

低品位炭（亜瀝青炭）の貯蔵および運搬技術

— サイロ貯炭の昇温試験とその昇温挙動の数値解析 —

Storage and Handling of Low-Rank Coal

— Experimental and Numerical Investigations into the Spontaneous Heating Behavior of Low-Rank Coal Stored in a Silo —

| | | | |
|---|---|----|--|
| 崔 | 原 | 栄 | 技術開発本部基盤技術研究所熱・流体研究部 博士（工学） |
| 大 | 森 | 大助 | IHI 運搬機械株式会社 運搬システム事業部生産統括部バルクシステム部 |
| 伊 | 藤 | 隆政 | 技術開発本部基盤技術研究所熱・流体研究部 主査 博士（工学） |
| 高 | 橋 | 克巳 | 技術開発本部基盤技術研究所応用理学研究部 主幹 工学博士 |
| 田 | 中 | 昭洋 | IHI 運搬機械株式会社 運搬システム事業部生産統括部バルクシステム部 次長 |

120 t 規模の試験機サイロに低品位炭を貯蔵し、その昇温挙動を調査する試験を実施した。石炭層の温度分布とサイロ上部の酸素濃度を計測した。貯炭中、石炭層の中央部に高温部が形成され、その最大温度は 45°C 以上に上昇した。貯蔵層に窒素を封入すると、酸素濃度が下がり、昇温が抑制されることを確認した。石炭層の酸素吸収に伴う発熱を考慮した新 CFD モデルを用いて数値解析を行った結果、石炭層の温度上昇と温度分布の経時変化を妥当に模擬することを確認した。

The spontaneous heating behavior of sub-bituminous coal stored in a 120-ton experimental silo was investigated. The temperature distribution in the coal bed and the oxygen concentration in the silo were measured. A heated zone formed in the central part of the coal bed, and its maximum temperature reached over 45°C during storage. After nitrogen entered the silo, the heating of the coal bed was suppressed due to the resultant reduction in oxygen concentration in the silo. The heating behavior was numerically analyzed using a computational fluid dynamics (CFD) model that took into account gas flow through the coal bed and heat generated by oxygen being absorbed into coal particles. The numerical temperature distribution in the coal bed was consistent with the experimental results.

1. 緒 言

国内のエネルギー源としての石炭利用割合は、2011 年度までエネルギー全体の 22%程度を占めていたが、2014 年度には 25.5%でありここ数年増加傾向となっている⁽¹⁾。一方で、従来の燃料用石炭として使用された瀝青炭（高品位炭）の価格が上がりつつあるため、安価で埋蔵量が多い亜瀝青炭や褐炭（低品位炭）を、導入することが実施または検討されている^{(2), (3)}。

低品位炭は自然発火が起こりやすい特性がある。このため、高品位炭の運用を前提とした現行の発電所に低品位炭を導入すると、石炭のハンドリング時により厳しい安全管理対策が必要と予想される⁽⁴⁾。

近年では、亜瀝青炭に近い物性をもつ瀝青炭を火力発電所で使用する場合があります。温度検知機器や水噴霧設備を完備している貯炭施設においても、自然発火による発煙や発火事例が発生している。

さらに、低品位炭は自然発火に至る期間が高品位炭に比べ短くなるため、精度の高い自然発火予測技術が求められている。IHI グループでは石炭の自然発火に関する研究を積み重ねてきたが^{(5)~(7)}、今回、低品位炭を対象にさらに検討を行った。本稿では、試験機サイロを用いた低品位炭の昇温試験結果と数値解析による石炭層の昇温予測技術について紹介する。

2. 低品位炭の特徴と自然発火反応性

2.1 低品位炭の特徴

石炭はその炭化度によって区分されるが、国によって指標は異なる。たとえばアメリカでは揮発分量によって分類するが、日本では JIS に従い発熱量と燃料比で分類される。第 1 表に石炭の分類 (JIS M 1002) を示す。発熱量の少ない亜瀝青炭や褐炭を低品位炭、発熱量の多い瀝青炭を高品位炭と称している。

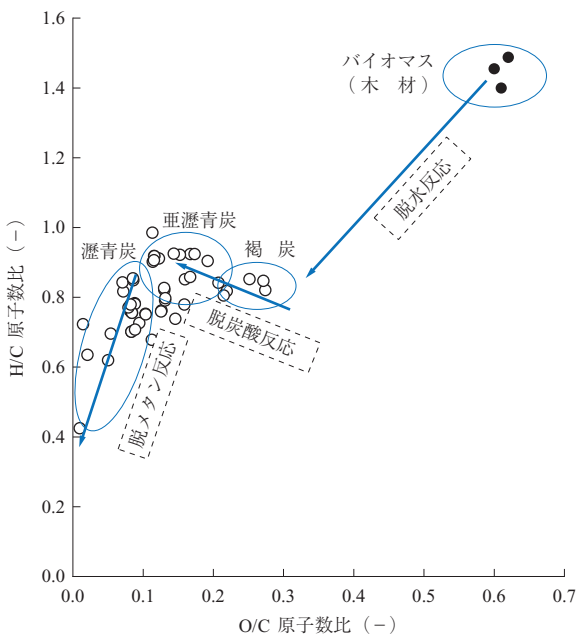
Van Krevelen のコールバンドに基づいて O/C (酸素／

第1表 石炭の分類 (JIS M 1002)
Table 1 Coal classification (JIS M 1002)

| 分類 | | 発熱量 ^{*1} (補正無水無灰基) kJ/kg { kcal/kg } | 燃料比 | 粘結性 |
|----------------|----------------|---|--------|-----|
| 炭質 | 区分 | | | |
| 無煙炭 (A) | A ₁ | - | 4.0 以上 | 非粘結 |
| | A ₂ | | | |
| 瀝青炭 (B, C) | B ₁ | 35 160 以上 { 8 400 以上 } | 1.5 以上 | 強粘結 |
| | B ₂ | | 1.5 未満 | |
| | C | 33 910 以上 35 160 未満 { 8 100 以上 8 400 未満 } | - | 粘結 |
| 亜瀝青炭 (D, E) | D | 32 650 以上 33 910 未満 { 7 800 以上 8 100 未満 } | - | 弱粘結 |
| | E | 30 560 以上 32 650 未満 { 7 300 以上 7 800 未満 } | - | 非粘結 |
| 褐炭 (F) | F ₁ | 29 470 以上 30 560 未満 { 6 800 以上 7 300 未満 } | - | 非粘結 |
| | F ₂ | 24 280 以上 29 470 未満 { 5 800 以上 6 800 未満 } | - | |

(注) *1: 発熱量 (補正無水無灰基)
= 発熱量 / (100 - 灰分補正率 × 灰分 - 水分) × 100

炭素) 原子数比, H/C (水素/炭素) 原子数比による石炭やバイオマスの分類 (Van Krevelen diagram) を第1図に示す。バイオマス (木材) が脱水反応で褐炭になり, 次に脱炭酸反応で亜瀝青炭に, さらに脱メタン反応で瀝青炭に炭化が進むことを大まかに示す。一方, 海外の数多くの産地からの石炭銘柄について分類すると, コールバンド上の値がかなり分散する。それは石炭の産地・銘柄によって石炭物性がかなり異なることを意味し, 場合によっては銘柄に応じた石炭の貯蔵・運搬技術が必要になること



第1図 H/C, O/C 原子数比による石炭とバイオマスの分類 (Van Krevelen diagram)
Fig. 1 H/C and O/C ratio for several coal and biomass specimens (Van Krevelen diagram)

を示している。

第1図に示すように, 低品位炭は高品位炭より O/C 原子数比が大きい。その由来は, -COOH, =O など酸素含有官能基が多いためである。一方, この官能基は低温での酸素との反応点となるため, 低品位炭は低温での酸化反応によって発熱し, 自然発火しやすい^{(3), (4)}。自然発火は貯蔵・運搬の安全運用に直接影響するため, 低品位炭を導入する前には貯蔵管理に関する安全対策が必要になる。

2.2 自然発火性の評価

貯蔵・運搬時の石炭自然発火の発熱の原因は, 空気中の酸素が石炭に吸着・反応する際に発生する熱である。低い温度で石炭が緩慢に酸化されるため, その現象は低温酸化反応といわれている⁽⁵⁾。

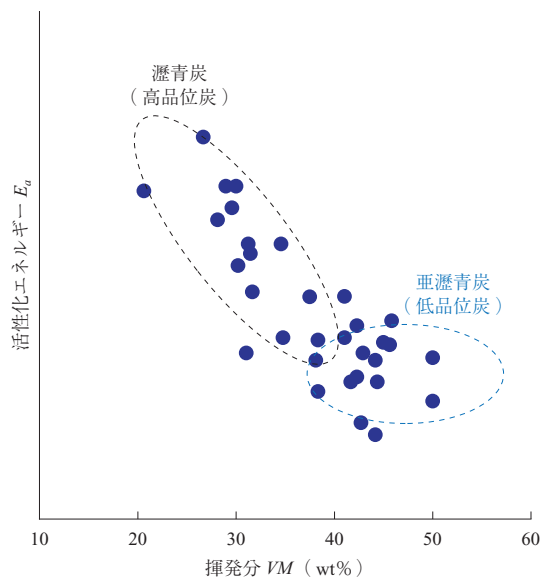
低温酸化反応速度 r は (1) 式で示すように, アレニウス型の反応速度式であり, 活性化エネルギー E_a と頻度因子項 A_c (アレニウス項) で表される。

$$r = A_c \times \exp(-E_a/RT) \dots \dots \dots (1)$$

R : 気体定数

T : 温度

IHI グループが扱った石炭の一部について, (1) 式の低温酸化反応の活性化エネルギーと石炭の揮発分の関係を第2図に示す (第1図と第2図の石炭銘柄の母集団は異なる)。高品位炭は活性化エネルギーが低品位炭より大きく, (1) 式で表される低温酸化反応速度は小さくなる。低品位炭は, 活性化エネルギーが分散しており高品位炭の



第2図 低温酸化反応の活性化エネルギーと石炭の揮発分の関係
Fig. 2 Relationship between the activation energy produced in low-temperature oxidation and the volatile matter content of various coal specimens

ように活性化エネルギーのみから比較できず、頻度因子項と合わせた検討が必要になる。

さらに、貯蔵中の石炭層の昇温には、低温酸化反応による発熱と石炭層の外部への放熱の熱バランスが影響する。反応熱量の方が大きいと石炭層の温度が上昇し、自然発火に至る⁽⁵⁾。すなわち、自然発火の昇温挙動は石炭の物性だけでなく、①石炭層の形状②貯蔵方法③空気の拡散(供給)の状況④外気温度、などにも大きく影響される。

このため、貯炭の自然発火の予測には、実際の貯蔵形式、炭種、貯炭量、貯蔵環形などを検討できる数値解析を用いないと個々の具体的事例に対応できない。

貯炭に対する自然発火の検討に当たっては、数値解析が適すると報告されており⁽⁴⁾、⁽⁵⁾、また、高品位炭(瀝青炭)を貯蔵するサイロや貯炭パイルに対しては、過去に数値解析が実施されている⁽⁵⁾、⁽⁶⁾。

今回は、自然発火性が強い低品位炭に対応するため、試験機サイロによる実証試験を行い、さらに精度の高い自然発火数値解析技術を開発した。

3. 低品位炭の昇温試験

3.1 試験機サイロ

本研究で使用した試験機サイロの外観を第3図に示す。上部と下部は円すい型で中央部は円筒型であり、一般的なサイロと類似な形状である。直径5.0m、高さ18.5mであり、石炭の貯蔵量は約120tである。

実際の貯炭サイロは上部に換気口があり、下部には石炭払出コンベヤがあるためそれぞれ開口している。このため、サイロへの空気流入は主に自然対流に依存する。そこで、試験機サイロもサイロの上下面を開放し、実機サイロの空気流入を再現するようにした。



(注) 場所: IHI 運搬機械株式会社 沼津工場内

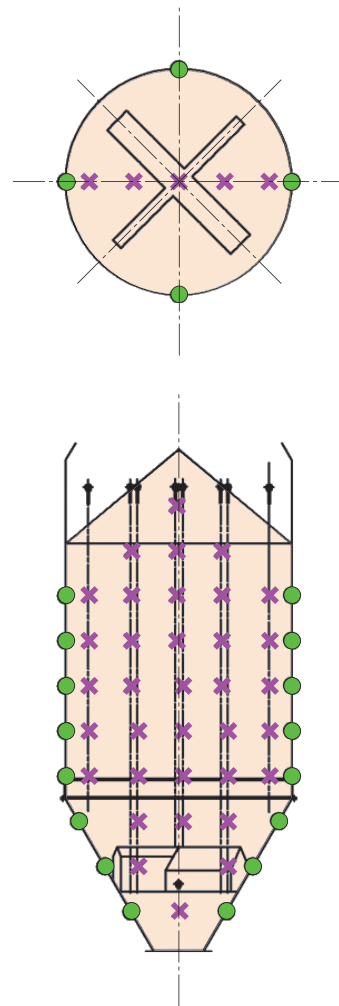
第3図 試験機サイロの外観
Fig. 3 Experimental coal storage silo

また、外部への放熱および太陽からの直射熱による影響を低減するため、試験機サイロの壁面に断熱材を施工した。

3.2 計測機器および防災設備

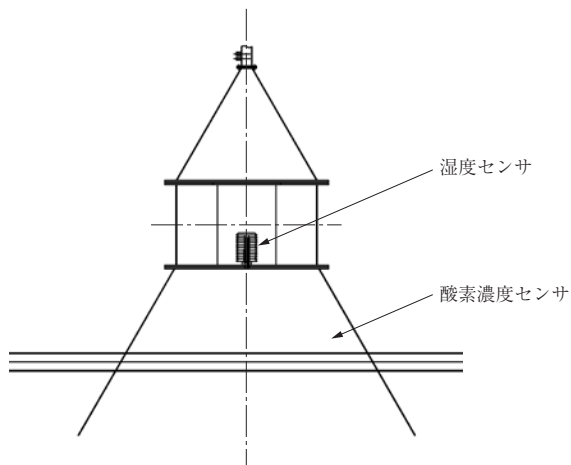
計測機器は、温度センサ(67か所)、湿度センサ(1か所)、酸素濃度センサ(1か所)が設置されている。温度センサは石炭層内部やサイロの壁面に設置され、石炭層の温度分布を測定した。湿度センサおよび酸素濃度センサは石炭層の上部空間に位置し、サイロ上部の湿度とガスの酸素濃度の変化を計測した。また、試験中の外気温度も同時に測定した。すべての計測値は実時間で記録し、経時変化を評価できるようにした。第4図に石炭層内部およびサイロ壁面の温度計測位置を、第5図にサイロ頭頂部の湿度および酸素濃度の計測位置を示す。

また、万一に備えた防災設備として、貯炭が昇温した際に、石炭層への酸素供給を遮断するための窒素封入装置を



(注) X: 石炭層内部の温度センサ
●: 壁面側の温度センサ

第4図 石炭層内部およびサイロ壁面の温度計測位置
Fig. 4 Location of temperature measurement points in the experimental silo



第 5 図 サイロ頭頂部の湿度および酸素濃度の計測位置
Fig. 5 Location of measuring equipment in the upper part of the silo

設置した。また、試験中の急激な昇温および火災発生に対応するためにサイロの上部から石炭層へ多量の水を散布する設備を設置した。

3.3 試験対象炭および試験方法

試験機サイロを用いた貯蔵試験は 2 銘柄 (A 炭と B 炭) の石炭を用いて実施した。第 2 表に貯蔵試験の対象炭種の工業分析値を示す。A 炭と B 炭の燃料比は 1.0 ~ 1.1 程度で、到着時の含水率は 25 ~ 29% 程度であり、典型的な亜瀝青炭の特徴が表れている。発熱量からはより褐炭に近い物性であることが示されている。

石炭は乾燥・粉碎・分級せず、原炭の状態 (粒径: 50 mm 以下が 90% 以上) で試験機サイロに投入した。試

第 2 表 対象炭種の工業分析値
Table 2 Proximate analysis of coal specimens

| 項目 | 基準 | 単位 | A 炭 | B 炭 |
|-------------------|------------------|---------|-------|-------|
| 水分 | 到着 ^{*1} | wt% | 25.0 | 29.1 |
| 水分 | 気乾 ^{*2} | wt% | 9.3 | 21.2 |
| 灰分 | 気乾 ^{*2} | wt% | 3.1 | 2.4 |
| 揮発分 | 気乾 ^{*2} | wt% | 42.3 | 38.3 |
| 固定炭素 | 気乾 ^{*2} | wt% | 45.3 | 38.1 |
| 燃料比 (固定炭素/揮発分) | - | - | 1.1 | 1.0 |
| 発熱量 | 無水・無灰分 | kcal/kg | 6 000 | 5 830 |

(注) *1: 炭種が到着時のままの状態
*2: 炭種が大気中に放置したままの自然乾燥状態

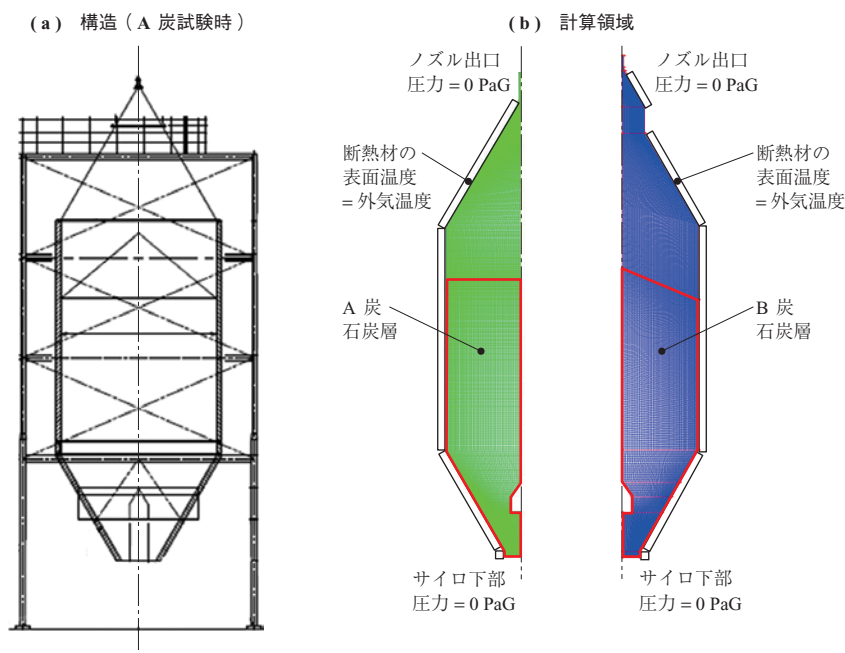
験炭の全量が投入された時点で計測を開始した。試験中、石炭層の温度をモニタリングしながら、ある管理温度に達する時点まで放置した。

管理温度に達した以降は、石炭の低温酸化反応を抑制するためサイロ内部へ窒素を供給し、サイロ内部の酸素濃度と温度変化を確認した。

4. 貯炭の昇温現象の数値解析

4.1 計算領域

第 6 図に試験機サイロの構造 (-(a)) と数値解析で用いた計算領域 (-(b)) を示す。計算領域の形状は石炭層および上部空間を含む二次元・軸対称である。石炭層の上部形状は貯蔵試験での石炭層の形状と同様に設定した。ただし、石炭 (A 炭, B 炭) の投入方法の違いのため両炭種の石炭層の上部形状は異なる。



第 6 図 試験機サイロの構造と数値解析で用いた計算領域
Fig. 6 Cross-sectional view of the experimental silo and the computational domains

自然対流によって石炭層に空気が吸い込まれる現象を模擬するため、サイロ上下の開口部には流速を与えず、圧力は常圧とした。流入空気の温度変化は試験の計測値の近似曲線から求めた値で設定した。

4.2 支配方程式

本稿の数値解析では、従来のモデル⁽⁷⁾に対して石炭層への空気流入・酸素吸収による石炭粒子の発熱・石炭の水分移動を考慮するCFD (Computational Fluid Dynamics) モデルを使用した。支配方程式を以下に記載する。

・連続方程式

$$\nabla \cdot \vec{v} = 0 \quad \dots\dots\dots (2)$$

・運動量保存式

$$\begin{aligned} \rho_f \frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + \rho_f (\vec{v} \cdot \nabla) \vec{v} \\ = -\nabla p + \mu \cdot \nabla^2 \vec{v} - \frac{\mu}{\alpha} \cdot \varepsilon \vec{v} + S_b \quad \dots\dots\dots (3) \end{aligned}$$

・化学種保存式

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho_f Y_{O_2}}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_f \vec{v} Y_{O_2}) \\ = \rho_f D_{O_2,m} \cdot \nabla^2 Y_{O_2} + S_{O_2} \quad \dots\dots\dots (4) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho_f Y_{H_2O}}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_f \vec{v} Y_{H_2O}) \\ = \rho_f D_{H_2O,m} \cdot \nabla^2 Y_{H_2O} + S_{H_2O} \quad \dots\dots\dots (5) \end{aligned}$$

・エネルギー保存式

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} \left((1-\varepsilon) \rho_s C_{p,s} + \varepsilon \rho_f C_{p,f} \right) + \varepsilon \rho_f C_{p,f} (\vec{v} \cdot \nabla T) \\ = k_{eff} (\nabla \cdot \nabla T) + H_r S_{O_2} - H_{evap} S_{H_2O} \quad \dots\dots\dots (6) \end{aligned}$$

・酸素吸収項

$$S_{O_2} = c A_c \exp\left(-\frac{E_a}{RT}\right) \quad \dots\dots\dots (7)$$

- \vec{v} : 流れのベクトル
- ∇ : ラプラスの演算子
- p : 圧力
- μ : 粘性係数
- $1/\alpha$: 石炭層の抵抗係数
- ε : 石炭層の空隙率
- S_b : 浮力項
- Y_{O_2} : 酸素の質量分率
- Y_{H_2O} : 水分の質量分率
- $D_{O_2,m}$: 酸素の拡散係数
- $D_{H_2O,m}$: 水分の拡散係数
- S_{O_2} : 酸素のソース項

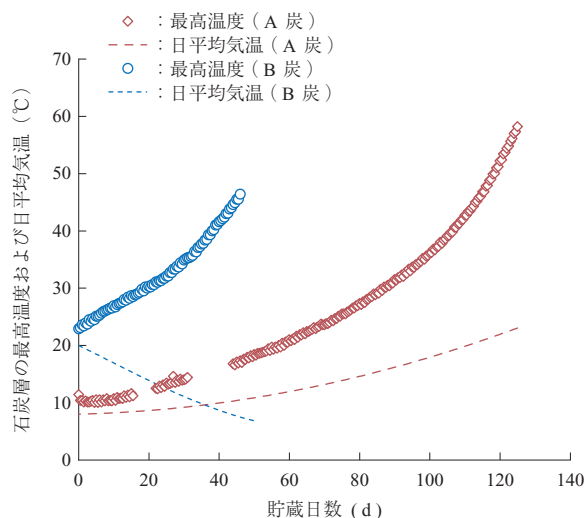
- S_{H_2O} : 水分のソース項
- H_r : 反応熱
- H_{evap} : 水分の蒸発熱
- k_{eff} : ポーラス層の有効熱伝導率
- $C_{p,f}$: 石炭層の気流の比熱
- $C_{p,s}$: 石炭の定圧比熱
- ρ_f : 石炭層の気流の密度
- ρ_s : 石炭の密度
- A_c : 低温酸化反応の頻度因子
- E_a : 低温酸化反応の活性化エネルギー
- c : 粒子径分布を考慮した装置定数
- R : 気体定数
- T : 温度
- t : 時間

酸素吸収項は別途実施の低温酸化反応試験^{(5)~(7)}から得られた反応速度式を使用した。石炭の熱伝導率と比熱は熱線法および断熱連続法を用いて別途実測した値を使用した。

5. 結果および考察

5.1 貯炭の最高温度の経時変化

貯蔵試験で計測した石炭層の最高温度の測定値および日平均外気温の経時変化を第7図に示す。各炭種の貯蔵期間はA炭が125日間で、B炭は46日間であった。最高温度は貯蔵日数に対し、指数関数的に増加する傾向が現れた。同じ貯蔵期間における最高温度および昇温速度はB炭の方がA炭より高いことが分かる。別途実施した低



第7図 石炭層の最高温度の測定値および日平均外気温の経時変化

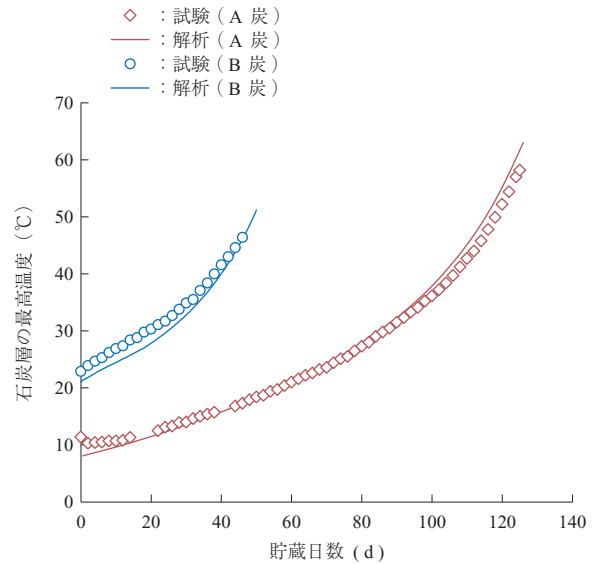
Fig. 7 Maximum coal temperature and average ambient temperature versus elapsed time

温酸化反応試験では、両炭種の酸素吸収速度は同程度であったため、貯蔵試験での昇温速度の差異は試験当時の季節による外気温度の違いに起因すると考えられる（A 炭：1 月～6 月，B 炭：11 月～12 月）。

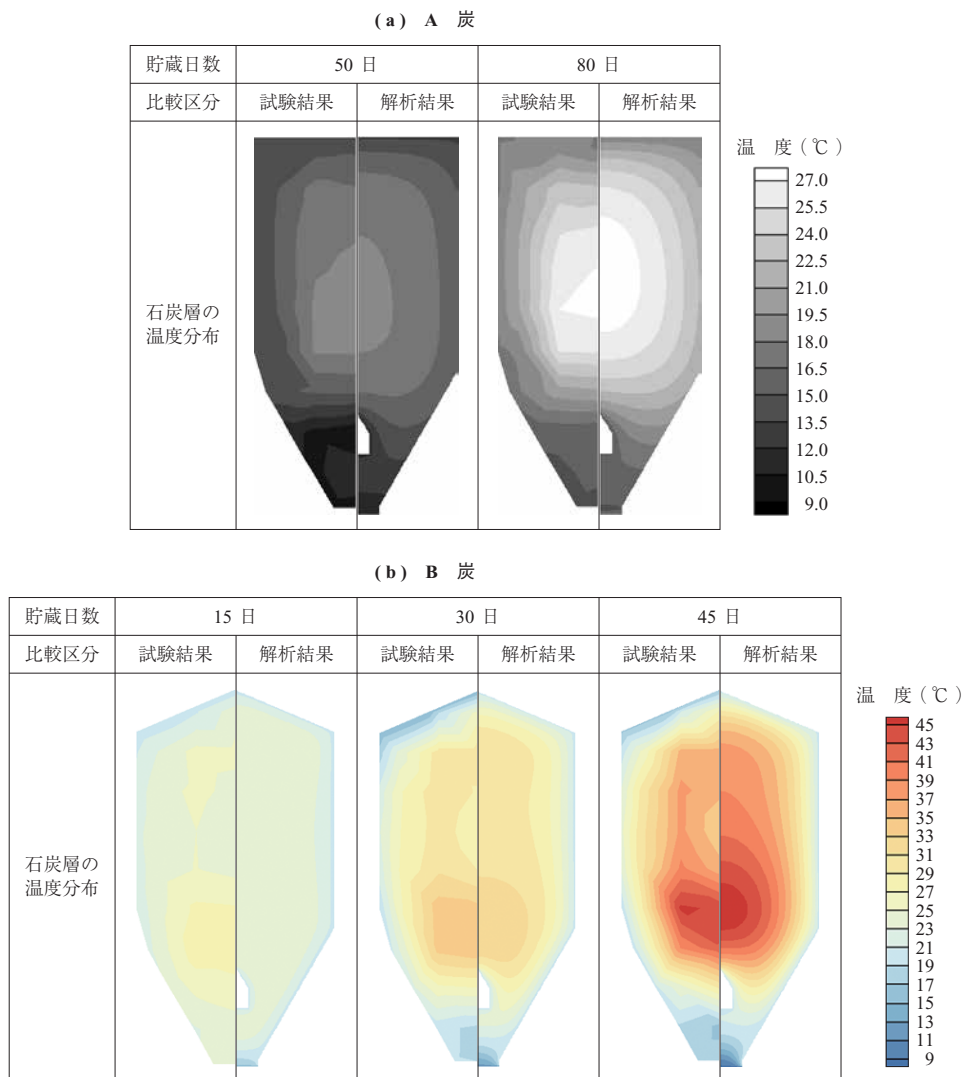
第 8 図に石炭層の最高温度の経時変化の試験結果と解析結果の比較を示す。第 7 図に示した試験機の日平均外気温度と、流入空気温度およびサイロの壁面温度を一致させながら、数値解析を行った。石炭層の最高温度の解析値の推移は貯蔵試験での測定結果と合致することが分かる。

5.2 石炭層の温度分布

貯蔵日数による石炭層の温度分布の変化について、試験結果と解析結果の比較を第 9 図に示す。石炭層の中央部に高温部が形成され、底面から高さ約 1/3 ～ 1/2 の中心軸付近に最大温度領域が位置することが分かる。石炭層の中



第 8 図 石炭層の最高温度の経時変化の試験結果と解析結果の比較
Fig. 8 Comparison of calculation with experimental results (maximum coal temperature)



第 9 図 試験結果と解析結果の比較（石炭層の温度分布）
Fig. 9 Comparison of calculation with experimental results (temperature distribution in coal bed)

中央部は壁面からの熱損失が少なく、石炭から発生した熱が逃げにくいことがその原因だと考えられる。解析結果も試験結果と同様の温度分布、温度推移の傾向が現れている。

5.3 サイロ内ガスの湿度

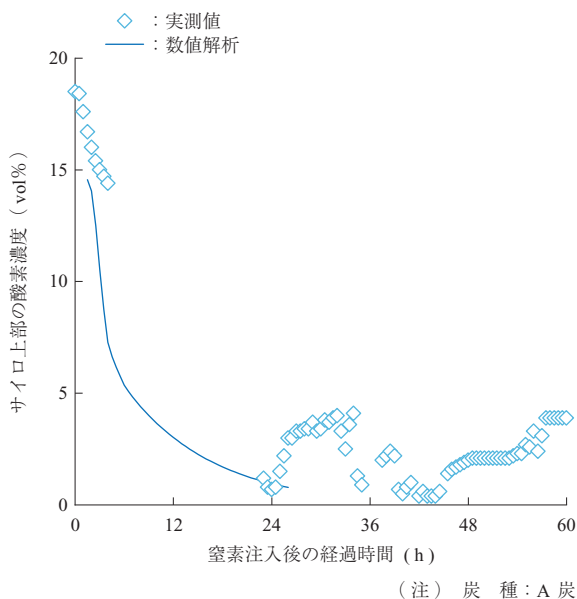
2回の貯蔵試験とも、試験中にサイロ上部で計測した相対湿度はほぼ100%であった。また、サイロ上部の壁面に多量の水滴の付着が観察された。それは、石炭に含まれていた水分が石炭の昇温に伴い蒸発し、石炭層から相対的に温度が低いサイロの上部空間で凝縮したためと考えられる。

5.4 石炭層の窒素封入

A炭の貯蔵試験の際、貯炭の最大温度が管理温度を超えた時点（貯蔵日数125日）で、サイロの下から窒素を供給し、窒素封入を行った。

窒素の導入量は、最初の4時間は384 l/minであり、その後100 l/minまで徐々に導入量を減少させた。第10図に窒素注入後のサイロ上部空間における酸素濃度の経時変化（計測器の一時的なトラブルのため、一部の区間は解析結果を表示）を示す。窒素注入から約24時間以降は、実測値で5%以下を維持した。

窒素封入中の貯炭の温度は上昇せず、石炭層の最高温度が約0.7℃/日の割合で徐々に低下した。低温酸化反応の酸素濃度依存性の検討⁽⁵⁾から石炭層の酸素濃度が5%以下になれば、反応速度が半分以下に減少することが判明している。窒素導入・封入によって石炭層の酸素濃度が短時間で5%以下になり、低温酸化反応速度が低下し、発熱が抑制されたと考えられる。



第10図 窒素注入後のサイロ上部空間における酸素濃度の経時変化
Fig. 10 Oxygen concentration in gas above the coal bed after nitrogen enters the silo

6. 結 言

貯炭試験機サイロに低品位炭（亜瀝青炭）を貯蔵し、数十日間にわたる長期間の昇温試験を実施した。石炭層の中央部に高温部が形成され、その昇温速度は外気温度に影響されることを確認した。外気温度変化も踏まえ、石炭層への空気流入・酸素吸収による石炭粒子の発熱・石炭の水分移動を考慮した数値解析から、貯炭試験の貯炭の最大温度と石炭層の温度分布の適切な再現・予測が可能になった。

自然発火制御技術として、貯炭温度が管理温度に達した時点で、サイロの下部から窒素導入を行った。24時間以内に石炭層の内部が窒素で充満され、酸素濃度が5%以下になり、石炭層の最高温度が徐々に下がった。窒素封入は比熱の点で石炭層を直接冷却する効果はほとんどないが、酸素濃度を低下させ、低温酸化反応を抑制する効果が大きいことを確認した。

今後、IHIグループでは石炭の貯蔵・運搬設備を運用するお客さまに対し、本研究成果のPR活動を実施していく。低品位炭の昇温挙動の予測に基づき、低品位炭に適合する既存設備の改善や新規貯炭設備の提案ができると期待される。

参 考 文 献

- (1) 経済産業省 資源エネルギー庁：エネルギー白書 2011～2016 2016年
- (2) 牧野尚夫, 池田道隆, 日恵井佳子, 神田英輝, 小野哲夫：微粉炭火力用燃料の多様化 電中研レビュー 第46号 2002年11月 pp. 88 - 99
- (3) U. S. Energy Information Administration : Subbituminous and bituminous coal dominate U. S. coal production (2013)
- (4) 崔 原栄, 高橋克巳, 伊藤隆政, 田中昭洋, 藤田昌弘, 大森大助：数値解析を用いたサイロに貯蔵された低品位炭の昇温挙動の予測 第53回燃焼シンポジウム講演論文集 2015年11月 pp. 116 - 117
- (5) 高橋克巳, 内田博幸, 渡辺 孝, 高橋一正：石炭の自然発火に関する研究－酸素ガスの吸収挙動と上昇温度の予測 石川島播磨技報 第23巻第5号 1983年9月 pp. 439 - 444
- (6) 中村元哉, 氣駕尚志, 高橋克巳, 鈴木幸平：石炭

の低温酸化に関する研究 石川島播磨技報 第 36
巻第 3 号 1996 年 5 月 pp. 208 - 212

(7) 高橋克巳, 布川 勇, 原 朗芳, 星井 勤: 大容
量石炭サイロの昇温予測方法に関する研究 石川
島播磨技報 第 38 巻第 4 号 1998 年 7 月 pp. 214

- 220

(8) 崔 原榮, 伊藤隆政, 高橋克巳: 石炭の低温酸化
反応性とその評価方法 第 52 回燃焼シンポジウム
講演論文集 2014 年 12 月 pp. 348 - 349