算する必要がある。こうすると、通気システムの最適化は 2・3 と 2・4 のサイクル計算となる。この計算は $dh \leq \epsilon_f$ までに続ける。ここで、 ϵ_f はファン圧力の計算精度である。

坑道数が b 、節点数が p 、ファン数が f の任意の通気システムは入気坑、坑内通気網と排気坑の 3 つの部分から成り立つと見なせる (Fig.1)。ファンの排気口を 1 つの仮想の坑道 (Fig.1, 点線) に接続し、この坑道の通気抵抗を 0、風量をファンの風量とする。また、これらの仮想坑道は抵抗増加の調節ができ、共通の終点を有するとすれば、複数のファンを 1 つの仮想のファンに合成することができる。以上の仮説は通気網の構造や風量分布を変更しないので、1 つの仮想ファンを複数のファンに代替しても最適化の解が影響されない。

以上の計算手順をまとめると Fig.2 に示すようになる。この手順に従い既存の通気網の風量解析プログラムを基にして C++ 言語で最適化のためのプログラムを作成し、実際の通気網を含む十数種類の通気網の最適化を行った。計算のプロセスによれば収束速度は主に坑道数とファン数に関係することが分かる。例えば、ファンが 1 台、坑道数が 23 本の通気網では計算が収束するまでに要する通気網の風量解析の回数は 9898 回で、計算時間 (Pentium4 プロセッサ 2.0GHz を使用する場合は) およそ 4 秒であるが、ファンが 3 台、坑道数が 52 本の通気網では風量解析の回数は 7 万回以上で、計算時間はおよそ 30 秒である。本方法では、坑内ブースターファンによる調節を考慮していないので、抵抗調節及び地表ファンによる通気システムの最適化ということになる。

3. 解析例

Fig.3 に示す通気網を例として本計算方法を示す。同通気網は目

Fig. 3 The example network.

Table 1 Input data for example network.

j	r_j N·s ² /m ⁸	Lq_j m ³ /s	Uq_j m ³ /s	Us_j N·s ² /m ⁸	Us_j N·s ² /m ⁸
1	0.0844				
2	1.82778	6.1	8.1	0	>0
3	1.82778	6.1	8.1	0	>0
4	1.97018	6.1	8.1	0	>0
5	1.61032	5.4	7.4	0	>0
6	1.61032	5.4	7.4	0	>0
7	1.50952	5.4	7.4	0	>0
8	1.44783	6.7	8.7	0	>0
9	1.35999	6.8	8.8	0	>0
10	0.1265				
11	0.1491				
12	0.312				
13	0.2923				
14	0.2433				
15	0.4326				
16	0.415				
17	0.6651				
18	0.3296				
19	0.3952				
20	1.0114				
21	95.52	2.5	6.5	0	>0
22	1.4293				
23	2.42				

的坑道が 9 本、ファンが 1 台で、その調節可能範囲は

$$Lh_f = -24q_f + 2000$$

$$Uh_f = -24q_f + 3500$$

である。通気網に関するパラメータとその他の情報を Table 1 に示す。計算の目的は最適な風量分布、調節のサイズと位置、及びファンの最適作動点を求めることである。

本論文で提案した方法を用いて計算を行った結果を Table 2 に示す。目的坑道の解析風量はすべてその所要風量の下限に等しいので、この解析風量は最小の風量分布である。必要な調節数は $8 < nk$ であり、またパス $10 \rightarrow 21 \rightarrow 16 \rightarrow 1$ には抵抗を変化させた坑道を含んでいないので、最適調節の必要十分条件によれば Table 2 に示した調節は抵抗の調節値が最も小さい調節である。これによって、ファンの解析作動点 $P(51.41\text{m}^3/\text{s}, 1314.87\text{Pa})$ はエネルギー消費が最小の作動点である。すべての調節が抵抗増加の調節であるので、エネルギー消費が最小の解は全コストが最小の解でもあると思われる。

4. 結 言

本論文では、全コストの最小化という観点から通気網の最適調節の方法について述べた。最適化の基礎的な考え方は

- (1) 抵抗の調節値をできるだけ小さくする
- (2) 抵抗を変化させる坑道数(調節数)をできるだけ少なくする
- (3) ファンのエネルギー消費をできるだけ小さくする

Table 2 The optimal solution.

j	s_{mj} N·s ² /m ⁸	q_{mj} m ³ /s
1		50.5141
2	0.59534	6.10083
3	0.59179	6.10535
4	2.59772	6.10058
5	0.94567	5.4006
6	0.94409	5.40132
7	3.94702	5.4003
8	0.21515	6.70246
9	0.25443	6.8025
10		50.5141
11		34.509
12		18.3068
13		12.2062
14		12.2062
15		18.3068
16		20.6069
17		16.2022
18		10.8019
19		10.8019
20		16.2022
21	0	2.50014
22		13.505
23		13.505
Fan pressure Pa		1314.87
Fan air quantity m ³ /s		50.5141

ということである。

(1) と (2) は技術的目的であり、ファンの圧力が一定の場合の、通気網の最適調節の問題である。(3) は経済的目的であり、通気網の調節が一定の場合の、ファンの経済的運転の問題である。この階層化により通気システムの最適化を 2 つのステップに分けて、通気網の最適調節を計算しながらファンの最適作動点を求めるアルゴリズムを提案した。また、例をもって計算方法の有用性を示した。本方法の主な特徴は、大規模の非線形計画問題の解析が不要で、既存の通気網の風量解析プログラムを利用して最適解が求められることである。

References

- 1) Wang Zhencai and Yao er-yi: Third international mine ventilation congress, (Harrogate, England, 1984), pp.53-55.
- 2) X. Wu, E. Topuz, and M.Karfakis: Proceedings of the 5th US mine ventilation symposium, (West Virginia, 1991), pp.391-399.
- 3) Xu Zhuyn and Wang Yinning: reference 2), pp.440-444.
- 4) Changhong Huang and Y.J.Wang: Proceedings of the 6th US mine ventilation symposium, (Salt Lake City, Utah, 1993), pp.153-161.
- 5) I.S. Lowndes and M.A. Tuck: Transactions of the institution of mining and metallurgy section-a mining industry, **105**(1996), A114-A126.
- 6) Li Bingrui, K.Uchino and M.Inoue: Proceedings of the international mining tech. '98 symposium, (Chongqing, China 1998), pp.348-354.
- 7) Li Bingrui, K.Uchino and M.Inoue: Shigen-to-sozai, **111**(1995), 829-834.
- 8) Li Bingrui, K.Uchino and M.Inoue: Shigen-to-sozai, **113**(1997), 677-682.