

大気環境を考慮したガスタービン用吸気フィルタの差圧上昇の推定手法の考案

Differential Pressure Estimation for Gas Turbine Air Intake Filter with Consideration of Atmospheric Environment

尾関 高行^{*1}
OZEKI Takayuki

松井 陽平^{*1}
MATSUI Yohei

藤井 智晴^{*1}
FUJII Tomoharu

ABSTRACT

In gas turbines, many air intake filters are installed to prevent damage and deterioration of the compressor due to suction of dust in the atmosphere. For reducing the cost of replacing these filters, it is necessary to estimate the increase in the differential pressure of the filter, which is the criteria for replacement. In this study, we described the relationship between the differential pressure and the dust collection amount of the filter based on the fluid drag. Moreover, we proposed a method to estimate the dust collection amount of the filter used in atmospheric environmental conditions. The test in which the air was continuously ventilated through the filter demonstrated that the dust collection amount estimated by the proposed method was in good agreement with the experimental result. Furthermore, the experimental results suggest that the differential pressure of the filter can be estimated from the dust collection amount of it.

キーワード：ガスタービン、吸気フィルタ、大気環境、差圧推定、捕集量

Key words : Gas Turbine, Air Intake Filter, Atmospheric Environment, Differential Pressure Estimation, Dust Collection Amount

1. 緒言

空気を圧縮して燃焼用空気として利用する大型発電用ガスタービン（以下、GT）では、吸氣中に含まれる粉塵（以下、大気塵）の圧縮機翼への付着による圧縮機の効率低下や、飛来物の衝突による圧縮機翼の損傷を招く恐れがある⁽¹⁾。そのため、GTでは吸気フィルタを導入し、圧縮機に流入する空気を清浄化している。発電用の大型GTでは、2段構成あるいは3段構成の吸気フィルタシステムが利用されており、各段に数百枚単位の吸気フィルタが用いられる。JIS Z 8122で定義される吸気フィルタにおいて、1次フィルタには $5\text{ }\mu\text{m}$ 以上の粒子を主に捕集する粗じん用エアフィルタ（以下、プレフィルタ）が、2次フィルタには $5\text{ }\mu\text{m}$ 以下の粒子に対して中程度の粒子捕集率をもつ中性能エアフィルタ（以下、中性能フィルタ）が、3次フィルタには $0.3\text{ }\mu\text{m}$ の粒子に対して99.97%の粒子捕集率を持つHEPAフィルタがそれぞれ用いられる⁽²⁾。これらの吸気フィルタは大気塵を捕集することで、その差圧が使用時間に対して指数関数的に上昇することが知られている⁽³⁾。しかし、大気塵の粒子径

分布や質量濃度は季節や場所によって異なるため、一概に差圧が上昇する時間を推定することは困難である。吸気フィルタの急激な差圧上昇は、GTの運転停止を招く恐れがあるため、差圧が上昇する前にGTの吸気フィルタを交換する必要がある。差圧が上昇する前に吸気フィルタを交換することは、その交換周期を早めるため、過剰な交換費用が掛かる。

吸気フィルタの交換時期を適正化するためには、交換基準となる吸気フィルタの差圧を推定する必要がある。清浄な状態での吸気フィルタに対しては、吸気フィルタを構成する纖維の周りに空気が流れるため、その纖維の流体抵抗の総和から差圧を求めることが可能である⁽⁴⁾。また、粉塵負荷時の差圧の推定については、吸気フィルタを構成する纖維の抵抗係数や線径の変化に着目した手法⁽⁴⁾や、単分散粒子を吸気フィルタで捕集した場合の手法⁽⁵⁾が報告されている。坂野らは、数時間程度の比較的短時間で、大気塵よりも高く均一な質量濃度の単分散粒子を纖維で捕集した試験結果を基に差圧上昇を検討している⁽⁵⁾。しかし、GTでは質量濃度が刻々と変化する上、多分散の大気塵を年単位の長時間吸引する点が異なる。そこで、本研究では、GT用吸気フィルタに大気を長時間連続通風させることができ可能な試験装置を製作し、差圧及び捕集量とともに、捕集量の推定に重要な吸気フィルタの粒子捕集率を測定する。そして、吸気フィルタの粒子捕集率

原稿受付 2022年3月20日

査読完了 2023年7月14日

* 1 一般財団法人 電力中央研究所
〒240-0196 横須賀市長坂2-6-1
E-mail: t-ozeki@criepi.denken.or.jp

および大気塵の質量濃度に関する公開データから吸気フィルタの捕集量を推定する手法を考案し、試験結果を用いて検証する。さらに、単分散粒子の差圧推定手法⁽⁵⁾を基に、多段構成であるGT用吸気フィルタの特徴を考慮し、フィルタ差圧上昇を推定する手法を考案する。

主な記号

A_F	吸気フィルタの開口面積	(m ²)
C_{D0}	清浄な纖維における抵抗係数	(-)
C_m	大気塵の質量濃度	(kg/m ³)
C_{ml}	5.2 μmより大きい粒子の質量濃度 (kg/m ³)	
C_{mm}	2.5 μmより大きく5.2 μm以下の粒子の質量濃度 (kg/m ³)	
C_{ms}	2.5 μm以下の粒子の質量濃度 (kg/m ³)	
$C_{mPM2.5}$	大気塵のPM2.5の質量濃度 (kg/m ³)	
C_{mSPM}	大気塵のSPMの質量濃度 (kg/m ³)	
C_{mTSP}	大気塵のTSPの質量濃度 (kg/m ³)	
d_f	吸気フィルタの纖維径 (m)	
d_p	粒子径 (m)	
d_{pv}	平均体積となる粒子径 (m)	
F_0	清浄な纖維における単位長さの流体抵抗 (N/m)	
F_m	粒子捕集時の纖維における単位長さの流体抵抗 (N/m)	
L	吸気フィルタのろ材の厚さ (m)	
LB	粒子径範囲の下限の粒子径 (m)	
m	吸気フィルタの捕集量 (kg)	
\dot{m}	吸気フィルタのろ材の単位長さあたりの捕集量 (kg/m)	
N	大気塵の粒子径範囲の分割数 (-)	
N_l	0.3 μm以上10 μm以下の粒子径範囲の分割数 (-)	
N_m	0.3 μm以上5.2 μm以下の粒子径範囲の分割数 (-)	
N_s	0.3 μm以上2.5 μm以下の粒子径範囲の分割数 (-)	
n	大気塵の個数濃度 (1/m ³)	
n_i	吸気フィルタ上流側における大気塵の個数濃度 (1/m ³)	
n_o	吸気フィルタ下流側における大気塵の個数濃度 (1/m ³)	
Q	吸気フィルタ 1 枚当たりの吸気流量 (m ³ /s)	
t	時間 (s)	
U	接近速度 (m/s)	
UB	粒子径範囲の上限の粒子径 (m)	
x	吸気フィルタの厚さ方向の長さ (m)	
β	\dot{m} に対する差圧上昇係数 (m ^γ /(kg) ^γ)	
Δp_0	清浄時の吸気フィルタの差圧 (初期差圧) (Pa)	
Δp_m	粒子捕集時の吸気フィルタの差圧 (Pa)	

ε	吸気フィルタの空隙率	(-)
γ	差圧上昇指数	(-)
η_c	吸気フィルタの計数法の粒子捕集率	(-)
η_m	吸気フィルタの質量法の粒子捕集率	(-)
κ_1	5.2 μmより大きく10 μm以下の粒子における体積濃度割合	(-)
κ_m	2.5 μmより大きく5.2 μm以下の粒子における体積濃度割合	(-)
κ_s	0.3 μm以上2.5 μm以下の粒子における体積濃度割合	(-)
ρ	空気密度 (kg/m ³)	
ω	差圧上昇係数 (1/(kg) ^γ)	

添え字

1	1 次フィルタ
2	2 次フィルタ
3	3 次フィルタ
k	粒子径範囲序数

2. 吸気フィルタの差圧及び捕集量の理論

2.1 吸気フィルタの差圧と捕集量の関係

吸気フィルタは空隙率 ε が高く、吸気フィルタを構成する纖維の周りを空気が流れる。清浄な吸気フィルタの場合、これらの纖維の流体抵抗の総和として、差圧 Δp_0 を求めることができる⁽⁴⁾。

$$\Delta p_0 = 4 \frac{1-\varepsilon}{\pi d_f^2 \varepsilon} F_0 L \quad (1)$$

$$F_0 = C_{D0} d_f \frac{\rho u^2}{2} \quad (2)$$

吸気フィルタが粒子を捕集した状態では、纖維に堆積した粒子が流体抵抗を増大させる。単分散粒子が堆積した場合、式(1)を拡張した下式で差圧 Δp_m が推定される⁽⁵⁾。

$$\Delta p_m = 4 \frac{1-\varepsilon}{\pi d_f^2 \varepsilon} \int_0^L F_m dx \quad (3)$$

$$F_m = F_0 (1 + \beta \dot{m}(x, t)^\gamma) \quad (4)$$

実際の大気塵は単分散粒子ではないものの、GT用吸気フィルタの場合、多段構成により各吸気フィルタが捕集する粒子径は一定の範囲内となる。そのため、GT用吸気フィルタに式(3)、式(4)を適用できると仮定した。また、簡単のために、厚さ方向の捕集量の分布の影響は無視でき、下式で表すことができると仮定した。

$$\Delta p_m = 4 \frac{1-\varepsilon}{\pi d_f^2 \varepsilon} F_m L \quad (5)$$

$$F_m = F_0 (1 + \beta \dot{m}(t)^\gamma) \quad (6)$$

ここで、吸気フィルタの捕集量 m はろ材の単位長さあたりの捕集量 \dot{m} の総和として下式により求められる。

$$m = 4 \frac{1-\varepsilon}{\pi d_f^2} \dot{m} A_F L \quad (7)$$

式(5)を式(1)、式(6)を用いて変換し、さらに単位長さあた

りの捕集量 \dot{m} に対する差圧上昇係数 β を吸気フィルタの捕集量 m に対する差圧上昇係数 ω に置き換えると、ガスタービン用吸気フィルタの差圧 Δp_m は下式で推定される。

$$\Delta p_m = \Delta p_0 (1 + \omega m(t))^\nu \quad (8)$$

したがって、GTの使用環境における差圧上昇係数 ω および差圧上昇指数 ν をあらかじめ求めておくことで、吸気フィルタの初期差圧 Δp_0 と捕集量 m から、差圧 Δp_m を推定することができると考えられる。

2.2 吸気フィルタの捕集量の推定

吸気フィルタの捕集量 m は、大気塵の質量濃度と吸気フィルタ前後の質量濃度比から求められる質量法での粒子捕集率から推定することができる。一方で、粒子捕集率は吸気フィルタ毎、粒子径範囲毎に異なる。また、GTでは吸気フィルタを通常3段以内で構成するため、各段の吸気フィルタは前段の吸気フィルタを通過した大気塵を捕集する。そのため、大気塵の粒子径範囲の分割数を N として、大気塵の質量濃度 C_{mk} と各段吸気フィルタの粒子捕集率 η_{mk} を用いて、下式より吸気フィルタの捕集量 m を推定した。

$$m_1 = \int Q \sum_{k=1}^N \eta_{m1k} C_{mk} dt \quad (9)$$

$$m_2 = \int Q \sum_{k=1}^N \eta_{m2k} (1 - \eta_{m1k}) C_{mk} dt \quad (10)$$

$$m_3 = \int Q \sum_{k=1}^N \eta_{m3k} ((1 - \eta_{m2k}) (1 - \eta_{m1k})) C_{mk} dt \quad (11)$$

ここで、吸気フィルタの質量法での粒子捕集率 η_{mk} は、粒子形状を球形とし、粒子径範囲毎の粒子の密度は一定と仮定することで、吸気フィルタに供された同粒子径範囲の粒子の個数に対する吸気フィルタが捕集した個数との比で求められる計数法の粒子捕集率 η_{ck} と等しくなる。そのため、吸気フィルタの前後の個数濃度 n_{ik} 、 n_{ok} から、下式で求められる計数法の粒子捕集率 η_{ck} を用いることとした。

$$\eta_{mk} \approx \eta_{ck} = 1 - \frac{n_{ok}}{n_{ik}} \quad (12)$$

大気塵については、全粒子径範囲である大気浮遊粉塵 (Total Suspended Particles, 以下、TSP)、空気動力学的粒子径 $10 \mu\text{m}$ で100%の粒子捕集率をもつ分級装置を通過する粒子と定義される浮遊粒子状物質 (Suspended Particulate Matter, 以下、SPM)、空気動力学的粒子径 $2.5 \mu\text{m}$ で50%の粒子捕集率がある分級装置を通過する粒子である微小粒子状物質 (Particulate Matter 2.5, 以下、PM2.5) などのように、粒子径により区分がなされている。吸気フィルタは全ての粒子径範囲の大気塵を吸引するため、TSPの粒子径範囲に対して、粒子径範囲毎の質量濃度 C_{mk} を求める必要がある。一方でSPMおよびPM2.5の粒子径範囲については、自動測定機による1時間毎の質量濃度の速報値が環境省大気汚染物質広域監視システム (以下、そらまめくん)⁽⁶⁾で公開されている。

そらまめくんは全国に測定局があり、GT発電所の近隣の計測値も入手しやすい。そこで、粒子径範囲毎の質量濃度 C_{mk} を求めるのに、そらまめくんで公開されているSPMとPM2.5の質量濃度の計測値を用いることとした。また、TSPとSPMの質量濃度の関係を調査した事例⁽⁷⁾から、そらまめくんのSPMの質量濃度 C_{mSPM} を用いてTSPの質量濃度 C_{mTSP} を下式により推定した。

$$C_{mTSP} = \frac{C_{mSPM} \cdot 3.1}{0.57} \quad (C_{mSPM} > 3.1) \quad (13)$$

$$C_{mTSP} = C_{mSPM} \quad (C_{mSPM} \leq 3.1) \quad (14)$$

SPMとPM2.5はそれぞれの定義から、特定の粒子径以下の質量濃度を示すものではないが、SPMとPM2.5を計測するための分級装置は粒子径に対して滑らかなS字曲線となる場合が多い⁽⁸⁾。そこで、それぞれの質量濃度は分級装置の粒子捕集率が50%となる中位径以下の質量濃度に等しいと仮定した。SPMの中位径については、各メーカーのSPM用の分級装置の計測結果⁽⁹⁾から、粒子捕集率が50%となる粒子径の平均値を算出して $5.2 \mu\text{m}$ とした。PM2.5の中位径はその定義から $2.5 \mu\text{m}$ である。これにより、大気塵の質量濃度を $2.5 \mu\text{m}$ 以下、 $2.5 \mu\text{m}$ 以上 $5.2 \mu\text{m}$ 以下、 $5.2 \mu\text{m}$ 以上の粒子の質量濃度（以下、それぞれ C_{ms} 、 C_{mm} 、 C_{ml} ）を推定することができる。また、球形粒子を仮定した上で、粒子径範囲毎の上限粒子径 UB_k と下限粒子径 LB_k から、平均体積となる粒子径 d_{pk} を求めた。 d_{pk} とGT近傍で計測した大気塵の個数濃度 n_k の平均値から、 C_{ms} 、 C_{mm} 、 C_{ml} それぞれにおける体積濃度割合 κ_{sk} 、 κ_{mk} 、 κ_{lk} を求めた。粒子径範囲毎の質量濃度 C_{mk} は、球形粒子、粒子密度一定を仮定した上で、 C_{ms} 、 C_{mm} 、 C_{ml} および κ_{sk} 、 κ_{mk} 、 κ_{lk} から求めた。なお、 C_{ms} の下限および C_{ml} の上限は各吸気フィルタが主に捕集する粒子径から、それぞれ $0.3 \mu\text{m}$ と $10 \mu\text{m}$ とし、TSPの質量濃度 C_{mTSP} は全て $0.3 \sim 10 \mu\text{m}$ に分布すると仮定して、粒子径範囲毎の質量濃度 C_{mk} を下式により算出した。

$$\kappa_{lk} = \frac{\frac{1}{6} \pi d_{pk}^3 n_k}{\sum_{k=N_m+1}^{N_l} \frac{1}{6} \pi d_{pk}^3 n_k} \quad (5.2 < d_p \leq 10) \quad (15)$$

$$\kappa_{mk} = \frac{\frac{1}{6} \pi d_{pk}^3 n_k}{\sum_{k=N_s+1}^{N_m} \frac{1}{6} \pi d_{pk}^3 n_k} \quad (2.5 < d_p \leq 5.2) \quad (16)$$

$$\kappa_{sk} = \frac{\frac{1}{6} \pi d_{pk}^3 n_k}{\sum_{k=1}^{N_s} \frac{1}{6} \pi d_{pk}^3 n_k} \quad (0.3 \leq d_p \leq 2.5) \quad (17)$$

$$d_{pk} = LB_k \left[\frac{1}{4} \left(1 + \left(\frac{UB_k}{LB_k} \right)^2 \right) \left(1 + \left(\frac{UB_k}{LB_k} \right) \right) \right]^{\frac{1}{3}} \quad (18)$$

$$C_{mk} = C_{ml} \kappa_{lk} = (C_{mTSP} - C_{mSPM}) \kappa_{lk} \quad (5.2 < d_p \leq 10) \quad (19)$$

$$C_{mk} = C_{mm} \kappa_{mk} = (C_{mSPM} - C_{mPM2.5}) \kappa_{mk} \quad (2.5 < d_p \leq 5.2) \quad (20)$$

$$C_{mk} = C_{ms} \kappa_{sk} = C_{mPM2.5} \kappa_{sk} \quad (0.3 \leq d_p \leq 2.5) \quad (21)$$

3. 試験方法

3.1 試験装置

吸気フィルタに大気を通風する試験装置を神奈川県横須賀市の（一財）電力中央研究所構内に設置した。試験装置の外観をFig. 1に示す。試験装置は下流部に設置されたファンが大気を吸引する風洞構造となっており、その上流側に吸気フィルタの設置部が直列に3か所設けられている。それぞれの設置部には吸気フィルタを1枚ずつ設置でき、上流側に設置された吸気フィルタを通過した空気が下流側の吸気フィルタに流入する構造である。各吸気フィルタの差圧 Δp_m は、吸気フィルタ前後の天井面に設置された圧力ポートの静圧差として計測される。吸気フィルタ設置部の前面にはウェザーラーバが設置されており、雨水が直接入り込まない構造になっている。吸気フィルタ設置部の下流側にある流量測定部には、整流機能付きの定置式複合ピトー管センサが設置されており、このセンサで計測された動圧を吸気流量 Q に換算している。試験装置の吸気流量 Q は約30～100m³/minの範囲で調整することが可能である。これらにより、実機GTの吸気フィルタと同一の構成に対して、運転条件を模擬した試験が可能となる。各吸気フィルタの差圧 Δp_m や試験装置の吸気流量 Q は、温度や湿度のデータとともにデータロガーに隨時記録される。

吸気フィルタの粒子捕集率 η_{ck} の計測および大気塵の個数濃度 n_k の計測には、0.3～10μmの大気塵を対数で16等分割した粒子径範囲毎における個数濃度を計測できるTSI社製の光散乱式個数濃度計を用いた。吸気フィルタ前後に本個数濃度計を設置して、吸気フィルタ前後の個数濃度を簡易的に計測し、その変化から式(12)で粒子径範囲毎の計数法での粒子捕集率 η_{ck} を求めた。また、試験装置近傍に本個数濃度計を設置して、大気塵の個数濃度 n_k を計測した。

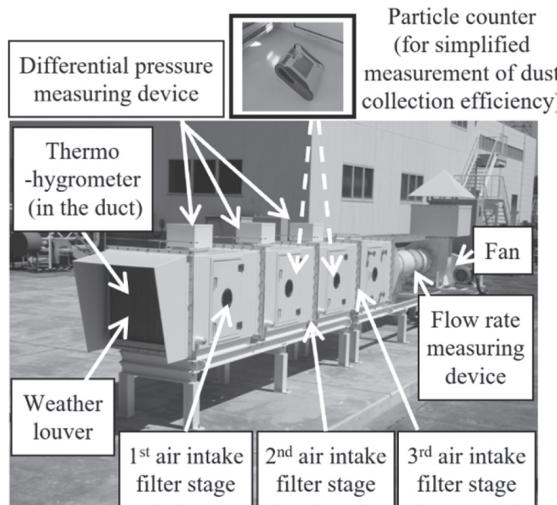


Fig. 1 Test equipment for GT air intake filter system

3.2 試験条件

吸気フィルタに対して、大気を連続通風させた際の試験条件をTable 1にまとめた。試験には日本無機製の吸気フィルタを用い、1次フィルタにプレフィルタを、2次フィルタに中性能フィルタを、3次フィルタにHEPAフィルタをそれぞれ用いた。同一型式の吸気フィルタに対して、異なる時期に2回試験した。試験期間1は2016年7月から2019年4月まで、試験期間2は2019年11月から2020年12月まであり、それぞれ断続的に実施した。試験では、一定流量で各吸気フィルタに連続通風し、それぞれの試験における差圧 Δp_m や吸気流量 Q を1分毎に記録し、1時間平均でまとめた。各試験期間の前後および試験装置メンテナンスのための試験中断時には、差圧計や吸気流量を調整した上で、各吸気フィルタの差圧 Δp_m 及び粒子捕集率 η_{ck} を、毎秒計測の15分間の平均値、30秒計測の5分間の平均値でそれぞれ計測した。また、各吸気フィルタを乾燥させた上で質量計測し、初期質量からの変化量を捕集量 m として求めた。

Table 1 Conditions of continuous ventilating tests conducted intermittently during the test periods

Case	Test period 1	Test period 2
Testing time	9624 (h) (July 2016 ～April 2019)	7936 (h) (November 2019 ～December 2020)
Testing location	Central Research Institute of Electric Power Industry (Yokosuka area)	
Flow rate	58 (m ³ /min)	
1 st air intake filter	Prefilter	
	Dimension (mm)	External: 594×594×95 Opening space: 553×564
2 nd air intake filter	Medium efficiency air filter	
	Dimension (mm)	External: 594×594×292 Opening space: 527×527
3 rd air intake filter	HEPA filter	
	Dimension (mm)	External: 610×610×290 Opening space: 572×561

4. 試験結果

4.1 試験装置周辺の大気環境

試験装置から直線距離で約0.5km離れたそらまめくんの測定局である神奈川県横須賀市西行政センターのSPMおよびPM2.5の質量濃度を、試験期間毎に各月の平均値でまとめたものをFig. 2に示す。Fig. 2の白抜きは20日間以上試験を実施していない月を示しており、黒塗りの月には概ね試験を実施している。そらまめくんで計測された質量濃度の経時変化において、データ欠損部はFig. 2に示した当該月の平均値を用いることとした。また、そらまめくんのSPMおよびPM2.5の質量濃度を、試験期間2の開始以前3年間における各月の平均値でまとめたもの（以下、過去3年間平均データ）をFig. 3に示す。試験期間2では、SPMおよびPM2.5の質量濃度が

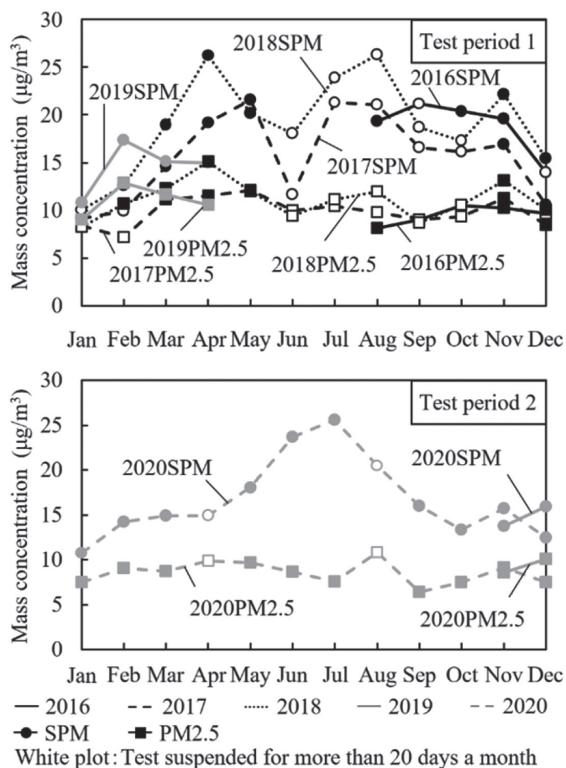


Fig. 2 Mass concentration of SPM and PM2.5 in Nishi Administration Center during the test periods (created based on Atmospheric Environmental Regional Observation System (Ministry of the Environment of Japan) <<https://soramame.env.go.jp/>>) (Reference date 2021.8.23)

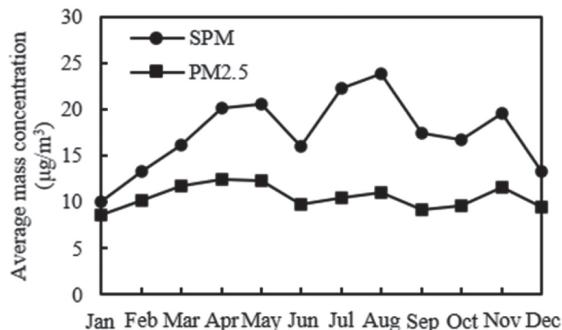


Fig. 3 Mass concentration average of SPM and PM2.5 in Nishi Administration Center for the last 3 years before the test period 2 (created based on Atmospheric Environmental Regional Observation System (Ministry of the Environment of Japan) <<https://soramame.env.go.jp/>>) (Reference date 2021.8.23)

Fig. 3に示した各月の平均値で一定であるとして、各吸気フィルタの捕集量 m を予測した。さらに、本試験での大気塵の個数濃度には、Fig. 4に示した試験装置近傍で2018年度に計測した個数濃度分布の平均値を用いた。

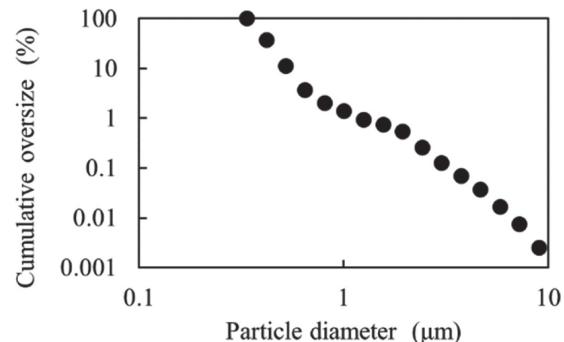


Fig. 4 Particle size distribution over the test equipment

4.2 吸気フィルタの連続通風試験結果

Fig. 5に各吸気フィルタの差圧 Δp_m と時間 t の関係を示す。1次フィルタ及び2次フィルタの差圧 Δp_m の上昇は、試験期間1及び試験期間2で異なり、同一試験時間において比較した場合、いずれも試験期間1の差圧 Δp_m の方が高い。3次フィルタの差圧 Δp_m については、明確な差異は見られなかった。2次フィルタと3次フィルタにスパイク状の差圧上昇がみられるが、これは雨天などにおける高湿度の影響と思われる。また、いずれの試験期間においても、本試験時間内では指數関数的な差圧上昇は確認されなかった。

各吸気フィルタの質量増加から計測した捕集量をFig. 6に示す。1次フィルタ及び2次フィルタの捕集量は時間 t とともに増加していることが確認されるが、試験期間2よりも試験期間1の捕集量の方が大きい傾向にある。3次フィルタの捕集量はばらつきが大きい結果となったが、これは3次フィルタの枠材が木材であったため、吸湿の影響を受けていると考えられる。特に、試験終了時を除く試験期間1は、空調による室内乾燥であったため、乾燥状況が各計測で異なっていた恐れがあった。そこで、試験期間1の試験終了時点から乾燥剤を用い、乾燥状況を概ね一定にして計測した。

Fig. 7に試験前後及び試験を中断した際に計測した各吸気フィルタの粒子捕集率 η_{ck} の平均値を示す。各吸気フィルタの試験期間における平均粒子捕集率 η_{ck} は多少異なるが、傾向は同一であることを確認した。

5. 吸気フィルタの差圧及び捕集量の考察

5.1 吸気フィルタの捕集量の推定

実機GTの吸気フィルタの管理に向けた吸気フィルタの捕集量 m の推定には、日常的な吸気フィルタの捕集量を管理するために随時推定する手法と、今後の差圧上昇を把握するために吸気フィルタの捕集量を事前に予測する手法が必要である。そこで、試験時のそらまめくんのSPMおよびPM2.5の質量濃度から試験中の吸気フィルタの捕集量 m を随時推定する手法と、SPMおよびPM2.5の質量濃度の過去の平均値から試験前に吸気フィルタの捕集量 m を予測する手法を検討した。

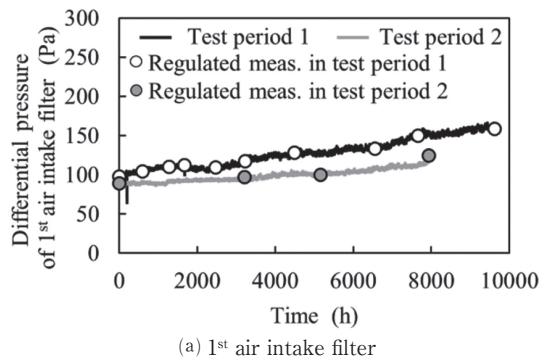
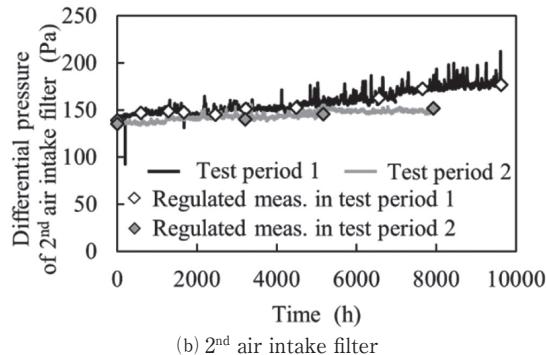
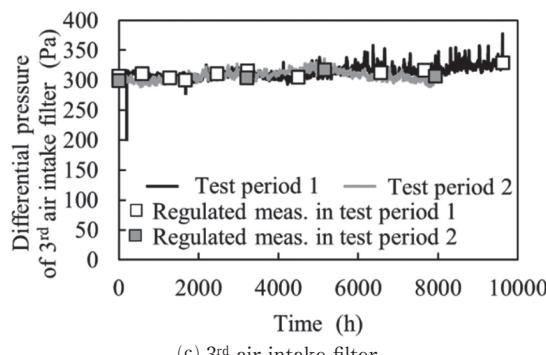
(a) 1st air intake filter(b) 2nd air intake filter(c) 3rd air intake filter

Fig. 5 Differential pressure of each filter over time in continuous ventilation tests conducted intermittently during the test periods

Fig. 2に示したSPMおよびPM2.5の質量濃度と、Fig. 4に示した大気塵の個数濃度 n_k の平均値を用いて、式(9)～式(21)とFig. 7に示した平均粒子捕集率 η_{ck} により、各吸気フィルタの捕集量 m を随時推定した結果をFig. 8に示す。試験期間2に対しては、Fig. 3に示したSPMおよびPM2.5の各月の質量濃度の過去3年間の平均データと、Fig. 4に示した大気塵の個数濃度 n_k の平均値を用いて、試験期間1で計測した各吸気フィルタの粒子捕集率 η_{ck} から同様に各吸気フィルタの捕集量 m を予測した結果を合わせてFig. 8に示す。さらに、Fig. 6に示した吸気フィルタの質量変化から計測した捕集量を合わせてFig. 8に示す。但し、3次フィルタについては、乾燥剤を用いた捕集量の計測結果のみを示す。両試験期間において、随時推定した各吸気フィルタの捕集量 m と、吸気フィルタの質量変化から計測した捕集量は概ね一致することを確認した。したがって、吸気フィルタが吸引する大気の

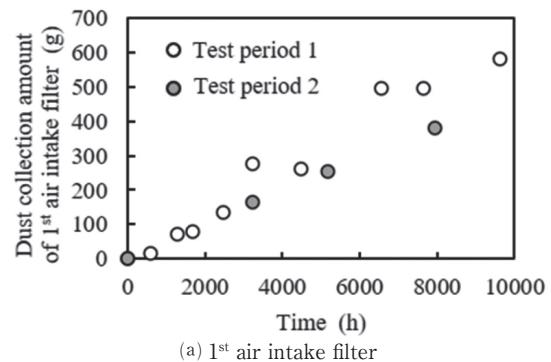
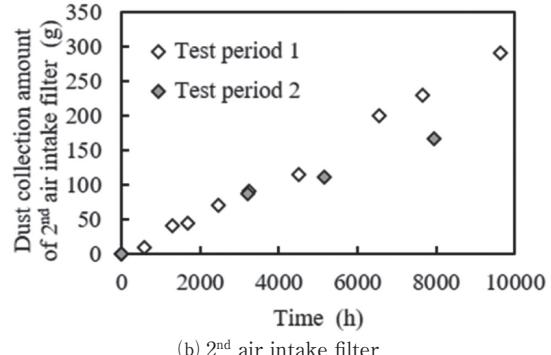
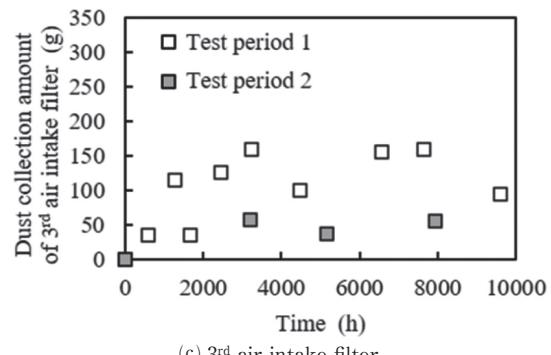
(a) 1st air intake filter(b) 2nd air intake filter(c) 3rd air intake filter

Fig. 6 Dust collection amount of each filter over time in continuous ventilation tests conducted intermittently during the test periods

SPMおよびPM2.5の質量濃度を用いることで、式(9)～式(21)により、運転中の吸気フィルタの捕集量 m を推定することができる。1次フィルタおよび2次フィルタで推定した捕集量は、試験期間1及び試験期間2の捕集量の大小関係を概ね示しており、Fig. 5に示した各試験期間における差圧の上昇傾向の違いとも連動している。また、SPMおよびPM2.5の各月の質量濃度の過去3年間平均データから予測した各吸気フィルタの捕集量 m は、2次フィルタでは推定した捕集量とほぼ同等であったが、1次フィルタ、3次フィルタでは多少乖離が生じた。これはFig. 2に示した通り、試験期間2におけるPM2.5の質量濃度が過去3年間の傾向よりも低かったためと考えられる。一方で、予測した捕集量と推定した捕集量は、いずれも吸気フィルタの質量変化から計測した捕集量と概ね一致している。このことから、各月のSPMおよびPM2.5の過去の質量濃度の平均値を用いることで、式(9)

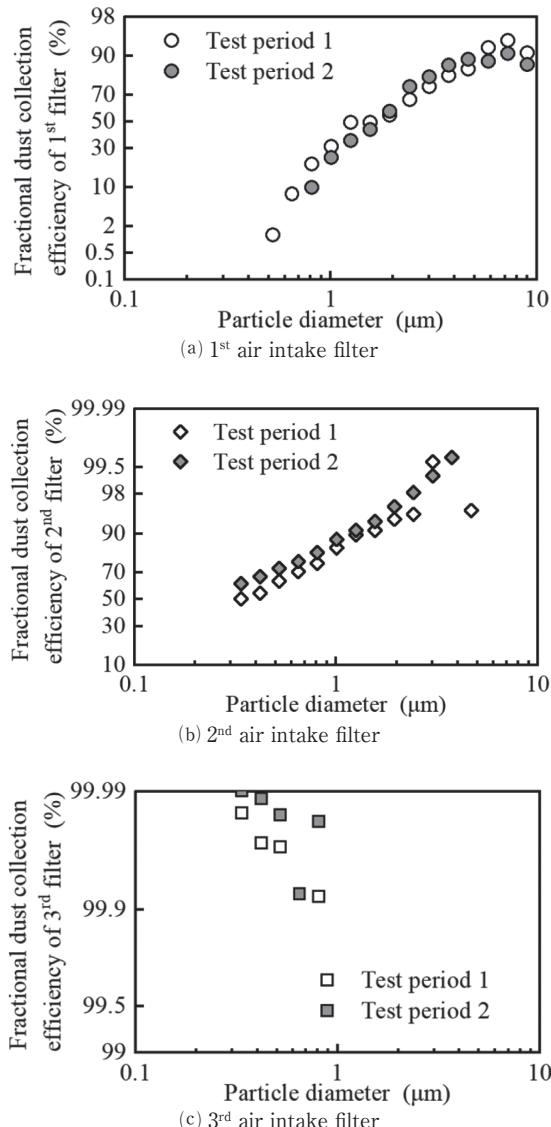


Fig. 7 Dust collection efficiency of each filter over time in continuous ventilation tests conducted intermittently during the test periods

～式(2)により、吸気フィルタの捕集量 m の予測が可能であると考えられる。

5.2 吸気フィルタの差圧と捕集量の関係の導出

試験期間1に対して、Fig. 5に示した差圧 Δp_m の経時変化と、Fig. 8に示した各吸気フィルタの捕集量 m の推定値の経時変化から、各吸気フィルタの差圧と捕集量の関係を整理した結果をFig. 9に示す。また、Fig. 9に示した差圧と捕集量の関係から、差圧上昇係数 ω および差圧上昇指数 γ を最小二乗法で推定し、式(8)で吸気フィルタの差圧 Δp_m を推定した結果を合わせてFig. 9に示す。2次フィルタと3次フィルタにおけるスパイク状の差圧上昇を除いて、式(8)で求めた各吸気フィルタの差圧 Δp_m と捕集量 m の関係は、試験期間1の実測値とよく一致した。

試験期間2の初期差圧 Δp_0 と、試験期間1で求めた各吸気フィルタの差圧上昇係数 ω および差圧上昇指数 γ を

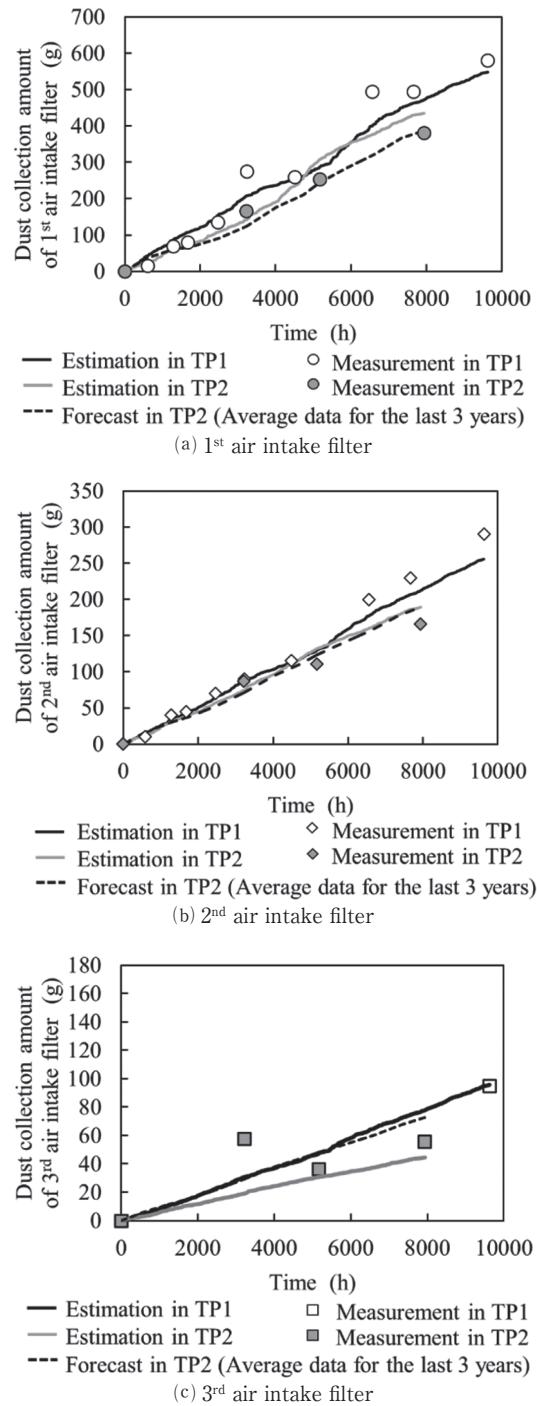


Fig. 8 Estimation of dust collection amount of each filter continuous ventilation tests conducted intermittently during the test periods (TP1: Test period 1, TP2: Test period 2)

用いて、式(8)から試験期間2の差圧上昇を予測した結果をFig. 10に示す。また、Fig. 9と同様に、試験期間2における各吸気フィルタの差圧と捕集量の関係を整理した結果を合わせてFig. 10に示す。試験期間2における各吸気フィルタの差圧 Δp_m の予測結果は、試験結果と概ね一致している。したがって、同じ型式の吸気フィルタを測定値と同じ場所で使用するのであれば、差圧上昇係数 ω と差圧上昇指数 γ は一定として差圧と捕集量の関係

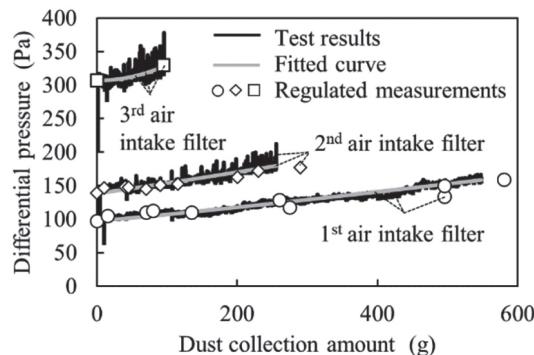


Fig. 9 Relationship between the differential pressure and the dust collection amount of each filter in test period 1

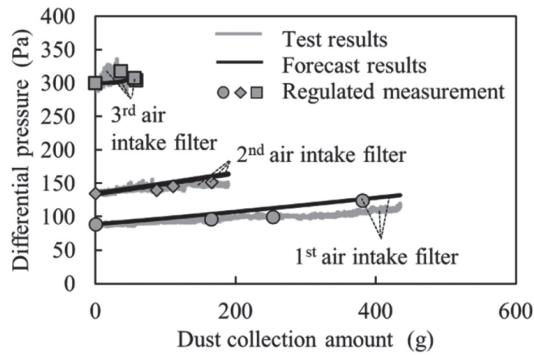


Fig. 10 Relationship between the differential pressure and the dust collection amount of each filter in test period 2

を導出することができる。導出した差圧と捕集量の関係に、式(9)～式(21)で予測した捕集量 m を用いることで、差圧 Δp_m の予測が可能である。

6. まとめ

本研究では、GT用吸気フィルタの粒子捕集率と大気塵の質量濃度に関する公開データから吸気フィルタの捕集量を推定する手法を考案した。また、単分散粒子の差圧推定手法を基に、多段構成であるGT用吸気フィルタの差圧上昇を推定する手法を考案した。考案した手法を、GTと同一構成の吸気フィルタセットに対して、連続通風させる試験に適用して検証したところ、以下の知見を得た。

SPMとPM2.5の質量濃度の公開データと粒子径範囲毎の個数濃度から、粒子径範囲毎の質量濃度を推定し、吸気フィルタの粒子捕集率から、吸気フィルタの捕集量を推定した。推定した捕集量を試験結果と比較したところ、概ね一致することを確認した。また、直近のSPMとPM2.5の各月の質量濃度の平均値を用いて、予測した吸気フィルタの捕集量も試験結果と概ね一致した。したがって、本手法により、吸気フィルタの捕集量を予測することが可能である。

吸気フィルタの初期差圧、差圧上昇係数および差圧上昇指数を用いて、吸気フィルタの差圧と捕集量の関係を整理したところ、試験結果とよく一致した。

差圧上昇係数および差圧上昇指数を把握した測定地と同じ場所で同じ型式の吸気フィルタを使用する場合、差圧上昇係数と差圧上昇指数は概ね一定となる。したがって、予め吸気フィルタの使用環境における差圧上昇係数と差圧上昇指数を把握しておくことで、吸気フィルタの捕集量を基に差圧の予測を可能とした。

GTの吸気フィルタの運用に本手法を適用する際の課題として、より長期間の吸気フィルタの差圧上昇の推定が挙げられるとともに、2次フィルタや3次フィルタに生じるスパイク状の差圧上昇を予測する手法を検討する必要がある。

参考文献

- 三浦千太郎, ガスタービンにおける吸気フィルタ総論—吸気净化技術へのユーザーの取り組みと実績—, 日本ガスタービン学会誌, Vol. 25, No. 99 (1997), pp. 3-10.
- 藤井智晴, 尾関高行, ガスタービン用吸気フィルタの保守管理の実態調査. 電力中央研究所報告 M13008. (2014).
- 金子清隆, 岩間秀司, 寺澤秀彰, 自家発電設備用ガスタービンの吸気系改善事例 (日本ガスタービンユーザー会), 日本ガスタービン学会誌, Vol. 42, No. 3 (2014), pp. 166-173.
- 金岡千嘉男, フィルタ性能の経時変化, エアロゾル研究, vol. 4, No. 4 (1989), pp. 256-264.
- 坂野健夫, 大谷吉生, 並木則和, 江見準, 単分散粒子に対する中性能纖維層フィルタ集塵性能の経時変化予測, エアロゾル研究, vol. 17, No. 3 (2002), pp. 185-190.
- 環境省大気汚染物質広域監視システム (そらまめくん) <<https://soramame.env.go.jp/>>, (参照日2021年8月23日).
- 渡辺征夫, 遠藤治, 後藤純雄, 田辺潔, 溝口次夫, 松下秀鶴, β 線吸収法とハイボリュームエアサンプラー法による都市大気中の浮遊粉塵の測定値の比較—東京の2監視局での10年間にわたる間欠測定調査より—, 環境化学, Vol. 10, No. 3 (2000), pp. 557-572.
- L.C. Kenny, R. Gussman and M. Meyer. Development of a Sharp-Cut Cyclone for Ambient Aerosol Monitoring Applications. Aerosol Science & Technology. Vol. 32, No. 4 (2010), pp. 338-358.
- 兼保直樹, 大気中の汚染物質に関する法規則と研究の現状, 第31回環境工学連合講演会講演論文集, (2018), pp. 21-24.