

アブレーション材料同定解析システム FISCAM

佐藤 裕, ○高寄浩一 (JAXA/ISTA), 須藤之喜, 高田健一 (NEC 情報システムズ)

Development of FISCAM:

Ablative material analysis and identification program using axisymmetric FEM model

Yutaka Sato, Koichi Takasaki(JAXA/ISTA),

Yukiyoshi Sutoh, Ken-ichi Takada(NEC Informatec Systems)

Key Words: finite element method, ablation, identification

Abstract

The Finite-Element based Identification System of Charring Ablative Materials(FISCAM) Program is presented. The program was developed for the analysis and identification of heat conduction problem which includes thermal decomposition of material, pyrolysis gas generation, and surface recession due to combustion of the charring material. The governing equation of two-dimensional axisymmetric heat transfer problem was discretized using a finite-element mathematical model. An identification problem of heated cylinder is presented in this paper.

1 概要

宇宙航空研究開発機構総合技術研究本部 (旧称: 独立行政法人航空宇宙技術研究所) において, 2次元軸対称有限要素アブレーション解析コード FISCAM が開発された。本コードは, 航空宇宙技術研究所において開発された熱伝導解析 FEM プログラム THAP[1] を元に, 通常の熱伝導に加えてアブレーション挙動を再現できるよう改造を施したものである。

FISCAM の扱うアブレーション現象について図 1 に示す。アブレーション材料の挙動は大きく 3 つ (炭化領域/熱分解領域/母材領域) に分かれている。3 領域とも通常の熱伝導方程式が適用されるが, 熱分解領域では母材が熱分解により炭化を起し, それに伴い熱分解気体が発生し, その結果潜熱が奪われ, 発生した気体は炭化領域から外部に向けて流出する。炭化領域についてはこの分解ガスの質量流量

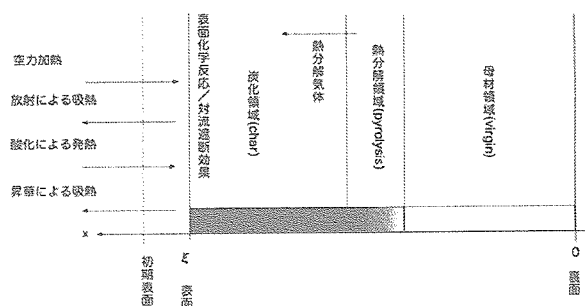


図 1: アブレーション現象の概略図

は一定と仮定する。また, 表面においては外部からの空力加熱, 酸化による発熱, 放射による熱流出, 昇華による熱吸収が考慮され, 空力加熱については表面からの熱分解ガスの流出による熱流入遮断効果を考慮している。

この FISCAM 開発の目的は, 再突入物体やロケットノズルに代表される 2次元軸対称物体が強力な熱

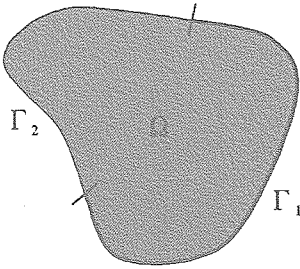


図 2: 解析領域

荷重を受けた際に材料が熱分解を起こし、炭化しつつ熱分解ガスを放出、同時に表面炭化層が酸化により失われ後退する現象であるアブレーション挙動を解析することであった。従来著者らが開発、使用していたコードは1次元であり、FISCAMのような軸対称物体に適用できるコードにより、肉厚が大きくかつ曲率の大きい物体の挙動に対し、1次元解析よりも精度よく再現する事が可能になる。加えてFISCAMは基礎方程式の離散化に有限要素法を用いている事も特色の一つであり、FISCAMと同様の目的で開発されたと考えられるNASAエイムズ研究所で開発されたコード [2] などに対する差別化も図っている。

2 基礎方程式

アブレーションを含む解析では、解析対象の熱分解ガス発生に伴う潜熱、及びガスが材料内を通過する際の熱輸送を考慮する必要がある。

図2に示す解析領域における支配方程式は以下の通りとなる。仮定として、熱分解ガスの温度は、その通過点の温度と同値とする。

$$\nabla(\kappa\nabla\theta) - \nabla(\theta C_g \dot{m}_g) + \frac{\partial \rho}{\partial t} h_v = \rho C \frac{\partial \theta}{\partial t} \quad (1)$$

in Ω

$$\theta = \bar{\theta} \text{ on } \Gamma_1 \quad (2)$$

$$\kappa\nabla\theta \cdot \mathbf{n} = \bar{q} \text{ on } \Gamma_2 \quad (3)$$

ここに、

κ : 領域 Ω 内の熱伝導率 [W/m·K]

θ : 領域 Ω 内の温度 [K]

C_g : 熱分解ガスの比熱 [J/kg·K]

\dot{m}_g : 熱分解ガス質量流量 [kg/m²·sec]

h_v : 熱分解の潜熱 [J/kg]

ρ : 領域 Ω 内の密度 [kg/m³]

C : 領域 Ω 内の比熱 [J/kg·K]

\mathbf{n} : Γ_2 に対する法線ベクトル

ここで、アブレータ表面燃焼による質量流量は以下の式で算出された。

$$\dot{m}_c = \frac{KpC_e}{1 + Kp/\lambda P_{cu}} \quad (4)$$

$$K = A_c \exp(-B_c/\theta_s) \quad (5)$$

$$P_{cu} = L_e^{0.6} \frac{q_c}{h_e} (1 - b) \quad (6)$$

$$b = 0.724b_0 - 0.13b_0^2 \quad (7)$$

$$b_0 = \frac{\alpha_c \dot{m}_c + \alpha_g |\dot{m}_g|}{P_{cu0}} \quad (8)$$

ここに、

p : 外部流体の圧力 [Pa]

C_e : 境界層外の酸素の質量分率

λ : 酸素に対する炭素の質量比

A_c : 反応速度定数 [kg/m²·sec]

B_c : 活性化エネルギー [K]

θ_s : 表面温度 [K]

L_e : ルイス数

q_c : 空力加熱率 [W/m²]

h_e : 回復エンタルピ [J/kg]

α_c : 炭化層燃焼による遮断補正係数

α_g : 熱分解ガスによる遮断補正係数

P_{cu0} : 遮断なしの質量流出係数 [kg/m²·sec]

アブレータ炭化層表面の、上記の燃焼に伴う後退速度 \dot{s} は以下の式

$$\dot{s} = \frac{\dot{m}_g}{\rho_{char}} \quad (9)$$

により算出される。ここで、 ρ_{char} は炭化層の密度である。

3 離散化

FISCAM は以前に開発された FEM コード THAP を基にしているため、支配方程式もガラーキン形式および 2 次元軸対称 4 節点アイソパラメトリック要素による定式化、離散化を施している。

式 (1) に対する弱形式は、

$$\int_{\Omega} \left\{ \nabla(\kappa \nabla \theta) - \nabla(\theta C_g \dot{m}_g) + \frac{\partial \rho}{\partial t} h_r - \rho C \frac{\partial \theta}{\partial t} \right\} \delta \theta d\Omega = 0 \quad (10)$$

となる。これに部分積分を施すと、以下の式となる。

$$\begin{aligned} & \int_{\Omega} \kappa \nabla \delta \cdot \nabla \theta d\Omega + \int_{\Omega} \delta \theta \rho C \frac{\partial \theta}{\partial t} d\Omega = \\ & \int_{\Omega} \delta \theta \frac{\partial \rho}{\partial t} h_r d\Omega + \int_{\Gamma_1} \delta \theta \bar{q} d\Gamma - \\ & \int_{\Gamma_2} \delta \theta C_g \dot{m}_g \cdot n \theta d\Gamma + \int_{\Omega} \nabla \delta \theta \cdot \dot{m}_g C_g \theta d\Omega \quad (11) \end{aligned}$$

この積分を各要素に分割して行い、かつ要素内の値を形状関数で近似することでガラーキン形式により離散化する。式 (10) のうち、領域 Ω 内の熱分解ガス通過による影響の項の離散化は以下の式となる。

$$\begin{aligned} & \int_{\Omega_e} \nabla \delta \theta \cdot \dot{m}_g C_g \theta d\Omega = \\ & \int_{\Omega_e} \nabla \left(\sum_{i=1}^n N_i \delta \theta_i \right) \cdot \left(\sum_{i=1}^n N_i \theta_i \right) d\Omega = \\ & \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \delta \theta_i \left(\int_{\Omega_e} \nabla N_i \cdot \dot{m}_g C_g N_j d\Omega \theta_j \right) \quad (12) \end{aligned}$$

ここで、 θ_i は節点温度、 N_i は形状関数である。

一般的にアブレーション材料は複合材料であるため、FISCAM では材料の熱伝導率の異方性に対応できるように熱伝導率をテンソルとして与え、その値および材料座標系と要素座標系との角度差は事前に入力、算出を可能としている。

発生した熱分解ガスは留まることなくアブレーション材表面に向かって流れる、つまり厚さ方向の質量流量は一定と仮定すると、表面からある深さ d での熱分解ガスの質量流量は、深さ d より裏面側で発生し

た全ての熱分解ガスの総和をガス通過面積 S で割った値に等しいとおき、

$$|\dot{m}_g| = -\frac{1}{S} \int_d^t \dot{\rho} dV \quad (13)$$

となる。ここで、 t はアブレーション材の裏面位置、 $\dot{\rho}$ はアブレーション材密度の時間微分である。

\dot{m}_g の方向については、熱分解ガスはアブレーション材表面に向かって 1 次元的に流れるものとし、アブレーション材の面内方向には流れないモデルをおく。そのため、FISCAM では構造格子を用い、厚さ方向に配列された節点に沿って熱分解ガスが流れるというプログラム内容となっている。なおその際に、解析の安定性のため、熱分解ガスの質量流量の値は深さ方向（風上側）にある隣接する節点の情報を利用する。

4 プログラム構造

FISCAM にはアブレーション問題の解析だけでなく、CG（共役勾配法）及び GA（遺伝子アルゴリズム）を組み合わせた最適化モジュールを上位のプログラム構造として組み合わせ、与えられた温度情報を基に同定解析を行うオプションも付属している。

FISCAM の解析フローチャートを図 3 に、上位構造の GA および CG アルゴリズムのフローチャートをそれぞれ図 4、図 5 に示す。

5 解析例：

円筒状物体に対する同定問題

図 4 に示す円筒状物体に対し、外部表面から一様な加熱を受ける場合を模擬し、あらかじめ FISCAM で解析した出力値（3 点の温度履歴）に数値的ノイズを加え、その値との誤差の二乗和の時間積分を目標として各種パラメータを同定する作業を行った。

FISCAM を用いた同定システムは 2 段階からなるハイブリッド型で、最初に GA アルゴリズムを用い、目的関数の少ない複数のパラメータ列を選び出し、その値を初期値として共役勾配法を用いるもの

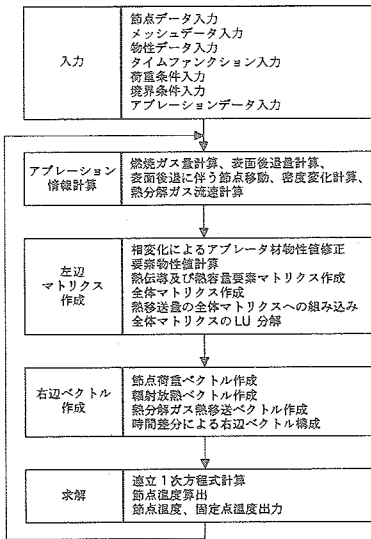


図 3: FISCAM の解析フローチャート

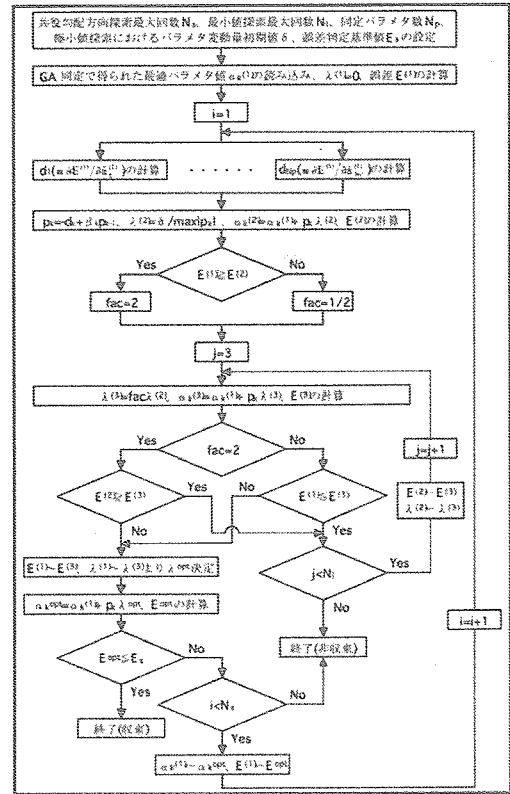


図 5: FISCAM 上位構造 (CG) の解析フローチャート

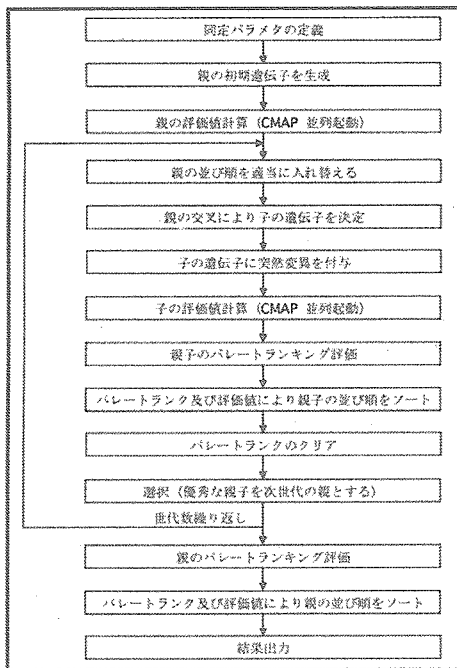


図 4: FISCAM 上位構造 (GA) の解析フローチャート

である。

以下に GA アルゴリズム同定のみを用いた結果を示す。パラメータは実数値であり、世代数は 30、各世代の個体数は 40 とした。

実数型 GA アルゴリズムのテスト同定の結果として、世代内最適個体の評価値の世代変化を図 5 に示す。なお、目標値と解析結果の温度履歴の差は良く一致しており、GA としては十分に極値付近に到達したものと考えられる。しかし、GA で最適化されたパラメータ自体をみると目標値に良く一致しているとは言えない。これは、同定目標値に対するパラメータの影響度を正しく評価して目標パラメータを設定することの重要性を示していると考えられる。

6 結言

(旧称) 航空宇宙技術研究所において開発された熱伝導解析 FEM プログラム THAP を元に、2次元

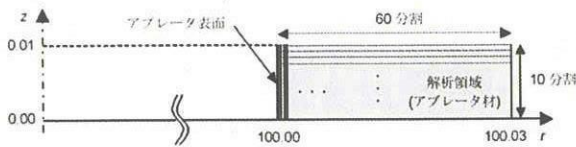


図 6: 同定解析対象モデル

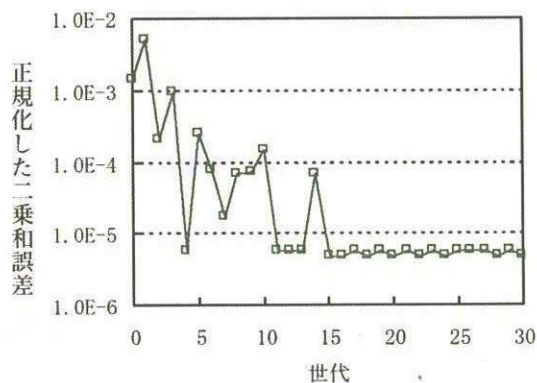


図 7: GA 解析結果：最適個体の評価値の世代変化

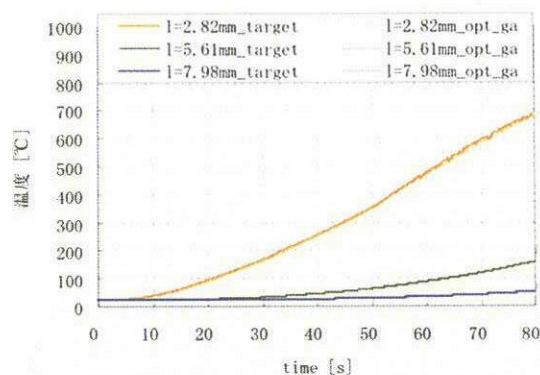


図 8: GA 解析結果：同定目標値と同定結果の温度履歴の比較

軸対称物体のアブレーション挙動を再現するプログラム FISCAM が開発された。

その基礎方程式は、異方性熱伝導率に対応した固体内熱伝導解析に加え、アブレーション挙動特有の熱分解ガス発生に伴う潜熱、熱分解ガスが表面の炭化層の中を通過する際の熱輸送量、表面からの熱分解ガス放出に伴う境界層熱伝達率の低減効果、炭化層表面と外部流との間の化学反応、その化学反応に伴う質量流出による表面後退を考慮している。

さらに、FISCAM の機能は単なる解析のみではなく、上位構造として遺伝子アルゴリズムと共役勾配法を組み合わせたハイブリッド最適化を持ち、加熱試験などから得られたデータを基にした同定解析を行う事が可能である。

本プログラムのテストとして簡単な形状モデルに対する同定解析を行った結果、目標値と解析結果の温度履歴の差は良く一致しているが、最適化されたパラメータ自体は目標値とは良い一致を見せなかった。これは、同定目標値に対するパラメータの影響度を正しく理解及び評価した上で目標パラメータを設定することの重要性を示していると考えられる。

FISCAM に対する当面の改良点および目標としては、アブレーション挙動を再現するためのより良い数学モデル/アルゴリズムの導入、および3次元要素の導入が挙げられる。

7 謝辞

最後に、紙面をお借りしまして、FISCAM の基礎となった THAP を開発され、また長年にわたりご指導いただきました故大竹邦彦氏に感謝致します。

参考文献

- [1] 大竹邦彦, 蒲原美都子, 井上裕子: 組み立て構造物熱解析コード THAP.V3 説明書, 独立行政法人航空宇宙技術研究所 資料, 1994.

- [2] Y.-K. Chen, and F. S. Milos : Two-Dimensional Implicit Thermal Response and Ablation Program for Charring Materials, *Journal of Spacecraft and Rockets*, Vol. 38, No. 4, pp. 473-481, 2001.
- [3] 野村茂昭 : カプセル型改修飛しょう体の熱・空力的概念設計法, 航空宇宙技術研究所報告 779 号, 1983.
- [4] 鈴木幸次郎 : 再突入カプセルにおけるアブレーションと化学非平衡衝撃層流れの連成解析, 日本航空宇宙学会誌 第 50 巻 第 582 号, 2002.
- [5] 加藤純朗 他 : 再突入回収カプセル用アブレータ材の炭化アブレーション数値解析, 日本航空宇宙学会論文集 Vol. 50, No. 582, pp. 255-263, 2002
- [6] Donald M. Curry, and Emily W. Stepbens : *APPOLO Ablator Thermal Performance at Superorbital Entry Velocities*, NASA TN D-5969, Sep. 1970.
- [7] C.B. Moyer, K.A. Green : *Demonstration of the Range over which the Langley Research Center Digital computer Charring Ablation Program (CHAP) can be used with Confidence, Comparisons of CHAP Predictions and Test Data for Three Ablation Materials*, NASA CR-1980, Feb. 1972.