■■■ 論文 ファン特性変更と通気抵抗調節による通気網の最適化*

— 通気システムの最適化に関する研究 (第2報) —

李 秉 芮¹ 井 上 雅 弘² 内 野 健 一³

A New Method for Optimization of Ventilation Network with a Main Fan in Consideration of Network Characteristics

— A study on the optimum control of a mine ventilation system (2nd Report) —

by Bingrui LI¹, Masahiro INOUE¹ and Kenichi UCHINO¹

1. Faculty of Engineering, Kyushu University, Higashi-ku, Fukuoka 812

This paper proposes a new method for optimization of ventilation network with a main fan in terms of minimization of the total cost which consists of the cost of power for ventilation and that of controlling resistances of airways. The elements to be considered in this method are the fan characteristics and resistances of the network. The proposed method yields the optimum fan operating point and resistances to be controlled. The following results are obtained through analyses of some examples by this method:

1. More energy saving control of ventilation network can be attained by the proposed method which considers fan characteristics than by others which do not.

2. Results computed by this method may not make optimized values, when improper initial values of fan characteristics and resistances are used. However, the optimum values will be gained by calculating again using the results of the previous calculation as the initial values for the subsequent trial.

3. Optimization is better when the required air quantities are constrained by lower and upper bound than when given as fixed values.

KEY WORDS : Fan, Ventilation Network, Resistance, Airflow, Optimum Control

1. 緒 言

主扇は鉱山の通気を行うための主要な動力源であり、昼夜絶えず運転されることが普通であり、電気を大量に消費する。ある統計⁸⁾によると、一般に通気のための電気コストは鉱山の生産に要する総電気コストの15%以上を占める。この割合が1/3程度を占める鉱山さえもある。しかし、通気のための電気エネルギーが有効に利用されていない鉱山も多い。この浪費には種々の原因がある。例えばファンの設備が古く、作動効率が低い場合がある。鉱山の必要風量に対してファンの能力が過大で、ファンの作動点を合理的に設定していない場合もある。風量配分が不合理なために生ずる場合もある。したがって、通気のための節電対策に関する研究は、ファンの機械性能の向上に工夫をするほか、風量の合理的配分、ファンと通気網の双方を考慮した最適化などが重要である。

通気網の最適化については数多くの研究¹⁾³⁾⁴⁾⁶⁾⁸⁾⁹⁾があるが、そのほとんどは通気抵抗 (以後抵抗と記す) の調節すなわち変更によるもので、ファンの風量-圧力特性曲線 (以後ファン特性と

記す) は固定している。筆者らも前報⁴⁾においてこの場合の最適化について検討したが、この方法で求められたファンの作動点は、ファンの作動可能範囲におけるエネルギー消費が必ずしも最少であることを保証するものではない。したがって、通気に要する全コスト (ファンの動力コストおよび通気抵抗の調節のための工事コスト) の最小化を実現するためには、抵抗の調節のみならず、ファン特性の変更も含めた最適化が不可欠である。これを本報ではファン特性変更と抵抗調節による通気網の最適化と呼ぶが、混乱する恐れがない場合には単に最適化と呼ぶことにする。本報ではファンが1台の場合の最適化について検討する。

2. 最適作動点の計算方法

ファンの作動点はファン特性と鉱山の通気網全体の風量-圧力特性曲線 (mine characteristics²⁾、以後、通気網の等価抵抗曲線と記す) の交点である。ファンは回転数やピッチを変化させると特性が変わり、異なる圧力と風量で作動することが可能である。したがって、ファンの作動可能範囲および通気網の抵抗の調節可能範囲において、通気網の風量分布が所要風量を満たし、抵抗の調節に要する工事コストおよびファンの消費エネルギーが最小であるような作動点が存在する。この点をファンの最適作動点と呼ぶことにする。最適化とはこの最適作動点を求めることでもある。

2・1 ファンの最適作動点

ファン特性が可変であるとき、その作動可能範囲を

* 1995年9月16日受付 12月26日受理

1. 正会員 九州大学助手 工学部資源工学科

2. 正会員 工博 九州大学助教授 工学部資源工学科

3. 正会員 工博 九州大学教授 工学部資源工学科

[著者連絡先] FAX 092-642-3614 (九大・資源)

キーワード: ファン, 通気網, 抵抗, 風量, 最適化調節

$$H_{\min}(q) \leq H(q) \leq H_{\max}(q)$$

で表すと ($H_{\min}(q)$ および $H_{\max}(q)$ はファンの作動可能範囲の下限および上限である), ファン特性変更と通気抵抗調節による最適化のモデルは次のように記述できる。

$$\text{制御関数: } J = \sum_{j=1}^n (qn_j - qm_j)^2 \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$\text{調節条件: } \sum_{j=1}^n a_{ij}(r_{0j} + \mu_j)qn_j|qn_j| - H_i(q) - H_{ei} = 0 \quad (i = 1, 2, \dots, m) \quad \dots\dots\dots (2)$$

$$\mu_j = 0 \quad (j \in S_1) \quad \dots\dots\dots (3)$$

$$\mu_j \geq 0 \quad (j \in S_2) \quad \dots\dots\dots (4)$$

$$-\Delta r_j \leq \mu_j \leq 0 \quad (j \in S_3) \quad \dots\dots\dots (5)$$

$$\mu_j \geq -\Delta r_j \quad (j \in S_4) \quad \dots\dots\dots (6)$$

$$q_{\min j} \leq qn_j \leq q_{\max j} \quad (j = 1, 2, \dots, nk) \quad \dots\dots\dots (7)$$

$$H_{\min i}(q) \leq H_i(q) \leq H_{\max i}(q) \quad (i = 1, 2, \dots, m) \quad \dots\dots\dots (8)$$

ここで, j : 坑道番号, n : 坑道数, qn_j : 抵抗調節後の風量 (m^3/s), qm_j : 最適風量 (m^3/s), i : メッシュ番号, m : メッシュ数, r_{0j} : 坑道の抵抗 ($\text{N} \cdot \text{s}^2/\text{m}^8$), μ_j : 抵抗の調節値 ($\text{N} \cdot \text{s}^2/\text{m}^8$), Δr_j : 許容される抵抗減少の調節範囲 ($\text{N} \cdot \text{s}^2/\text{m}^8$), $H_i(q)$: ファン特性の方程式, H_{ei} : 自然通気圧力 (Pa), S_1 : 抵抗の調節が不可の坑道のセット, S_2 : 抵抗増加の調節のみが可の坑道のセット, S_3 : 抵抗減少の調節のみが可の坑道のセット, S_4 : 抵抗の増減が可の坑道のセット, $H_{\max j}$ および $q_{\min j}$: 通気を必要とする箇所の所要風量の上限および下限 (m^3/s), nk : 通気を必要とする箇所の数, a_{ij} : 通気網の接合マトリックス (incidence matrix) の要素, また a_{ij} は次の通りである。

$$a_{ij} = \begin{cases} 1, & j \text{ 坑道は } i \text{ メッシュに属し, かつ } i \text{ の方向と同じ} \\ -1, & j \text{ 坑道は } i \text{ メッシュに属し, かつ } i \text{ の方向と反対} \\ 0, & \text{上記以外の場合} \end{cases}$$

前報⁴⁾で, (1)~(7)式によって全コスト (ファンの動力コストおよび通気抵抗の調節のための工事コスト) が最小であるような抵抗調節値および抵抗を変更させる坑道の組合せが求められることを明らかにしたが, これはファンの特性を変更しないという制限がついたものであった。この制限をなくせばより最適な調節が可能となると考えられる。したがって, 本報ではファン特性の変更を考慮するため, ファン作動可能範囲を表す(8)式を加えた。抵抗調節値の求め方は前報と全く同じである。(8)式を加えた上記モデルを用いて消費エネルギーが最小のファン作動点を求められれば, この作動点に対応するファンと通気網の調節は, 全コストが最小の調節である。次にファンの最適作動点の求め方について論じる。

ファンの最適作動点はファン特性, 通気を必要とする箇所の所要風量, 抵抗の調節可能範囲などに関係し, 理論的な解を求めるのは極めて困難である。ファンの最適作動点を M とすれば, 点 M は次の特徴を持っている。すなわち点 M の下方に位置するファン特性を(2)式に代入すれば, 通気網の最適化を行う過程においては, 抵抗の制約条件(3)~(6)式および所要風量の制約条件(7)式を同時に満足することができず, 最適化計算が収束しない。点 M の上方に位置するファン特性を(2)式に代入すれば, 通気網の適当な調節を通じて, (3)~(6)式および(7)式を同時に満足することができ, 最適化計算が収束する。すなわち, ファン特性変更と通気抵抗調節による通気網の最適化の収束可能な範囲は図1でハッチングをした部分である (図1, rm は最小等価抵抗であり, qm はファンの最小風量である)。ファン特性が点 M の上方に位置すれば通気網の最適化計算が収束し, 下方に位置すれば収束しないので, この点 M を通気網の最適化計算の収束性を判断する

図1 ファンと通気網の最適化の収束可能な範囲

ことで求めることができる。

2・2 最適作動点の計算方法

通気網の最適化計算により求められるファンの作動圧力を $h(\mu, Q)$ で表す。最適作動点を求めるために本論文で用いた方法は, 適当なファン特性および初期抵抗調節値から出発して, ファンの圧力 $h(\mu, Q)$ の値を順次減少させる, すなわち

$$h(\mu_0, Q_0) > h(\mu_1, Q_1) > \dots > h(\mu_w, Q_w) \quad \dots\dots (9)$$

となるように系統的に計算するものである (w はファン特性の補正回数である)。

この方法では, 現在の点 $\{\mu_w, Q_w\}$ において, まずファン特性の補正值 $L(q)$ を決定し, 次式で新しいファン特性を求める。

$$H_{w+1}(q) = H_w(q) - L_w(q) \quad \dots\dots\dots (10)$$

次に $H_{w+1}(q)$ をファン特性とする通気網の最適化計算によって, 次の新しい点 $\{\mu_{w+1}, Q_{w+1}\}$ を求める。

その際, ファン特性の補正值がファンの圧力を下げる方向が消費エネルギーが小さくなる方向である。すなわち, $H_w(q)$ を特性とする通気網の最適化計算が収束すれば ($H_w(q)$ は図1のハッチングをした部分を通る), ファンの圧力を減少させる。しかし, w 回目の補正をしてファン特性が $H_w(q)$ になるとき, 通気網の最適化計算が収束しないとすれば, 図1により, ファンの最適作動点はファン特性 $H_{w-1}(q)$ と $H_w(q)$ との間に位置するはずである。[$H_{w-1}(q), H_w(q)$] の区間内, 二分法を用いてファン特性の補正值を計算することができる。すなわち, $L_{w+1}(q) = L_w(q)/2$ をファン特性の補正值とし, $H_{w+1}(q) = H_w(q) + L_{w+1}(q)$ をファン特性とする。 $H_{w+1}(q)$ をファン特性とした最適化計算が収束すれば, $H_{w+2}(q) = H_{w+1}(q) - L_{w+1}(q)/2$ を新しいファン特性とし, 収束しなければ, $H_{w+2}(q) = H_{w+1}(q) + L_{w+1}(q)/2$ を新しいファン特性として, 次回の計算を行う。同様の計算を所定の精度が満たされるまで繰返し行う。その計算手順をまとめると図2の通りである。

2・3 解析例

図3に示す通気網を用いて本解析方法を示す。坑道の抵抗, 抵抗の制約条件および所要風量は表1に示す通りであり, ファン特性は次式で表され, 回転数は 750 r/min とする。

$$H(q) = -0.75q^2 + 57.5q + 1250 \quad \dots\dots\dots (11)$$

また, ファンの作動可能範囲の下限および上限は

$$H_{\min}(q) = -0.75q^2 + 57.5q + 250 \quad \dots\dots\dots (12)$$

$$H_{\max}(q) = -0.75q^2 + 57.5q + 1500 \quad \dots\dots\dots (13)$$

とする。

(11)式をファン特性とする通気網の風量解析によれば, なにも

表1 解析例のデータ

坑道番号	抵抗 $N \cdot s^2/m^8$	抵抗の 制約条件	所要風量 m^3/s		ファンの 調節
			下限	上限	
1	0.1	調節不可			
2	0.6	抵抗増加			
3	0.4	抵抗増加			
4	0.8	抵抗増加			
5	1.0	抵抗増加	13	17	
6	0.8	抵抗増加	13	17	
7	0.45	抵抗増加			
8	1.5	抵抗増加	18	22	
9	0.8	抵抗増加			
10	0.1	調節不可			可

表2 解析例の最適化の結果

坑道番号	風量 m^3/s	抵抗の調節値 $N \cdot s^2/m^8$
1	44.0008	
2	18.0001	0.568966
3	26.0006	
4	0.0001	6060295290.89
5	13.0001	
6	13.0005	0.649910
7	13.0002	
8	18.0000	0.591478
9	26.0007	
10	44.0008	
ファンの作動点(q, h)		(44.0008, 1443.61)
エネルギー(kw)		63.52

図2 計算手順図

図3 解析例の通気網図

調節を行わない状態では、坑道5、6、8の解析風量はそれぞれ11.87、17.37、25.08 m^3/s である。これは所要風量を満たさないもので、本方法を用いて最適化計算を行った。その結果を表2に示す。

表2から次のことが分かる。

(1) 通気を必要とするすべての箇所の調節後の風量がその所要風量の下限付近に収束しているため、求められた風量分布は所要風量を満たす最小な風量分布である。

(2) 求められた通気網の等価抵抗は最小な抵抗である。その根拠は次の通りである。

本法によって求められた風量分布を $QM = (qm_1, qm_2, \dots, qm_n)$ 、抵抗を $RM = (rm_1, rm_2, \dots, rm_n)$ とする。ここで、 QM は最小風量であり、 RM は最小抵抗ではないと仮定すると、さらに抵抗減少の調節を行うことができる一組の坑道が存在することになる。求められた風量分布は最小の風量分布であるので、通気網の風量分布を変えない条件で抵抗減少の調節を行えば、ファンの圧力が低下する。ファンの圧力はパス (path) の圧力降下に等しいので、ファンの圧力が低下すると、各パスの圧力降下が同じ値で減少する。すなわち、抵抗減少の調節が行われる坑道のセットが存在すれば、パスごとに少なくとも1本ずつ存在する。あるパスに抵抗減少の調節が行われる坑道が存在しなければ、抵抗減少の調節が行われる坑道のセットが存在しない。

解析例の通気網には $1 \rightarrow 2 \rightarrow 8 \rightarrow 10$ 、 $1 \rightarrow 2 \rightarrow 4 \rightarrow 7 \rightarrow 9 \rightarrow 10$ 、 $1 \rightarrow 3 \rightarrow 6 \rightarrow 9 \rightarrow 10$ 、 $1 \rightarrow 3 \rightarrow 5 \rightarrow 7 \rightarrow 9 \rightarrow 10$ の4本のパスがあるが、その中のパス $1 \rightarrow 3 \rightarrow 5 \rightarrow 7 \rightarrow 9 \rightarrow 10$ では、本法

で求めた抵抗の調節値 $\mu_j = 0$ であり、すなわち $rm_j = r_{0j}$ である。表1で与えられた抵抗の制約条件に基づいて、パス $1 \rightarrow 3 \rightarrow 5 \rightarrow 7 \rightarrow 9 \rightarrow 10$ に対して rm_j からさらに抵抗減少の調節を行うことは不可能なので、このパスには抵抗減少の調節が行われる坑道が存在しない。したがって同例では rm_j からさらに抵抗減少の調節が行われる坑道のセットは存在せず、本法で求められた通気網の抵抗は最小な抵抗である。

(3) r_0 および rm をそれぞれ調節前および後の通気網の等価抵抗とすれば、調節前後のファンの作動点の相対位置は図4に示す通りである。図4に示すように $A(q_a, h_a)$ と $M(q_m, h_m)$ は同じ等価抵抗曲線上にないため、まず $B(q_b, h_b)$ を求めて、それから B と M の間にファンの風量-回転数原則⁶⁾に従って、調節後の回転数を求める必要がある。 $r_0 = 0.63078 N \cdot s^2/m^8$ を次の連立方程式

$$h_b = r_0 q_b^2 \quad \dots\dots\dots (14)$$

$$h_b = -0.75 q_b^2 + 57.5 q_b + 1250 \quad \dots\dots\dots (15)$$

に代入すると、 $q_b = 53.94 m^3/s$ が得られる。したがって、最適化後のファンの回転数 n_m は

$$n_m = n_0(q_m/q_b) = 750(44.0008/53.94)$$

$$\approx 612 \text{ r/min}$$

最適化計算の過程では、ファン特性は(10)式に従って変化しているとして、特性曲線は

$$H_m = -0.75 q^2 + 57.5 q + 1250 - L_m(q) \quad \dots\dots\dots (16)$$

で求められることになる。(16)式は最適作動点 $M(44.0008, 1443.61)$ を通るので、これを(16)式に代入すると、 $(1250 - L_m(q)) = 365.61 \text{ (Pa)}$ が得られる。

図4 調節前後のファンの作動点

表3 ファン特性を固定した計算結果

坑道番号	風量 m³/s	抵抗の調節値 N・s²/m⁸
1	55.169	
2	25.176	0.209957
3	29.993	
4	3.2344	0.681106
5	13.001	
6	16.996	0.196225
7	16.236	
8	21.942	0.613219
9	33.228	
10	55.169	
ファンの作動点(q, h)		(55.169, 2139.49)
エネルギー(kw)		118.034

(4) 調節条件は表1と同じであるが、ファン特性を固定した場合の最適化計算の結果を表3に示す。表2と比べると、抵抗調節の坑道数は同じであるが、ファン特性を固定した最適化のほうは通気網の消費エネルギーは約118 kWであり、ファン特性を変更した場合の約63 kWと比べて大きく、最適な調節ではないことが明らかである。

3. 収束の判断

収束性を判断してファンの最適作動点を求めるには、収束の正しい判断方法が必要不可欠である。

前報⁴⁾で述べた通気網の最適化方法を応用すると、ファン特性が可変の場合、最適風量および抵抗の調節値の繰返し計算式はそれぞれ次のように書ける。

$$qm_{j,w}^k = \begin{cases} q_{\min j} & qn_{j,w}^k < q_{\min j} \text{ の場合} \\ q_{\max j} & qn_{j,w}^k > q_{\max j} \text{ の場合} \\ qn_{j,w}^k & \text{上記以外の場合} \end{cases} \quad \cdots (17)$$

$$\mu_{j,w}^{k+1} = \mu_{j,w}^k + \Delta \mu_{j,w}^k \quad \cdots (18)$$

$$\Delta \mu_{j,w}^k = (r_{0j} + \mu_{j,w}^{k-1}) \left[\frac{(qn_{j,w}^k)^2}{(qm_{j,w}^k)^2} - 1 \right] \quad \cdots (19)$$

ここで、 k ：通気網の調節計算の繰返し回数を示すカウンダ、 $qm_{j,w}^k$ ：最適風量の近似値、 $qn_{j,w}^k$ ： $(r_{0j} + \mu_{j,w}^k)$ を坑道の抵抗とする通気網の解析風量、 $\mu_{j,w}^k$ ：抵抗の調節値、 $\Delta \mu_{j,w}^k$ ：最適化計算によって求められる $k+1$ 回目の調節値と k 回目の調節値の差。

ファン特性を $H_w(q)$ とすると、

表4 計算精度 ϵ_{qn} が計算結果に及ぼす影響

坑道番号		ϵ_{qn}				
		0.01	0.001	0.0001	0.00001	0.000001
抵抗の調節値 $N \cdot s^2/m^8$	1					
	2	0.275339	0.523339	0.523298	0.523110	0.523498
	3	0.078736				
	4	1.81×10^8	7.523×10^9	7.526×10^9	7.532×10^9	7.521×10^9
	5	0.036914				
	6	0.686766	0.649126	0.649630	0.649134	0.649554
	7					
	8	1.067598	0.637295	0.636660	0.636827	0.636747
	9					
	10					
ファンの作動点	q(m ³ /s)	44.0045	44.006	44.0029	44.0063	44.0027
	h(Pa)	1503.11	1443.93	1443.61	1443.81	1443.63
繰返し回数		2786	1471	1626	1732	8613

$q_{\min j} \leq qn_{j,w}^k \leq q_{\max j} \quad (j = 1, 2, \dots, nk) \quad \cdots (20)$
を満たせば、(17)および(19)式によって通気網の解析風量 $qn_{j,w}^k$ が $qm_{j,w}^k$ に収束し、 $\Delta \mu_{j,w}^k$ が0に収束して、計算は収束する。したがって、(20)式を、最適化計算が収束する判断条件とすることができる。 $qn_{j,w}^k$ は収束するが、 $qm_{j,w}^k$ に収束しない箇所が存在すれば、最適化計算は収束しない。したがって、

$$\begin{cases} \max |qn_{j,w}^k - qn_{j,w}^{k-1}| \leq \epsilon_{qn} \quad (j = 1, 2, \dots, n) \\ qn_{j,w}^k < q_{\min j} \text{ or } qn_{j,w}^k > q_{\max j} \quad (j = 1, 2, \dots, nk) \end{cases} \quad \cdots (21)$$

を最適化計算が収束しない判断条件とすることができる。ここで、 ϵ_{qn} は $qn_{j,w}^k$ の収束判定値(m³/s)である。

ϵ_{qn} は収束性の判断指標として最適化計算の結果に影響が大きい。2・3の解析例に異なる ϵ_{qn} を与えた場合の計算結果は表4に示す通りである。 $\epsilon_{qn} = 0.01$ のときの計算結果はその他の場合と比べて随分違っている。 $\epsilon_{qn} \leq 0.001$ のとき、計算結果はほぼ同じであるが、 ϵ_{qn} の減少に伴って最適化計算に要する繰返しの回数が増加するので、無駄な計算をしないように $\epsilon_{qn} = 0.001 \sim 0.0001$ を設定すれば、本例での計算結果はほぼ最適値であると考えられる。

4. ファン特性

4・1 初期ファン特性の影響

2・2の方法はファンの最適作動点を求めるものであるが、解析に与える初期のファン特性（以後初期ファン特性と記す）および抵抗の調節値の初期値（以後初期抵抗調節値と記す）によっては必ずしも最適な作動点に収束しない場合がある。例えば、解析例に示す通気網では、(11)式を初期ファン特性とし、 $\mu = (0, 0, \dots, 0)$ を初期抵抗調節値とした場合、5、6および8坑道の初期解析風量はそれぞれ11.8756、17.377および25.0872 m³/sである。最適化計算の過程では、5坑道の風量が風量増加の方向に沿って13.000 m³/sに収束し、6および8坑道の風量が風量減少の方向に沿ってそれぞれ15.697および19.349 m³/sに収束する。最適化計算の過程における5、6および8坑道の風量の収束方向が一致しないので、求めた通気網の風量分布は最適な風量分布にならず、ファンの解析作動点(48.059, 1695.98)が最適な作動点ではない。初期抵抗調節値を $\mu = (0, 0, \dots, 0)$ とし、(11)式の値に3600 Paを加えた

表 5 初期抵抗調節値が計算結果に及ぼす影響

坑道 番号	初 期 抵 抗 調 節 値			
	$\mu_{0.1}$	$\mu_{0.5}$	$\mu_{1.0}$	$\mu_{1.5}$
1				
2	0.0752552	0.623724	0.822701	2.680407
3		0.011371	0.024294	0.895155
4	222694.02	59829755.21	72883713.92	84671637.88
5				0.113531
6	0.617388	0.613219	0.593267	1.427208
7				0.663729
8	1.108717	0.589573	0.440180	2.715210
9				0.940605
10				
作動点 $q(\text{m}^3/\text{s})$	44.2240	44.1796	44.2639	44.0028
$h(\text{Pa})$	1459.03	1465.06	1481.4439	2816.13

$H(q) = -0.75q^2 + 57.5q + 4850$ (22)
を初期ファン特性とする場合、5、6 および 8 坑道の初期解析風量はそれぞれ 17.3008、25.316 および 36.5478 m^3/s である。最適化計算の過程で、ファン特性が

$H(q) = -0.75q^2 + 57.5q + 2145$ (23)
に減少するときに、すべての通気を必要とする箇所の解析風量は所要風量の下限より小さくなるので、これ以後の計算では、5、6 および 8 坑道の風量が風量増加の方向に沿って収束する。調節計算が終了するとき、5、6 および 8 坑道の風量がそれぞれ 13.000、13.039 および 18.005 m^3/s に収束し、ファンの作動点は(44.046、1447.08)で、ほぼ最適値に収束する。

同じ通気網で異なる初期抵抗調節値を与えて最適化計算を行った結果を表 5 に示す。与えた初期抵抗調節値は 1 坑道と 6 坑道を除いてすべて 0.1、0.5、1.0、1.5 $\text{N} \cdot \text{s}^2/\text{m}^8$ であり、それぞれ $\mu_{0.1}$ 、 $\mu_{0.5}$ 、 $\mu_{1.0}$ 、 $\mu_{1.5}$ で表す。1 坑道と 6 坑道は入気坑と排気坑であり、抵抗の変更ができないとしているので、初期抵抗調節値は 0 となる。また初期ファン特性としては(22)式を用いている。同表から分かるように初期抵抗調節値が異なると得られる結果も異なる。

以上のように、初期ファン特性および初期抵抗調節値を適切に選択するのは最適作動点を求める、すなわち最適化を行ううえで重要である。これらの初期値は風量の収束方向の一致性を保証しなければならない。しかし、このような初期値の選定に関する理論的計算は極めて複雑であるので、本報では簡単な計算方法を提案する。

この方法を簡潔に言えば、まず一度最適化計算を行い、この結果を初期値として再度最適化計算を行うというものである。具体的なステップは次の通りである。

まず、適当なものを選んで初期ファン特性とし、初期抵抗調節値を $\mu = (0, 0, \dots, 0)$ と置いて、2・2 で述べた方法を用いて最適化計算を行い、ファンの解析作動点 $M'(q_m', h_m')$ および抵抗調節値 $\mu' = (\mu_1', \mu_2', \dots, \mu_n')$ を求める。次に圧力が h_m' より k 倍高いものを初期ファン特性とし、 μ' を初期抵抗調節値として、再び同様の最適化計算を行う。2 回目の計算結果を最適値とする。

1 回目の最適化計算が終了してから、2 回目の最適化計算を行うための初期ファン特性の計算方法は次の通りである。

rm' を 1 回目の最適化計算によって求めた通気網の等価抵抗とする。 rm' を変えない条件で、ファンの圧力が h_m' から khm' に増加すると、ファンの風量 q が

図 5 所要風量が最適作動点に及ぼす影響

$$hm' = rm'qm'^2 \quad \dots\dots\dots (24)$$

$$khm' = rm'q^2 \quad \dots\dots\dots (25)$$

によって、 $q = k^{1/2}qm'$ に上昇する。すなわち、圧力が増加したファン特性は点 $(k^{1/2}qm', khm')$ を通る。ファン特性を

$$H(q) = aq^2 + bq + c \quad \dots\dots\dots (26)$$

で表し (a, b, c はファン特性の係数)、 a と b を定数とすれば、点 $(k^{1/2}qm', khm')$ を(26)式に代入して、

$$c = khm' - akqm'^2 - bk^{1/2}qm' \quad \dots\dots\dots (27)$$

が得られる。したがって、2 回目の最適化計算を行うための初期ファン特性は次式のようなになる

$$H(q) = a(q^2 - kqm'^2) + b(q - k^{1/2}qm') + khm' \quad \dots\dots\dots (28)$$

6 つの計算例を用いてこの計算を行ったが、1 回目の最適化計算を行うとき、どのような初期ファン特性を選んでも、1 回目の計算によって求められた抵抗の調節値および(28)式によって求められたファン特性を初期値として再び通気網の最適化計算を行えば、2 回目の計算で得られる抵抗の調節値およびファンの解析作動点はいずれも最適値に収束した。

これまでの計算例から、ファンの作動可能範囲の上限を表すものを初期ファン特性とし、 $\mu = (0, 0, \dots, 0)$ を初期抵抗調節値とし、 $k = 2.0 \sim 3.5$ を取ることを、本報は提案する。

4・2 ファン特性の計算精度

求められた解析作動点が十分な精度を持つためには、ファン特性の圧力値としてどの程度まで小さな値を取り扱う必要があるかについて考察する。

計算上は、いくらでも真の最適作動点に近い作動点を得られるが、この作動点に応じるファンの調節を精密に行うことは実際上困難である。風圧が 2000 Pa、回転数が 710 r/min の遠心ファンの場合、回転数を 720 r/min に増やせば、ファンの圧力は計算上 2056.7 Pa になる。また、軸流ファンでは、動翼取付角を 1° 変えたと、ファンの圧力は 30~100 Pa 程度の変化が生じる。ファンの動翼取付角を 0.1° 、回転数を 1 r/min の精度でそれぞれ変えることは一般に困難なので、ファン特性の圧力を 1 Pa 程度まで計算すれば、機械的調節の要求は満足されと考えられる。

5. 所要風量の調節結果への影響

通気網の風量解析を行うとき一般に通気を必要とする箇所の所要風量を固定値とすることが多いが、通気網の最適化計算を行う場合には、所要風量を区間風量とするのが適当である。所要風量を固定値とすると、坑道の抵抗とファン特性をいかに調節しても、ファンの解析作動点は $q = q_0$ (図 5) の直線に沿って移動するの

表6 所要風量を固定値とした連合最適化の結果

坑道番号	風量 m ³ /s	抵抗の調節値 N・s ² /m ⁸
1	50.050	0.666282
2	20.006	
3	30.043	
4	0.0001	8040869653.60
5	15.000	
6	15.043	
7	15.000	0.641663
8	20.006	
9	30.043	
10	50.050	0.758288
ファンの作動点(q,h)		
(50.050,1910.39)		
エネルギー(kw)		95.61

図6 M と M_f の相対位置

所要風量を区間値とする場合と固定値とする場合のファン作動点の比較

で、ファンの調節可能範囲は AB の直線の上に制限される (RU , RL は抵抗の調節可能範囲である)。しかし、所要風量を区間風量とすれば、ファンの調節可能範囲が広くなり (図5, $abcd$ 枠内)、所要風量を固定値とする方法と比べて、抵抗の調節可能範囲が同じでも、通気網の抵抗の調節とファンの調節の組み合わせがより多様となる。例えば、図2に示す解析例で、坑道の抵抗および抵抗の制約条件などを変えず、5, 6 および 8 坑道の所要風量をそれぞれの区間風量の中点の 15, 15, 20 m^3/s と固定すると、ファンと通気網の最適化計算の結果は表6に示す通りである。所要風量を区間風量とする最適化によって求めたファンの作動点を M で、所要風量を固定風量とする最適化によって求めたファンの作動点を M_f で記すと、点 M と M_f の位置関係は図6に示す

通りである。点 M_f と点 M を比べて、圧力差は 466.78 Pa, 風量差は 6 m^3/s , 消費エネルギーは約 1.46 倍である。

通気を必要とする箇所の風量分布を制御することはファンの作動点を変更する方法ではないにもかかわらず、最適化計算の結果に影響が大きいので、所要風量を区間風量とすることが最適化には望ましい。

6. 結 言

ファン特性変更と通気抵抗調節による通気網の最適化は、通気抵抗による最適化を基にして、ファンの作動点を合理的に選定する問題である。本報では、ファンの最適作動点に関する検討を行い、最適化の計算方法を提案した。またいくつかの解析例により次の点を明らかにした。

(1) ファン特性を変更する最適化を用いれば、ファン特性を変更しない最適化よりもさらに消費エネルギーが少ない調節を行うことができる。

(2) 本方法では、解析に与える初期ファン特性および初期抵抗調節値によっては必ずしも最適解析結果が得られないことがある。このような場合には、大きなファン圧力を発生させる初期ファン特性を用いることで解析できるが、この方法によってもまれに最適値を得ることができない場合があった。しかしながら、得られた結果を新しい初期値として再度解析を行うと、筆者らが用いた6種類すべての通気網について最適な結果を得ることができた。

(3) データとして与える所要風量は固定値ではなく、区間値として与える方が、最適化が良好である。

本報で述べた方法はファンの最適作動点を得ることを保証するものであるが解析の能率という点からは改良の余地が残されており、今後検討する必要がある。また本報ではファンが1台の場合の最適化を扱ったが、複数のファンと通気網の最適化に関してはさらに検討する予定である。

引 用 文 献

- Huang, C. H. and Wang, Y. J. : Proceedings of 6th US Mine Ventilation Symposium, p. 153-161, (1993)
- Hartman, H. L. : Mine Ventilation and Air Conditioning, A Wiley-Interscience publication, p. 167-198, (1982)
- Li, M. N. and Hu, W. J. : Proceedings of 5th US Mine Ventilation Symposium, p. 427-431, (1992)
- 李秉丙・内野健一・井上雅弘：資源と素材, Vol. 111, p. 829-834, (1995)
- 関 亨・中井 洵：図解通気, 白亜書房, (1952. 7)
- Wang, Z. C. and Yao, E. Y. : 3rd International Mine Ventilation Congress, p. 53-55, (1984)
- 呉中立：鉱山通気と安全 (中国語), 1989, 6
- Wu, X., Topuz, E. and Karfakis, M. : 前出3), p. 391-399
- Xu, Z. Y. and Wang, Y. M. : 前出3), p. 440-444