

石炭運搬船における酸化発熱によるメタンガス発生と 倉内環境制御について

正員 福地 信義*
学生員 中島 徹*

後藤 研**
工藤 伸司***

A Characteristic Analysis of Methane-gas Generation by Oxidizing Heat of Stored Coal
and Hold Ventilation Control

by Nobuyoshi Fukuchi, *Member* Ken Gotoh
Tohru Nakashima, *Student member*, Shinji Kudoh

Summary

Accompanying gradual increase of consuming coal as inexpensive energy, a great deal of coal which has tendency to generate methane-gas spontaneously by oxidizing heat is transported overseas by many bulk carriers. The problem of methane-gas generation originating from coal self-heating is induced greatly the concern in the coal transportation as bulk cargo for the reason that the accidents of gas explosion is apprehensive to occur. Consequently, it needs to take counter-measures to cope with preventing from accumulating surplus explosive gas beyond the lower limit of explosive concentration in void spaces of cargo holds. For this purpose, the hold ventilation is a way of controlling the gas concentration to take account into the fact that quantity of oxidizing heat of fine coal depends upon its temperature and surrounding oxygen concentration which could be expressed by the Arrheniuse's formula.

The generated methane-gas by oxidizing heat of stored coal and the variation of gas concentration in cargo hold with ventilation are clarified in the present study. Firstly, the measurement of generating quantity of methane-gas based on coal temperature is carried out experimentally using the gas-tight steel box in the electric furnace. Secondly, the variation of temperature and gas concentration in a cargo hold are simulated numerically for the coals having combined properties of thermal and gas characteristic, by using the thermal conductivity equation and the gas diffusion equations with the self-generating source. By the results of simulation, the gas accumulation in a cargo hold must depend upon the properties of coal in regard to methane-gas generation and it may be difficult to control the gas concentration within the safety range only by hold ventilation in a case of carrying the coal with high gas generation.

1. はじめに

石炭の需要は世界的に緩やかな増加傾向にあるが、これに伴い石炭の海上輸送量も漸次増大し、石炭運搬船も大型化している。石炭輸送形態の主体はバルク輸送であるが、この方式の場合には石炭の酸化発熱により、粘結性の低

下、発熱量の減少などの品質低下や自然発火が起こる恐れ
の他に、メタンガスの発生を引き起こす。船倉内に発生し
たメタンガスは次第に上部空間へ滞留し、時間の経過とと
もに爆発限界濃度に達する可能性もあり得る。このため
に、石炭運搬船には適当な換気装置を装備し、輸送する石
炭の物性に依りて、石炭の自然発熱を抑えながらメタンガ
スの濃度を制御する必要がある。

石炭からのメタンガス発生には、石炭倉における酸化発
熱の寄与が大きいのと考えられるが、メタンガス発生温度
依存性はあまり明らかでないで、その関係を石炭加熱実
験により調べる。さらにこの実験結果を用いて、石炭運搬
船の貨物倉におけるメタンガスの発生量を推定し、航海中

* 九州大学大学院工学研究科

** 九州炭鉱技術連盟

*** 波止浜造船所

原稿受理 平成 10 年 7 月 9 日

秋季講演会において講演 平成 10 年 11 月 12 日, 13 日

の倉内温度、酸素濃度、メタンガス濃度の時間的変化についてシミュレーション計算を行う。これにより、炭種、換気などの条件による石炭運搬船の安全性を評価する。

2. 石炭からのメタンガス発生

石炭からのメタンガス発生は減圧するか熱が与えられる場合に多くなる。石炭倉内の圧力変化はあまり大きくないので、メタンガス発生は石炭の酸化発熱などによる温度変化に依存するものと考えられる¹⁾²⁾³⁾。

2.1 メタンガス発生実験

石炭からのメタンガス発生と温度依存性の関係はあまり明らかでないので、本研究では、石炭を電気炉で加熱してメタンガスの濃度を計測し、これより発生量を算出した。

(1) 実験装置

a) 加熱装置と計測装置

石炭の加熱には、Fig. 1 に示すような鋼製の箱にガス吸排出用と熱電対用穴をそれぞれ上下面と側面にあけ、アルミニウムのガイドパイプを入れてコーキング材で固定した容器を使用した。これを電気炉に入れて容器ごと加熱した。

石炭温度は、代表温度としての有効性を確かめた上で、Fig. 1 に示すように石炭集積の中心に設置した熱電対 (T) により計測した。メタンガス濃度の測定には、接触燃焼式濃度計 (コスモス, XP-316 A) を使用した。

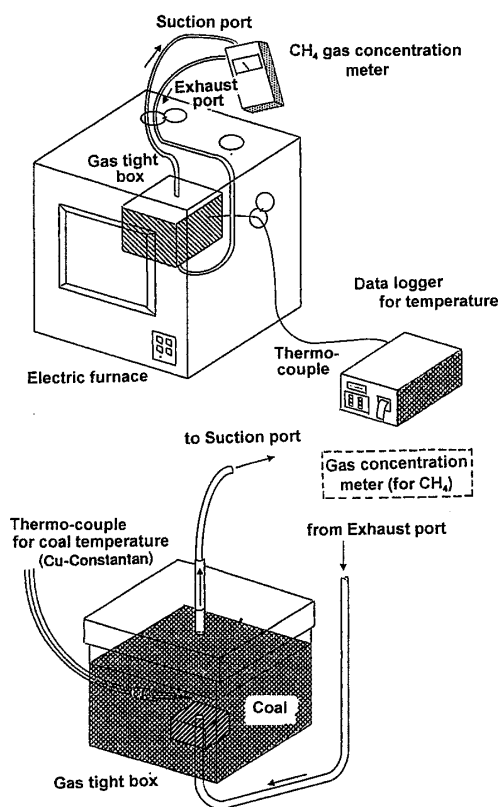


Fig. 1 Measurement system for generating methane gas

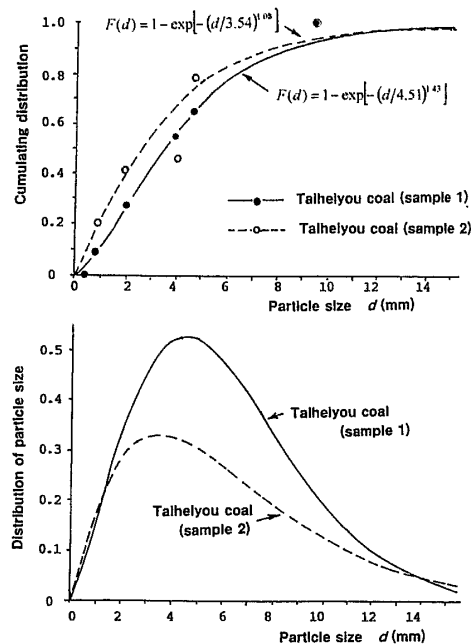


Fig. 2 Distribution of particle size

b) 空隙率および粒径分布

集積した石炭の空隙率および粒径分布は粉碎の状態により変わる。例えば実験に用いた太平洋炭の2試料の空隙率は18.4%と32.2%であり、計測した累積粒径重量分布とRosin-Rammler分布と仮定した粒径分布をFig. 2に示す。

(2) 実験方法

実験は次の手順にて行った。

- 鋼製の箱に石炭（太平洋炭など）を2000g程度計量して入れ、箱を密封し、電気炉に入れて加熱する。
- 目標保持温度に達した時点で、発生したガス（メタンガスが主体）を箱からガス濃度測定器（CH₄専用）により吸引し、その濃度を測定した後に、再び箱へ返還する。
- 石炭の温度をそれぞれ30°C、40°C、50°C、60°Cに保ち、5分ごとのメタンガス濃度を計測する。

2.2 メタンガス発生量の算出

(1) メタンガス発生速度

太平洋炭（試料1）を粉碎後1日、3日、7日および12日経た試料について、加熱時間とメタンガス濃度の関係をFig. 3(a)-(d)に示す。さらに、砕いた7日後の松島炭についてガス濃度の経時変化をFig. 4(a)に示す。またFig. 4(b)は試料1とは別途入手の太平洋炭（試料2）のガス濃度の時間的変化である。これらはメタンガスの累積濃度に相当し、ほぼ直線であることから、温度一定の場合にはガスの発生速度は一定であることがわかる。

(2) メタンガス発生量

実験で用いた容器内には上部空間と石炭空隙に空気・ガスが存在する。両者のガス濃度は等しいものとして、真の

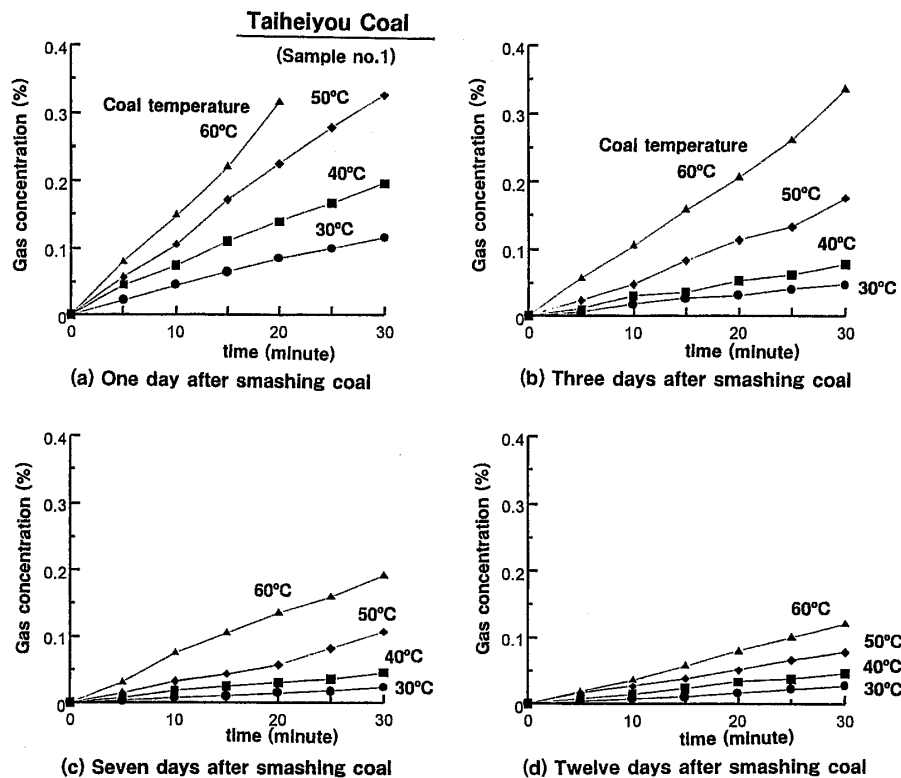


Fig. 3 Measured the concentration of generating methane gas from Taiheiyou coal (sample 1)

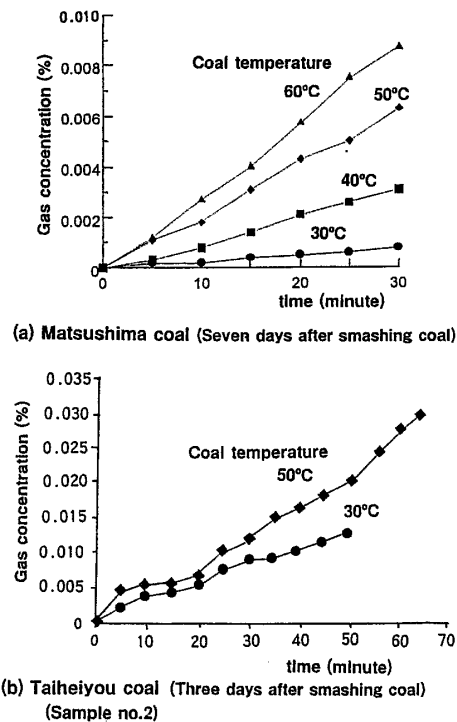


Fig. 4 Measured the concentration of generating methane gas from two kinds of coal

石炭量に対するの単位体積，単位時間当たりのメタンガス発生量を (計測ガス濃度) × (容器内気積) / (真の石炭体積) より算出した。

算出した温度とメタンガス発生量の関係を Fig. 5 に示

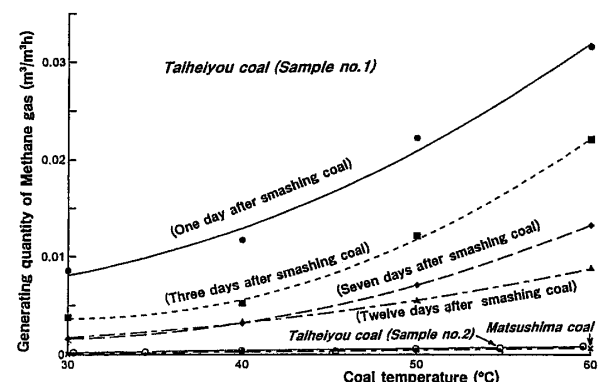


Fig. 5 Generating quantity of methane gas from two kinds of coal

すが，これよりメタンガス発生量 (m³/m³h) を温度 θ の 2 次曲線で表し，次式のように近似すると，係数 k_0, k_1, k_2 は Table 1 のようになる。

$$m = k_0 + k_1\theta + k_2\theta^2 \quad (1)$$

Fig. 6 に太平洋炭の粉碎後経過日とメタンガス発生量の関係を示すが，メタンガス発生は粉碎後に多く，時間経過と共に減少し，定常化するが，計測例では定常化まで 2 週間以上かかることが分かる。ただし，船で運搬する石炭は，一般に，これ以上の時間が経過しており，メタンガス発生は定常化しているものと考えられる。また，メタンガス発生量は炭種および粉碎や貯蔵状態により大きく異なるが，メタンガスの発生が少ない炭種は一般に時間経過によ

Table 1 Coefficients of generating methane gas

Kind of coal (days after smashing)	coefficients		
	k_0	k_1	k_2
Taihelyou (sample 1) (one day)	1.271×10^{-2}	-6.269×10^{-4}	1.580×10^{-5}
(three days)	2.337×10^{-2}	-1.295×10^{-3}	2.124×10^{-5}
(seven days)	1.081×10^{-2}	-6.540×10^{-4}	1.158×10^{-5}
(twelve days)	2.933×10^{-3}	-1.757×10^{-4}	4.545×10^{-6}
Taihelyou (sample 2) (three days)	-3.40×10^{-4}	1.60×10^{-5}	0
Matsushima (seven days)	-4.139×10^{-4}	1.373×10^{-5}	6.640×10^{-8}

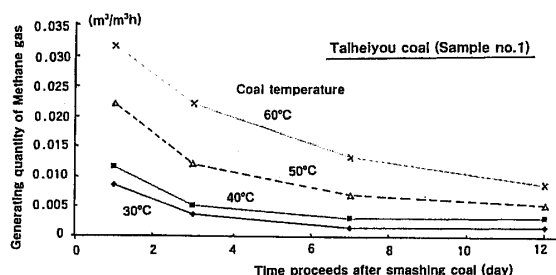


Fig.6 Generating quantity of methane gas as time proceeds after smashing coal

る変化が少ないと云われている²⁾。

3. 石炭と堆積体の物性

3.1 酸化発熱とメタンガス発生

石炭の発熱には酸化反応による化学的な発熱と石炭表面の水分吸着による吸着熱とがある。水分吸着による発熱は貯炭の状態によっては少なくない場合もあるが、一般的には吸着熱は少なく、ここでは熱源として石炭の酸化発熱と船倉周囲からの貫流熱を考える。

(1) 酸化反応速度

粉粒炭が酸化発熱する見かけの反応速度 r は近似的に次の Arrhenius の式で表現し得ることが確かめられている⁴⁾。

$$r = A_a e^{-E_a/RT} \quad (2)$$

ここに、 A_a は見かけの頻度係数、 E_a は見かけの活性化エネルギーであり、これらの値は炭種により大きく異なるが、その例を Table 2 に示す^{4)~6)}。さらに R は気体定数 (8.32 J/Kmol)、 T は絶対温度 (K) である。

石炭の酸化反応の度合いを決める内的要因としては水分含有量、石炭化度、粒径らがあり、また外的要因としては酸素濃度、温度、付着水分、堆積状態らがある。この内、船倉内の酸素濃度は酸化反応に伴い減少するが、石炭粒子の温度上昇率は酸素濃度の冪の形となるため⁷⁾、頻度係数を次の形に仮定して解析に用いる。

$$A_a = ac^n \quad (3)$$

ここに、 c は酸素濃度、 a は比例定数である。指数 n は石炭の炭素含有率 $[C]$ % により決まり、 $n=2.01-0.0156[C]$ の関係があり、 $0.4 \sim 0.8$ 程度の値になる^{6),7)}が、以下では $n=0.6$ を用いる。

Table 2 Kinetic properties of coal

Kind of coal	Rate of Heat Generation hA_a (W/m²)	Activation Energy/ R E_a/R (K)	Reference
Taihelyo (Japan)	2.51×10^3	0.520×10^4	4)
Bruceton (USA)	0.96×10^{13}	0.957×10^4	
Colorado (USA)	1.90×10^{10}	0.694×10^4	5)
Bank (Australia)	1.55×10^7	0.364×10^4	
Lithgaw (South Af.)	0.52×10^7	0.335×10^4	6)
Tatung(1) (China)	1.06×10^8	0.459×10^4	
Tatung(2) (China)	3.51×10^8	0.532×10^4	
Hon-gay (Viet-Num)	1.93×10^6	0.295×10^4	

(note) R: Gas constant

(2) 発熱と酸素消費

見かけの反応熱 h は炭種により異なり、その例を Table 2 に示す^{4)~6)}が、単位体積当たり発生する熱量は hr となる。また、 ν を燃焼の必要酸素率とすると、酸化反応により消費される酸素の量は νr となる。なお、 ν は石炭の炭素含有量により決まる。

(3) メタンガス発生

石炭からのメタンガス発生は減圧するか熱が与えられる場合に起こる。石炭倉内の圧力変化はあまり大きくないので、メタンガス発生は石炭の酸化発熱や倉内貫流熱などによる温度変化に依存するものとする。

3.2 石炭堆積体の物性値

(1) 見かけの体積比熱: $C_a \rho_a$

石炭堆積体の体積比熱は次式で表される⁴⁾。

$$C_a \rho_a = C_f \rho_f \epsilon + C_s \rho_s (1 - \epsilon) \quad (4)$$

ここに、 C_f , C_s は空気と石炭の比熱であり、それぞれ 1.0×10^3 (J/kg K), $0.84 \sim 1.67 \times 10^3$ (J/kg K) 程度の値である。また、 ρ_f , ρ_s は空気と石炭の比重であり、それぞれ 1.2 (kg/m³), $1.2 \sim 1.5 \times 10^3$ (kg/m³) である。空隙率を $\epsilon = 0.4$ とすると一般的な体積比熱の値は 1.01×10^6 (J/m³ K) 程度である。

(2) 有効熱伝導率: λ_e

堆積体内部の有効熱伝導率は石炭の種類 (固有の熱伝導率)、粒径、空隙率、温度などの影響を受け、次の流れを伴わない場合の充てん層有効熱伝導率⁸⁾より求まる。

$$\lambda_e = (\lambda_f + h_v d_p) \epsilon + \lambda_s (1 - \epsilon) / \left(\frac{2}{3} + \frac{\lambda_s}{\lambda_f \phi + h_s d_p} \right) \quad (5)$$

ここに、 d_f は石炭の粒径で、輸入炭では最大 $32 \sim 50$ mm であり、 λ_f は空気の熱伝導率 (0.026 W/mK 程度) および λ_s は石炭の熱伝導率 (輸入炭の平均 0.26 W/mK) である。また、 h_v および h_s はそれぞれ空隙間、固体表面間の放射熱伝達係数 (W/m² K) であり、石炭の熱放射率を 0.9、絶対温度を T とすると次式で求まる。

$$h_v = 0.160 \times 10^{-6} T, h_s = 0.188 \times 10^{-6} T \quad (6)$$

さらに、 ϕ は空隙間流体膜の平均厚さと粒径の比であり、 $\lambda_s/\lambda_f = 10$, $\epsilon = 0.4$ の場合には $\phi = 0.13$ となる。

有効熱伝導率には粒径の影響が大きく、 $d_p = 0 \sim 50$ mm に対し $\lambda_e = 0.09 \sim 0.25$ (W/mK) 程度の値となり、粒径が

小さいほど λ_e が小さく蓄熱が起りやすい。例えば、実験に用いた太平洋炭(試料1)について(6)式より求めた有効熱伝導率は $\lambda_e=0.30(\text{W/mK})$ である。

4. 積荷の酸化発熱と船倉内蓄熱

4.1 酸化発熱による熱的状态方程式⁹⁾

船倉に堆積された粉粒炭が酸化発熱する場合の熱拡散方程式は、堆積上表面を除いて移流の影響がほとんどないので、次のように表される。

$$C_a \rho_a \frac{\partial \theta}{\partial t} = (\lambda_e \theta_{,j})_{,j} + hac^n \cdot \exp[-E_a/R(\theta+273)] \quad (j=1, 2, 3) \quad (7)$$

ここに、 θ は粉粒炭の温度($^{\circ}\text{C}$)、 t は時間、 C_a および ρ_a は石炭堆積体の見かけの比熱と比重であり、 λ_e は堆積体の有効熱伝導率である。 C_a および λ_e は空隙率 ε により変化する。

また空隙間における酸素濃度の収支は、移流の影響がなく拡散のみ考慮すれば、次の方程式で表される。

$$\frac{\partial c}{\partial t} = (\mu_e c_{,j})_{,j} - vac^n \cdot \exp[-E_a/R(\theta+273)] \quad (j=1, 2, 3) \quad (8)$$

ここに、 μ_e は分子拡散と媒体特性により決まる空隙間の有効ガス拡散率であり、ここでは実験的な経験値を用いる³⁾⁵⁾。

4.2 石炭倉内のメタンガス発生と濃度

メタンガス濃度の収支は、次の方程式で表される。

$$\frac{\partial c_m}{\partial t} = (\mu_e c_{m,j})_{,j} + k_0^* + k_1^* \theta + k_2^* \theta^2 \quad (j=1, 2, 3) \quad (9)$$

ここに c_m はメタンガス濃度、 k_0^* 、 K_1^* 、 k_2^* は実験によって得られたメタンガス発生速度を規定する係数 k_0 、 k_1 、 k_2 (Table 1)を単位時間、単位体積あたりに換算した係数である。

4.3 石炭積層境界での熱・物質の収支

(1) 境界条件

熱的境界条件に関しては、まず船倉上面では、石炭層表面とハッチカバーまたは上甲板間に存在する空気層を介した対流と放射による熱伝達、上甲板暴露面と外気間の対流熱伝達、さらに太陽光による放射熱伝達などの複合熱伝達によって外界との熱の流入出が生じる。ここでは、ハッチカバーや上甲板の温度 θ_u を計測値などから経験的に与えて、上甲板より下部空気層による自然対流および放射熱伝達だけを考慮して、それらの総合熱伝達率 α_1 の値を求める。なお、鋼板の伝熱抵抗は他の寄与に比べて無視する。

側面での境界条件としては、上面の場合と同様、船側外板の伝熱抵抗を無視し、船側外板位置での温度 θ の石炭

層と温度 θ_s の大気または温度 θ_w の海水との間に生じる、船速による強制対流熱伝達(各々の伝達率 α_2 、 α_3)を考える。なお、喫水下の熱伝達率 α_3 は通常極めて大きな値となるため、この部分の外板温度はほぼ海水温度 θ_w に等しいと見なしてよい。

下面に関しては、上記船側外板と同様に、船底外板温度が海水温度 θ_w にほぼ等しいと考える。これにより境界条件としては、船倉底の温度 θ の石炭層と温度 θ_w の船底外板間の二重底タンク内に存在する空気層による自然対流および放射熱伝達を考慮し、その総合熱伝達率 α_4 を求める。なお、幅広浅喫水船で船側に二重構造が採用されている船型の場合には、これと同様な取り扱いにより α_4 を与える。

以上のモデル化を行うと、各境界条件はそれぞれ対応する熱伝達率 α_i ($=\alpha_1 \sim \alpha_4$)、基準温度 θ_i ($=\theta_u$ 、 θ_w)を用いて、境界の法線方向を n とすると次のように整理できる。

$$\lambda_e \frac{\partial \theta}{\partial n} - \alpha_i (\theta - \theta_i) = 0 \quad (10)$$

一方、酸素、メタンガス(以後まとめてガスと呼ぶ)などの物質移動の境界条件に関しては、側面および底面ではガスの流入出が遮断されており、一方石炭層上面ではガス濃度 c_{xs} の層表面と濃度 c_x の上部空気層との間に生じる対流による移送を考慮して、その物質伝達率 κ_D を与える。従って境界条件は、次のように表される。

$$\mu_e \frac{\partial c_x}{\partial n} - \kappa_D (c_{xs} - c_x) = 0 \quad (11)$$

上式において、左辺第1項は石炭層内部から表面へのガスの拡散量を表し、第2項は上部空間へのガス伝達強度を意味している。

上記境界面以外の断熱ならびにガス遮断面における境界条件は反射境界(すなわち各伝達率がゼロ)とする。

(2) 船倉内上部空気層のガス濃度

換気が行われている場合の船倉上部空間のガス濃度は次式で表わされる。

$$\frac{\partial c_x}{\partial t} = \frac{M_s}{(1-\beta)V} - \eta(c_x - c_0) \quad (12)$$

ここに、 M_s は船倉内上部空気層に流出入する発生ガス量、 V は船倉容積、 β は石炭の積み付け率、 η は換気回数、 c_0 は外気のガス濃度である。

5. 酸化発熱とメタンガス発生シミュレーション

石炭を運搬中の船倉における酸化発熱とそれに伴うメタンガス発生状態についてシミュレーション計算を行い、換気による船倉内環境制御とその限界について調べる。

5.1 数値解析と計算条件

数値計算は有限要素法を用いて行う。熱伝導抵抗を無視できる鋼製の横隔壁により船倉が連続していることより、船倉の縦方向の温度分布はほぼ変わらないものと仮定できる。さらに、メタンガス発生や酸素消費は酸化発熱に依存するために、船倉内の状態量は温度分布に支配されること

から、解析は船倉の横断面について行う。

(1) 石炭の物性値

石炭の物性は炭種により大きく異なるために、運搬中に問題が起きやすい仮想の炭種を下記の石炭物性の組み合わせにより想定して、運搬上の極端な例について計算する。

i) 酸化発熱：発熱が少ない炭種の代表として太平洋炭、多い炭種として南アフリカ産一般炭の物性値を用いる。

・太平洋炭（試料1）

$$C_a = 1.00 (\text{kJ/kgK}), \rho_a = 1000 (\text{kg/m}^3), \\ \lambda_e = 0.30 (\text{W/mK}), \mu_e = 6.56 \times 10^{-3} (\text{m}^2/\text{h}) \\ hA_a = 2.60 \times 10^9 (\text{W/m}^3), E_a = 0.52 \times 10^4 (\text{K})$$

・南アフリカ産一般炭

$$C_a = 1.00 (\text{KJ/kg K}), \rho_a = 860 (\text{kg/m}^3), \\ \lambda_e = 0.25 (\text{W/mK}), \mu_e = 6.48 \times 10^{-3} (\text{m}^2/\text{hr}) \\ hA_a = 5.20 \times 10^7 (\text{W/m}^3), E_a = 3.35 \times 10^4 (\text{K})$$

ii) メタンガス発生：発生が多い炭種の代表として太平洋炭（試料1）、比較的少ない炭種として太平洋炭（試料2）を選び、次の発生係数を用いる。なお、試料2のメタンガス発生は試料1に比べ少ないが、新生代の石炭のために石炭種全体では少ない方ではない。

・太平洋炭（試料1）

$$k_0 = 2.93 \times 10^{-3}, k_1 = -1.76 \times 10^{-4}, k_2 = 4.54 \times 10^{-6}$$

・太平洋炭（試料2）

$$k_0 = -3.4 \times 10^{-4}, k_1 = 1.6 \times 10^{-5}, k_2 = 0$$

(2) 船倉の計算モデルと要素分割

計算はFig. 7に示すような2次元の船倉モデル（ $B=25.0$ m）を対象とし、積付率85%とする。石炭積層の各面における熱伝達率は次の値を用いた。

$$\alpha_1 = 7.12 (\text{W/m}^2\text{K}), \alpha_2 = 10.47 (\text{W/m}^2\text{K}), \\ \alpha_3 = 4610 (\text{W/m}^2\text{K}), \alpha_4 = 4.06 (\text{W/m}^2\text{K}) \\ \kappa_D = 9.00 (\text{m/h})$$

Fig. 8(a)に計算に用いたメッシュ分割を示す。なお、図中の番号1～6は数値シミュレーション上の観測点である。

(3) 石炭運搬の状態

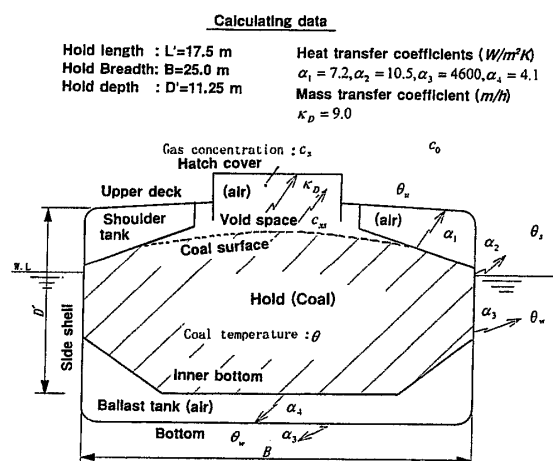
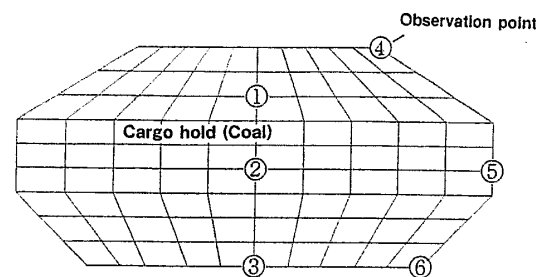
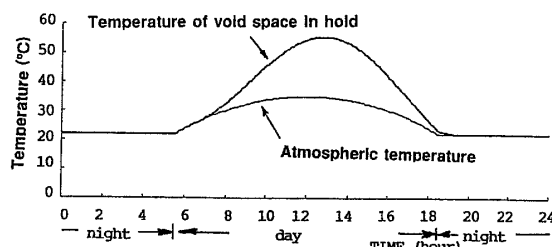


Fig. 7 Cargo hold model and calculating data



(a) Mesh subdivision for hold model



(b) Variation of Atmospheric and hold temperatures

Fig. 8 Calculating hold model and condition of temperature

航走の天候条件は、晴れ（日射有り）、気温は最高35°C、最低22°Cの日較差による変化あり、水温は20°C（一定）として計算した。また船倉内の石炭上部空気層の温度は航海記録²⁾などにより最高56°C、最低22°Cとした。外気の酸素濃度は21%、メタンガス濃度は0%とする。Fig. 8(b)に仮定した一日における温度変化を示す¹⁰⁾。

また換気は通風筒（マッシュルーム型、450 mm 径、給気2本×排気2本）による自然換気とし、船速（14.5 ノット）に対する通気量¹¹⁾は換気回数にして3.5回/時程度であるが、石炭の酸化発熱抑制を考慮してその20%程度の0.7回/時とした。メタンガスの爆発下限濃度は5.0%なので爆発許容濃度1.5%に達すると換気が開始され、その後0.3%を下回ると通風筒を閉鎖するものとする。実際には石炭運搬船ではメタンガス濃度の常時計測は行われていず、さらに通風筒の開閉は手動であり、ガス濃度に応じた完全な換気制御は行われていない。このため、計算例は理想的な換気制御の場合といえる。

5.2 数値シミュレーションの結果

酸化発熱の多少およびメタンガス発生の多少を組み合わせた仮想の石炭を積載した場合について、石炭倉内の温度、酸素濃度およびメタンガス濃度について数値計算を行った。なお、発熱量が少なく、メタンガス発生量が少ない場合には、輸送上問題が起こらないので省き、運搬中に問題が起きやすい極端な例を扱った。

(1) 発熱量が少なく、メタンガス発生量が多い場合 (Case L-H)

各観測点の石炭温度、酸素濃度、メタンガス濃度の時間的変化および通風筒の開閉状態をFig. 9に示す。さらに、

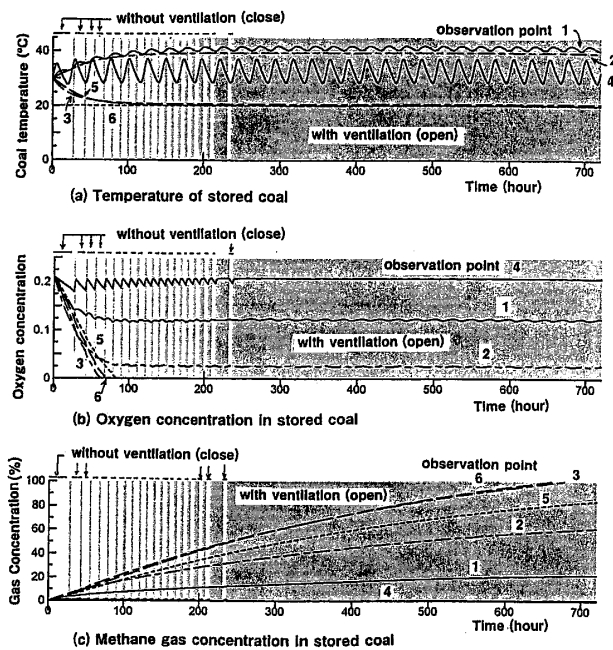


Fig. 9 Variation of coal temperature and gas concentration as time proceeds (case L-H)

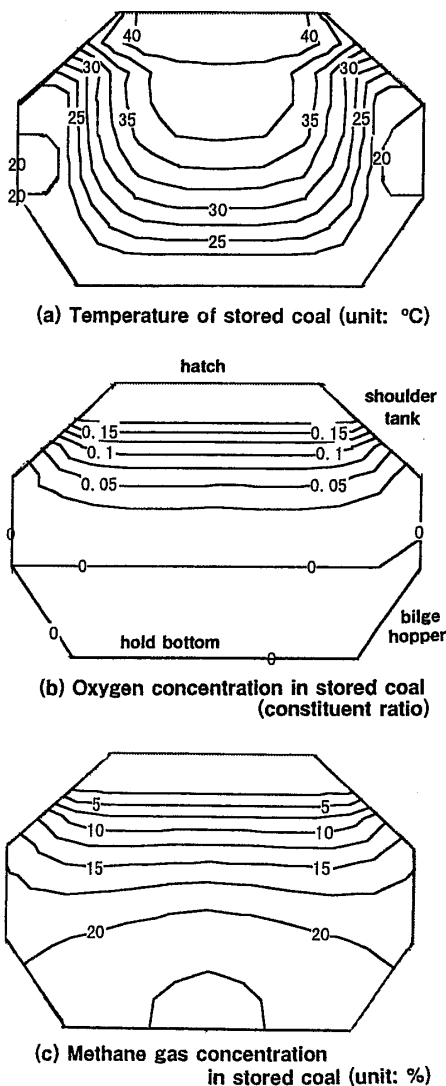


Fig. 10 Distribution of coal temperature and gas concentration at period 100 hours (case L-H)

輸送開始後 100 時間, 600 時間における船倉内の等温線および等濃度線を Fig. 10, Fig. 11 に示す。

この場合にはメタンガスの発生が多いために, 240 時間以降では通風筒が開き放なしで新気流入が多いにも拘わらずメタンガス濃度は爆発下限 (5.0%) 以上の危険域にあり, 倉内のガス濃度制御は不可となり, 運搬可能時間が制限される。また, 濃度等高線よりメタンガスは倉内上部空間に放出される以上に倉内底部に蓄積されるのが分かる。

ただし, 石炭温度はあまり上昇していないが, 観測点 1, 4 のみ気温の日較差の影響が及び, 内部まで至らないのは石炭堆積体が空隙を持つため断熱的であることによる。

(2) 発熱量が多く, メタンガス発生量が比較的小さい場合 (Case H-L)

各観測点での倉内状態量の時間的変化および通風筒開閉状態を Fig. 12 に示す。さらに, 輸送開始後 100 時間, 600 時間における船倉内の等温線および等濃度線を Fig. 13, Fig. 14 に示す。

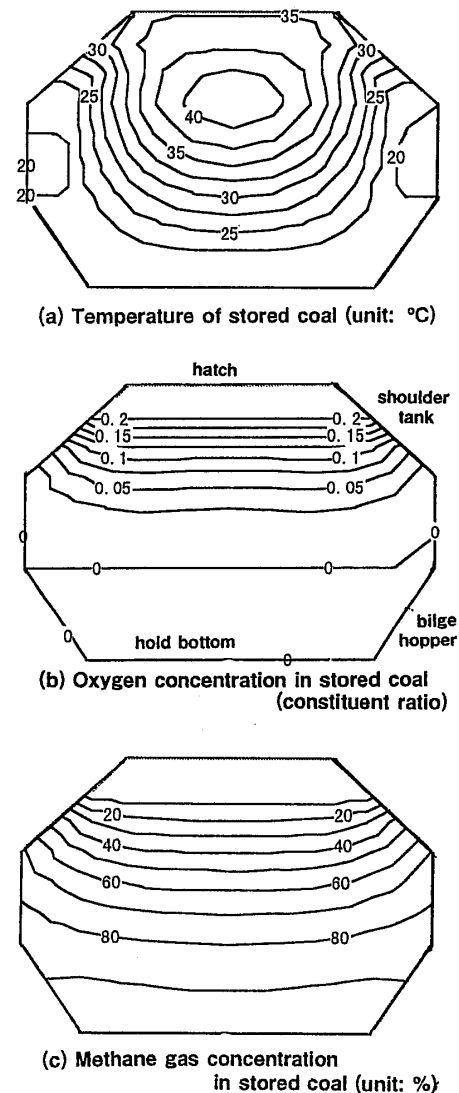


Fig. 11 Distribution of coal temperature and gas concentration at period 600 hours (case L-H)

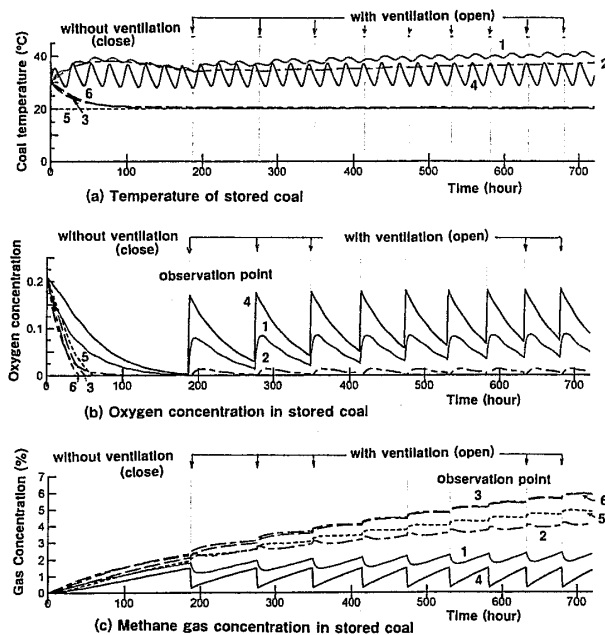


Fig. 12 Variation of coal temperature and gas concentration as time proceeds (case H-L)

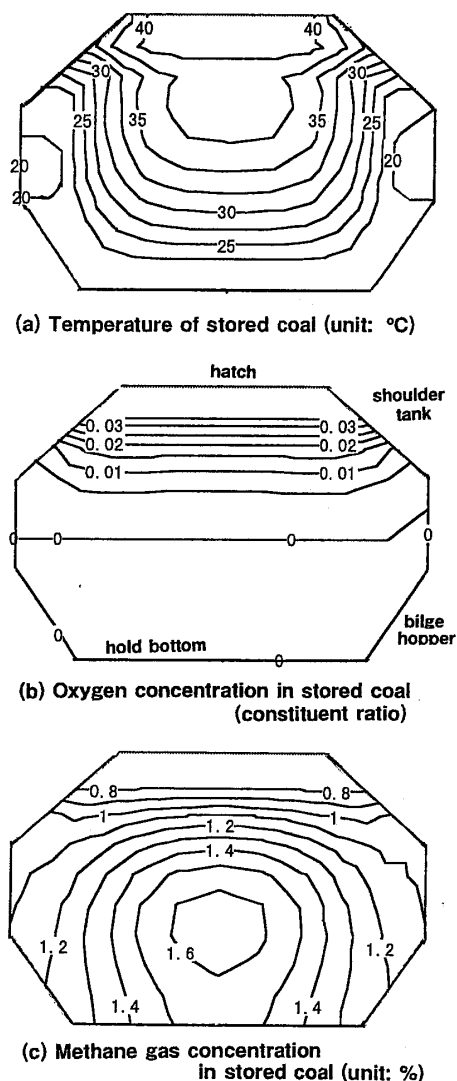


Fig. 13 Distribution of coal temperature and gas concentration at 100 hours (case H-L)

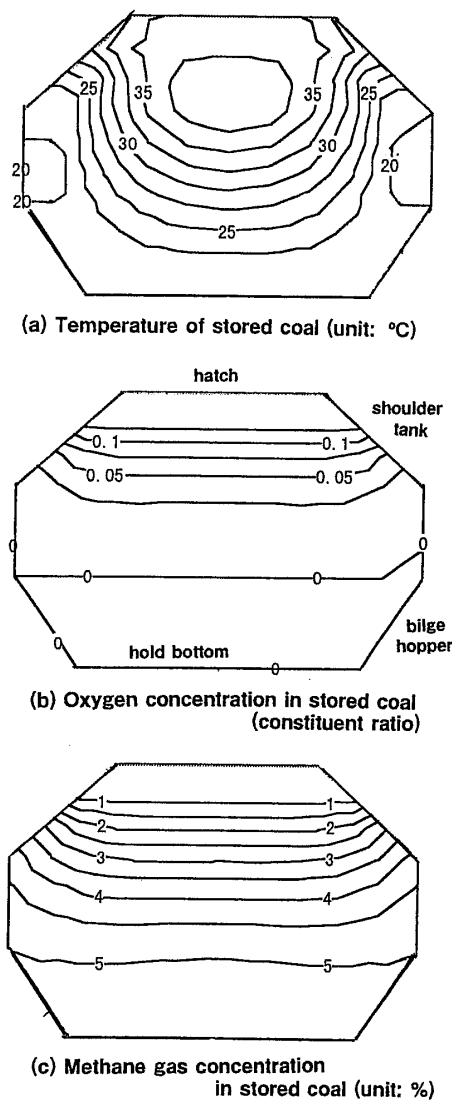


Fig. 14 Distribution of coal temperature and gas concentration at 600 hours (case H-L)

メタンガスの発生が比較的少ない場合には、通風筒の開放が少なく酸化発熱も抑制できて、ガス濃度制御は可能である。ただ、倉内底部にメタンガスがしだいに蓄積されるので、多港寄りなどで輸送時間が極めて長くなると問題が起こる場合も考えられる。

(3) 発熱量が多く、メタンガス発生量が多い場合 (Case H-H)

各観測点での倉内状態量の時間的変化および通風筒の開閉状態を Fig. 15 に示す。さらに、輸送開始後 100 時間、200 時間における船倉内の等温線および等濃度線を Fig. 16, Fig. 17 に示す。なおこの計算例では 200 時間で計算を終了しているのは、石炭温度が高くなり危険な状態になり、これ以降は問題外となる極端な例と判断したためである。

この場合には、メタンガス濃度の経時変化は(1)の場合と同じ傾向にあるが、通風筒の開放により酸化発熱が激しくなり、石炭温度が上昇するためメタンガスの発生量が増

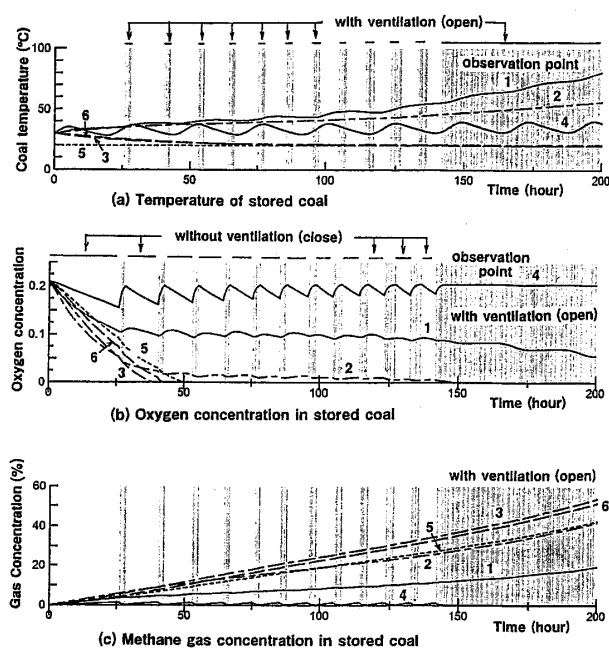


Fig. 15 Variation of coal temperature and gas concentration as time proceeds (case H-H)

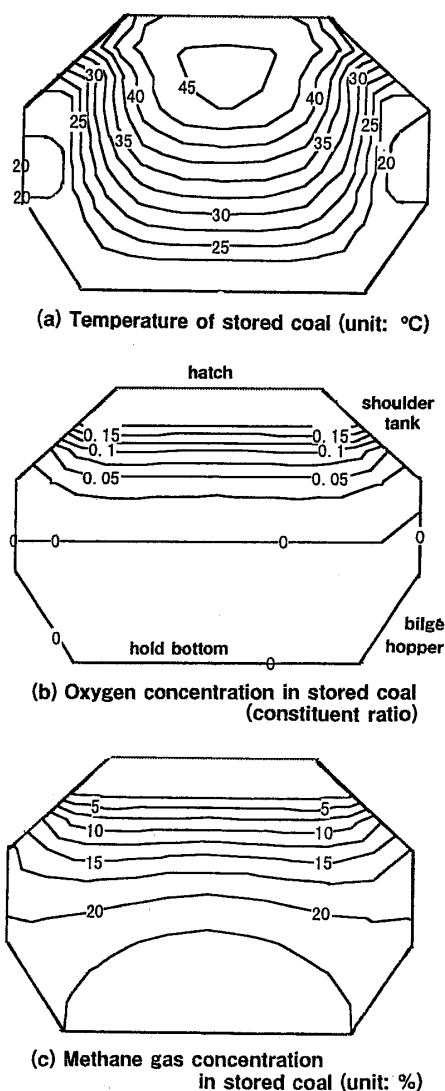


Fig. 16 Distribution of coal temperature and gas concentration at 100 hours (case H-H)

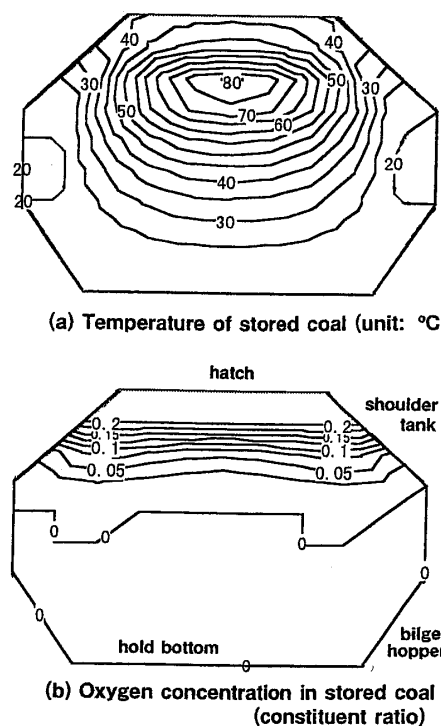


Fig. 17 Distribution of coal temperature and gas concentration at 200 hours (case H-H)

加する負のフィードバック状態となり、ガス濃度制御が不可能となる。このため、この種の石炭は極めて短期間でない限り輸送に適さない。

5.3 換気の影響

ここでは、発熱量が多く、メタンガス発生量が少ない石炭または多い石炭の場合について、換気直前と換気2、3時間後の酸素濃度およびメタンガス濃度をそれぞれ Fig. 18 および Fig. 19 に示す。

石炭倉の換気は一般に自然換気を用い、酸化発熱を促進しないように穏やかに換気を行うため、石炭積層表面から濃度勾配に比例して自然に流出するメタンガスしか排出できない。図より換気されない中心部では、換気中もメタンガス濃度が上昇する様子が分かる。また同様に、換気による酸素の供給は内部にまで達しないことが分かる。

堆積表面では換気により低い濃度に押さえられているのに対し、堆積内部ではメタンガスの濃度が高くなる一方なので、濃度勾配が大きくなり、上部へのメタンガスの拡散

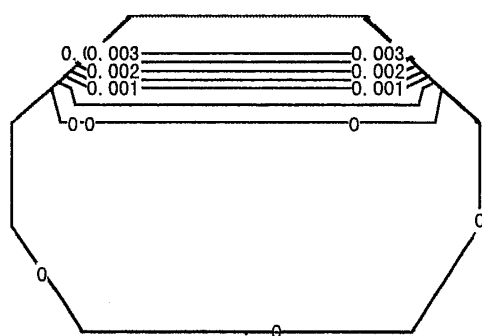
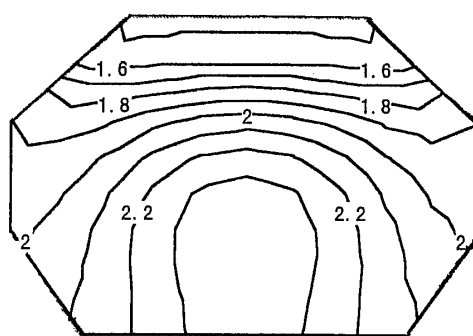
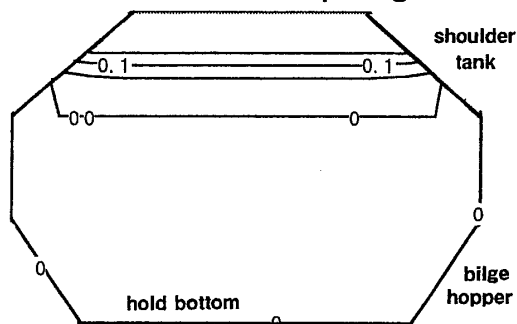
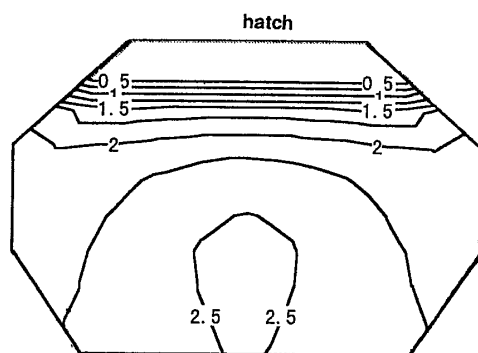
(1) Before opening ventilators (at 186.5 hours)**(a) Oxygen concentration in stored coal (constituent ratio)****(b) Methane gas concentration in stored coal (unit: %)****(2) Three hours after opening ventilators****(a) Oxygen concentration in stored coal (constituent ratio)****(b) Methane gas concentration in stored coal (unit: %)**

Fig. 18 Distribution of gas concentration before and after ventilation (case L-H)

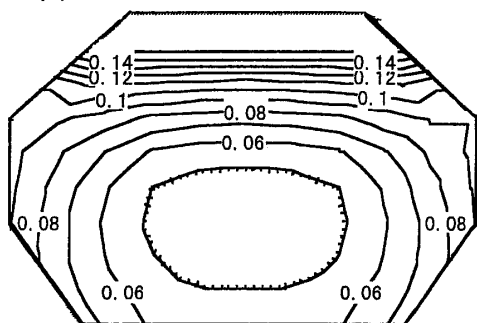
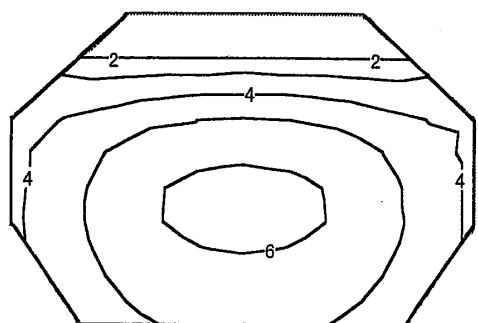
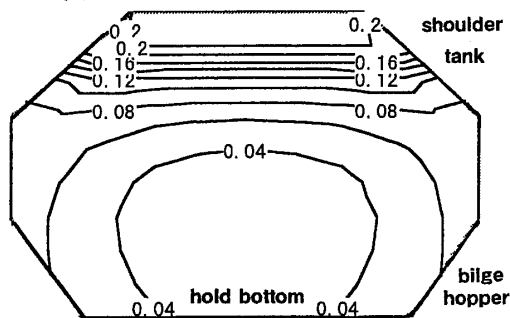
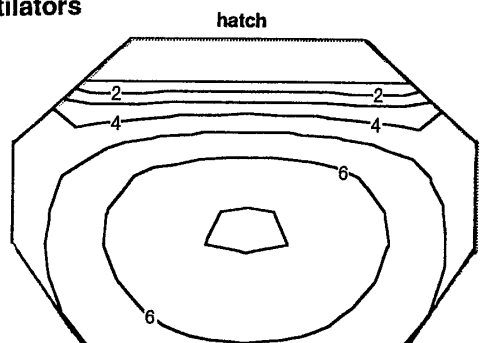
(1) Before opening ventilators (at 25.5 hours)**(a) Oxygen concentration in stored coal (constituent ratio)****(b) Methane gas concentration in stored coal (unit: %)****(2) Two and half hours after opening ventilators****(a) Oxygen concentration in stored coal (constituent ratio)****(b) Methane gas concentration in stored coal (unit: %)**

Fig. 19 Distribution of gas concentration before and after ventilation (case H-H)

は速くなる。このために船倉上部空間のメタンガス濃度増加の速度が早くなり、換気の間隔を時間経過に伴い短くする必要がある。

また、堆積石炭内に蓄積されたメタンガスは、港湾で荷卸しする際には一気に放出されるので、希釈に若干の時間を必要とする場合がある。

6. 結 言

電気炉で石炭を加熱することにより発生させたメタンガスの量を計測し、石炭からのガス発生の温度依存性を調べる実験を行い、この結果を用いて石炭運搬船の貨物倉におけるメタンガスの発生量を推定した。さらに、運搬中に問題が起きやすい仮定の炭種を想定した極端な例について、航海中の倉内温度、酸素濃度およびメタンガス濃度の時間的变化について数値解析を行った。これらの実験および数値シミュレーションにより以下のことが明らかになった。

- 1) 石炭からのメタンガス発生には温度依存性があり、その発生量はほぼ直線に近い温度の2次曲線で表わされる。ただ、メタンガス発生量は炭種および粉碎や貯蔵状態により大きく異なる。特に、メタンガス発生は粉碎後に多く、時間経過と共に減少し、定常化する。
- 2) 爆発危険性の回避問題では、酸化発熱よりもメタンガス発生量が支配的であり、石炭の物性により運搬可能時間が制限される。
- 3) メタンガス発生が多い石炭の運搬では、船倉の換気による危険ガス排出は石炭堆積表面付近においてしか行われず、船倉内部では時間の経過と共にメタンガスが蓄積される。蓄積ガスの放出により必要な換気間隔が次第に短くなり、倉内のガス濃度制御が難しくなる。
- 4) 港湾で荷卸しする際には、蓄積されたメタンガスが一気に放出されるので、希釈のために若干の時間を必要とする場合があり得る。

これらの結論は定性的傾向を示しているが、定量的には炭種、粒径、貯蔵状態、換気状態により変わることがある

ため、さらに多くの実験と不完全な換気制御も含めた数値シミュレーションを行い、設計に反映させることが望ましい。また、換気装置などの設計では不確定要因やあいまいな幅を見込んで行うことが必要である。

なお、本研究に当たり九州大学内野健一教授（資源工学）には有益なご教示を頂き、また、池島炭鉱（株）宮島九州男氏には石炭試料を提供頂きました。ここに記して深く感謝いたします。

参 考 文 献

- 1) フジ・テクノシステム：石炭ヤード・ハンドリング設備計画，建設の実際，(1981)。
- 2) 危険物評価委員会集積効果部会：危険物の危険性評価に関する調査研究報告書，集積効果による発熱特性に対する危険性評価の検討と解析（1987）
- 3) 菅野昭雄：石炭の海上輸送時におけるメタンの発生，採鉱と保安，vol. 13, no. 12（1968）
- 4) 伊木，樋口：常温付近における自然発火発生機構に関する研究，日本鉱業会誌，第89巻1025号，(1973)，第90巻，1033号（1974）。
- 5) Edwards, J. C. : Mathematical Modeling of Spontaneous Combustion of Coal, Selection Paper of the Metallurgical Society of AIME, no. A 83-21 (1983)。
- 6) 鬼塚，渡辺：石炭の自然発火特性，日立造船技報，第43巻，1号（1962）。
- 7) 田代，河野，朝倉：石炭の自然発火初期現象と空気中の酸素濃度との関係，日本鉱業会誌，第85巻，69号（1969）。
- 8) 国井大蔵：熱的単位操作(上)，(1976)，丸善。
- 9) 福地信義，安藤淳禎：石炭積倉内における酸化発熱と蓄熱過程について，日本造船学会論文集，第163号（1988）。
- 10) 運輸省海上技術安全局：石炭の発熱挙動に対する危険性予測に関する調査報告書，(1987)
- 11) 関西造船協会：造船設計便覧（第4版），海文堂，(1996)