

クローズドシステム処分場のガス発生量・換気量の同時評価手法

諏訪 好英 小竹 茂夫

(本社エンジニアリング本部)

Simultaneous Evaluation of Gas Emission Rate and Air Ventilation Rate in Closed System Disposal Facilities

Yoshihide Suwa Shigeko Kotake

Abstract

In recent times, waste disposal facilities have been constructed as closed systems (CSs) in order to reduce the influence of the waste disposal process on the surroundings. Several types of gas are emitted from the waste. Hence, it is very important to maintain the gas concentration at safe levels through adequate ventilation and to ensure a safe environment to the personnel who work inside the facility. However, it is difficult to evaluate the total gas-emission rate. On the other hand, the rate of exchange of air between the facility and the surroundings is occasionally increased because of the effect of natural ventilation. It is also difficult to evaluate the total air-exchange rate. In this work, evaluation method was developed that could simultaneously evaluate the gas emission rate and ventilation rate. Using the evaluation results, natural ventilation could be predicted. The change in the gas concentration in the facility was predicted assuming it was the natural ventilation caused by the external wind and a difference in the temperature between the interior and the exterior of the system. As a result, the prediction was in good agreement with the measurements. If the current method is used to control CS disposal facilities, it is expected that environmental improvement and energy saving will be achieved by natural ventilation.

概要

環境との共生を目的として、廃棄物処理施設を大型の建屋やテントで覆ったクローズドシステム処分場(CS処分場)の建設が増えている。CS処分場では、作業者の安全確保のため処分場内のガス濃度を一定値以下に保持する必要があり、十分な換気を得られる性能が重要となる。しかしCS処分場のような大空間では、換気性能の評価が難しく、また部分的な濃度測定値から発生ガスの総量を把握することも困難であった。そこで、濃度測定値に基づき発生ガスと換気性能の双方を同時に評価する技術を開発した。この方法によれば、夜間などファンの運転台数を切替えたときの濃度変化から発生ガスの総量を評価でき、また同時に計測した気象データから外部風や温度差に起因する自然換気効果を考慮し、換気性能を評価することができる。本技術を制御システムに組み込めば、自然換気の有効利用による環境改善や運転コストの削減、省エネルギー化も可能と考えられる。

1. はじめに

周辺環境への考慮、維持管理の容易さなどから、一般廃棄物の最終処分場をクローズドシステム処分場(以下CS処分場と呼ぶ)とする例が増えている。CS処分場とは、大型のテントや鉄骨・パネル構造により処分場を屋内化したシステム、あるいは人工地盤等で処分場を覆って廃棄物を処理・貯蔵するシステムの総称である。Fig.1は大型テントで屋内空間を構成したCS処分場の一例である。CS処分場には、粉じんの飛散、浸出水の河川への流出、衛生害虫獣の発生を防止し、周辺環境への負荷を低減できる利点があり、雨水の流入などの外部影響を受けにくく維持管理が容易なため、結果的に従来システムに対してランニングコストを削減できるなど、多くの利点がある^{1),2)}。

一方、廃棄物処分場では微生物による分解作用に伴いさまざまなガスが発生する場合があるが、CS処分場の場合

は特にガスが滞留して高濃度となる危険性があるため、十分な換気により処分場内のガス濃度を一定値以下に保持し、作業者の安全を確保する必要がある。

しかし、一般にCS処分場のような大空間では、屋内によどみやショートサーキットを生じる場合があり、実質の換気風量が排気ファンによる機械換気風量と一致するとは限らない^{3),4)}。また、正確な換気風量の評価には対象ガスの発生量が既知である必要があるが^{5),6)}、大規模な処分場ではガスの発生量にも空間的なばらつきが大きく、その総量を把握することが難しいという課題がある⁷⁾。そこで本研究では、ガス濃度の実測値に基づきその発生量と換気風量の双方を同時に評価する方法について検討を実施した。また外部風や温度差に起因する自然換気効果が処分場内のガス濃度に与える影響を考察し、自然換気利用による環境改善の可能性を検討した。

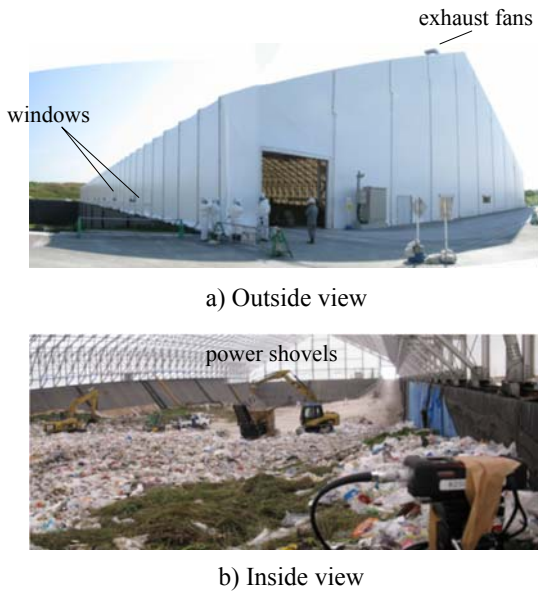


Fig.1 CS 処分場の概観

View of CS (Closed system) disposal facility

2. ガス発生量と換気風量の同時評価

2.1 基本的な考え方

容積 V の空間に発生量 M のガスの発生があり、任意の換気風量 W を与えたときの空間内におけるガス濃度は次式で表される。

$$V dC/dT = -(C - C_{out})W + M \quad (1)$$

V : 対象空間の容積, C : 空間内の平均ガス濃度,
 C_{out} : 屋外のガス濃度, W : 換気風量,
 M : ガスの発生量

(1) の解析解は次のとおりである。

$$C = C_{out} \exp(-Wt/V) + \{(C_{out}W + M)/W\} \{1 - \exp(-Wt/V)\} \quad (2)$$

ここで $C_{out} = 0$, $C_{term} = M/W$ とおくと,

$$C = (C_{init} - C_{term}) \exp(-Wt/V) + C_{term} \quad (3)$$

C_{init} : 初期濃度, C_{term} : その換気条件での定常濃度

ここに、以下のような3種類の評価法が考えられる。

2.2 評価手法

2.2.1 評価手法1 いま、排気ファンを停止している状態から換気を開始した場合を想定する。ガスの発生がない場合には、縦軸を対数濃度、横軸を時間として濃度変化をプロットすると、その時間変化は $-Wt/V$ を勾配とする直線で表される⁸⁾。ここに $-Wt/V$ は対象空間の実質の換気回数である。(3)式ではガスの発生があるため、対数濃度の時間変化は直線とはならない。しかし、その換気条件で定常に達したときの濃度 C_{term} を求め、(3)式の両辺

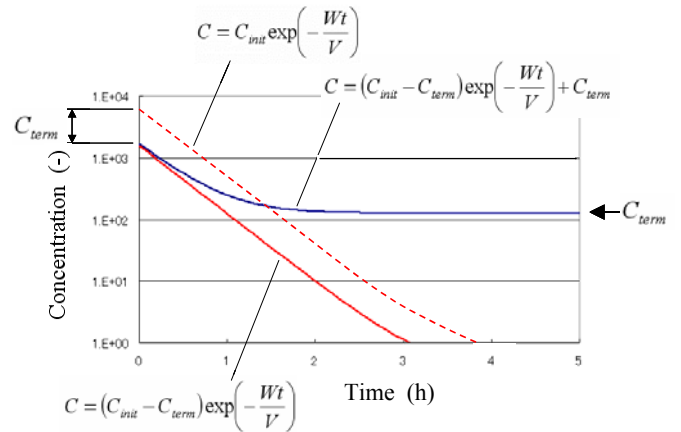


Fig.2 評価手法1による換気量評価
 Evaluation of air exchange rate by method-1

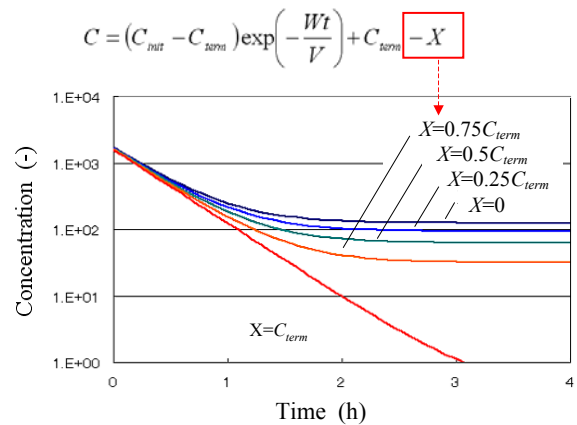


Fig.3 評価手法2による換気量評価
 Evaluation of air exchange rate by method-2

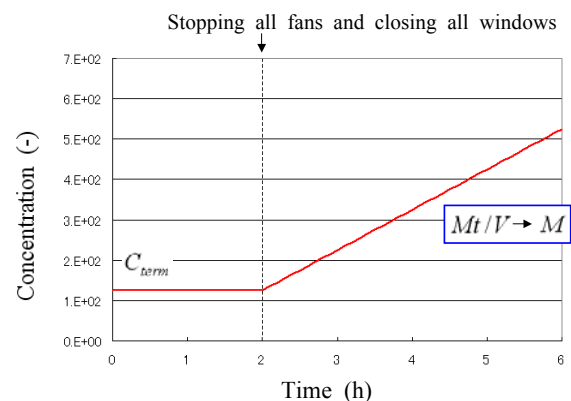


Fig.4 評価手法3による換気量評価
 Evaluation of air exchange rate by method-3

から C_{term} を差引くと、対数濃度の時間変化は直線となり、その勾配を求めることができる。すなわちこの勾配から、Fig.2に示すように対象空間の換気回数、および換気風量を求めることができる。この方法は、ガスの発生量 M の有無および大小には依存しない評価方法である。また換気が行われている空間では、排気口におけるガス濃度は屋内の平

均ガス濃度にほぼ一致することが換気理論からわかっており、排気口付近でガス濃度を連続測定することで本手法を実現できると思われる。

2.2.2 評価手法2 (3)式の両辺から C_{term} を差引くのではなく、両辺から任意の数値を順次差引き、最小二乗法等で対数濃度の時間変化が最も直線に近くなった場合を正解とみなして評価することもできる。Fig.3にその概念を示すように、本手法ではさらに高い汎用性を得ることができる。

2.2.3 評価手法3 換気している状態からすべての排気ファンを停止した場合には、空間内の濃度変化は M/V で表させることとなり、これを用いてガスの発生量 M が評価できる。(3)式から換気風量を評価した場合もFig.4に示すように $M=W C_{term}$ より発生量 M が求まる。ただし、処分場のような広い空間で発生量が均一でない場合に、空間内のガスの平均濃度(すなわち発生するガスの総量)を評価しにくいことが本研究のそもそもの発端であった。本手法の適用には、屋内にゆっくりとした自然換気等の一方向流れが存在する場合の排気口濃度を適用するなどの工夫が必要であり、必然的にその評価は換気分の誤差を含むこととなる。

いずれの場合も、ガス濃度の測定値にはある程度の誤差やばらつきが含まれることとなるため、可能な限り複数の異なる方法を用いてガス発生量および換気風量を評価することが望ましい。

2.3 評価対象

2.1に示したガス発生量と換気風量の同時評価手法を実際のCS処分場に適用した。対象とした処分場の概要をFig.5およびTable1に示す。本処分場は134.35m × 49.35m、深さ12mのピットの上部に最高高さ18.8mの切妻型の大型テントを設置し、屋内化したものである。テントの側面には外気取込み用開口が、また屋根頂部には27台の排気ファンが設置されており、必要に応じて排気ファンの運転台数を変化させ、テント内を換気している。Fig.5に併記したように、本研究ではテントの屋根頂部の排気口3箇所からガス濃度の測定点を設定し、連続測定を行った。

2.4 実測値による評価

ガス濃度の実測値を用いて、ガス発生量と換気風量の同時評価を試みた。Fig.6は「評価手法1」を用いて換気量を評価した例である。縦軸を対数として濃度変化をプロットし、 C_{term} を差引くと、換気を開始した時点から直線的に減衰する濃度変化を得られ、換気回数 W/V を評価できることがわかる。Table 2は、同じデータに2.1の「評価手法1」～「評価手法3」を適用して求めた換気回数およびこれに基づいて求めたガス発生量である。なお2.1で述べたように、ここで求めた値は対象空間における実質の換気回数(換気に寄与した風量)であり、ファンにより与えられた実際の風量とは異なる。Table2に示した効率率は実際の換

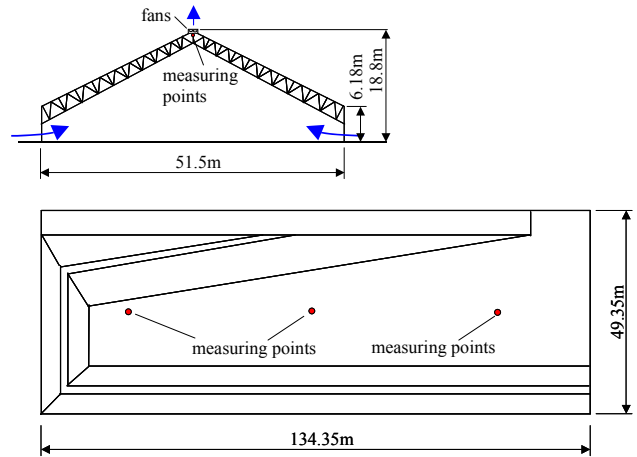


Fig.5 評価対象としたCS処分場
Evaluated CS disposal facility

Table 1 評価対象としたCS処分場の概要
Specification of evaluated CS disposal facility

Type	The gable roof tent
Size	Width : 51.5m × Length : 137m, Eave's height : 6.18m, Top height : 18.8m
Tank	Width : 49.35m × Length : 134.35m, Depth : 12m
Openings and Fans	Gate : 4605mm × 4114mm × 1 Windows : 2600mm × 750mm × 5 Roof fans : φ 750mm × 0~20 (200m ³ /min, 1.5kW)

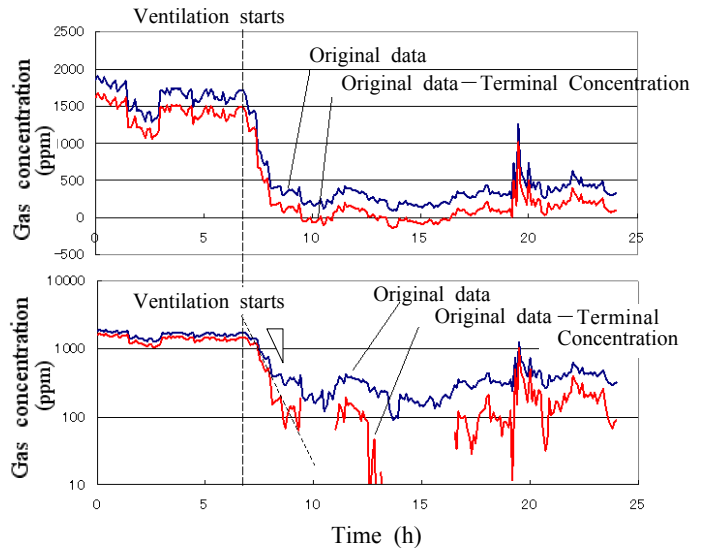


Fig.6 実測データを用いた換気量評価の例
An example of exchange rate evaluation from actual data

気風量に対する実質の換気量の割合を示しており、本処分場では与えられた換気風量のうち約90%が実質の換気量として利用されていることを示している。異なる評価手法により算出したTable2の結果は、いずれもほぼ近い値を示しており、本評価手法の妥当性を示すものと考えられる。

Table 2 各手法による評価結果
Evaluated results by each method

	Air exchange rate (h)	Efficiency (%)	Gas emission rate (kg/h)
Method 1	1.304	91.3	36.3
Method 2	1.251	87.5	34.9
Method 3	—	—	40.4

* Efficiency was evaluated assuming 11 fans are working (each fan supplies 200m³/min)

ただし [評価手法 3] による結果は2.1.3に示したような課題を残すものであり、あくまで参考値である。

3. 自然換気の影響に対する評価

3.1 自然換気による影響のモデル化

換気空間では、排気ファンによる機械換気のほか、屋内外の温度差や外部風に起因する自然換気効果が作用する。CS処分場の場合も、日昼は日射によりテントおよび屋内が温められるほか、内部で使用している重機（パワーショベル等）の発熱、廃棄物の微生物反応による発熱がこれに加わるため、処分場内の温度が上昇して自然換気を生じる。また外部風が強い場合には、テント側面の開口から外気が屋内に流入し、換気作用を促進することも考えられる^{9)~1)}。そこで、これら自然換気がCS処分場の換気風量やガス濃度にどの程度影響するのかを考察した。

これらの自然換気効果は圧力差として系に作用する。すなわち、

・屋内外の温度差に起因する自然換気効果で生じる圧力差

$$\Delta P_{buoy} = \Delta h (\rho_{out} - \rho_{in}) \quad (4)$$

・外部風に起因する自然換気効果で生じる圧力差

$$\Delta P_{wind} = C_s u^2 \rho_{in} / 2g \quad (5)$$

Δh : 上下開口高さの差, ρ_{in} : 屋内の空気密度,
 ρ_{out} : 屋外の空気密度, C_s : 風圧係数, u : 外部風速,
 g : 重力加速度

ただし、対象とした処分場のテントは先述したように切妻型である。(5)式の風圧係数 C_s は風向により異なるため、既往の研究^{12), 13)}で求められている値を風向ごとに適用して計算することとした。 ΔP_{buoy} , ΔP_{wind} は換気が促進される方向を正とした。

一方排気ファンによる機械換気は、使用するファンの差圧特性と系内の流路抵抗とがバランスする点で風量 W_{fan} を与える。

$$W_{fan} = f_{fan}(\Delta P_{fan}) = A \alpha (2g \Delta P_{fan} / \rho_{in})^{-1/2} \quad (6)$$

$f_{fan}(\Delta P_{fan})$: ファンの P-W 特性, ΔP_{fan} : ファンの差圧,

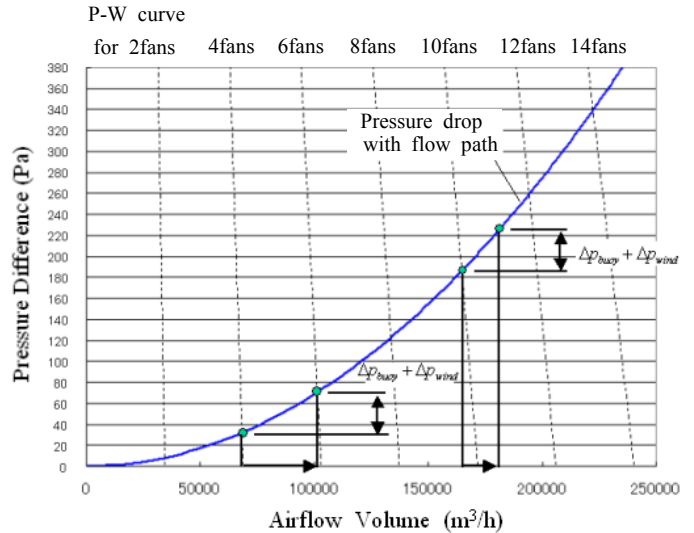


Fig.7 差圧（ファンおよび自然換気効果による）と換気風量との関係

Relation between pressure difference (caused by fan, buoyancy and wind) and ventilation airflow volume

α : 流量係数, A : 開口面積

ここに、開口部の流量係数 α は、テントに複数設けられている窓、出入り口等すべての開口について総合した値である。テントの開口部はすべて単純開口とした。

(8)式と(4)式、(5)式との関係はFig.7のように表される。すなわち、特定の台数のファンで排気したときの差圧 ΔP_{fan} および換気風量 W_{fan} は(5)式で表される曲線とファンの P-W 特性との交点で与えられる。屋内外の温度差や外部風に起因する自然換気効果が作用した場合には、系内の総合的な差圧、

$$\Delta P = \Delta P_{fan} + (\Delta P_{buoy} + \Delta P_{wind}) \quad (7)$$

として(5)式を変形した式

$$W = A \alpha (2g \Delta P / \rho_{in})^{-1/2} \quad (8)$$

により総合的な換気風量 W を予測した。Fig.6に補助線と併記したように、本モデルでは、稼働中の排気ファン台数が少ない場合には、自然換気が風量変化におよぼす影響が大きく、排気ファン台数が増えるに従いその影響は相対的に小さくなるのがわかる。

なお、屋内のガス濃度 C との関係は、Table2の効率を γ として次式で表される。

$$C = M / \gamma W \quad (9)$$

3.2 実測データを用いた評価

実際に稼働中の某CS処分場について、気象データ（屋内外温度差および外部風速）を用いてガス濃度の時間変化を予測した。使用したガス濃度の実測データは、2009年10月に北海道大学大学院工学研究科 古市徹教授のグループが実施した連続測定の結果である¹⁴⁾。対象とした処

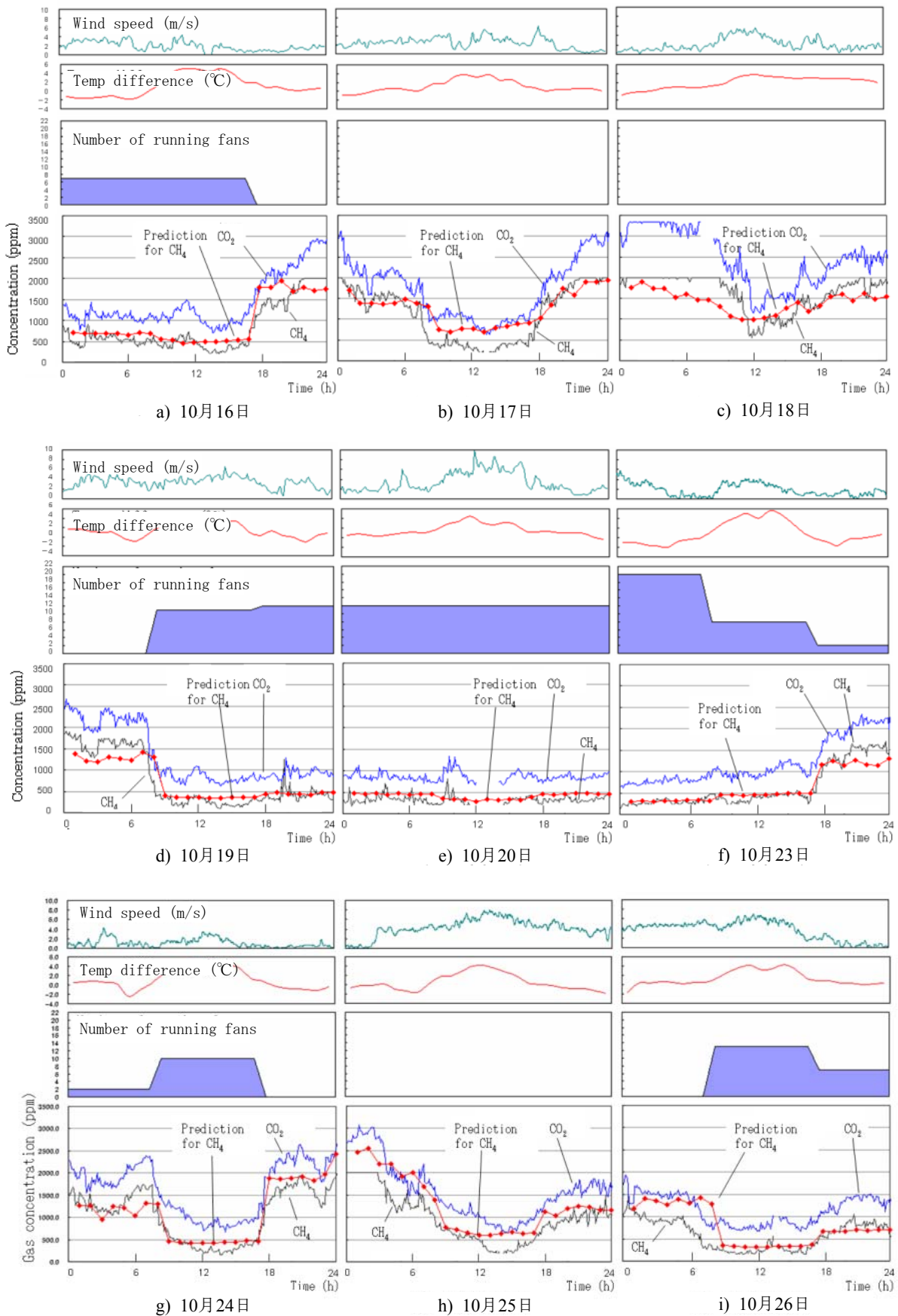


Fig.8 処分場内ガス濃度の実測値と予測結果との比較
Comparison between measured and predicted gas concentration

分場の緒元は2.3に示したとおりである。Fig.8は3.1の方法により予測したガス濃度と実測データとを比較したものである。なお、ガス濃度の測定はメタンおよび二酸化炭素について実施しているが、予測はメタンを対象とした。Fig.8 b), c), h)など、機械換気を全く行っていない場合でも、日昼に屋内外の温度差が大きくなったり外部風が強くなったりすると自然換気効果が得られ、屋内のガス濃度が減少する傾向が認められた。他のケースでは意図的に排気ファンの運転台数を変化させ、屋内外温度差および外部風の影響が複雑に関係する実現象の再現を試みている。ガス濃度の変化は排気ファンの運転台数に非常によく追従した。ガス濃度の予測結果は、実測結果を定性的、定量的に精度よく再現しており、自然換気や排気ファンの運転台数によるガス濃度への影響をよく反映していることなど、本評価手法の妥当性が確認された。

4. まとめ

C S処分場を対象として、大空間におけるガス濃度の実測値に基づきその発生量と換気風量の双方を同時に評価する方法を開発した。また某C S処分場で収集した実測データとの比較を行った結果、その妥当性が確認された。本手法を処分場の作業環境監視システムに組込めば、より安全な作業環境の実現に寄与できるほか、気象データの連続モニタリングを応用した自然換気利用による排気ファンの省エネ運転制御も可能と考えられる。今後さらに実測データとの比較を継続し、本手法の完成度を高めていく予定である。

謝 辞

本研究の実施にあたり、北海道大学大学院工学研究科古市徹氏、谷川昇氏、石井一英氏、岩崎謙二氏、稚内市建設産業部 日向寺和裕氏、および同生活福祉部衛生課田端

義親氏より多大なるご協力をいただきました。ここに記して感謝いたします。

参考文献

- 1) Ohno, F., Hanashima, M. and Furuichi, T. : Proc. of 5th. Asian-Pacific Landfill Symp., CD-ROM (2008).
- 2) Matsumoto, S., Nishiyama, et.al. : Proc. of 5th. Asian-Pacific Landfill Symp., CD-ROM (2008).
- 3) Brohus H. : Proc. of Ventilation '97, 5th. Int. Symp. on Ventilation for Contaminant Control, Ottawa, Canada, Vol.1, pp.215-226 (1997).
- 4) Mathisen, H.M. and Skaret, E. : SINTEF 15 A84047, The Norwegian Institute of Technology, Trondheim (1983).
- 5) Brouns, C., and Waters, B. : Technical Note AIVC 28, Air Infiltration and Ventilation Centre (1991).
- 6) Sutcliffe, H. : Technical. Note AIVC 28, Air Infiltration and Ventilation Centre (1990).
- 7) Raatschen, W. : KI, Klima Kiilte Heizung, Hefte. 5, 6, 7, and 8, May, June, and July, Verlag Muller (1988).
- 8) ISO Technical Committee 209 : ISO 14644-3 (2005).
- 9) Linden, P. F. : Ann. Rev. of Fluid Mechanics, Vol. 31, pp. 201-238 (1999).
- 10) Teitel, M. and Tanny, J. : Vol.96, No.30, pp.59-70 (1999).
- 11) Boulard, T., Meneses, et.al. , G. : Agricultural and Forest Meteorology, Vol. 79, Issues 1-2, pp.61-77 (1996).
- 12) 岡田, 大熊, 片桐: 日本建築学会構造系論文集, No.622, pp.57-64 (2007).
- 13) 有富, 酒井, 久保, 石原: 日本建築学会九州支部研究報告, No.46, pp.437-440 (2007).
- 14) 諏訪, 古市, 谷川, 石井, 岩崎, 小竹: プレISCC2010 空気清浄とコンタミネーションコントロール研究発表会, 日本空気清浄協会, pp.98-100 (2010).