

JNC TN8410 99-046

アスファルト固化処理施設
火災爆発事故の中期的課題の対応
～充てん室内火災のシミュレーション～
(技術報告)

1999年10月

核燃料サイクル開発機構
東 海 事 業 所

本資料の全部または一部を複写・複製・転載する場合は、下記にお問い合わせ下さい。

〒 319-1194 茨城県那珂郡東海村大字村松 4-33

核燃料サイクル開発機構 東海事業所

運営管理部 技術情報室

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to:

Technical Information Section,

Administration Division,

Tokai Works,

Japan Nuclear Cycle Development Institute

4-33 Muramatsu, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken, 319-1194

Japan

© 核燃料サイクル開発機構 (Japan Nuclear Cycle Development Institute)

1999

充てん室内火災のシミュレーション

<目 次>

1. 概 要	1
2. 火災シミュレーション概要	
2.1 燃焼現象における基礎方程式	6
2.2 移動現象	7
2.3 フィールドモデル	7
2.3.1 火災現象のモデル化	7
2.3.2 建築物の火災モデル	7
2.3.3 フィールドモデルの概要	8
3. ターンテーブル上の火災	
3.1 ドラム火炎のモデル化	11
3.2 爆発後の火災による各種構造物への熱流束 ...	17
3.3 エクストルーダの表面温度	20
3.4 隣接ドラム火炎からの熱的影響の評価	24
4. 最初の火災によるコンベア上の隣接ドラムへの熱的影響	
4.1 最初の火災時の複数ドラムからのふく射強度 ...	30
4.2 28 バッチドラムの内部温度変化	31
5. 結 論	33
参考文献	35

図表リスト

1. 概 要

- 図 1-1 アスファルト固化処理施設の鳥瞰図
- 図 1-2 爆発後のアスファルト充てん室のターンテーブル付近のイメージ
- 図 1-3 爆発後のエクストルーダゾーン 8 温度の時間変化
- 図 1-4 エクストルーダゾーン 8 温度計位置
- 図 1-5 火災爆発事故の経緯の仮定
- 図 1-6 爆発後最初のドラム火災
- 図 1-7 ドラム燃焼時の昇温原因
- 図 1-8 充てん室内の位置関係(概略図)

2. 火災シミュレーション概要

- 表 2-1 代表的なフィールドモデル

3. ターンテーブル上の火災

- 図 3-1 燃焼・消火実験場と測定点概略図
- 図 3-2 燃焼開始後の火炎(定常燃焼)
- 図 3-3 燃焼・消火実験データ(気流温度)
- 図 3-4 燃焼・消火実験データ(ふく射強度、気流速度)
- 図 3-5 燃焼・消火実験 10 分後に対応した計算例
 - (a) 実験場内部空間の熱気流の速度分布
 - (b) ふく射計を含む 2 断面内における大気温度分布
 - (c) 火炎による室内壁面でのふく射強度分布
- 図 3-6 燃焼・消火実験 18 分後(最大燃焼時)に対応した計算例
 - (a) 実験場内部空間の熱気流の速度分布
 - (b) ふく射計を含む 2 断面内における大気温度分布
 - (c) 上図(b)と同様な 2 断面内におけるふく射強度分布
- 図 3-7 爆発後の充てん室内部火災計算モデル
- 図 3-8(a) エクストルーダを含む横断面内の速度分布
- 図 3-8(b) 火災を含む横断面内の温度分布
- 図 3-9(a) エクストルーダおよび隣接ドラムの表面温度

1999年10月

アスファルト固化処理施設 火災爆発事故の中長期的課題の対応 ～充てん室内火災のシミュレーション～

(技術報告)

再処理施設安全対策班
三浦 昭彦、*鈴木 美寿

要　旨

アスファルト固化処理施設火災爆発事故調査委員会において、爆発が生じた午後8時過ぎにアスファルト充てん室(R152)内において2回目の火災が起こったと結論づけられている。本報告は爆発後に発生した2回目の火災に注目し、アスファルト充てん室の火災シミュレーションを実施した結果についてまとめたものである。

火災シミュレーションを実施するため過去に行われた、燃焼・消火実験のデータを参考に充てん室モデルを作成し、気流温度・ふく射強度等を算出し、このデータを用いてエクストルーダ排出管(ゾーン8)への熱的影響および発火したドラムに隣接するドラムへの熱的影響を解析により求めた。

この結果、爆発後にはじめに発火したドラムが30バッチで充てんされたドラムであると推定した。さらに、火炎からのふく射により隣接するドラムは熱的に大きな影響を受けないため、発火したドラムは火炎により温度が上昇し熱暴走反応を引き起こしたのではなく、発火した29バッチ以降のドラムは全て高温で充てんされたものと推定できる結果を得た。

*本社 品質保証推進部

Simulation of Second Fire Incident in the Filling Room (R152)

Tokai Reprocessing Plant Safety Evaluation and Analysis Team
Akihiko Miura & *Mitsutoshi Suzuki

Abstract

Judging from several evidences which are operators' testimony, observation result, and so on, the "Committee for an Investigation into the Fire and Explosion Incident at the BDF of the Reprocessing plant of Tokai Works" concluded another fire incident occurred in the filling room (R152) after the explosion (hereafter called second fire incident). This report explains the simulation result of second fire incident.

Calculated air temperature and radiation intensity are used another calculations that indicate the thermal influence from the fire flame to the extruder or neighboring drums.

About second fire incident, calculated result indicates first fire occurred from the No.30104 drum that was produced in 30B or several drums including No.30104 drum. It is estimated that temperature and thermal runaway reaction was not due to fire of neighboring drum because the drum doesn't receive large influence thermally by radiation from the neighboring fire flame. Each result suggests the all burnt 29B and 30B drums were filled at higher temperature than usual.

*Total Quality Management Division, HEAD OFFICE

- 図 3-9(b) エクストルーダおよび隣接ドラム境界での熱流束
- 図 3-10 エクストルーダの計算モデル図と境界条件
- 図 3-11 ドラム発火 1 時間後のエクストルーダの表面温度
- 図 3-12 ドラム発火 1 時間後の熱電対插入部分の表面温度
- 図 3-13 爆発後のエクストルーダゾーン 8 热電対の記録と計算結果との比較
- 図 3-14 ふく射伝熱モデル
- 図 3-15 ふく射加熱を受けるドラムの内部温度変化
- 図 3-16 No.30101 ドラム表面上のふく射熱流束分布
- 図 3-17 隣接ドラム加熱現象の計算モデル
- 図 3-18 発火に至らない場合
- 図 3-19 発火に至った場合
- 表 3-1 ドラム火炎計算モデル

4. 最初の火災によるコンベア上の隣接ドラムへの熱的影響

- 図 4-1 充てん室内部の複数のドラム火炎からのふく射強度
- 図 4-2 最初の火災から爆発までの No.30088(A6) ドラム内温度変化

1. 概 要

本報告はアスファルト充てん室(以下充てん室)内で発生した火災を計算機によりシミュレーションした結果を示したものである。図1-1にアスファルト固化処理施設の鳥瞰図(CGイメージ)を示す。また1997年3月11日20時頃に発生した爆発事故後の充てん室の様子を図1-2に示す。図のように充てん室及びエクストルーダ室は隣接しており、爆発事故発生後には両室を隔てるシールディングウォールが吹き飛び、爆発の発生直後から充てん室とエクストルーダ室は自由流出面になっていた。

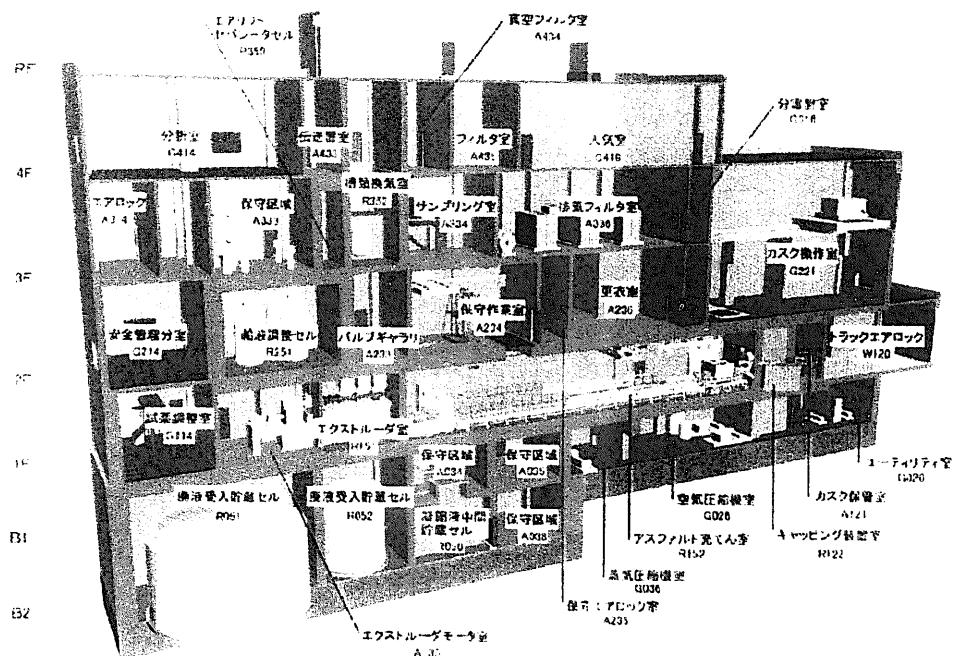


図1-1 アスファルト固化処理施設の鳥瞰図

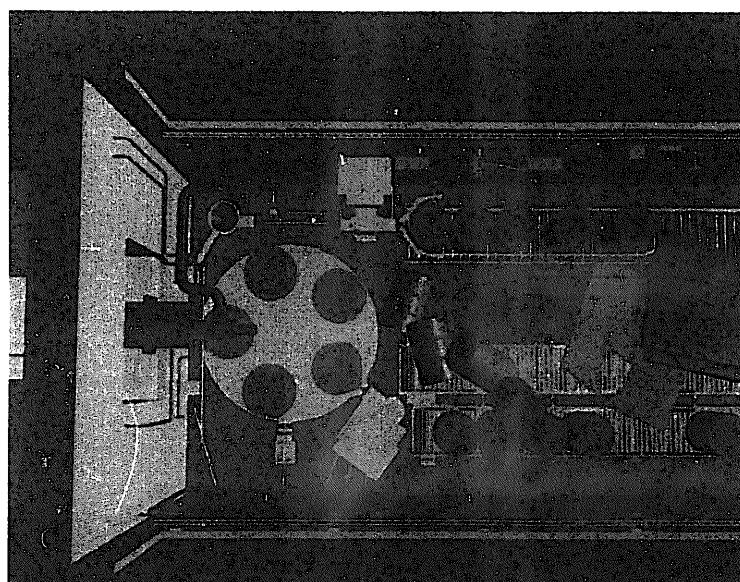


図1-2 爆発後のアスファルト充てん室のターンテーブル付近のイメージ

エクストルーダのゾーン8の熱電対(図1-4参照)は、爆発後に図1-3に示すように、400°C以上に達するような2つの大きな温度上昇の記録を残している。また、ターンテーブル上のいくつかのドラムの灰が上部に盛り上がっており、長時間燃焼していたことを示す状態になっていた。さらに、爆発後に建物外に2時間以上にわたって黒煙が排出されたこと[1]などから、爆発後にターンテーブル上のドラムが燃焼していたことが結論づけられている。

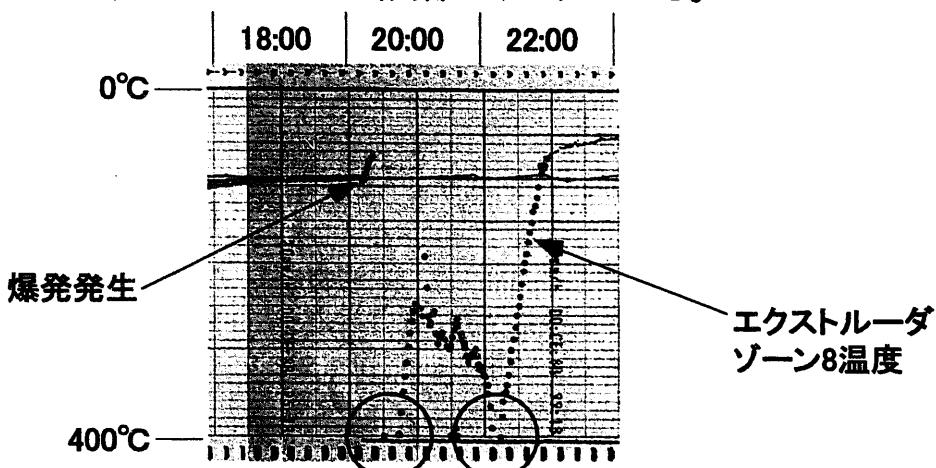


図1-3 爆発後のエクストルーダゾーン8温度の時間変化

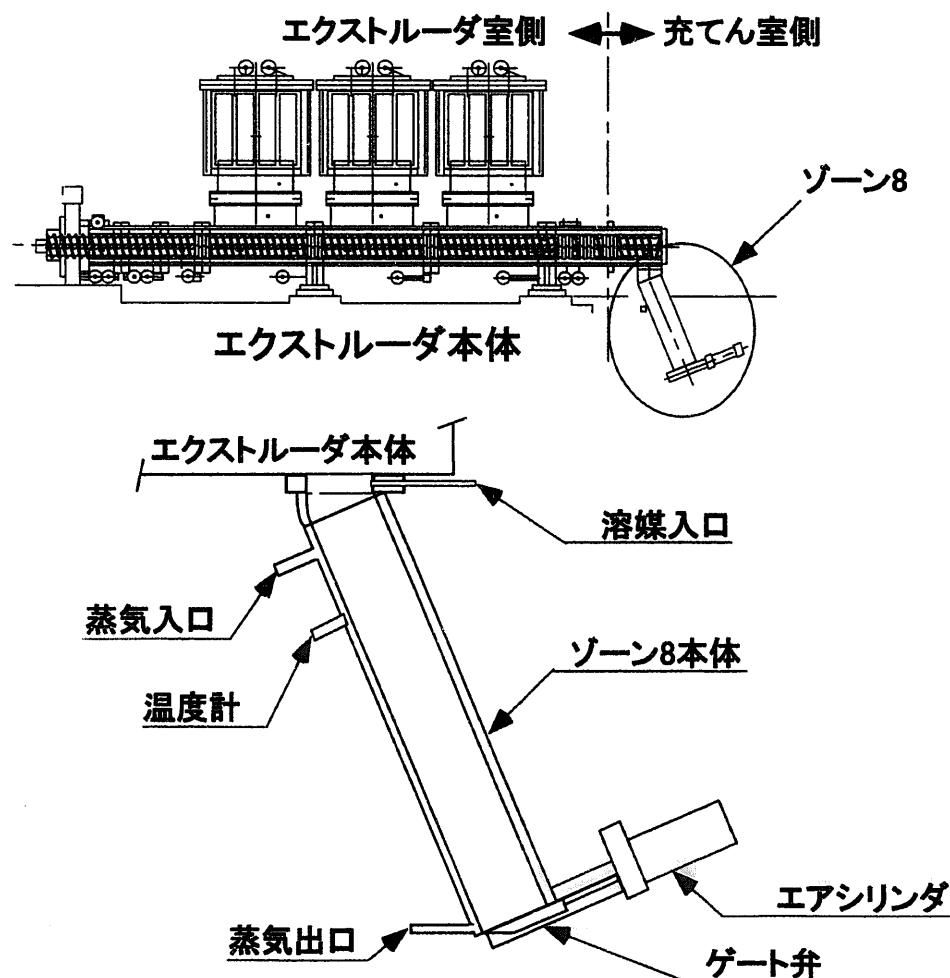


図1-4 エクストルーダゾーン8温度計位置

火災発生から爆発後に生じた火災までの経緯を図1-5に示す。本報告では、2つの大きな温度上昇記録より爆発後のターンテーブル上のドラム火災を2つの火災として分けて考え、爆発後の最初の火災がエクストルーダ及び隣接するドラムにどの程度影響するかを検討することにより、燃焼したドラムの事象進展について以下の①～⑤ように考察した。

①火災発生経緯の仮定

最初の温度上昇に相当する火災が、ターンテーブル上で唯一の29バッチで充てんされたドラムであるNo.30101ドラムから発生したと仮定する。この理由は充てんしてから最も時間が経過しており、発熱反応と蓄熱により内部温度が上昇していた可能性が高いと考えられるためである。

爆発後最初の火災時に、エクストルーダやターンテーブル上の各ドラムは図1-6に示す位置関係であった。

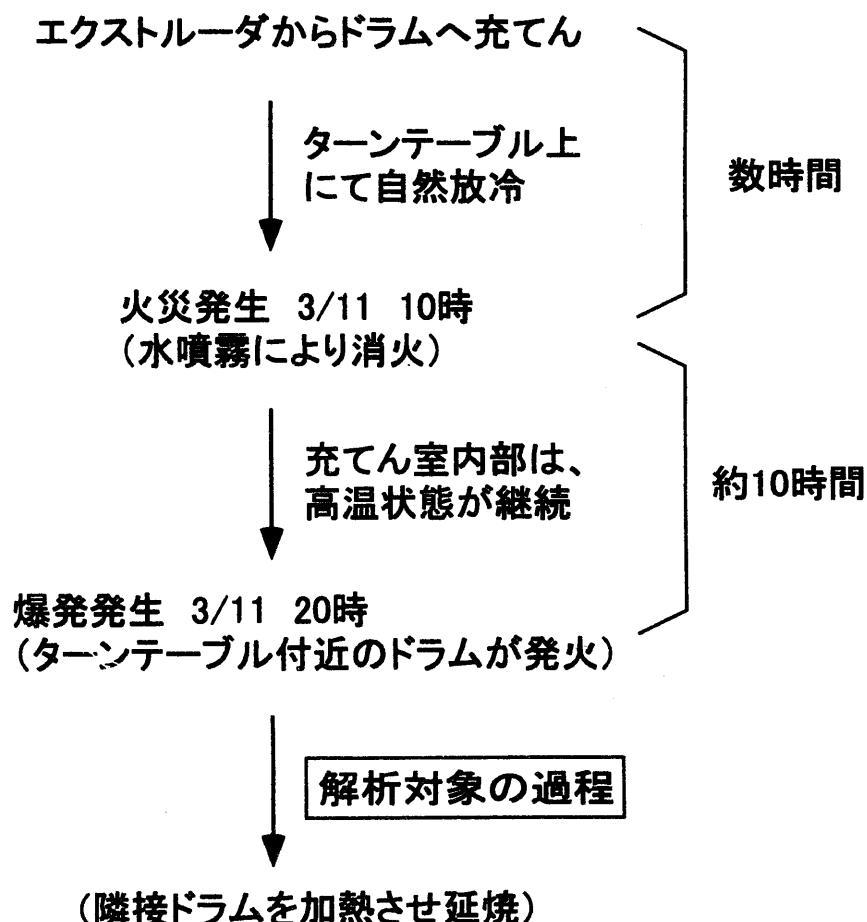


図1-5 火災爆発事故の経緯の仮定

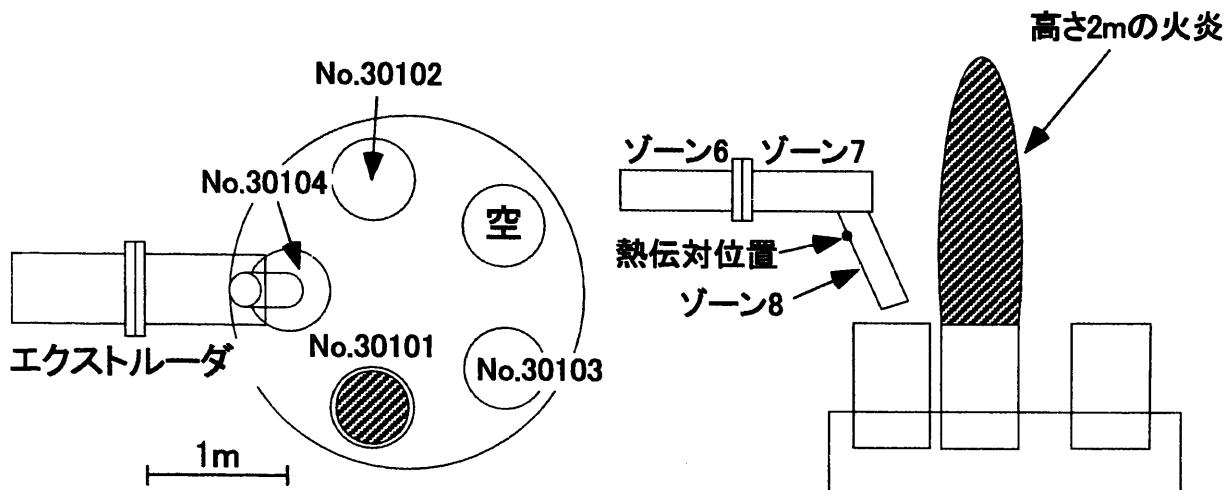


図1-6 爆発後最初のドラム火災

②室内火災シミュレーションのモデル化

一般の建築火災シミュレーションにおいては、火災の物理モデル、これを解くための数学モデル、数学モデル差分化し、数値化するための数値モデルを策定してシミュレーションを行う。さらに、実在現象との対比をとることによりその妥当性を検討する。本報告第2章では解析に使用した数学モデルについて説明する。

③ターンテーブル上の火災のシミュレーション

過去に行われた燃焼・消火実験データ[2]を基に、火災の物理モデルの検討を行う。気流温度、ふく射強度やすすの発生量等データを参考にして、ふく射伝熱モデル(熱伝導、対流、ふく射)の最適化を行いモデル化した。

④エクストルーダ表面温度の算出

唯一の29バッチドラムであるNo.30101ドラムが最初に発火した場合に、この火炎によりゾーン8での温度上昇が再現されるか否かを作成した物理モデルにより検討する。火災シミュレーションの結果からエクストルーダゾーン8表面へ与えられるエネルギーの大きさがわかる。このエネルギーを初期条件に、エクストルーダの熱電対付近の温度上昇を有限要素法による熱解析によって求める。

⑤隣接ドラムへの熱的影響の評価

燃焼するドラムが隣接するドラムへ与える伝熱のメカニズムとしては、図1-7に示すようなNo.30101ドラム火炎からのふく射加熱および対流・伝導伝熱である。発火するまで昇温する際の温度上昇に対するふく射、対流・伝導伝熱の効

果を計算によって調べ、隣接ドラムが発火するドラムの初期温度(充てん温度)を算出する。

さらに、同様の手法にて図1-8に示すようなコンベア上の火災による28バッチドラムへの熱的影響についても検討する。

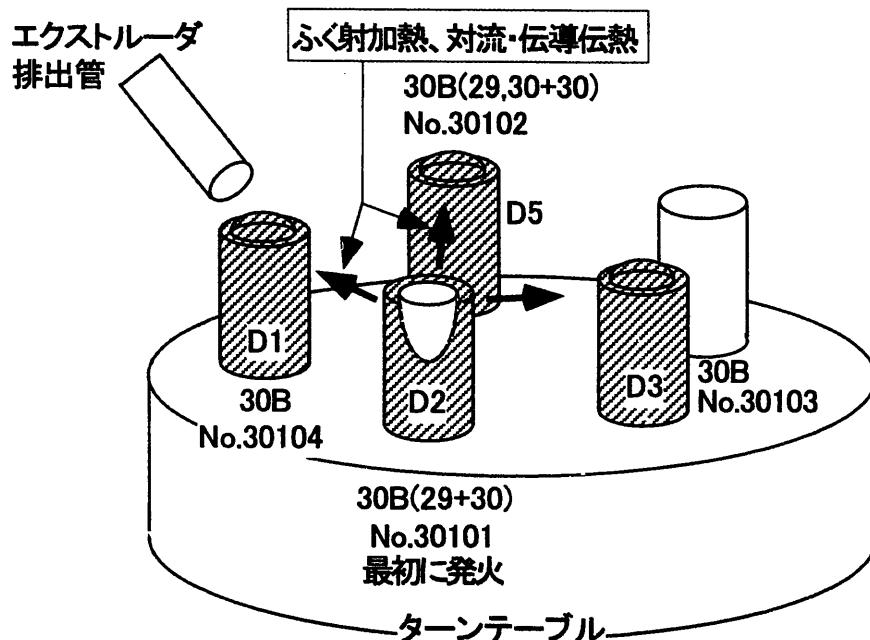


図1-7 ドラム燃焼時の昇温原因

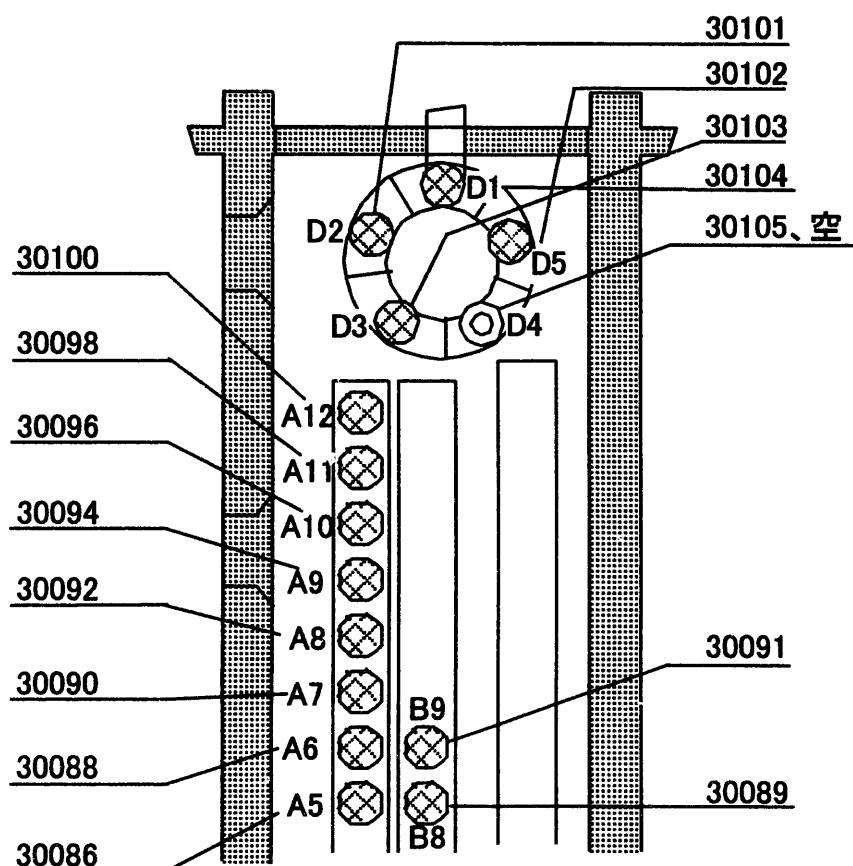


図1-8 充てん室内的ドラムの位置関係
(概略図)

2. 火災シミュレーション概要

火災を解析する際には、実在現象に対する「物理モデル」、この物理モデルを計算機により解析するための「数学モデル」、数学モデルを計算機言語に置き換えるため「数値モデル」を順次作成する必要がある。本章ではまず通常の火災解析において使用される物理系の基礎方程式について2.1及び2.2節で概説する。本解析は流体の式を基本にした解析であり、これらに気体の状態方程式を適用している。また、火炎からのふく射はP-1モデル[3]を使用した。火災発生中の気流は非圧縮性流体として扱い、ブジネスク近似は採用しなかった。乱流モデルにはk- ϵ モデルを使用し、各境界メッシュにおける確率過程はマルコフ過程として扱っている。さらに温度・速度において自己無着な場を仮定した。火災は非線形現象であるため、数学モデルの差異によって、計算結果が異なるという現象が起こり得る。本章の後半では、本火災解析を実施する際に使用した数学モデルについて概説する。

2.1 燃焼現象における基礎方程式[4]

通常の流体力学における基礎方程式では未知数として、密度 ρ 、速度 \mathbf{v} (3成分)、温度 T 、圧力 P の6個があり、これに対して

- 1) 質量保存の式
- 2) 運動量保存の式
- 3) エネルギー保存の式
- 4) 状態方程式

の方程式が与えられてそれぞれの未知数が決定されるのに対し、燃焼現象では、多くの化学種が関与するため新たに化学種の濃度(質量分率)という未知数が加わる。この濃度は、

- 5) 各化学種の質量に関する保存式

が与えられて、決定することができるが、この保存式の中には、各化学種の拡散速度、各化学種のモル分率の物理化学量が関与してくるため、さらに

- 5-1) 拡散速度に関する式
- 5-2) モル分率と質量分率との関係式

の方程式が必要となる。1)~4)、5)~5-2)を解くと、燃焼場における速度場、温度場、濃度場が決定されることになる。ただし、5)式で

6) 各化学種の生成濃度を表す式

が明確に与えられなければならないほか、3)のエネルギー保存の式では、反応による発熱・吸熱の項や熱伝導や拡散、ふく射などによるエネルギー輸送項が加わるため、反応のない場合のエネルギー保存式に比べ非常に複雑となる。

2.2 移動現象[4]

火災による損害の大部分は、火災によって発生する熱・煙が空間的に移動・拡大することに伴って発生する。移動現象の数量的モデル化の方法論は、移動現象を扱う場に注目して移動の空間的パターンを把握しようとする方法と、移動する物質・物性などのゆくえを経時的に追跡していく方法の2通りに大別される。このような視点の違いは流体力学モデルによって決定され、前者をオイラー型モデル、後者をラグランジュ型モデルとよんでいる。オイラー型モデルとラグランジュ型モデルでは、現象の観察の仕方の違いが計算結果等の表現の仕方にも反映されてくるが、適用対象も、保存則(質量保存則等)が移動現象の様態を強く支配する場合(流体など)はどちらかといえばオイラー型モデルのほうが適用しやすく、保存則を強く意識しないですむ場合はラグランジュ型モデルが威力を発揮することが多い。

2.3 フィールドモデル

2.3.1 火災現象のモデル化

実在の火災現象を解析するためには、小規模実験や、実大模型実験を繰り返し行い、その性質を描き出し抽象化して「物理モデル」を作る。この「物理モデル」によって火災の現象を直感的・定性的に把握することができる。定量的な結果を得るには、さらに抽象化と近似を与え、「数学モデル」を作成する。ほとんどの「数学モデル」は非線形方程式のため、直接定量的な結果を導くのは難しい。そこで、数値計算用アルゴリズムを考え、コンピュータの性能等を考慮に入れて、数値解析用のスキームを確立し、数値計算用の方程式を導くこととなる。

2.3.2 建築物の火災モデル

火災モデル化に関しては、火災データを統計学の見地から、建築物の火災危険度評価を目的に研究された「推計学的研究」による「統計モデル」と、熱

物理学・熱化学理論と流体力学等の理論に基づき、理論的解析や実験的解析から基礎支配法則を確立する「決定論的研究」による「数学モデル」がある。数学モデルは大別して三つのモデルがある。その一つは「経験モデル」と呼ばれ、物理化学と流体力学の基礎理論を用いて、実験結果を解析し、実験式を導入して火災現象を表現しシミュレーションする方法である。二つめのモデルは「ゾーンモデル」と呼ばれている。このモデルは火災現象を性質の異なった部分(ゾーン)に分け、各ゾーンを表現する物理化学パラメータを平均値で代表する。そして、パラメータを質量保存法則、エネルギー保存法則を用い、各ゾーン間の関係を非線形非定常連立常微分方程式と代数方程式で表現するモデルである。最後のモデルは火災現象をすべての地点で時々刻々と変化する現象を質量保存則・運動量保存則・エネルギー保存則を用いて非線形非定常連立偏微分程式で表現した「フィールドモデル」である。

2.3.3 フィールドモデルの概要

CFD(Computational Fluid Dynamics)とは、流れの支配方程式を数値的に解いて、流れ現象を再現しようとするものであり、流れの数値シミュレーション、数値流体力学等とも呼ばれる。火災研究の分野では、CFDをフィールドモデルと呼ぶことが一般的である。

CFDでは、実際の流れ現象を数学的に表現することから始まる。数学的に表現されたものを流れの基礎方程式系と呼ぶが、通常はさらに乱流モデルの基礎方程式系へと書き換えられる。これらの基礎方程式系は微分表示されていて、このままでは数学的に解けないので、代数方程式系に変換されて計算が進められていく。

フィールドモデルは流体力学の分野で研究されたモデルを火災現象に応用したものである。ゾーンモデルでは建築物内を一様な性質を有する検体(壁・天井・床・煙層等)を平均値(温度・圧力・化学種濃度等)で表現したが、フィールドモデルは、建築物内のすべての位置で火災現象を表現するモデルで、非線型非定常連立偏微分方程式で表現されている。火災気流の「物理モデル」には、流体を粒子の集まり(流体粒子)として個々の粒子の振る舞いを表現したラグランジュ式記述法のリュヴィル方程式をボルツマン方程式にして表現した「ボルツマン型モデル」と、各時刻において流体を流れの場(連続体)全体の様子を見渡すオイラー式記述法で、ボルツマン方程式を2次のモーメント法を用いて表現し、ナヴィエ・ストークス方程式で表した「ナヴィエ・ストークス型モデ

ル」とがあり、この「ナヴィエ・ストークス型モデル」が火災モデルとして採用されている。火災熱気流も火災の規模や燃焼火災・有炎火災等、火災気流の性質、流動性状によって採用する数学モデルも必然的に考慮しなければならない。燃焼火災等では「層流モデル」、火災拡大期等では「乱流モデル」その他の状態では「遷移モデル」が知られている。表2-1に代表的な「ナヴィエ・ストークス型モデル」を用いた数学モデルを紹介する。

フィールドモデルの「数値モデル」では、数値計算スキームが多種多様あり、火災の規模、建築物の形状等によって計算結果に大きな差異が生じる。「数学モデル」の基礎方程式は非線形非定常連立2階偏微分方程式であるので、大きく分けて「有限差分法」、「有限要素法」、「境界要素法」の3種類がある。火災の分野では、理屈が非常にわかりやすくプログラミングもすっきりしているため「有限差分法」が主流である。この方法にはさらに数十のスキームがある。数値解析の分野では、「有限要素法」が数学的にすっきりするため、かなり研究されている。この方法も多数のスキームはある。有限差分法に比べて計算時間が長いのとプログラムのステップ数が多く、いろいろな開発ツールが必要であるという欠点があるが、数値安定性、疑似振動等の数値解析的な不利はないのが魅力的である。「境界要素法」は数値解析では比較的新しい方法で、現在コンピュータを用いた気流解析の分野では研究が盛んになされいるが、火災の分野でこの方法は発展していない。

表2-1 代表的なフィールドモデル

- (1) 直接解法モデル
- (2) 平均化解法モデル
 - (A) 時間平均化法
 - (a) 積分法
 - (i) 卷込法
 - (b) 微分法
 - (I) 乱流粘性法
 - 0-方程式法
 - (i) 混合長法
 - (ii) Cebeci-Smith model
 - 2-方程式法
 - (i) $k-\epsilon$ model
 - (II) Stress equation model
 - Bradshaw's 1-equation model
 - 3-方程式法(3-equation model)
 - (B) 空間平均化法
 - (i) Large Eddy Simulation (LES) model
 - (C) アンサンブル法

3. ターンテーブル上の火災

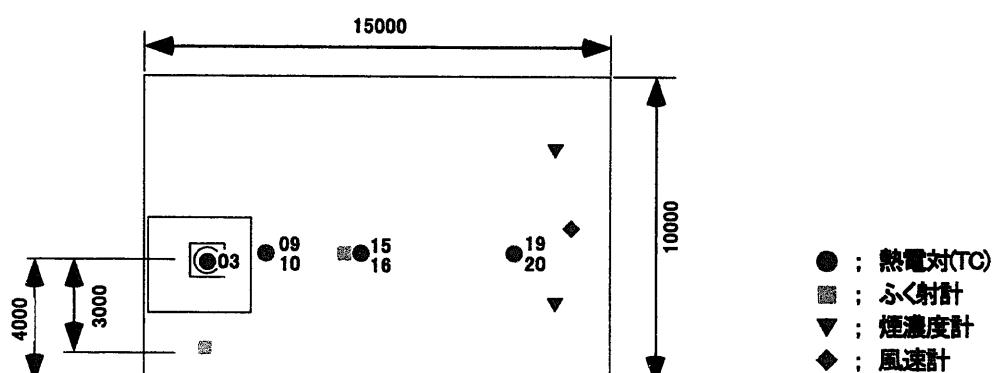
3.1 ドラム火炎のモデル化

ドラム火炎を計算でモデル化するためには、実験データが不可欠である。そこで、昭和57年に行われた模擬アスファルト固化体の燃焼・消火実験時の測定データ[2]を用いて、ドラム燃焼時の火炎モデルについて検討する。

図3-1に、燃焼実験に用いられた実験場の平面図と側面図、燃焼ドラムの位置及び実験時に測定した温度、ふく射強度、速度、煙濃度の測定箇所を示した。

実験では、赤熱した鉄棒を挿入することによって着火させ、時間経過と周囲の温度上昇等を測定した。着火後、約18分後に最大燃焼で定常状態になり、その後しばらくして水噴霧により消火した。

燃焼開始後の火炎の写真を図3-2に示す。



(図中番号は、熱電対番号を表わす。)
単位は[mm]

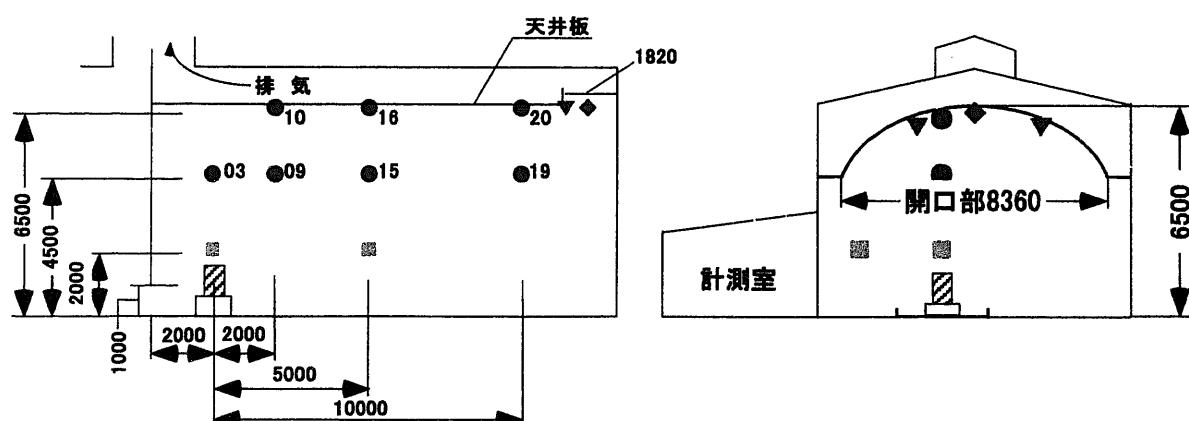


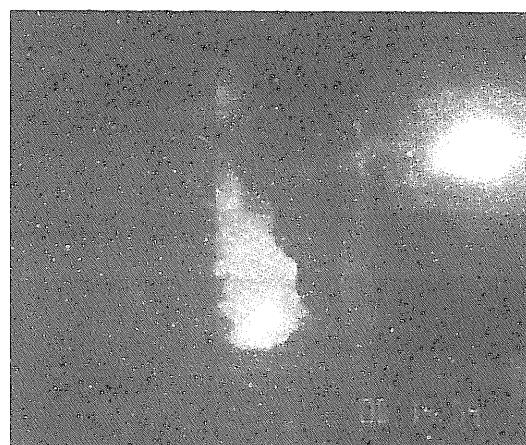
図3-1 燃焼・消火実験場と測定点概略図



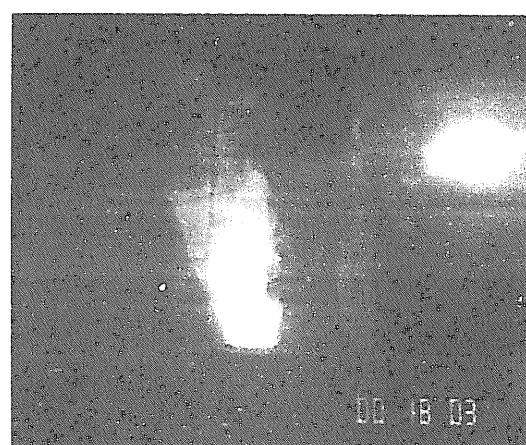
燃焼開始6分後の火炎



燃焼開始10分後の火炎



燃焼開始14分後の火炎



燃焼開始18分後の火炎
(最大燃焼時)

図3-2 燃焼開始後の火炎(定常燃焼)

図3-3及び図3-4に、燃焼・消火実験の経過時間に対する気流温度、ふく射強度及び気流速度の実験結果を示す。また、本計算によって求めた18分経過時の火炎モデルによる計算結果を図中に示した。測定結果にはばらつきが見られるものの、いくつかの点において解析結果とほぼ合致する結論がえられた。

またこの計算においては、汎用熱流体解析コード"FLUENT ver.4.4"を用い、図3-3に示された実験場の屋内屋根の下の領域を計算対象領域とした。18分経過した定常火炎を棒状の発熱体としてモデル化し、図3-3及び図3-4に示された実験値に合う熱流束の値を算出した。また、流体方程式の他にふく射輸送方程式を別途解いて、ふく射強度の変化を求めた。

上記の検討結果より、ドラム内混合物燃焼時の計算モデルを表3-1のように決定した。

また、実験開始後10分後及び18分後(最大燃焼時)の実験場空間内部の熱気流の速度分布、実験場のふく射計を含む面内における加熱された大気温度分布、二つの断面内におけるふく射強度分布を、各々図3-5(a)～(c)及び図3-6(a)～(c)に示す。

表3-1 ドラム火炎計算モデル

火炎高さ: 2~3[m]	壁床天井境界面の熱的条件: 断熱
火炎からの熱流束: $1 \times 10^5 [\text{W}/\text{m}^2]$	壁床天井境界面のふく射率: 0.7
火炎面のふく射率: 0.3	シャッターおよび屋根開口部: 自由流出
ふく射強度の吸収係数: 0.15 [1/m]	ふく射計のふく射率: 0.9
ふく射強度の散乱係数: $1 \times 10^{-4} [1/\text{m}]$	ふく射モデル: P-1モデル

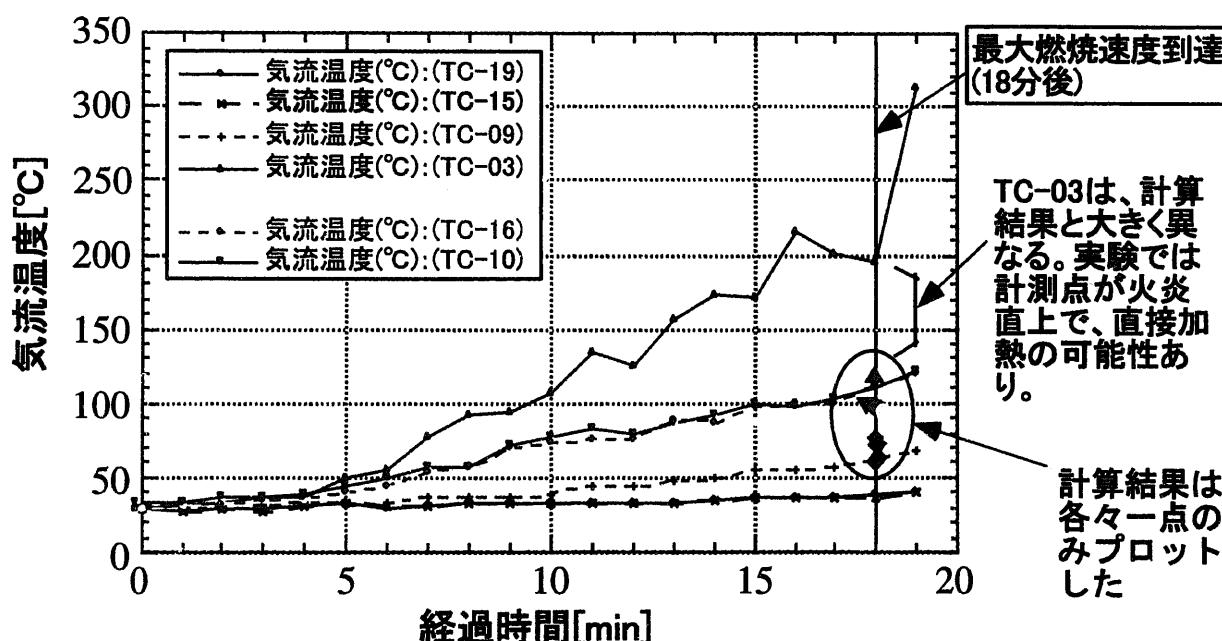


図3-3 燃焼・消火実験データ(気流温度)

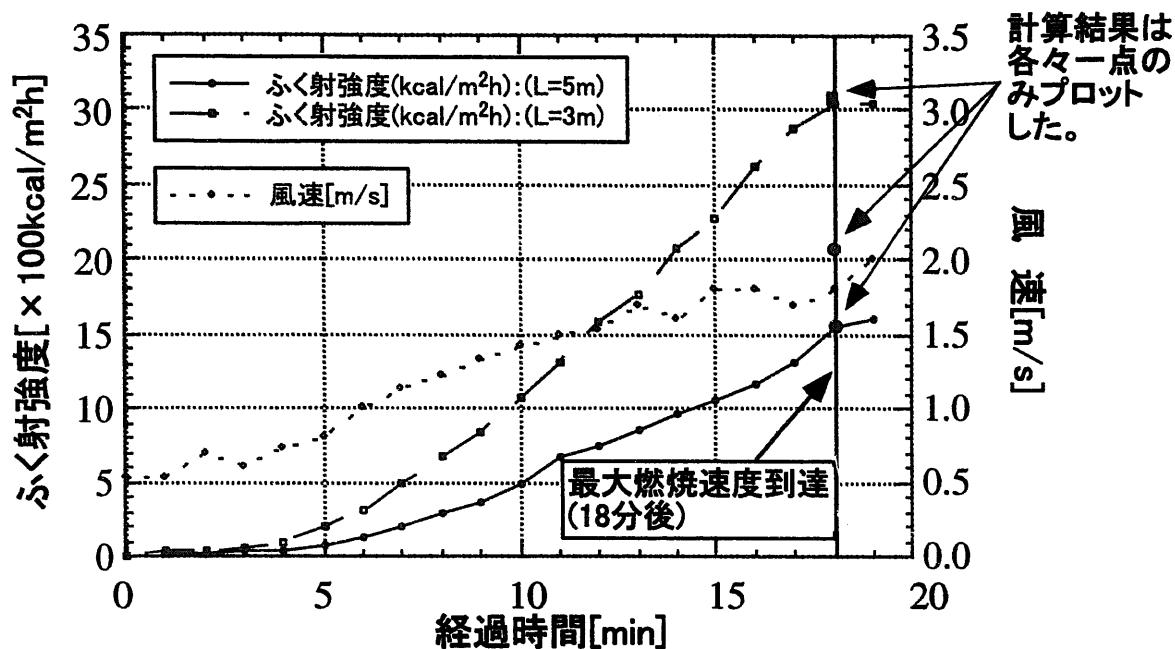


図3-4 燃焼・消火実験データ(ふく射強度、気流速度)

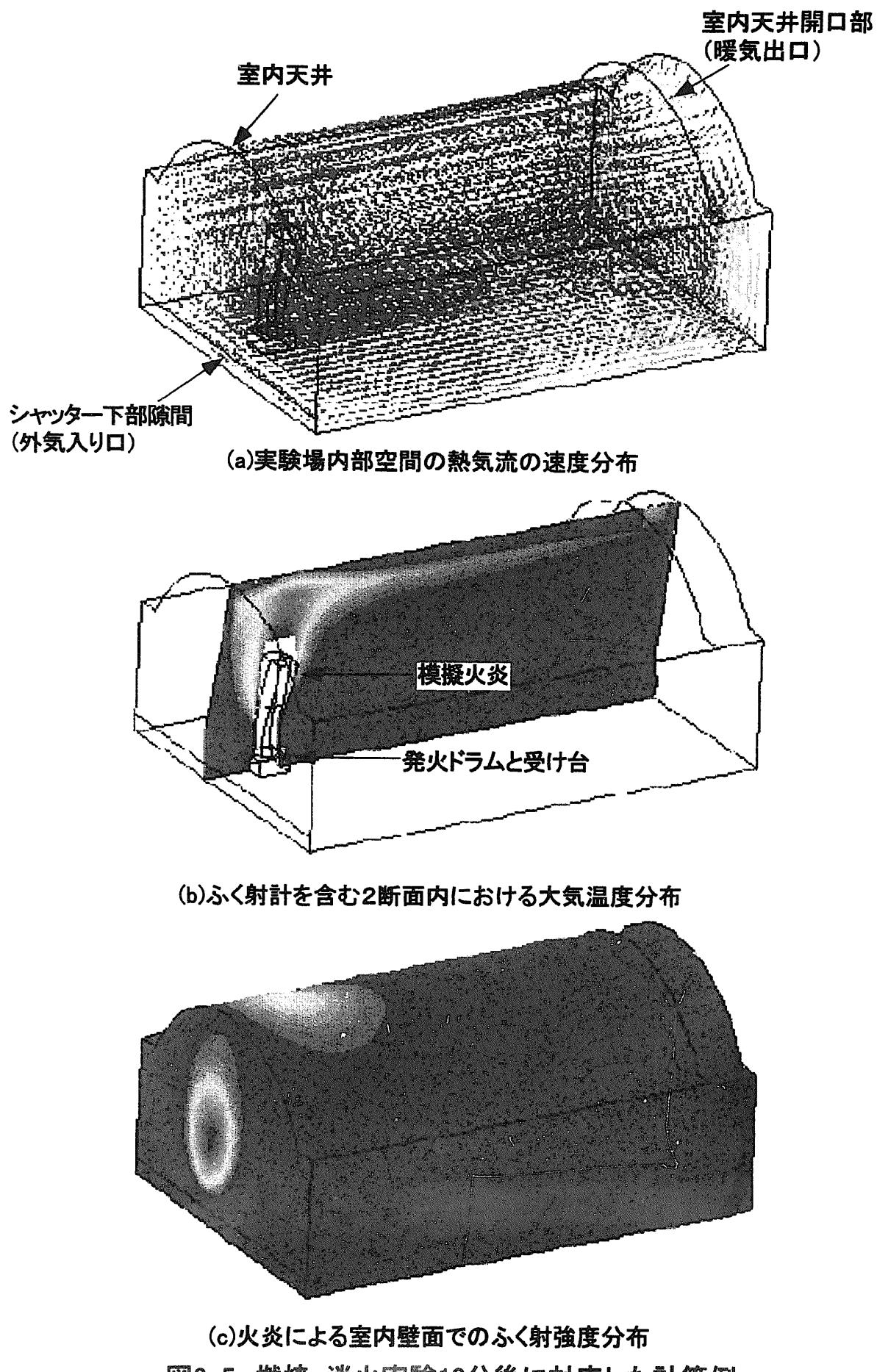
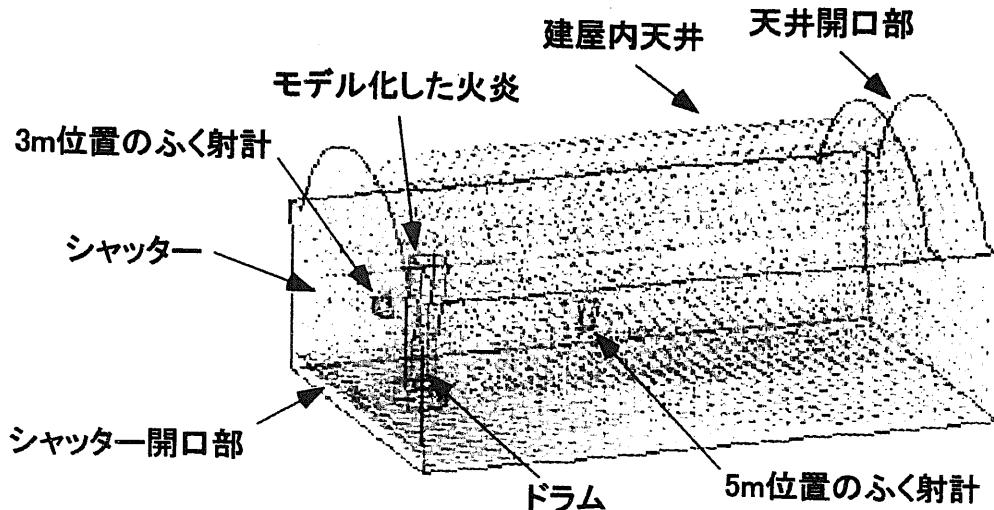
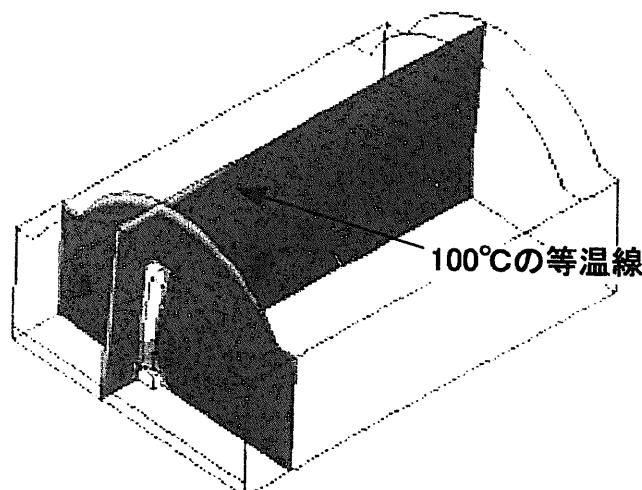


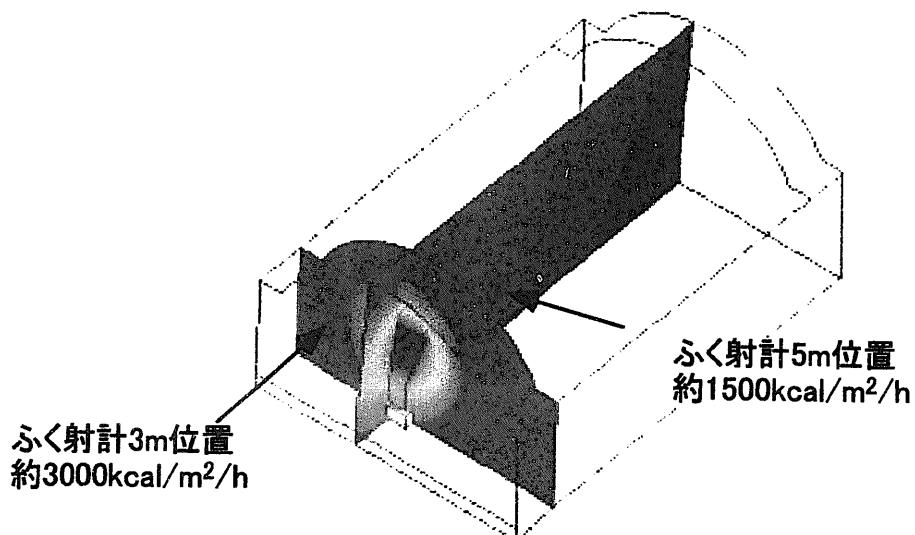
図3-5 燃焼・消火実験10分後に対応した計算例



(a)実験場内部空間の熱気流の速度分布



(b)ふく射計を含む2断面内における大気温度分布



(c)上図(b)と同様な2断面内におけるふく射強度分布

図3-6 燃焼・消火実験18分後(最大燃焼時)に対応した計算例

3.2 爆発後の火災による各種構造物への熱流束

充てん室内部のターンテーブル上のNo.30101ドラムが、爆発後に最初に燃焼したと仮定したときに、No.30101ドラムの火炎が隣接するドラムやエクストルーダをふく射加熱および対流・伝導伝熱により昇温させたと考えられる。解析には第2章で紹介したフィールドモデルを用い、3.1節表3-1に示した実験値を基に決定した「ドラム火炎の計算モデル」を用いて、充てん室内部の火災時のシミュレーションを行った。

図3-7に充てん室内部の計算モデルを示した。建屋換気系統は停止しており、また爆発によって充てん室天井のリムーバブルルーフや、充てん室とエクストルーダ室との間のシールディングウォールは吹き飛ばされているので、計算上不要な空間は対象領域から外し、境界面は自由流出境界とした。熱的な境界条件は表3-1で示した値を用いた。本計算は定常状態を仮定した計算であり、No.30101ドラムの混合物が定常状態で燃焼しているときに、周囲のエクストルーダやターンテーブル上の他のドラムに対する加熱効果を定量的に見積もる目的で行った。

得られた計算結果のうち、エクストルーダを含む充てん室横断面内の速度ベクトル図を図3-8(a)に、また火炎を含む横断面内の気流の温度分布を図3-8(b)に各々示す。

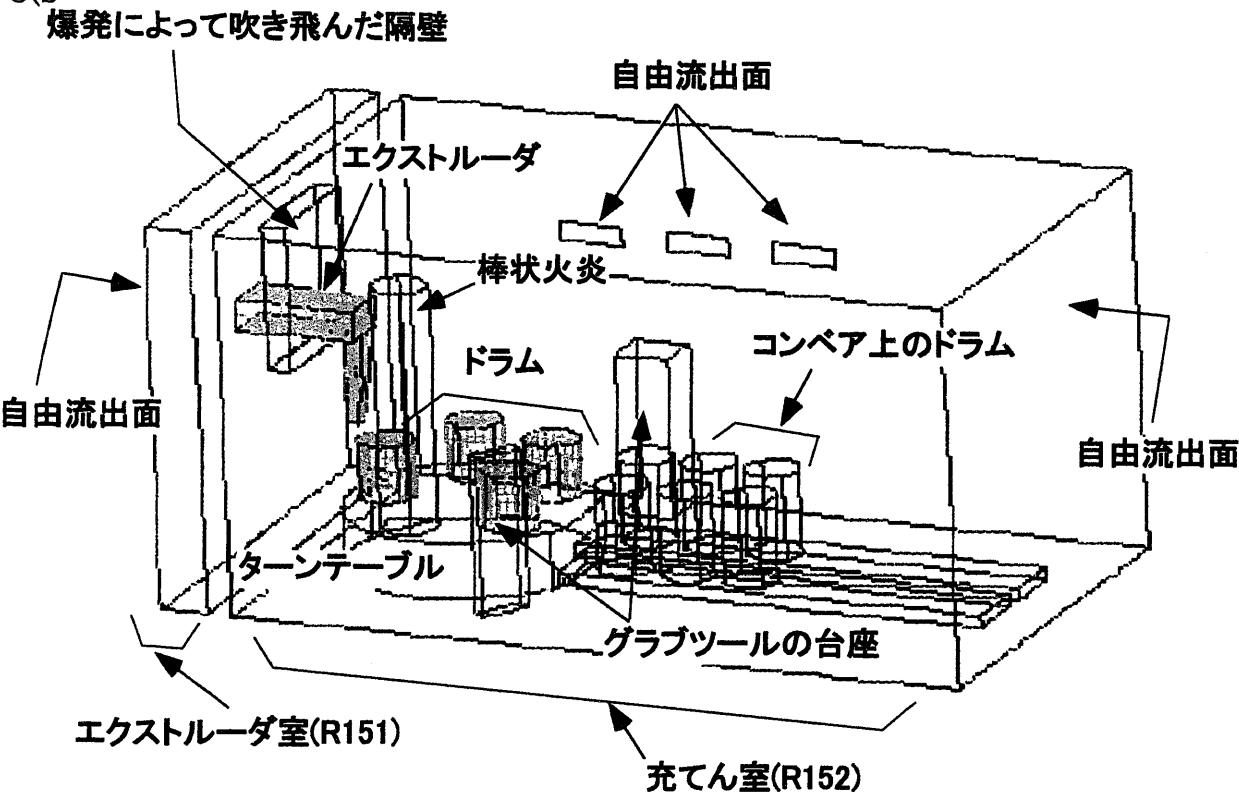


図3-7 爆発後の充てん室内部火災計算モデル

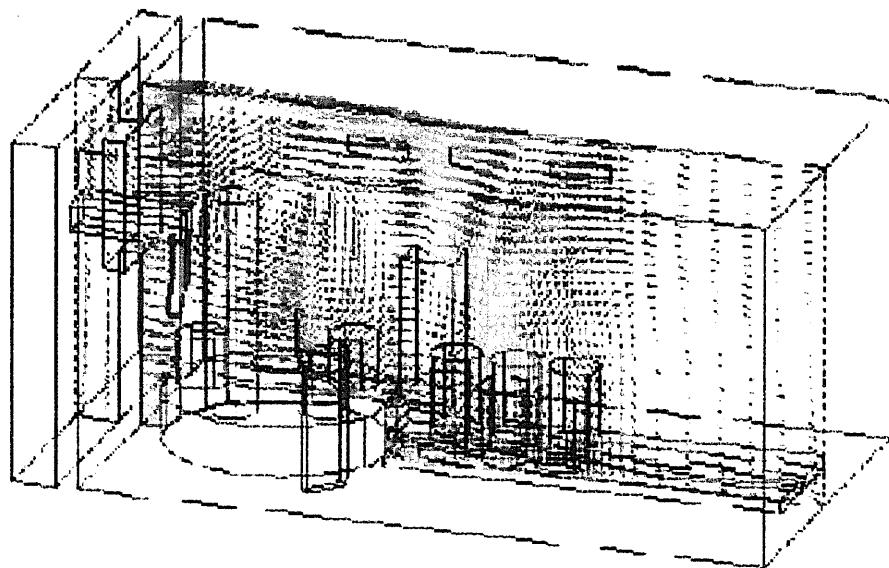


図3-8(a) エクストルーダを含む横断面内の速度分布

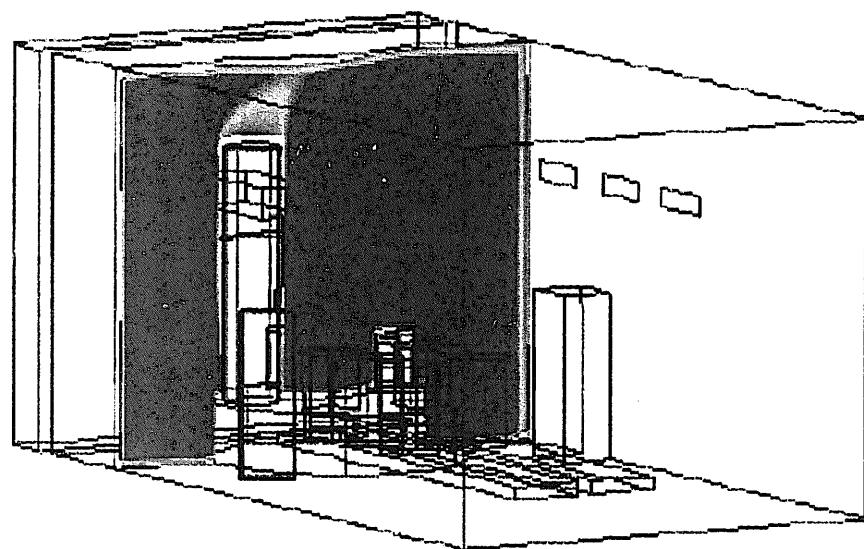


図3-8(b) 火炎を含む横断面内の温度分布

No.30101ドラム火炎により、エクストルーダやターンテーブル上の他のドラムが、どの程度加熱されるかを調べるために、火災解析の結果得られた構造物の表面温度と熱流束とを、各々図3-9の(a)と(b)に示した。

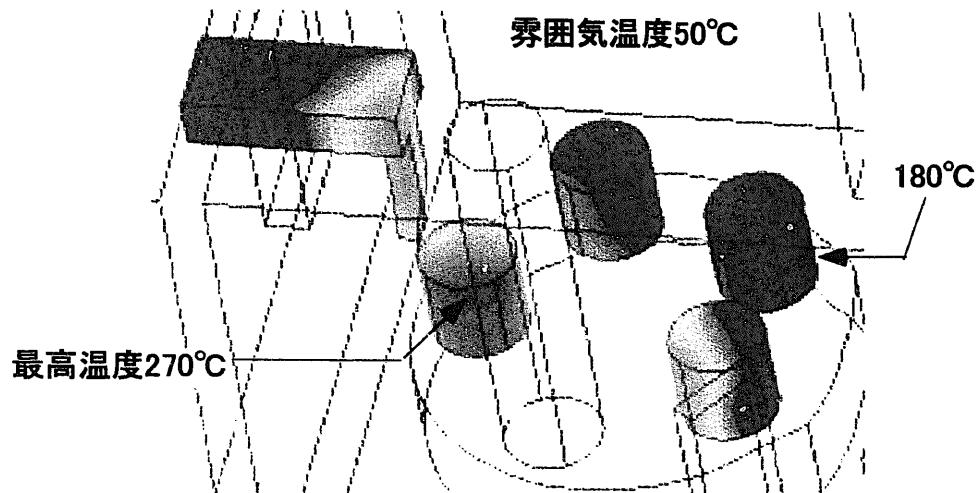


図3-9(a) エクストルーダおよび隣接ドラムの表面温度

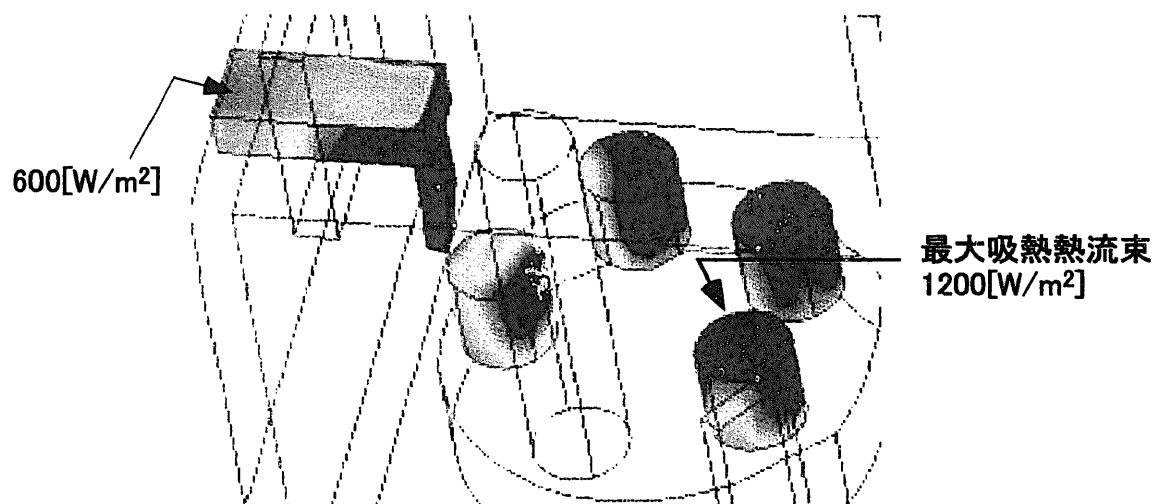


図3-9(b) エクストルーダおよび隣接ドラム境界での熱流束

3.3 エクストルーダの表面温度

爆発後にゾーン8部分の熱電対は、400°Cを越えるような高温を記録している。3.2節において求めたNo.30101ドラム火炎からの加熱によるエクストルーダ表面温度や表面からの熱流束によって、観測された熱電対の高温状態が生じうるのかどうかを確認する目的で、図3-10に示した熱的境界条件によってエクストルーダの表面温度の計算を行った。

解析には汎用非線形構造解析コード"FINAS Ver.13"を用いた。計算に用了いたエクストルーダのモデル図と、図3-9に示した計算結果よりファイナスの境界条件として採用した値を図3-10に示した。

エクストルーダのゾーン8の熱電対に記録された400°Cを越えるような高温状態が、計算によって再現されるかどうかを確認するために、定常燃焼火炎が1時間継続したと仮定したときの、エクストルーダ構造体昇温過程の非定常計算を行った。本来はエクストルーダ本体の構造計算と充てん室内の雰囲気大気の流体計算とを交互に解かなければならぬのであるが、本解析ではエクストルーダの構造計算と気流計算は別々に実施しているため、この点について簡略化し、定常燃焼火炎から受けるエネルギーのみでのエクストルーダ表面温度の見積もりを行った。

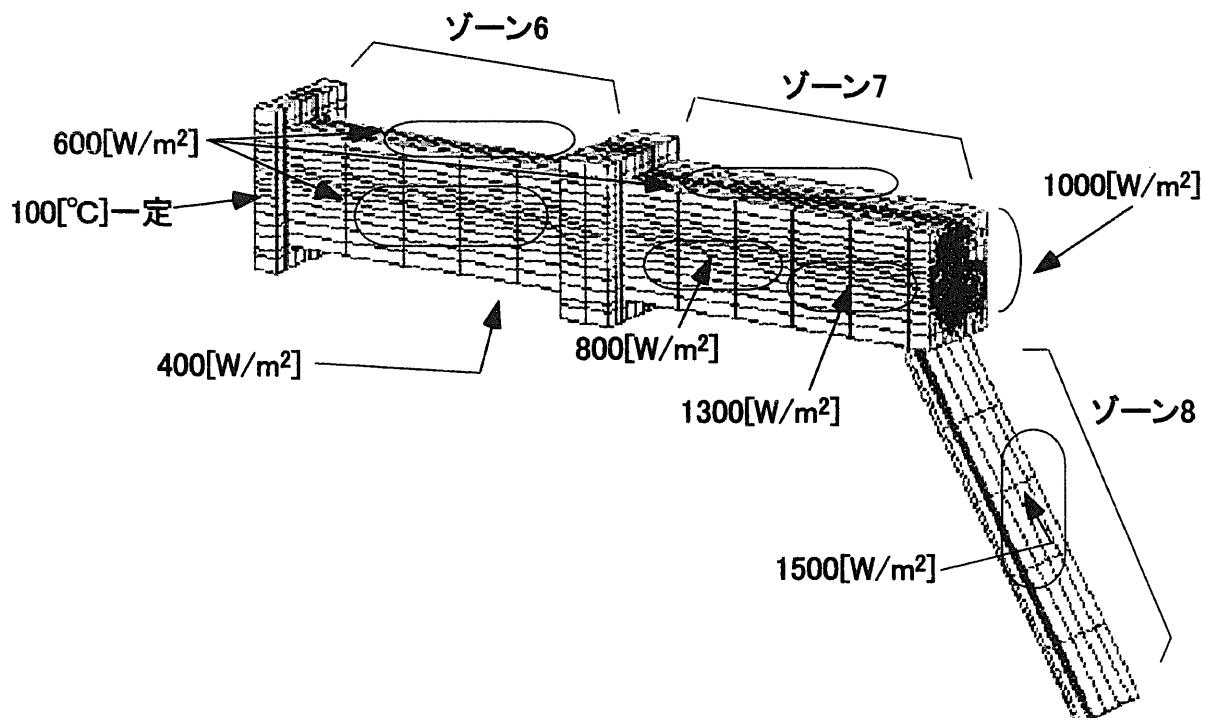


図3-10 エクストルーダの計算モデル図と境界条件

バレルの初期温度を、100°C一様として、1時間後のエクストルーダの温度分布を鳥瞰図として図3-11に示す。ゾーン8の二重円管の外側管に挿入された熱電対は、挿入部分に対応する外側管の表面温度に等しいと考えると、図3-12の熱電対挿入部分の拡大図より分かるように、350°C～400°Cの高温に達している。

これらの計算結果によれば、No.30101ドラムからの火炎が爆発直後に最大燃焼状態に達したと仮定したとき、1時間後にエクストルーダゾーン8部分の表面温度が350°C以上に達している。

また、図3-13にゾーン8部分の熱電対記録と計算結果を示した。図3-13のゾーン8の熱電対記録は爆発後数分の温度低下を示した後に、直ちに記録紙から振り切れるような急激な温度上昇を示している。加熱計算の結果では、1時間の加熱後にやっと350°Cに昇温しており、熱電対記録とは大きく異なっている。

従って、このような急激な温度上昇は、No.30101やNo.30102ドラムからのふく射加熱ではなく、火炎はゾーン8の真下にあったNo.30104ドラムからのものであり、直接の火炎によりゾーン8部分が加熱されたと考えられる。

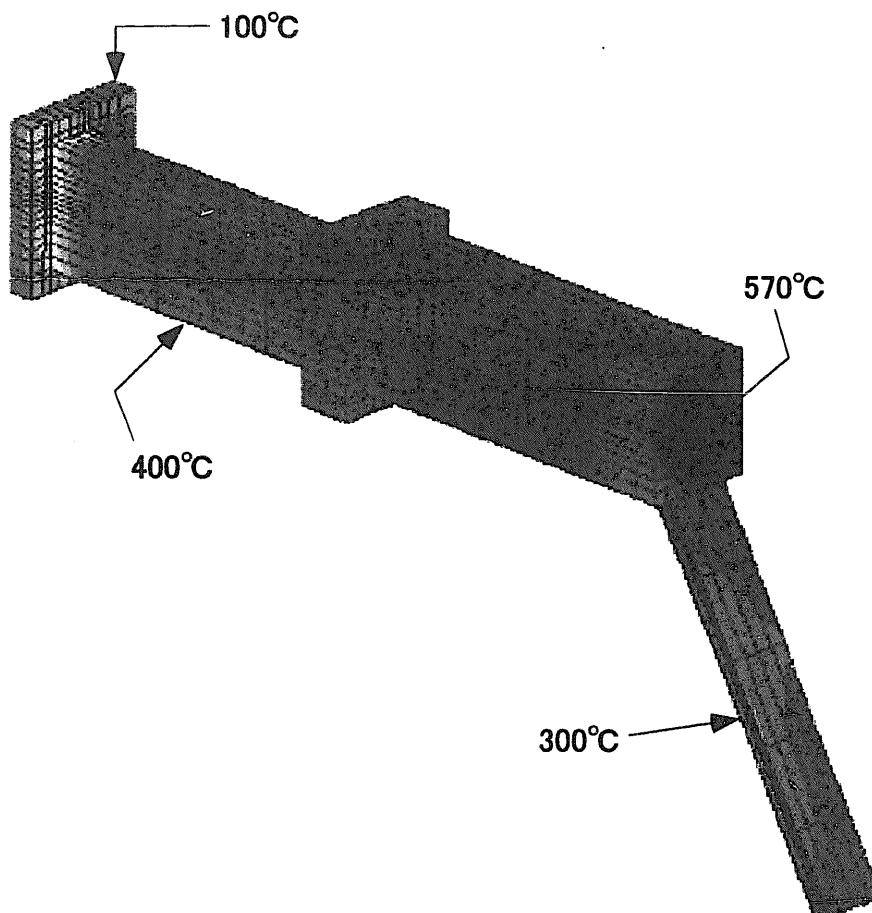


図3-11 ドラム発火1時間後のエクストルーダの表面温度

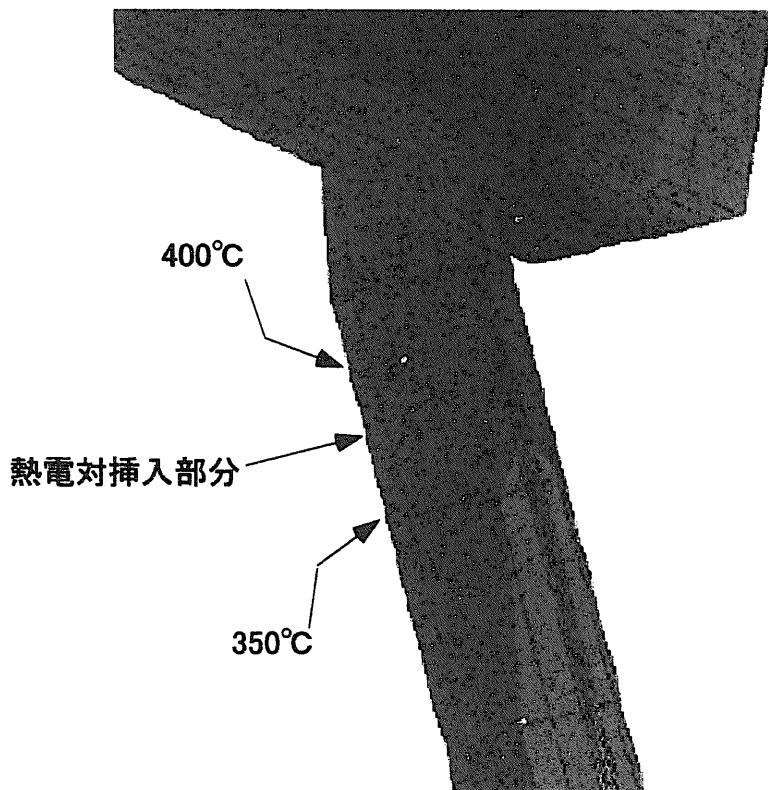


図3-12 ドラム発火1時間後の熱電対插入部分の表面温度

(計算条件)

- ・初期エクストルーダ本体温度;100°C
- ・火炎の放射強度; 1×10^5 [kcal/(m²h)]
[過去の燃焼・消火実験より]
- ・火炎とエクストルーダ構成面との形態係数; $F = \cos\theta_i \times \phi$
[θ_i はエクストルーダ各構成面と火炎とのなす角、 ϕ は火炎半径0.3m、火炎高さ2m、火炎中心から受熱面までの距離1mのときの形態係数で0.25]
- ・ふく射加熱時間;60分

図1-3あるいは図3-13の熱電対記録の第2番目のピークに関しては、ターンテーブル上のNo.30104ドラム以外のNo.30101、No.30103及びNo.30102の何れかあるいは全てが、逐次あるいは同時に発火したと考えられる。No.30101ドラム単体の最大燃焼火災を仮定した場合でも、計算結果に示すように1時間で350°Cまでの温度上昇を示しており、3本の燃焼形態によっては十分推測される事象進展である。

以上の結果、爆発直後にNo.30104ドラムが発火し、これに隣接するドラムへの熱的影響、つまり相対的な位置関係が同じであるNo.30101あるいはNo.30103ドラムが発火した可能性について検討する。

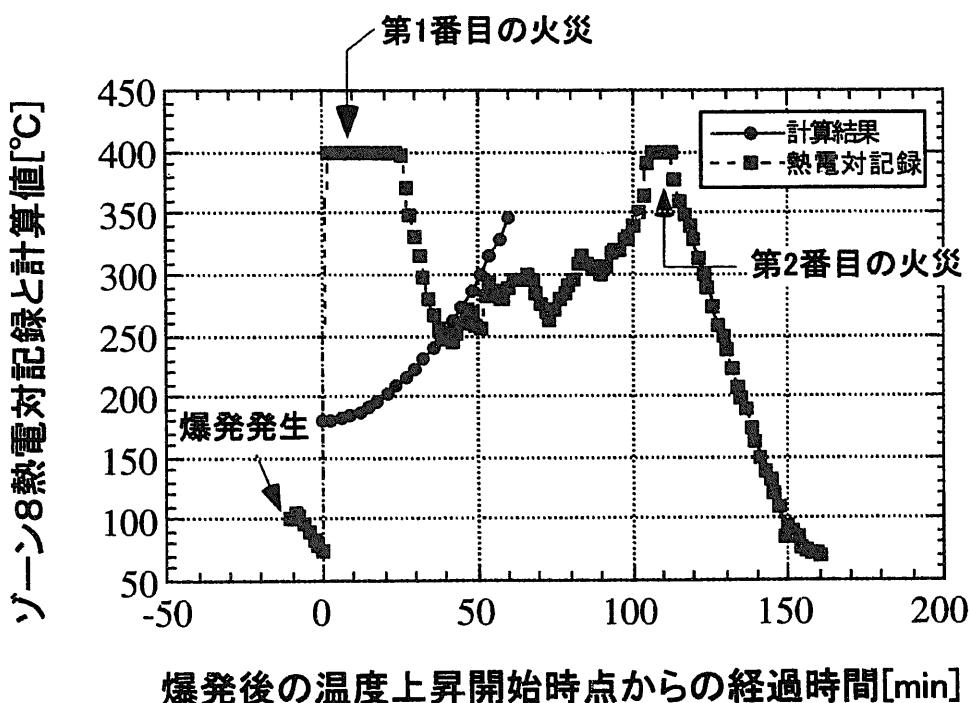


図3-13 爆発後のエクストルーダゾーン8熱電対の記録と計算結果との比較

3.4 隣接ドラム火炎からの熱的影響の評価

図3-9で示された隣接ドラムへの熱流束を熱的な境界条件を用いた計算を行う前に、一定のふく射を与え続けたときのドラム内の温度分布を調べる。解析モデルを図3-14に示す。解析方法は、まず180[°C]でドラムへ充てんした後、約2時間放冷させた。そこで、過去の試験結果からドラムからのふく射強度を最高で3100[kcal/m²h]とし、約1時間のふく射熱を与えた。解析結果を図3-15及び3-16に示す。この結果、ドラム表面は十分に高温になるもののドラム全体が高温になるのは難しいことがわかる。

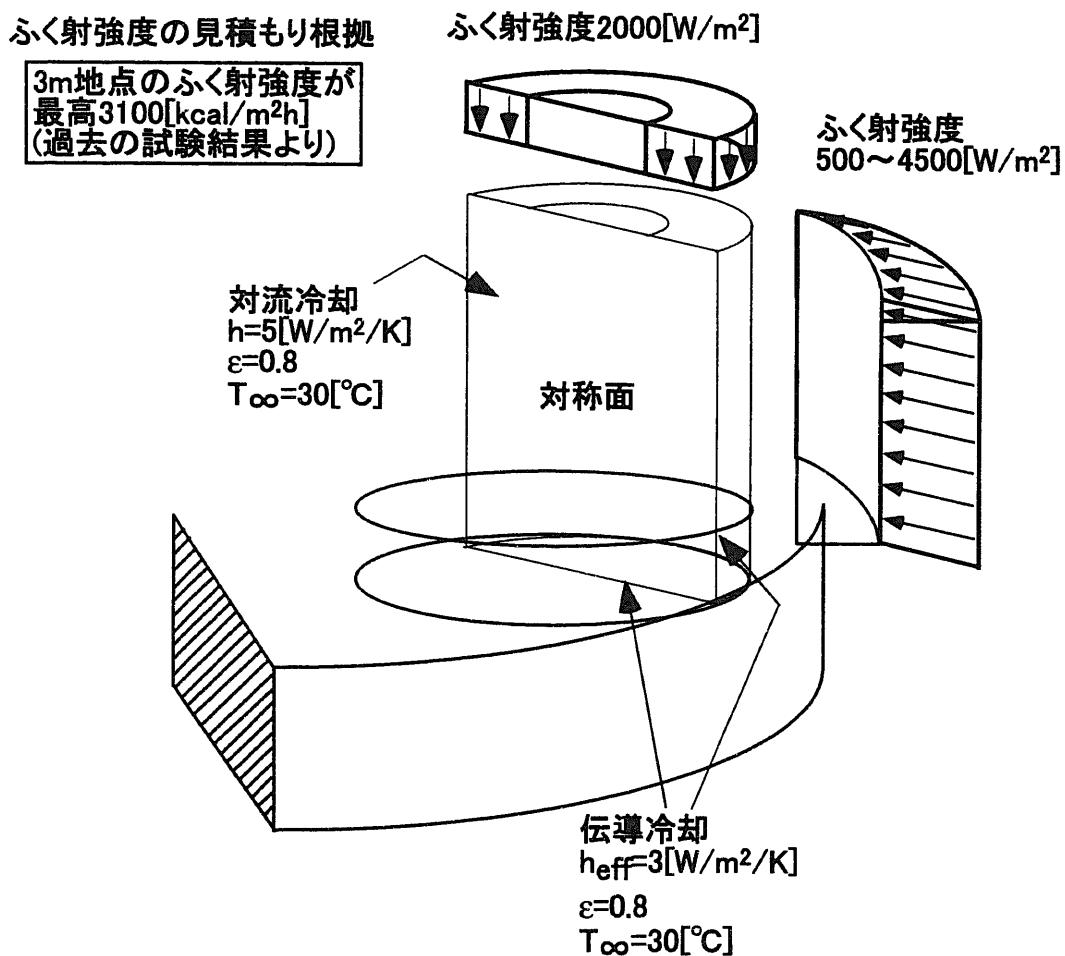


図3-14 ふく射伝熱モデル

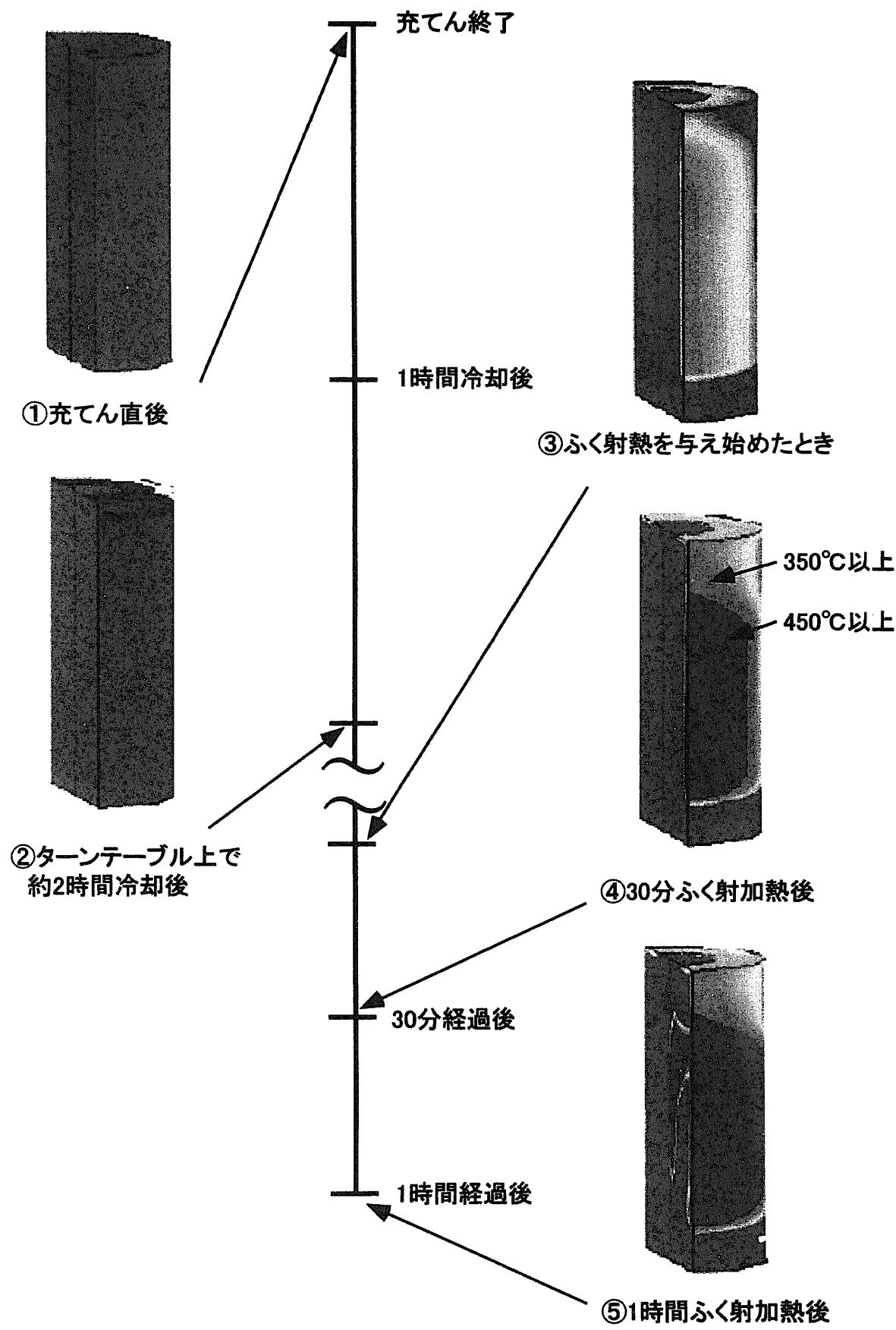


図3-15 ふく射加熱を受けるドラムの内部温度変化

同様に図3-9で示された隣接ドラムへの熱流束を熱的な境界条件として、No.30101あるいはNo.30103ドラムへの熱的影響が、ふく射加熱や熱対流による入熱によるものか、自己発熱反応によるものかを計算によって検討する。充てん室内部のドラム火災解析により、No.30104ドラムが燃焼した場合のNo.30101ドラム表面のふく射加熱による熱流束を表わしたのが図3-16である。このふく射熱流束と周囲雰囲気温度を境界条件とし、また計算結果によって求められたNo.30101ドラムの平均表面温度を初期条件として、No.30101ドラム単体の昇温過程の計算を行った。

計算は、フルエント(FLUENT 4.4)を用いた3次元計算を行った。図3-16に示されたNo.30101ドラム表面上の熱流束を境界条件として使用した。計算モデルに用いた入力条件としては、計算結果を模擬して図3-17のように設定した。ドラム内部の混合物に対しては、No.30090ドラム(ドラム位置は図1-8参照)から分析され決定した反応速度定数を用いて、硝酸塩・亜硝酸塩とアスファルトとの化学反応を考慮した。混合物の流動性に関しては非ニュートン性を考慮してドラム内部の自然対流による冷却を考えた。

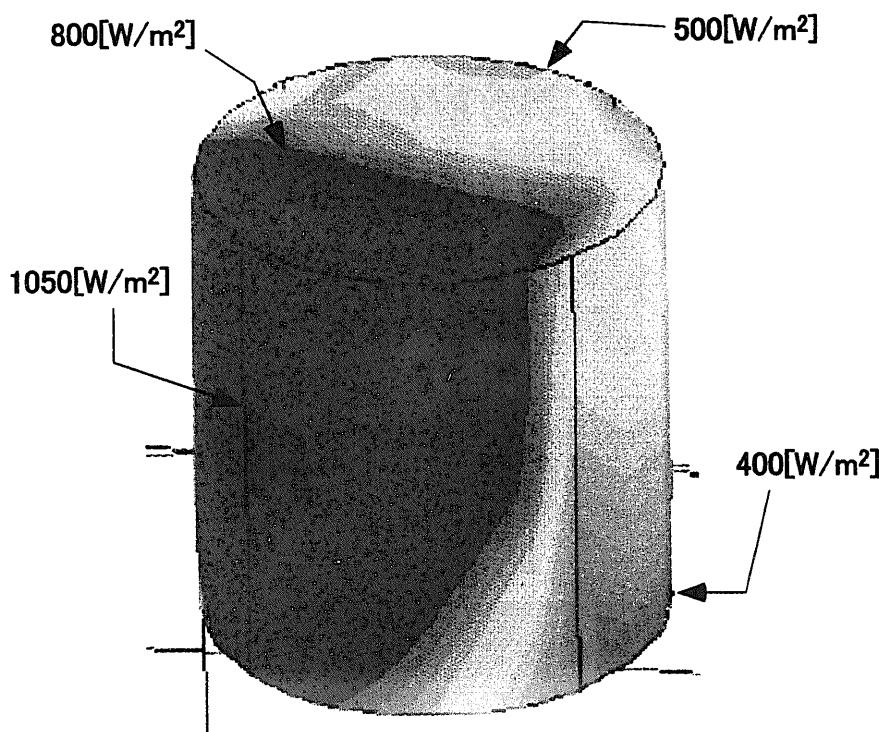


図3-16 No.30101ドラム表面上のふく射熱流束分布

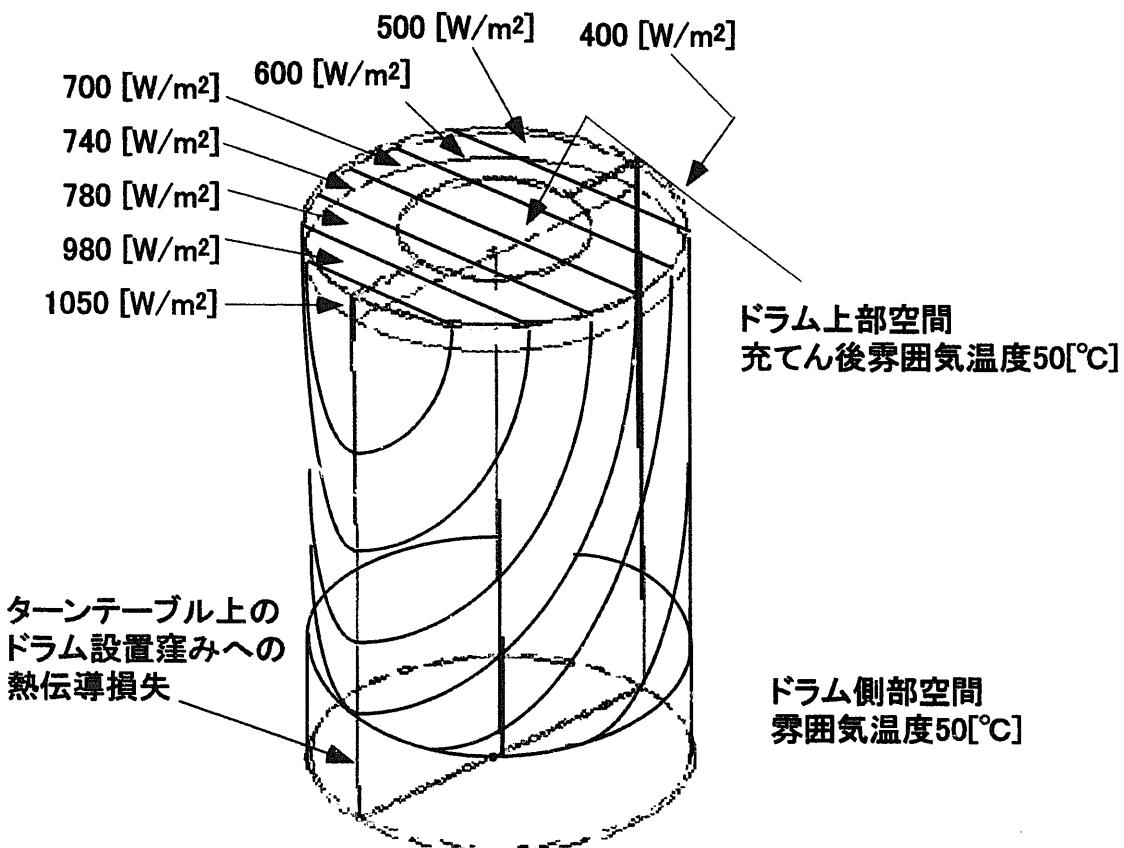


図3-17 隣接ドラム加熱現象の計算モデル

隣接ドラムへの熱的影響の評価は、最初の火災が1時間程度継続していたことより、上述した熱的境界条件が1時間継続していたとしたときに、加熱された隣接ドラムが発火温度まで昇温するかどうかを調べる目的で計算を行った。最初に、200°Cで充てんされたドラムが冷却期間を置かずに直ぐにふく射により加熱された場合の計算を行った。

この結果を図3-18に示した。図3-18はふく射加熱開始から2時間経過後の結果であり、内部の温度は一様に冷却されているのに対し、ドラム表面の一部の混合物の温度が上昇している。しかし、最大で2時間の加熱時間を想定しても、非常に薄い領域が300°C程度の高温状態に達するものの、熱暴走に至るまでには至らなかった。

以上のように、充てん後の冷却時間が無く、ふく射加熱が開始したと仮定し、2時間後になってやっと非常に薄い層が300°Cの高温状態になったという結果より、ターンテーブル上の隣接ドラムが燃焼するためには、化学反応以外の効果、つまり高温で充てんされたこと等を考えなければならない。

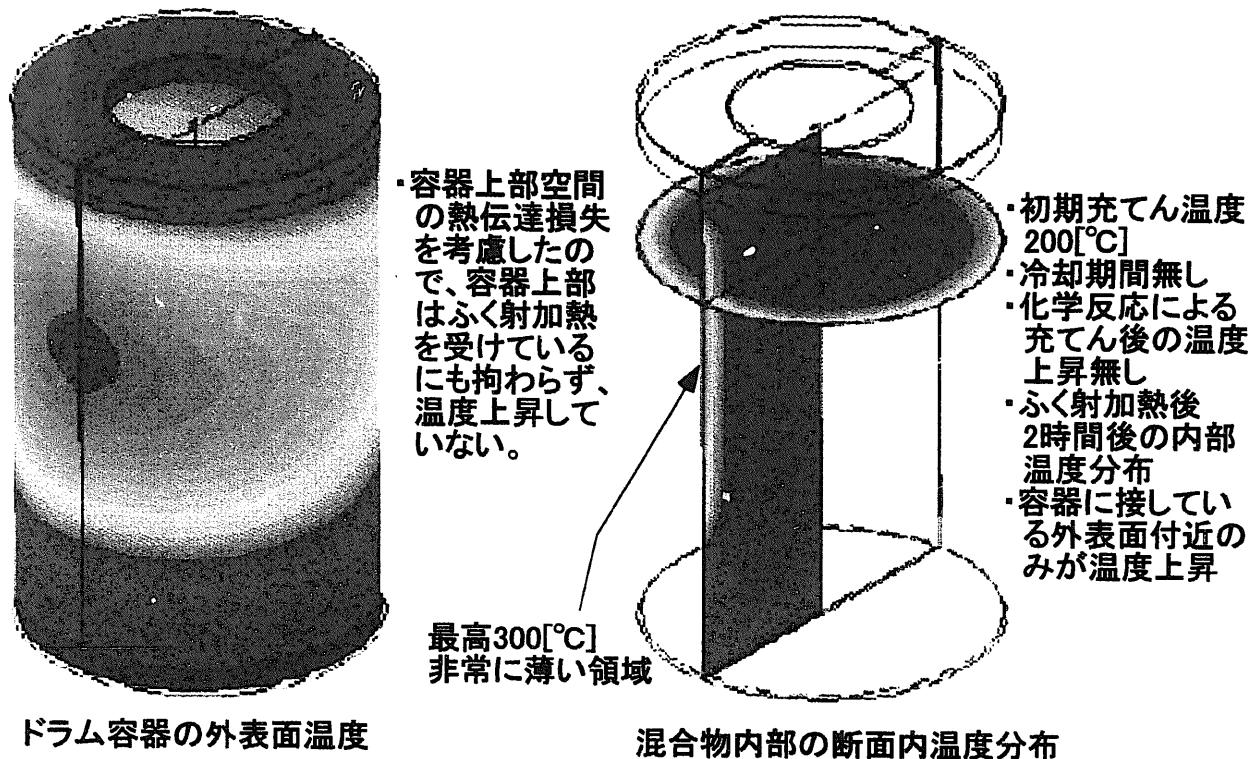


図3-18 充てん温度200°Cにおけるふく射加熱の影響

そこで、初期充てん温度をパラメータに245°Cまで上昇させた計算を行った。初期の火災が発生する前の冷却時間を考慮して2時間冷却後に、最初のドラムが発火を起こしたと仮定し、1時間ふく射加熱を受けた場合の計算を行った。計算結果を図3-19に示す。充てん後2時間冷却した場合(図3-19①)と、その後1時間のふく射加熱を受けた場合(図3-19②)のドラム内横断面内の温度分布を示した。図3-19からわかるように、この条件ではドラム上部が発火温度である350°Cに昇温されている。なお、245°Cに至るまでの解析では、初期充てん温度を200°Cとした場合と同様にドラム表面の一部がふく射加熱により昇温するものの、全体が昇温することはなかった。

以上の計算結果より、爆発後最初の火災からのふく射加熱によって隣接するドラムが燃焼したと結論づけることは困難であり、むしろターンテーブル上のドラムについても充てん温度が高かったと考えられる。

従って、ドラムの熱解析(1)、(2)より分かるように[6]、[7]、ドラムへの充てん温度が通常より高く、そのまま放置されていても自然発火に至ったであろう混合物が、爆発後最初の火炎からのふく射加熱によって、時間的に若干早められたと考えることができる。

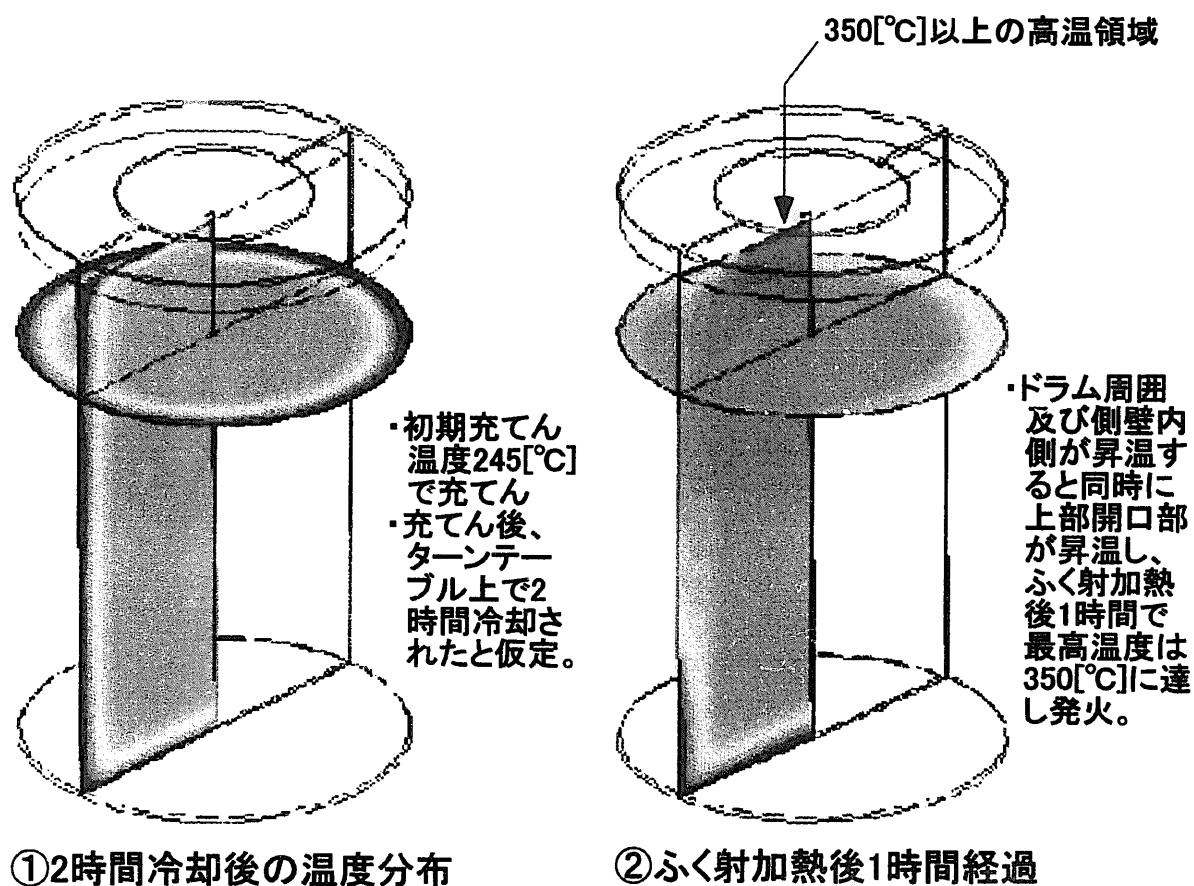


図3-19 充てん温度を上昇させた場合の熱ふく射の影響

4. 最初の火災によるコンベア上の隣接ドラムへの熱的影響

最初の火災で燃焼したコンベア上の複数のドラムから、火炎が立ちのぼっていることが確認された。また、その数分後に約1分間の水噴霧を行った。その後の充てん室内部の状況について、事故調査委員会では、「No.30094～No.30100、No.30093、No.30095～No.30099のアスファルト固化体は燃焼し続けたと推定される。」としており[8]、充てん室内部は高温状態であったと考えられる。

この章では、充てん室内部の調査によって明らかになった28バッチドラム内部の「ボロボロの状態」になった原因について検討するため、最初の火災が発生した時から爆発までに28バッチドラムが受けたと考えられる熱的影響を解析により見積もる。2.2節で用いたドラム火炎モデルを用いて、コンベア上の複数のドラム火炎からのふく射量を計算し、また爆発までの充てん室内部雰囲気温度を仮定し、コンベア上の28バッチドラムの昇温の程度について計算する。

4.1 最初の火災時の複数ドラムからのふく射強度

コンベア上の複数ドラムから火炎が立ち上っていたときの、ドラム上の火炎からのふく射強度を見積もった。

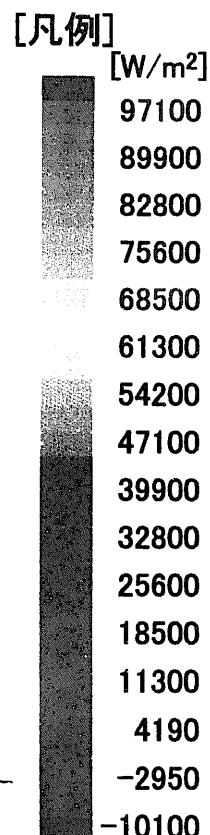


図4-1 充てん室内部の複数のドラム火炎からのふく射強度
(プラスは放熱する方、マイナスは吸熱する意味。)

最初の火災を模擬するために、充てん室の換気が作動している状態で、コンベア上の8本のドラムに対して表3-1で求めた火炎モデルを適用して、定常状態を仮定した室内の温度分布、ふく射強度分布等を求めた。計算結果として、図4-1にドラム上に火炎と見たてた発熱源を持った8本のドラムと、その脇に28バッチドラムを模擬したドラムとを各々直方体形状で近似した場合の表面からのふく射強度を示した。

この計算結果より、28バッチで作製したドラムの代表として、発火ドラムに隣接するNo.30088ドラム(図1-8参照)が受けるドラム上面及び側面での平均的なふく射強度を、図4-1及びアスファルト固化体の熱解析結果[7]より7kW/m²とした。

4.2 28バッチドラムの内部温度変化

最初の発火時の火炎からのふく射加熱、その後爆発までの約10時間の間、高温の充てん室内部に置かれていた等の状況により、28バッチドラム(ここでは代表例として、No.30088ドラムを選んだ)の内部温度変化を計算した。

28バッチドラムでは、エクストルーダ内部の塩の濃縮・堆積現象により充てん温度は通常より高かったが、発火はしなかつたため、ドラムの熱解析の結果[7]より充てん温度を240°Cであるとした。No.30088ドラムは、充てん後最初の火災時まで30時間程度コンベア上において自然冷却されていた。この状況を模擬するため、充てんした後30時間経ったドラム内部温度分布を計算した。結果を図4-2(a)に示す。

火災が発生してすぐに複数のドラムから火炎が発生し、このときのふく射加熱量7kW/m²によりドラム内部の温度変化がどのようになるかを、6分間の非定常計算により調べた。その結果を図4-2(b)に示す。この結果、側面及び上面において温度上昇がみられ、特に側面において最高温度180°Cに達することが分かった。

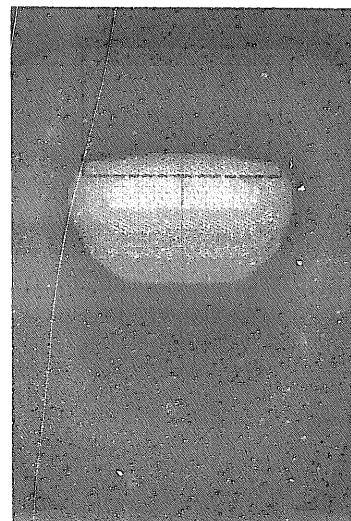
水噴霧後、充てん室の雰囲気温度は、エクストルーダのゾーン8部分の温度計記録(図1-3参照)より100°Cであると仮定して、爆発時(10時間後)までの温度変化を計算した。結果を図4-2(c)に示した。この解析では昇温は見られなかった。

以上の計算結果より、最初の発火から爆発に至るまで火炎からのふく射加熱やその後の充てん室雰囲気からの加熱の効果では、No.30088ドラム内部は、模擬固化体を高温度・長時間保持した際に見られるような、空洞が生成されるような高温状態にはならず、ドラム中心部分の到達温度は自然冷却の場合に比べ大きな変化はないと考えられる。

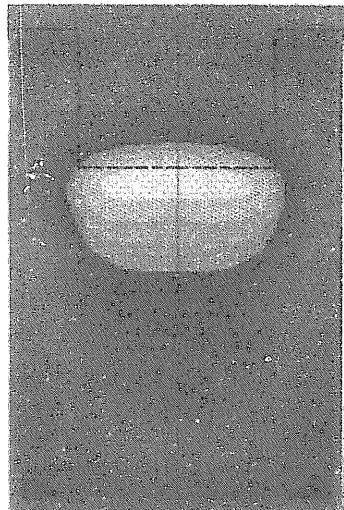
[凡例]

温度[°C]

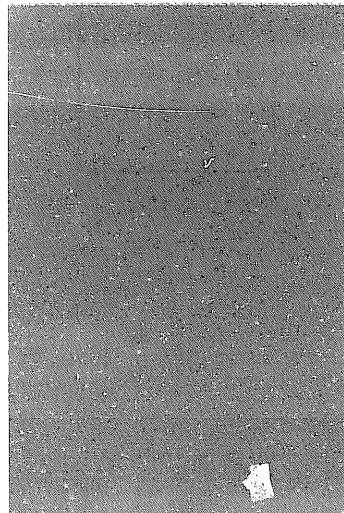
183
173
163
153
143
133
123
113
103
93
83
73
63
53
43



(a) 火災前の温度分布
(充てん後約30時間の冷却)



(b) 火災時の温度分布
(約6分間のふく射加熱)



(c) 爆発時の温度分布
(火災から10時間後)

図4-2 最初の火災から爆発までのNo.30088(A6)ドラム内温度変化

5. 結 論

爆発後のターンテーブル上の複数ドラム間の熱的影響を数値解析によって検討した。過去の燃焼・消火実験結果[2]やゾーン8部分の熱電対の温度記録を計算結果と比較検討することにより、爆発後の火災発生の事象を以下のように推定した。

①ゾーン8熱電対記録の最初の高温ピークに対応する火災は、ゾーン8直下のNo.30104ドラムの燃焼である。

②様々な化学分析の結果、化学反応による顕著な昇温原因がみられず、爆発後に燃焼したNo.30104ドラムから隣接ドラムへ与えた熱的影響も大きくないことから、燃焼した全てのドラムの充てん温度はそれ自体でも放置すれば発火し得る温度であったことが必要である[9]。爆発後に燃焼したNo.30104ドラム(30バッチ)の火炎は、ターンテーブル上で隣接するドラムの発火の時期をふく射加熱によって早めたと考えられる。

また、コンベア上の複数のドラムによる最初の火災及び爆発までの充てん室内部の高温状態を考慮して、28バッチドラムの熱的影響を見積もることにより、以下の結論が得られる。

③複数のドラムからの発火火炎からのふく射加熱、充てん室内部の高温の雰囲気からの伝導加熱では、No.30088(A6)ドラム内部に特に大きな昇温は生じない。

結 言

本報告は火災シミュレーションを行った種々の結果をまとめたものである。火災は様々な非線形物理現象や化学的な反応が複雑に混在した系であるため、火災シミュレーションには様々なモデルや解析法が提案されている。本解析は火災事象を説明する1つのモデルであり、複合事象を詳細に説明するためには新たなるモデルや解析法を提案する必要がある。

火災解析の基礎理論は流体工学・伝熱工学のほか熱力学などである。また、アルゴリズム等の検討をする際には高度な数学が必要なほか自動制御の知識が必要になるが本報告ではこれにふれなかった。第2章で説明した火災シミュレーションのモデル化の手法、モデルを検討する際には後記した文献を参照されたい。

本解析の充てん室モデルを作成するに当たり、旧再処理技術開発部プラント設計開発室の方々に御協力得られました。また、エクストルーダの熱解析を実施する際には大洗工学センター基盤研究部構造材料設計室の方々にご協力いただきましたことに感謝をいたします。

平成11年9月
筆者

参考文献

・本文中で参考にした文献

- [1] 須藤俊幸ほか、「放射性物質の放出量並びに作業者及び公衆の被爆線量の評価」、PNC TN8410 98-048、1998
- [2] 宮尾英彦ほか、「アスファルト固化体の燃焼、消火実験」、PNC TJ8710 97-001、S57
- [3] S.S.Sazhin et al., “The P-1 model for thermal radiation transfer: advantages and limitations”, *Fuel*, Vol. 75, No. 3, 289, 1996
- [4] 日本火災学会編、「火災便覧第3版」、共立出版、1997
- [5] 森田昌宏、“建築火災シミュレーションとその現状”、安全工学 Vol. 36, No. 6, 368, 1997
- [6] 三浦昭彦、今本信雄、「ドラムの熱解析(1)」、JNC 公開資料、JNC TN8410 99-044、1999
- [7] 三浦昭彦、鈴木美寿、「ドラムの熱解析(2)」、JNC 公開資料、JNC TN8410 99-045、1999
- [8] 第11回事故調査委員会提出資料 11-5
- [9] 佐藤嘉彦、蛭町秀、野尻一郎、「実固化体のARCによる熱分析結果」、JNC TN8410 99-030

・火災解析において参考となる文献

- [10] 安全工学協会編、「火災」、海文堂出版 1983
- [11] Fluent User's Manual Vol. 1-4
- [12] Wm. T. Ashurst et al., “Flame Front Curvature Distributions in a Turbulent Premixed Flame Zone”, *Combust. Soc. and Tech.*, vol. 124, 115, 1997
- [13] Maria da Graca Carvalho et al., “Predicting Radiative Heat Transfer in Absorbing, Emitting and Scattering Media Using the Discrete Transfer Method”, *Fundamental of Radiation Heat Transfer*, HTD-vol. 160, 17, 1991
- [14] J. M. Hyun et al., “Unsteady Buoyant Convection in an Enclosure”, *Advances in Heat Transfer*, Vol. 24, 227, 1994