

CS-59

石炭サイロの自然発熱シミュレーション

日立造船（株） 技術研究所 正会員○柳 浩敏

日立造船（株） 技術研究所 加藤 剛

1. はじめに

石炭は常温においても徐々に酸化反応・発熱し、特に大型の石炭サイロにおいては熱がにげにくいために発煙・発火の危険性が大きくなる。そのため、自然発熱・発火について検討する事が災害防止上非常に重要であり、この観点からこれまでに多くの実験的な研究がなされてきた。⁽¹⁾⁽²⁾⁽³⁾⁽⁴⁾ 当社においても様々な種類の石炭における自然発火特性について検討を行い酸化反応定数を詳細に求めている。⁽⁵⁾ しかしながら、これらの研究において空気の流れによる酸素濃度分布の影響を調べたものがなかった。その理由は、酸素濃度分布を調べるには、数値解析により空気の流れを計算する必要があり、手間がかかること、さらに、酸化反応の時間が数十日というオーダーであり、計算時間が非常に長くなることなどによるものと考えられる。

しかしながら、自然発熱は局所的な部分の発熱による温度上昇が徐々に拡大し、温度が高くなるにしたがってさらに酸化反応が加速されるという現象であり、部分的な酸素の供給により反応量が決まる。それゆえ酸素濃度分布を考慮した発熱の検討が非常に重要である。また、空気の流れを完全に遮断することができれば酸化反応・発熱の可能性はなくなるが、実際の装置では空気を完全に遮断することは出来ないため、空気の流れを含んだ自然発熱の検討を行うことは装置設計上有意義である。

そこで、本研究においては空気の流れを含んだ石炭の自然発熱・発火解析技術を確立したのでその内容を以下に報告する。

2. 簡易解析法による検討

石炭サイロの自然発熱・発火特性の概要を把握するため、図1に示すような一次元モデルについて検討を行った。検討に使用する基礎式は、アレニウス型の反応式を用いた熱の収支方程式と酸素濃度の収支方程式を用いる。

<非常定熱収支方程式>

$$\varepsilon \rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = Q \left(\frac{C}{C_0} \right)^n \cdot f_0 \cdot \exp \left(-\frac{E}{RT} \right) + \rho_{air} C_{p,air} \frac{Q_{in}}{V} (T_0 - T) \quad -(1)$$

<酸素濃度収支方程式>

$$\varepsilon \frac{\partial C}{\partial t} = - \left(\frac{C}{C_0} \right)^n \cdot f_0 \cdot \exp \left(-\frac{E}{RT} \right) + \frac{Q_{in}}{V} (C_0 - C) \quad -(2)$$

(1),(2)式をある与えられる初期条件のもとに時間進行法にて解析を行う。

手法としては Runge-Kutta-Gill 法を用いた。

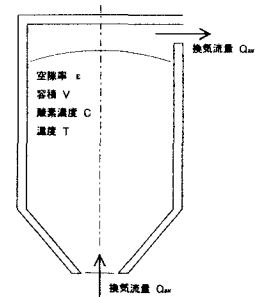


図-1 一次元解析モデル

図2に換気量 $QV(=Q_{in}/V)$ をパラメータに石炭サイロ内の昇温過程を解析した一例を示す。横軸は経過時間で縦軸は温度である。換気量が多い時には酸化反応熱が空気の流れにより外部に逃げていくことが出来るが、換気量を少なくしていくと徐々に昇温されやすくなる。さらに換気量を少なくすると、酸素量が不足してくるので、昇温のされかたが逆に遅くなる。また、石炭の温度が高くなるにしたがって昇温のスピードが増加する傾向になることが判る。同じ条件における酸素濃度の変化を図3に示す。換気量が多いときにはサイロ内の酸素濃度は外気と同じであるが、換気量が少なくなるにしたがってサイロ

内酸素濃度が低下していく様子がわかる。酸化反応で発熱するのであるから当然ではあるが、急激に濃度が低下する位置は石炭の温度上昇が急激な位置と対応することが計算結果にも現われている。

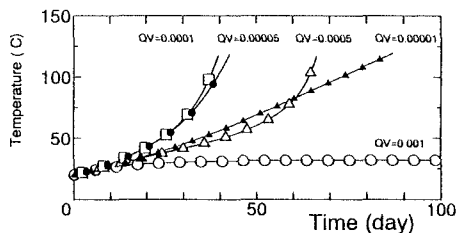


図-2 石炭サイロの温度上昇

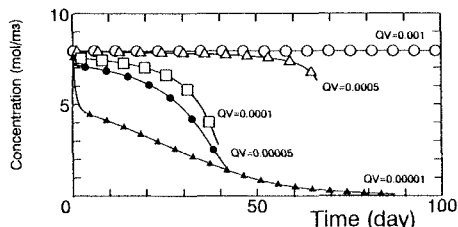


図-3 石炭サイロの酸素濃度

3. 数値解析法の確立と考察

石炭サイロ内を流れる空気と、石炭粒子層の温度解析を同時に行うために、酸化反応を考慮した数値解析法を確立した。

解析に使用する基礎方程式としては質量保存則、運動量の保存則、エネルギー保存則、拡散物質の保存則を用いる。

<質量保存則>

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} = 0 \quad (3)$$

<運動量保存則>

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + \frac{\partial u_j u_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left\{ \nu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right\} - g_i \beta \rho (T - T_0) \quad (4)$$

<エネルギー保存則>

$$\varepsilon \rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} + \varepsilon \rho C_p \frac{\partial u_j T}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} K \frac{\partial T}{\partial x_j} + Q \left(\frac{C}{C_0} \right)^n f_0 \exp \left(-\frac{E}{RT} \right) \quad (5)$$

<拡散物質保存則>

$$\varepsilon \frac{\partial C}{\partial t} + \varepsilon \frac{\partial u_j C}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} D_m \frac{\partial C}{\partial x_j} - \left(\frac{C}{C_0} \right)^n f_0 \exp \left(-\frac{E}{RT} \right) \quad (6)$$

上記の支配方程式を差分法の一つである有限体積法を用いて離散化し、数値解析により解いた。図4に解析結果の一例を示す。図のように、酸素濃度分布、空気流速、石炭・空気の温度分布が詳細に求まり、簡易解析で求められない発熱箇所の特定が可能となった。

4. まとめ

酸素濃度分布を考慮した石炭サイロ内の発熱解析手法を確立し、局所的な発熱箇所の検討が行えるようになった。この手法をさらに発展させ、穀物サイロ等の調温、調湿解析に適用したい。

<参考文献>

- 1) 宮川一郎著：「石炭の自然発火」、共立出版
- 2) 伊木正二、樋口登志：石炭の堆積体内における蓄熱過程ならびに自然発熱し得る粉炭量の計算、日本鉱業会誌 Vol.90, No.1033,(1974) p.175
- 3) 田代襄、河野信、高桑功：石炭の低温酸化と炭化度の関係について、日本鉱業会誌 Vol.84, No.954,(1968) p.219
- 4) 田代襄、河野信、高桑功：石炭の低温酸化に酸素濃度がおよぼす影響、日本鉱業会誌 Vol.84, No.954,(1968) p.217
- 5) 鬼塚聖則、渡辺高延：石炭の自然発火特性、日立造船技報、Vol.43, No.1,(1982.3) p.13

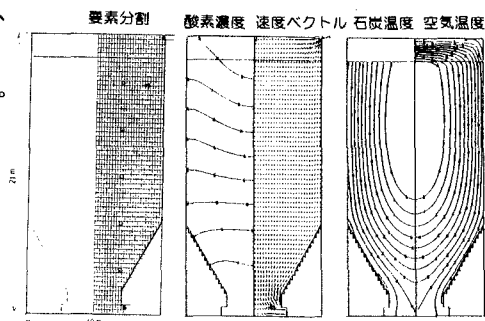


図-4 数値解析による発熱解析