

微小重力場における被覆電線の燃焼の数値計算*

内田 正宏^{*1}, 梅村 章^{*2}
平田 哲也^{*3}, 佐藤 順一^{*4}Numerical Calculation of Electric Wire Insulation Burning under
Micro-Gravity ConditionMasahiro UCHIDA, Akira UMEMURA^{*5},
Tetsuya HIRATA and Jun'ichi SATO^{*5} Department of Aerospace Engineering, Nagoya University,
Furo-cho, Chikusa-ku, Nagoya-shi, Aichi, 464-8603 Japan

In space station, short-circuit of electric wiring is thought as one of the factors responsible for firing. For crews' safety, we need to investigate combustion characteristics of electric wire insulation burning under micro-gravity condition and establish a criterion for material selection. In electric wire burning under micro-gravity condition, the copper wire with very large heat conductivity is considered to play an important role. The mechanism of electric wire insulation burning is supposed to consist of the following two processes. (1) At the coating-burned-out wire part, the spherical flame contacts with the copper wire and heats it and intensive gasification occurs at the edge of coated wire part. (2) The gasified fuel diffuses radially to meet oxygen, forming a spherical flame. Our calculations confirm that the heat feedback via copper wire is very crucial to whether self-sustained burning is attained or not after the cease of heating, and that it brings about phenomena that are peculiar to electric wire insulation burning under micro-gravity condition.

Key Words: Combustion Phenomena, Extinction, Numerical Analysis, Micro-Gravity Condition

1. はじめに

宇宙ステーションは完全に隔離された有人宇宙活動の場であり、その内部での火災は人命を危機にさらすため、安全性の確保は必須である。宇宙ステーションにおける代表的な火災発生要因の一つに、電気系のショート等に起因する電線被覆材からの火災の発生が考えられる。被覆電線はその施設場所の多様性から、自己発火した際に周囲の可燃性物体へ引火する可能性が高く、電線被覆材の選定が防災上非常に重要となる。このため、宇宙ステーションに使用される電線材料には、その材料特性、利用法等について安全確認試験が課されている。しかしながら、これらの試験は通常重力環境下で行われているため、微小重力環境下での可燃性・延焼性・自消性を反映しているとはいえない。また、微小重力場における燃焼現象には未知の部分がある。

多いため、電線材料の選定基準を確立するために、微小重力場における被覆電線の燃焼機構を明らかにする必要がある。このため、電線燃焼の微小重力試験が行われ、球状火炎の形成等の現象が報告されており^{(1)~(3)}、微小重力場における被覆電線の燃焼機構として、図1に示されているような機構が著者らによって提案されている⁽⁶⁾⁽⁷⁾。それによると、火炎の燃え広がりが速度が小さい場合の被覆電線の燃焼は、(1)球状の火炎に触れる裸電線からの熱の供給によって、被覆材の端で活発な気化が起きる、(2)被覆材の端からわき出した燃料気体が放射状に拡散し、酸素と会合して球状の火炎を形成する、という二つの過程から成り立っており、非常に熱伝導性のよい心線の存在が微小重力下での被覆電線の燃焼を特徴づける。本報告では、この被覆電線の燃焼機構を検証し、電線燃焼の非定常な特性を調べるために数値シミュレーションを行った結果について報告する。

2. 数値解析モデル

被覆電線の一部が加熱されると、球状の火炎が形成され、加熱部に近い部分から被覆材が燃え尽きる。その結果、時間がたつと、最初にできた球状火炎は二つの球状火炎に分離し、2方向に燃え広がっていく。本

* 原稿受付 2000年12月13日。

*1 名古屋大学大学院。

*2 正員、名古屋大学大学院工学研究科(☎464-8603 名古屋千種区不老町)。

*3 石川島播磨重工業(株)基盤技術研究所(☎135-8732 東京都東区豊洲3-1-45)。

*4 石川島播磨重工業(株)技術開発本部(☎135-8733 東京都東区豊洲3-2-46)。

E-mail: uchi@prop.nuae.nagoya-u.ac.jp

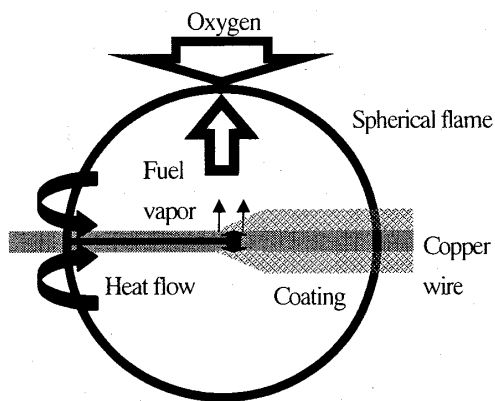


Fig. 1 Supposed mechanism of electric wire insulation combustion

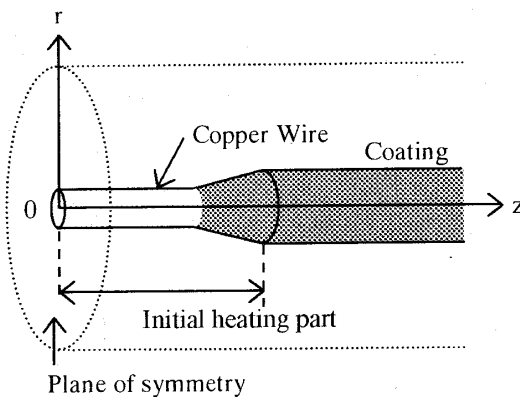


Fig. 2 Numerical simulation model

論文の計算モデルでは、図2に示されているように、静止気体中に張られた無限長の電線において、二つに分離した球状火炎の片側を考え、対称面近くの被覆材はすでに燃え尽きた裸電線部とし、残りの部分は被覆材に覆われているとした。これにより二つの分離火炎が形成されるまでの計算を省略できる。計算では、計算開始から一定時間、裸電線部と被覆部端近くの心線を高温に保って、被覆材を気化させて着火し、球状火炎が伝播していく過程、あるいは消炎に至る過程を追跡した。また、被覆材の厚み、気化熱、気相の酸素濃度を変化させて、電線燃焼への影響を調べた。

2.1 基礎方程式 心線の温度 T_* は各断面 z で一様であり、次の一次元非定常熱伝導方程式に従うとした。

$$\pi a^2 \rho_* C_* \frac{\partial T_*}{\partial t} = \pi a^2 \lambda_* \frac{\partial^2 T_*}{\partial z^2} + q \dots\dots\dots (1)$$

ここに a , C_* , ρ_* , λ_* はそれぞれ心線の半径、比熱、密度、熱伝導率を表す。また、 q は、被覆材あるいは直接気相から心線に伝わる熱である。気体の熱伝導率を λ 、心線表面から微小距離 Δr 離れた位置での気体温度を T として、裸電線部では

$$q = 2\pi a \lambda \frac{T - T_*}{\Delta r} \dots\dots\dots (2)$$

が成り立つ。被覆材内部の温度は各 z の位置で準定常であるとする。被覆材の表面温度 T_s 、局所厚み δ 、および熱伝導率 λ_* を用いて、被覆材から心線に伝わる熱量は

$$q = \frac{2\lambda_*}{\rho_* C_* a^2 \ln\left(1 + \frac{\delta}{a}\right)} (T_s - T_*) \dots\dots\dots (3)$$

で与えられる。

一般に、被覆材の熱分解特性は複雑である。ここでは、被覆材が加熱されると固体から気体へ変化すると考え、表面温度が T_B になると、熱流入に対応して被

覆材表面で気化が起きると仮定した。被覆材厚みの時間変化は、心線および気相からの熱流入量を考慮して求められ、被覆材の密度 ρ_* を用いて、支配方程式は次のように書き表せる。

$$\frac{\partial \delta}{\partial t} = \frac{1}{\rho_* L} \left[\frac{\lambda_* (T_* - T_B)}{(a + \delta) \ln\left(1 + \frac{\delta}{a}\right)} + \lambda \frac{T - T_B}{\Delta r} \right] \dots\dots\dots (4)$$

ここに L は被覆材の気化熱で、被覆材の融解熱と気化熱を総括したものを想定している。

気相場の支配方程式は、軸対称、円柱座標系に準拠したエネルギー、燃料および酸素の保存方程式である。簡単のため、拡散係数、熱伝導係数と比熱は定数として取扱い、燃焼は、被覆材が気化した燃料ガスと空気中の酸素の反応が、アレニウス形の総括一段階反応に従って起きるとした。

気化によって生じる気相の速度場は、被覆材の気化を、電線の中心軸に沿った質量わき出し分布で置き換え、質量流速ポテンシャル⁽⁶⁾を導入して記述した。わき出し強さ F_M は次の式によって算出される。

$$F_M = 2\pi(a + \delta)(\rho_* - \rho) \left(-\frac{\partial \delta}{\partial t} \right) \dots\dots\dots (5)$$

ここに ρ は気体の密度を表す。

2.2 境界条件 対称面 $z=0$ で対称条件を課した。円柱計算領域の半径を予想される火炎半径の3倍程度にとり、境界上で温度と酸素濃度が一定であるとした。円柱計算領域の長さは、火炎直径の4倍程度にとり、ここでも温度と酸素濃度が一定であるとした。

2.3 無次元化 長さ⁽⁷⁾と時間を心線半径 a と気体の拡散時間 a^2/D を用いて無次元化した。熱力学変数と輸送係数の無次元化には、心線から十分離れた位置での空気の値を用いた。以下は、これらの無次元量を用いて記述する。

2・4 初期条件 初期の気相の状態は、温度 $T=1.0$ 、燃料濃度 $Y_F=0.0$ 、酸素濃度 $Y_O=Y_{O\infty}$ とした。心線の初期状態は、裸電線部、被覆材気化部、被覆部の長さをそれぞれ 60, 15, 175 とし、心線温度 T_* は、裸電線部、気化部で 2.0、被覆部で 1.5 とした。被覆材厚み δ は裸電線部で 0.0、被覆部で δ_0 とし、気化部については、被覆部端点からの距離に比例する厚み分布とした。裸電線部、気化部を高温に保つ時間は $t=1000$ までとした。パラメータの数値は、酸素濃度 $Y_{O\infty}$ を 0.30 に固定し、気化熱 L 、被覆材厚み δ_0 を 6, 1.0 と 6, 0.8 と置いて計算を行った。また、気化熱 L 、被覆材厚み δ_0 を 6, 1.0 に固定し、酸素濃度 $Y_{O\infty}$ を 0.233, 0.25, 0.30, 0.35, 0.40 と変えて計算を行った。

3. 計算結果

3・1 自燃状態の計算結果

3・1・1 火炎形状 微小重力試験と同様、本計算結果においても、図 3 に示されているように、球形を保って自燃する火炎が得られた。火炎形状が球形になるのは次の二つの理由による。(1)各時間における被覆材厚み分布を示した図 4 からわかるように、活発な被覆材の気化が起こる部分は被覆部端点付近のわずかな範囲に限定されていて、燃料ガスの点湧き出しのようになっている。(2)被覆部端点位置と移動速度を示した図 5 からわかるように、被覆部端点の移動速度は、燃料の拡散速度と比較して非常に小さいため、球状に燃料が拡散して、反応面で酸素と会合し、準定常的に燃焼するのに十分な時間がある。

3・1・2 心線温度 図 6 に心線温度の時間変化を示す。対称面(左端)付近の心線温度は加熱終了時点の $t=1000$ で最も高くなっている。これは、 $t=1000$ の時点で球状の火炎がすでに形成されていて、裸電線部が加熱されているのに加え、計算初期の心線加熱の影響が残っているためである。加熱終了後、裸電線部の温度は、火炎との干渉による熱の供給と、被覆部への熱損失が釣り合う温度分布へと変化するため、徐々に対称面付近の温度は低くなっていき、裸電線部の心線

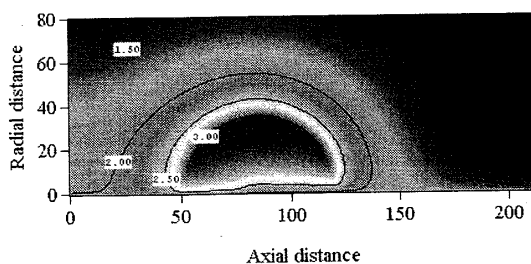


Fig. 3 Temperature contour at time =5 000

温度は、反応帯に触れる部分で最も高くなる。一方、被覆部では、被覆材を通した火炎からの熱の供給と、裸電線部からの熱伝導によって、徐々に温度が上昇する。このような熱の流れが存在するため、被覆材の気化速度は被覆部端点で最も大きくなり、被覆材厚み分布は、図 4 に示されているように、端点からの距離の平方根に比例したような形になる。

3・1・3 流れ場の特徴 図 7 に気相の速度ベクトル分布と反応速度分布を示す。反応速度は、薄い反応帯でのみ大きな値をとっており、燃焼形態は拡散燃焼になっている。流速が球状火炎の内側でのみ大きな値

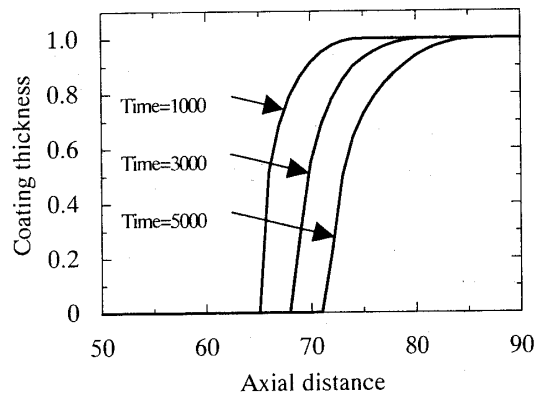


Fig. 4 Temporal variation of coating thickness distribution

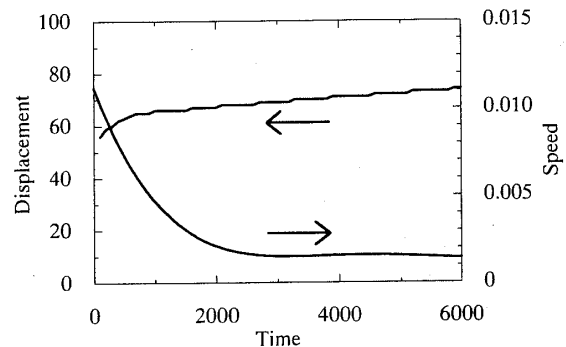


Fig. 5 Temporal variation of coating edge location and its moving speed

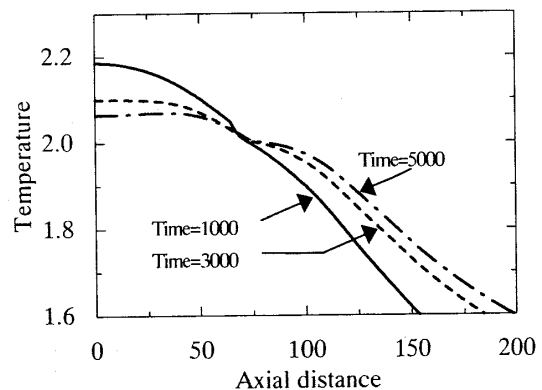


Fig. 6 Temporal variation of temperature distribution along wire

をとっていることより、酸素は拡散によって反応帯へ供給され、燃料は対流によって供給されていることがわかる。このため、反応帯の位置は燃料の噴出速度によって変化すると考えられる。火炎半径 r_f と被覆材の質量気化速度 m の関係を見るために

$$\Phi = \frac{m}{4\pi\rho D \ln(1+\sigma Y_{O_2}) r_f} \dots\dots\dots(6)$$

の値の時間変化を算出した(図8)。ここで Y_{O_2} と σ は空気中の酸素濃度と当量比を表し、右辺の分母は、空気中に一樣な反応速度をもった半径 r_f の球状火炎があるときに、定常的な分子拡散によって火炎に運ばれる酸素が、単位時間に燃やすことのできる燃料量を表す。加熱によって火炎半径が拡大しているときには、火炎の内側に蓄積される燃料量も m の中に含まれているので、 $\Phi > 1$ となりうる。加熱の影響がなくなると、 Φ の値はほぼ一定になっており、火炎半径が被覆材の気化速度によって定まっていることがわかる。また、このときの Φ の値が1より小さいことより、反応速度の非一様性がきいていることがわかる。

図9に雰囲気温度を基準にして見たときの気相の熱流束(対流によって輸送される熱と拡散によって輸送される熱の和)分布を示す。それを見ると、速度ベクトルと同様に反応帯を境に傾向が異なっているのがわかる。熱の発生源である反応帯からの熱の流れは、お

もに火炎の外側方向に向かうものとなっており、火炎の内側に向かう大きな熱の流れは存在しない。これは、火炎の内側では吹出しによる熱の輸送が支配的であり、熱伝導により内側へ向かう熱の流れを上回っているためであると考えられる。このように、被覆材の気化部分へ直接向かう大きな熱の流れは気相中には存在しないが、裸電線部では、心線に流れ込み、気化部分へ向かう熱の流れが生じる。このことから、電線燃焼における心線を通した熱の循環が重要であると考えられる。

3.2 心線を通した熱の循環 前述のように、電線の燃焼では非常に熱伝導性のよい心線が重要な役割

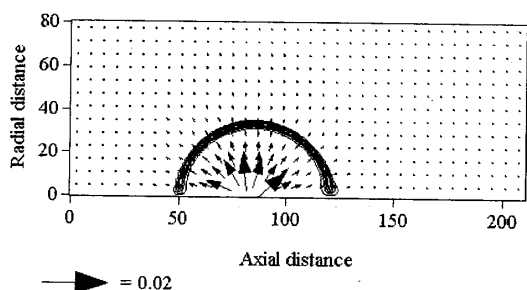


Fig. 7 Reaction rate contour and velocity vectors at time = 5000

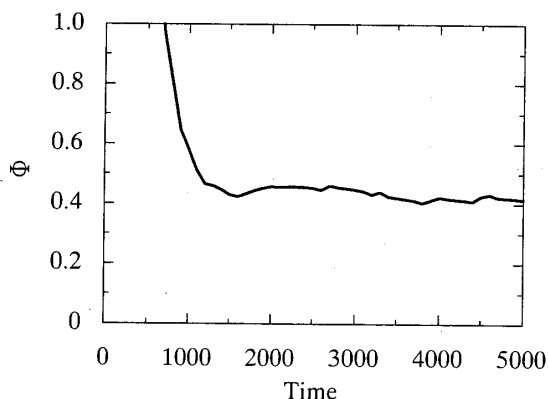


Fig. 8 Temporal variation of ratio of gasifying amount to flame radius

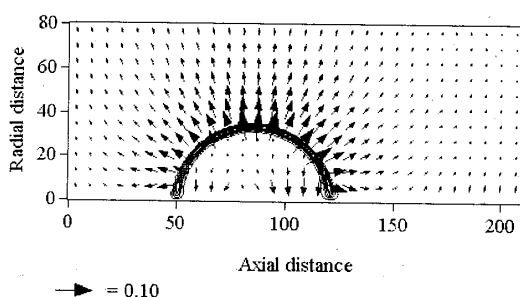
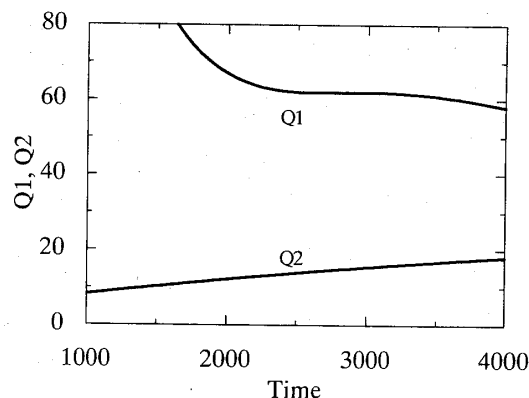
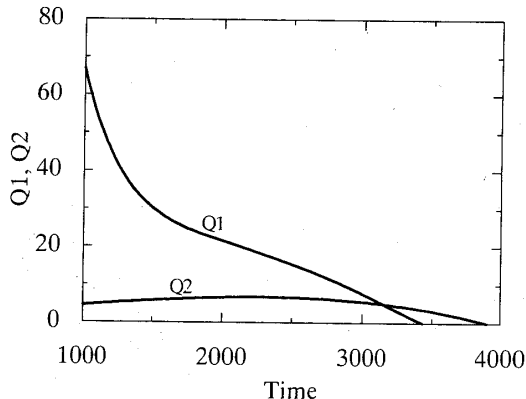


Fig. 9 Reaction rate contour and heat flux vector at time = 5000



(a) Self-sustained burning case



(b) Flame extinction case

Fig. 10 Temporal variation of heat transferred to gasifying coating

を果たし、心線を通した熱の循環によって、燃焼が持続すると考えられる。そこで次のような熱量を用いて、この機構を検証した。被覆端部の心線断面を通過する熱量を Q_1 とする。その一部 Q_1 が心線から被覆材に伝わって気化に使われる。被覆材の気化は気相から流入する熱量 Q_2 によっても起きる。被覆材の気化量 m は、 Q_1 と Q_2 の和を気化熱 L で割ったものに等しいので、定常火炎で発生する熱量 Q は $(Q_1 + Q_2)/L$ に反応熱 H を掛けたものとして算出できる。図 10 に加熱終了後に自燃する場合と消炎する場合の Q_1 と Q_2 の時間変化を示す。自燃する場合には、心線から流入する熱量 Q_1 が、気相から流入する熱量 Q_2 の数倍になっており、被覆材の気化がおもに心線から熱を受け取って起きていることがわかる。消炎する場合には、気相からの熱流入量 Q_2 は、消炎開始時間 $t = 2000$ の前後でほとんど変化しないが、心線からの熱流入量が減少して消炎に至っている。 Q_2 の Q に対する比の時間変化を図 11 に示す。この比は外部からの熱の印加なしには、1 を超えることはないから、1 以下に下がった時点で加熱の影響がなくなっていると考えられる。自燃する場合には、この比はほぼ一定の値をとっており、定常的に熱が循環して自燃していることがわかる。一方、消炎する場合には、加熱の影響がなくなった後、急激に減少して、消炎に至っている。消炎するとき、火炎は、図 12 に示すように、球状を保ったまま収縮して消炎に至る。火炎の収縮は、心線からの熱の流入量の減少に対応していると考えられ、心線を通した熱の循環量の減少、すなわち、心線から被覆材への熱の供給量の減少が、消炎する要因であると考えられる。このため、心線を通した熱の循環は、被覆電線の燃焼機構において非常に重要であるといえる。

3.3 消炎機構 消炎する場合、心線を通した熱の循環量が減少し、対応して火炎も収縮した。球状火炎が裸電線部を加熱するとき、心線に流れ込んだ熱は

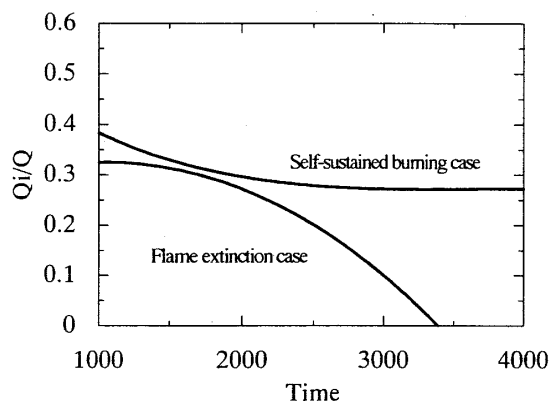


Fig. 11 Temporal variation of heat feedback ratio

二つの方向へ流れる。一部の熱は、対称面に向かって流れ、残りの熱は被覆部方向へ流れ、被覆材を気化させる。もし、前者が大きくなれば、熱の循環量が減少することになる。図 13 の消炎する場合の心線温度の時間変化を見ると、図 6 の自燃する場合と比較して対称面近くの温度が低くなっている。図 14 の気相から心線へ流入する熱流束の分布を見ると、自燃する場合に比べ、消炎する場合には心線に流れ込む熱量が少なくなっている。心線温度が低くなるのは、図 14 に示されているように、心線へ流入する熱量が少なく、また、心線の熱容量が大きいために、一部の裸電線部を加熱して裸電線部全体を高温に保つのは難しいためであると考えられる。図 14 で加熱されている領域を比較すると、自燃する場合には裸電線部がほぼ全域で加熱されているのに対し、消炎する場合には対称面付近のわずかな範囲が周囲の気体に冷却されている。この冷却されている範囲は、時間経過とともに徐々に広がり、消炎に至る。心線の一部が冷却されると、対称面方向へ向かって流れる熱の割合が増すため、熱の循環量が減少し、火炎が収縮すると考えられる。火炎が収縮すると、心線に流入する熱量が減少し、対称面付近の気相の温度が低くなる。このために冷却される裸電線部が広がり、さらに熱の循環量が減少すると考えら

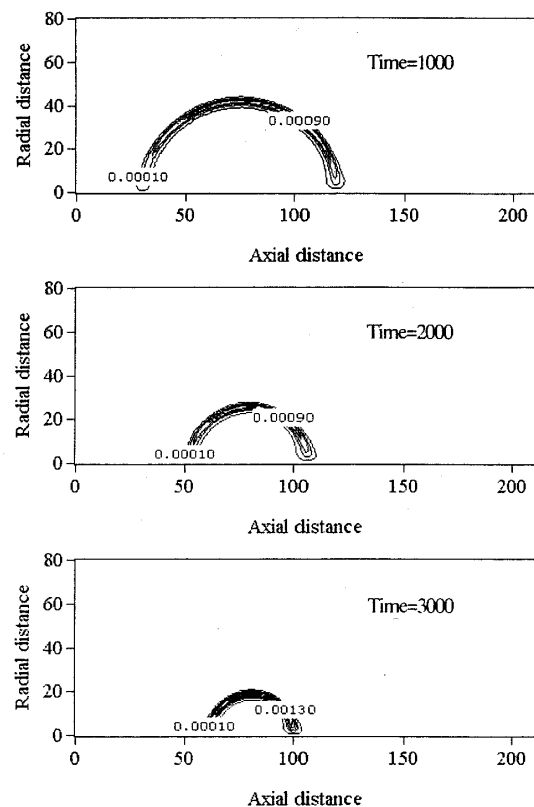


Fig. 12 Reaction rate contour of extinguishing flame

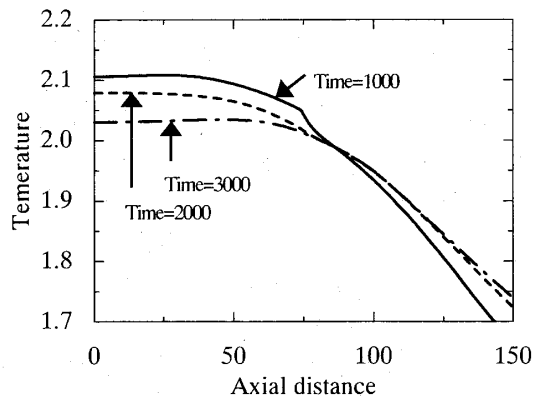


Fig. 13 Temporal variation of temperature distribution along wire (Flame extinction case)

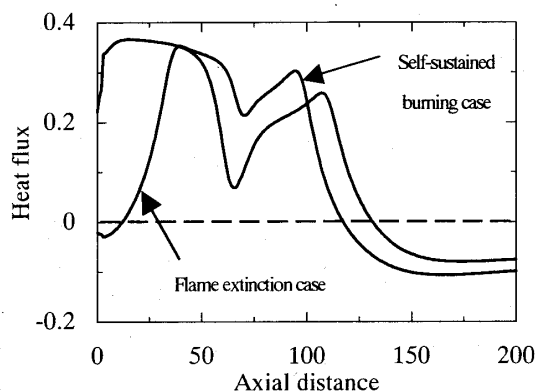


Fig. 14 Heat flux from gas to wire at time = 1000

れる。以上のことから、消炎に至る過程は次のようなものであると考えられる。対称面付近の心線が周囲空気によって冷却されると、対称面方向へ流れる熱の割合が増す。このため、被覆部方向へ向かって流れる割合が減少し、心線を通した熱の循環量、被覆材の気化量が減少し、火炎が収縮する。この過程を繰返して、最終的に消炎に至ると考えられる。このため、最も効率的に短時間で消炎する方法は、心線を冷却することであるとされる。

気化熱と被覆材厚みを変えた計算結果によれば、気化熱が大きいほど消炎しやすく、被覆材が薄いほど消炎しやすいという傾向が見られた。この数値解析モデルでは、同量の熱を受け取った場合、被覆材の気化熱が小さいほど、気化量が増すため、定常的な熱の循環が維持され、自然状態に入りやすいと考えられる。一方、気化熱が大きいと、気化量が減少するために、消炎しやすくなると考えられる。一方、次のような効果も影響していると考えられる。電線燃焼では、火炎半径は燃料の噴出速度の影響を受けている。この噴出速度は被覆材への熱の流入量に比例し、被覆材厚み、気化熱に反比例している。このため、被覆材の気化熱が

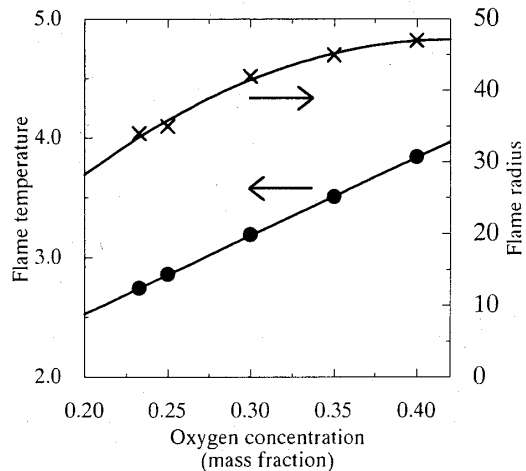


Fig. 15 Effect of oxygen concentration on flame temperature and radius

小さいほど火炎半径は大きくなり、火炎と対称面の間隔が小さくなる。この場合には、対称面付近で心線が周囲空気に冷却されることがなく、自然状態に入りやすくなると考えられる。逆に、気化熱が大きいと、火炎半径が小さくなるために、対称面付近で心線が冷却され、早い時間に消炎に至ると考えられる。

3・4 酸素濃度の影響 電線燃焼の微小重力試験で、雰囲気酸素濃度の上昇に伴い、火炎温度が上昇し、火炎半径が大きくなるという変化が観察されている。図15に示すように、本計算でも同様の変化が確認された。この結果を液滴燃焼と比較して考えると、心線の役割がよくわかる。実際、液滴燃焼では酸素濃度の上昇に伴い、火炎温度が上昇し、火炎半径は小さくなって、火炎半径の挙動が電線燃焼と逆である。拡散火炎の場合、酸素濃度が増すと燃焼が活発になり、火炎温度が上昇する。しかし、液滴燃焼での火炎位置は、当量比の関係で決まるので、高酸素濃度環境下では火炎半径が小さくなる。他方、電線燃焼の場合、同様の理由により火炎温度が上がり、火炎からの熱の供給によって裸電線部も高温となる。このため、心線から気化部に供給される熱量が増し、燃料の噴出速度が増大する。図8で見たように、電線燃焼での被覆材の気化速度と火炎半径は比例関係にあり、燃料の噴出速度の増大に伴って、火炎半径が大きくなったと考えられる。この現象は、熱伝導性のよい心線の存在と、その心線を通した熱の循環によってもたらされる、電線燃焼に特有の現象である。通常、宇宙ステーションの酸素濃度は、地上大気に比べ高く設定されており、被覆電線から発火した際、酸素濃度の違いによって消炎せずに周囲の可燃性物体への引火が起り、火炎に発展することも考えられる。電線材料の選定の際には、こ

の現象を考慮に入れ、高酸素濃度環境下でも早期に消炎に至る材料を開発する必要があると考えられる。

4. ま と め

宇宙ステーションにおける火災防止の基礎研究の一つとして、微小重力場における被覆電線の燃焼機構を調べるために、数値シミュレーションを行った。その結果、微小重力場における被覆電線の燃焼機構は、次の二つの過程から成り立っていることが確認された。

(1) 球状に燃え広がった火炎に触れる裸電線からの熱の供給によって心線が加熱され、被覆材の端で活発な気化が起きる。(2) 点湧き出した燃料気体が放射状に拡散し、酸素と会合して球状の火炎を形成する。この過程において、非常に熱伝導性のよい心線が重要な役割を果たしている。また、被覆電線から発生した火炎の消炎に至る過程は、心線を通した熱の循環量の減少に伴って被覆材の気化量が減少し火炎が収縮するというものであり、この過程を繰返して消炎に至る。心線からの熱の供給量の減少が、消炎に至る原因であることから、最も効率的に消炎する方法は心線を冷却することであると考えられる。一方、熱伝導性のよい心線の存在と、その心線を通した熱の循環は、電線燃焼

に特有な現象をもたらす、その一つに、雰囲気酸素濃度の上昇に伴い、火炎温度が上昇し、火炎半径が大きくなるという現象が確認された。しかしながら、本計算は、1段階の被覆材の熱分解と総括反応に基づくものであり、詳細な被覆材の熱分解機構が得られれば、さらに詳しい解析が可能になると考えられ、詳細な被覆材の熱分解の解析が待たれる。

文 献

- (1) 菊地政雄・佐藤敦樹・藤田修・伊藤献一, 第34回燃焼シンポジウム前刷集, (1996), 514-516.
- (2) 菊地政雄・佐藤敦樹・藤田修・伊藤献一・櫻谷隆, 第35回燃焼シンポジウム前刷集, (1997), 79-81.
- (3) 菊地政雄・佐藤敦樹・藤田修・伊藤献一・櫻谷隆, 第36回燃焼シンポジウム前刷集, (1998), 465-467.
- (4) 平田哲也・佐藤順一・岩波隆・岩崎茂弘・今川吉郎・伊藤献一, 第36回燃焼シンポジウム前刷集, (1998), 480-482.
- (5) 藤田修・菊池政雄・伊藤献一・櫻谷隆, 第37回燃焼シンポジウム前刷集, (1999), 143-144.
- (6) 梅村章・平田哲也・佐藤順一, 第36回燃焼シンポジウム前刷集, (1998), 453-455.
- (7) 梅村章・平田哲也・佐藤順一, 第37回燃焼シンポジウム前刷集, (1999), 103-104.
- (8) Umemura, A., *Prog. Energy. Combust. Sci.*, **20** (1994), 325-372.