

高温加熱面と衝突する液粒の最大蒸発率点
近傍における蒸発に関する研究

高野 孝樹

①

高温加熱面と衝突する液粒の最大蒸発率
点近傍における蒸発に関する研究

高野孝義

目 次

	Page
第1章 緒 論	1
1. 1 はじめに	2
1. 2 加熱面上における液粒の蒸発に関する従来の研究	4
1. 2. 1 液粒の寿命曲線と蒸発形態	4
1. 2. 2 液粒の蒸発速度、寿命	6
1. 2. 3 スフェロイド状蒸発領域における熱伝達	7
1. 2. 4 ライデンフロスト温度とその近傍における固液直接接触	8
1. 2. 5 液膜蒸発領域および沸騰蒸発領域	9
1. 3 本論文の目的と構成	10
1. 4 主な記号と添え字	13
第2章 材質が異なる加熱固体面に衝突して蒸発する液粒に関する実験結果 および検討	16
2. 1 はじめに	17
2. 2 固体面試料	18
2. 3 実験装置	20
2. 3. 1 実験装置の概要	20
2. 3. 2 単一液粒の滴下装置	21
2. 3. 3 液粒の蒸発挙動の撮影装置	23
2. 4 実験方法	25
2. 4. 1 初期液粒直径の測定	25
2. 4. 2 液粒の寿命の測定	25
2. 4. 3 液粒試料に関する実験条件	25
2. 4. 4 実験手順	26
2. 5 材質が異なる加熱面との衝突による液粒の蒸発	27
2. 5. 1 寿命曲線の概要	27

2. 5. 2	加熱面材質の熱伝導性の影響	31
2. 5. 3	表面汚損の影響	33
2. 6	セラミックス加熱面との衝突による液粒の蒸発	40
2. 6. 1	寿命曲線	40
2. 6. 2	蒸発様相	43
2. 6. 3	固液接触面の挙動	49
2. 6. 4	セラミックス加熱面の表面粗さの影響	56
2. 6. 5	初期液粒直径の影響	58
2. 6. 6	金属加熱面における現象との関係	60
2. 7	第2章のまとめ	67

第3章 セラミックスが被覆された加熱面に衝突して蒸発する液粒に関する

	実験結果および検討	69
3. 1	はじめに	70
3. 2	加熱固体面試料	71
3. 2. 1	固体面試料の形状	71
3. 2. 2	溶射法によるセラミックスの被覆	72
3. 3	実験装置および実験方法	74
3. 3. 1	実験装置	74
3. 3. 2	液粒試料	75
3. 3. 3	実験方法	75
3. 4	実験結果	77
3. 4. 1	寿命曲線	77
3. 4. 2	蒸発様相	82
3. 5	核沸騰状蒸発領域における被覆層の材質の影響	88
3. 5. 1	固液接触面の挙動	88
3. 5. 2	加熱面から液粒への熱伝達	89
3. 6	第3章のまとめ	99

第4章 溶射セラミックス被覆加熱面に衝突する液粒の蒸発に対する 表面粗さおよび被覆層厚さの影響	101
4.1 はじめに	102
4.2 加熱固体面試料	103
4.2.1 表面粗さが異なる試料	103
4.2.2 被覆層厚さが異なる固体面試料	105
4.3 実験装置および実験方法	106
4.4 表面粗さが異なるセラミックス被覆層を有する加熱面との 衝突による液粒の蒸発	109
4.4.1 寿命曲線	109
4.4.2 核沸騰状蒸発領域の広さ	114
4.4.3 核沸騰状蒸発領域における液粒寿命	116
4.4.4 核沸騰状蒸発領域における蒸発様相	116
4.4.5 固液接触面の大きさと加熱面から液粒へ伝達される熱流束	123
4.4.6 金属系加熱面における現象との比較	129
4.5 厚さが異なるセラミックス被覆層を有する加熱面との衝突による 液粒の蒸発	131
4.5.1 寿命曲線	131
4.5.2 核沸騰状蒸発領域における蒸発様相	137
4.5.3 固液接触面の大きさと加熱面から液粒へ伝達される熱流束	140
4.5.4 溶射ジルコニアセラミックス被覆加熱面上で液粒が 蒸発する現象に対する温度浸透厚さ	144
4.5.5 溶射ジルコニアセラミックスの被覆層厚さによる 伝熱量の変化	145
4.6 第4章のまとめ	149
第5章 加熱面から液粒への熱伝達に関する理論的考察	151
5.1 はじめに	152

5. 2	解析の仮定	153
5. 2. 1	セラミックス加熱面上に形成される液膜	153
5. 2. 2	加熱面温度変化	153
5. 2. 3	固液接触面の大きさ	154
5. 2. 4	セラミックス被覆層内の初期温度分布	154
5. 3	溶射セラミックス被覆層の有効熱伝導度	155
5. 4	基礎方程式と数値解法	158
5. 5	計算結果の概要	161
5. 5. 1	被覆層内温度分布、熱流束分布、積算伝導熱量の計算例	161
5. 5. 2	被覆層厚さによる伝熱量の変化	163
5. 5. 3	結合材層の影響	163
5. 5. 4	被覆層の熱拡散率の影響	165
5. 5. 5	固液接触面上の液膜の影響	167
5. 6	溶射セラミックスの被覆層厚さが異なる場合の液粒の寿命	174
5. 7	溶射セラミックス被覆層の表面粗さが異なる場合の液粒の寿命	186
5. 8	溶射セラミックス被覆層の材質が異なる場合の液粒の寿命	191
5. 9	セラミックス (a) 加熱面における液粒の寿命	195
5. 10	第5章のまとめ	198
第6章	加熱面材質の熱物性値の測定	199
6. 1	はじめに	200
6. 2	測定原理および測定装置	202
6. 3	試料	203
6. 3. 1	金属試料およびセラミックス試料	203
6. 3. 2	溶射セラミックス試料	203
6. 4	溶射セラミックスの密度	205

6. 5	金属およびセラミックス加熱面材質の熱伝導率	208
6. 6	溶射セラミックスの熱拡散率、比熱および熱伝導率	209
6. 6. 1	溶射アルミナの熱拡散率	209
6. 6. 2	溶射ジルコン酸マグネシウムおよび溶射ジルコニアの熱拡散率	212
6. 6. 3	溶射セラミックスの比熱	218
6. 6. 4	溶射セラミックスの熱伝導率	220
6. 7	溶射セラミックスの有効熱伝導度	223
6. 7. 1	溶射セラミックスの熱伝導率の雰囲気気体圧力に対する依存性	223
6. 7. 2	溶射セラミックスの熱伝導率に対する気孔の効果	224
6. 7. 3	大気雰囲気下における溶射セラミックスの有効熱伝導度の温度依存性	228
6. 8	第6章のまとめ	229
第7章	結 論	230
	参考文献	236
	謝 辞	243
	発表論文	

第1章 緒 論

第1章 目 次

	Page
1. 1 はじめに	2
1. 2 加熱面上における液粒の蒸発に関する従来の研究	4
1. 2. 1 液粒の寿命曲線と蒸発形態	4
1. 2. 2 液粒の蒸発速度、寿命	6
1. 2. 3 スフェロイド状蒸発領域における熱伝達	7
1. 2. 4 ライゲンフロスト温度とその近傍における固液直接接触	8
1. 2. 5 液膜蒸発領域および沸騰蒸発領域	9
1. 3 本論文の目的と構成	10
1. 4 主な記号と添え字	13

1. 1 はじめに

液粒が蒸発する現象には、液体燃料の気化、噴霧乾燥による造粒、高温物体の冷却など、工業上、種々の応用例がある。いずれにおいても蒸発を促進して各システムの特性を向上させるためにいろいろと研究が行われてきている。一般的には、よく微粒化して高温の高速気流中で蒸発させる等の方法により大きな蒸発速度が得られている。一方、類似した温度条件下などでは、液粒を加熱固体面に直接的に接触させて蒸発させるのが最も効果的な方法の一つであり、これは霧雰気温度が高い場合にも圧力が高い場合にも同様である。液粒が加熱面に衝突して蒸発する現象においては、加熱面温度が十分に高く液体が加熱面表面に直接的に接触することなく、加熱面から液粒への熱伝達がこれらの間に形成され、大きな伝熱抵抗となる蒸気層を介して行われる場合には加熱面の影響は小さい。これに対して、加熱面と液粒とが容易に直接接触を生じ得るような条件下では液粒への熱伝達特性は極めて良好となり、加熱面側の特性が現象を強く支配する。特に、高温領域で加熱面と液粒との直接接触を実現し、また、この状態を継続的に維持することにより非常に大きな蒸発速度を得ることができる。高温固体面と液体の直接接触およびこれが熱伝達へ及ぼす効果に関してはいろいろと検討されてきているが、この現象が認められ得る温度範囲など、実際的には不明な面も多い。

加熱された固体面に液粒が衝突して蒸発する現象は、液体の飽和温度以上の高温面に、必要に応じ速当に微粒化した液粒や噴霧を衝突させて冷却する目的で使用されている例が多い。工業的には蒸発潜熱が大きい水が用いられ、連続鑄造工程等における強制的な冷却や圧延鋼板の冷却、および焼き入れなどの熱処理へ応用されている。このような高温面の冷却を目的とする場合に対し、液体を気化し蒸気を生成することを目的とする例としては、スプレー蒸発器や空気調和などへの用途がある。また、液体燃料の気化、燃焼に関するものとしては壁面蒸発式ディーゼル機関や、火花点火機関の吸気管内における燃料の蒸発や加熱面を使用した冷間時の蒸発の促進、そして、高温の蒸発板に軽質燃料を噴射して気化させる蒸発型燃焼器などがある。高温固体面との衝突、干渉が意図されていない場合でも実際の問題としてこの影響が生じていることも多い。直接噴射方式ディーゼル機関では燃焼室内に噴射された燃料液滴は高温高圧の霧雰気下で蒸発が行われるが、その一部は必ず壁面に衝突して蒸発している。これは重油の噴霧燃焼器な

どでも同様である。液体燃料の蒸発過程は混合気の濃度に影響し、その後の反応過程、燃焼過程を支配し、着火遅れ、燃焼速度、排気性能などに影響を及ぼす。燃焼室における蒸発挙動、燃焼挙動を予測し、最適運転条件を定めたり改善したりするには固体壁面の影響について知られている必要がある。内燃機関用の石油代替燃料として蒸発潜熱が大きいアルコールが使用されるような場合には特にその必要性が増すと考えられる。

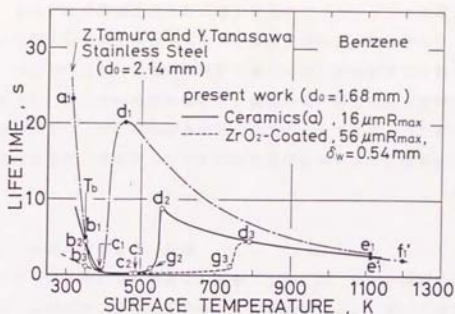
単一液滴に関する現象は広範囲にわたる応用例の最も基礎的な現象である。本研究では液粒が高温面に直接接触して非常に大きな蒸発速度が得られる現象を対象とし、高効率な蒸気生成や高熱流束除去による冷却を目的として、基本的な単一液滴に関する現象の範囲内での特性について検討する。

1. 2 加熱面上における液粒の蒸発に関する従来の研究

1. 2. 1 液粒の寿命曲線と蒸発形態

加熱面上において液粒が蒸発する場合の加熱面温度に対する液粒の寿命の関係を表す寿命曲線など、現象の基本的な特性が Tamura & Tanasawa⁽¹⁾による実験で明らかにされている。加熱面上で蒸発する単一液滴の寿命曲線の一例として、Tamura & Tanasawaによりステンレス鋼製の加熱面を使用して測定された、直径が $d_0 = 2.14 \text{ mm}$ であるベンゼン滴の寿命曲線を第1. 1図に示す。なお、第1. 1図には、本研究においてセラミックス (a) 加熱面およびステンレス鋼表面に薄いジルコニア (ZrO_2) の被覆層 (被覆層厚さ $\delta w = 0.54 \text{ mm}$) を設けた加熱面で実測された $d_0 = 1.68 \text{ mm}$ のベンゼン滴の寿命曲線をも併せて示している。第1. 1図上の b_1 、 b_2 、 b_3 はそれぞれステンレス鋼加熱面、セラミックス (a) 加熱面、ジルコニア被覆加熱面の寿命曲線上においてベンゼンの沸点 T_b に相当する加熱面温度に対応する点を示している。また、 c_1 、 c_2 、 c_3 は各加熱面において寿命が極小となる最大蒸発率点、 d_1 、 d_2 、 d_3 は寿命が極大となるライデンフロスト点である。Tamura & Tanasawaにより、このような単一液滴に関する寿命曲線は加熱面表面温度によって次のような五領域に分けられている。すなわち、第1. 1図において、液粒の沸点 T_b に相当する加熱面温度よりも低い領域 a_1 - b_1 は液膜蒸発領域、沸点から最大蒸発率点までの領域 b_1 - c_1 は沸騰蒸発領域、最大蒸発率点からライデンフロスト点までの領域 c_1 - d_1 は遷移領域、ライデンフロスト点から着火点までの領域 d_1 - e_1 はスフェロイド状蒸発領域、着火点以上の領域 e_1 '- f_1 ' はスフェロイド状燃焼領域とされている。液粒の寿命曲線は、液粒の種類が水である場合を中心として、その後、多くの研究者により測定されているが、各領域における蒸発形態との関連から基本的にはこれと一致する分類がなされてきている。

加熱面上で蒸発する液粒は、沸騰曲線における自然対流、核沸騰、遷移沸騰、膜沸騰と類似した挙動を示すことが知られている。加熱面温度が液粒の沸点よりも低い場合には、加熱面上の液粒は平凸レンズ状、あるいはより薄い液膜状に広がり、液内部の熱伝導や自然対流によって熱伝達が行われ液膜の表面から蒸発する。加熱面温度が沸点を越えると、加熱面を濡らす液内部に気泡が発生するようになる。加熱面温度が高くなるにつれて気泡の発生が活発になり核沸騰により蒸



第1. 1図 ベンゼンの寿命曲線

発し、最大蒸発率点で寿命が極小となる。遷移領域は、蒸発形態が、液粒が加熱面に直接接して核沸騰を伴って蒸発する形態から、加熱面と直接接せず液と加熱面との間に薄い蒸気層を形成し、これに支持されてスフェロイド状で蒸発する形態に遷移する過程である。したがってこの領域における現象は両方の現象が時間的に交互に現れたり、液粒が大きい場合には局部的にいずれかの現象が現れたりする。沸騰、蒸発の途中で液が分裂するなど不安定な挙動も見られる領域である。スフェロイド状態では熱抵抗が大きい蒸気膜を介して液粒への熱伝達が行われるので寿命は長い。

本研究では最大蒸発率点近傍の加熱面温度において液粒の蒸発時間が著しく短くなる現象を対象とするわけであるが、第1. 1図の Tamura & Tanasawaによるステンレス鋼加熱面の場合の寿命曲線からもわかるように、一般的に使用されている金属加熱面の場合にはこの温度範囲は狭い。このため、金属加熱面のみを対象とした従来の研究では、寿命曲線上で液粒の蒸発形態毎に領域に分割するための一つの境界点として扱われている。また、これまで、最大蒸発率点近傍の温度における液粒の蒸発形態についても、加熱面上に薄く広がって瞬時に蒸発するというような画一的な表現がなされているにすぎない。これに対して、本研究で取り扱う第1. 1図に示したような熱伝導率が金属系の材質よりも低いセラミック

ス加熱面、あるいは金属面表面を熱伝導率が低いセラミックスで被覆した加熱面の場合には、最大蒸発率点 c_2 、 c_3 を含み高温度側に広がる広範な加熱面温度範囲 b_2-g_2 、 b_3-g_3 において液が加熱面と直接接して核沸騰の状態できわめて短時間で蒸発し、同じ加熱面温度範囲の金属加熱面の場合よりも非常に大きな蒸発速度が得られることがわかる。本研究では、主としてこのような最大蒸発率点を含み、この低温側、高温側へ広がる加熱面温度範囲における現象について調べる。

1. 2. 2 液粒の蒸発速度、寿命

高温面上における液粒の蒸発速度や寿命については、液粒の種類や大きさ、加熱面の材質や表面粗さ、雰囲気圧力などとの関係について、多くの研究者により報告されてきている。

Borishansky⁽²⁾ は、水、エタノールなどの小液滴による寿命曲線に、核沸騰が生ずる上限の加熱面温度、スフェロイド状態となる下限の加熱面温度が存在し、これらが液粒や加熱面材質の熱物性値により異なることを示すとともに、スフェロイド状態の液粒の寿命を計算した。また、同じ温度領域でも液粒の体積が非常に大きく加熱面上に平板状に広がる場合の挙動について調べ、スフェロイド状態での液滴と加熱面間の平均熱伝達率を計算している。

Tamura & Tanasawa⁽¹⁾ は、種々の液体燃料および水、エタノールからなる小液粒を用いて加熱面上での蒸発について実験を行い、加熱面温度に対する現象の基本的な特性の全容を明らかにした。そして、スフェロイド状蒸発領域において、液粒直径の時間変化より加熱面が存在する場合の蒸発速度定数が求められている。また、液膜蒸発領域および沸騰蒸発領域のステンレス鋼加熱面の場合の寿命を表す実験式が得られている。同様に、燃焼との関連から、手代木・大橋⁽³⁾ は、各種の液体燃料の蒸発現象に対する加熱面材質、表面粗さの影響などについて調べている。

Baumeisterら⁽⁴⁾ より、ライデンフロスト温度以上のスフェロイド状蒸発領域において、液粒の体積により加熱面上での形状が異なることを考慮し、球状、半球状、平板状のいずれに対しても適用できる液粒の寿命の解析結果が示されている。Patel & Bell⁽⁵⁾ は、0.05~1.0 m² の範囲の体積の水、エタノール、

ベンゼン、四塩化炭素、*n*-オクタンを用いて、ライデンフロスト温度以上の領域における液粒体積による寿命やライデンフロスト温度の変化について実験により調べている。Satcunanathan⁽⁶⁾は、やはりライデンフロスト温度を超える温度領域において、加熱面上で半球状の形状で蒸発する液粒の蒸発速度定数を、半球状液粒の加熱面上への投影面積の時間変化より計算する簡易な形の式を求めている。

燃焼工学との関連からは雰囲気圧力による液粒の蒸発現象の変化が調べられている。Temple-Pediani⁽⁷⁾は、8.9気圧までの圧力範囲で各種の燃料液粒の寿命曲線を測定し、圧力によりライデンフロスト温度付近の寿命が大きく変化するなど、雰囲気圧力による現象の基本的な動向を明らかにしている。廣安ら⁽⁸⁾も、5.0気圧までの圧力範囲で各種燃料液粒の寿命曲線を求めており、圧力が高い場合の液膜蒸発領域とスフェロイド状蒸発領域における理論解析結果が示されている。

このように、加熱面の冷却を目的とした研究では広い範囲の大きさをもつ水を使用して、膜沸騰的な挙動を示す高温から加熱面を冷却することを想定した研究が多く行われ、また、燃焼に関連する研究では燃料液粒の液膜蒸発領域やスフェロイド状蒸発領域における蒸発速度に関する研究が行われてきている。

1. 2. 3 スフェロイド状蒸発領域における熱伝達

スフェロイド状蒸発領域における熱伝達に関しては従来より多くの解析的な研究がなされ、現象の機構が明らかにされてきている。たとえば Gottfriedら⁽⁹⁾は、加熱面上で蒸発する場合に球状の形態をとる小さな液粒について、液粒の下面における蒸気膜への伝導伝熱、液粒の全表面における輻射伝熱を考え、また、液粒下面における蒸気膜への蒸発、液粒上面における分子拡散による蒸発を考慮して、寿命や液粒直径の経時変化を計算している。このほかにも、加熱面上で半球状や円板状の形態をとって蒸発する大きな液滴に関する熱伝達、物質移動の解析が Wachtersら⁽¹⁰⁾、Gottfried & Bell⁽¹¹⁾、Baumeisterら⁽⁴⁾によって行われており、熱伝達率や寿命が計算されている。また、最近、Sen & Law⁽¹²⁾、Nguyen & Avedisian⁽¹³⁾により、より厳密なモデルに基づいた数値解析が行われ、蒸気膜の厚さや液粒を支持する力の大きさ、液粒の直径、温度の時間変化や寿命が求

められている。

1. 2. 4 ライデンフロスト温度とその近傍における固液直接接触

ライデンフロスト温度は寿命が極大となる加熱面温度と定義され、寿命曲線上において、加熱面と液粒とが直接接触して蒸発する領域と加熱面と液粒の間に蒸気層が形成されて膜沸騰的に蒸発する領域の境界を与える一つの限界的な温度と認識され、実用上の必要性から、従来より多くの研究が行われ、測定結果が報告されてきている^(1,5,9,10,14)。しかし、これらは必ずしも一致した結果を与えているわけではなく、同一種類の液体に関する測定値も広い範囲に分布していて不一致がみられる。また、加熱面の材質の種類や、粗さ、汚損などの表面条件の影響を受け変化することも知られている。これに対して、Baumeisterら⁽¹⁵⁾は、加熱面材質として銅、アルミニウム、黄銅、ステンレス鋼およびバイレックスガラスを使用して、水、エタノールについて、ライデンフロスト温度に対する加熱面材質の影響を実験により調べている。そして、液体の臨界温度、加熱面の熱物性値、液体および固体の表面エネルギーを考慮することにより、有機液体、水、液体金属のような広範囲の液体のライデンフロスト温度を整理して表すことができることを示した⁽¹⁶⁾。

ライデンフロスト温度は液粒の蒸発時間によって規定される性格をもつばかりでなく、固液直接接触に関連した伝熱現象において重要な意味をもつものであり、これに関連した実験と解析⁽¹⁷⁾がなされてきている。また、小竹⁽¹⁸⁾は、最大蒸発率点からライデンフロスト温度にかけての領域における加熱面上の液滴の蒸発について調べ、蒸気膜の上に支えられた板状に存在する広がり液滴の気液界面の不安定現象により固液接触が生じることを示している。西尾・平田^(19,20)は、ライデンフロスト温度以上の温度領域でも液粒が加熱面に衝突する過程では固液の直接接触が生じていることを実験により明らかにした。そして、固液接触による加熱面表面の温度降下と、観察される固液接触面の挙動が良く対応することから、固液接触により生ずる接触面温度降下が液粒の挙動を支配しており、ライデンフロスト温度を決めることを示している。固液接触面が形成されると接触面温度は急激に降下する。Sekiら⁽²¹⁾はステンレス鋼製加熱面に、また、Groendes & Mesler⁽²²⁾は石英ガラス製加熱面に液粒が衝突して生ずる表面温度変化の薄膜

抵抗温度計による実測例を示している。

1. 2. 5 液膜蒸発領域および沸騰蒸発領域

液膜状蒸発領域に関する研究としては、小過熱度の低温域における高熱流束による冷却を目的として、戸田⁽²³⁾や Bonacina ら⁽²⁴⁾により、衝突液滴に形成される液膜の熱伝導と蒸発伝熱の解析が行われている。同様に、Rizza⁽²⁵⁾は加熱面内の温度分布を考慮し、液膜周辺部で熱流束が大きくなる現象の影響に関する解析、Marzo & Evans⁽²⁶⁾は平凸レンズ状の液膜の半径が一定で液膜厚さが半径方向に異なる厚さを持ち、液膜内の半径方向熱流束分布がある場合の解析を行い、蒸発時間を計算している。

沸騰蒸発領域や最大蒸発率点の近傍における現象を対象とする研究例として、Yang⁽²⁷⁾は、加熱面上で蒸発する液粒の形状を、平凸レンズ、円板、回転楕円体、球等の形状で近似的に表し、エネルギー保存則より、各形態を示す場合の寿命を計算している。これによると、核沸騰状蒸発領域あるいは最大蒸発率点近傍では液粒が加熱面上で平凸レンズの形状を維持するとし（接触角一定）、ローゼナウによるプール核沸騰データの整理式、あるいはプール沸騰の極大熱流束に対するクテラゼの式に従う熱伝達が行われるとしてこれらを過渡沸騰状態の伝熱量計算に適用している。

Michiyoshi & Makino⁽²⁸⁾は、銅、黄銅、炭素鋼、ステンレス鋼という金属製の平滑面を加熱面として、直径が2.54～3.29 mmの範囲の大きさをもつ水滴の寿命曲線を得ている。そして、蒸発する液粒の加熱面上への投影面積、加熱面表面温度および液粒温度を実測することにより、沸騰曲線における核沸騰域、遷移沸騰域、膜沸騰域に対応するような、加熱面材質によらない過熱度と熱流束の関係が得られている。また、同様に、ライデンフロスト温度付近からこれを越える温度において生ずる固液の直接接触時間を計測し、この短い固液接触時間内において伝達される熱流束が非常に大きくなることを示している⁽²⁹⁾。

以上のように、従来、液粒と加熱面とが直接接触し核沸騰の状態で蒸発する温度領域の現象に関する研究例は少なく、金属加熱面の範囲を越えて、セラミック類のような金属とは大きく異なった材質について実際に現象が調べられた例はほとんどみられない。

1・3 本論文の目的と構成

前節で示したように、加熱面上で液粒が蒸発する現象に関する研究は寿命の極大を与えるライデンフロスト点の近傍からスフェロイド状蒸発領域、および液膜蒸発領域に集中しており、核沸騰を伴う最大蒸発率点の近傍における現象に関するものは非常に少なく、現象は明かになっていない。これは、現在までの大部分の研究が、熱伝導率が比較的高い範囲に限られる金属加熱面を対象としているため、最大蒸発率点に相当するような短い寿命を示す加熱面温度範囲が非常に狭いことによると思われる。また、金属加熱面を使用した実験では酸化や汚損というような表面条件の影響を受けて観察される現象が変化しやすいことや、金属系加熱面の場合に観察される最大蒸発率が低温域に位置し、実用上重要な加熱面温度範囲はこれよりも高いスフェロイド状蒸発領域に対応する温度範囲である場合が多いことも関係していると思われる。

加熱面に衝突して蒸発する液粒の寿命が極小となる温度領域の現象は、噴霧燃料の蒸発や液体による高温材の冷却に関して重要である。本研究では加熱面材質の範囲を拡大するなどの実験手段により、従来の研究で詳しい観察があまりなされていない最大蒸発率点近傍の現象を実際に広い温度領域で実現し、そこで見られる現象について調べ、熱伝達について検討する。以下、この問題に対する研究の方針の簡単な説明と、本論文の構成について述べる。

第2章では、最大蒸発率点近傍の温度領域における現象を把握する目的で、熱伝導率が広い範囲で段階的に異なる加熱面を使用した実験により、加熱面材質の熱伝導率の影響について検討した結果について述べる。加熱面材質としては、従来の研究でも多く使用されてきている鋼やステンレス鋼などの金属類のほか、これらよりも低い熱伝導率をもつセラミックス ($SiO_2-Al_2O_3$ 系)を使用する。熱伝導率が低く適当な表面粗さをもつ加熱面では、液粒が加熱面と直接接して核沸騰の状態では蒸発する、最大蒸発率点を中心とした温度領域が広く高温側へ拡大し、かつ、寿命の値も金属加熱面よりも短くなる傾向となることを示す。また、ここで得られる結果と従来の研究による結果とを比較することにより、表面粗さや酸化皮膜による表面汚損など、表面条件の影響について検討を行う。

第3章では、第2章で得られた結果に基づいて、熱伝導率が高い金属加熱面の表面に低熱伝導性のセラミックスを薄く被覆した、より実用的な加熱面の場合に

見られる現象について、実験により検討した結果を示す。酸化膜やスケールが付着した場合は異なり、積極的に熱抵抗層を設けたものである。加熱面表面近傍の低熱伝導性と表面粗さとを兼ね備えたセラミックス被覆層を設けることにより、高温領域にわたる広い温度範囲で液粒の蒸発促進効果が得られる。蒸発過程の液粒の挙動および加熱面から液粒への熱伝達について検討を重ね、最大蒸発率点近傍の温度領域における現象の概要について調べる。

第4章では、セラミックス被覆層の材質は同一とし、厚さが同じで表面粗さだけが異なる被覆層を設けた固体面試料、そして、表面粗さが同じで厚さが異なるような被覆層を設けた固体面試料を製作し、これらを加熱面として使用することにより、溶射セラミックス被覆面に固有な表面粗さと被覆層厚さが最大蒸発率点近傍の温度領域における現象に及ぼす影響について調べた結果について述べる。対象とする温度領域では固液が直接接触する状態で熱伝達が行われるため、これらの条件の影響が強く現れる。表面粗さが大きい場合には、加熱面温度が十分に高い領域まで液粒と加熱面の衝突時に局部的に固液接触を生じやすく、より広い加熱面温度範囲で液粒の寿命が短くなる。また、寿命の値も表面粗さの影響を受けて変化する。被覆層厚さが薄い場合には、加熱面から液粒への熱伝達に対する低熱伝導性の被覆層を設けたことに起因する熱抵抗は小さいが、加熱面表面に形成される固液接触面近傍の加熱面内に生じる過渡的な温度変化に対して熱伝導性が良い母材の影響が現れやすい。また、被覆層が厚い場合には、固液接触による温度変化が影響する領域は表面付近の薄い範囲に限られるので、現象が被覆層厚さには依存しなくなる。

第5章では、最大蒸発率点を含む核沸騰状蒸発領域で蒸発する液粒に対し、実験による観察結果に基づく簡単なモデルを使用して、セラミックス被覆層を有する加熱面から液粒への過渡的な熱伝達について数値計算により検討する。蒸発過程の液粒底部の固液接触面上に薄い液膜が存在し、これを通して加熱面から液粒への熱伝達が行われる状況を考えるが、液膜の熱抵抗を考慮すると液粒の種類による寿命の計算結果の差が小さくなり、また、被覆層の厚さや材質が異なる場合にもほぼ一致する結果が得られることを示す。

第6章では、加熱面材質の熱物性値の実測結果について述べる。特に、本研究で使用した溶射セラミックス被覆層の場合には、それがセラミックス粒子の溶融、

急冷という特殊な過程を経て形成されることや、溶射方法の種類や溶射施工時の条件により得られる組織が異なってくることから、その熱物性値には不明な点が多い。これを実測することにより可能な範囲で正確に定める。また、大気中における使用状況を考え、気孔内に存在する空気の影響を含めた有効熱伝導度について検討した結果についても述べる。第5章の定量的な計算にはここで得られた加熱面熱物性値を使用する。

最後に本論文のまとめとして、本研究による成果ならびに今後の課題について第7章に述べる。

主な記号

- a : 加熱面材質の熱拡散率 cm^2/s
 (被覆がある加熱面の場合は被覆層材質の熱拡散率)
- a_e : 大気雰囲気下における見かけ熱拡散率 cm^2/s
- a_w : 加熱面材質の熱拡散率 cm^2/s
- A_0 : 一定面積 cm^2
- \bar{A} : 寿命期間内の時間平均固液接触面積 mm^2
- c : 加熱面材質の比熱 $\text{J}/(\text{g}\cdot\text{K})$
 (被覆がある加熱面の場合は被覆層材質の比熱)
- c_{su} : セラミックス被覆加熱面の基盤材質の比熱 $\text{J}/(\text{g}\cdot\text{K})$
- c_l : 液粒試料の比熱 $\text{J}/(\text{g}\cdot\text{K})$
- d_0 : 初期液粒直径 mm
- D : 固液接触面の直径 mm
- \bar{D} : 寿命期間内の時間平均固液接触面直径 mm
- I_α : α 相に対するX線回折強度 (面指数 (113))
- I_γ : γ 相に対するX線回折強度 (面指数 (400) および (440))
- L : 蒸発潜熱 J/g
- q : 熱流束 $\text{W}/\text{cm}^2, \text{W}/\text{m}^2$
- q_0 : 熱流束 (一定値) $\text{W}/\text{cm}^2, \text{W}/\text{m}^2$
- \bar{q} : 寿命期間内の時間平均熱流束 $\text{W}/\text{cm}^2, \text{W}/\text{m}^2$
- \bar{q}_0 : 寿命期間内の時間平均熱流束 (実測値) $\text{W}/\text{cm}^2, \text{W}/\text{m}^2$
- \bar{q}_c : 寿命期間内の時間平均熱流束 (計算値) $\text{W}/\text{cm}^2, \text{W}/\text{m}^2$
- Q : 寿命期間内に加熱面から液粒へ伝えられる熱量 J
- Q_0 : $= Q / (T_{w0} - T_b)$ J/K
- \bar{R} : 寿命期間内の時間平均固液接触面半径 mm
- R_{max} : 表面粗さ (最大高さ) μm
- R_z : 表面粗さ (十点平均粗さ) μm

- t : 経過時間 ms
 T_b : 液粒試料の沸点 K
 T_c : 接触面温度 K
 T_E : 熱処理温度 K
 T_L : ライデンフロスト温度 K
 T_{10} : 初期液粒温度 K
 T_{UL} : 上限温度 K
 T_W : 加熱面温度 K
 T_{W0} : 初期加熱面表面温度 K
 T_{Wi} : 加熱面表面温度 K
 T^* : $= (T_W - T_b) / (T_{W0} - T_b)$
 V_0 : 初期液粒体積 mm^3
 V_g : 気孔の体積分率
 $\delta_{0.99}$: 温度浸透厚さ mm
 δ_B : セラミックス被覆加熱面の結合材層の厚さ mm
 δ_F : 液膜層の厚さ μm
 δ_W : セラミックス被覆層の厚さ mm
 ϵ_a : $= \bar{q}_0 / \bar{q}_c$
 λ : 加熱面材質の熱伝導率 $W/(cm \cdot K), W/(m \cdot K)$
 (被覆がある加熱面の場合は被覆層材質の熱伝導率)
 λ_{su} : セラミックス被覆加熱面の基盤材材質の熱伝導率 $W/(cm \cdot K), W/(m \cdot K)$
 λ_o : 大気雰囲気下における有効熱伝導度 $W/(cm \cdot K), W/(m \cdot K)$
 (多孔質固体の熱伝導率)
 λ_F : 液膜の熱伝導率 $W/(cm \cdot K), W/(m \cdot K)$
 λ_g : 気孔内の気体の熱伝導率 $W/(cm \cdot K), W/(m \cdot K)$
 λ_l : 液粒試料の熱伝導率 $W/(cm \cdot K), W/(m \cdot K)$
 λ_s : 固相の熱伝導率 $W/(cm \cdot K), W/(m \cdot K)$
 λ_{WL} : 放射温度計の測定波長 μm
 ρ : 加熱面材質のかさ密度 g/cm^3
 (被覆がある加熱面の場合は被覆層材質のかさ密度)

- ρ_b : 溶射セラミックスのかさ密度 g/cm^3
 ρ_{su} : セラミックス被覆加熱面の基盤材材質の密度 g/cm^3
 ρ_l : 液粒試料の密度 g/cm^3
 σ_l : 液粒試料の表面張力 N/m
 T_0 : 液粒寿命 (全体) s
 T_c : 液粒寿命 (計算値) s
 T_m : 液粒寿命 (主滴) s
 T_f : 液粒の自由振動の第一次周期 s
 T_t : 固液接触時間 s

添え字

- B** : セラミックス被覆加熱面の結合材層
F : 液膜層
l : 液粒試料
SU : セラミックス被覆加熱面の基盤材
V : 加熱面 (被覆がある加熱面の場合はセラミックス被覆層)

第2章 材質が異なる加熱固体面に衝突して蒸発する液粒に関する実験結果および検討

第2章 目 次

	Page
2. 1 はじめに	17
2. 2 固体面試料	18
2. 3 実験装置	20
2. 3. 1 実験装置の概要	20
2. 3. 2 単一液粒の滴下装置	21
2. 3. 3 液粒の蒸発挙動の撮影装置	23
2. 4 実験方法	25
2. 4. 1 初期液粒直径の測定	25
2. 4. 2 液粒の寿命の測定	25
2. 4. 3 液粒試料に関する実験条件	25
2. 4. 4 実験手順	26
2. 5 材質が異なる加熱面との衝突による液粒の蒸発	27
2. 5. 1 寿命曲線の概要	27
2. 5. 2 加熱面材質の熱伝導性の影響	31
2. 5. 3 表面汚損の影響	33
2. 6 セラミックス加熱面との衝突による液粒の蒸発	40
2. 6. 1 寿命曲線	40
2. 6. 2 蒸発様相	43
2. 6. 3 固液接触面の挙動	49
2. 6. 4 セラミックス加熱面の表面粗さの影響	56
2. 6. 5 初期液粒直径の影響	58
2. 6. 6 金属加熱面における現象との関係	60
2. 7 第2章のまとめ	67

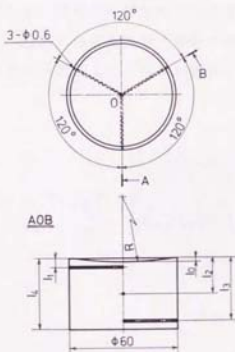
2. 1 はじめに

加熱された固体面に液粒が衝突して蒸発する現象は、Tamura-Tanawawa⁽¹⁾によって最初に研究され、液粒の寿命曲線が加熱面温度の上界に対し極小値と極大値をもつような形状となることなど、その基本的な特性が明らかにされた。その後、噴霧やミストによる冷却や膜沸騰などとも関連する基礎的な研究が数多く行われてきている。しかし、これらの研究の多くでは、ライデンフロスト温度近傍やそれ以上の温度領域における現象が対象とされ、たとえば Baumeister ら⁽¹⁶⁾や西尾ら⁽¹⁹⁾によりライデンフロスト温度と加熱面材質などの影響因子との関係が明らかにされている。これに対して、寿命が極小値を示す最大蒸発率点やその近傍の温度領域の現象に関する研究例は少ない。固体面との接触を伴う蒸発現象は、たとえば Meurer⁽²⁰⁾が、直接噴射式ディーゼル機関において、ピストン頂部に設けられた球形燃焼室の内壁面に沿って燃料を噴射して気化させ、混合気を形成して燃焼を行う M-燃焼方式を説明したように、その実用的見地から考えると重要であるにもかかわらず、これが詳しく扱われた例は少ない。いわゆる最大蒸発率点における現象は、加熱面上に薄い液膜状に広がって瞬時に蒸発するというように画一的に扱われていることが多い。これは、通常使用される金属加熱面の場合では液粒の蒸発速度が著しく速くなる現象が見られるのは極めて狭い温度範囲に限られており、金属材料による材質の範囲では現象に差が現れにくいことによると考えられる。Temple-Pediani⁽⁷⁾はステンレス鋼製加熱面を使用して燃料液滴の寿命曲線を計測した一連の実験の中で、液粒の沸点から寿命が最短となる最大蒸発率点までの温度範囲が、鋼製の加熱面の場合にはより狭く、ガラスでは広くなることを指摘しているが、寿命や液粒が示す挙動の変化については言及されていない。

本研究では主として最大蒸発率点近傍の温度領域における現象を対象とし、寿命や蒸発挙動に対する加熱面材質の影響を明らかにする。このため第2章では、まず、熱伝導率が広い範囲で段階的に異なる加熱面を使用した実験を通して得られた結果について述べる。加熱面材質としては金属類のほか、より低い熱伝導率をもつセラミックスを使用した。従来、液粒と加熱面とが直接接触し核沸騰の状態では蒸発する温度領域の現象に関して、金属加熱面の範囲を越えて、セラミックス類のような金属とは大きく異なった材質について調べられた研究例はない。

2. 2 固体面試料

液粒の蒸発面として使用した金属製およびセラミックス製の固体面試料の形状を第2. 1図に、その各部の寸法を第2. 1表に示す。いずれも直径が60mmの円柱状であり、液粒が接触して蒸発する上面は、スフェロイド状態で蒸発する液粒を固体面上に保持できるように、わずかに凹球面状に仕上げられている。また、試料の側面には、液粒が接触する前のその中心軸上における温度を測定するための熱電対を挿入する小穴が第2. 1図に示すような位置、方向に3箇所に設けられている。



第2. 1図 固体面試料の形状

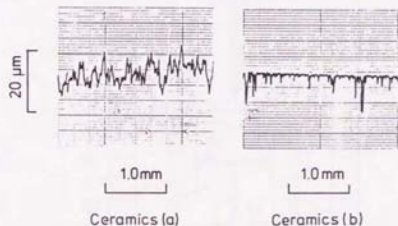
金属製固体面試料の材質は、銅、アルミニウム (A2011B)、黄銅 (Bs8M2)、炭素鋼 (S25C) およびステンレス鋼 (SUS304) である。いずれも一般的な市販材料を使用し、これらを機械加工することにより第2. 1図のような形状とした。凹球面状の試料表面は、機械加工の後、エメリー紙による研磨および $0.06\mu\text{m}$ のアルミナ研磨剤を用いたパフ仕上げを行うことにより、表面粗さが $R_{\text{max}} \leq 0.25\mu\text{m}$ 程度の鏡面に近い表面として実験に使用した。なお、一部の実験には、鑄鉄および鑄造アルミニウム合金による砂型鑄肌面をもつ試料を製作し、使用している。

第2. 1表 固体面試料の各部の寸法 (mm)

	10	11	12	13	14	R
Metallic Surfaces	1	4	19	34	40	421
Ceramics (a)	2	6	11	16	20	210
Ceramics (b)	0*1	4	9	14	18	∞ *1

*1 固体面試料の上面が平面状であることを示す

実験に使用したセラミックス製の固体面試料の材質は1種類であり、ここでは単にセラミックスと呼ぶこととする。これは磁器の一種であり SiO_2 (75wt%) および Al_2O_3 (16wt%) を主成分としている。粉末状の原料陶石を方向性が生じないよう湿式で均質に混合し、これを乾燥させた状態で成形した後、約1300℃で焼成した。焼成後はガラスマトリックス中に石英粒が分散した緻密な組織となるが、実際にも吸水性等は認められなかった。このように製作された試料は、素材の不均質さに伴う変形や表面に微小な割れがないことを確認して実験に使用した。なお、第2.1表に示すセラミックス(a)と(b)は同一の素材を使用して製作したものであり、このうち(b)についてはさらにその表面を研磨しているため、試料の材質は同じでも形状、表面粗さがやや異なっている。第2.2図に、触針式表面粗さ計(触針半径5 μm)により、実験に使用したセラミックス固体面試料表面上の、液粒が接触する中心部分の表面粗さを測定した結果を示す。

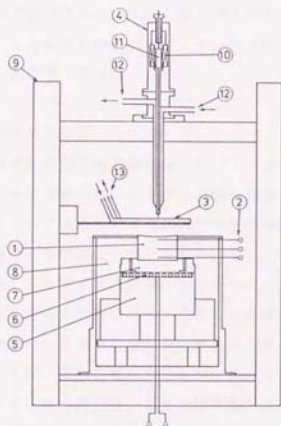


第2.2図 セラミックス製固体面試料の表面粗さ

2. 3 実験装置

2. 3. 1 実験装置の概要

実験装置の概要を第2. 3図に示す。均質な材料から製作された固体面試料①は、銅ブロック⑦を介して、アルミナレンが⑤にカンタル線を埋め込んである電気ヒータ⑥に通電することにより加熱され、一定の温度に保持される。固体面試料の側面はセラミックス繊維を用いた断熱材⑧で覆われている。固体面試料の温度は、厚さ方向に一定の間隔で側面からその中心軸上まで挿入された3対のシー



- | | |
|------------------------|-----------------------|
| 1 : Hot Surface | 8 : Thermal Insulator |
| 2 : Thermocouple | 9 : Supporting Frame |
| 3 : Shutter | 10 : Solenoid |
| 4 : Dropping Equipment | 11 : Armature |
| 5 : Alumina Brick | 12 : Cooling Water |
| 6 : Heater | 13 : Cooling Water |
| 7 : Copper Block | |

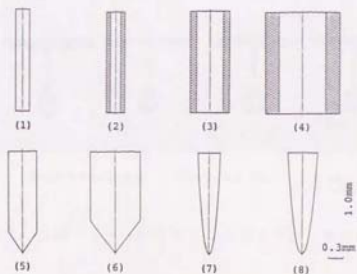
第2. 3図 実験装置の概要

ス熱電対②の熱起電力を、氷冷式の基準接点を通してデジタル電圧計（分解能 $1\mu\text{V}$ ）およびペン型記録計で測定することにより求めた。使用した熱電対はシース外径 0.5mm の K 型である。本実験においては、このような細径のシース熱電対の常用限界温度（カタログ値）を越えて使用する場合もあるため、あらかじめ個体毎に校正を行ってから実験に使用した。熱電対の校正は、シリコン油槽内で標準白金抵抗温度計を使用して比較法により、また、錫、鉛、亜鉛、アンチモンの定點物質を用いてるつぽ法により行い、実験に使用した温度範囲において誤差が概略 0.1% 以内となる温度測定を可能とした。液粒は、上下方向の位置調節が可能な支持台⑤に固定されている滴下装置④を使用して、任意の高さより加熱固体面上に滴下される。そして、滴下前の液粒が保持される滴下装置下部を皿のようにシャッタ⑥が設けられていて、これが滴下時のみ開かれる。また、滴下装置およびシャッタに冷却水を導くことにより、滴下前の液粒がおかれている雰囲気温度をほぼ一定に保った。

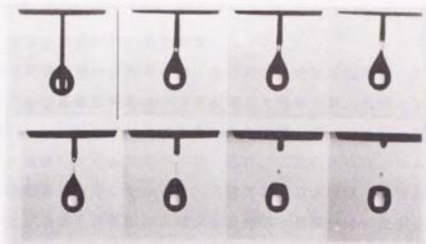
2. 3. 2 単一液粒の滴下装置

第 2. 3 図における液粒の滴下装置④にはソレノイドコイル⑦が組み込まれている。ソレノイドコイルに通電してアーマチュア⑧を急速に引き上げることににより、これと一体になっている滴下装置下部の細い針状の液粒懸垂部に付着されている所定の大きさの液粒が加熱面上へ滴下される。なお、ソレノイドコイルはシャッタ⑥の開閉に連動して作動する回路構成となっている。液粒懸垂部に試料液体を供給し一滴の液粒を形成するためには、主として小容量のマイクロシリンジを使用して針状の懸垂部へ一定体積の液粒を一滴毎に外部から付着させる方法を用いたが、一部については、連続供給の方法も用いた。マイクロシリンジによって設定される液量のばらつき範囲は、たとえば蒸留水および n -ヘキサデカンの場合には、実際に滴下された 10 滴の重量測定の結果、直径に換算して平均直径より $\pm 0.6\%$ 以内であった。連続供給の場合には、アーマチュアと一体となった滴下装置の可動部が直径 1.5mm のステンレス鋼製の細管で製作されているため、この内部を通して試料液体を先端のノズル状の液粒懸垂部に導いている。そして、常時、連続的に滴下させながらこれをシャッタで受けとめ、加熱面上に滴下する場合のみシャッタを開いて単一の液粒を滴下した。

液粒の滴下装置を針状の懸垂部からソレノイドコイルを利用して滴下する構造としたのは、余滴の発生を防ぐ目的からである。大きな余滴を伴う場合には、実際に滴下される液粒の直径に影響を及ぼすほか、特にセラミックス加熱面上で液粒が蒸発する場合には、滴下された液粒が加熱面上へ薄く広がったところへ温度が低い余滴が遅れて落下することになり、実験上、好ましくない。そこで、粘性、表面張力が異なる試料液体について、滴下される液粒の体積と余滴が生じないアマチュアの引き上げ速度の条件、懸垂部の形状等について調べ、余滴が生じないことを確認した後、これを使用した。滴下装置の液粒懸垂部に所定の大きさの液粒を附着させるために、第2.4図に示すような形状について検討した。通常、第2.4図における(2)~(4)のような細管の端部より液粒を落下させる場合には液体試料の種類により比較的大きな余滴を伴いやすい。(1)に示す直径が0.3mmの細い棒状の場合には、水以外の液粒試料は先端部分を取り巻くような形態で附着する。この状態で懸垂部が急速に引き上げられ液滴が滴下されても大部分の液粒試料の場合には余滴は発生しないが、第2.5図に示すn-ヘキサデカンの例のように速度の条件によっては体積比で0.2%程度の小さな余滴が発生する。本研究で使用した液粒の種類について一定体積約2.5 μ lを滴下する場合には第2.4図(7)の形状のものを使用した。第2.6図は第2.4図(7)の針状形状をしたものによる第2.5図と同じn-ヘキサデカンの滴下

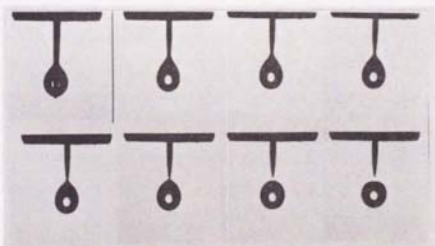


第2.4図 滴下装置の液粒懸垂部の形状



n-Hexadecane , $\Delta t=0.46$ ms 5 mm

第 2. 5 図 n-ヘキサデカンの滴下状況 (余滴の発生有り)



n-Hexadecane , $\Delta t=0.45$ ms 5 mm

第 2. 6 図 n-ヘキサデカンの滴下状況 (余滴の発生無し)

例であり余滴は生じていない。なお、水の場合にのみ、第2、4図(1)に示す形状のものを使用した。水滴は直径0.3mmの棒状の懸垂部の下端面にほぼ球状に付着し、この状態で滴下されても余滴が発生しないことが確認された。

2.3.3 液粒の蒸発挙動の撮影装置

最大蒸発率点近傍で寿命が非常に短くなる領域における加熱面上での液粒の蒸発挙動は、16mm高速度撮影カメラを使用して撮影した。光源としてはクセノンランプを用い、コンデンサレンズで集光して使用した。フィルム面上には現象と併せて一定周波数のタイムマークを写し込み、これによりフィルム速度を補正して正確な時間測定に利用した。また、高速度撮影カメラは、制御回路を介して第2、3図における滴下装置④およびシャッター③と連動させて使用した。

16mm高速度撮影カメラが加熱面上に滴下され、急速に蒸発する液粒の主演の挙動を詳細に撮影するために使用されたのに対し、特に金属系の加熱面の場合に見られるような、蒸発の過程で主演より分裂した微小な液粒が加熱面上に飛散して蒸発する状況なども含めて、より広い視野で撮影するためビデオカメラを併用した。ここで使用したのは撮影速度が毎秒30駒相当の、通常のビデオカメラである。

2. 4 実験方法

2. 4. 1 初期液粒直径の測定

マイクロシリンジを使用して $\pm 0.6\%$ 以内の精度で液粒体積を設定できることが確認されたが、滴下装置より実際に滴下され、加熱面に接触する直前の時点における液粒の大きさは、ストロボと遅延装置を使用して35mmカメラを使用した写真撮影により実測した。液粒形状を回転楕円体としてその長径と短径を測定し、同じ体積をもつ真球の直径に換算して初期液粒直径としている。初期液粒直径の測定結果には、雰囲気温度等の影響によって揮発性が高い液粒試料では設定値よりも小さくなる傾向が認められ、たとえば同一の設定値1.68mmに対しては液粒の種類によって約1.4~1.7mmの範囲であった。また、各液粒試料についての直径の測定結果にはいずれの場合にも平均値に対し3%程度のばらつきが認められたが、これは一方向のみからの写真撮影による測定誤差の影響が現れているものと考えられる。なお、初期液粒直径の系統的な測定は数種の液粒試料について室温雰囲気で行ったが、この後、実際の液粒の蒸発挙動を撮影した16mm高速度撮影写真からも同様にして初期液粒直径が測定された。これにより、滴下装置およびシャッターが水冷されているため、加熱面の温度が高くなっている状態でも加熱面に接触する直前の時点の初期液粒直径の大きさには特に大きな変化がないことが確認されている。

2. 4. 2 液粒の寿命の測定

加熱面に液粒の一部が接触した瞬間よりその全てが蒸発し終えるまでの時間としての液粒の寿命の測定は、1秒以上の比較的長い時間の場合は目視によりストップウォッチを使用し、それ以下の短い現象の場合にはビデオカメラによる録画画面の駒数を数えることにより測定し、また、16mm高速度写真撮影結果を併用して行った。滴下された液粒がいくつかに分裂したり、あるいは、主滴から微小な液粒が飛散する場合にも、それらの全てが蒸発し終える時間を寿命とした。同一条件下で5~10回の測定を繰り返し、その算術平均値を求めた。

2. 4. 3 液粒試料に関する実験条件

本実験において使用した液粒は、水(脱気した蒸留水)およびn-ペンタン、

アセトン、メチルアルコール、エチルアルコール、シクロヘキサン、ベンゼン、*n*-ヘプタン、イソオクタン、トルエン、ニトロベンゼン、 α -メチルナフタレン、*n*-ヘキサデカン（いずれも試薬特級品あるいは相当品）である。滴下直前の液粒の温度は 291 ± 3 Kでほぼ一定とした。液粒の滴下高さは加熱固体面上30 mmで一定としたが、この場合、ほぼ球形をした液粒が約0.7 m/sと遅い速度で加熱面に衝突する。なお、一部の実験は滴下高さを加熱固体面上、19 mmとしているが、この差による現象の変化は認められなかった。雰囲気は全て大気圧下の空気中で実験を行った。

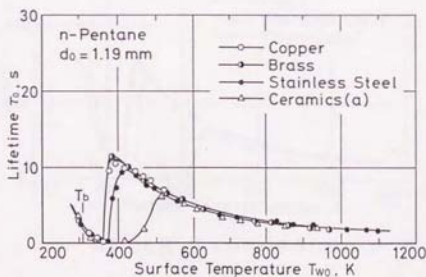
2. 4. 4 実験手順

固体面試料が加熱、昇温されて、各部の温度が定常となった状態で、固体面試料の厚さ方向に一定の間隔で配置された熱電対の指示値から外挿法により加熱面の表面温度を求める。この後、マイクロシリンジを使用して一定体積の液粒試料が滴下装置の液粒懸垂部に付着されると、速やかにシャッターが開かれる。これに連動してソレノイドコイルが駆動されて液粒の懸垂部が急速に引き上げられ、単一の液粒が加熱面上に滴下されて、寿命が計測される。液粒が滴下される前には、加熱面表面にはこりなどが付着しないよう注意を払い、アルコールなどを含ませた脱脂綿等で表面を拭うなどの処置を数多く行った。実験は、加熱面温度の低い側から順に段階的に昇温しながら行った。金属加熱面の場合には、加熱によって表面に形成される酸化膜等の影響を防ぐ目的から、必要に応じて一回の実験毎に降温して表面研磨を行い、再び昇温して実験を行う操作を繰り返した。同一温度においては、各部の温度が定常に復帰するのを待って5~10回の測定を繰り返し、その後、他の種類の液粒についても同様な測定を繰り返した。

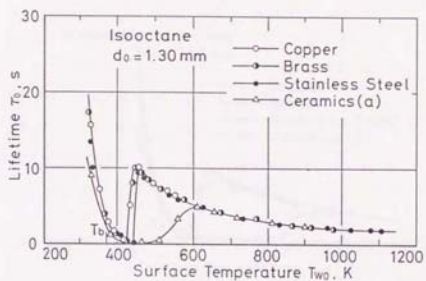
2. 5 材質が異なる加熱面との衝突による液粒の蒸発

2. 5. 1 寿命曲線の概要

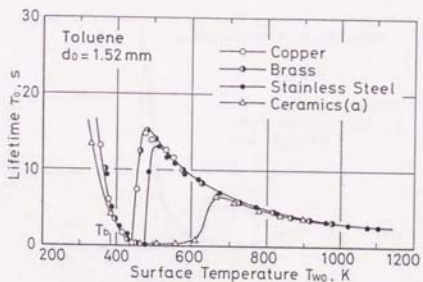
熱伝導率が段階的に異なる加熱面材質と沸点が異なる数種の液粒試料との組み合わせにより測定された寿命曲線の例を第2. 7図～第2. 11図に示す。横軸の表面温度は液粒が加熱面上に滴下される直前の温度を表している。縦軸は液粒の寿命であり、加熱面上に滴下された液粒の全てが蒸発し終えるまでの所要時間である。初期液粒直径 d_0 の値は滴下された液粒が加熱面に接触する直前の時点において写真撮影により測定された値の平均値である。この d_0 の測定値には、最大、 $\pm 3\%$ 程度のばらつきがあったが、これは2. 4. 1に既に示したように一方からの写真撮影による測定誤差を含んでいる。実際の液粒の直径の値のばらつきは、マイクロシリンジによる液粒の容積の設定精度が $\pm 0. 6\%$ 程度であったことから写真撮影により得られた測定結果よりも小さいと考えられる。寿命曲線の形状にも液粒の直径のばらつきによる影響はほとんど認められなかった。各図中には、加熱面の材質として、銅、黄銅、ステンレス鋼およびセラミックス(a)についての測定結果を示しているが、前三者が研磨された平滑面であるのに対し、セラミックス(a)加熱面は、第2. 2図に粗さ曲線を示したように、 $16\mu\text{m}R_{\text{max}}$ 程度の粗面となっている。実験を行った加熱面温度範囲の上限は、加熱により金属加熱面の表面に生じた酸化膜等による蒸発過程の液粒の挙動対



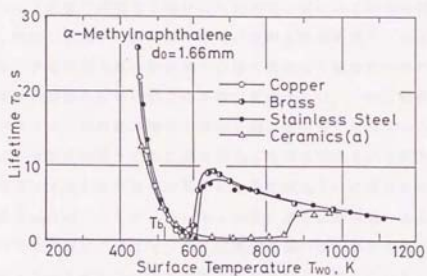
第2. 7図 n-ペンタンの寿命曲線



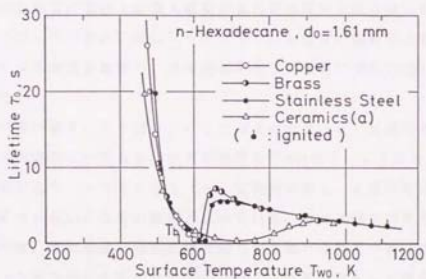
第 2. 8 図 イソオクタンの寿命曲線



第 2. 9 図 トルエンの寿命曲線



第2. 10 図 α -メチルナフタレンの寿命曲線



第2. 11 図 n-ヘキサデカンの寿命曲線

する影響が見られない範囲とし、たとえば銅の場合には約573 Kまでの測定とした。

第2.7図～第2.11図に示した各液粒の寿命曲線において、ライデンフロスト温度を越える加熱面温度範囲で液粒と加熱面との間に薄い蒸気膜が形成されてスフェロイド状態で蒸発する場合には加熱面材質による寿命の差は現れていない。また、液粒の沸点 T_b 近傍よりも低い加熱面温度範囲で、固体面上に平凸レンズ状で存在する液膜内部の熱伝導や自然対流により熱移動が行われ蒸発する場合にも平滑な金属系の加熱面間での寿命の差は小さい。この液膜状蒸発領域ではセラミックス(a)加熱面の場合の寿命が他に比べ短くなっているが、これは表面粗さにより液膜が時間とともに固体面上に広がる挙動を示すためである。加熱面材質の相違による大きな変化が見られるのは沸点 T_b に相当する加熱面温度から最大蒸発率点を経てライデンフロスト温度に至る温度領域である。この温度領域における寿命曲線は、全体としては加熱面材質の熱伝導率が低くなるほど最大蒸発率点およびライデンフロスト温度がそれぞれ高くなっている。そして、最大蒸発率点近傍で寿命が著しく短くなっている温度領域の幅が加熱面材質の熱伝導率が低いほど広がる傾向がみられる。しかし、金属系の加熱面間では、材質により熱伝導率が大きく異なっても、これによって生ずる寿命曲線の差は比較的小さい。金属加熱面の場合には最大蒸発率点付近の限定された狭い温度範囲でのみ寿命が短くなっているのに対し、セラミックス加熱面の場合には最大蒸発率点の前後の広い加熱面温度範囲で、最大蒸発率点と同程度に寿命が短くなっていることがわかる。

第2.7図～第2.11図におけるセラミックス(a)加熱面とその他の金属加熱面では表面粗さが異なる。金属加熱面は $R_{max} \leq 0.25 \mu m$ 程度の鏡面に近い平滑面であり、セラミックス(a)加熱面は第2.2図の粗さ曲線に示したように $1.6 \mu m R_{max}$ 程度の粗面となっている。寿命曲線に対する表面粗さの影響に関しては、既に金属加熱面の場合について調べられている。たとえば、Cusoら⁽¹¹⁾により銅加熱面表面をラップ仕上げにより平滑面とした場合およびサンドブラストにより粗面とした場合の水滴の寿命曲線が測定されている。粗さが大きい場合には、最大蒸発率点から平滑面の場合に寿命が極大となる温度領域における寿命曲線の形状が温度に対して緩やかに変化するようになり、平滑面の場合よ

りも高い加熱面温度で寿命が極大値を示してライデンフロスト温度が高くなる。しかし、最大蒸発率点近傍の寿命曲線には粗さの影響が認められていない。このように、一般に粗面では遷移領域の寿命が短くなりライデンフロスト温度が高くなる現象が知られているが、最大蒸発率点近傍の核沸騰状に蒸発する温度領域が広くなるというような報告例はない。セラミックス加熱面の表面粗さも同様な効果を生じていると考え、各寿命曲線においてライデンフロスト点付近の寿命曲線がなだらかなピーク形状となっているのが表面粗さの影響と考えられる。

第2.7図～第2.11図におけるセラミックス(a)加熱面の各寿命曲線では、金属系加熱面の場合に比べ、より広い温度範囲で寿命が短くなる傾向が現れている。これは、金属系加熱面とここで使用したセラミックス加熱面における沸騰を伴う液粒の蒸発の形態が全く一致するものではないことを示していると思われる。

2.5.2 加熱面材質の熱伝導性の影響

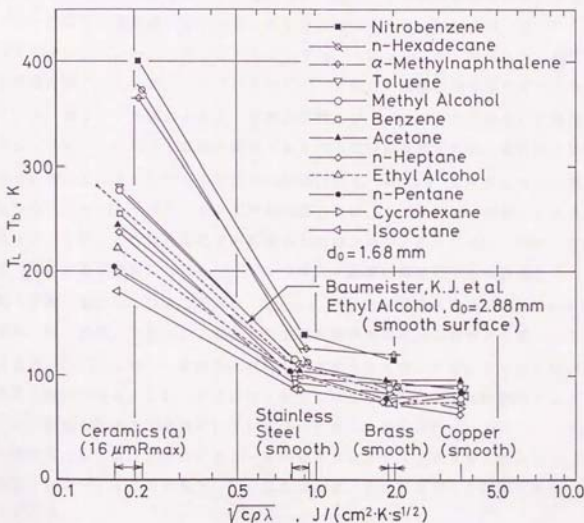
セラミックス加熱面をはじめ種々の加熱面材質に対する液粒の寿命曲線において、最大蒸発率点の近傍で寿命が著しく短くなる加熱面温度範囲の広さは、ライデンフロスト温度 T_L と液粒の沸点 T_b の差をとり、 $(T_L - T_b)$ で表すことができる。ここで、加熱面表面に液粒が接触して蒸発する場合に加熱面内に生ずる非定常温度変化に、近似的に半無限固体の熱伝導理論を適用する。加熱面が液粒との接触面を形成し核沸騰状に蒸発を開始するまでの間に加熱面表面温度が温度 T_{w1} まで急速に降下し、寿命期間内はこの温度に保持されるというようなステップ状の表面温度変化が生じる場合の表面熱流束 q は次式で与えられる⁽³²⁾。

$$q = \frac{\sqrt{c\rho\lambda}}{\sqrt{\pi t}} (T_{w0} - T_{w1}) \quad \dots (2-1)$$

ただし、 c 、 ρ 、 λ は、それぞれ加熱面材質の比熱、密度、熱伝導率を示す。また、初期温度 T_{i0} の液粒が加熱面に接触した直後の接触面温度 T_c は次式で与えられる⁽³³⁾。

$$T_c = \frac{T_{i0}\sqrt{c_1\rho_1\lambda_1} + T_{w0}\sqrt{c\rho\lambda}}{\sqrt{c_1\rho_1\lambda_1} + \sqrt{c\rho\lambda}} \quad \dots (2-2)$$

となる。ただし、 c_l 、 ρ_l 、 λ_l は、それぞれ液粒試料の比熱、密度、熱伝導率を示す。Seki, M. et al.⁽²¹⁾による、ニッケル薄膜抵抗温度計を使用したステンレス鋼製加熱面への液滴衝突時の表面温度の測定結果は、ライデンフロスト点までの加熱面温度範囲で第(2-2)式にほぼ一致する値を与えている。また、ライデンフロスト温度は、加熱面と液粒との衝突直後の固液が直接接触をおこす短時間の間における加熱面から液粒への伝熱挙動により定まる⁽²⁰⁾と考えられ、第(2-2)式による T_{lc} の値が密接に関与する。いずれにしても液粒の沸点 T_b からライデンフロスト温度 T_L に至る加熱面温度範囲において加熱面内に生じる温度変化に対しては、第(2-1)式および第(2-2)式中に示す加熱面材質

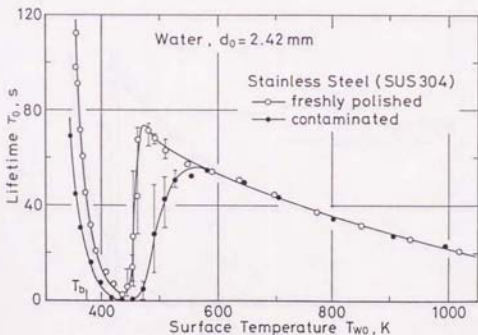


第2. 12図 寿命曲線に対する加熱面熱伝導性の影響

の $\sqrt{c\rho\lambda}$ の値が大きな影響を及ぼす。そこで、第2.7図～第2.11図に示したような各液粒毎の寿命曲線から $(T_L - T_b)$ を $\sqrt{c\rho\lambda}$ に対して整理した結果を第2.12図に示す。加熱面材質の $\sqrt{c\rho\lambda}$ の値は、特にセラミックス加熱面の場合にはライデンフロスト温度が液粒の種類により広い温度範囲に分布するので、各加熱面材質に対するライデンフロスト点に相当する温度における値を使用し、その温度依存性も含めて示している。なお、 $\sqrt{c\rho\lambda}$ の値は第8章に示す実測値を使用している。液粒の大きさは、加熱面上に滴下された時点では液粒の種類毎に多少異なっていたが、ここで対象としている温度領域における現象に対する液粒直径の大きさの影響は認められなかったので、初期液粒直径 d_0 として滴下装置への設定値で示している。なお、第2.12図は加熱面材質によるライデンフロスト過熱度の変化を表していることにもなり、Baumeisterら⁽¹⁵⁾によってエチルアルコールに対してアルミニウム、ステンレス鋼、ガラスの3種類の加熱面材質について測定されているライデンフロスト温度の測定値も併せて示している。第2.12図によると、加熱面材質の $\sqrt{c\rho\lambda}$ が小さくなるほど液粒の沸点とライデンフロスト温度の間隔が広がる傾向が確認される。金属系の加熱面では沸点とライデンフロスト温度の間隔は狭く、 $\sqrt{c\rho\lambda}$ に対する変化の割合も少ない。セラミックス(a)加熱面の場合には $(T_L - T_b)$ が著しく大きくなっているが、これは表面粗さの影響をも含むためである。ただし、Baumeisterら⁽¹⁵⁾による平滑面におけるライデンフロスト温度の測定結果も本研究と全く一致する傾向を示していることから、 $\sqrt{c\rho\lambda}$ が小さい場合には $(T_L - T_b)$ の値は、銅、黄銅、ステンレス鋼などの金属系加熱面における結果より第2.12図上で $\sqrt{c\rho\lambda}$ に対して直線的に外挿して求められる値よりも大きくなる傾向にあると推定される。なお、従来のライデンフロスト温度に関する研究例ではステンレス鋼製の加熱面が使用されているものが多く、報告されている $(T_L - T_b)$ の測定値としては、エチルアルコールの場合には97～107K、ベンゼンの場合には100～115Kであり⁽¹⁵⁾、これは第2.12図に示した結果とほぼ一致している。

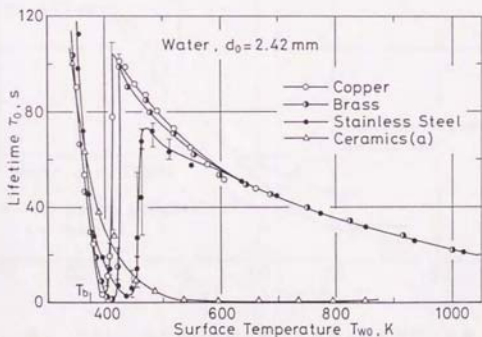
2. 5. 3 表面汚損の影響

第2. 7図～第2. 11図において、黄銅を加熱面とする場合の寿命曲線の形状を比較すると、ライデンフロスト温度が高温度領域に現れている場合ほど寿命の極大値を与える曲線の形状が鋭い尖頂状からしだいに丸みを帯びた形に変化していく傾向が認められる。また、ライデンフロスト温度が高くなっている α -メチルナフタレンや n -ヘキサデカンのステンレス鋼加熱面に対するライデンフロスト温度前後の温度領域における寿命は、黄銅加熱面に対するよりも短く、寿命が極大となる領域の曲線がなだらかになり、より高い加熱面温度で極大値を与えている。これらの変化は、金属面が大気雰囲気中において加熱されることにより表面に酸化膜などが形成されるなどして、表面条件が変化していることによるものと考えられる。そこで、従来の研究で報告されているライデンフロスト温度に最もばらつきが多い水の場合について加熱面の表面汚損の影響について調べた。第2. 13図に、同一のステンレス鋼製加熱面を使用して、表面の研磨を繰り返し行った清浄面と、事前に高温度まで昇温する操作を行った酸化皮膜による汚損面に対して測定された水の寿命曲線を示す。前者の場合には、一つの加熱面温度における測定の都度、降温して研磨し、再び昇温する操作を繰り返し行うことに



第2. 13図 表面汚損の影響

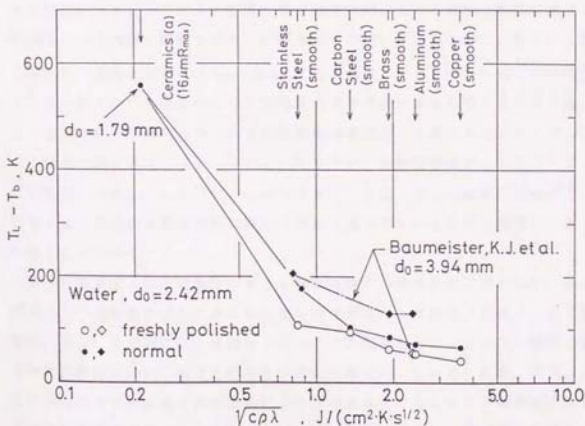
より可能な範囲で清浄な加熱面とした。汚損面の場合には固液が直接接触して蒸発する温度領域全域において寿命が短くなっていることがわかる。これは、液膜状蒸発領域においては加熱面表面との接触面積が大きくなって液粒の寿命が短くなっていることからわかるように、液に対する濡れ性が良くなっていることによる。また、最大蒸発率点近傍での寿命が著しく短くなる加熱面温度範囲は清浄面に比べると広くなり、寿命が極大となる温度領域における寿命曲線の形状がなだらかになってライデンフロスト温度が高くなっている。なお、実験前に十分に研磨を行った加熱面の場合でも、測定の数度、繰り返し研磨することなく段階的に温度を上げながら実験を繰り返した場合には、最大蒸発率点よりも低い加熱面温度範囲では清浄面の場合とほとんど一致し、これよりも高い加熱面温度範囲では第2.13図に示す汚損面の場合の450K~600Kにおける寿命曲線と類似した形状の寿命曲線が得られた。一般に表面汚損という場合には、表面粗さの変化が認められるような酸化皮膜の形成や腐食があったり、スケールのような堆積物を生ずるような範囲まで含まれることが多いのに対し、ここで言う表面汚損とはより軽微な汚損状態であるが、これが寿命曲線に大きな影響を及ぼすことがわかる。



第2.14図 水の寿命曲線

第2. 14図に、材質が異なる加熱面に対して得られた水の寿命曲線を示す。金属系の各加熱面表面は、特に、ライデンフロスト温度に近い温度領域の測定の場合には、一つの加熱面温度における測定の都度、降温して研磨する操作を繰り返し行った。ステンレス鋼加熱面の場合の寿命曲線は第2. 13図に示した良く研磨された清浄面と同じである。可能な範囲で清浄とした状態でも、ライデンフロスト点近傍から約600Kまでの温度領域における寿命は銅や黄銅加熱面の場合に比べると短くなっていることがわかるが、この差については、やはり表面汚損の影響が一因となっていると考えられる。また、セラミックス(a)加熱面の場合には非常に広範な温度領域で寿命が著しく短くなっており、測定温度範囲では寿命が極大値を示す現象が観察されていない。

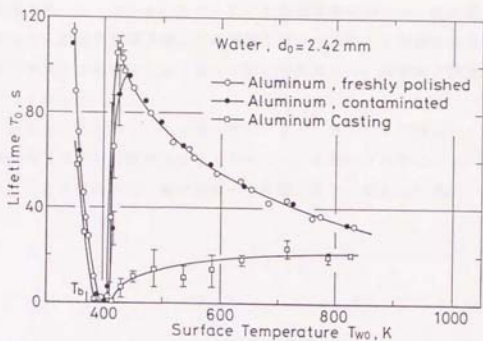
加熱面材質の相違による水の寿命曲線の変化を、第2. 12図に示したものと同様にして、加熱面材質の $\sqrt{c\rho\lambda}$ に対する $(T_L - T_b)$ の変化として整理し



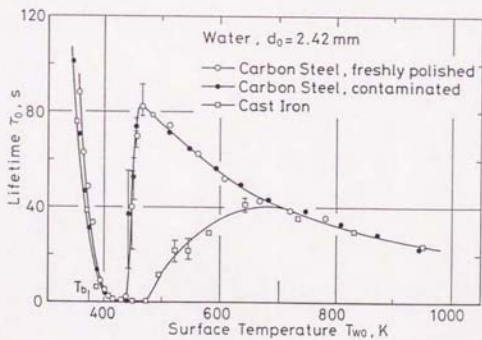
第2. 15図 水の寿命曲線に対する加熱面熱伝導性の影響

た結果を第2. 15図に示す。図中のセラミックス(a)加熱面に対するライデンフロスト温度は、後出の第2. 18図に示す寿命曲線より得られたもので、初期液粒直径が異なっている。金属系の加熱面については、第2. 14図に示した良く研磨された清浄面と、実験開始前にのみ十分な研磨を施した面についての結果を示した。セラミックス加熱面については加熱にともなう汚損の現象はなくこのような区別はしていない。第2. 12図に示した他の液粒の場合と同様に、加熱面材質の $\sqrt{c\rho\lambda}$ の値が低くなるほど $(T_L - T_b)$ が大きくなる傾向となっている。金属系の加熱面では、表面がより清浄な状態ではライデンフロスト温度が低くなることがわかり、特に、水-ステンレス鋼加熱面の場合はこれが顕著に現れている。Baunesterら⁽¹⁵⁾により報告されている、本研究よりもやや大きな水滴によるライデンフロスト温度の測定結果も図示しているが、加熱面材質による変化の傾向は本研究と同様であり、さらに、良く研磨された清浄なアルミニウム加熱面におけるライデンフロスト温度は本研究結果と全く一致している。金属系加熱面のライデンフロスト温度近傍の温度領域における現象は加熱面表面の酸化膜等による汚損に鋭敏であり、影響を受けやすいことがわかる。第2. 12図において、液粒の種類により $\sqrt{c\rho\lambda}$ に対する $(T_L - T_b)$ の変化の傾向が必ずしも一様でないのはこのような加熱面の表面汚損による影響と考えられる。また、従来の研究で報告されている金属加熱面を使用した場合の水のライデンフロスト温度の測定値は、 $(T_L - T_b)$ で表すと、加熱面材質により90~220 Kの範囲に分布している⁽¹⁴⁾。これを第2. 15図に示した結果と比較すると、汚損により表面の状態が微妙に異なる場合に得られている結果の範囲に一致していることがわかる。

清浄な金属面とは表面条件が著しく異なる場合の寿命曲線の例として、砂型鋳肌面をもつ加熱面に対して測定されたものを第2. 16図および第2. 17図に示す。第2. 16図には、清浄なアルミニウム加熱面とアルミニウム鋳物で製作された加熱面について測定された水の寿命曲線を示している。また、第2. 13図に示したものと同様な酸化皮膜により汚損されたアルミニウム加熱面に対して測定された寿命曲線をも併せて示している。また、第2. 17図は、同様に、炭素鋼と鋳鉄について測定された水の寿命曲線を示す。いずれにおいても、加熱面



第2. 16図 アルミニウム系加熱面の寿命曲線に対する表面性状の影響



第2. 17図 鉄系加熱面の寿命曲線に対する表面性状の影響

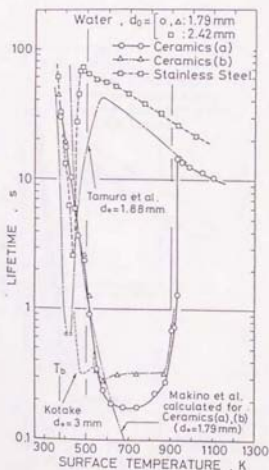
の濡れ性が向上することにより最大蒸発率点近傍の寿命が短い領域が拡大している。また、これを越える高温域にかけての広い温度領域で、表面粗さにより液粒の蒸発時間が短くなっている。ただしこの加熱面温度範囲では、最大蒸発率点近傍とは異なり、固液が直接接触して核沸騰を伴って蒸発する現象は加熱面への衝突初期や加熱面上での移動にともなって間欠的に見られ、遷移域の蒸発挙動を示す。

なお、第2.13、第2.14図、第2.16、第2.17図に示した寿命曲線は液粒の滴下高さを加熱固体面上19mmとして測定されたもので、他の場合(30mm)とは異なるが、寿命曲線への影響はないと考えられる。

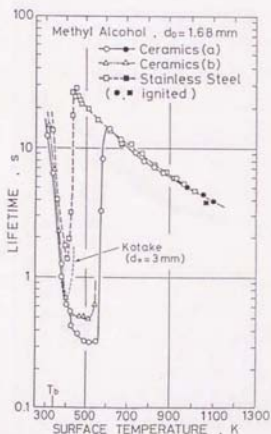
2. 6 セラミックス加熱面との衝突による液粒の蒸発

2. 6. 1 寿命曲線

液粒がセラミックス製およびステンレス鋼製の加熱面上で蒸発する場合に得られた寿命曲線を第2. 18図～第2. 21図に示す。これらの寿命曲線においては最大蒸発率点近傍の温度領域における寿命がより詳細に示されている。ステンレス鋼面は研磨仕上げされた平滑面で $R_{max} \leq 0.25 \mu m$ 程度の鏡面状であるが、セラミックス (a) および (b) 加熱面は第2. 2図に示したような表面粗さをもつ。横軸は液粒が接触する前の加熱面の表面温度であり、縦軸は加熱面上に滴下された液粒の全てが蒸発し終えるまでの時間としての液粒の寿命である。寿命が1秒以下となるような蒸発が速い温度領域の寿命はビデオカメラを使用して測定されたものである。また、本研究におけるものとは実験条件がやや異なるが、



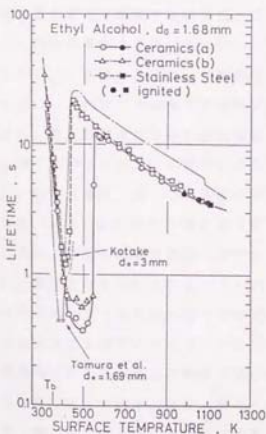
第2. 18図 水の寿命曲線



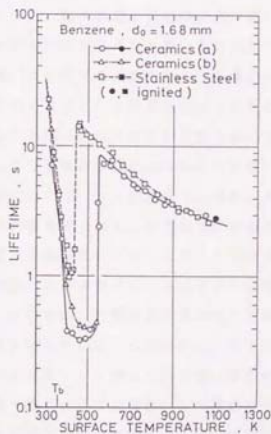
第2. 19図 メチルアルコールの
寿命曲線

ステンレス鋼製の加熱面上における寿命の報告例をも併せて示している。

第2. 18図は水の寿命曲線である。ステンレス鋼面上においては、本研究における場合よりも雰囲気温度が高い容器内で測定された、Tamura-Tanawawa (1) によるものと類似した形状の寿命曲線が得られているが、測定の都度、繰り返し表面研磨を行うことにより清浄な状態を保った本研究における寿命曲線の極大値を与える部分の形状はより鋭い尖頂状になっている。これらに比べ、セラミックス (a) 加熱面では、ステンレス鋼面の場合の最大蒸発率点より高く、かつ、広い温度領域において寿命が著しく短くなり、約500~900Kの温度領域ではステンレス鋼の場合の1/100以下の寿命となっている。この領域における寿命の測定値のばらつきは約30ms程度であったが、これはビデオカメラによる撮影画面の一駒あたりの時間間隔に相当している。一方、セラミックス (b) 加



第2. 20図 エチルアルコールの
寿命曲線



第2. 21図 ベンゼンの寿命曲線

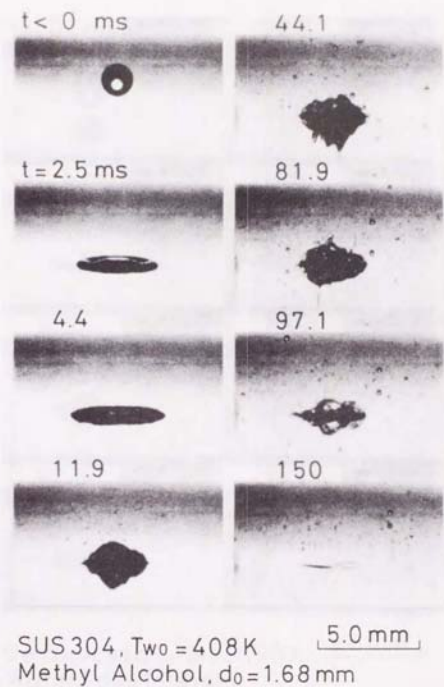
熱面では、この寿命が著しく短くなる温度領域はほぼ重なって同じであるが、寿命の値はやや大きくなっている。これは、第2. 2図に示したような両加熱面表面の粗さの形状の相違によるものと考えられる。セラミックス(a)加熱面の寿命曲線においてはライデンフロスト温度は非常に高く、約930Kとなっているが、寿命が極大となるライデンフロスト温度近傍における寿命曲線の形状はやはり尖頂状である。ライデンフロスト温度を越える温度領域の寿命は、初期液粒直径の差を考慮するとセラミックス面でもステンレス鋼面でも一致していると思われる。なお、ここで使用したセラミックス加熱面のような低い熱伝導率をもつ加熱面材質について、ライデンフロスト温度を越える温度領域に至るまでの水の寿命曲線が明らかにされている例は他にない。

第2. 19図～第2. 21図は、同様にして得られたメチルアルコール、エチルアルコールおよびベンゼンの寿命曲線である。水の場合と同様にセラミックス加熱面に対する寿命曲線では、最大蒸発率点の寿命に相当するような非常に短い寿命を示す温度領域が高温度側に広がっている。最大蒸発率点近傍における寿命が、熱伝導率がより高いステンレス鋼面の場合の方が長くなっている傾向が見られるが、これは、ステンレス鋼面では沸騰による蒸発の過程で多くの小滴の分裂を伴い、この全てが蒸発する時間が比較的長くなるという蒸発形態によるものである。最大蒸発率点近傍の温度領域であっても滴下された液粒が分裂をおこさずに薄く広がりその全てが瞬時に蒸発するような現象は実際にはほとんど見られない。液粒の沸点に達しない液膜状蒸発領域でセラミックス加熱面での寿命が短いのは、滴下された液粒が表面粗さにより加熱面を良く濡らして大きく広がるためである。液粒と加熱面の間に安定な蒸気層が形成されるようになるライデンフロスト温度よりも高いスフェロイド状蒸発領域における寿命は、ベンゼンの場合にはセラミックス加熱面の方でやや短くなっているが、材質および表面粗さが異なるステンレス鋼面とセラミックス面でほぼ一致している。このように、全ての温度領域でセラミックス加熱面の場合の寿命はステンレス鋼面と同程度、あるいはより短くなっている。また、第2. 19図～第2. 21図において、黒塗りの記号(●、■)は当該加熱面温度における計測時に液粒に着火する現象がみられたことを意味しているものであるが、セラミックス面における場合の方がステンレス鋼面よりも概略100Kほど低い温度で着火している。これは、ライデンフロ

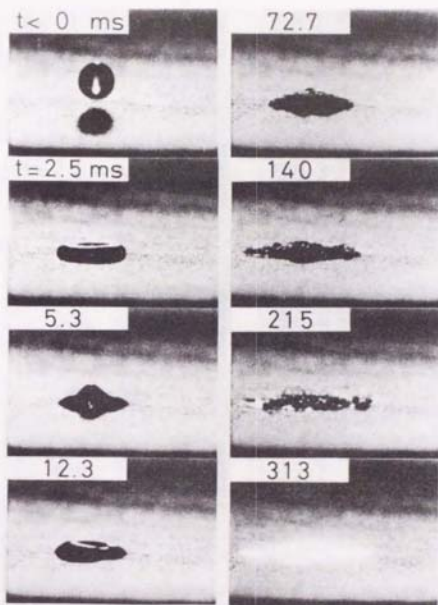
スト点よりも高い温度領域において蒸発する場合でも、同一の初期加熱面温度に対してはセラミックス面の方が衝突時の蒸発量が大きくて局所的に可燃混合気が形成されやすいため、より発火温度（メチルアルコール：743 K、エチルアルコール：665 K）に近い温度で着火すると考えられる。

2. 6. 2 蒸発様相

第2. 18図～第2. 21図に示した寿命曲線上で、核沸騰状に短時間で蒸発する加熱面温度領域における液粒の蒸発様相を高速撮影した例を第2. 22図～第2. 25図に示す。図中の各写真には、滴下された液粒の一部が加熱固体面に最初に接触した瞬間からの経過時間を t で示している。第2. 22図(1)はステンレス鋼製の加熱面上における蒸発様相の例で、液粒はメチルアルコールである。表面が鏡面状であるために、それぞれの写真には変形しながら蒸発する液粒の実像とともに、その倒立像も写っている。加熱面への衝突の直後、ひとたび初期液粒直径 d_0 の約3倍程度の直径をもつ薄い円板状に変形するが、この時点で底面の固液接触部より細かい気泡が発生し始める。以降、固液接触面の輪郭の大きさが d_0 の約2倍程度まで復元した状態で激しく沸騰する。この沸騰の過程は、この後に示すセラミックス加熱面の場合に比べて比較的大きな気泡の発生を伴う。また、主滴からは多くの小滴が分離して加熱面上に飛散するが、これらの全てが蒸発するために必要な時間としての寿命は主滴のみの蒸発時間に比べて長く、第2. 19図に示した通りである。外部から観察される固液接触部の輪郭は気泡の発生、移動にともなって振動的に形状を変え、外縁部は局部的に濡れた状態と乾いた状態が繰り返されている。以上の挙動はエチルアルコールそしてベンゼンの場合もほぼ同様であった。水の場合には、衝突時直後の加熱面上への広がり面積や沸騰過程での広がり面積がやや小さい、加熱面への衝突後、最初に気泡を発生するまでの経過時間が長い、突沸の挙動を示しやすく主滴から飛散する割合が大きい、などの点で相違が見られたが、基本的には同じような様相が観察された。このように、酸化膜などがなく鏡面状に研磨された状態のステンレス鋼加熱面上において蒸発する液粒の挙動は、核沸騰状に気泡を多く発生するが、従来の報告例で言及されているような、加熱面上に薄く広がって瞬間的に蒸発する理想的な挙動とはかなり異なる面があるように思われる。

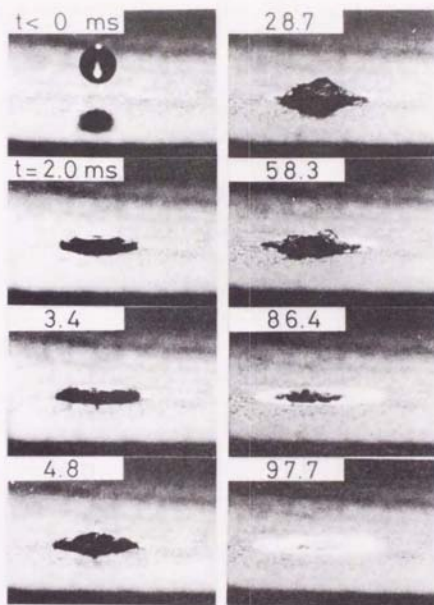


第2. 22図 ステンレス鋼製加熱面に衝突する液粒の蒸発様相



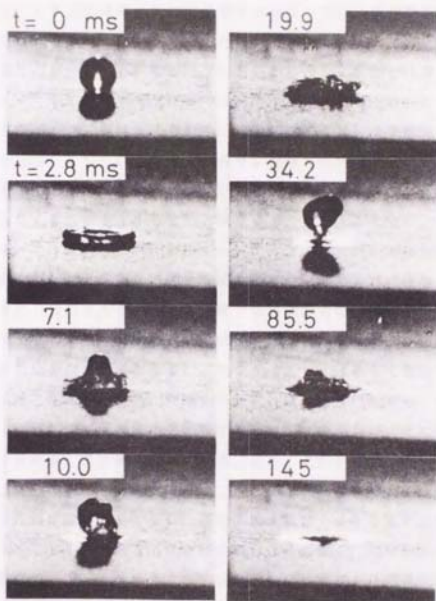
Ceramics (a), $T_{wo}=550\text{ K}$ $\underline{5.0\text{ mm}}$
 Water, $d_0=1.79\text{ mm}$

第2. 23図 セラミックス (a) 加熱面に衝突する液粒の蒸発様相 (1)



Ceramics(a), $T_{w0}=668\text{K}$ 5.0 mm
 Water, $d_0=1.79\text{mm}$

第2. 24図 セラミックス (a) 加熱面に衝突する液粒の蒸発様相 (2)



Ceramics(a), $T_{w0}=824\text{ K}$ $\underline{5.0\text{ mm}}$
 Water, $d_0=1.79\text{ mm}$

第2. 2.5図 セラミックス (a) 加熱面に衝突する液粒の蒸発様相 (3)

第2. 2. 3図～第2. 2. 5図はセラミックス (a) 加熱面上で水滴が蒸発する場合に観察された蒸発様相を示す一連の高速度撮影写真であり、初期加熱面温度はそれぞれ寿命がきわめて短くなる温度領域の低温部、中温部、高温部に対応している。第2. 2. 3図では初期加熱面温度 T_{w0} が低いため、衝突後しばらくの間は気泡の発生が認められないが、時間の経過 ($t = 1. 2, 3 \sim 7. 2, 7 \text{ ms}$) とともに液粒表面が細かく乱れ始めることから、加熱面上に広がった液粒の底部の固液接触面より多数の小気泡を発生して核沸騰の状態に至ることがわかる。ここで使用したセラミックス面は水に対して比較的濡れやすく、衝突直後に一度、円板状に変形した後、この形状が復元する過程に相当する時点 ($t = 5. 3 \text{ ms}$) になっても固液接触部の輪郭の大きさはほとんど収縮しておらず、また、その後、液粒が加熱されて気泡を発生するまでの間には徐々に拡大していく。そして、沸騰、蒸発が進行する過程 ($t = 7. 2, 7 \sim 21. 5 \text{ ms}$) においては急速に接触面の大きさを拡大し、寿命末期まで大きな接触面積を保っている。液塊からは多数の小気泡が発生し放出されるが、この過程で液の外縁部の形状が振動するように動く挙動を示すことはなく、固液接触面積は時間の経過とともに単調に大きくなる。沸騰の状態は寿命の全期間を通じて穏やかであり、連続して多数の小気泡を発生する核沸騰の様相を呈する。主滴より分裂、飛散する小液滴は、第2. 2. 2図のステンレス鋼製加熱面の場合と比較するときわめて少ない。そして寿命の末期 ($t = 31. 3 \text{ ms}$) には薄い液膜の状態に至り、これが蒸発し終えて寿命となる。この液膜は、写真から特定することは難しいが表面粗さ程度の厚さで、固体面に密着した非常に薄い液膜であり、蒸発の際、気泡の発生は認められない。

第2. 2. 4図では T_{w0} が第2. 2. 3図の場合よりも高く、寿命がほぼ極小値をとる加熱面温度である。この場合には、加熱面への衝突により円板状に変形した時点 ($t = 3. 4 \text{ ms}$) で既に気泡の発生が始まっている。その後、盛んに気泡を発生するようになり、時間の経過とともに固液接触面の大きさを著しく増しながら蒸発していく。セラミックス加熱面上に広がって気泡を放出しながら蒸発する液塊の加熱面と直接接している部分の外縁部は、第2. 2. 3図で認められたような薄液膜状になっている。その輪郭の形状は滑らかではほぼ円形である。外部から観察される固液接触部の時間平均的な面積には第2. 2. 3図の場合との大きな差は見られないが、寿命はより短く、加熱面から伝達される熱流束が大きくな

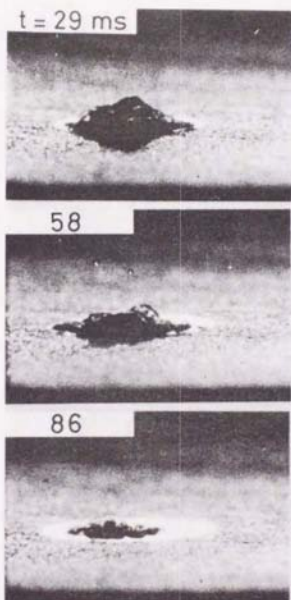
っていることがわかる。

加熱面温度が最も高い第2. 25図の場合には、加熱面への衝突直後の液粒の底部における蒸気発生量が大きく、また、固液接触面積が小さく液塊の下部より加熱面表面に沿って放出される蒸気量が多いことなどにより、液粒の一部が加熱面から持ち上がるような現象も見られる ($t = 10.0, 34.2 \text{ ms}$)。これは、従来、金属加熱面上における遷移領域の蒸発形態として示されているものと類似した現象であるが、加熱面との衝突直後に液粒底部に形成されると推定される薄液膜を介し、寿命の全期間を通して固体面と直接接している点で明らかに異なっている。薄液膜は、第2. 25図のような過熱度の高い状態でも加熱面表面に密着して存在しており、これが加熱面との直接接触状態を維持するという形で液粒への伝熱に大きく寄与していると考えられる。

以上、第2. 23図～第2. 25図に示したセラミックス (a) 加熱面上における蒸発挙動は、加熱面温度にしたがって連続的に変化していることがわかり、最大蒸発率点とはもはや蒸発形態を区別する境界温度ではないことが明かである。このセラミックス (a) 加熱面上における蒸発挙動は、液粒の種類が異なる場合でも同様である。ただし、水の場合には、加熱面上に大きく広がる傾向が強く、薄液膜も顕著に現れる。なお、加熱面温度が高い第2. 24図および第2. 25図の場合に観察された主滴のみの寿命は第2. 18図の寿命曲線における値よりも30%程度小さな値となっている。これは、加熱面上に滴下された水滴が沸騰により蒸発する過程では主滴より分離する小滴の量がなお多いことを示しているものと思われる。同様に、セラミックス (a) 加熱面上における液粒の主滴のみの蒸発時間は、寿命曲線に示された寿命に比べメチルアルコールで約20%、エチルアルコールで約10%小さい値であったが、ベンゼンでは寿命曲線の値にほぼ一致していた。

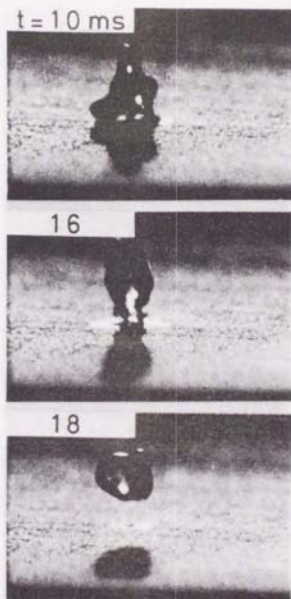
2. 6. 3 固液接触面の挙動

セラミックス (a) 加熱面に水滴が衝突して蒸発する場合に観察される固液接触面の挙動を第2. 26～第2. 28図に示す。第2. 26図は第2. 24図に示した一連の写真の一部である。第2. 23図～第2. 25図に示したセラミックス加熱面で蒸発する液粒の挙動の高速度写真撮影による観察結果によると、核



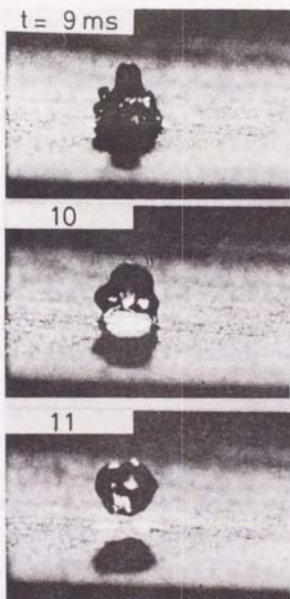
Ceramics(a), $T_{w0} = 668 \text{ K}$ 5.0mm
 Water, $d_0 = 1.79 \text{ mm}$

第2. 26図 核沸騰状態で蒸発する温度領域における固液接触面の挙動



Ceramics(a) , $T_{w0} = 932 \text{ K}$ 5.0 mm
 Water , $d_0 = 1.79 \text{ mm}$

第2. 27図 ライデンフロスト温度近傍における固液接触面の挙動(1)

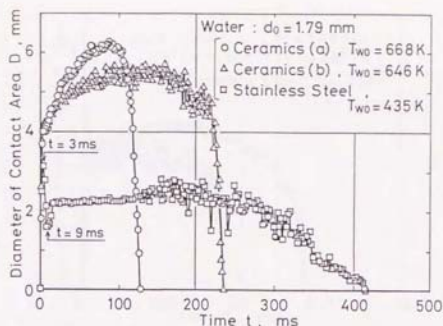


Ceramics(a) , $T_{w0} = 932 \text{ K}$ 5.0 mm
 Water , $d_0 = 1.79 \text{ mm}$

第2. 28図 ライデンフロスト温度近傍における固液接触面の挙動(2)

沸騰状態で蒸発する過程で加熱面と液粒の接触部の周囲には、第2, 28図に見られるような薄い液膜の層が存在していた。このような安定した状態で見られる薄い液膜の層は、初期加熱面過熱度が最も高く、かつ、衝突直後の時点で既に液粒底部の加熱面表面上に形成されていることが確認された。さらに、第2, 27図および第2, 28図に示すように、加熱面温度がライデンフロスト温度に一致するような高い場合でも、加熱面と液粒の衝突直後の短い期間中には、同様な薄液膜が加熱面上に付着しているようすがわかる。このように高い加熱面温度範囲において液が加熱面を濡らす現象からは、第2, 23図～第2, 25図に示したような核沸騰状態で気泡を発生しながら蒸発する挙動を示す温度領域では、蒸発する液境部と加熱面との接触部が、その外縁部だけでなく外部から観察される輪郭をもつ固液接触面の全体にわたってこのような薄液膜で覆われ濡れた状態に保たれていることが推定される。このような加熱面上に付着する薄液膜の層は液粒と加熱面の直接接点を維持するうえで大きな役割を果たしており、これを介して加熱面から液粒への熱伝達が行われている。

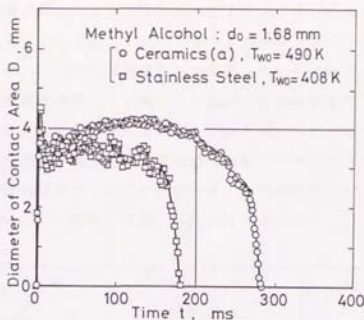
各試料加熱面上で蒸発する液粒の高速度写真から、固液接触面の輪郭形状が常に円形であるとみなし、その直径の大きさの時間による変化を測定した結果を第2, 29図～第2, 31図に示す。第2, 29図は水滴が各加熱面上で蒸発する場合に観察された接触面の大きさの変化を示す例であり、 T_w はほぼ各加熱面上で寿命が極小となる温度に対応している。セラミックス(a)加熱面上では、滴下された液粒が衝突直後に円板状に変形した状態に対応する接触面の大きさを起点として、液の温度が急速に飽和温度に加熱され核沸騰状態に至る過程で時間とともに急速に接触面積を拡大し、非常に短い時間で蒸発している様子がわかる。これに対しステンレス鋼製加熱面上では、固体面への衝突直後に円板状に広がった状態($t = 3 \text{ ms}$)よりも接触面が縮小した状態で蒸発している。固体面へ衝突した直後の接触面の大きさは極大値($t = 3 \text{ ms}$)、極小値($t = 9 \text{ ms}$)を示して減衰振動的な変化を見せ、滴下後は接触角によって定まる一定の大きさに落ちつく状況がわかる。加熱面温度が低いために、液が加熱されて沸騰を開始する状態に至るまでの時間は長く、この間は接触面の大きさはほぼ一定である($t < 100 \text{ ms}$)。沸騰が始まると接触部の輪郭形状は振動するように激しく変化するが、時間平均的には蒸発が進行し液境の容積が減少するとともに縮小してお



第2. 29図 接触面直径の時間による変化(水)

り、定性的には接触角がほぼ一定に保たれた状態で変化している傾向を示しているものと思われる。なお、ステンレス鋼加熱面上で沸騰する状態の固液接触面では局部的に濡れと乾燥の状態が繰り返されており、薄い液膜に覆われた状態のセラミックス(a)加熱面の場合とは異なっている。セラミックス(b)加熱面の場合には、セラミックス(a)加熱面と同様に加熱面上に大きく広がって沸騰、蒸発する状況がわかるが、輪郭形状が時間とともに振動的に変化しており、また、固液の接触面の大きさがセラミックス(a)加熱面の場合よりも小さく、したがって主滴の寿命に差がみられる。なお、水滴を、加熱していない常温の固体面上に3.0mmの高さより滴下した場合の接触面の大きさは、ステンレス鋼面とセラミックス(b)面ではほとんど変化は見られなかったが、その他の液粒の場合では5~15%程度、セラミックス(b)面の方が大きい状態であった。セラミックス(a)面上ではいずれの液粒も毛細管現象により数十秒に至る時間の経過とともに固体面上へ広がっていく現象がみられた。

第2. 30図は、メチルアルコール液が各加熱面上で蒸発する場合に測定された接触面の大きさの時間による変化を示す。T_{w0}は各加熱面上で寿命が最も短くなる温度に対応している。第2. 29図と基本的には同様な傾向が見られる。核

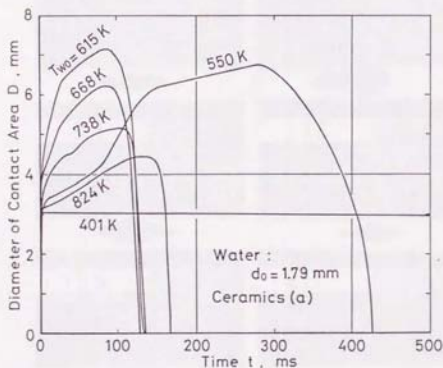


第2. 30図 接触面直径の時間による変化(メチルアルコール)

沸騰状に蒸発する場合、セラミックス(a)面では滴下された液粒はほとんど分裂をおこさず蒸発するのに対し、ステンレス鋼加熱面上では激しく沸騰する際に主滴より多くの小滴が分裂するため、主滴の寿命は短くなっている。また、セラミックス加熱面上で蒸発する液粒の固液接触面の大きさが時間の経過とともに大きくなる現象も見られるが、水の場合ほど顕著ではない。これは、エチルアルコール、ベンゼン、その他の種類の液粒の場合にも同様であり、時間に対する変化の割合は小さく、接触面の大きさはほぼ一定となる。

セラミックス加熱面の広い温度領域において液粒が固体面と直接接触した状態で蒸発する場合の初期加熱面温度による固液接触面の大きさの変化を表す一例として、第2. 31図に、セラミックス(a)加熱面上で水滴が蒸発する場合に測定された接触面直径の時間による変化を示す。第2. 18図に示した寿命曲線上で寿命が非常に短くなっている $800\text{ K} < T_{w0} < 800\text{ K}$ の温度領域においては、寿命はほとんど同じであるのに対して、接触面の大きさは T_{w0} が高くなるにつれて全体的に小さくなっていることがわかる。これは過熱度の上昇とともに加熱面から液粒へ伝達される熱流束が連続的に増大していることを意味する。寿命が極小値を示す温度を越える加熱面温度範囲では接触面の大きさがさらに小さくなる

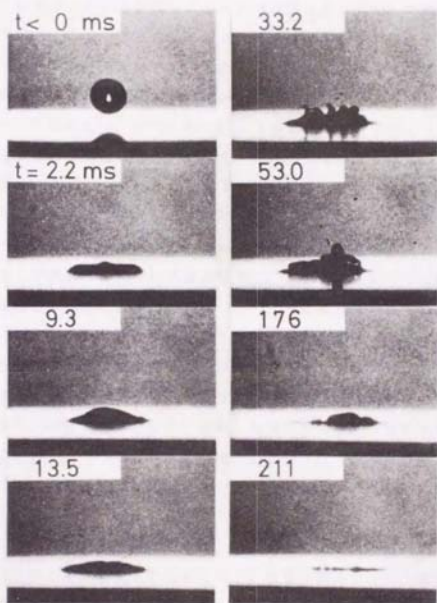
ため寿命が長くなる。熱流束が増加することにより、加熱面上へ広がった液の外縁部からの蒸発量が増し、これが接触面の拡大を妨げるために生ずる現象と考えられる。また、第2.31図の $T_{w0} = 550\text{ K}$ の例で示すような、寿命曲線上で T_{w0} が高くなるにつれて寿命が急速に小さくなっていく過熱度の低い温度領域では、滴下された液粒が沸点まで加熱される過程では接触面積が小さいが、沸騰過程での接触面積は T_{w0} が高くなるほど大きくなる傾向がみられた。なお、固液が直接接触して核沸騰状で蒸発するような温度領域のセラミックス加熱面上で蒸発する液粒の固液接触面積が、加熱面温度が高くなり加熱面からの熱流束が増すと小さくなる現象は全ての液粒の場合に共通してみられた。



第2.31図 初期加熱面温度による接触面直径の変化(水)

2.6.4 セラミックス加熱面の表面粗さの影響

セラミックス(a)加熱面とセラミックス(b)加熱面の材質は全く同じであるが、第2.2図に示したように表面粗さが異なる。セラミックス(b)加熱面の表面は研磨された面であるが、素材の特性により必ずしも平滑な面となっているわけではない。表面粗さが大きい加熱面に液粒が衝突した時には突起部分



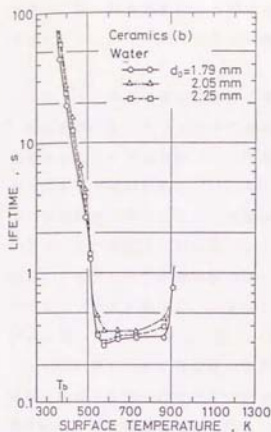
Ceramics (b), $T_{W0} = 646 \text{ K}$ [5.0 mm]
 Water, $d_0 = 1.79 \text{ mm}$

第2. 3 2 図 セラミックス (b) 加熱面における蒸発様相

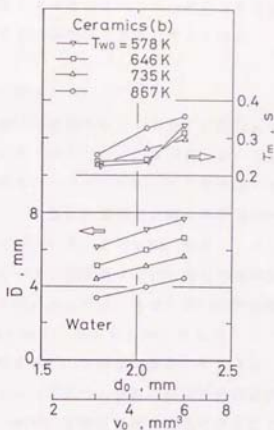
で固液が局部的に直接接触しやすくなると考えられる。第2. 18～第2. 21図の寿命曲線は、表面に突起状の部分が多いと考えられるセラミックス(a)加熱面の方がライデンフロスト点が高い傾向も与えているが、大きな差はない。両セラミックス加熱面における表面粗さの大きさは最大高さ R_{max} で表示すれば同程度であり、第2. 2図のような表面粗さの相違はライデンフロスト温度に対してはほとんど同じ効果を与えている。これに対して、最大蒸発率点に匹敵するような短い寿命を示す温度領域における寿命は、粗さが大きいセラミックス(a)加熱面の方がより短くなっている。第2. 32図に、セラミックス(b)加熱面で観察された水滴の蒸発様相の一例を示す。加熱面表面温度が第2. 32図と同程度である第2. 24図のセラミックス(a)加熱面の場合と比較すると、セラミックス(b)加熱面の方が主滴の寿命がより長くなっていることがわかる。第2. 32図では撮影方向が水平に近い方向で加熱面上の固液接触面の輪郭形状は明かでないが、蒸発過程の液塊の周縁部は薄く、加熱面表面に沿って広がり、固液接触面を形成していることがわかる。しかし、薄液膜状になっている固液接触面の外縁部は、第2. 29図に示したように、時間の経過に対して振動するように動く。これは、表面が研磨されて滑らかであるために適当な厚さの液膜を保持することができず、核沸騰状で蒸発する液塊の外縁部に現れる液膜の平均厚さが非常に薄くなり、局部的に蒸発して、濡れ、乾燥の状態を繰り返すためにみられる現象と推定される。セラミックス加熱面の表面粗さは、表面に液膜を保持し、安定した固液接触面を形成する効果を生じていると考えられる。

2. 6. 5 初期液粒直径の影響

寿命曲線に対する初期液粒直径のばらつきの影響を調べるため、セラミックス(b)加熱面を使用して液粒の大きさを広い範囲で変化させた場合に測定された水の寿命曲線を第2. 33図に示す。第2. 33図中、550K～900Kの温度領域における寿命はビデオカメラ(30f/s相当)を使用して測定された平均値であり、現象に対して時間分解能が不足しているため必ずしも滑らかな曲線とはなっていないが、液粒が図示したような範囲で大きくなると寿命も大きくなる傾向が現れている。また、これと同じ温度領域において加熱面上に広がって蒸発する液粒の高速度写真から測定された、初期液粒直径の大きさに対する固液接



第2.33図 初期液粒直径による
寿命曲線の変化



第2.34図 初期液粒直径による
固液接触面直径および液粒寿命の変化

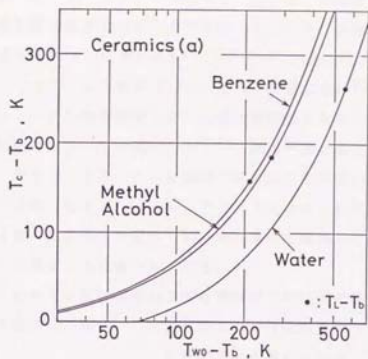
触面の大きさおよび主滴の寿命との関係を第2.34図に示す。固液接触面の大きさは、その時間変化を表す第2.29図に示したような図より求められる時間平均値 \bar{D} で表している。第2.34図中の主滴の寿命、固液接触面の大きさの測定値はそれぞれ一滴の蒸発より求められたものであり、複数回の測定による平均値ではない。第2.34図によると、初期液粒直径 d_0 に対して固液接触面の大きさ \bar{D} が直線的に増加している。これは、加熱面上で液粒が直径 \bar{D} の円板状に変形した状態で蒸発すると考えた場合の円板状に変形した液の厚さ $\frac{v_0}{\pi \bar{D}^2/4}$ が d_0 に比例して変化することを示し、したがって、このような温度領域における液粒の寿命は初期液粒直径 d_0 にほぼ比例することがわかる。第2.34図の主滴の寿命、第2.33図の液粒の寿命はほぼこれに従った変化を示している。本研究

においては、写真撮影による液粒の滴下時の大きさのばらつきは最大3%程度であったが、これが寿命に与える影響も同程度の範囲内であると考えられる。

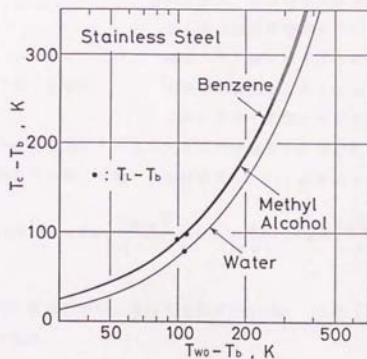
2. 6. 6 金属加熱面における現象との関係

熱伝導率が低いセラミックス加熱面に液粒が直接接して蒸発する場合には加熱面内には大きな温度降下が引き起こされると考えられる。本研究において加熱面材料として使用した $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ 系セラミックス材料の熱伝導率は、第6章の実測結果に示すように、実験に使用した金属加熱面間では最も熱伝導率が低いステンレス鋼に比べても約1/10となっている。このため、第2.18図～第2.21図に示す寿命曲線では、セラミックス加熱面における最大蒸発率点やライデンフロスト温度は、ステンレス鋼の場合とは大きく異なり高い加熱面温度領域に現れている。また、第2.23図～第2.25図に示したセラミックス(a)加熱面上における液粒の挙動を比較すると、加熱面に衝突して広がり、接触面を形成して盛んに気泡を発生するようになるまでの状況は初期加熱面表面温度 T_{w0} により大きく異なっているが、この過程で接触面温度は大きく低下していると考えられる。 T_{w0} が最も高い第2.25図の場合、蒸発が進行して寿命の末期に近づくにしたがい加熱面上に広がった状態の液全体から気泡を発生して核沸騰状に蒸発するようになるが、この段階における蒸発様相は、これよりも T_{w0} が低い第2.23図や第2.24図の場合の加熱面上で見られる接触面の全体から気泡を発生している様相に類似したものとなっている。このように、液粒の蒸発挙動も加熱面温度降下にしたがって変化していることがわかる。

セラミックス加熱面に液粒が衝突した直後に形成される固液接触面の温度は、半無限固体の熱伝導理論による、異なる温度に保持された二物体が急接触する場合の接触面温度 T_c を表す第(2-2)式によって与えられる。ステンレス鋼製加熱面に液滴が衝突する場合の接触面温度の実測値は、ほぼ、第(2-2)式によって計算される T_c の値に一致することが知られている⁽²¹⁾。そこで、本研究において使用したセラミックス(a)加熱面とステンレス鋼加熱面の場合について、第(2-2)式を適用して接触面温度 T_c を計算し、初期加熱面温度による変化を整理した結果を第2.35図および第2.36図に示す。計算に使用した



第 2. 3 5 図 初期加熱面温度と固液接触面形成直後の接触面温度の関係 (1)



第 2. 3 6 図 初期加熱面温度と固液接触面形成直後の接触面温度の関係 (2)

加熱面材質の $\sqrt{c\rho\lambda}$ の値は図示した温度範囲における実測値の平均値である。液粒試料については、水、メチルアルコール、ベンゼンの場合について示しており、いずれも初期液粒温度 T_{i0} は一定で293 Kとした。各図中には寿命曲線から得られているライデンフロスト点を $(T_L - T_b)$ で示している。第2. 35図におけるセラミックス(a)加熱面においては、各液粒試料についてのライデンフロスト点 T_L で示す加熱面温度に対する接触面温度が非常に高くなっており、 $(T_c - T_b)$ の値は第2. 36図のステンレス鋼加熱面の場合に比べて2~3倍になっている。セラミックス(a)加熱面の場合には接触面温度 T_c が第2. 35図に示すように高くなるが、ライデンフロスト点よりもわずかに低い温度までの、遷移領域を除く加熱面温度範囲では寿命期間内で継続して固液接触状態を維持して核沸騰状に蒸発する現象がみられる。

セラミックス加熱面に液粒が衝突して核沸騰状に短時間で蒸発する場合には、加熱面への衝突直後に、第2. 35図に示したような温度降下を含む急激な温度変化があると推定される。ここではこの初期の温度降下を大きさが時間により変化しない一定表面熱流束により生ずる温度変化で近似的に考え、表面熱流束の大きさとこれにより生じる表面温度降下について調べる。そこで第2. 37図に示すように、半無限固体状の加熱面の表面上において表面に直角な z 軸上に中心をおく半径 $r = \bar{R}$ である円形領域全体($r \leq \bar{R}$, $z = 0$)を通して一定の大きさの熱流束 q_0 が加熱面外に伝達される場合の加熱面内の中心軸(z 軸)上の温度 $T(r=0, z, t)$ は次式で与えられる⁽³⁵⁾。

$$T(0, z, t) = T_{w0} - \frac{2q_0\sqrt{t}}{\sqrt{c\rho\lambda}} \left\{ \operatorname{ierfc} \left(\frac{z}{2\sqrt{at}} \right) - \operatorname{ierfc} \left(\frac{\sqrt{z^2 + \bar{R}^2}}{2\sqrt{at}} \right) \right\} \dots (2-3)$$

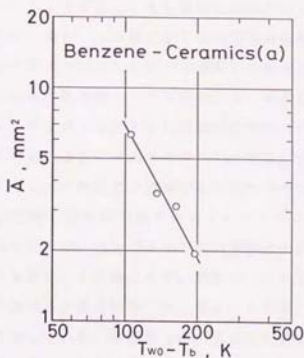
加熱面表面の円形領域の中心における温度 $T(r=0, z=0, t)$ は第(2-3)式より次式に示すようになる。

$$T(0,0,t) = T_{w0} - \frac{2q_0\sqrt{t}}{\sqrt{c\rho\lambda}} \left(\frac{1}{\sqrt{\pi}} - \text{ierfc} \left(\frac{R}{2\sqrt{at}} \right) \right) \quad \dots (2-4)$$

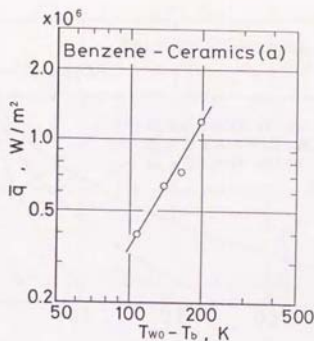
第(2-4)式を用いてセラミックス加熱面の表面温度変化を計算するための \bar{R} の値としては、第2.29図～第2.31図に示したような固液接触面直径 D の時間変化を表す図より時間平均の接触面直径 \bar{D} ($=2\bar{R}$)を求めてこれを使用する。また、熱流束 q_0 の値には、時間平均の接触面積 \bar{A} ($=\pi\bar{D}^2/4$)を使用して次式により求められる一つの液粒の寿命期間内における時間平均熱流束 \bar{q} を用いる。

$$\bar{q} = \frac{Q}{\bar{A} \cdot \tau_0} \quad \dots (2-5)$$

ただし、第(2-5)式における Q は一滴の液滴を飽和温度の蒸気とするのに必要な熱量を表す。第2.38図は、ベンゼン滴がセラミックス加熱面上で核沸騰状に蒸発する場合に測定された時間平均の固液接触面積 \bar{A} と初期加熱面温度 T_{w0} の関係を示す。図示している温度範囲は、第2.21図に示した寿命曲線上では

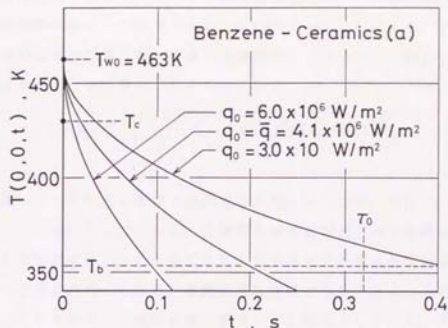


第2.38図 初期加熱面温度と時間平均固液接触面積の大きさの関係



第2.39図 加熱面から液粒への時間平均熱流束

寿命が極小値を示す付近から寿命が徐々に大きくなっていく加熱面温度範囲に対応しており、核沸騰状に蒸発する温度領域の一部であり、また測定点数も少ないが、 $(T_{w0} - T_b)$ が上昇するとともに接触面の大きさ \bar{A} が直線的に減少する傾向がわかる。さらに、第2.38図に示した時間平均接触面積 \bar{A} の値を用い、第(2-5)式により求められた加熱面から液粒に伝達される時間平均熱流束 \bar{q} と初期加熱面温度 T_{w0} の関係を図2.39図に示す。寿命期間内の時間平均熱流束 \bar{q} は $(T_{w0} - T_b)$ が上昇するとともに直線的に増加している。第2.38図、第2.39図より得られる \bar{R} 、 \bar{q} の値を用いて、第2.21図に示したベンゼン滴がセラミックス(a)加熱面上で蒸発する場合の寿命曲線において寿命が最も短い最大蒸発率点近傍の加熱面温度である $T_{w0} = 463$ Kの場合について、第(2-4)式により計算されたセラミックス加熱面上の固液接触面の中心における温度の時間変化を図2.40図に示す。熱流束 q_0 としては実測による時間平均熱流束 \bar{q} のほか図示した値を使用した。第2.40図には第2.35図による接触面温度 T_c も示している。熱流束 q_0 の大きさが実測に基づく寿命期間内の時間平均熱流束 \bar{q} に等しいと仮定した場合には、接触面中心の温度が液粒の寿命 T_0 以前に液粒試料の沸点 T_b まで低下している状況も見られる。実際にセラミ



第2. 40図 円形の固液接触面の中心における温度の時間変化
(熱流束が一定の場合)

ックス加熱面上で液粒が蒸発する場合には、液粒の蒸発挙動の観察結果よりわかるように、現象の概要としては、液と加熱面の温度差が大きな初期の熱流束は大きく、加熱面温度が降下した後の寿命末期における熱流束は小さくなっていると考えられ、一定ではない。しかし、第2. 40図は、定性的には時間平均熱流束 \bar{q} 程度の大きさの熱流束で大きな接触面温度降下が生じることをよく示していると考えられる。なお、第2. 40図に示した温度変化は接触面中心位置における、しかも熱伝散率 α の値が小さいセラミックス加熱面における計算例であつて、第(2-4)式の右辺()内の第2項は第1項に比べて小さく、 $t < 0.3$ sの範囲では \bar{q} の影響はほとんど現れていない。

従来の金属系の加熱面を使用した研究においては、寿命の全期間を通して加熱面と液粒が直接接触して核沸騰状に蒸発する挙動がみられるのは液粒の沸点に相当する加熱面温度から最大蒸発率点近傍までの狭い温度範囲内に限られるが、最大蒸発率点近傍よりライデンフロスト温度、あるいはライデンフロスト温度を越えるまでの温度領域においても加熱面に液粒が衝突した直後の短時間の間は固液の直接接触が生じ、核沸騰状に蒸発する現象が知られている。このような沸騰蒸

発領域、遷移領域そしてスフェロイド状蒸発領域にかけての温度領域において生じる固液接触時間については、Makino & Michiyoshi⁽²⁹⁾により、水滴と材質が異なる数種の金属加熱面（銅、真鍮、炭素鋼およびステンレス鋼）を使用した実験から次に示すような実験式が求められている。

$$\tau_t = 1.51 \times 10^{17} \left(\sqrt{\frac{c \rho \lambda}{\pi}} \right)^{-2.20} (\sqrt{d_0})^3 (T_{w0} - T_b)^{-3.01} \quad \dots (2-5)$$

ただし、第(2-5)式における各記号の単位は c [J/(kg·K)]、 ρ [kg/m³]、 λ [W/(m·K)]、 d_0 [m] である。沸騰蒸発領域における固液接触時間とは液粒寿命そのものを表すので、この金属面において得られた関係を本研究で使用したセラミックス面に適用してみる。実験結果と比較するために d_0 を本研究における値に一致させて計算した結果を既に第2.18図に示している。この結果によると、セラミックス加熱面上で T_{w0} の上昇とともに寿命が短くなる領域については比較的良く一致しているが、それよりも加熱面温度が高い領域では傾向を異にしている。加熱面温度が高い範囲では、本研究におけるセラミックス加熱面の場合には第(2-5)式に示す金属加熱面による実験より得られた整理式から計算される値に比べ、より長い固液接触時間（液粒の寿命）が得られている。また、西尾ら⁽¹⁵⁾により金属加熱面の場合のライデンフロスト温度近傍での固液接触時間は、第(2-6)式に示すようなRayleigh⁽³⁶⁾による液粒の自由振動の第一次周期 τ_r にほぼ等しくなることが報告されている。

$$\tau_r = \pi \sqrt{\frac{\rho_l \cdot d_0^3}{16\sigma_1}} \quad \dots (2-6)$$

そこで第(2-6)式より本研究における $d_0 = 1.79$ mm の水滴の自由振動周期を計算し、第(2-5)式に示した Makino & Michiyoshi による実験式からこの周期に等しい固液接触時間を与える加熱面温度を求めると約 1110 K となり、セラミックス加熱面の場合のライデンフロスト温度の実測値よりも約 200 K 高い温度を与える。このように、セラミックス加熱面に液粒が衝突して蒸発する場合に、寿命全期間内で固液が直接接触状態を維持することにより広い温度範囲において著しく短い時間で蒸発する現象には、従来より研究されてきている金属加熱面上における現象から単に外挿的には説明できない点がある。

2・7 第2章のまとめ

加熱された固体面に単一の液粒が衝突して蒸発する現象に関して、銅、真鍮、ステンレス鋼など、材質が異なる金属加熱面および熱伝導率がより低いセラミックス製の加熱面と、水、メチルアルコール、エチルアルコールなど、種々の液粒とを用いた実験により、主として寿命曲線の形状に対する加熱面材質の影響について調べた。加熱面材質による寿命曲線の変化は、寿命が極小となる最大蒸発率点近傍から寿命が極大となるライデンフロスト温度近傍の形状に現れる。一般的に使用されている金属加熱面の場合には材質の種類が異なる場合でも熱伝導率などの熱物性値の範囲は狭く、また、寿命曲線に材質による変化が見られる温度領域において表面汚損など表面条件の影響が大きい。このため、これまで加熱面材質のみの影響を的確に示し得る実験データは十分でなく、加熱面材質の影響について必ずしも明かとなっていない。そこで、酸化膜等による表面汚損の影響が生じやすいことに留意して得られた清浄な金属系加熱面の寿命曲線により、加熱面材質の熱伝導率が低いほど最大蒸発率点、ライデンフロスト温度は高くなる傾向を与えるが、金属系の加熱面間ではこの差は比較的小さいことを示した。これに対して、熱伝導率がより低く、また、適当な表面粗さをもつセラミックス加熱面では、寿命曲線の核沸騰状蒸発領域が高温側へ拡大した形状となり、広い温度範囲で寿命が短くなる現象がみられた。セラミックス加熱面では加熱面温度が十分に高い温度領域でも加熱面表面に液膜が存在し、これにより固液が直接接する状態を維持することができるためであり、その低熱伝導性と液膜を保持しやすい表面構造による効果と推定される。このため、同じ加熱面温度範囲においてはスフェロイド状の蒸発形態となる金属系の加熱面の場合に比べると、広範な温度範囲で液粒の蒸発が促進されることになる。ただし、ここで示した加熱面温度範囲は初期温度で表されたものであり、セラミックス加熱面と蒸発過程の液との接触面の瞬間的溫度、あるいは液粒の寿命期間中の平均的な表面温度で考えた実質的な加熱面温度範囲は初期温度で表した場合よりも狭く、低いと推定される。セラミックス加熱面の場合には固液の接触面形成にともなって大きな加熱面温度降下が生じることにより、金属加熱面では固液の直接接が生じ得ないような高温の場合でも直接接による固液間の熱伝達が可能となっている。また、セラミックス加熱面の寿命曲線にみられる核沸騰状蒸発領域における現象は加熱面温度に対

して連続的に変化しており、最大蒸発率点は沸騰蒸発領域と遷移域との境界ではないなど、最大蒸発率点を中心とする領域の挙動が明かとなった。

第3章 セラミックスが被覆された加熱面に衝突して蒸発する液粒に関する実験
結果および検討

第3章 目 次

	Page
3. 1 はじめに	70
3. 2 加熱固体面試料	71
3. 2. 1 固体面試料の形状	71
3. 2. 2 溶射法によるセラミックスの被覆	72
3. 3 実験装置および実験方法	74
3. 3. 1 実験装置	74
3. 3. 2 液粒試料	75
3. 3. 3 実験方法	75
3. 4 実験結果	77
3. 4. 1 寿命曲線	77
3. 4. 2 蒸発様相	82
3. 5 核沸騰状蒸発領域における被覆層の材質の影響	88
3. 5. 1 固液接触面の挙動	88
3. 5. 2 加熱面から液粒への熱伝達	89
3. 6 第3章のまとめ	99

3. 1 はじめに

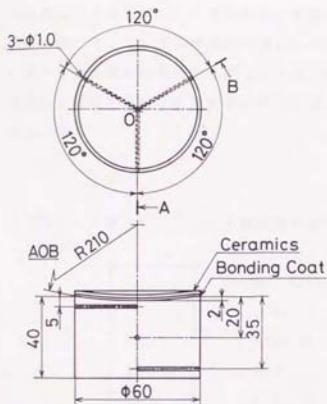
加熱された固体面上で単一の液粒が蒸発する現象に関する従来の研究では、加熱面の表面粗さや堆積物等による突起が存在する場合、また、酸化皮膜が生じて濡れ性が向上した場合などに、清浄な平滑面の状態では寿命の極大値を与えていた温度領域で固液が直接接触する機会が増えて寿命が短くなり、結果として寿命が極大となる領域がより高温側へ移動しライデンフロスト温度が高くなることが報告されている。このような場合、最大蒸発率点からライデンフロスト温度に至る領域では核沸騰および膜沸騰的な蒸発様相がみられ、遷移域としての挙動を示す。従って、寿命期間内全体で固液接触状態が維持される最大蒸発率点近傍の温度領域とは異なり、寿命は最大蒸発率点ほどには短くはない。ライデンフロスト温度が高くなるのに比べ、最大蒸発率点近傍の寿命が短い領域の大きさもわずかに広がるが大きな変化はない。第2章で使用した砂型鋳肌面をもつ加熱面などもこれに相当している。

これに対して、第2章におけるセラミックス加熱面に関する実験結果は、熱伝導率が高い金属加熱面表面に、適当な粗さをもち、高温度においても濡れ性の良い低熱伝導性の皮膜を適当な厚さに設けることにより、寿命曲線の形状が大きく変化し、最大蒸発率点近傍の寿命が短くなる領域が高温側へ拡大される可能性を示す。この被覆層の熱伝導率が十分に低い場合には、液粒との衝突により生じる温度降下が大きく、より高い加熱面温度範囲まで固液接触を維持することができると思われる。

第3章では、熱伝導率が高い金属面表面にセラミックスを薄く被覆した固体面を加熱面とする場合に液粒が示す蒸発挙動について調べる。

3. 2 加熱固体面試料

3. 2. 1 固体面試料の形状



第3.1図 固体面試料の形状

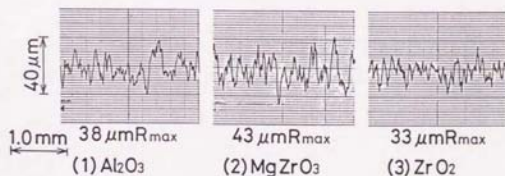
液粒の蒸発面として使用した固体面試料の形状を第3.1図に示す。直径が60mm、厚さが40mmの円柱状で、わずかに凹球面状に機械加工された基盤材の上端面に、溶射法により均一な厚さのセラミックス被覆層を設けた。基盤材の材質は、大気雰囲気下で約1200Kまでの使用に耐え、また、セラミックスとの接合面に基盤材表面の酸化の進行等による変化が生じにくいステンレス鋼(SUS304)とした。このステンレス鋼製の基盤材の側面には、その中心軸上における異なる3点

の温度を測定する熱電対を挿入するための直径1mmの小穴が、第3.1図に示すように互いに120°の角度をなして外表面から円柱状の基盤材の中心軸上まであけられている。セラミックス被覆層の材質は、被覆層の熱伝導率が段階的に異なるものとする目的から、アルミナ(Al_2O_3)、ジルコニウム酸マグネシウム($MgZrO_3$)およびジルコニア(ZrO_2)の3種類とした。以降、加熱固体面試料の種類は、それらに被覆されているセラミックス層の材質により区別することとし、セラミックス被覆層材質の化学記号で表す。これらの固体面試料は、まず、ステンレス鋼製の基盤材表面に下地処理として結合材層を設け、次に、組成、粒度分布が調整された市販のセラミックス粉末材料を厚さが均一になるように溶射して製作した。なお、溶射法の概要については第6章に示す。結合材層とは、Ni-Al-Mo系の金属複合体粉末の溶射層で、その溶射後の表面は表面粗さが40 μ m Rmax程度の粗面であり、基盤材とセラミックス層との良好な密

着性を維持するためのものである。このようにして製作された試料の中心軸から半径10mmの範囲内におけるセラミックス被覆層の厚さをダイヤルゲージにより測定した結果を第3.1表に示す。結合材層の厚さは平均して0.13mm程度であり、セラミックス層に比べ薄い。また、溶射後はセラミックス被覆層表面に対する後処理的な表面仕上げなどは特に行ってはいない。触針式表面粗さ計を使用して液粒と接触する表面中央部分の粗さ曲線を計測した結果を第3.2図に示す。

第3.1表 セラミックス被覆層および結合材層の厚さの測定結果

	Ceramic Coating [mm]	Bonding Coat [mm]
Al_2O_3	0.92±0.03	0.14±0.02
$MgZrO_3$	0.62±0.02	0.14±0.02
ZrO_2	0.91±0.06	0.12±0.02



第3.2図 セラミックス被覆層表面の粗さ曲線

3.2.2 溶射法によるセラミックスの被覆

本研究では、金属面表面に熱伝導率が低く、また、液粒との直接接触する機会

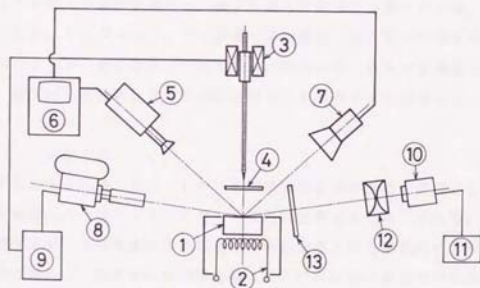
を多くできるような適当な粗さをもつ被覆層を設けるため、酸素-アセチレンガスを加熱源とする溶射装置を使用してセラミックス粉末を溶射する方法により被覆層を形成した。これによれば比較的容易で、簡単な作業により、目的とする厚さのセラミックス被覆層が得られる。しかし、結果として得られる被覆層の熱伝導率は、被覆層が溶射法に固有なセラミックス粒子の熔融、急冷という特異な過程を経て形成されるため粉末状の原材料のそれとは大きく異なり、また、溶射施行時の各種条件の影響を受けて変化しやすい。さらに、使用時の加熱昇温や、水など液粒の蒸発にともなう局所的な急冷などの熱環境に耐え、基盤材からの剥離などをおこさない結合状態を得るには十分な注意が必要となる。溶射セラミックスの熱伝導率については、固体面試料の製作と同時に熱伝導率測定用の試料を同一の条件で製作し、これを使用して実測した。測定結果の詳細は第6章に示す通りである。また、基盤材との接合性についても、ステンレス鋼製基盤材とここで使用した3種類のセラミックス材質との組み合わせで予備的な実験を行い、剥離を生じない条件について検討した。その結果、本研究で使用する被覆層厚さの範囲内では第3、1図に示したような3層構成で可能であることが確認された。

3. 3 実験装置および実験方法

3. 3. 1 実験装置

実験装置の基本的な構成は第2章で使用したものと同じであるが、セラミックス被覆層を設けた加熱面の表面温度の測定方法、およびビデオによる現象撮影装置として、蒸発速度が大きい温度領域における時間計測精度を向上させる目的から時間分解能がより高いビデオ装置を使用した点が異なる。

第3. 3図に本実験で使用した実験装置の概要を示す。液粒の蒸発面であるセラミックスが被覆された固体面試料①は電気ヒータ②によって一定温度に加熱される。電気ヒータ②の電力制御は温度調節計にソリッドステートリレーを組み合わせて行った。セラミックス被覆層の表面上には、表面温度計測用の熱電対が周辺部から表面に沿うように配置され、温接点が試料の中心軸から約1.5 mm離れた位置にアルミナセメントで接着されている。また、固体面試料内部の中心軸上



- | | |
|---------------------------|------------------------------------|
| ① Hot Surface | ⑧ High-Speed Motion-Picture Camera |
| ② Heater | ⑨ Camera Controller |
| ③ Dropping Equipment | ⑩ Xenon Illuminator |
| ④ Shutter | ⑪ Condenser Lens |
| ⑤ High-Speed Video Camera | ⑫ Light Diffuser |
| ⑥ Video Tape Recorder | |
| ⑦ Stroboscope | |

第3. 3図 実験装置の概要

にも3本の熱電対が配置されている。いずれの熱電対も素線の直径が0.1mmのK型であり、あらかじめその起電力を校正して使用した。熱電対の起電力は氷浴式基準接点を介してデジタル電圧計により測定した。ソレノイドコイルを利用した滴下装置③からはシャッタ④を介して一定の大きさの単一の液粒が加熱面上へ滴下される。加熱面上における液粒の蒸発挙動は、滴下装置に連動して作動する16mm高速度撮影カメラ⑤、あるいは高速度ビデオカメラ⑥により撮影される。高速度ビデオカメラ⑥は発光時間20 μ sのストロボ⑦と同期させて使用し、200f/s(時間分解能5ms)で録画し、ビデオテープレコーダ⑧で再生する。

3.3.2 液粒試料

液粒試料としては、メチルアルコール、シクロヘキサン、ニトロベンゼン(いずれも試薬特級)および水(脱気した蒸留水)を使用した。液粒はマイクロシリンジによりその一定量が計量され、滴下装置の針状部に付着された後、加熱面上に滴下される。マイクロシリンジで計量する容積は、第2章の結果を参考とし、滴下時の大きさが一定になるよう調整した。液粒の滴下高さは加熱面上30mmとした。滴下時の液粒の温度は全測定を通じて29.6 \pm 2K程度であった。

3.3.3 実験方法

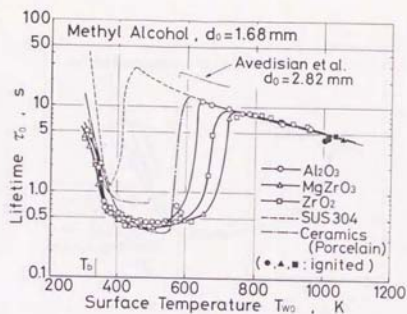
ヒータによって加熱、昇温された固体面試料の各部の温度が定常となった状態で、滴下装置より一定の大きさの単一の液粒が加熱面上に滴下される。滴下前の状態のセラミックス被覆層の表面温度は表面に接着された熱電対により測定したが、これと同時に、固体面試料の中心軸上における温度の測定値から外挿により求められるステンレス鋼部上面の温度と比較することにより、それが被覆層の剥離などが生じていない妥当な値であることを確認した。液粒が加熱面と接触した瞬間よりその全てが蒸発し終えるまでの寿命の計測には主として高速度ビデオカメラを使用した。数秒以上の比較的長い時間の測定は目視によりストップウォッチで行った。いずれの場合も同一条件下で5~10回の測定を繰り返し、その平均値をとって寿命とした。加熱面上に滴下された液粒の詳細な蒸発挙動は16mm高速度撮影カメラを使用して撮影した。フィルム面上には一定周波数のタイ

ムマークを写し込み、これによってフィルム送り速度を補正し、正確な時間計測に用いた。なお、ビデオカメラによる撮影方向は16mm高速カメラとは異なる方向とし、加熱面上での液膜の広がり状況が観察できるように考慮した。

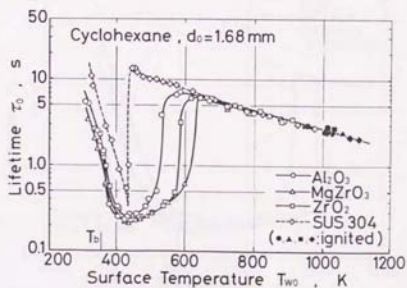
3. 4 実験結果

3. 4. 1 寿命曲線

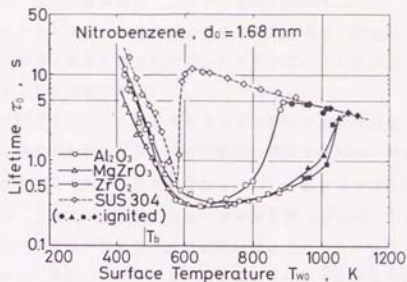
第3. 4図～第3. 7図に、各液粒が溶射セラミックス被覆面および被覆層のないステンレス鋼面で蒸発する場合に得られた寿命曲線を示す。横軸に示す初期加熱面温度 T_{w0} は、液粒が滴下される直前に測定されたセラミックス被覆層表面の温度である。メチルアルコールおよび水のステンレス鋼加熱面に対する寿命曲線は、それぞれ第2. 19図、第2. 18図に既に示したものを破線で示している。いずれの液粒の場合にもセラミックス被覆層がある場合には、ステンレス鋼面に比べ、広範な温度領域において一様に寿命が短くなっていることがわかる。この領域における寿命のばらつきは少なく、図示した記号の大きさ程度である。特に第3. 7図に示す水の場合にはセラミックス被覆層の効果が顕著であり、約500～900Kにかけての広い温度領域における寿命が、被覆のない場合に比べて約1/100以下となっており、蒸発速度が非常に大きくなっていることがわかる。 $MgZrO_3$ および ZrO_2 の場合にはライデンフロスト温度は高く、寿命曲線の測定温度範囲内には現れていない。また、セラミックス被覆層がなく表面が良く研磨されたステンレス鋼面の最大蒸発率点近傍における寿命の値は、沸騰、蒸発の過程で小滴の分裂を伴うことから、滴下された液粒の主滴が消失するまでの見かけの蒸発時間は短いが全ての液体が気化するのに必要な実際の蒸発時間は比較的長い。これに対してセラミックスが被覆されている場合には、被覆層が低熱伝導性であるため加熱面からの伝導熱流束が制限されるが、寿命期間中、液体が加熱面を濡らした状態で核沸騰を伴って蒸発する結果、寿命は短くなっている。さらに、第3. 6図のニトロベンゼンが $MgZrO_3$ および ZrO_2 が被覆された加熱面に衝突して蒸発する場合には、このような蒸発が広い温度領域の範囲内で着火しており、その結果、同じ温度のステンレス鋼製加熱面に対する場合と比べると非常に短い時間で燃焼し終えている。加熱面の表面温度が、液粒の沸点 T_b よりも低い領域においてもセラミックス被覆層がある場合の方が寿命が短くなっているが、これは、溶射セラミックスの表面がいずれの種類の液体に対しても濡れやすく、衝突後、時間の経過とともに加熱面上へ広がり、接触面積が非常に大きくなるためである。これらに対して、液粒が加熱面への衝突後、スフェロイド状態に至る温度領域では、被覆層材質の相違や被覆層の有無による



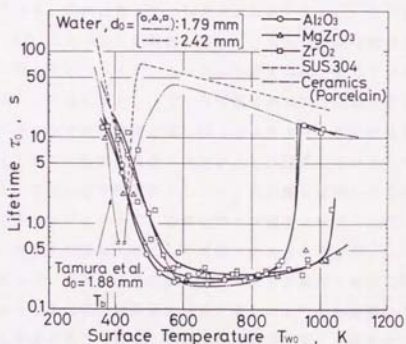
第3. 4 図 メチルアルコールの寿命曲線



第3. 5 図 シクロヘキサンの寿命曲線



第3. 6 図 ニトロベンゼンの寿命曲線



第3. 7 図 水の寿命曲線

差もほとんど認められなくなっている。また、第3. 5図、第3. 6図では、セラミックス被覆層がある場合に加熱面上の液粒に着火する温度はステンレス鋼の場合よりも低い加熱面温度範囲となっている傾向がみられるが、これは第2章で示したセラミックス加熱面の場合と一致する現象であり、衝突時の蒸発量が大きく局部的に可燃混合気が形成されやすいことを示す。これはメチルアルコールの着火温度についても同様である。

低熱伝導性のセラミックス被覆層を有する加熱面に液粒が接触して蒸発する場合には、第2章で示したセラミックス加熱面の場合と同様に加熱面表面温度は大きく低下すると考えられ、加熱面材質の $\sqrt{c\rho\lambda}$ の値が大きな影響を及ぼす。既に第2章で示した第2. 12図によると加熱面材質の $\sqrt{c\rho\lambda}$ が大きい場合ほどライデンフロスト温度が低くなる。この点に関してセラミックス被覆層の材質による寿命曲線の相違についてみると、第8章における実測値を基にして第5章の第5. 3図に示しているように3種類の溶射セラミックスの材質の中で $\sqrt{c\rho\lambda}$ の値が最も大きい Al_2O_3 の場合に遷移領域が最も低い加熱面温度で現れてライデンフロスト温度が最も低く、したがって寿命が短い核沸騰状蒸発領域の幅が最も狭くなっている。これに対して、 $MgZrO_3$ と ZrO_2 とでは、 $\sqrt{c\rho\lambda}$ の値の差が Al_2O_3 と比べると比較的小さいこともあり、同程度の加熱面温度範囲で遷移領域が現れておりライデンフロスト温度もほぼ一致している。これは、加熱面上に滴下された液粒がスフェロイド状態で蒸発する領域に近い加熱面温度範囲では現象が不安定で寿命の測定値のばらつきが大きくなるためあまり明確ではないが、 $MgZrO_3$ の表面粗さが大きいことに起因していると考えられる。すなわち、第3. 2図の粗さ曲線に示したように実験に使用した3種類のセラミックス被覆層の中では $MgZrO_3$ の表面粗さが最も大きく ZrO_2 は最も小さくて両者における粗さの差が大きく、表面粗さが大きい $MgZrO_3$ ではライデンフロスト温度に近い加熱面温度の固体面と液粒とが衝突する時に形成される蒸気膜の厚さを越えて突起状の加熱面の一部と液とがより直接接触しやすいた態にあることによる影響と考えられる。なお、寿命曲線に対する溶射セラミックスの表面粗さの影響については後述の第4章に示す。

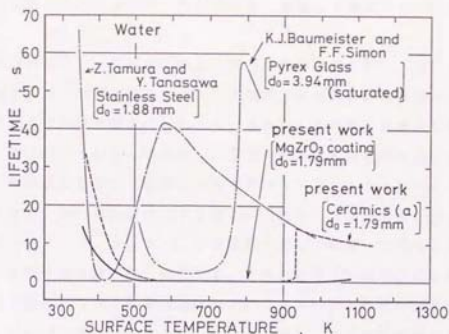
第3. 4図～第3. 7図に示した寿命曲線において、初期液粒直径 d_0 は全割

定を過して一定となるようにしているが、第2章で述べた方法と同様にして写真撮影により確認したところ、やはり3%程度のばらつきが生じていることが確認された。しかし、第2章において、滴下された液粒の重量測定から液粒の実際の大きさのばらつきは一方向からの写真撮影によるよりも小さいことがわかっており、実際の液粒の大きさのばらつきはこれよりも小さいと思われる。また、メチルアルコールとシクロヘキサンについては d_0 が約1.60mm程度であり、設定値よりわずかに小さくなっていった。しかし、この程度の初期液粒直径の差による寿命曲線への影響は小さく寿命の測定値のばらつき範囲内であったので、各寿命曲線において d_0 は初期設定値で示している。

第3.4図および第3.7図には、加熱固体の全体が熱伝導率が低いセラミックスで製作されていた、第2章で得られた結果についても併せて示している。第2章で使用したセラミックス加熱面の素材は磁器で、その熱伝導率は、後出の第6章に示す真空中での実測結果によると Al_2O_3 被覆層のそれに近い値をもっている。第2章で得られている寿命曲線と Al_2O_3 被覆層に対する寿命曲線の形状は類似した傾向を与えていることから、このような薄い被覆層の場合でも液粒との接触面近傍の加熱面内の中に生ずる温度変化は加熱面の全体がセラミックスである場合と大きな差はないものと推定される。

また、第3.4図には、Avedisian & Koplik⁽²⁷⁾により、気孔率10%の多孔質のアルミナ層が約1.6mmの厚さに被覆されたステンレス鋼加熱面を使用して測定されたメチルアルコールの寿命曲線も参考のため示した。比較的大きな液粒を用いてスフェロイド状蒸発領域の解析を目的として得られている寿命曲線であるため、核沸騰を伴って蒸発する領域およびそこからライデンフロスト点に至る過程における加熱面上における液粒の挙動や、アルミナ被覆層材質の熱伝導率、表面の状態などについては示されておらず不明であるが、定性的には本研究による結果と一致する寿命曲線となっていることがわかる。

加熱面の種類による寿命曲線の変化を第3.8図に示す。図は水の寿命曲線の例であるが、ステンレス鋼、バイレックスガラスを加熱面とした場合の報告例、および本研究における $SiO_2-Al_2O_3$ 系のセラミックス(a)加熱面および $MgZrO_3$ が被覆されたステンレス鋼加熱面で得られたものを示している。金属系の加熱面に対する寿命曲線については既に第2章の第2.14図に示してい



第3.8図 加熱面の種類による水の寿命曲線の変化

るが、材質が変わってもセラミックス類の加熱面に対するほど大きな変化はみられず、ステンレス鋼の場合と類似な形状となっている。また、表面汚損による影響を受けやすいことがわかっている。ステンレス鋼よりも低い熱伝導率をもつ加熱面材質に対する寿命曲線としては、ライゼンフロスト温度が非常に高くなるため、本研究によるほかは図示したBaumeisterら⁽¹⁵⁾による飽和液の寿命曲線以外には報告例は見あたらない。熱伝導率が低いパイレックスガラスではライゼンフロスト温度が高くなっているが、 $16\ \mu\text{m Rmax}$ 程度の表面粗さをもつセラミックス(a)ではさらに高く、また最大蒸発率点を含む広い温度領域における寿命が著しく短くなっている。 MgZrO_3 被覆層の熱伝導率が低く、また、表面粗さも最も大きいため、測定した温度範囲ではスフェロイド状で蒸発する現象は現れていない。

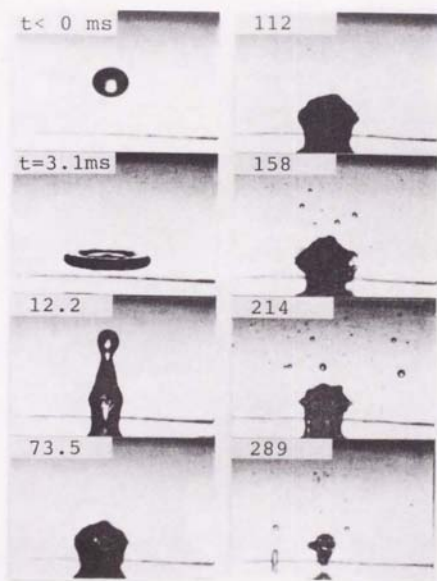
3.4.2 蒸発様相

第3.9図～第3.11図に、最大蒸発率点近傍の寿命が短い温度領域において、セラミックスが被覆されたステンレス鋼加熱面および被覆がなく平滑なステ

ステンレス鋼加熱面に衝突して蒸発する液粒の蒸発様相を高速度撮影した結果の一例を示す。tは滴下された液粒の一部が加熱面に接触した瞬間からの経過時間である。

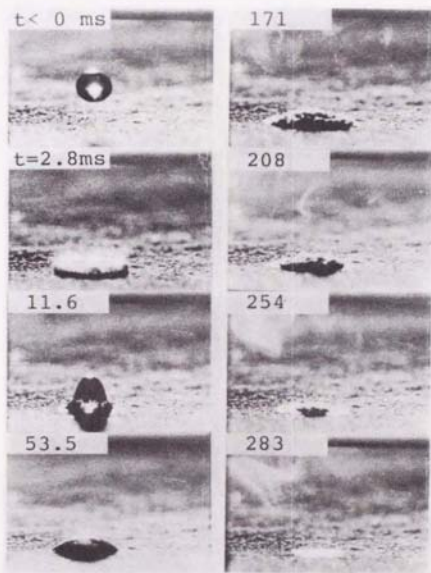
第3. 9図はステンレス鋼製加熱面の場合の蒸発様相の例で、液粒はニトロベンゼンである。よく研磨されたステンレス鋼製加熱面の表面は鏡面状であり、また、全体的にわずかに凹球面状となっているため、加熱面上の液塊の影の部分が倒立像のように写っている。加熱面への衝突の直後、初期液粒直径 d_0 の大きさの約2. 5倍の直径をもつ円板状に変形する($t = 3. 1 \text{ ms}$)が、その後は形状が復元するとともに接触面の大きさは d_0 の約1. 5倍程度まで縮小した状態で落ちつく($t = 73. 5 \text{ ms}$)。この状態で激しく沸騰して液塊底部の固液接触面より大きな気泡を繰り返し発生する。これにともない液塊の形状は大きく振動するように変化しながら蒸発が進行していくが、時間平均的な形状は凸レンズ状であり、これがしだいに小さくなっていく。また、外部から観察される固液接触面の輪郭形状も気泡の放出とともに大きく変化するが、平均的には円である。激しく沸騰する主滴からは多くの小滴が分離、飛散するため、第3. 8図に示す滴下された液粒の全てが蒸発する時間としての寿命の値に比べ、第3. 9図でみられる滴下された主滴が見かけ上蒸発し終える時間は非常に短くなっている。このような現象が、水やメチルアルコールの場合に特に著しいことは第2章でも述べた通りである。

第3. 10図および第3. 11図は MgZrO_3 が被覆された加熱面で観察された蒸発様相の例である。第3. 10図は、初期加熱面温度 $T_{w0} = 613 \text{ K}$ で、寿命曲線上で蒸発が遅い温度領域の中でも比較的低い加熱面温度であるが、寿命は極小値に近い値を示す温度である。加熱固体表面に衝突して円板状に変形した後($t = 2. 8 \text{ ms}$)、形状が復元していく過程において、加熱面上の液の周囲には薄い液膜が現れているのがわかる($t = 11. 8 \text{ ms}$)。この薄液膜は加熱面表面に密着して固液の接触面を形成しており、これが初期液粒直径 d_0 の約2倍程度の大きさを保っていてほとんど収縮していない。加熱面に衝突した直後の加熱面上への広がり($t = 2. 8 \text{ ms}$)は、表面の粗さのため、第3. 9図に示したステンレス鋼の場合よりも小さくなっていくが、沸騰を開始していく時点で加熱面上への広がりにはステンレス鋼の場合よりも大きくなっている。以後、沸



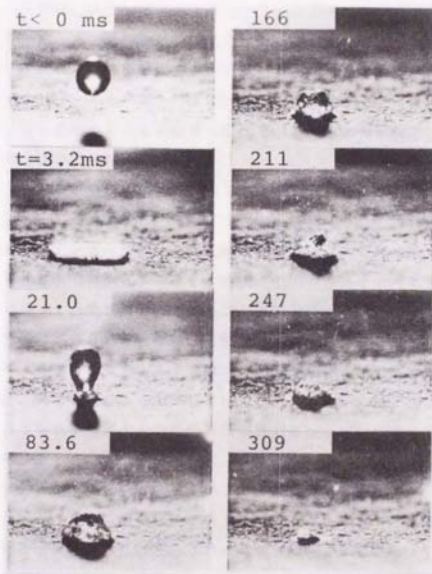
SUS 304 , $T_{w0}=585\text{K}$ 5.0mm
 Nitrobenzene , $d_0=1.68\text{mm}$

第3.9図 ステンレス鋼製加熱面に衝突する液粒の蒸発様相



MgZrO_3 , $T_{w0}=613\text{K}$ 5.0mm
 Nitrobenzene , $d_0=1.68\text{mm}$

第3.10図 セラミックス被覆加熱面に衝突する液粒の蒸発様相(1)



MgZrO₃ , T_{w0}=790K
 Nitrobenzene , d₀=1.68mm

5.0mm

第3. 11 図 セラミックス被覆加熱面に衝突する液粒の蒸発様相 (2)

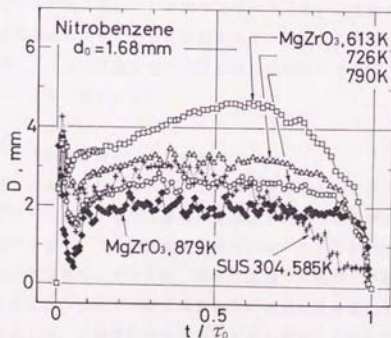
膜を伴いながら蒸発し、時間の経過とともに接触面積を拡大していく過程を経て寿命末期には薄液膜の状態に至り、蒸発を完了する。沸騰は、連続して多数の小気泡を発生する核沸騰の様相を呈している。固液接触面の外縁部は加熱面に密着した薄い液膜状となっており、また、その輪郭形状はほぼ円形であることが時間の分解能が高いビデオ撮影により確認された。沸騰はステンレス鋼製加熱面の場合よりも穏やかで、その過程で主滴から分裂、飛散する小滴もほとんどみられない。第3. 11図は、加熱面温度がより高く $T_{w0} = 790\text{K}$ で、核沸騰状蒸発領域の中でも加熱面温度の上昇とともに寿命が徐々に増加していく領域における蒸発様相である。第3. 10図の場合よりも蒸発過程の液塊と加熱面との接触面積の大きさは小さいが、寿命末期までほぼ一定の大きさを保っている。また、衝突直後の時点で液粒底部に形成される薄液膜により、寿命の全期間を通じ、加熱面を濡らし直接接状態を保っている。

第3. 10図および第3. 11図に示した、溶射セラミックスが被覆されている加熱面上において核沸騰状に短時間で蒸発する液粒について観察された蒸発挙動は、加熱面表面上には液粒が加熱面に接触した直後より寿命末期まで薄い液膜が表面に付着するように存在すること、液膜上の液塊部はその内部を通して気泡を発生するに伴って液膜が付着する加熱面上の範囲内で形状を著しく変化させるが、液塊の周囲に観察される液膜部の輪郭形状は円形で安定しており、時間の経過とともに形状を変えることもなく液塊状の部分が蒸発を終えるまで加熱面上に残留し、終始、固液の接触面を形成していること、また、このような薄い液膜により形成される固液接触面の大きさが加熱面表面温度に応じた変化を見せることなど、第2章で示した $\text{SiO}_2 - \text{Al}_2\text{O}_3$ 系のセラミックス加熱面の場合と非常に良く似た挙動となっている。なお、第3. 10図および第3. 11図で、主滴の蒸発時間は第3. 6図の寿命曲線に示した値に一致しており、沸騰の過程で主滴より分裂する小液滴もほとんど見られなかった観察結果に対応している。これは、液粒の種類が、第2章におけるセラミックス加熱面の場合に滴下された液粒全体の寿命と主滴の蒸発時間に比較的大きな差がみられた水やメチルアルコールなどの場合も同様であり、溶射セラミックス被覆層をもつ加熱面上で液粒が核沸騰を伴い蒸発する過程では主滴から分離、飛散する液滴はほとんどない。

3. 5 核沸騰状蒸発領域における被覆層の材質の影響

3. 5. 1 固液接触面の挙動

第3. 9図～第3. 11図に示したような一連の高速撮影写真の各駒より、固液の接触面の輪郭形状が円形であるとみなした場合に得られる接触面直径 D の時間による変化の測定例を第3. 12図に示す。加熱面上の液粒が固体面に直接接触して核沸騰状に蒸発し寿命が短くなる温度領域の低温側ほど接触面の大きさが大きく、時間の経過とともに拡大する傾向も見られること、また、初期加熱面温度 T_{w0} が高くなるにしたがい接触面の大きさは全体的に小さくなっていくが寿命末期まで蒸発する液の外縁部に薄い液膜が安定して存在し、固液接触面を形成することによりほぼ一定の大きさを保っている状況がわかる。これは、セラミックス被覆層の材質が異なる加熱面の場合そして液粒の種類が異なる場合についてもほぼ同様であった。ただし、水の場合には、第2章で既に示したセラミックス(a)加熱面の場合についての接触面直径の時間による変化を表す第2. 31図と同様に、接触面の大きさが時間の経過とともに著しく拡大して寿命が非常に短くなる現象がみられた。なお、第3. 12図のMgZrO₃が被覆されたステンレス鋼加熱面上においてニトロベンゼンが蒸発する場合の固液接触面直径の時



第3. 12図 固液接触面直径の時間による変化

間変化の測定結果は、第2章の第2.30図に示したセラミックス(a)加熱面上でメチルアルコールが蒸発する場合に得られている接触面直径の時間変化とほぼ同じ傾向を示していることがわかる。高速度写真により観察された結果によると、ステンレス鋼製加熱面の場合には、固液接触部の輪郭が気泡の発生にともなって振動するように動き、外縁部は局部的に濡れた状態と乾燥した状態が繰り返される。第3.12図にも接触面の大きさが時間により変動する状況が現れている。また、接触面の大きさは沸騰、蒸発が進行するに伴い減少する。これは第2章の第2.30図、第2.29図で示したメチルアルコール、水がステンレス鋼加熱面上で蒸発する場合と同様な現象である。

これまでに示してきたような、セラミックスが薄く被覆されたステンレス鋼加熱面に衝突して蒸発する液粒が示す蒸発挙動には、第2章で示したような加熱面全体が同程度の熱伝導率をもつセラミックスでできている場合と共通する点が多いことがわかる。また、ここで使用したセラミックス被覆加熱面と第2章で使用したセラミックス(a)加熱面で得られている寿命曲線が類似した形状となっていることは、既に、メチルアルコールと水の場合についてそれぞれ第3.4図と第3.7図に示した通りである。これらのことより、単一液滴の核沸騰状蒸発領域からスフェロイド状蒸発領域にかけての加熱面温度領域において、セラミックス被覆加熱面では、第2章に示したセラミックス(a)加熱面の場合と同様に一致する蒸発現象が生じていると推定される。ただし、各加熱面では表面粗さが異なっており、これを考慮しなければ正確な比較はできない。なお、表面粗さの影響については第4章に示す。

3.5.2 加熱面から液粒への熱伝達

セラミックスが被覆された加熱面における蒸発様相を示す第3.10図および第3.11図からは、滴下された液滴が加熱面と衝突した直後の時点で加熱面表面に薄い液膜が付着し、これが固液接触面を形成することがわかる。加熱面との衝突直後における接触面の大きさは、球状の液滴が加熱面との衝突により薄い円板状に変形するまでの数ミリ秒間の期間における液の蒸発量によって決まると考えられる。たとえば、加熱面に液滴が衝突すると最初に加熱面に触れた部分で固液接触を生じるが、薄い円板状への変形する過程における蒸発量が大きい場合に

は固体面とこの上に薄く変形しつつ広がる過程の液層の間に生成される蒸気がその後の固液の直接接触を妨げる作用を生じ、このため液滴が加熱面上で変形している間に形成される接触面の大きさは小さくなる。このような状況下での液滴と加熱面の衝突直後の蒸発量は液滴の比熱 c_l 、蒸発潜熱 L や加熱面材質の熱伝導性によって生じる加熱面表面温度変化に支配され、概略的には、既に第2章の第(2-2)式に示した、初期温度がそれぞれ T_{w0} 、 T_{l0} である加熱面と液とが急接触した場合の接触面温度 T_c や、加熱面熱容量と蒸発に伴う加熱面から液滴への伝熱量の比 $\frac{c(T_{w0}-T_b)}{c_l(T_b-T_{l0})+L}$ に依存すると考えられる。したがって、加熱面材

質と液滴の組み合わせが同一である場合には、衝突直後の固液接触による蒸発量は初期加熱面温度 T_{w0} によって変化し、 T_{w0} が高いほど蒸発量が多く、その結果形成される固液接触面の大きさは小さくなる。 $MgZrO_3$ が被覆されたステンレス鋼加熱面上でニトロベンゼンが蒸発する場合の固液接触面直径の時間変化を示す第3、12図においても、加熱面上での液粒の形状が衝突に伴って円板状に変形した状態から平凸レンズ状に復元した寿命初期の時点における接触面の大きさは、初期加熱面温度 T_{w0} が高いほど小さくなっている。

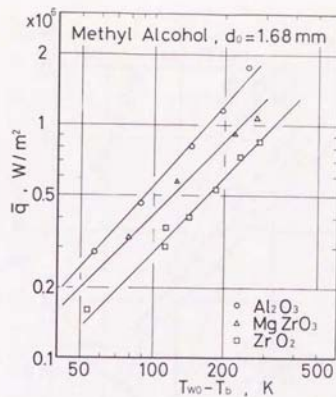
一旦、加熱面上に液膜状の接触面が形成されるとその後の接触面の大きさは、液の蒸発に対する加熱面側の熱供給能力と液膜への液の供給能力により変化すると考えられる。蒸発する液膜への液の供給が継続してなされる場合には加熱面上の液膜近傍の加熱面温度が低下し、特に液膜における蒸発量に比べ液の供給能力が充分大きいと加熱面と液との濡れ性に応じて液膜の大きさが拡大し、固液接触面の大きさも大きくなる。液膜へは、加熱面上で液膜が付着する範囲内で気泡の発生とともに大きく形状を変化させながら核沸騰状に蒸発する液塊部より液が直接的に供給されるが、蒸発の進行とともに加熱面上に存在する液量が減少すると液供給能力が小さくなり、液膜の一部が蒸発することにより接触面の大きさは小さくなる。第3、12図の $MgZrO_3$ が被覆された加熱面上でニトロベンゼンが蒸発する場合の固液接触面直径の時間変化は、寿命期間内の初期で加熱面上で蒸発する液の周囲に存在して固液接触面を形成する液膜部への液供給が充分に行われる場合にはわずかに増加し、液供給が不足する終期には減少する傾向を与えている。また、これらの中間で寿命期間の大部分を占める時期においては接触面

の大きさはほとんど一定となっており、加熱面からの熱供給量と液膜への液の供給がほぼ平衡する状態となっていると考えられる。このように接触面の大きさの時間変化は定性的には加熱面側からの熱供給量と液膜部への液供給量の時間変化で説明される。なお、蒸発潜熱が大きい水の場合には固液接触面形成時の蒸発による加熱面温度降下が大きく、このため時間の経過とともに接触面の大きさを拡大する傾向が強く現れるものと考えられる。

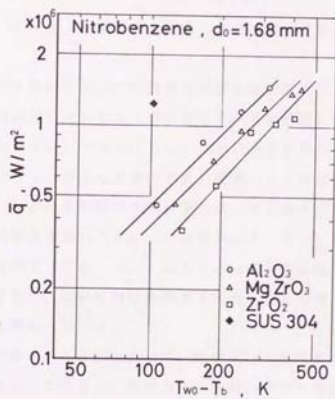
第3. 12図に示したように、セラミックスが被覆された加熱面上で液粒が蒸発する場合、核沸騰状蒸発領域では固液の接触面の大きさは加熱面温度によって異なるが、同一加熱面温度の場合は寿命期間内でほぼ一定の大きさを保っているとみなすことができる。また、加熱面温度が十分に高い領域においても加熱面上で核沸騰状に気泡を発生しながら蒸発する液の周囲には薄い液膜の層が存在し接触面を形成していることから、加熱面から液粒への熱伝達は液膜部の外部形状で表される大きさの固液接触面を通して行われていると考えられる。そこで、液粒の種類、加熱面材質の種類、そして加熱面温度毎に撮影された一連の高速度写真の各駒より、第3. 12図に示したような各加熱面温度における固液接触面の大きさの時間変化を表す曲線を得、さらにこれを使用して液粒の寿命期間内の平均接触面積 \bar{A} を求めた。この時間平均接触面積 \bar{A} は、被覆層表面の粗さは考慮せず平面であるとして接触面の外形形状より求められる見かけの接触面の大きさを表している。また、初期液粒温度(室温)において初期液粒直径 d_0 である単一の液粒を蒸発させて飽和温度の蒸気とするのに必要な熱量 Q は、液体試料の飽和表により、あるいは比熱と蒸発潜熱により与えられる。そこで、これらの値と液粒の寿命 τ_0 を用いると、加熱面上の接触面積 \bar{A} を通して加熱面から液粒に伝達される寿命期間内における時間平均の熱流束 \bar{q} を第(3-1)式により求めることができる。

$$\bar{q} = \frac{Q}{\bar{A} \cdot \tau_0} \quad \dots (3-1)$$

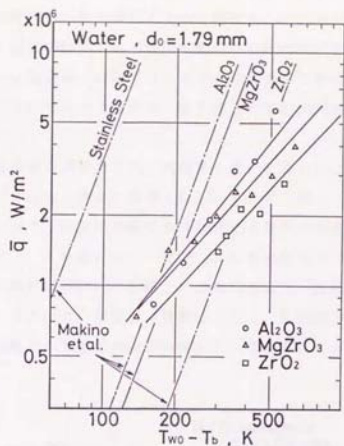
第3. 13図～第3. 15図に、それぞれメチルアルコール、ニトロベンゼンおよび水の場合について、各加熱面材質に対する時間平均熱流束 \bar{q} を初期加熱面温度 T_{w0} で表した過熱度($T_{w0} - T_b$)について整理した結果を示す。ここで初期液粒直径 d_0 の値としては、第3. 9図～第3. 11図に示したような高速度撮



第3. 13図 加熱面から液粒への時間平均熱流束 (メチルアルコール)



第3. 14図 加熱面から液粒への時間平均熱流束 (ニトロベンゼン)



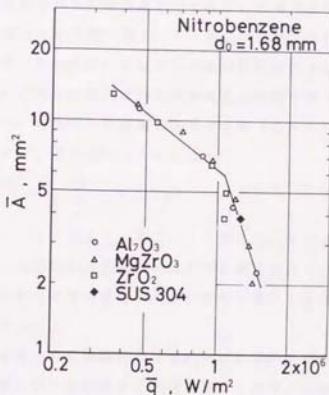
第3. 15図 加熱面から液粒への時間平均熱流束（水）

影写真から加熱面へ接触する直前の時点における直径を測定し、これを計算に使用した。いずれの液粒においても、寿命が短くなる核沸騰状蒸発領域内においては、過熱度 ($T_{w0} - T_b$) が高くなるにしたがい熱流束 \bar{q} が一様に増加していることがわかる。セラミックス被覆層の材質の相違による差については、同じ過熱度 ($T_{w0} - T_b$) における時間平均熱流束 \bar{q} は、熱伝導率が最も高い Al_2O_3 で最も大きく、熱伝導率が低い ZrO_2 では最も小さくなっている。すなわち、同じ熱流束 \bar{q} の値を示す ($T_{w0} - T_b$) は Al_2O_3 の場合に最も低く、 ZrO_2 では最も高くなっており、液粒に同じ熱流束を伝達し得る加熱面温度は被覆層の材質の種類によって異なっている。

第3. 13図～第3. 15図において、時間平均の熱流束 \bar{q} は加熱面温度の上昇とともに大きくなっているが、加熱面上の液粒が寿命の全期間を通して固体面と直接的に接触することができなくなるような、液粒の種類によって定まるある

限界的な値が存在すると考えられる。そして、熱流束 q がこの限界値を示すまでの温度領域は被覆層材質の熱伝導性によって異なり、これらが、第3.4図～第3.7図に示した寿命曲線において寿命が短くなる核沸騰状蒸発領域に対応している。 Al_2O_3 では熱流束 q が限界値に達する加熱面温度が低く核沸騰状蒸発領域も狭いが、 ZrO_2 では同じ熱流束の限界値を示す加熱面温度はより高く核沸騰状蒸発領域も広い。

加熱面上の液粒が寿命期間内に同じ熱流束を受ける場合には、蒸発にともない類似した挙動を示すことが容易に想像される。そこで、第3.14図のニトロベンゼンの場合について、時間平均熱流束 q に対する時間平均接触面積 \bar{A} の変化を求めた。これを第3.16図に示す。第3.16図ではセラミックス被覆層の種類が異なる場合の測定値が同一の曲線上に分布しており、加熱面から伝達される熱流束 q が等しい場合には、被覆層の種類によらず、接触面の大きさの変化に代表されるような液粒が示す蒸発様相が同様なものになることがわかる。また、第



第3.16図 加熱面から液粒への時間平均熱流束と
固液接触面積の大きさの関係

3. 14 図中には、被覆層がないステンレス鋼加熱面の最大蒸発率点近傍で得られた結果も一点で示されているが、これは、第3. 9 図に示した写真が撮影された加熱面温度に対応する測定点である。これに対し、第3. 11 図に示した写真は $MgZrO_3$ が被覆されたステンレス鋼面に対するものであったが、両者は接触面の大きさが比較的類似したものとなっている。この場合、第3. 14 図によると、 $T_{w0} = 585 K$ のステンレス鋼加熱面と $T_{w0} = 790 K$ の $MgZrO_3$ が被覆された加熱面に対応する時間平均熱流束 \bar{q} の測定値がほぼ一致する値を示していることがわかる。

第3. 16 図では、時間平均接触面積 \bar{A} は熱流束 \bar{q} の大きさに対して単一の直線状には変化しておらず、 \bar{q} の範囲により勾配の異なる2本の直線で表されている。これは、熱流束 \bar{q} が大きくなるにしたがって接触面積 \bar{A} は減少するが、2本の直線の交点で表される値を超える熱流束の領域にはいと接触面の大きさが減少する割合がさらに大きくなることを示す。ニトロベンゼン以外の液粒についても同様な結果が得られた。

セラミックスが被覆された加熱面表面から液粒に伝達される寿命期間内の時間平均熱流束 \bar{q} は、第3. 13 図～第3. 15 図に示したように、初期加熱面温度 T_{w0} で表した過熱度 ($T_{w0} - T_b$) に対して直線的に変化する。したがって初期加熱面表面温度 T_{w0} に対する時間平均接触面積 \bar{A} の関係も第3. 16 図と同様な傾向を示す。そこで、時間平均熱流束 \bar{q} を与える第(3-1)式に第3. 16 図の関係 $\bar{q} = f(\bar{A})$ を用いると液粒寿命 τ_0 は

$$\tau_0 = \frac{Q}{\bar{A} \cdot \bar{q}} = \frac{Q}{\bar{A} \cdot f(\bar{A})} = g(T_{w0}) \quad \dots (3-2)$$

で表される。第(3-2)式より、第3. 16 図に示しているような時間平均接触面積 \bar{A} の変化は、初期加熱面温度 T_{w0} に対する液粒寿命 τ_0 の変化に対応しており、近似的に表された2本の直線の交点が寿命が極小となる最大蒸発率点に対応していることがわかる。

セラミックスが被覆された加熱面上で液粒が核沸騰状に蒸発する場合の固液接触面の瞬間的な大きさは、加熱面上で気泡を発生して蒸発する液の周囲に現れる部分を含めた固液の接触面を形成していると考えられる液膜部全体への液の供給能力と、液の蒸発に対する加熱面側の熱供給能力との相対関係によって決まってい

ると考えられる。初期液粒温度など液粒側の条件は一定の状態では初期加熱面温度が高くなると、加熱面側の熱供給能力が大きくなる結果、形成される固液接触面の大きさは小さくなる。この場合、接触面の大きさが小さくなるほど加熱面内には二次元的な温度変化が生じるようになり、それだけ加熱面の固液接触面に対する熱供給能力は高くなる。これに対して固液接触面への液の供給は加熱面上に残る未蒸発の液量により決まる。接触面の大きさが小さい場合に加熱面上で蒸発する過程の液の形状が第3、11図にも示したように近似的には端部が固液接触面の大きさに等しい円柱状となり、液高さが増すことによる差圧の効果があるが、固液接触面への液の供給能力に大きな変化はないと考えられる。したがって、加熱面温度が高くなり固液接触面の大きさが小さくなって二次元伝熱の影響が大きくなる場合には、加熱面温度の上昇にともなう接触面の減少割合がより大きくなる。加熱面上で液粒が核沸騰状に蒸発する場合の固液接触面の大きさが熱流束あるいは初期加熱面温度に対して第3、16図に示したような変化を示すのは、このような加熱面内に生じる二次元伝熱の効果と推定される。

なお、セラミックス被覆層表面と液との濡れ性は、加熱面に液滴が衝突した場合に加熱面表面に形成される液膜の大きさに直接的に影響するが、問題としている温度領域における加熱面表面に存在する液の加熱面との接触部は薄い液膜状となって加熱面表面をよく濡らしており、濡れ特性は充分によい状態にある。したがって、加熱面温度、熱流束に対する接触面の大きさの変化には、見かけ上、濡れ特性の影響は現れないと考えられる。

従来の金属系の加熱面を使用した研究においては、寿命の全期間を通して加熱面と液粒が直接接触して核沸騰状に蒸発する挙動がみられるのは、液粒の沸点に相当する加熱面温度から最大蒸発率点近傍までの狭い温度範囲内に限られるが、この加熱面温度領域において、液粒の寿命期間内に加熱面から液粒へ伝達される時間平均熱流束 q について、Makino & Michiyoshi⁽²⁹⁾は、水滴と数種の金属加熱面（銅、真鍮、炭素鋼およびステンレス鋼）を使用した実験により次に示すような実験式を求めている。

$$q = 770 \times (T_w - T_b)^{2.76} \quad \dots (3-3)$$

ここで、 T_w は寿命期間内における時間平均の加熱面表面温度であり、初期加熱面温度 T_{w0} との関係として第(3-4)式のような実験式が求められている。

$$T_w - T_b = 2.23 \times 10^3 \left(\sqrt{\frac{c \rho \lambda}{\pi}} \right)^{-0.725} (T_w - T_b) \quad \dots (3-4)$$

ただし、第(3-3)式、第(3-4)式における各記号の単位は q [W/m²]、 c [J/(kg·K)]、 ρ [kg/m³]、 λ [W/(m·K)]である。ここで、本研究におけるセラミックス被覆加熱面上で液粒が核沸騰状に短時間で蒸発する現象は、基盤材の影響はほとんど及ばず、主にセラミックス被覆層内に生じる温度変化に支配されると考えて、金属加熱面に関する上記の第(3-3)式、第(3-4)式の関係を本研究で使用したセラミックス被覆層材質に適用してみる。水滴の場合について過熱度($T_w - T_b$)に対する時間平均熱流束 q の変化を表す第3.15図には、Makino & Michiyoshiによる実験式を本研究で使用したセラミックス被覆層に適用した結果およびステンレス鋼加熱面の場合に得られている結果を併記している。セラミックス被覆層の材質の $\sqrt{c \rho \lambda}$ の値としては、第6章に示すように、方形波パルス加熱法により真空中で実測された値を使用した。第(3-3)式、第(3-4)式は、初期液粒直径が $d_0 = 2.54 \sim 4.50$ mmの範囲の大きな水滴に対し材質が異なる数種の金属加熱面を使用した実験から得られたものであり、また、蒸発する液粒の加熱面上への投影面積から熱流束が求められているなど、本研究とは条件がやや異なるが、基本的には同様な傾向がみられる。ただし、直線の傾斜が異なり、本研究における溶射セラミックスが被覆された加熱面の場合には、金属加熱面で得られた結果より加熱面材質の熱物性値により外挿して考えた場合よりもより広い温度範囲で固液直接接触による大きな熱流束が得られていることがわかる。さらに、金属加熱面の場合と同様に、セラミックスが被覆された加熱面においても、遷移領域やライデンフロスト温度近傍あるいはライデンフロスト温度を越えるまでの温度領域において加熱面に液粒が衝突した直後の短時間の間は固液が直接接触する現象が確認されている。このように、セラミックスが被覆された加熱面の場合には、金属加熱面の場合に比べ非常に高い温度領域まで固液の直接接触による大きな熱流束を得ることができる。

なお、セラミックス被覆層を有する加熱面上で水滴が核沸騰状に短時間で蒸発する場合、接触面温度が急降下して一定値に保たれると仮定して被覆層内の温度変化に半無限固体の熱伝導理論を適用し、第3.7図に示した水の寿命曲線で最大蒸発率点近傍における寿命に相当する時間 $\tau = 0.2$ sにおける温度浸透厚さ

($\sqrt{12at}$) を計算した結果を第3. 2表に示す。Al₂O₃およびMgZrO₃の場合の温度浸透厚さは被覆層厚さよりも大きくなっているが、差は小さい。被覆層厚さの影響については第4章に示すが、ここで使用した程度の厚さの被覆層の場合は $t=0.2\sim 0.5$ s程度の時間の現象に対しては被覆層厚さへの依存性はほとんど認められないと推定される。したがって、金属加熱面に関する第(3-3)式、第(3-4)式の関係を直接的に本研究におけるセラミックス被覆層材質に適用したとしても、被覆層厚さが薄いことに起因するような大きな誤りはないと思われる。

第3. 2表 温度浸透厚さ ($\sqrt{12at}$, $t=0.2$ s) と
セラミックス被覆層厚さ

	Penetration Depth [mm]	Coating Thickness [mm]
Al ₂ O ₃	1.3	0.92
MgZrO ₃	1.0	0.62
ZrO ₂	0.7	0.91

3. 6 第3章のまとめ

ステンレス鋼表面に薄いセラミックス被覆層を設けた加熱面表面に単一の液粒が衝突して蒸発する現象について実験により調べた。セラミックス被覆層の材質は、被覆層の熱伝導率を段階的に変える目的から、アルミナ、ジルコニウム酸マグネシウムおよびジルコニアの3種類とした。溶射法により設けられたセラミックス被覆層表面は $3.3 \mu\text{m R}_{\text{max}} \sim 4.3 \mu\text{m R}_{\text{max}}$ 程度の表面粗さを持ち、また、被覆層厚さは $0.6 \text{mm} \sim 0.9 \text{mm}$ 程度であった。加熱面表面温度を段階的に変えて液粒の蒸発時間を測定した結果、セラミックス被覆層を設けた加熱面に対する液粒の寿命曲線は、被覆のないステンレス鋼加熱面の場合に比べ、最大蒸発率点近傍で寿命が著しく短くなる現象を示す加熱面温度範囲が高温度側に向けて大きく広がる形状となることが明らかとなった。このような広い核沸騰状蒸発領域における液粒の蒸発速度は、同じ加熱面温度範囲ではスフェロイド状態で蒸発するステンレス鋼加熱面の場合に比べると、セラミックス被覆層が存在することにより $10 \sim 100$ 倍にも促進される。そして、加熱面温度が低い液膜状蒸発領域から寿命が極大値を示す加熱面温度としてのライデンフロスト点近傍に至る、寿命の全期間あるいは一部の期間に固液が直接接触する現象がみられる広い加熱面温度範囲においては、寿命曲線の形状や液粒の蒸発挙動にセラミックス被覆層の材質や表面粗さの影響が見られた。3種類のセラミックスの中では最も熱伝導性が良いアルミナの場合のライデンフロスト点は最も加熱面温度が低い領域に現れ、第2章の結果と定量的にもほぼ一致する結果が得られた。また、セラミックス被覆層をもつステンレス鋼加熱面の場合の核沸騰状蒸発領域からライデンフロスト点近傍に至る温度領域における寿命曲線や蒸発様相は、加熱面の全体が被覆層と類似した熱伝導性を示す材質からなるセラミックス加熱面で得られている結果と同様であることから、この加熱面温度範囲の現象は、主として加熱面表面を含め加熱面内の表面近傍の使用したセラミックス被覆層厚さ程度以下の薄い層の範囲に生じる温度変化に依存していることが確認された。この意味で、本研究で使用したセラミックス被覆層の厚さは、現象を支配する加熱面内の表面層の厚さ比べ相対的に厚い状態であり、被覆層下の基盤材の材質は現象には直接影響してはいないと推定される。また、固液接触面を介する熱伝達について検討した。

金属面に低熱伝導性のセラミックス被覆層を設けた加熱面に液粒が衝突する場

合には、熱伝導率が高い金属面に比べ、より高い加熱面温度範囲でも固液が直接接触を生じ、薄い液膜が加熱面表面に付着して固液接触面を形成する。ただし、液膜が過熱度の高い表面に付着する原因については明かでないが、加熱面に最初に液粒が接触した時に瞬間的に大きな表面温度降下が生ずることによると考えられる。そして、液粒が寿命期間全体を通じて固液の直接接触を維持できるような加熱面温度、熱流束の範囲内では核沸騰を伴って蒸発するため、この領域における寿命は著しく短くなる。この核沸騰状蒸発領域内では一つの液粒の寿命期間内に加熱面から伝達される時間平均の熱流束は、加熱面温度が高くなるほど大きくなり、液粒が示す蒸発様相も熱流束の上昇とともに連続的に変化する。寿命期間内に加熱面から液粒に伝達される時間平均熱流束の大きさは被覆層材質により異なるが、熱流束の大きさが等しい場合には、液粒は被覆層材質の種類によらずほぼ一致する挙動を示す。この核沸騰状蒸発領域の上限を与える熱流束を伝達し得る加熱面温度は被覆層の材質に依存し、低熱伝導性の被覆層を有する加熱面ほど高く、核沸騰状蒸発領域は広くなる。

第4章 溶射セラミックス被覆加熱面に衝突する液粒の蒸発に対する表面粗さおよび被覆層厚さの影響

第4章 目 次

	Page
4. 1 はじめに	102
4. 2 加熱固体面試料	103
4. 2. 1 表面粗さが異なる試料	103
4. 2. 2 被覆層厚さが異なる固体面試料	105
4. 3 実験装置および実験方法	106
4. 4 表面粗さが異なるセラミックス被覆層を有する加熱面との衝突による液粒の蒸発	109
4. 4. 1 寿命曲線	109
4. 4. 2 核沸騰状蒸発領域の広さ	114
4. 4. 3 核沸騰状蒸発領域における液粒寿命	116
4. 4. 4 核沸騰状蒸発領域における蒸発様相	116
4. 4. 5 固液接触面の大きさと加熱面から液粒へ伝達される熱流束	123
4. 4. 6 金属系加熱面における現象との比較	129
4. 5 厚さが異なるセラミックス被覆層を有する加熱面との衝突による液粒の蒸発	131
4. 5. 1 寿命曲線	131
4. 5. 2 核沸騰状蒸発領域における蒸発様相	137
4. 5. 3 固液接触面の大きさと加熱面から液粒へ伝達される熱流束	140
4. 5. 4 溶射ジルコニアセラミックス被覆加熱面上で液粒が蒸発する現象に対する温度浸透厚さ	144
4. 5. 5 溶射ジルコニアセラミックスの被覆層厚さによる伝熱量の変化	145
4. 6 第4章のまとめ	149

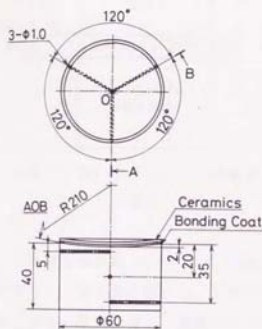
4. 1 はじめに

単一の液粒が加熱された固体面に衝突して蒸発する場合の寿命曲線の形状は加熱面の材質によって変わり、熱伝導率が高い金属系加熱面の場合には最大蒸発率点近傍で核沸騰の状態でも短時間で蒸発するような温度範囲は非常に狭く、ライデンフロスト温度も低い。第2章では種々の材質からなる加熱面に衝突して蒸発する液粒が示す現象について調べ、低熱伝導性のセラミックスを加熱面とする場合には金属加熱面の場合に比べて十分に温度が高い状態でも固液が直接接触し、また、これに伴う接触面温度降下により継続的に直接接触状態を維持できるため、高温側へ広がる広範な加熱面温度範囲で寿命が短くなることを示した。そして、第3章では熱伝導率が高い金属加熱面の表面に低熱伝導性の薄いセラミックス被覆層を設けることによっても同様な効果が得られ、広い加熱面温度範囲において液粒の蒸発を促進することができることを示した。セラミックス加熱面あるいはセラミックス被覆層を設けた加熱面のいずれにおいても、液粒が示す蒸発挙動は低熱伝導性で適当な表面粗さをもつ加熱面から液粒に伝達される熱流束の大きさに強く依存して変化することが明かとなった。そこで、第4章では同一材質のセラミックス被覆層を設けた加熱面を使用して、核沸騰状蒸発領域における現象に対する、溶射セラミックス被覆面に固有な表面粗さと、寿命期間内における加熱面から液粒への熱伝達量を支配する被覆層厚さの影響について実験により検討を行った結果について述べる。

従来、伝熱面の表面条件の中でも重要な影響因子である表面粗さの影響に関してはブール沸騰における核沸騰熱伝達率に対する研究例は多い。また、加熱面上における液粒の蒸発現象に対しては、ライデンフロスト温度に及ぼす表面粗さの影響に関する研究例もある。これらに対し、セラミックス類のような金属類とは大きく異なる現象を示す加熱面材質について、また、液粒と加熱面とが直接接触して蒸発することにより寿命が極小となる温度領域の現象について表面粗さの影響が調べられた例は見られない。

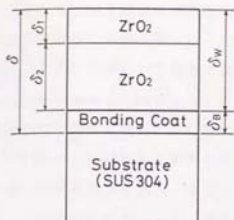
4. 2 加熱固体面試料

4. 2. 1 表面粗さが異なる試料



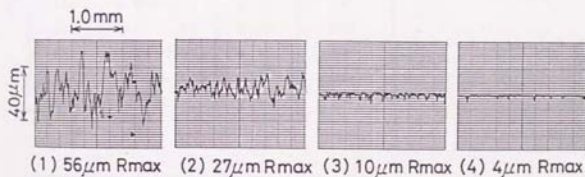
第4. 1図 固体面試料の形状

液粒の蒸発面として製作した固体面試料を第4. 1図に示す。固体面試料の形状、寸法は第3章で使用したものと同じにした。種類としては、ステンレス鋼（SUS304）製の基盤材表面に表面粗さが段階的に異なるようにセラミックスを薄く均一に被覆したものの4種類、および、比較用として被覆層がない平滑なステンレス鋼面を使用した。試料側面にはステンレス鋼部上面の温度を外挿法により計測するための熱電対を挿入する3個の小穴を設けた。セラミックスの被覆は溶射法により、第3章に示したのと同じ酸素-アセチレンガス溶射装置を使用して行った。セラミックス被覆層の材質は全て同一とし、熱伝導率が十分に低いジルコニアとした。基盤材との密着性をよくするための下地処理としての結合材層を介し、組成（ $ZrO_2 : 93wt\% - CaO : 5wt\%$ ）、粒度分布（ $10 \sim 53\mu m$ ）が調整された標準的な粉末材料を一定の厚さに溶射してセラミックス被覆層を形成した。これを標準溶射層と呼ぶことにする。ただし、表面粗さを変える目的から、ジルコニア被覆層の内部は第4. 2図に示すような二層構造とし、被覆層表面から約0. 2mmの厚さの表層部の溶射には粒度が異なる粉末材料を使用した。これには、標準粉末材料からふるい分けにより分粒したものを適宜使用した。すなわち、被覆層の基盤材への結合条件および材質は可能な範囲で同一とし、その表面粗さだけが変えられるように考慮した。このようにして製作された固体面試料の中心軸より直径10mmの範囲内の液粒が直接接触する部分で、触針式粗さ計により計測した表面粗さを第4. 3図に、ダイヤルゲージにより計測した各被覆層厚さを第4. 1表に示す。第4. 3図（1）は標準溶射層の上に分粒して得られた最大径の粉末材料を重ねて溶射することにより、（2）は標



第4. 2図 セラミックス被覆層の構造

標準溶射層に最小径の粉末材料を同様に重ねて溶射することによって製作された表面である。これらの表面粗さの大きさは同一粉末材料を使用した溶射により得られる被覆層表面粗さの上限、下限に相当している。また、第4. 3図(3)は標準溶射層を研磨することにより、そして(4)は標準溶射層を重ねて分粒によって得られた最小径の粉末材料を溶射した面を研磨することによって得られた面である。なお、比較のために使用したステンレス鋼面は $R_{max} \leq 0.25 \mu\text{m}$ の鏡面状であった。第4. 1表に示すようにセラミックス被覆層の厚さは、上層、下層合わせて約 0.55 mm で一定であり、結合材層の厚さは薄く、基盤材との良好な接合性が確保できる必要最小限の厚さとしている。



第4. 3図 セラミックス被覆層の表面粗さ(1)

第4. 1表 セラミックス被覆層の厚さ(mm)および表面粗さ(1)

		(1)	(2)	(3)	(4)
R_{max}		$56 \mu\text{m}$	$27 \mu\text{m}$	$10 \mu\text{m}$	$4 \mu\text{m}$
δ_1	δ_2	0.18	0.21	0	0.32
		0.36	0.35	0.57	0.23
δ_B		0.13	0.09	0.24	0.10
δ		0.67	0.65	0.81	0.67

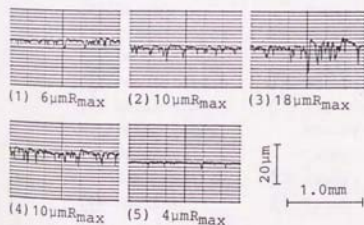
4. 2. 2 被覆層厚さが異なる固体面試料

固体面試料の形状は第4. 1図に示したのと同じである。4. 2. 1で述べた方法によりステンレス鋼製の基盤材上に結合材層を介して標準的なジルコニア粉末材料を溶射してセラミックス被覆層を形成した後、所定の厚さに研磨した。製作された固体面試料の中心軸より直径10mmの範囲内の部分で、ダイヤルゲージを使用して計測した被覆層厚さを第4. 2表に、また、触針式粗さ計により計測した表面粗さを第4. 4図に示す。セラミックス被覆層の厚さは0. 92~0. 18mmの範囲とした。ただし、第4. 4図に示すように研磨後の表面粗さが必ずしも同一になっていないので、比較用として表面粗さが最も小さくなるように製作された第4. 3

第4. 2表 セラミックス被覆層の厚さ
および表面粗さ(2)

test surface	coating thickness		surface roughness
	zirconia δ_w, mm	bonding coat δ_B, mm	$R_{\text{max}}, \mu\text{m}$
(1)	0.92±0.01	0.10	6
(2)	0.57±0.01	0.24	10
(3)	0.29±0.005	0.10	18
(4)	0.18±0.015	0.11	10
(5)	0.55±0	0.10	4

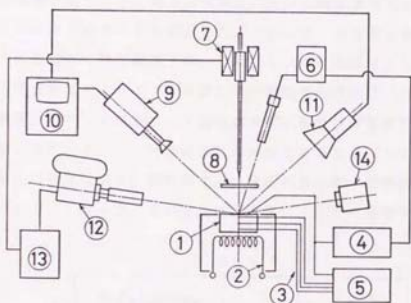
図および第4. 1表中の(4)の試料を使用し、これを第4. 4図および第4. 2表では(5)として示している。



第4. 4図 セラミックス被覆層の表面粗さ(2)

4.3 実験装置および実験方法

使用した実験装置の概要を第4.5図に示す。固体面試料①はヒータ②によって一定温度に加熱される。各部の温度が記録計⑤で定常と確認された状態で、マイクロシリンジで計量された一定の大きさの液粒が単一液粒滴下装置⑦より、加熱面上30mmの高さから速やかに滴下される。液粒が加熱面上に滴下されてから消滅するまでの間の挙動はストロボ⑪と同期した高速度ビデオカメラ⑨および16mm高速度撮影カメラ⑫を併用して、互いに異なる方向から撮影した。液粒の寿命は、主として高速度ビデオカメラを使用して毎秒200駒で録画、再生し

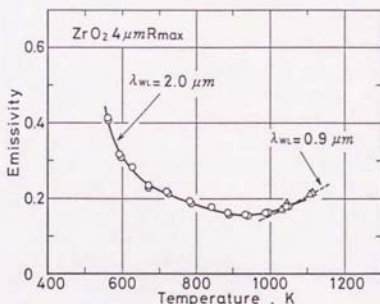


- | | |
|-------------------------|------------------------------------|
| ① Hot Surface | ⑨ High-Speed Video Camera |
| ② Heater | ⑩ Video Tape Recorder |
| ③ Thermocouple | ⑪ Stroboscope |
| ④ DC Voltmeter | ⑫ High-Speed Motion-Picture Camera |
| ⑤ Pen Recorder | ⑬ Camera Controller |
| ⑥ Radiation Thermometer | ⑭ Xenon Illuminator |
| ⑦ Dropping Equipment | |
| ⑧ Shutter | |

第4.5図 実験装置

て測定した。同一条件下で5～10回の測定を繰り返して、その算術平均値を寿命とした。以上は、第3章で使用した装置と基本的に同じであり、細部は省略する。液粒が滴下される直前の時点の加熱面の表面温度は、セラミックス被覆層表面にアルミナセメントにより接着された熱電対（K型、素線直径0.1mm）および放射温度計⑥を使用して測定した。熱電対の起電力は氷冷式基準接点を通して電圧計④により、また、放射温度計⑥の変換器出力も電圧計④を使用して測定した。放射温度計は主として高温領域において液粒が直接接触する加熱面の中心部分の表面温度を非接触で計測し、離れた位置に接着された熱電対による表面温度測定を補う目的で使用した。

放射温度計は単色型であり、測定温度範囲に応じて測定波長 λ_{wl} がそれぞれ、2.0、0.9 μm である2台を使用した。これらは、あらかじめ、黒体炉を使用して標準放射温度計（校正精度 $\pm 0.6\text{K}$ ）により変換器出力を校正することにより、使用温度範囲により $\pm (1\sim 2)\text{K}$ の再現性が確認された。そして、熱電対との比較測定を行ってジルコニア被覆層表面の単色放射率を実測した後、表面温度の測定に使用した。この時測定された溶射によるジルコニア被覆層の放射率の一例を第4.6図に示す。放射温度計の測定波長に対する溶射ジルコニア被覆層の放射率は0.15～0.40と低く、温度によっても変化する。また、溶



第4.6図 溶射ジルコニア被覆層表面の放射率

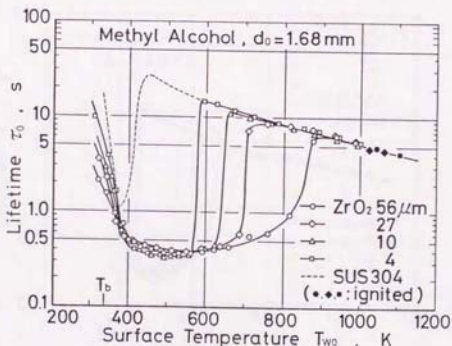
針ジルコニア被覆層表面は散乱的な面であるが、ここで使用した被覆層の表面粗さが広い範囲で異なるため、実験に使用した試料固体面毎に第4、6図のような放射率を計測してこれを用いた。

なお、液粒試料としてはメチルアルコール、ベンゼン、*n*-ヘプタン、イソオクタン、 α -メチルナフタレン、*n*-ヘキサデカン（いずれも市販の試薬特級）、および水（脱気された蒸留水）を用い、滴下時の初期液粒温度は、室温や滴下装置の冷却水温度を一定に保つこと等により 293 ± 2 Kとした。

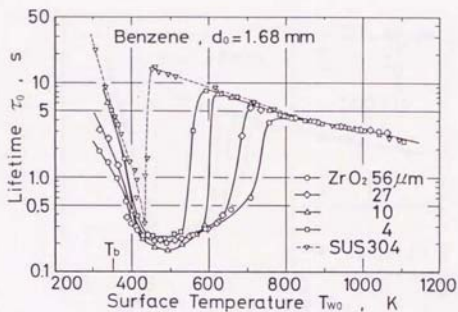
4. 4 表面粗さが異なるセラミックス被覆層を有する加熱面との衝突による液粒の蒸発

4. 4. 1 寿命曲線

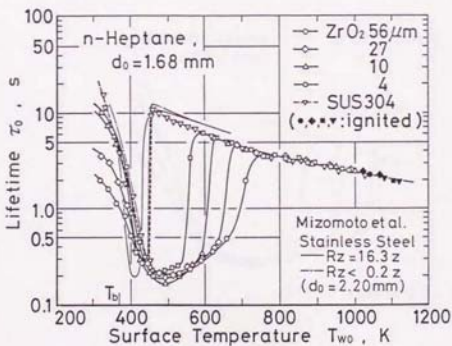
各種の液粒が表面粗さが異なるセラミックスが被覆された加熱面および被覆がない平滑なステンレス鋼製の加熱面に衝突して蒸発する場合に得られた寿命曲線を第4. 7図～第4. 14図に示す。各図上において、セラミックス被覆面の種類は第4. 3図に示した表面粗さ R_{max} の値で表している。加熱面に接触する直前の初期液粒直径 d_0 の大きさは、写真撮影による結果、揮発性の大きい液体では設定値よりもわずかに小さく、また、全体的に3%程度のばらつきが生じていることが確認された。しかし、この程度の液粒直径の差による影響は小さいため初期液粒直径 d_0 の値は設定値で表示している。いずれの寿命曲線もセラミックスが被覆されることにより、液体の沸点 T_b に相当する加熱面温度からライデンフロスト点において寿命が極大値を示すまでの広い加熱面温度範囲において、液粒の寿命が著しく短くなっていることを示している。この領域では加熱面上で蒸発する液粒は核沸騰状の蒸発様相を示す。表面粗さは、このような液粒が加熱面と直接接触して蒸発する領域において影響を及ぼしており、特に最大蒸発率点を



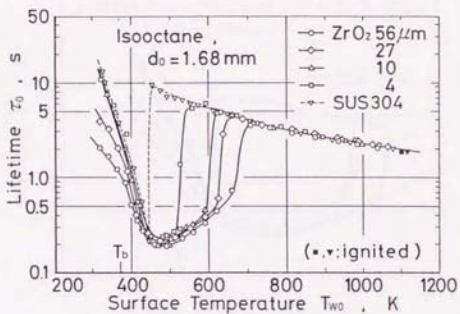
第4. 7図 メチルアルコールの寿命曲線



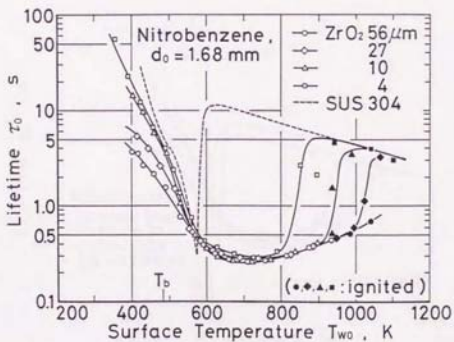
第 4. 8 図 ベンゼンの寿命曲線



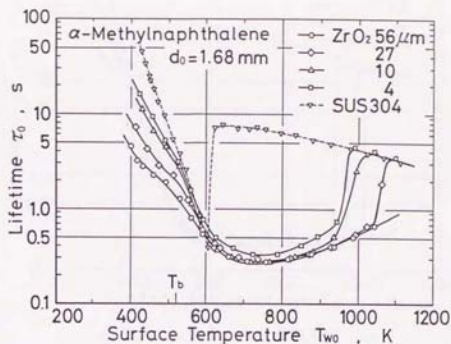
第 4. 9 図 n-ヘプタンの寿命曲線



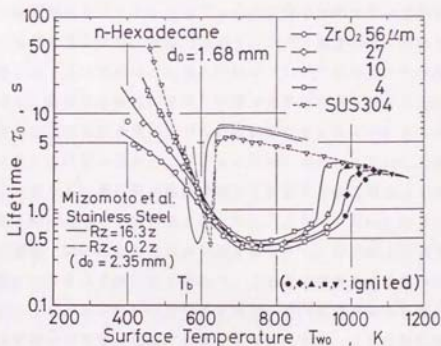
第4.10図 イソオクタン の寿命曲線



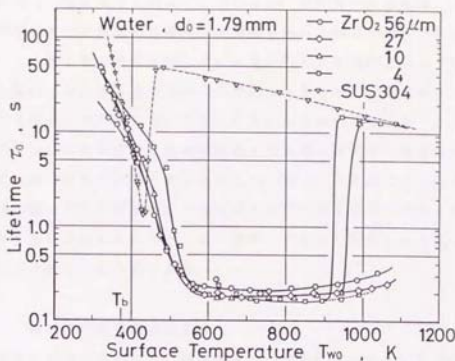
第4.11図 ニトロベンゼン の寿命曲線



第4. 12図 α -メチルナフタレンの寿命曲線



第4. 13図 n-ヘキサデカンの寿命曲線



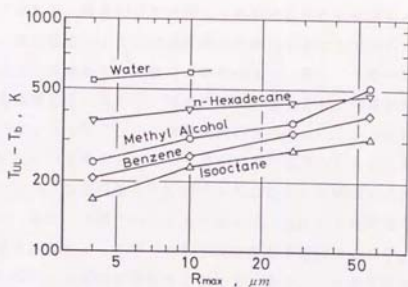
第4.14図 水の寿命曲線

含む核沸騰状蒸発領域の大きさに対する影響が顕著である。蒸発過程で加熱面との間に蒸気層が存在するようになるスフェロイド状蒸発領域では、最も粗い56 $\mu\text{m Rmax}$ の結果にもライデンフロスト点の近傍の領域を除いて表面粗さによる差異はほとんど見られない。液体の沸点 T_b 以下の温度領域において粗い面の方が寿命が短くなっているのは、金属加熱面について手代木ら³⁾が報告している結果と同様に、粗面ほど液粒の広がり面積が大きい傾向を示すことによる。ただし、この加熱面上における液の広がり状況は56 $\mu\text{m Rmax}$ と27 $\mu\text{m Rmax}$ の溶解による仕上げ面の場合と、10 $\mu\text{m Rmax}$ と4 $\mu\text{m Rmax}$ の研磨による仕上げ面とは異なる。溶射面の場合には液粒は加熱面をよく濡らして滴下された直後から時間の経過とともに加熱面上に広がり、56 $\mu\text{m Rmax}$ の方がより大きく広がる。研磨面ではこのような広がり速度は小さく、加熱面上に滴下された直後では接触面の大きさはほぼ一定となるが、この時に観察される見かけの接触角は粗さが大きい10 $\mu\text{m Rmax}$ の方がわずかに小さい傾向が見られた。したがって、結果的には粗面ほど面積拡大率が大きくなっているが、これは単に粗さの大きさのみにより整理されるものではない。なお、水が4 $\mu\text{m Rmax}$ の加熱面上における

900 Kを越える温度領域で蒸発する場合には、加熱面への接触後、スフェロイド状態に遷移せず、加熱面と直接接触を保持し続ける様相も観察された。このため、第4. 14図の水の寿命曲線においてはこの部分を破線で示している。実験に使用した試料のなかでは最も平滑な加熱面ではあるがこの中に存在する小さな傷に起因する現象と考えられる。また、56 $\mu\text{m R}_{\text{max}}$ そして27 $\mu\text{m R}_{\text{max}}$ の粗さをもつジルコニアが被覆された加熱面上で水滴が蒸発する場合のライデンフロスト温度は非常に高くなると考えられるが、第4. 14図に示した水の寿命曲線では寿命が極大となる現象を示す温度領域までの測定値が示されていない。これはカンタル線を使用したヒータにより試料の下面から加熱する方式の実験装置の昇温能力の制約によるものである。

4. 4. 2 核沸騰状蒸発領域の広さ

最大蒸発率点前後の寿命が短い温度領域は、表面粗さが大きい場合ほど広がっている。この温度領域の寿命曲線はセラミックス被覆層表面の粗さが大きく異なる場合でも最大蒸発率点までの加熱面温度範囲ではほとんど一致している。これを越える温度領域では加熱面温度の上昇とともに寿命が徐々に上昇していくが、寿命の全期間において加熱面と液粒の一部が直接接触する状態が保たれおり、スフェロイド状態へと移行する過渡的な遷移領域とは異なる。この部分の寿命曲線の形状は、加熱面上の固液接触面の大きさとこの固液接触面を介して伝達される熱流束により決まっている。そして、加熱面温度が高くなり、液粒と加熱面の衝突時の蒸発量が増して液粒の下部に表面粗さよりも厚い蒸気層が形成されるようになると、寿命曲線は急に立ち上がる形状となり遷移領域に移行する。この加熱面温度に対する寿命の変化割合が急に大きくなる温度は、寿命の全期間を通して固液が直接接触を維持することができる加熱面の上限温度であり、これを T_{ul} とする。そこで、測定されている寿命曲線の形状からこの上限温度 T_{ul} を求め、核沸騰状蒸発領域の温度幅を $(T_{ul} - T_b)$ で表し、これを表面粗さについて整理した結果を第4. 15図に示す。実験した加熱面の表面粗さの範囲において、いずれの液粒の場合にもほぼ表面粗さに比例した加熱面温度範囲で核沸騰状に蒸発し、寿命が短くなっている状況がわかる。これは、加熱面に液滴が衝突すると最初に加熱面に触れた部分で固液接触を生じると考えられるが、表面粗さが大きい



第4.15図 表面粗さによる核沸騰状蒸発領域の変化

場合ほど加熱面表面に存在する突起状の部分が液滴と直接的に接触しやすく、また、加熱面への衝突の直後に液滴が加熱面上へ薄い円板状に変形する過程で、液滴の下面と加熱面の間に存在する薄い蒸気層を越えて加熱面表面の突起状の部分が液滴と接触しやすく、これらにより大きな接触面温度降が生じ、より高い初期加熱面温度の範囲まで固液接触面を形成して蒸発することを示している。このように加熱面表面に存在する突起の大きさが現象に影響するという意味でここでは表面粗さを最大高さ R_{max} で表しているが、一般的に熱伝達への粗さの影響を考える場合には十点平均粗さ R_z で表す方がより適当であるとも考えられる。ただし、ここで使用したような溶射セラミックス被覆面の場合に関しては両者による値はほぼ一致する。なお、第4.7図～第4.11図に示した粗さが広い範囲で異なる加熱面により得られた寿命曲線の核沸騰状蒸発領域における形状の粗さによる変化の傾向から、本実験と同じ条件下で表面粗さによる蒸発促進の効果が得られるのは $5.6 \mu m$ R_{max} 程度の粗さが上限に近く、これ以上粗くなっても大きな変化は得られないと推定される。

4.4.3 核沸騰状蒸発領域における液粒寿命

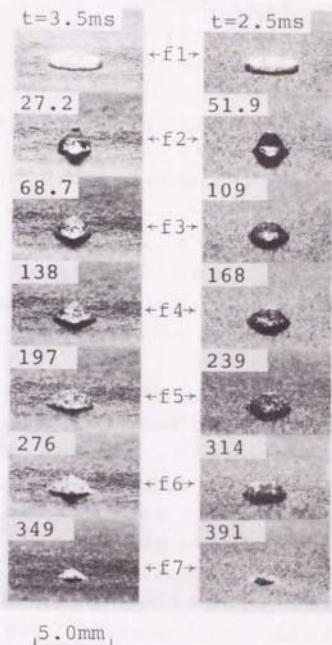
第4.7図～第4.14図において核沸騰状で蒸発する領域の寿命曲線は、表

面粗さによりその領域の大きさは異なるが、同じ温度領域では類似した形状を示している。すなわち、粗さが異なる場合でも寿命は加熱面温度に対して同様に变化しており、表面粗さによる最大蒸発率点の変化もほとんど認められない。また、寿命の値に対する表面粗さの影響は比較的小さく、第4.7図～第4.14図の寿命曲線でも表面粗さの大きさと寿命の間に一般性をもつ関係が見られない。溶射ジルコニアによるセラミックス加熱面濡れ性が良いことから相対的に表面粗さの影響が現れにくいと考えられるが、寿命が単に粗さの大きさに対して一定の変化を示していないのは表面粗さの形成法が異なることに起因していると推定される。すなわち、第4.3図に示した表面粗さが、溶射した結果得られた突起が多い面と溶射後の研磨によって得られた平坦な面の表面粗さであり、これらの粗さの幾何学的な形状の相違が伝熱特性に差を生じ得る。これを考慮すると、表面粗さの影響については同一の表面仕上げ法による範囲内で比較する方が妥当であると考えられる。56 $\mu\text{m Rmax}$ および27 $\mu\text{m Rmax}$ の被覆面は溶射により得られた面である。液粒の種類により56 $\mu\text{m Rmax}$ の方が寿命が短い傾向も見られるが、両者における差は小さい。研磨により仕上げられている10 $\mu\text{m Rmax}$ と4 $\mu\text{m Rmax}$ では、より粗面である10 $\mu\text{m Rmax}$ の方が寿命が短い傾向が見られる。ただし、水の場合だけはわずかに粗面の方が寿命が長い傾向も見られる。水が蒸発する場合には粗さが大きい場合には接触面の大きさがわずかに小さくなる現象がみられ、このため粗い面で寿命が長くなっている。水の場合には、蒸発潜熱が大きいため大きな表面温度降下が生じ接触面の大きさが時間とともに拡大する傾向が見られるが、この接触面の拡大に対しては粗さが抵抗として作用し、接触面の大きさが相対的に小さくなるためとも考えられるが詳細は明かでない。いずれにしても、寿命は粗さの大きさだけでなく粗さの形状の相違も含めた表面形状の影響を受けていることがわかる。

4.4.4 核沸騰状蒸発領域における蒸発様相

表面粗さが異なるジルコニアが被覆された加熱面上で蒸発する液粒の蒸発様相の例を第4.16図～第4.20図に示す。第4.16図は、異なる粒度の粉末材料の溶射により得られた2種類のセラミックス被覆層を有する加熱面にn-ヘキサデカンが衝突して蒸発する場合に撮影された高速度写真の一部である。初期

n-Hexadecane , $d_0=1.68\text{mm}$



- (1) $56\mu\text{m}R_{\text{max}}$ (2) $27\mu\text{m}R_{\text{max}}$
 $T_{w0}=757\text{K}$ $T_{w0}=755\text{K}$

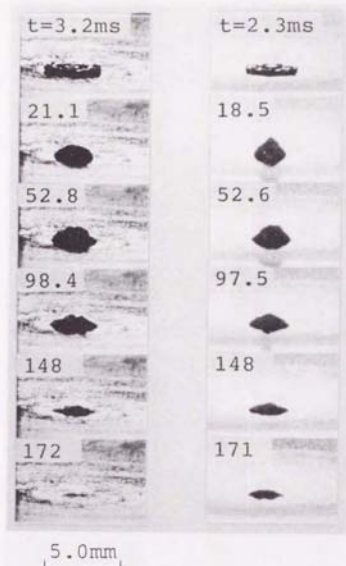
第4.18図 液射面におけるn-ヘキサデカンの蒸発様相 ($T_b = 580\text{K}$)

加熱面温度はほぼ等しく、最大蒸発率点に近い。いずれの表面粗さの場合にも、加熱面への接触直後には初期液粒直径 d_0 の約2倍の直径をもつ円板状に変形する (f 1) が、その後には形状復元の過程を経て接触面が縮小した状態 (f 2) で蒸発が進行していく。そして加熱面との接触面積を徐々に拡大しながら、液粒の加熱過程 (f 1 ~ f 3) を経て、凸レンズ状に広がった液粒の全体から多数の気泡を発生し始める (f 4)。この後、核沸騰状に激しく沸騰し、蒸発量を増していくが、接触面の大きさはほぼ一定に保たれていて減少しない (f 5 ~ f 6)。最後には薄い液膜状の接触面の大きさが急激に減少して蒸発を完了する。固液接触面の外縁部に、水やメチルアルコールの場合に良く観察される薄い液膜が顕著には現れていないが、沸騰を伴う蒸発過程における固液接触部の輪郭はほぼ円形で安定しており、気泡の発生にともなう動くことはなく、液粒底部全体で加熱面と直接接していると考えられる。このように、加熱面の表面粗さが異なる場合でも液粒が示す蒸発形態には差はみられないが、 n -ヘキサデカンの場合に観察される、加熱面が平滑な面であると考えた場合の見かけの接触面の大きさは表面粗さが大きい場合の方がわずかに大きく、このため寿命もやや短くなっている。

第4. 17図は研磨により仕上げられた被覆面におけるイソオクタンの蒸発様相を示す。10 μm R_{max} と4 μm R_{max} の表面粗さをもつジルコニア被覆加熱面で寿命が極小値をとる加熱面温度において撮影された、ほぼ一致する時間における写真を比べて示している。時間経過に対する変化は、第4. 17図に示した n -ヘキサデカンの場合と同様であるが、粗面の方が各時点において観察される固液接触面の大きさがより大きく、液粒の寿命が短い。

第4. 18図および第4. 19図には、それぞれ溶射面および研磨面におけるメチルアルコール滴の蒸発様相を示す。加熱面温度は、ほぼ最大蒸発率点に一致する温度である。第4. 18図の溶射面においても、表面粗さが異なる場合でも液粒が示す蒸発様相に大きな差は見られない。また、メチルアルコールの場合には、核沸騰状に蒸発する過程の固液接触面の外縁部は薄い液膜状となっていることが明確に観察される。この液膜状の部分の輪郭形状は安定していて局部的に乾燥したり、気泡の発生にともなう振動するように動くことはない。周縁部が薄液膜状となった固液接触面は、表面粗さが小さい方がその輪郭形状は滑らかであ

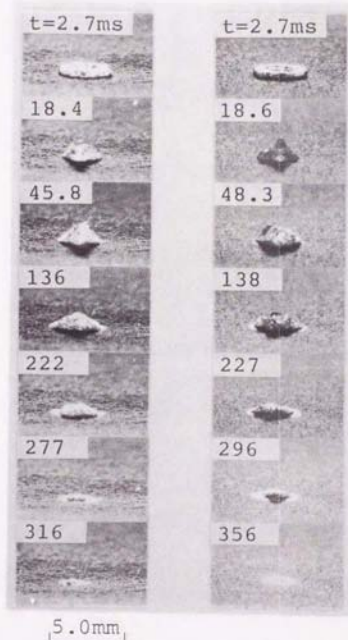
Isooctane , $d_0=1.68\text{mm}$



- (1) $10\mu\text{m}R_{\text{max}}$ (2) $4\mu\text{m}R_{\text{max}}$
 $T_{w0}=491\text{K}$ $T_{w0}=482\text{K}$

第4. 17図 研磨面におけるイソオクタン₂の蒸発様相 ($T_b = 372\text{K}$)

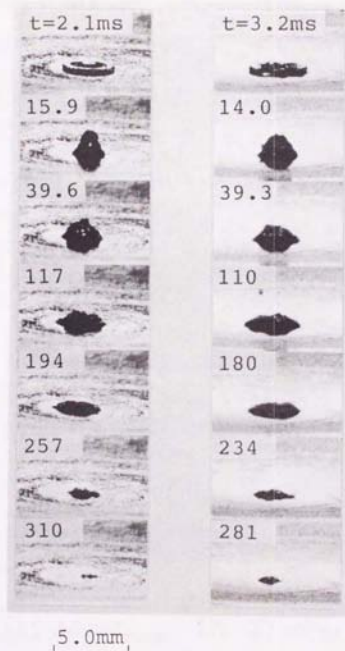
Methyl Alcohol, $d_0=1.68\text{mm}$



- (1) $56\mu\text{m}R_{\text{max}}$ (2) $27\mu\text{m}R_{\text{max}}$
 $T_{w0}=529\text{K}$ $T_{w0}=527\text{K}$

第4. 18図 溶射面におけるメチルアルコールの蒸発様相 ($T_b = 338\text{K}$)

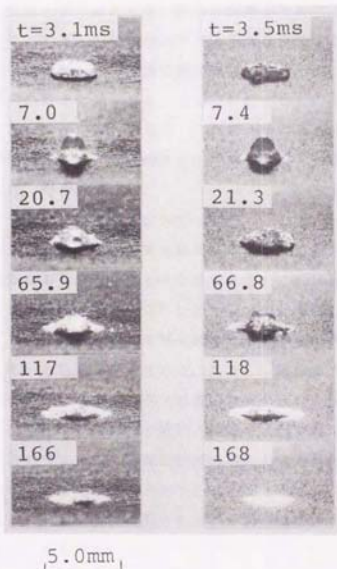
Methyl Alcohol , $d_0=1.68\text{mm}$



(1) $10\mu\text{m}R_{\text{max}}$ (2) $4\mu\text{m}R_{\text{max}}$
 $T_{w0}=530\text{K}$ $T_{w0}=528\text{K}$

第4.19図 研磨面におけるメチルアルコールの蒸発様相 ($T_b = 338\text{K}$)

Water , $d_0=1.79\text{mm}$



(1) $56\mu\text{mR}_{\text{max}}$ (2) $27\mu\text{mR}_{\text{max}}$
 $T_{w0}=815\text{K}$ $T_{w0}=816\text{K}$

第4.20図 溶射面における水の蒸発様相 ($T_b = 373\text{K}$)

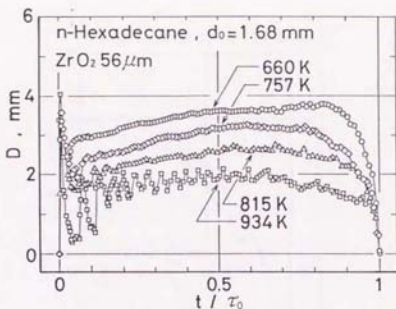
るが、みかけの接触面の大きさにはほとんど差がみられない。一方、第4. 19図の研磨面では、核沸騰状に蒸発する液塊の周囲で加熱面と接触している部分はやはり薄い液膜状となっている。しかし、加熱面表面が滑らかであるためにこの液膜厚さは非常に薄く、表面が粗い溶射面の場合ほど液膜状の部分が広く現れてはいない。また、気泡の発生にともない固液接触面の外縁部が局部的に振動するように動く現象も見られた。接触面の大きさは平滑な面の方がやや大きい。

第4. 20図は溶射面における水滴の蒸発様相である。水の場合には、固液接触面を形成する液膜が顕著に見られる。加熱面に衝突した直後に液塊の周囲には加熱面に密着した薄い液膜が現れており、これにより寿命期間全域において固液の直接接接触状態が維持される。表面粗さが小さい場合の方が観察される固液接触面の大きさが大きく、寿命が短い。

第4. 7図～第4. 11図の寿命曲線および第4. 16図～第4. 20図の蒸発様相からは、表面粗さを考慮した実接接触面積でなく、観察される見かけの固液接触面の大きさが寿命を支配している様子がわかる。これは蒸発過程の液粒底部では液膜が粗さによる空間を満たすように加熱面表面に密着して存在しており、加熱面表面における固体から液体への熱伝達よりも加熱面の熱伝導性の影響が相対的に大きく現れている結果と考えられる。ただし、観察される見かけの固液接触面の大きさの変化には、セラミックス被覆層表面の粗さの大きさによる一様な傾向は見られず、表面仕上げの方法や液粒の種類によって異なっている。また、溶射後に研磨されたセラミックス被覆加熱面の場合の固液接触面の挙動は、第2章で示した、やはり研磨仕上げされた面であるセラミックス(b)加熱面で観察された挙動に類似している。表面の粗さの形状が固液接触面に現れる薄液膜の挙動に影響していることがわかる。

4. 4. 5 固液接触面の大きさと加熱面から液粒へ伝達される熱流束

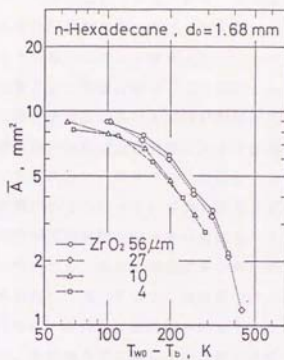
液粒と加熱面の接触面の挙動は寿命に大きな影響を与える。そこで、実験で観察された見かけの固液接触面の形状を円形と考え、第4. 16図～第4. 20図に示したような一連の高速度写真から固液接触面の直径の時間変化を計測した。この一例としてn-ヘキサデカンが $5.6 \mu\text{m Rmax}$ の溶射面で蒸発する場合の測定例を第4. 21図に示す。加熱面への衝突直後には薄い円板状に変形し加熱面



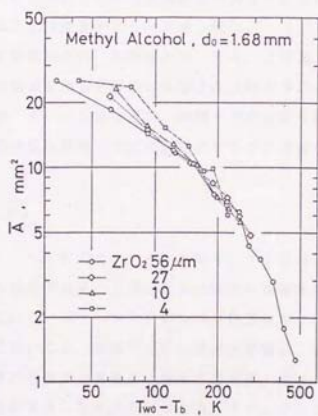
第4. 21図 固液接触面直径の時間による変化

上に広がるが、この時点で液粒底部の中心部より外周部にかけてのかなり広い範囲で固液が直接接触していると考えられる。加熱面温度が高くなるにつれて部分的に蒸気層が形成され、粗さによる液粒の広がりに対する抵抗が減るため、衝突直後の広がり面積は大きくなる。しかし、液粒が加熱され、沸騰して蒸発していく過程における接触面の大きさは、これとは逆に、加熱面温度が上昇するにつれて小さくなっており、衝突時の広がり径の影響は消失していることがわかる。また、寿命期間内の接触面の大きさは近似的にはほぼ一定に保たれていることがわかり、これは加熱面温度によって変化している。

第4. 21図に示したような接触面直径の時間変化曲線より、一滴の液粒が蒸発する場合について寿命期間内における平均接触面積 \bar{A} を求めた例を第4. 22図および第4. 23図に示す。これらの図中に示す一つの測定点は一つの液粒の蒸発過程から計測されたものであり、複数回の測定による平均的な値ではない。第4. 22図はn-ヘキサデカンの例である。固液接触面の大きさは加熱面温度の上昇とともに減少して行くが、その減少割合は加熱面温度が高い方がより大きく、急激に減少していく。また、加熱面温度が同じ場合には同一表面仕上げの範囲内では表面粗さが大きい方が見かけの接触面積がわずかに大きい傾向も見られる。しかし、この表面粗さによる差は小さく、溶射あるいは研磨という表面仕上



第4. 2 2 図 表面初期過熱度と時間平均接触面積 (n-ヘキサデカン)



第4. 2 3 図 表面初期過熱度と時間平均接触面積の変化 (メチルアルコール)

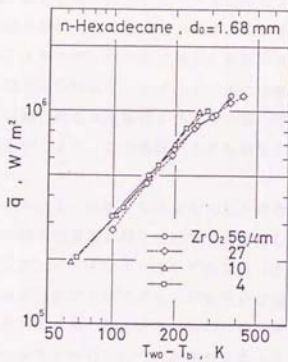
げ法の影響の方がより大きく現れている。第4. 23図はメチルアルコールの場合の加熱面温度による固液接触面積の変化の測定例である。加熱面温度の上昇に対して接触面の大きさが減少していく傾向はn-ヘキサデカンの場合と同様である。表面仕上げ法の差による影響は第4. 22図のn-ヘキサデカンの場合ほど明かではないが、平坦な研磨面における固液接触面の大きさが大きくなる傾向がわかる。そして、溶射面では固液接触面積の大きさは表面粗さが異なっても差は小さいが、第4. 22図のn-ヘキサデカンの場合とは逆に粗さが小さい場合の方が見かけの接触面積がわずかに大きい傾向も見られる。また、研磨面でも表面粗さが小さい場合の方が固液接触面が大きい傾向を与えている。

他の種類の液粒についても、変化の傾向は多少異なるが同様な表面仕上げ法の相違による差が認められている。そして、溶射面では、第4. 22図のn-ヘキサデカンの場合と同様に、全体的に表面粗さの大きさによる接触面積の大きさの差は少ない。ただし、水の場合には第4. 23図のメチルアルコールの場合と同様、粗さが小さい場合の接触面積が大きくなり寿命が短くなる傾向が見られた。一方、研磨面では粗い面の方が平均接触面積が大きくなる傾向があり、ベンゼン、イソオクタンではこれが顕著であり、寿命も短い。

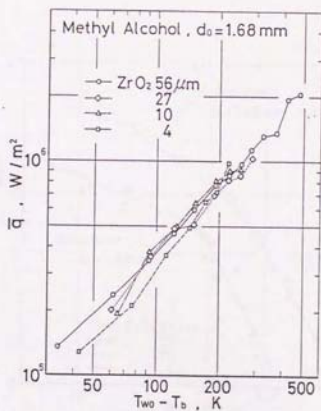
一液の液粒の寿命期間内に、加熱面から、第4. 22図、第4. 23図に示した大きさの固液接触面を通して液粒に伝達される時間平均の熱流束 \bar{q} を求めた結果を第4. 24図、4. 25図に示す。時間平均熱流束 \bar{q} は第3章で示したものと同様に、単一の液粒を蒸発させ飽和蒸気にするのに必要な熱量 Q を用いて次式により求めた。

$$\bar{q} = \frac{Q}{A \cdot \tau_0} \quad \dots (4-1)$$

第4. 24図はn-ヘキサデカン、そして第4. 25図はメチルアルコールの例である。いずれも加熱面温度の上昇とともに時間平均熱流束はほぼ直線的に増加することを示している。n-ヘキサデカンの加熱面温度による熱流束の変化を表す第4. 24図においては、表面仕上げの相違の影響は、第4. 22図に示した時間平均接触面積の場合ほど明確には現れておらず、寿命 τ_0 と時間平均接触面積 \bar{A} とで相殺される関係にある状況がわかる。メチルアルコールの場合の熱流束変化を表す第4. 25図においては、研磨面 $4 \mu\text{m Rmax}$ での時間平均熱流束 \bar{q}



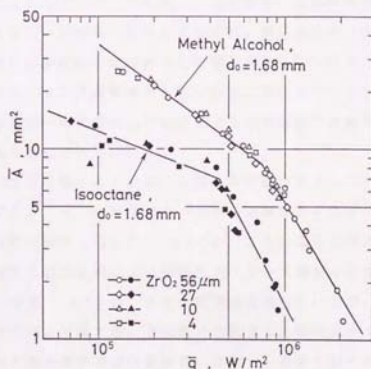
第4. 24図 表面初期過熱度と時間平均熱流束 (n-ヘキサデカン)



第4. 25図 表面初期過熱度と時間平均熱流束 (メチルアルコール)

が加熱面温度が低い範囲で他の場合に比べやや低い値を示している。この原因として、第4.23図に示した固液接触面の大きさ \bar{A} がやや大きく測定されていることも考えられる。メチルアルコールが表面が滑らかな研磨面上で蒸発する場合には、表面が粗い場合とは異なり、第4.19図の高速度写真にも示しているように固液接触面の周囲に現れる液膜厚さが非常に薄く時間とともに外形形状が変動する傾向が観察されており、この影響が固液接触面の大きさ \bar{A} の測定値に現れていると考えられる。

第4.24図、第4.25図のように求められた寿命期間内における時間平均熱流束 \bar{q} を用いて時間平均接触面積 \bar{A} との関係を整理した例を第4.26図に示す。メチルアルコール、イソオクタンいずれにおいても、表面粗さが異なるセラミックス被覆加熱面における測定点は、近似的には傾斜が異なる2本の直線からなる折線上に分布している。この折線の折点は最大蒸発率点に相当している。第4.26図は、全体的な傾向として、表面粗さの大きさや粗さの幾何学的な形状が異なる場合でも固液の接触面積は液粒に伝達される熱流束の大きさに依存して変化していることを示す。



第4.26図 熱流束と接触面積の関係

4. 4. 6 金属系加熱面における現象との比較

本研究における金属加熱面では表面粗さは変化させていないため、既に報告されている金属加熱面に関し得られている結果と比較する。

Cumo⁽³¹⁾は、平均高さ1.2~6.6 μm の範囲の表面粗さをもつ3種類の鋼製加熱面を使用して水の寿命曲線を得ている。粗面の場合ほどライデンフロスト温度近傍の寿命が短くなり、寿命の極大値を与える部分の寿命曲線の形状がピークが低い滑らかな曲線となるが、最大蒸発率点近傍の温度領域においては表面粗さによる差はほとんど認められない。

Temple-Pediani⁽⁷⁾は、エメリーペーパーによる4 $\mu\cdot\text{in}$ (=0.10 μm)および16 $\mu\cdot\text{in}$ (=4.1 μm)の表面粗さをもつ研磨面と、これらよりも粗いエッチングによる粗面の3種類の表面粗さをもつステンレス鋼製の加熱面とケロシンを用いた実験から粗面ほど液粒の寿命が短くなることを示している。表面処理の方法が異なるエッチングによる粗面を除外して考えると、2種の研磨面では粗い16 $\mu\cdot\text{in}$ の加熱面の方がわずかに寿命が短くなっているが、寿命曲線の形状には表面粗さによる変化がほとんどみられず、一致している。

小竹⁽¹⁸⁾は、#400、#240、#100のやすり仕上げをしたステンレス鋼製加熱面とエチルアルコールを用い、表面粗さによる寿命の相違を示している。最大蒸発率点は粗い加熱面の方がわずかに低い値になるが、全体としてのこの温度領域の蒸発には表面粗さはほとんど影響しないとしている。第4.7図に示した本研究のセラミックスが被覆された加熱面におけるメチルアルコールの寿命曲線においても、同一の表面仕上げ方法による加熱面間では寿命の差が小さく、これと同じ傾向を示している。

溝本ら⁽²⁸⁾により得られている、3種の表面粗さをもつステンレス鋼製の加熱面とn-ヘプタン、n-ヘキサデカンとによる結果をそれぞれ、第4.9図および第4.13図に併せて示した。Rz<0.2zの場合の寿命曲線は、液粒の直径差等を考慮すれば本研究による平滑なステンレス鋼製の加熱面の結果と良く一致している。なお、Rz=6.6zの結果は省略しているが、図示した二つの寿命曲線のほぼ中間に位置する。表面粗さの影響が比較的大きく現れており、表面粗さが増すほど最大蒸発率点は低温側に移動し、寿命も短くなっている。表面粗さが増すとともに寿命が短くなる傾向は本研究によるセラミックス被覆加熱面に

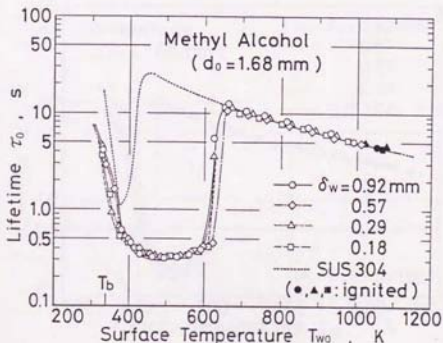
おける一部の結果にも認められている。しかし、表面粗さによる最大蒸発率点の移動に関しては、現象が広範な温度領域にわたるセラミックス被覆加熱面の結果においてもきわめて小さく、明確でない。

以上のような金属加熱面の場合の表面粗さの影響は、最大蒸発率点付近の寿命が短い温度領域が狭いため明かでないが、全体的な傾向としては本研究と同様な結果を示していると推定される。

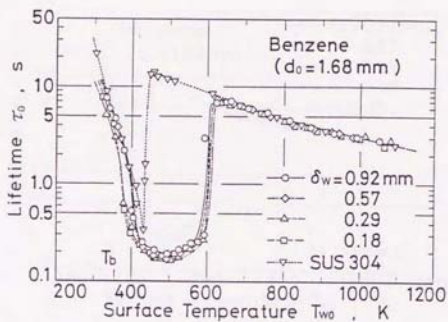
4.5 厚さが異なるセラミックス被覆層を有する加熱面との衝突による
液粒の蒸発

4.5.1 寿命曲線

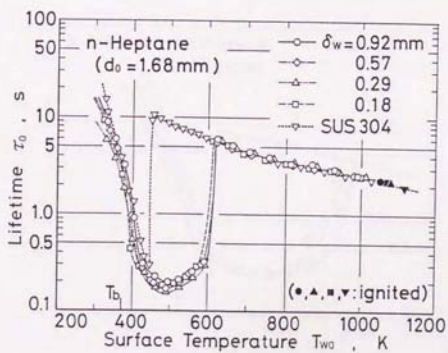
被覆層厚さが異なる溶射ジルコニアセラミックスで被覆されたステンレス鋼製加熱面および被覆のない平滑なステンレス鋼製の加熱面で測定された寿命曲線を第4.27図～第4.33図に示す。初期液粒直径 d_0 は初期設定値の値を示している。いずれの液粒の場合もステンレス鋼表面に被覆層厚さ $\delta_w = 0.18 \sim 0.92$ mmの範囲でセラミックス被覆層を設けることにより、沸点 T_b から寿命が極大となるライデンフロスト温度 T_L までの広い加熱面温度範囲で寿命が著しく短くなっている。第4.27図～第4.30図のメチルアルコール、ベンゼン、*n*-ヘプタン、イソオクタン¹⁾の寿命曲線では、被覆層厚さによる寿命曲線の形状の差はなく、また、同程度の表面粗さをもつことからライデンフロスト温度もほぼ一致していることがわかる。ライデンフロスト温度近傍における固液の接触時間は非常に短く、被覆層厚さが最も薄い $\delta_w = 0.18$ mmの場合でも固液接触時間内の温度浸透厚さよりも厚いため、ライデンフロスト温度の変化は生じないと考えられる。このライデンフロスト温度近傍における固液接触時間に比べ



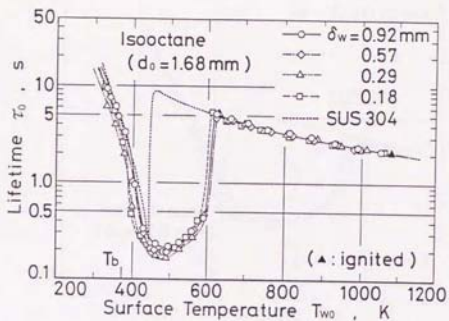
第4.27図 メチルアルコールの寿命曲線



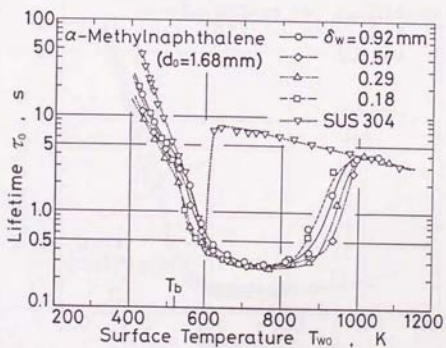
第 4. 28 図 ベンゼンの寿命曲線



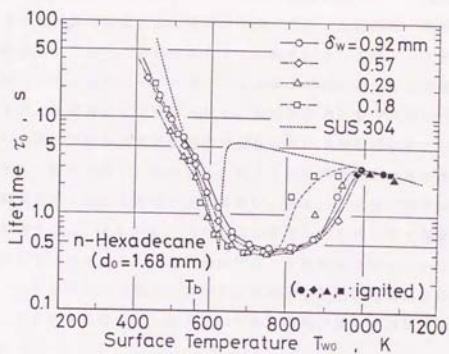
第 4. 29 図 n-ヘプタンの寿命曲線



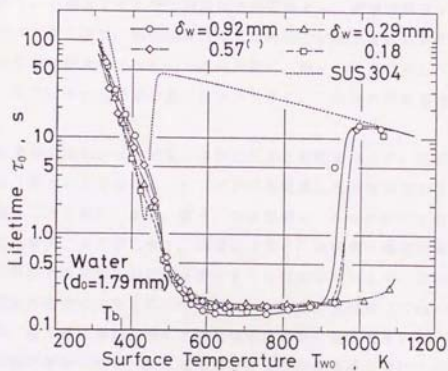
第4.30図 イソオクタン の寿命曲線



第4.31図 α -メチルナフタレン の寿命曲線



第4.32図 n-ヘキサデカンの寿命曲線

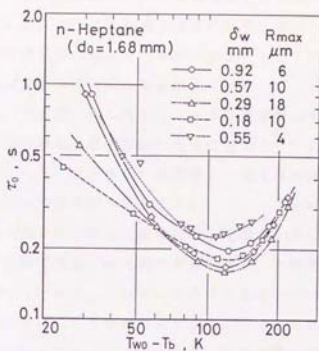


第4.33図 水の寿命曲線

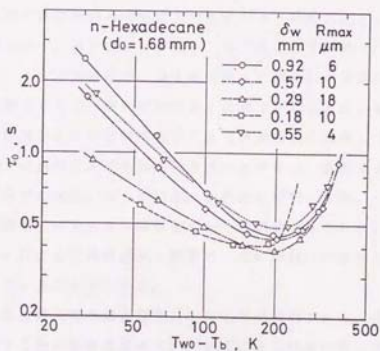
ると、最大蒸発率点前後の領域の寿命は0.2~0.4秒程度と相対的に長い、寿命曲線に特に大きな影響は現れてはいない。同様に第4.33図に示す水の場合にも、核沸騰状蒸発領域における寿命が短くて0.2秒前後であり、被覆層厚さの影響は現れていない。これらに対して、第4.31図の α -メチルナフタレンおよび第4.32図のn-ヘキサデカンの寿命曲線においては被覆層厚さの影響が認められ、被覆層厚さが薄い場合に、液粒の蒸発形態が核沸騰状からスフェロイド状への遷移が始まる加熱面温度が低温度側に移動しているのがわかる。これらの液体では沸点が高く、加熱面上に滴下された後の加熱過程が長くなるので、核沸騰状蒸発領域における寿命が比較的長い。第4.31図に示す α -メチルナフタレンの場合には、 $\delta w = 0.18\text{ mm}$ の場合に約850Kで遷移域に移行する傾向を示しているが、この時の寿命は約0.5秒程度となっている。第4.32図のn-ヘキサデカンの場合にはさらに核沸騰状蒸発領域における寿命が長く、 $\delta w = 0.29\text{ mm}$ の場合にも他と比べて低い加熱面温度で遷移域に移行する傾向がみられる。

次に、各領域における寿命の値について比較する。ライデンフロスト温度以上の加熱面温度範囲における寿命には被覆層厚さによる差異は認められない。また、液粒の沸点 T_b に相当する加熱面温度以下の領域では、被覆層厚さよりも表面粗さの影響がより強く現れ、粗面の場合ほど加熱面上に滴下され蒸発する過程での液粒の広がり面積が大きくなるので寿命が短い。第4.4図に示したように、 $\delta w = 0.29\text{ mm}$ の被覆層の表面粗さが大きく、このため最も寿命が短くなっている。

核沸騰状蒸発領域における液粒の寿命に対する被覆層厚さ δw の影響について調べるため、第4.29図のn-ヘプタンの核沸騰状蒸発領域における寿命曲線の詳細を第4.34図に、また、第4.32図のn-ヘキサデカンの同様な寿命曲線の一部を第4.35図に示す。両図によると、核沸騰状蒸発領域における現象は被覆層厚さと表面粗さの影響を受けている状況がわかるが、これはそれぞれの加熱面温度の寿命の大きさによって異なっている。過熱度($T_w - T_b$)が低い領域では、最大蒸発率点近傍に比べ全体的に寿命の値が大きいが、被覆層厚さ δw が薄いほど寿命は短く、主に被覆層を介しての伝導熱流束により現象が支配されていることがわかる。これに対し、過熱度($T_w - T_b$)がより高い最大蒸



第4.34図 核沸騰状蒸発領域におけるn-ヘプタンの寿命曲線 ($T_b = 372$ K)



第4.35図 核沸騰状蒸発領域におけるn-ヘキサデカンの寿命曲線 ($T_b = 560$ K)

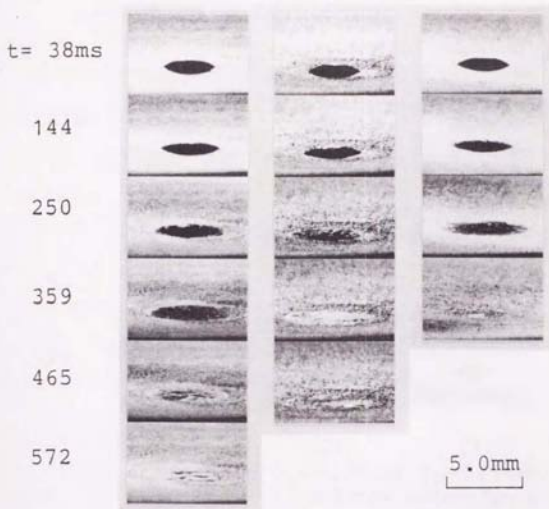
発率点近傍の領域では、現象が速いため被覆層厚さの効果は消失して、粗面ほど寿命が短くなっている。このような表面粗さの効果は第4.9図に示したn-ヘプタン、第4.13図に示したn-ヘキサデカンについての、表面粗さが異なる研磨仕上げによる被覆面で得られた実験結果に一致している。なおここでは、第4.34図、第4.35図に示したセラミックス被覆層は全て研磨による仕上げ面であり、粗さの幾何学的形状は類似したものとなっている。また、両図において、最も平滑な $\delta w = 0.55 \text{ mm}$ の被覆面の、過熱度が低い温度領域における寿命曲線が、ほぼ同じ被覆層厚さである $\delta w = 0.57 \text{ mm}$ の曲線に漸近していることから、最大蒸発率点付近の寿命曲線は研磨面における表面粗さの影響を表していることが確認される。最大蒸発率点を越え、加熱面温度が高くなると寿命の差は小さくなっているが、この領域における寿命の絶対値が大きいn-ヘキサデカンでは、 $\delta w = 0.18 \text{ mm}$ および $\delta w = 0.29 \text{ mm}$ の場合に寿命が急激に増加する傾向がみられる。以上のような、被覆層厚さが液粒に寿命に与える影響は他の液粒試料の場合についても同様であった。

4.5.2 核沸騰状蒸発領域における蒸発様相

核沸騰状蒸発領域における加熱面上の液粒が示す挙動の例として、n-ヘプタンの蒸発様相を第4.36図および第4.37図に示す。第4.36図は過熱度 $(T_w - T_b) = 30 \text{ K}$ 程度で、最大蒸発率点近傍に比べ寿命の値が大きい領域における蒸発様相である。液粒が加熱面上に滴下されると広い面積で加熱面を濡らし、時間の経過とともに液が加熱されると核沸騰状に蒸発していく。この沸騰を伴って蒸発する過程における固液接触面の大きさは、表面粗さによっても異なるが全体的に非常に大きくなっている。加熱面に衝突した後、 $t = 1.44 \text{ ms}$ 程度までは固液接触面の大きさも同程度であり特に差がみられないが、これ以降は、被覆層厚さ δw による伝導熱流束の影響で、 δw が薄い場合ほど現象の進行が著しく速くなっていることがわかる。

第4.37図は最大蒸発率点近傍における蒸発様相である。蒸発が非常に短い時間内で完了するため被覆層厚さ δw の相違による現象の差は見られず、表面粗さによる固液接触面積の大きさの差が寿命に影響しており、粗面ほど寿命が短くなっている。

n-Heptane , $d_0=1.68\text{mm}$



(1)	(2)	(3)
$\delta_w=0.92\text{mm}$	$\delta_w=0.29\text{mm}$	$\delta_w=0.18\text{mm}$
$6\mu\text{m Rmax}$	$18\mu\text{m Rmax}$	$10\mu\text{m Rmax}$
$T_{w0}=401\text{K}$	$T_{w0}=399\text{K}$	$T_{w0}=401\text{K}$

第4.36圖 n-ヘプタンの蒸発様相 (1) ($T_b = 372\text{K}$)

n-Heptane , $d_0=1.68\text{mm}$

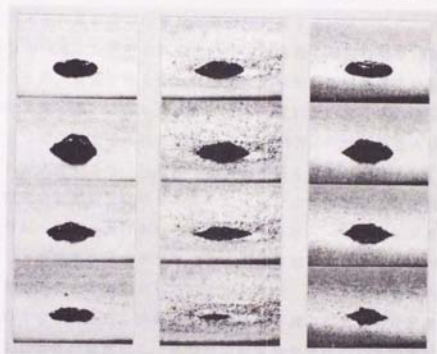
5.0mm

t = 21ms

56

92

127



(1)

(2)

(3)

$\delta_w=0.92\text{mm}$ $\delta_w=0.29\text{mm}$ $\delta_w=0.18\text{mm}$

$6\mu\text{m Rmax}$ $18\mu\text{m Rmax}$ $10\mu\text{m Rmax}$

$T_{w0}=490\text{K}$ $T_{w0}=490\text{K}$ $T_{w0}=489\text{K}$

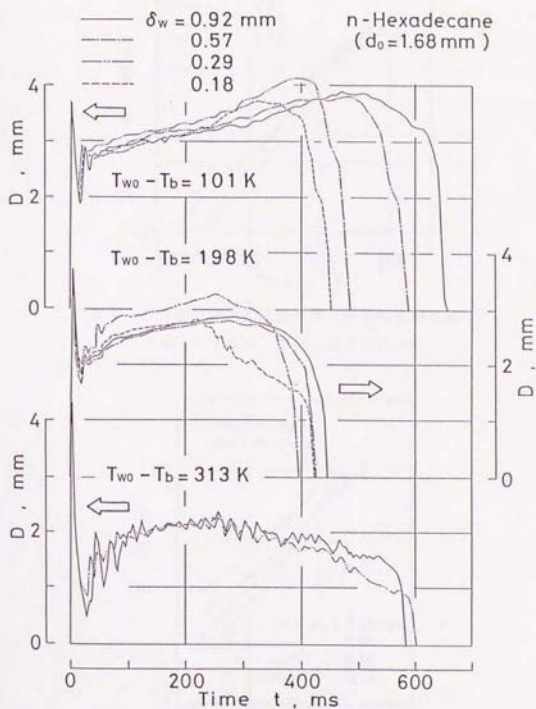
第 4. 37 図 n-ヘプタンの蒸発様相 (2) ($T_b = 372\text{K}$)

4. 5. 3 固液接触面の大きさと加熱面から液粒へ伝達される熱流束

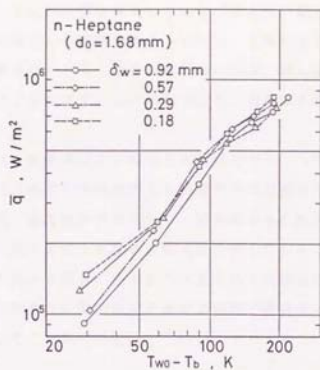
蒸発過程の固液接触面はほぼ円形となっていると仮定し、接触面の大きさの時間変化としてその直径 D の変化を高速度写真から測定した例を第4. 38図に示す。また、寿命の測定値および第4. 38図のような曲線より得られる寿命期間内の時間平均接触面積 \bar{A} を用いて計算される、固液接触面を通して液粒に伝達される寿命期間内の平均熱流束 \bar{q} の例を第4. 39図、第4. 40図に示す。

第4. 38図は、寿命曲線に被覆層厚さの影響が認められた n -ヘキサデカンが蒸発する場合の接触面の大きさの時間変化である。 $(T_{w0}-T_b) = 101\text{ K}$ では、加熱面上に滴下された直後の液粒の加熱過程に要する時間が長く、 $200 \sim 300\text{ ms}$ 経過した時点より多数の気泡を発生し核沸騰の状態に至る。現象が継続する時間が長いので、固液接触を伴った蒸発により生ずる温度変化が被覆層厚さを越えて基盤材に達する。このため、粗さによる接触面の大きさの差も認められるが、第4. 40図に示すように被覆層厚さ δ_w が小さいほど熱抵抗が小さく時間平均熱流束 \bar{q} が大きくなり、したがって寿命が短くなる。 $(T_{w0}-T_b) = 198\text{ K}$ では、液粒の加熱過程は短く、寿命の大部分は核沸騰状の蒸発過程からなる。 \bar{q} は、基盤材の影響を受けていると考えられる $\delta_w = 0.18\text{ mm}$ の場合を除いて、ほとんど同程度の値を示しており、固液接触による温度変化が基盤材には達せずに被覆層内にとどまっていることがわかる。このため接触面の大きい粗面ほど寿命が短くなっている。現象が生ずる時間の長さに対して被覆層厚さが薄い $\delta_w = 0.18\text{ mm}$ の場合には、基盤材の影響で加熱面からの熱流束が大きく、 $t = 250\text{ ms}$ 以降の時間域の固液接触面の大きさが減少していることがわかる。 $(T_{w0}-T_b) = 313\text{ K}$ では、再び寿命が長くなって基盤材の影響が及んで被覆層厚さが薄いほど熱流束 \bar{q} が大きくなる傾向を示すが、測定した範囲では \bar{q} の差は小さく接触面の大きさにも大きな変化がないので寿命の差も小さくなっている。

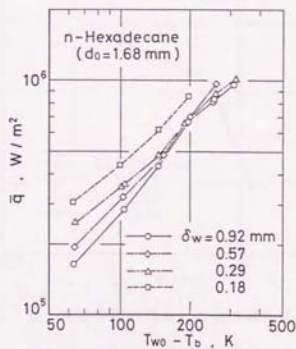
第4. 39図は n -ヘプタンの場合の寿命期間内に伝達される時間平均の熱流束を示している。液粒の寿命が長い、過熱度 $(T_{w0}-T_b)$ が低い領域では、被覆層厚さが薄い場合ほど熱流束 \bar{q} が大きくなっているが、加熱面温度の上昇とともに寿命が短くなり、現象に影響する温度変化が被覆層の薄い部分に限られてくるので、熱流束 \bar{q} の差は小さくなる。最大蒸発率点近傍では熱流束はほぼ一致し



第4.38図 固液接触面直径の時間変化 (n-ヘキサデカン, $T_b = 560 \text{ K}$)



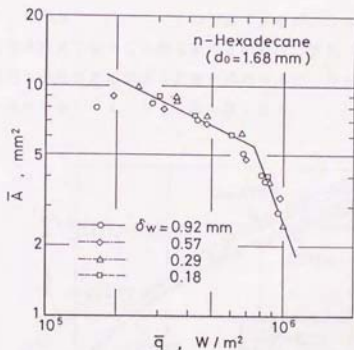
第 4. 39 図 表面初期過熱度と時間平均熱流束
(n-ヘプタン, $T_b = 372$ K)



第 4. 40 図 表面初期過熱度と時間平均熱流束
(n-ヘキサデカン, $T_b = 560$ K)

ており、被覆層厚さ δ_w の影響は喪失している。以上は、第4.40図に示したn-ヘキサデカンの場合にも同様である。しかし、現象が長い時間に及ぶため、被覆層厚さが最も薄い $\delta_w = 0.18$ mmの場合には、最大蒸発率点付近でも熱流束 \bar{q} が一致せず他よりも大きい値を示しており、被覆層厚さの影響が顕著に現れている。

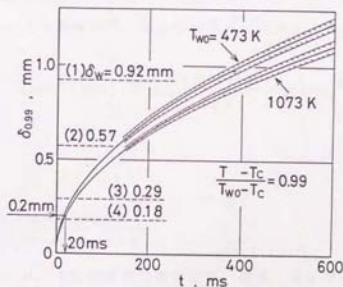
第4.41図には、被覆層厚さが異なる加熱面上でn-ヘキサデカンが蒸発する場合の寿命期間内の時間平均熱流束 \bar{q} と時間平均の固液接触面積 \bar{A} の関係を再整理した結果を示す。被覆層厚さが異なり、加熱面からの熱流束に差がある場合の測定値が、ほぼ一組の折線からなる曲線上に分布していることがわかる。これは、被覆層の材質が異なる場合に得られているものと同様な結果である。加熱面上において、最大蒸発率点近傍の温度で核沸騰状態で蒸発する液粒の挙動が、ほぼ熱流束により定まることがわかる。



第4.41図 時間平均熱流束と固液接触面積の関係

4. 5. 4 溶射ジルコニアセラミックス被覆加熱面上で液粒が蒸発する現象に対する温度浸透厚さ

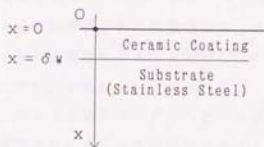
溶射ジルコニアセラミックス被覆面への液粒の接触により表面温度が急降下して短時間の間一定値 T_c に保たれると仮定し、被覆層内の温度変化に半無限固体の熱伝導理論を適用する。ここで、 $(T - T_c) / (T_{wo} - T_c) = 0.99$ となる表面からの距離 δ を温度浸透厚さとして、時間に対する温度浸透厚さの変化を計算した結果を第4. 42図に示す。計算に使用した熱拡散率は、第6章に示す真空中で測定された473 Kおよび1073 Kにおける値であり、測定値のばらつきにより生ずる差についても斜線の範囲で示している。第4. 42図において温度浸透厚さが0. 2 mmとなる時間を求めると約20 msとなる。本研究において、被覆層がある加熱面の場合でもライデンフロスト温度近傍における固液の接触時間は最大でも10 ms以下であると観察されており、これは、ここで使用した被覆層厚さの範囲内ではライデンフロスト温度が変化しないことを示し、第4. 27図～第4. 33図の実験結果に一致する。一方、核沸騰状蒸発領域における液粒の寿命は0. 2～0. 5秒程度であるが、この時間領域に対応する温度浸透厚さは本研究で使用した被覆層厚さの範囲に重なっていることがわかる。しかし、液粒の蒸発挙動に顕著な影響が現れるのは、最も薄い被覆層 $\delta_w = 0. 18$ mmの場合でも0. 4～0. 5秒以降である。



第4. 42図 溶射ジルコニア被覆層の温度浸透厚さ

4. 5. 5 溶射ジルコニアセラミックスの被覆層厚さによる伝熱量の変化

液粒が低熱伝導性のセラミックスが被覆された加熱面に衝突して固液接触面を形成し核沸騰状態で短時間で蒸発する場合の接触面温度が、寿命期間内全体を通して液粒の沸点 T_b に保たれると仮定し、被覆層厚さが異なる加熱面からの伝導熱量を比較する。セラミックス被覆層をもつ加熱面の構造は、本研究にて実験に使用したものは被覆層、結合材層、基盤材という3層構造であるが、ここでは熱物性値が基盤材のそれに比較的近い値を示し、また、厚さが薄い結合材層は省略し、2層構造として考えた。



第4. 43図 座標系

第4. 43図に示すような、厚さ δw のセラミックス被覆層をもち、初期温度が T_w (一定) である半無限固体状の加熱面 (被覆層: $0 < x < \delta w$, 基盤材: $\delta w < x < \infty$) の表面温度が、時刻 $t = 0$ にてステップ状に T_w から T_b に変化する際のセラミックス被覆層内の温度の時間変化は次式で与えられる⁽³⁹⁾。

$$T(x, t) = (T_w - T_b) \left(1 - \sum_{n=0}^{\infty} \phi^n \cdot \operatorname{erfc} \left[\frac{2n\delta w + x}{2\sqrt{at}} \right] - \phi \cdot \operatorname{erfc} \left[\frac{2(n+1)\delta w - x}{2\sqrt{at}} \right] \right) \quad \dots (4-1)$$

ここで、

$$\phi = \frac{\sqrt{c_{su} \cdot \rho_{su} \cdot \lambda_{su}} - \sqrt{c \rho \lambda}}{\sqrt{c_{su} \cdot \rho_{su} \cdot \lambda_{su}} + \sqrt{c \rho \lambda}} \quad \dots (4-2)$$

である。また、 c 、 ρ 、 λ は被覆層材質の比熱、密度、熱伝導率、そして、 c_{su} 、 ρ_{su} 、 λ_{su} は基盤材の比熱、密度、熱伝導率を表す。第(4-1)式を用いるこ

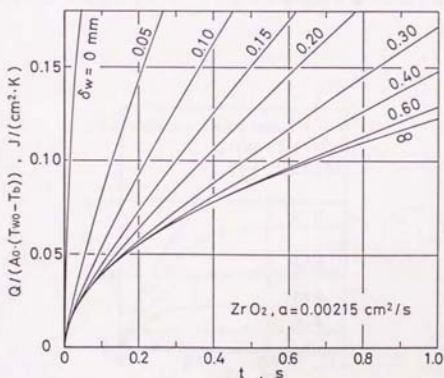
とにより、加熱面上の一定面積 A_0 を時刻 $t=0$ から $t=t$ の間に通過する熱量 Q は次に示す第(4-3)式のように表すことができる。

$$\frac{Q}{A_0} = \int_0^t \lambda \left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{x=0} dt$$

$$= 2(T_{w0} - T_b) \sqrt{c \rho \lambda} \sqrt{t} \left(\frac{1}{\sqrt{\pi}} + 2 \sum_{n=1}^{\infty} \phi^n \cdot \text{ierfc} \left(\sqrt{\frac{n^2 \cdot \delta w^2}{at}} \right) \right)$$

... (4-3)

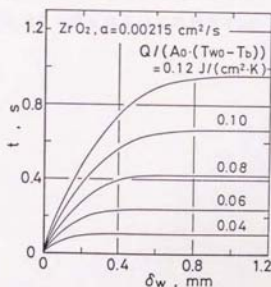
第(4-3)式を使用して厚さが異なるセラミックス被覆層をもつ加熱面からの、 $t=0$ から $t=t$ までの積算の伝導熱量を計算した結果を第4.44図に示す。加熱面の種類は、実験で使用したものと同じであり、溶射ジルコニアが薄く被覆されたステンレス鋼製の加熱面としている。また、計算に使用した加熱面材質の熱物性値は、第6章に実験結果を示すように、真空中で測定された常温における値である。被覆層厚さ $w = 0 \text{ mm}$ は被覆がないステンレス鋼表面を示して



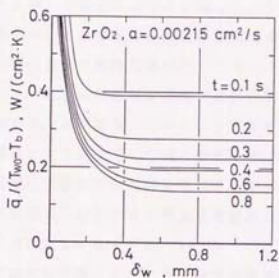
第4.44図 被覆層厚さによる伝熱量の変化

いる。被覆層厚さが薄い場合には被覆層厚さにより伝導熱量が大きく変わるが、約0.6 mmを越える厚さの範囲では、核沸騰状蒸発領域における液粒の寿命に相当する $t = 0.2 \sim 0.5$ s程度の時間内の伝導熱量にはほとんど変化がみられないことがわかる。

第4.44図より、一定の伝導熱量を得るのに必要な時間を被覆層厚さについて整理した結果を第4.45図に示す。第4.45図では、測定されている核沸騰状蒸発領域における液粒の寿命に相当する0.5 s程度までの時間内で、実験に使用した被覆層厚さをもつ加熱面の全てが伝達し得る範囲内の一定の大きさの熱量が伝達されるのに必要な時間は、被覆層厚さ δ_w が約0.4 mmを越える場合にはほぼ等しくなっている状況がよくわかる。これは加熱面上で蒸発する液粒への熱伝達に対して主に影響を及ぼすのは被覆層表面近傍の薄い領域であることも示している。また、同様に第4.44図を用いて、時刻 $t = 0$ より一定の時間内における時間平均熱流束を被覆層厚さについて整理した結果を第4.46図に示す。被覆層の厚さが薄く0.2 mm以下の場合には、被覆層がより厚い0.4 mm以上である場合に比べ、液粒の寿命に相当する時間内における時間平均熱流束の値が非常に大きくなっている。このような熱流束が高い状況では、実験結果



第4.45図 被覆層厚さによる一定熱量を伝達するのに必要な時間の変化



第4.46図 被覆層厚さによる時間平均熱流束の変化

にもみられたように、液粒と加熱面の接触面積は小さくなって寿命は長くなる、あるいは寿命期間内全体で液粒が加熱面と固液接触状態を維持することができなくなる現象が生じる。以上示したように、一次元近似した場合の被覆層厚さによる加熱面からの伝熱量の変化の計算結果は、本実験結果とも定性的に比較的良く対応しており、仮定に大きな誤りはないと思われる。

4. 6 第4章のまとめ

単一の液粒がセラミックスが被覆された加熱面に衝突して蒸発する現象における表面粗さおよび被覆層厚さの影響について調べた。先ず、セラミックス被覆層の材質、被覆層の厚さは同一で表面粗さだけが異なるような被覆層をもつ加熱面試料を製作し、これを使用して表面粗さが液粒の蒸発現象に及ぼす影響について検討した。ステンレス鋼の表面に低熱伝導性のセラミックスを薄く被覆すると、被覆のない場合に比べて、広い加熱面温度範囲で液粒が加熱面と直接接触して核沸騰状に短時間で蒸発する。この場合、セラミックス被覆加熱面の表面粗さの大きさは核沸騰状蒸発領域の大きさに対して強く影響する。表面粗さが大きい場合ほどより高い加熱面温度の状態からも固液接触状態を維持することができる現象がみられ、核沸騰状蒸発領域に相当する加熱面温度範囲はセラミックス被覆面の表面粗さの大きさにほぼ比例して拡大する。したがって、表面粗さが大きな低熱伝導性のセラミックス被覆層を設けることで、金属加熱面の場合には固液が直接接触することのないような高温域にかけての広範な加熱面温度範囲において液粒の蒸発時間を著しく短縮することができる。ただし、寿命曲線の形状より、本実験と同一条件下で効果の得られる粗さの上限は約 $80\mu\text{m} R_{\text{max}}$ 程度の範囲と推定される。これに対して、この温度領域における液粒の寿命に対する表面粗さの影響の程度は、粗さの形状などの表面条件で異なる。研磨による仕上げ面の場合には、一般に、粗い面の方が固液接触面が拡大する効果により短い時間で蒸発する傾向を示す。溶射による面では寿命に対する表面粗さの影響は比較的小さい。また、寿命に対する表面の粗さの形状の影響は比較的大きく現れ、溶射されたままの状態の表面粗さが大きな面よりも、これを研磨しかつ適当な粗さをもたせた面における寿命が最も短くなる傾向もみられた。ただし、いずれの場合にも表面粗さによる最大蒸発率点の変化はほとんど認められない。

次に、同じ材質で厚さが異なるセラミックス被覆層をもつ加熱面に衝突して蒸発する液粒が示す現象について検討した。核沸騰状蒸発領域における被覆層厚さの影響は、過熱度が低い領域および最大蒸発率点を越え核沸騰状蒸発領域内でも寿命が長くなる領域など、現象が比較的長い時間にわたる領域に現れる。すなわち、過熱度が低い温度領域では、液粒の寿命は基盤材から被覆層を介しての伝導熱流束により支配され、被覆層厚さが薄いほど寿命は短くなる。また、最大蒸発

率点を越える領域で寿命が長い場合には、被覆層厚さが薄いと熱流束が大きく増し、一定の固液接触面積を維持できなくなり、遷移域に移行する。最大蒸発率点近傍の温度領域では寿命が非常に短く被覆層内に生ずる温度変化だけが現象を支配するので、被覆層厚さの影響は消失し表面の粗さの形状などの影響が強く現れ、本実験で使用した研磨面の場合には一般的に粗面ほど寿命が短い傾向を示す。本研究で使用した液粒試料に関する実験条件下では、全ての種類の液粒に対し、溶射ジルコニア被覆層の厚さが約0.3 mm以上の範囲の場合には、寿命曲線に大きな変化はみられないことが確認された。また、この被覆層厚さについては、液粒と加熱面との接触面温度が液粒の沸点に保たれると仮定した一次元計算結果からも比較的良く一致する結果が得られた。

第5章 加熱面から液粒への熱伝達に関する理論的考察

第5章 目 次

	Page
5.1 はじめに	152
5.2 解析の仮定	153
5.2.1 セラミックス加熱面上に形成される液膜	153
5.2.2 加熱面温度変化	153
5.2.3 固液接触面の大きさ	154
5.2.4 セラミックス被覆層内の初期温度分布	154
5.3 溶射セラミックス被覆層の有効熱伝導度	155
5.4 基礎方程式と数値解法	158
5.5 計算結果の概要	161
5.5.1 被覆層内温度分布、熱流束分布、積算伝導熱量の計算例	161
5.5.2 被覆層厚さによる伝熱量の変化	163
5.5.3 結合材層の影響	163
5.5.4 被覆層の熱拡散率の影響	165
5.5.5 固液接触面上の液膜の影響	167
5.6 溶射セラミックスの被覆層厚さが異なる場合の液粒の寿命	174
5.7 溶射セラミックス被覆層の表面粗さが異なる場合の液粒の寿命	186
5.8 溶射セラミックス被覆層の材質が異なる場合の液粒の寿命	191
5.9 セラミックス(a)加熱面における液粒の寿命	195
5.10 第5章のまとめ	198

5. 1 はじめに

第2章では、熱伝導率が低く、適当な表面粗さをもつセラミックス加熱面に液粒が衝突して蒸発する場合には、金属系の加熱面の場合には最大蒸発率点として扱われてきた非常に短い時間で蒸発する現象が、高温度側に向けて広がる広範な温度領域で見られることを示した。また、第3章では、熱伝導率が高い金属面表面にセラミックスを薄く被覆することによっても同様な現象が得られ、同じ加熱面温度範囲の金属面と比較した場合、広い実用的な温度領域において液粒の蒸発を著しく促進することができることを示した。このような寿命が短くなる広い温度領域では液粒は核沸騰状の様相を示し、寿命期間内の全域において加熱面との直接接触を維持した状態で蒸発する。したがって、加熱面から液粒への熱伝達は主としてこの加熱面上の固液接触面を介して行われる。

第3章や第4章における検討の結果、最大蒸発率点を中心とする核沸騰状蒸発領域における液粒の寿命は加熱面表面上で観察される固液接触面の大きさに対応した変化を示すことがわかったが、加熱面上で蒸発する液粒が維持できる固液接触面の大きさは加熱面から受ける熱流束により制限される。また、ここで示した固液接触面積は、被覆層表面における粗さを考慮した真の接触面積でなく、加熱面上に現れる輪郭形状をもつ平面の面積で表される面積である。液粒の寿命が見かけの接触面積に依存していることは、加熱面から液粒への熱伝達が、接触面における熱伝達よりも、熱伝導率が低い被覆層内の熱伝達により依存していることを示す。このように核沸騰状蒸発領域における現象は被覆層を介する伝導熱量に依存している。

そこで、第5章では、セラミックス被覆層を有する加熱面から液粒への伝熱量について定量的に検討する。液粒の蒸発による被覆層内の過渡的な伝導熱流束は被覆層の材質、被覆層厚さにより異なり、これを円柱座標系二次元の数値計算により求める。この結果と接触面積の実測値を用いて寿命を計算し、実験値と比較、検討する。

5. 2 解析の仮定

ここでは以下に示すような仮定のもとで、被覆層厚さ、被覆層材質、液粒の種類が異なる場合の最大蒸発率点を中心とする核沸騰状に短い時間で蒸発する温度領域における現象を一括して扱い、液粒への熱伝達の概要について検討する。

5. 2. 1 セラミックス加熱面上に形成される液膜

核沸騰状蒸発領域においては、加熱面上で蒸発する液塊の周囲の固液接触部は表面粗さ程度の薄い液膜状になり、これが寿命期間中、加熱面表面に密着して一定の大きさの固液接触面を形成する現象がみられた。水やメチルアルコールの場合には蒸発する液の外縁部に特に明確に液膜が現れ、この薄い液膜には常に液が供給されて局部的に乾燥することなく、寿命末期までほぼ一定の大きさで安定的に存在し続ける。また、加熱面温度が非常に高く、ライデンフロスト温度における場合にも、加熱面に液粒が衝突した直後の短時間の間、同様な表面に密着した薄い液膜が存在することが実験により確認された。これらのことから、セラミックス加熱面上で気泡を発生して蒸発する液の底部には加熱面表面に密着した過熱された状態の薄い液膜が存在し、固液接触面が形成され、これを介して加熱面から液粒への熱伝達が行われていると考えられる。この液膜は加熱面表面の粗さによる微小な空間を満たすように密着しており、固液の熱的な接触状態は良好に保たれる。表面粗さなどの表面の形状は液膜厚さや広がりに影響する。液膜の上で沸騰により蒸発する液塊部は気泡の発生にともなって良く攪拌され、液膜の表面の温度は沸点に保たれる。ここでは、液膜の厚さは薄く一定とし、加熱面上での大きさは実測された固液の接触面積に等しいとした。また、液膜内は熱伝導のみにより伝熱が行われ、液膜内の温度分布は直線状とした。

5. 2. 2 加熱面温度変化

セラミックス被覆層材質の熱伝導率は低く、また、ライデンフロスト温度に至る高い加熱面温度の場合にも、液粒が衝突した直後の加熱面上に表面に密着した薄い液膜が存在することから、衝突後の非常に短い時間内に液体の過熱限界温度以内の温度まで加熱面の表面温度が低下していると推定される。なお、一次元熱伝導理論による二体接触の場合の接触面温度を実験で使用した被覆層材質と液粒

に適用すると接触面温度は沸点以上の温度となる。しかし、大きな表面温度の変化がみられるのは寿命に比べると非常に短い時間であり、寿命期間全体の現象を考える場合には近似的に一定値とすることもできる。ここでは、液粒と衝突後の加熱面表面温度が液粒の沸点に保たれると仮定した場合と、加熱面表面に密着した薄液膜の表面温度が液粒の沸点に保たれる場合について計算を行った。

5. 2. 3 固液接触面の大きさ

セラミックスが被覆された加熱面の核沸騰状蒸発領域内の加熱面温度においては、水など、一部の液体の過熱度が低い領域において、時間とともに接触面積が大きくなる傾向がみられた。しかし、これらの液体でも最大蒸発率点近傍やそれ以上の領域、また、その他の液体では、接触面の大きさの時間に対する変化は少なく、一定とした。接触面の大きさとしては時間平均接触面積 \bar{A} の実測値を使用した。

5. 2. 4 セラミックス被覆層内の初期温度分布

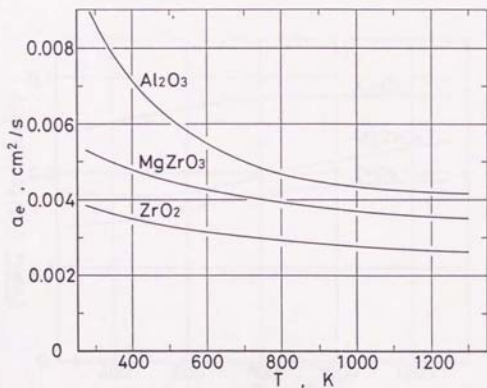
セラミックス被覆層内の液粒が衝突する前の初期温度は、被覆層表面温度と同じで一定とした。被覆層材質の熱伝導率が低いため、実際の測定時には温度分布があったが、これが寿命期間内の熱移動に与える影響は小さく、寿命に換算してもその実測値のばらつきの範囲内であることが一次元計算により確認された。

5. 3 溶射セラミックス被覆層の有効熱伝導度

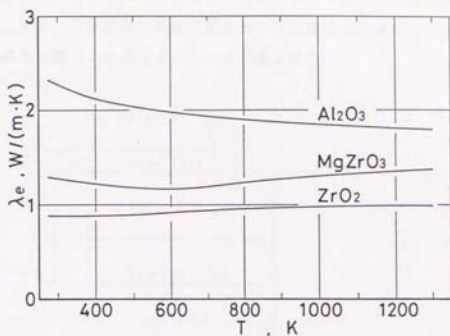
本研究においては、目的とする性状のセラミックス被覆層が比較的容易な操作により得られるセラミックス粉末供給式ガス溶射装置を利用して、ステンレス鋼製の基盤材表面にセラミックスを被覆した。溶射法によるセラミックス被覆層は、溶射したセラミックス粒子が固相面に衝突し急冷されてできる、基本的には扁平な粒子が積み重ねられた構造となっており、粒子間には気孔が含まれ、多孔質である。このような溶射セラミックスの熱伝導率は、溶射層を形成する粒子の形状や組織、気孔率などの影響を受けるため、一般に明かでない。被覆層を介する伝熱現象を定量的に考察するためには正確な熱物性値が必要であり、このため溶射セラミックスの熱拡散率、比熱、熱伝導率を方形波パルス加熱法⁽⁴⁰⁾により真空中(約0.1 Pa程度)で実測した。測定方法、測定結果の詳細については第6章に示す。

実際に溶射されたセラミックス被覆層においては気孔の形状は非常に複雑であり、その大きさも広範囲に分布している。本研究で使用した溶射セラミックスは、種類により異なるが概略10%の気孔率をもち、これらのほとんど全てが開気孔からなるという実測結果が得られている。このような溶射セラミックス被覆層の気孔内に空気が存在する場合には、この空気相が伝導および高温の場合には放射の形で伝熱に寄与する。このため、大気雰囲気下では見かけ上、真空中で測定されたものとは異なる熱伝導率を示すことになる。実際に本研究で使用した溶射セラミックスに関しては、第6章に示すように、大気雰囲気下における熱伝導率の測定結果に気孔内の空気による比較的大きな影響が認められ、真空中よりも大きな熱伝導率を示す現象がみられた。繊維質多孔体の断熱材等とは異なり気孔率が10%程度と小さく、固相部分が多い溶射セラミックスの熱伝導率に対する空気相の伝導の寄与が大きい点に関しては報告例もほとんどなく、不明な面もあるが、空気の分子の平均自由行程に相当する大きさを持つ小気孔が数多く存在するためと考えられる。ここでは第6章に示す溶射セラミックスに関する真空中と大気中における測定値の関係を適用して、真空中における熱伝導率の測定値を基にして大気雰囲気下における気孔内の空気の影響を含めた有効熱伝導度を求め、これを以下の計算に使用した。第5.1図～第5.3図に本研究で使用した3種類の溶射セラミックスに関する溶射した直後の状態における大気雰囲気下における見か

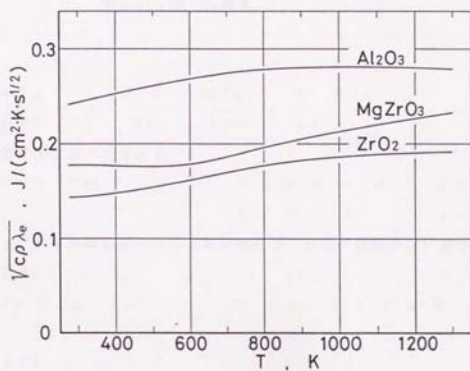
けの熱拡散率 a_e 、有効熱伝導度 λ_e および $\sqrt{c\rho\lambda_e}$ を示す。比熱およびかさ密度については雰囲気気体の圧力の影響はきわめて小さく、第6章に示す測定値を用いた。



第5.1図 溶射セラミックスの大気雰囲気下における見かけ熱拡散率



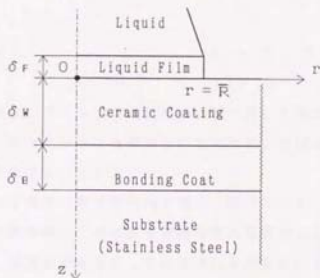
第5. 2図 溶射セラミックスの大気雰囲気気下における有効熱伝導度



第5. 3図 溶射セラミックスの大気雰囲気気下における $\sqrt{cp\lambda_e}$

5. 4 基礎方程式と数値解法

加熱固体面は、セラミックス被覆層、結合材層、ステンレス鋼製基盤材の3層からなる。第5. 4図に示した座標系を用いると基礎方程式は、たとえばセラミックス被覆層に関しては第(5-1)式で表される。



第5. 4図 座標系

$$\frac{\partial^2 T_w}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial T_w}{\partial r} + \frac{\partial^2 T_w}{\partial z^2} = \frac{1}{a_w} \cdot \frac{\partial T_w}{\partial t} \quad \dots (5-1)$$

初期加熱面温度は一定である。

$$\begin{aligned} T_w &= T_{w0} & 0 \leq r < \infty, 0 \leq z \leq \delta_w \\ t &= 0 & \dots (5-2) \end{aligned}$$

セラミックス被覆層表面における境界条件は、表面に液膜がない場合には次式のようにする。

$$\begin{aligned} T_w &= T_b & z = 0, 0 \leq r \leq \bar{R} \\ t &> 0 & \dots (5-3) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial T_w}{\partial z} &= 0 & z = 0, \bar{R} < r \\ t &> 0 & \dots (5-4) \end{aligned}$$

また、液膜の熱伝導を考慮する場合は次式のような境界条件とした。

$$\lambda_w \cdot \frac{\partial T_w}{\partial z} = - \frac{\lambda_f}{\delta_f} \cdot (T_w - T_b)$$

$$z = 0, 0 \leq r \leq \bar{R}$$

$$t > 0 \quad \dots (5-5)$$

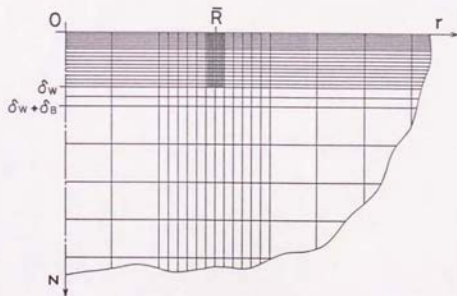
$$\frac{\partial T_w}{\partial z} = 0$$

$$z = 0, \bar{R} < r$$

$$t > 0 \quad \dots (5-6)$$

結合材層およびステンレス鋼製の基盤材に対しても同様な基礎方程式、境界条件が得られる。セラミックス被覆層と結合材層および結合材層と基盤材間の接触面における熱抵抗はないとした。

数値解法は通常の前進差分法で行い、第(5-1)式～第(5-6)式に示したような円筒座標系二次元非定常熱伝導方程式および境界条件を差分式に表すことにより、固液接触面を介して伝達される熱量の計算を行った。計算に使用した格子分割の例を第5.5図に示す。円筒座標に沿い、厚さ方向では被覆層内の表面近傍の領域で、半径方向では固液接触面半径 $R = \bar{R}$ 付近で密になるように考慮して分割している。 z 方向と r 方向の格子数は最高 50×60 程度とした。セラミックス被覆層厚さ δ_w 、固液接触面半径 \bar{R} を与え、各層を構成する材質の所定



第5.5図 格子分割図

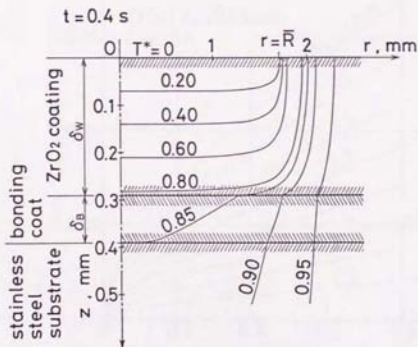
の加熱面温度における熱拡散率、比熱、熱伝導率を用いて温度場の計算を行った。
結合材層の厚さは0.1 mmで一定としている。

5. 5 計算結果の概要

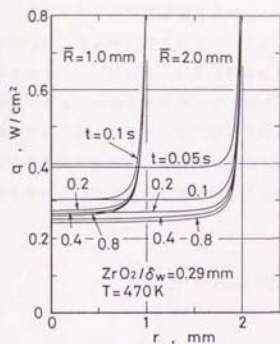
5. 5. 1 被覆層内温度分布、熱流束分布、積算伝導熱量の計算例

以下に、 $t = 0$ において $T^* = 1$ から $T^* = 0$ の表面温度変化を与えた場合の計算例を示す。一例として $\delta_w = 0.29$ mm、 $\bar{R} = 1.7$ mmの場合に得られたジルコニア被覆層内の温度分布を第5. 6図に示す。 $r = \bar{R}$ 近傍を除く領域では一次元温度分布に近い分布となっている。同じ被覆層厚さで、固液接触面半径が $\bar{R} = 1$ mmと $\bar{R} = 2$ mmの場合について、各経過時間における熱流束分布の計算例を第5. 7図に示す。いずれの場合にも、 $r = \bar{R}$ 近傍の熱流束が非常に高くなっていることがわかる。また、接触面の大きさが小さい場合には、核沸騰状蒸発領域における液粒の寿命に相当するような短い時間範囲内でも、熱流束に二次元性の影響が現れている。

第5. 8図は、固液接触面を通して時刻 $t = 0$ から $t = t$ までに伝達されるの積算伝熱量 Q_{01} の計算結果の一例である。図中、 Q_{01} は $t = 0$ において $T^* = 1$ から $T^* = 0$ の表面温度変化に対して伝達される熱量を表している。第5. 7図は被覆層表面の固液接触面温度を $T^* = 0$ に保つ場合の計算例であるが、被覆層表面に液膜が存在する場合にも同様な曲線が得られる。このような曲線を使用し

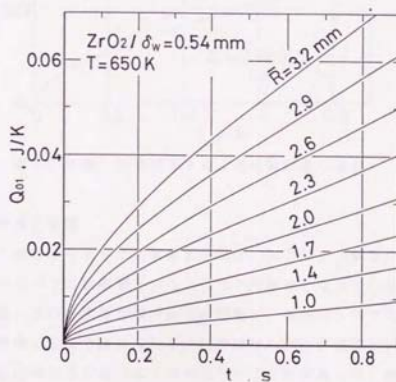


第5. 6図 被覆層内温度分布



第5.7図 熱流束分布

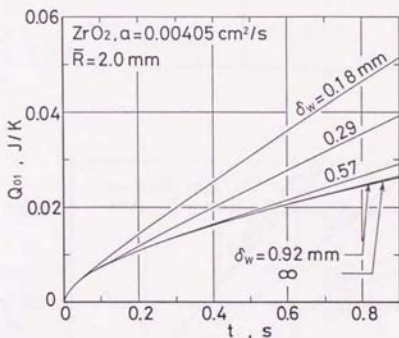
て、液粒の種類、大きさにより決まる加熱面から液粒への伝達熱量 Q_{01} および実測された固液接触面直径 \bar{r} から液粒の寿命が求められる。



第5.8図 固液接触面を通して伝達される積算熱量

5. 5. 2 被覆層厚さによる伝熱量の変化

一定の大きさの固液接触面積を通して伝達される積算伝熱量の被覆層厚さによる変化を、固液接触面温度を $T^* = 0$ ($t > 0$) に保つ場合について計算した結果を第5. 9図に示す。被覆層厚さの値は第4章の実験に用いた加熱面の被覆層厚さである。核沸騰状蒸発領域における液粒の寿命の範囲内の時間では、被覆層厚さ $\delta_w \geq 0.57$ mm で伝熱量がほぼ一致している。これは、固液接触面の大きさが実験で観察された範囲で異なる場合についても全く同様であった。これは、第4章に示した一次元計算結果による結果とも一致している。



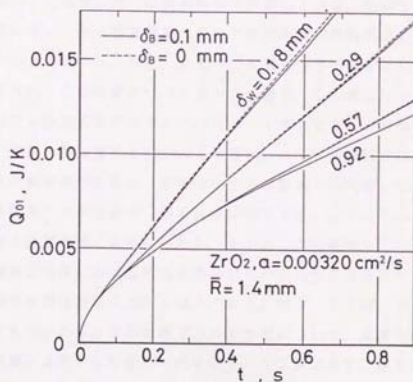
第5. 9図 被覆層厚さによる積算熱量の変化

5. 5. 3 結合材層の影響

本研究で使用した溶射セラミックス被覆加熱面は、ステンレス鋼製の基盤材、結合材層そしてセラミックス被覆層というような3層構造となっている。結合材層はNi-A1-Mo系の金属複合体粉末の溶射層で、基盤材とセラミックス層との良好な密着性を得る目的で設けられる。結合材層の熱物性値についても加熱面材質の熱物性値と同様に方形波パルス加熱法⁽⁴⁰⁾により実測した。結果の一例を第5. 1表に示しているが、たとえば熱伝導率は、第6章に示すステンレス鋼

第5. 1表 結合材層の熱物性値 (温度293K)

Thermal Diffusivity a cm ² /s	0. 0286
Specific Heat c J/(g·K)	0. 481
Thermal Conductivity λ W/(cm·K)	0. 0946
$\sqrt{c\rho\lambda}$ J/(cm ² ·K·s ^{1/2})	0. 560



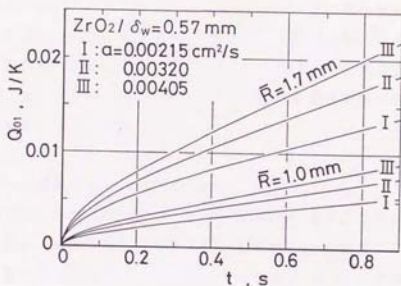
第5. 10図 結合材層の影響

の場合の約 $1/1.5$ 程度と比較的低値を示す。

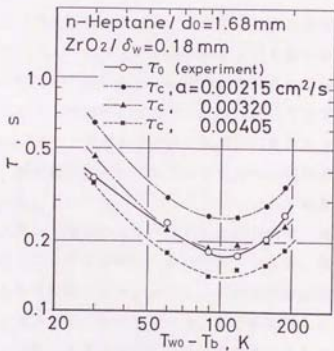
結合材層の有無による伝熱量の相違を第5.10図に示す。第5.10図も被覆層表面の固液接触面温度を $T^* = 0$ ($t > 0$) に保つ場合の計算例である。被覆層厚さが薄い場合ほど、また、時間が長くなるほど結合材層の影響が現れる。しかし結合材層の有無による相違は被覆層が薄い $\delta_w = 0.18$ mm の場合においても1.2%程度である ($t = 0.5$ s)。第5章に示す計算上では結合材層の厚さは一律 $\delta_B = 0.1$ mm としている。実際に実験に使用された加熱固体面試料の結合材層の厚さは $\delta_B = 0.1 \sim 0.2$ mm 程度で、試料により異なるがこの影響は小さいことがわかる。

5.5.4 被覆層の熱拡散率の影響

固液接触面を介して伝達される積算熱量に対する熱物性値の影響を表す例として、異なる熱拡散率をもつ被覆層について計算された結果の一部を第5.11図に示す。被覆層表面の固液接触面温度を $T^* = 0$ ($t > 0$) に保つ場合の計算例である。比熱および密度は同一の値を用いて計算している。溶射セラミックスでは、特に室温に近い、低い温度領域においては試料毎に熱拡散率の測定値に比較的大きなばらつきが見られ、また、大気中では真空中での測定されたものとは異なる値を示すため、この影響について調べた。第5.11図にはジルコニア被覆層の常温における熱拡散率が示されているが、IとIIはそれぞれ真空中と空気中における同一試料の熱拡散率を示す。IIとIIIは、いずれも空気中における異なる試料についての測定値であるが、前者は全ての測定値の平均値よりやや低い値であるが、後者は全ての測定値中、最も大きい値である。ここに示した熱拡散率の差は、被覆層の温度が高くなるにしたがって小さくなる傾向を示し、必ずしも核沸騰状蒸発領域の温度における熱拡散率のばらつきの大きさを示すものではないが、熱拡散率の影響は非常に大きく現れている。第5.11図に示したのと同じ熱物性値をもつジルコニアが被覆された加熱面について、実際に液粒の寿命を計算し、実測値と比較した結果の一例を第5.12図に示す。第5.12図は、 $\delta_w = 0.18$ mm のジルコニアが被覆された加熱面上で n -ヘプタンが蒸発する場合の核沸騰状蒸発領域における寿命曲線で、実測値は τ_o 、計算値は τ_c で示している。計算値は、被覆層表面の固液接触面温度が液粒の沸点 T_b に保たれ



第5. 1 1 図 固液接触面における積算熱量に対する熱拡散率の影響

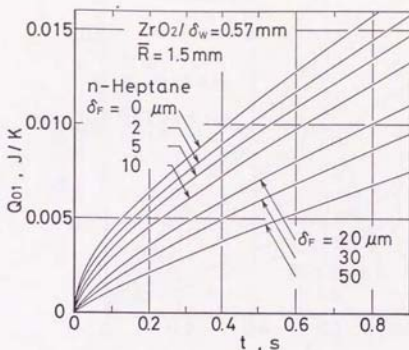


第5. 1 2 図 寿命の計算結果に対する熱拡散率の影響

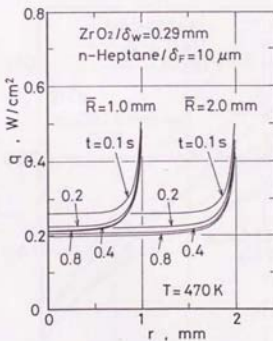
る ($t > 0$) と仮定した場合の計算例である。寿命の計算には、第5. 12図に示す寿命の測定値が得られた個々の液粒が蒸発する場合について実測された固液接触面直径 \bar{D} および初期液粒直径 d_0 を使用している。熱拡散率が大きく異なる場合でも加熱面温度に対する寿命の計算値 τ_c の変化の傾向は実測値と良く一致している。熱拡散率が、 $a = 0.00320 \text{ cm}^2/\text{s}$ の場合には計算された寿命が実測値と良く一致しているが、最も大きな熱拡散率を示す場合には最大蒸発率点付近で約20%短い値となっている。

5. 5. 5 固液接触面上の液膜の影響

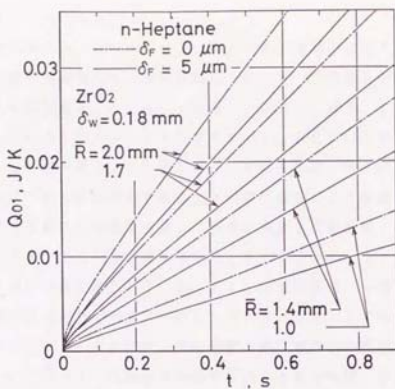
固液接触面上に半径 \bar{R} 、厚さ δ_f の薄い液膜が存在し、この液膜層を介して加熱面からの熱伝達が行われるとした場合の伝熱量の計算結果の一例を第5. 13図に示す。第5. 13図は、 $\delta_w = 0.57 \text{ mm}$ のジルコニアが被覆されている加熱面に、 $\delta_f = 0 \sim 50 \mu\text{m}$ の範囲の厚さの n -ヘプタンの液膜が存在する場合の積算伝熱量の時間による変化を示している。液膜は薄く、液膜内の温度分布は直線状になるとして計算している。液膜の熱伝導率としては沸点における値を用いた。固液接触面半径の大きさは $\bar{R} = 1.5 \text{ mm}$ としているが、これは n -ヘプタンの場合の最大蒸発率点付近の温度で蒸発する場合に測定される値である。液膜の熱伝導率がセラミックス被覆層の熱伝導率よりも低いため、固液接触面に液膜が存在する場合には熱抵抗となり、伝熱量が制限される様子がわかる。液膜の厚さ δ_f がセラミックス被覆加熱面の表面粗さに相当する程度の範囲内でも伝熱量の減少が大きい。また、液膜厚さが薄い範囲での変化が大きくなっている。第5. 14図には、固液接触面に液膜が存在する場合の固液接触面半径方向の熱流束分布を示している。 $\delta_w = 0.29 \text{ mm}$ のジルコニア被覆加熱面に、 $\delta_f = 10 \mu\text{m}$ の n -ヘプタンの液膜が存在する場合の計算例で、第5. 7図に示した液膜がない場合とセラミックス被覆層の条件は同じである。液膜が熱抵抗となり全体的に熱流束の大きさが低くなるとともに、固液接触面の周囲 $r = \bar{R}$ に近い部分の熱流束が大きく低下しているのがわかる。固液接触面上に存在する薄い液膜の伝熱抵抗により、液膜を考えない場合に比べて液粒の寿命に相当する時間範囲で加熱面からの伝導熱量が減少する割合は、固液の接触面の大きさが異なる場合(第5. 15図)でも、セラミックス被覆層厚さが異なる場合(第5. 16図)



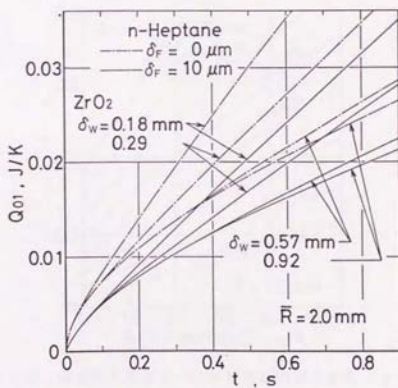
第5. 13 図 液膜厚さによる積算熱量の変化



第5. 14 図 固液接触面に液膜が存在する場合の熱流束分布



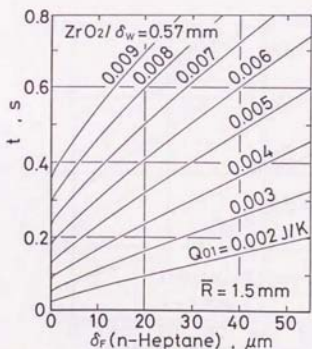
第5. 15 図 固液接触面の大きさが異なる場合の液膜の影響



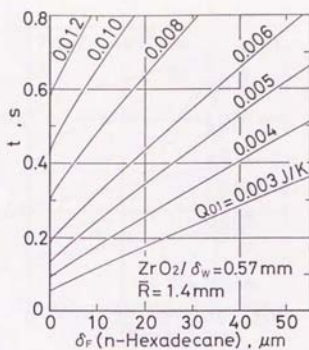
第5. 16 図 被覆層厚さが異なる場合の液膜の影響

でも同様に大きくなっている。

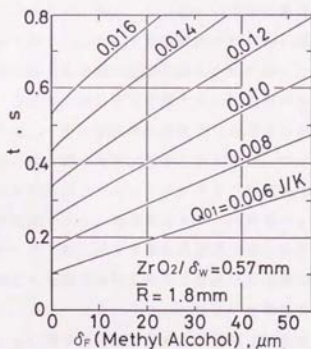
第5. 13図に示した、*n*-ヘプタンの場合の各液膜厚さに対する積算熱量の時間変化を表す曲線を使用して、固液接触面を通して一定熱量を伝達するのに要する時間の変化を液膜厚さ δ_F に対して整理した結果を、第5. 17図に示す。同様にして、*n*-ヘキサデカン、メチルアルコール、水について得られた結果をそれぞれ第5. 18図～第5. 20図に示す。それぞれ同一厚さのジルコニア被覆層をもつ場合についての計算例であるが、液粒の種類により核沸騰状蒸発領域が現れる加熱面温度範囲の相違を考慮し、計算に使用した被覆層の熱物性値は*n*-ヘプタン、メチルアルコールでは470 K、水で650 K、*n*-ヘキサデカンでは750 Kにおける測定値としている。また、固液接触面の半径 \bar{R} はそれぞれの液粒が最大蒸発率点付近で示す大きさとしている。第5. 17図と第5. 18図の*n*-ヘプタンと*n*-ヘキサデカンでは液膜の熱伝導率が同程度の大きさであり、液膜厚さ δ_F に対する一定熱量を供給するのに必要な時間、すなわち液粒の寿命の変化はほぼ一致する傾向を示している。これに対し、メチルアルコールの熱伝導率はやや高いため、第5. 19図では曲線の傾斜が小さく、液膜の影響割



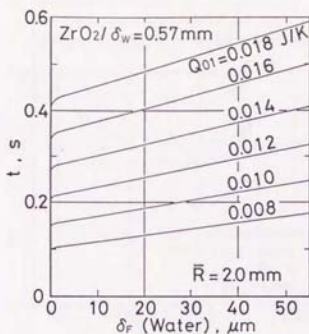
第5. 17図 液膜厚さによる一定熱量供給時間の変化 (*n*-ヘプタン)



第 5. 18 図 液膜厚さによる一定熱量供給時間の変化
(n-ヘキサデカン)



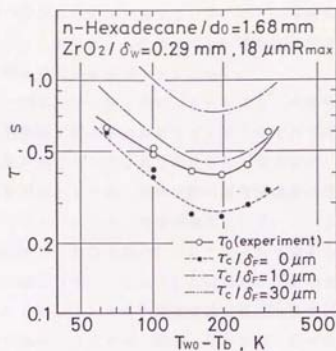
第 5. 19 図 液膜厚さによる一定熱量供給時間の変化
(メチルアルコール)



第5. 20図 液膜厚さによる一定熱量供給時間の変化
(水)

合が小さくなっている。さらに、第5. 20図に示す水の場合には、熱伝導率がメチルアルコールよりも高くジルコニア被覆層のそれに近い値であるため、固液接触面を介する熱伝達に対する液膜の影響は最も小さくなっている。

固液接触面を形成する液膜の熱抵抗を考慮すると加熱面からの伝熱量が減少して液粒に寿命に影響する。一定の液膜厚さを仮定した場合の寿命の計算結果と実測値との比較例を第5. 21図に示す。第5. 21図は、 $\delta_w = 0.29$ mmのジルコニアが被覆された加熱面上でn-ヘキサデカンが蒸発する場合の核沸騰状蒸発領域における寿命曲線であり、実測値は τ_o 、計算値は τ_c で示している。寿命の計算には、第5. 21図に示す寿命の測定値が得られた個々の液粒が蒸発する場合について実測された固液接触面直径 \bar{D} および初期液粒直径 d_o を使用している。液膜厚さが $\delta_f = 0, 10, 30 \mu\text{m}$ についての寿命の計算結果を示しているが、 $\delta_f = 0 \mu\text{m}$ の場合に対する寿命の計算値は実測値よりも小さくなっているが、 $\delta_f = 10 \mu\text{m}$ の場合には寿命の計算値が大きくなり、実測値よりも大きくなっている。n-ヘキサデカンの場合には、液膜の熱伝導率が低いため液



第5. 21図 寿命の計算結果に対する液膜厚さの影響

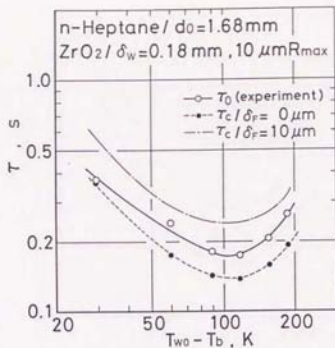
較への熱伝達に対しては大きな熱抵抗となり、寿命は液膜厚さに強く依存している状況がわかる。

5. 6 溶射セラミックスの被覆層厚さが異なる場合の液粒の寿命

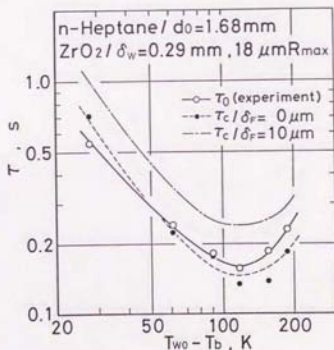
第4章の実験で使用した厚さが異なるジルコニア被覆層を有する加熱面に関する実験結果に対して、加熱面からの過剰的な伝導熱量を計算し核沸騰状蒸発領域における液粒の寿命を求めた結果を以下に示す。

第5. 22図～第5. 25図は液粒がn-ヘプタンの場合の計算結果である。計算に使用した加熱面材質の熱物性値は470Kにおける実測値である。各図中には、高速度撮影写真から測定された液粒寿命の実測値 τ_0 と計算値 τ_c を示している。寿命の計算値としては、蒸発過程の固液接触面の温度が沸点に保持される場合($\delta_f = 0 \mu\text{m}$)に加え、固液接触面上に $\delta_f = 10 \mu\text{m}$ の液膜が存在し、これを介して熱伝達が行われる場合について得られた結果も併せて示している。液膜が存在しない場合($\delta_f = 0 \mu\text{m}$)に計算された結果を比較すると、第5. 22図に示す $\delta_w = 0.18 \text{ mm}$ の場合には計算値は実測値よりも平均で約20%程短くなっているが、この差は、第5. 23図の $\delta_w = 0.29 \text{ mm}$ ではより小さく、さらに、第5. 23図および第5. 25図に示す $\delta_w = 0.57 \text{ mm}$ および $\delta_w = 0.92 \text{ mm}$ の場合にはほぼ一致していることがわかる。 $\delta_f = 10 \mu\text{m}$ の場合の寿命の計算値はいずれも実測値よりも大きい値を与えている。

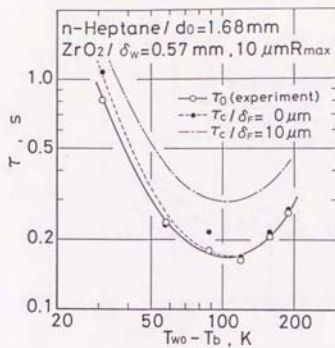
同じジルコニア被覆層をもつ加熱面に対する、液粒が水の場合の寿命の計算結果を第5. 26図～第5. 29図に示す。水の場合には核沸騰状蒸発領域の温度範囲がより高温側に位置するので、650Kにおける加熱面の熱物性値を使用して寿命の計算を行っている。n-ヘプタンの場合と同様に $\delta_f = 0, 10, 30 \mu\text{m}$ についての寿命の計算結果と実測値とを示している。 $\delta_f = 0 \mu\text{m}$ の場合に対する寿命の計算値と実測値を比較すると、第5. 26図の $\delta_w = 0.18 \text{ mm}$ の場合には、寿命の実測値に比較的近い計算結果が得られているが、被覆層がより厚い第5. 27図の $\delta_w = 0.29 \text{ mm}$ の場合には計算値の方がより大きくなっている。さらに、第5. 28図および第5. 29図の $\delta_w = 0.57 \text{ mm}$ と $\delta_w = 0.92 \text{ mm}$ では寿命の計算値は実測値の約2倍の大きさになっていることがわかる。また、n-ヘプタンでも同様であるが、寿命の実測値と計算値とが一致しない場合でもその差は加熱面温度が異なっても一様であり、計算による寿命の値と実測値との比はほぼ一定になっている。



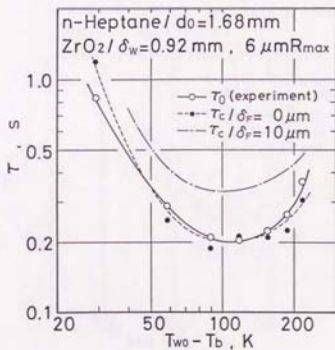
第5.22図 n-ヘプタンの寿命の実測値と計算値の比較
 (ジルコニア被覆層厚さ $\delta_w = 0.18\text{ mm}$)



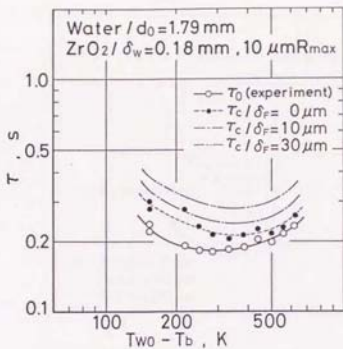
第5.23図 n-ヘプタンの寿命の実測値と計算値の比較
 (ジルコニア被覆層厚さ $\delta_w = 0.29\text{ mm}$)



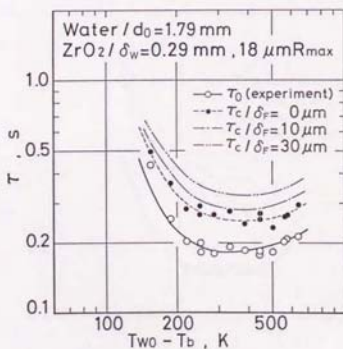
第5.24図 n-ヘプタンの寿命の実測値と計算値の比較
 (ジルコニア被覆層厚さ $\delta_w = 0.57$ mm)



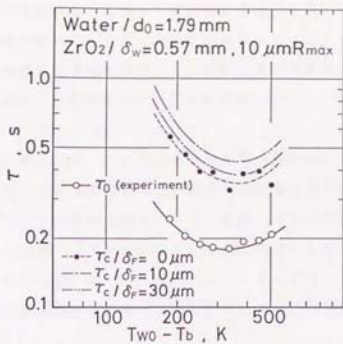
第5.25図 n-ヘプタンの寿命の実測値と計算値の比較
 (ジルコニア被覆層厚さ $\delta_w = 0.92$ mm)



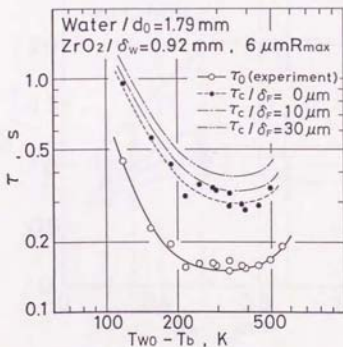
第5. 26図 水の寿命の実測値と計算値の比較
 (ジルコニア被覆層厚さ $\delta_w = 0.18$ mm)



第5. 27図 水の寿命の実測値と計算値の比較
 (ジルコニア被覆層厚さ $\delta_w = 0.29$ mm)



第 5. 28 図 水の寿命の実測値と計算値の比較
 (ジルコニア被覆層厚さ $\delta_w = 0.57$ mm)

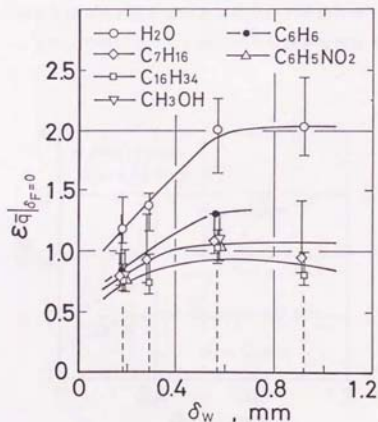


第 5. 29 図 水の寿命の実測値と計算値の比較
 (ジルコニア被覆層厚さ $\delta_w = 0.92$ mm)

n-ヘプタンと水とでは、寿命の実測値と計算値との関係が多少異なっているが、セラミックス被覆層の厚さに依存して変化する傾向が同じように見られる。そこで、この被覆層厚さに対し変化する状況を明らかにするため、各加熱面温度に対する寿命の実測値と計算値を使用して、液粒の寿命期間内に伝達される時間平均熱流束の実測値 \bar{q}_0 と計算値 \bar{q}_c の比 $\varepsilon \bar{q}$ を求めた。

$$\varepsilon \bar{q} = \bar{q}_0 / \bar{q}_c \quad \dots (5-7)$$

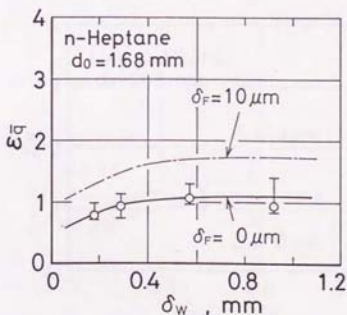
そして、第5.22図～第5.29図に示された寿命曲線毎に熱流束比 $\varepsilon \bar{q}$ の平均値を求め、これを、被覆層厚さについて整理した結果を第5.30図に示す。図中には $\varepsilon \bar{q}$ のばらつき範囲も併せて示す。なお、ここで使用した寿命の計算値は液膜が存在しない場合($\delta_f = 0 \mu\text{m}$)の値である。また、第5.30図には、n-ヘプタンと水の他、n-ヘキサデカン、メチルアルコール、ベンゼン、ニトロベンゼンと被覆層厚さが異なる4種類のジルコニア加熱面の組み合わせに



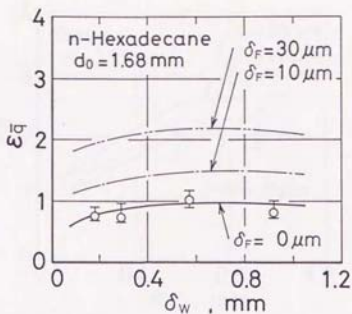
第5.30図 ジルコニア被覆層厚さによる時間平均熱流束の実測値と計算値の比の変化 (液膜厚さ $\delta_f = 0$)

ついて、同様にして得られた結果も併せて示している。第5. 30図では、液粒の種類によらず、被覆層厚さ $\delta_w = 0.18\text{ mm}$ の場合に実測と計算による熱流束の比 ξ_q の値が最も低く、被覆層厚さが薄い範囲では δ_w が大きくなるとともに ξ_q が上昇するというような ξ_q の値が δ_w に依存する傾向もみられるが、被覆層厚さが厚い $\delta_w = 0.57\text{ mm}$ と $\delta_w = 0.92\text{ mm}$ の場合にはほとんど差がみられない。しかし、液粒の種類により ξ_q の値が異なり、また、特に水の場合には ξ_q が他に比べ大きく δ_w に依存する傾向も強く表れている。

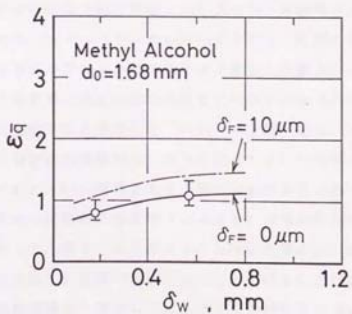
第5. 30図に示した ξ_q の値は、加熱面上に液膜が存在せず固液接触面の温度が寿命の全期間にわたり液粒の沸点に保たれる場合について得られたものである。これに対して固液接触面上に一定厚さの液膜が存在すると仮定した場合に、*n*-ヘプタン、*n*-ヘキサデカン、メチルアルコール、水と、厚さが異なるジルコニア被覆加熱面の組み合わせから同様にして得られた ξ_q の値を各液粒試料毎に第5. 31図～第5. 34図に示す。液膜が存在する場合には熱抵抗となるため、寿命期間内における時間平均熱流束の計算値 q_c が液膜を考えない場合に比べて小さくなり、したがって第(5-7)式による時間平均熱流束の実測値と計



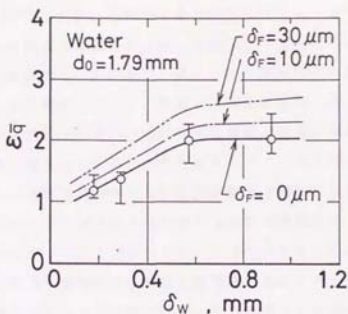
第5. 31図 ジルコニア被覆層厚さによる熱流束比の変化
(*n*-ヘプタン)



第5. 32図 ジルコニア被覆層厚さによる熱流束比の変化
 (n-ヘキサデカン)



第5. 33図 ジルコニア被覆層厚さによる熱流束比の変化
 (メチルアルコール)



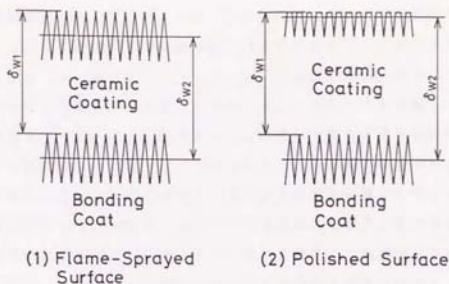
第5.34図 ジルコニア被覆層厚さによる熱流束比の変化
(水)

算値の比を示す $\epsilon\alpha$ の値は大きくなる。ここで液膜の存在を考慮した場合に $\epsilon\alpha$ の値が大きくなる割合は液膜の熱伝導率により異なり、液膜厚さが同じであるとすると、熱伝導率が低いn-ヘプタンやn-ヘキサデカンの場合には $\epsilon\alpha$ の増加割合が大きく、熱伝導率が最も高い値を示す水の場合には変化が小さい。一例として、セラミックス被覆層の表面粗さの大きさに相当する程度の値である $\delta_F = 10\mu\text{m}$ の液膜厚さを仮定する場合には、第5.31図~第5.33図に示しているいずれの液粒の場合にも液膜がない場合に比べて $\epsilon\alpha$ の値が大きく上昇しているが、各液粒の δ_w と $\epsilon\alpha$ の関係を表す曲線には大きな差はみられない。また、第5.34図に示す水の場合には液膜厚さによる $\epsilon\alpha$ の増加割合が他の液粒に比べて小さい。したがって、第5.30図に示した液膜を考えない場合にみられたような液粒の種類による $\epsilon\alpha$ の値の差が小さくなっていることがわかる。これは、寿命期間内の固液接触面積を一定としている点や接触面温度についての仮定などに問題が残っているが、セラミックス被覆層を有する加熱面表面に一定厚さの液膜層を仮定してこの液膜の伝熱抵抗を考慮することにより、液粒の種類毎に異な

る現象をある程度整理して表すことができることを示している。

なお、水の場合には液膜の熱抵抗を考慮しても他の液粒試料の場合に比べ $\varepsilon \alpha$ の値が大きい傾向が見られる。水滴が低熱伝導性のセラミックスが被覆された加熱面上で核沸騰状に蒸発する場合には他の液粒に比べ初期加熱面温度が非常に高い状態で加熱面に接触する。このため、滴下された液粒の全てが接触面を介して伝達される熱量により相変化せずに、最初に加熱面と接触し過熱された部分の急激な沸騰により、加熱面上の液の一部が非常に微細な液滴に微粒化された液相の状態では接触面を離れ蒸発しているとも推定される。このような現象が生じている場合には、観察された固液接触面における熱移動量を過大に見積もっていることになり、接触面を介して伝達される熱流束の大きさは実験結果から得られたものよりも小さく、したがってここで示した $\varepsilon \alpha$ の値もより小さくなる。また、蒸発潜熱が大きい水が蒸発する場合には接触面温度降下量が大きく、これに伴い接触面の大きさが非常に大きくなり時間の経過とともに拡大する傾向をも示す。ここでは接触面の大きさとしては時間平均の接触面積で一定としており、接触面の時間変化の影響は考慮されていない。実際の現象における接触面温度変化との関連で、最も拡大した時の接触面の大きさの影響が大きいような状況では、測定される熱流束の値は平均接触面積を用いる場合よりも低く、 $\varepsilon \alpha$ の値も小さくなる。水の場合の $\varepsilon \alpha$ の値が大きい傾向を示すのは、このような接触面における実際蒸発量や接触面の大きさの取り方などの影響によるものと推定されるが詳細は明かでない。

第5. 30図～第5. 34図において示した $\varepsilon \alpha$ の値が被覆層厚さが薄い範囲の $\delta w = 0.18 \text{ mm}$ あるいは $\delta w = 0.29 \text{ mm}$ である場合に小さくなっている原因の一つとして、被覆層厚さの測定誤差による影響が考えられる。本研究で使用した溶射セラミックス被覆加熱面は、 $40 \mu\text{m Rmax}$ 程度の粗さをもつ結合材層の上に溶射法によりジルコニア層を設けたものであり、通常、被覆層表面も $30 \sim 40 \mu\text{m Rmax}$ 程度の粗面となる。このような被覆層表面を研磨すると、第4. 4図の粗さ曲線に示したように表面の突起が少ない平坦な形状となる。溶射面と研磨面における表面粗さの幾何学的な形状の相違を概念的に第5. 35図に示す。上面および下面が平坦でないセラミックス被覆層の厚さはその断面曲線を計測することにより第5. 35図に示す δw_2 で表すのが適当と考えられるが、



第5.35図 表面粗さの幾何学的形状と被覆層厚さの関係

本研究において粗さの大きさに比べ十分に大きなボール付き測定子をもつダイヤルゲージにより測定された被覆層厚さは δw_1 である。通常の溶射による被覆層では δw_2 と δw_1 はほぼ一致する。被覆層表面を研磨した場合には第5.35図にみられるように δw_2 と δw_1 に不一致が生じることになり、実際の被覆層厚さは測定値よりもわずかに大きくなる。被覆層厚さが異なる加熱面試料として実験に使用したセラミックス被覆加熱面の表面は研磨面であるので、第5.35図の関係および結合材層表面、研磨前の被覆層表面の粗さの大きさより、実際の被覆層の厚さは測定されている値よりも $20\mu\text{m}$ 程度厚くなっていると考えられる。このような被覆層厚さの差が加熱面から伝達される伝導熱量に影響する割合は被覆層厚さが薄い場合ほど大きい。一例として、液膜を考えない場合の被覆層厚さによる加熱面からの積算の伝熱量の時間変化を表す第5.9図によると、核沸騰状蒸発領域における寿命に相当する時間 $t = 0.2 \sim 0.5$ s程度の範囲で先に示した厚さの差 $20\mu\text{m}$ により、被覆層厚さ $\delta w = 0.18\text{mm}$ の場合には同じ伝熱量が得られる時間が約4%、同様に被覆層厚さ $\delta w = 0.29\text{mm}$ の場合は1~2%長くなるが、 $\delta w = 0.57\text{mm}$ と $\delta w = 0.92\text{mm}$ では変化がないことがわかる。これを用いると、被覆層厚さ $\delta w = 0.18\text{mm}$ と表示されている実際の被覆層厚さは $\delta w = 0.20\text{mm}$ であり、 $\delta w = 0.18\text{mm}$ の場合に比べ時

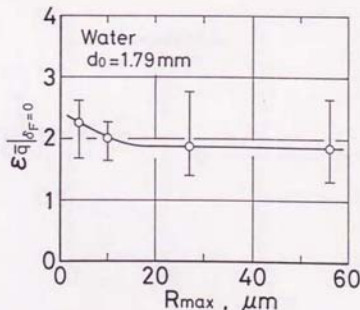
間平均熱流束の計算値が小さく、 $\varepsilon \eta$ の値は約 4% 高い値となる。実際のセラミックス被覆層表面の粗さの形状は第 5, 35 図に示したような規則的なものとは異なるが、このように実際の被覆層厚さが測定値に比べてわずかに大きいことを考慮すると第 5, 30 図～第 5, 34 図において被覆層が薄い場合の $\varepsilon \eta$ の値がわずかに大きくなる傾向を与えることがわかる。しかしこれを考慮しても被覆層が薄い範囲において $\varepsilon \eta$ の値が被覆層厚さに依存して変化する傾向は残る。

ここで行った計算はセラミックス加熱面上における現象の概要を知るために行ったものであり必ずしも実際の現象を正確に表すモデルに基づくものではなく、また、計算に使用した熱物性値は同一の溶射過程により製作された溶射ジルコニアが示す平均的な値であり、溶射セラミックスの特性上、加熱面試料毎のばらつきもあり得るが、被覆層厚さの変化に対し一定の傾向を与えているとも考えられる。 $\varepsilon \eta$ の値が 1 よりも大きくなることは、セラミックス被覆加熱面からの実測された見かけの固液接触面の大きさを介して伝達される伝導熱流束に比べ、実際には平均としてより大きな熱流束が液粒に伝達され、液粒の寿命が伝導熱流束により計算される寿命よりも短くなることを示す。また、被覆層の厚さが薄い範囲では厚さが増すとともに $\varepsilon \eta$ が大きくなっている。このような現象が見られるためには、使用したセラミックス被覆層が多孔質であるため、液相や蒸気相で多孔質被覆層の内部の表面に近い部分に浸透して熱伝達が促進される効果などが考えられるが、この点に関しては本研究の範囲では明かでない。

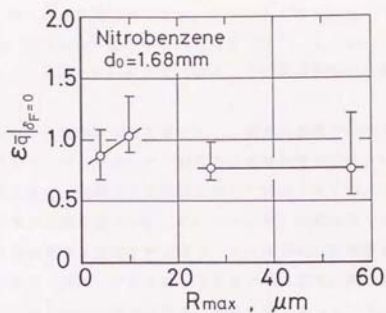
5. 7 溶射セラミックス被覆層の表面粗さが異なる場合の液粒の寿命

第4章の実験に用いた、セラミックス被覆層の材質が同一で表面粗さが異なる加熱面に関する実験結果に基づいて、第5. 30図と同様にして、各加熱面温度に対する寿命の実測値と計算値を使用し、液粒の寿命期間内に伝達される熱流束の実測値 \bar{q}_0 と計算値 \bar{q}_c の比 ε_q を求め、これを被覆層表面粗さについて整理した結果を第5. 36図～第5. 41図に示す。被覆層表面粗さはそれぞれ4、10、27、56 μm R_{max} の場合について示す。セラミックス被覆層の厚さが約 $\delta_f = 0.55\text{mm}$ であり、図に示す ε_q の値には第5. 30図で見られたような被覆層厚さの効果が含まれているので、ここでは相対的な比較を行うこととし、 ε_q を求めるために使用した寿命の計算値は液膜のない場合($\delta_f = 0\mu\text{m}$)の値としている。なお、被覆層厚さが全て同一であるので、計算による液粒の寿命、時間平均熱流束は第4章における固液接触面積の実測値に依存している。

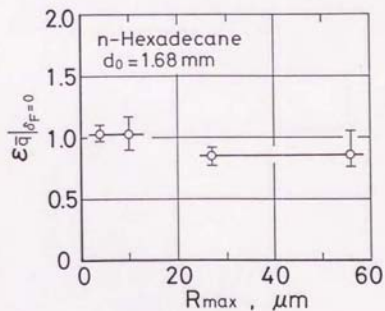
被覆層の表面粗さが液粒に寿命に影響する機構としては、第4章に示した実験で観察された固液接触面に現れる液膜の厚さが表面粗さにより増し、熱抵抗が大きくなって寿命が長くなることが考えられる。この場合には、液膜厚さを考慮



第5. 36図 ジルコニア被覆層の表面粗さによる熱流束比の変化
(水)



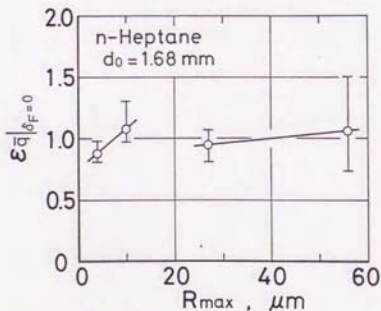
第 5. 37 図 ジルコニア被覆層の表面粗さによる熱流束比の変化
(ニトロベンゼン)



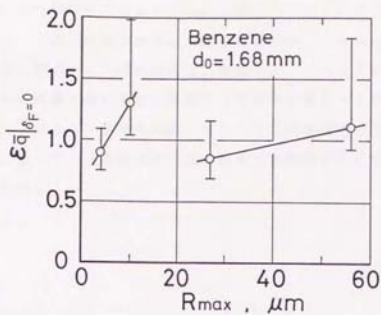
第 5. 38 図 ジルコニア被覆層の表面粗さによる熱流束比の変化
(n-ヘキサデカン)

していない $\delta_F = 0 \mu\text{m}$ の計算では熱流束の値を過大に評価していることになり、粗さが大きく液膜を保持しやすい場合ほど ε_q ($\delta_F = 0 \mu\text{m}$) の値は低くなる。第5. 36図～第5. 38図に示した水、ニトロベンゼン、*n*-ヘキサデカンの結果においては、溶射により仕上げられた $27, 56 \mu\text{m R}_{\text{max}}$ の場合の ε_q は研磨面である $4, 10 \mu\text{m R}_{\text{max}}$ に比べ低く、この液膜厚さの効果を表すものと考えられる。

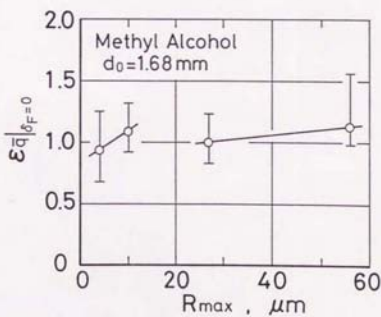
一方、セラミックス被覆層が多孔質であり、蒸発の過程で液が表面近傍の薄い範囲で気孔を通じて内部に浸透して、相対的に被覆層厚さが減少した場合と同じ効果を生ずる考えると、熱流束の計算値は過小に評価されていることになり、液が浸透しやすい条件の場合ほど ε_q ($\delta_F = 0 \mu\text{m}$) の値は高くなる。ここで、実験に使用した各被覆層の構造を考えると、 $4 \mu\text{m R}_{\text{max}}$ の被覆層表面近傍の領域は、他よりも粒度の細かい粉末を用いて溶射されており、同じ研磨による仕上げ面である $10 \mu\text{m R}_{\text{max}}$ の場合に比べ、密な状態となっている。また、 $27, 56 \mu\text{m R}_{\text{max}}$ の溶射面では、後者の方が表面近傍の領域がより粒度の大きい粉末材料が使用されており、その結果表面粗さも大きくなっているが、同時に、より気孔の多い疎な状態となっている。第5. 39図～第5. 41図に示す、*n*-



第5. 39図 ジルコニア被覆層の表面粗さによる熱流束比の変化
(*n*-ヘプタン)



第5.4.0図 ジルコニア被覆層の表面粗さによる熱流束比の変化
(ベンゼン)



第5.4.1図 ジルコニア被覆層の表面粗さによる熱流束比の変化
(メチルアルコール)

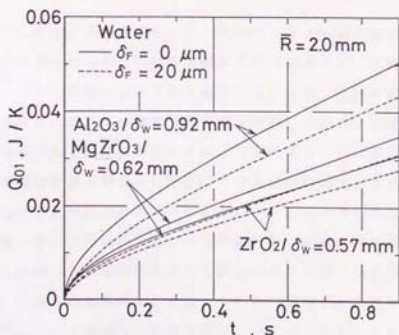
ヘプタン、ベンゼン、メチルアルコールのような粘度が低い液粒試料に関する結果においては、 $4\mu\text{m Rmax}$ よりも疎な $10\mu\text{m Rmax}$ の場合に、また、同様に $27\mu\text{m Rmax}$ よりも疎な $56\mu\text{m Rmax}$ の場合の方が $\epsilon\theta$ の値が大きくなる傾向が現れており、これらは液が表面に浸透する影響を示すものと推定される。

第5.36図～第5.41図の結果は、実際には、このような表面粗さにより液膜厚さが変わる効果と液が表面に浸透する効果等が重なって現れていると考えられる。また、このような挙動が溶射セラミックス被覆層を有する加熱面における液粒の寿命に対して、表面粗さが一定の決まった傾向を示さない原因となっているように思われる。

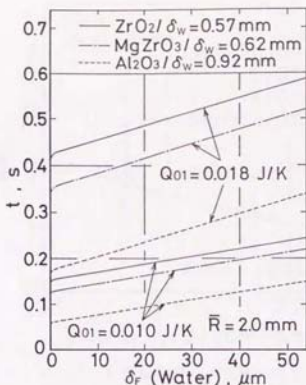
5. 8 溶射セラミックス被覆層の材質が異なる場合の液粒の寿命

第3章および第4章で示した、材質が異なるセラミックス被覆層を有する加熱面から得られた実験結果と、被覆層材質などの熱物性値を使用した加熱面からの伝熱流束の計算より得られる結果の比較を行う。

第5.42図に、被覆層材質が異なる場合について、固液接触面の大きさを通して伝達される積算の熱量の時間による変化を示す。セラミックス被覆層材質の種類は、 Al_2O_3 、 $MgZrO_3$ 、 ZrO_2 、の3種類で、被覆層厚さ、表面粗さはそれぞれ異なっている。液粒は水であり、核沸騰状蒸発領域の温度が高いため、計算には650Kにおける被覆層の熱物性値の実測値を使用した。計算結果は、それぞれ液膜の存在を考えず固液接触面が寿命の期間内では沸点に保たれる場合と一定厚さ $\delta_f = 20\mu m$ の液膜を介して熱伝達が行われる場合について示している。材質が異なる加熱面上に一定厚さの同一種類の液膜が存在する場合には、液膜の熱伝導率が低いことにより熱抵抗となる影響の程度は、被覆層材質の熱伝導率が最も高い Al_2O_3 で大きく、 $MgZrO_3$ 、 ZrO_2 では大きな差はみられないことがわかる。



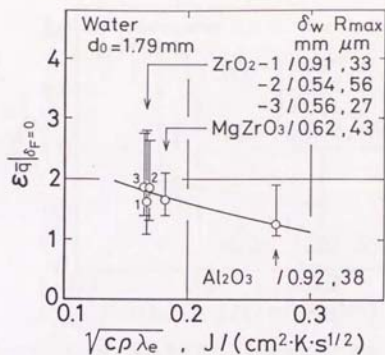
第5.42図 被覆層材質による固液接触面を通して伝達される積算熱量の変化



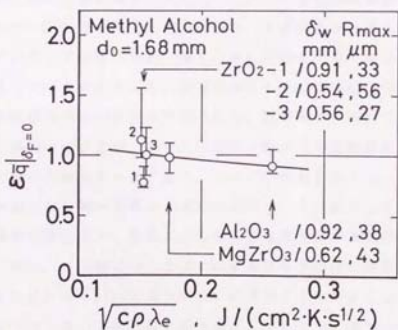
第5.43図 被覆層材質が異なる場合の液膜厚さによる一定熱量供給時間の変化(水)

第5.42図のような計算結果を用いて、所与の大きさの固液接触面を通して一定の熱量を伝達するのに必要な時間の液膜厚さによる変化として整理した結果を第5.43図に示す。液膜の有無による変化が大きい、ほぼ液膜の厚さに比例して時間が長くなる。また、核沸騰状蒸発領域で液粒が蒸発する場合の固液接触面の大きさは伝達される熱流束の大きさにより変化することは既に明らかにしているが、仮に被覆層材質が異なる加熱面における固液接触面の大きさが同じであるとすると、液粒の寿命には非常に大きな差が生ずることがわかる。

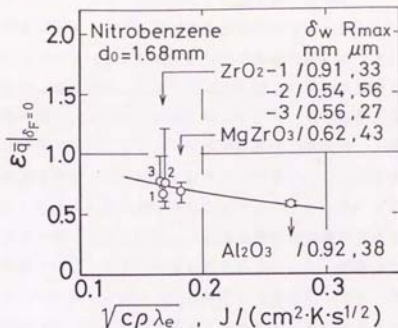
第3章、第4章に示した実験結果および加熱面材質の熱物性値の実測値に基づいて各加熱面温度における実測値に対応する寿命の計算を行い、この結果より液粒の寿命期間内に伝達される熱流束の実測値 q_0 と計算値 q_c の比 ϵ を求め、これを被覆層材質について整理した結果を第5.44図～第5.48図に示す。加熱面材質は便宜的に $\sqrt{c\rho\lambda\sigma}$ で表している。図示したセラミックス被覆層は全



第 5. 4 4 図 被覆層材質による熱流束比の変化
 (水)



第 5. 4 5 図 被覆層材質による熱流束比の変化
 (メチルアルコール)

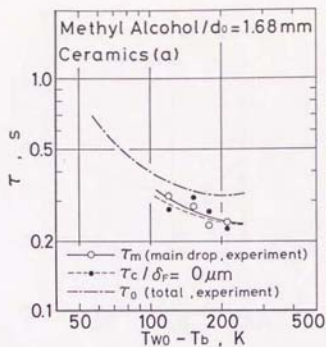


第5.46図 被覆層材質による熱流束比の変化
(ニトロベンゼン)

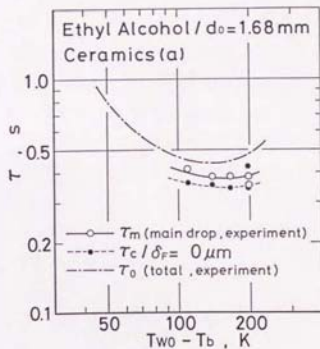
て溶射による面であるが、被覆層厚さおよび表面粗さはそれぞれ異なっているため、ここでは、液膜のない場合 ($\delta_F = 0 \mu\text{m}$) の寿命の計算値を使用して $\varepsilon\alpha$ を求めた。なお、加熱面の熱物性値は、第5.44図および第5.46図の水およびニトロベンゼンでは650K、第5.45図のメチルアルコールでは470Kにおける値を使用して計算した。各図における $\varepsilon\alpha$ の値は、第5.30図で見られたような被覆層厚さの効果を含み、また、液膜厚さを考えていないので液粒の種類により異なっているが、いずれの液粒の場合でも加熱面の熱伝導性が良いほど低くなる同一の傾向を与えており、Al₂O₃で最も低くなっている。ここで、図示した加熱面に対し同一の厚さの液膜が存在し、これを介して液粒への熱伝達が行われる場合を考えると、計算による熱流束は液膜の熱抵抗のため減少するが、この割合は、第5.42図に示したように被覆層材質の熱伝導率が高いほど大きくなる。このため、Al₂O₃の場合の $\varepsilon\alpha$ は図示された値よりも大きくなり、材質による差は小さくなって同程度の値を示すことになる。液膜の伝熱抵抗を考慮すると、材質が異なる被覆層をもつ加熱面における熱流束そして寿命の実測値と計算値が良く対応することがわかる。

5. 9 セラミックス (a) 加熱面における液粒の寿命

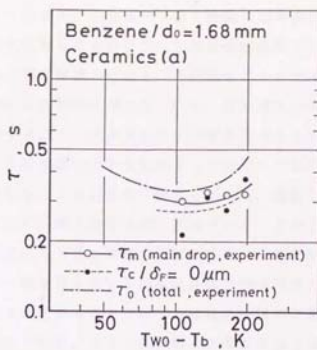
液粒の蒸発挙動が溶射セラミックス被覆加熱面の場合と類似している、第2章で使用したセラミックス (a) 加熱面に対する実験結果に基づき、固液接触面の温度が寿命期間内は液粒の沸点に保たれると仮定した場合の寿命を計算した結果を第5. 47図～第5. 49図に示す。各図中には、寿命曲線上に測定されている寿命 τ_0 (ビデオカメラによる5～10回の測定の平均値)、滴下された主滴の寿命 τ_n (高速度写真からの一滴に対する測定値)、および主滴に寿命に対応する計算値を示している。第2章に示したように、 τ_0 と τ_n とは一致しておらず、 τ_n の方がやや短くなっている。これは核沸騰状に蒸発する過程で主滴から微小な小滴が分離することによる影響と思われる。なお、溶射セラミックスの場合には τ_0 と τ_n は一致していたので特にこれらを区別してはいない。寿命の計算値は、高速度写真による加熱面に接触する直前の液粒の大きさと蒸発過程で観察される固液接触面の大きさに基づいているため、滴下された液粒の一部が液の状態で飛散する場合には定量的な評価はできないが、寿命の計算値はより短くなる傾向となる。第5. 47図～第5. 49図におけるメチルアルコール、エチルアルコール、ベンゼンの寿命の計算値は、いずれの場合にも主滴の寿命に等しい、あるいはやや小さくなっているが、液の一部が蒸発の過程で分離していることを考慮するとより小さくなっていると思われる。測定点も少なく定性的な評価であるが、セラミックス (a) 加熱面の場合にも固液接触面に一定厚さの液膜が存在して熱抵抗となると考えると、寿命の実測値と計算値は良く対応する傾向を与えると推定される。



第5. 47図 メチルアルコールの寿命の実測値と計算値の比較
(セラミックス (a) 加熱面)



第5. 48図 エチルアルコールの寿命の実測値と計算値の比較
(セラミックス (a) 加熱面)



第5. 49図 ベンゼンの寿命の実測値と計算値の比較
(セラミックス (a) 加熱面)

5. 10 第5章のまとめ

溶射セラミックスが被覆されたステンレス鋼製の加熱面に液粒が衝突して蒸発する場合には、最大蒸発率点を含む広い加熱面温度範囲で加熱面との直接接触が維持される核沸騰状蒸発領域が現れる。この領域における液粒の寿命の値について知るため、実験による観察結果に基づいて、蒸発過程の液粒底部に薄い液膜が加熱面表面に密着するように存在するという簡単なモデルを考えた。これを使用して、セラミックス被覆層を有する加熱面から液粒への伝熱量について、円筒座標系二次元の数値計算により定量的に検討を行った。溶射セラミックスの熱物性値については、それが特異な過程を経て形成されることから不明な点が多く、これを実測することにより可能な範囲で正確に定め、実際の計算に使用した。その結果、セラミックス被覆層を有する加熱面表面に一定厚さの液膜層を仮定してこの液膜の伝熱抵抗を考慮することにより、液粒の種類毎に異なる現象を整理して表せる可能性が認められた。また、被覆層の材質が異なる場合についても実測値に良く対応する傾向を与える計算結果が得られた。ここで行った計算は必ずしも実際の現象を正確に表すモデルに基づくものではないが、核沸騰状蒸発領域における液粒への熱伝達に対しては、加熱面表面に密着するように存在し、その大きさが寿命期間中、ほぼ一定である薄い液膜の層が大きく影響することがわかる。また、これに関連して以下に示すような知見が得られた。

- (1) 液粒がセラミックス加熱面あるいはセラミックス被覆層を有する加熱面に衝突して蒸発する場合、液粒底部に存在する薄い液膜層が加熱面表面を濡らすことにより一定の大きさの固液接触面を維持することができるが、その熱伝導率が低いため、粗さなどによる加熱面の表面構造が液膜を保持しやすいような条件下では液粒への熱伝達に対して熱抵抗となる。
- (2) 溶射セラミックスが被覆された加熱面上において測定された液粒寿命には、液相あるいは気相の状態で被覆層内の表面近傍の領域に浸透することによると推定される熱伝達を促進する効果が認められる。
- (3) 溶射セラミックス被覆層を有する加熱面における核沸騰状蒸発領域での寿命が表面粗さに対して一定の傾向を示さないのは、液膜厚さを増して熱抵抗を大きくする効果と、(2)の熱伝達を促進効果が重なって現れることも主な原因の一つと考えられる。

第6章 加熱面材質の熱物性値の測定

第6章 目 次

	Page
6. 1 はじめに	200
6. 2 測定原理および測定装置	202
6. 3 試 料	203
6. 3. 1 金属試料およびセラミックス試料	203
6. 3. 2 溶射セラミックス試料	203
6. 4 溶射セラミックスの密度	205
6. 5 金属およびセラミックス加熱面材質の熱伝導率	206
6. 6 溶射セラミックスの熱拡散率、比熱および熱伝導率	209
6. 6. 1 溶射アルミナの熱拡散率	209
6. 6. 2 溶射ジルコン酸マグネシウムおよび溶射ジルコニアの 熱拡散率	212
6. 6. 3 溶射セラミックスの比熱	218
6. 6. 4 溶射セラミックスの熱伝導率	220
6. 7 溶射セラミックスの有効熱伝導度	223
6. 7. 1 溶射セラミックスの熱伝導率の雰囲気気体圧力に対する 依存性	223
6. 7. 2 溶射セラミックスの熱伝導率に対する気孔の効果	224
6. 7. 3 大気雰囲気下における溶射セラミックスの有効熱伝導度の 温度依存性	228
6. 8 第6章のまとめ	229

6. 1 はじめに

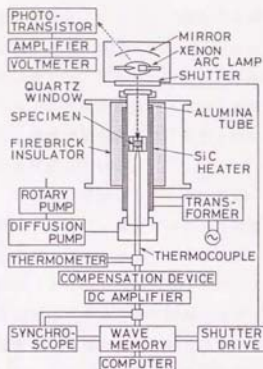
本研究では広い範囲の熱伝導率をもつ材質からなる加熱面に衝突して蒸発する液粒が示す現象について調べてきた。ここで使用した加熱面材質は一般に市販されている金属材料や磁器製品用の工業原料を利用したセラミックスであり、純金属族類とは異なって熱伝導率が明確になっているものばかりではない。また、ステンレス鋼製の加熱面の表面に低熱伝導性の溶射セラミックス被覆層を設けると広範な加熱面温度範囲において液粒の寿命が著しく短縮されることを示してきた。一般に、溶射セラミックスの熱伝導率は、溶射層を形成する粒子やその間に含まれる気孔の形状およびそれらの大きさ、そして気孔率、粒子内の結晶構造などの影響を受けるため、材質が決まっても正確な値は明かでない。また、使用する溶射装置の種類や、溶射距離など一連の溶射条件によっても異なる場合があることが知られている。そこで、本研究で使用した加熱面材質の熱伝導率を実測し、この結果をもとに加熱面材質の影響について検討を行った。

溶射法による金属表面へのセラミックスの被覆は、断熱や耐熱材料の高温における表面の耐食保護などの目的で、近年、広く利用されてきている。アルゴン、水素等を作動ガスとするプラズマジェットをセラミックス粒子の加熱源、加速源として利用するプラズマ溶射法は工業的に最も良く用いられている方法であり、これによって得られるセラミックス被覆層の熱拡散率に関してはこれまでも多くの研究が行われてきている。たとえば、Morrel & Taylor⁽⁴¹⁾、Pawlowski ら⁽⁴²⁾によりプラズマ溶射による Y_2O_3 安定化ジルコニアの熱拡散率が測定され、被覆層内の組織構造や溶射条件、熱処理の影響などについて調べられている。本研究において用いたものと同種の CaO 安定化ジルコニアについては、プラズマ溶射によるものについて研究されており^(43,44)、熱処理により熱拡散率が大きく変化する現象がみられることも報告されている。しかし、このように報告されている溶射セラミックスの熱拡散率の測定結果は必ずしも一致しているわけではなく、また、本研究で用いた燃焼ガスの燃焼熱を利用するガス溶射法によるセラミックス被覆層に関する測定値、あるいは比熱に関する測定例はきわめて少ない。

第6章では、本研究で使用した加熱面材質の熱伝導率を実測した結果について、溶射セラミックスに関する測定結果を中心に示す。熱物性値の測定は方形波パルス加熱法⁽⁴⁰⁾により行い、熱拡散率および比熱を同時測定し、別に測定された密

度の値を用いて熱伝導率を求めた。測定温度範囲は、温度依存性と、溶射施工時に試料が受ける熱的な環境や熱処理の影響について知るため、室温から1300 Kとした。

6. 2 測定原理および測定装置



第6. 1図 方形波パルス加熱法による
熱伝導率測定装置

熱流束で、シャッタを介して2~5秒の間、方形波パルス状に加熱される。この時の試料下面の温度が細い熱電対により検出され、電圧補償装置を通してその上昇分だけが波形記憶装置に入力されて温度応答が解析される。試料の熱拡散率は異なる時間における温度上昇の比から、そして、比熱は温度上昇の極大値から、それぞれ試料表面からの熱損失が考慮されている理論に基づいて求められる。キセノンアークランプの加熱光の強さをフォトトランジスタを用いた照度計を使用して計測すること、および試料表面を均一に表面処理することで比熱の測定を可能としている。

方形波パルス加熱法による測定原理は、熊田ら⁽⁴⁵⁾による、ステップ状加熱において測定時に生じる円柱状の試料の全ての表面からの熱損失を考慮した理論を基に、これを方形波状に加熱する場合に発展させたものである。この方法は、試料厚さや加熱用の放射熱流束の強さを適当に考慮するなどのことにより、金属、セラミックスを問わず幅広い熱伝導率を示す材料に適用することが可能である⁽⁴⁶⁾。第6. 1図に方形波パルス加熱法による測定装置の概要を示す。試料は円板状で、高真空に保持された電気炉内の中心部に置かれる。試料の温度が所定の温度に設定された状態で、その上面がキセノンアークランプからの一定強さの放射

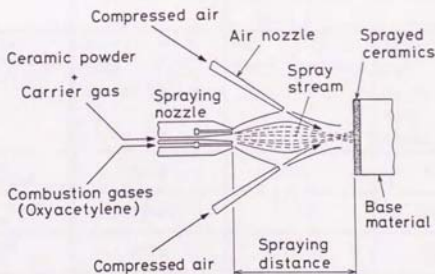
6. 3 試料

6. 3. 1 金属試料およびセラミックス ($SiO_2-A1_2O_3$) 試料

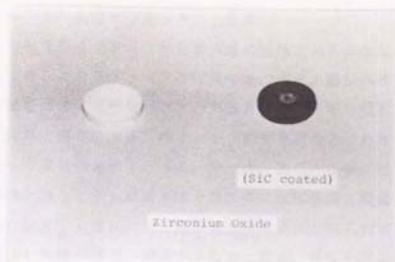
金属系試料については、液粒の蒸発面として使用した加熱面を製作したものと同一素材より、直径10mmの円柱状の試料を機械加工により製作した。試料の厚さは鋼で約1.8mm、ステンレス鋼で約6mmとした。セラミックス試料についても、加熱面を焼成して製作した際に使用した原料素材を用い、同様の乾燥、脱水、焼成の過程を経て、直径10mm、厚さ約2mmの円板状の試料を製作し、これを測定に用いた。

6. 3. 2 溶射セラミックス試料

第6. 2図に、セラミックスを被覆するのに使用した溶射装置の溶射ガンの略図を示す。セラミックス粉末は酸素-アセチレンガスと共にノズル部に導かれる。燃焼熱により溶融されたセラミックス粒子は、加圧空気により加速されて基盤材表面に達し、急冷されて固相となる。加圧空気を使用することにより気孔の少ない被覆層が得られるが、同時にこの空気は固体面の冷却剤ともなっている。溶射ガンは、基盤材との距離(溶射距離)を一定に保った状態で支持され、所定の一定厚さの被覆層が得られるまで基盤材の表面と平行に移動する操作が繰り返し行われる。液粒の蒸発実験にしようとしたセラミックス被覆層と同質の熱伝導率測定用の試料を製作するため、蒸発面として使用した加熱面試料を製作した場合と



第6. 2図 セラミックス溶射装置



第6-3図 熱伝導率測定用試料

同じ溶射条件下で、同じ種類のセラミックス粉末をステンレス鋼の基盤材表面に1~3mmの厚さに溶射した。次に、この溶射層をステンレス鋼面から物理的に剥離させ、ダイヤモンド砥石を用いて機械加工を行い、直径10mmの円板状の試料とした。第6-1表に試

料を製作するために使用した溶射用セラミックス粉末材料の化学組成、密度、粒度分布、融点を示す。第6-1表中の粉体密度は比重びんを使用して実測した値である。また、第6-3図には、成形された試料および実際に熱伝導率の測定に際し、表面を黒色化処理された試料の例を示す。試料の真面中央部には熱電対により表面温度を検出するための厚さ3 μ m程度の白金皮膜が設けられている⁽⁴⁷⁾。

第6-1表 溶射用セラミックス粉末材料

Powder	Aluminum oxide	Magnesium zirconate	Zirconium oxide
	Al ₂ O ₃	MgZrO ₃	ZrO ₂
Chemical composition ¹ , wt%	Al ₂ O ₃ 98.5	MgO 24	ZrO ₂ 93
	SiO ₂ 1 others balance	ZrO ₂ balance	CaO 5 Al ₂ O ₃ 0.5 SiO ₂ 0.4 others balance
Density, g/cm ³	3.98	5.00	5.70
Size range ¹ , μ m	15-53	10-53	10-53
Melting point ¹ , K	2270	2410	2810

¹As given by Metco Inc., Westbury, USA

6. 4 溶射セラミックスの密度

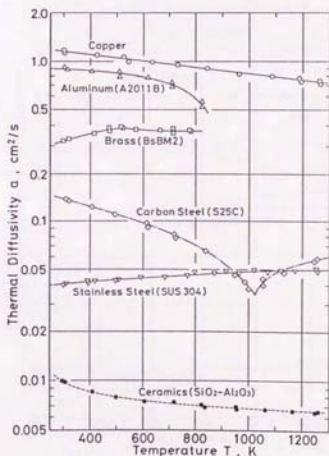
溶射セラミックスは溶射層形成の段階で気孔が生じるためかさ密度は完全に緻密化されたセラミックスとは異なる。また、熱伝導率は気孔率によって変わる。3種類の溶射セラミックスの密度および気孔率を溶射直後の状態で測定し整理した結果を第6. 2表に示す。かさ密度を求めるに必要な試料の見かけの体積の測定は3種類の方法で行った。第一は、第6. 3図に示したような円板状の試料の直径と厚さから計算する方法、第二は気孔内に浸透しない水銀中に浸漬して浮力を測定する方法、第三は蒸留水中で煮沸し気孔内に水を満たした試片を水中に浸漬した時の浮力を測定する方法である。第二の方法による測定値は第一の方法による場合に比べ平均2%程度小さく、逆に第3の場合は第1の方法よりも約2%大きくなる傾向がみられた。第1の方法が中間的な値を与えること、試料を精度良く円板状に成形することが比較的容易であることおよび簡便性から、ここでは主として第1に示した試料の外形形状と重さからかさ密度を求めた。また、アルキメデス法により見かけ密度を、試料を粉状に粉碎した状態で比重びんにより真密度を測定し、これらの測定値から気孔率を計算した。第6. 2表によれば、本研究で使用した溶射セラミックスは、材質により多少異なるが約10%前後の気孔率を示し、そのほとんど全てが開気孔からなることがわかる。また、融点が高いZrO₂はAl₂O₃やMgZrO₃に比べ気孔率が大きい傾向を示し、かさ密度のばらつきもやや大きい。

第6. 2表 溶射セラミックスの密度および気孔率

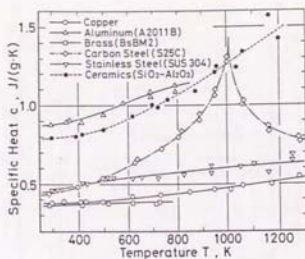
Material (as-sprayed)	Bulk density, g/cm ³	Porosity (% of bulk volume)	
		Total pores	Closed pores
Al ₂ O ₃	3.19 - 3.37	7 - 11	1
MgZrO ₃	4.26 - 4.38	12 - 15	2
ZrO ₂	4.63 - 5.16	9 - 19	0 - 1

6. 5 金属およびセラミックス加熱面材質の熱伝導率

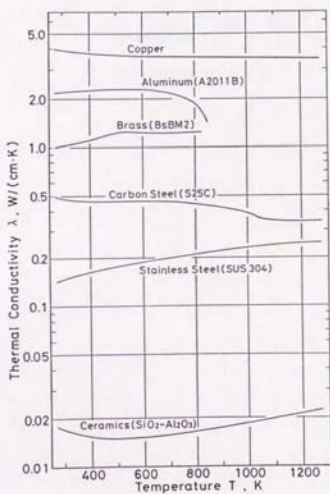
本研究で液粒の蒸発面として使用した、銅、アルミニウム、黄銅、炭素鋼、ステンレス鋼およびセラミックス ($\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$) の熱拡散率、比熱を実測した結果を第 6. 4 図および第 6. 5 図に示す。また、これらの測定値と密度により計算された熱伝導率および $\sqrt{c\rho\lambda}$ を第 6. 6 図および第 6. 7 図に整理して示す。これらの測定結果のうち、銅の熱伝導率は純銅のそれに近い値を示し、また、ステンレス鋼 (SUS304) の熱伝導率もこれまでに報告されている測定値⁽⁴⁸⁾にはほぼ一致している。これに対し、アルミニウム (A2011B) や黄銅 (BsBM2)、また炭素以外の微量成分の影響が大きいと考えられる炭素鋼 (S25C) の熱伝導率は実測によりはじめて正確な値が判明した。また、セラミックス ($\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$) の熱伝導率はステンレス鋼の約 1/10 程度であることがわかり、 $\sqrt{c\rho\lambda}$ も金属材料に比べ低い値となっている。



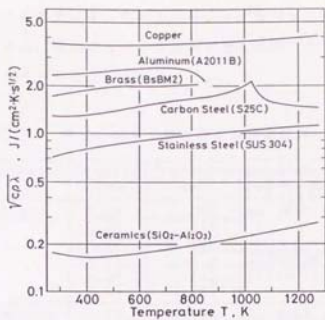
第 6. 4 図 加熱面材質の熱拡散率



第 6. 5 図 加熱面材質の比熱



第 6. 6 図 加熱面材質の熱伝導率



第 6. 7 図 加熱面材質の $\sqrt{cp\lambda}$

6. 6 溶射セラミックスの熱拡散率、比熱、熱伝導率

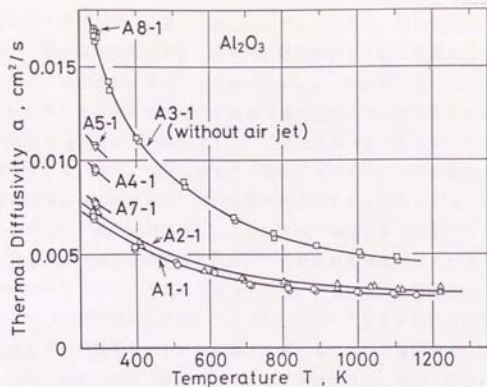
第6. 3表に熱伝導率の測定に使用した試料のかさ密度、厚さおよび測定前に行われた熱処理の内容を示す。試料の記号はその種類とともに熱処理の過程も表しており、たとえば、試料A4-1は溶射直後の状態であり、これに一定の熱処理を行った後はA4-2と表している。

第6. 3表 熱伝導率測定用試料

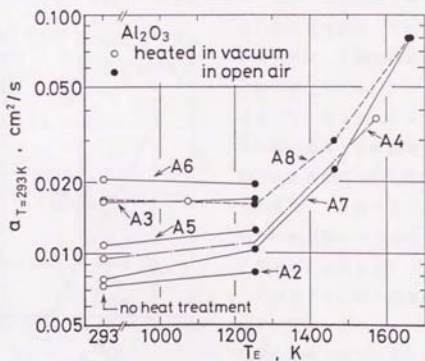
Specimen	Material	Density g/cm ³	Thickness mm	Exposed temperature before measurement	
A1-1	Al ₂ O ₃	3.19	1.200	no heat treatment	
A2-1		3.20	1.949		
A3-1		2.60	2.448		
A4-2		3.40	1.924		1570K in vacuum (0.5hr)
A5-2		3.34	1.863		1250K in open air (0.5hr)
A6-2		3.36	2.110		
M1-1	MgZrO ₃	4.34	0.973	no heat treatment	
M2-4		4.37	1.632	1570K in vacuum (0.5hr)	
Z1-1	ZrO ₂	4.63	1.000	no heat treatment	
Z2-1		4.83	1.495		
Z3-5		4.70	1.198		1570K in vacuum (0.5hr)
Z4-2		5.15	1.778		1660K in open air (0.5hr)

6. 6. 1 溶射アルミナの熱拡散率

溶射直後の状態における溶射アルミナの熱拡散率の測定例を第6. 8図に示す。測定した個々の試料は全て同じ種類の粉末材料を使用し、また、かさ密度を小さくする意図から加圧空気を使用しないで溶射が行われた試料A3-1を除く試料は見かけ上は同じ条件下での溶射により製作されたものである。全測定温度領域において第6. 8図における試料A2-1の測定値に5%以内で一致する結果がA1-1、A7-1、その他の試料で得られている。これに比べ、A4、A5、A8の熱拡散率は大きく、また、A3ではかさ密度が20%程度小さいにもかかわらず同様に熱拡散率が非常に大きくなっている。EPMAによる成分分析の結果には、Na、Si、その他の含有量に有意な差は認められなかった。したがって、溶射時に加圧空気を使用せず固相面の冷却状態が他と異なっていたと推定される試料A3の結果や、溶射の過程で基盤材上の被覆層が厚くなるとその熱伝導



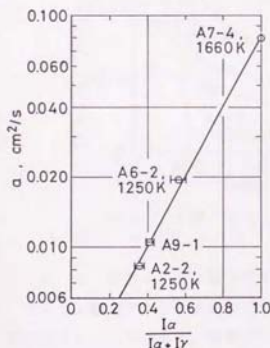
第6. 8 図 溶射アルミナの熱拡散率 (溶射直後)



第6. 9 図 熱処理温度による熱拡散率の変化

率が低いいため過熱されやすい傾向になることから、固相になった後の温度環境により溶射層の組織が変化し熱拡散率が大きくなったものと考えられる。

第6. 9図には熱処理が溶射アルミナの熱拡散率に及ぼす影響を示す。図は、各試料について、真空中あるいは大気中において一定時間(0. 5 hr)、一定温度 T_E に保持する熱処理を行った後の室温で測定された熱拡散率と熱処理温度 T_E の関係を表しており、熱処理をしていない試料については $T_E = 293 K$ として表している。第6. 9図によると、約1200 K以下の温度領域では熱拡散率の変化はほとんどみられないが、雰囲気によらず1200~1300 K以上の温度に保持すると熱拡散率が著しく上昇していく傾向を示すことがわかる。その結果、たとえば、溶射後の状態で試料A8の熱拡散率は試料A7に比べ2倍以上も大きい(1660 K)ではほぼ一致している。この現象は、溶射により異なる結晶構造をもつ被覆層が形成され、これが加熱によってアルミナの安定相である α 相へ変化していく過程を示しているものと考えられる。X線回折法による分析の結果、溶射に使用した粉末材料が α -アルミナであるのに対し、溶射されたアルミナは γ -アルミナ、あるいは γ 相に α 相が混合したものとなっていることが確認された。そこで、任意のいくつかに試料について α 相の含有率と熱拡散率を測定した結果を第6. 10図に示す。 α 相の含有率は、X線回折図に現れた α 相(面指数(113))と γ 相(面指数(400)および(440))に対する回折線の強度より近似的に求めた。また、図中には各試料の熱処理温度を示している。第6. 10図により、溶射アルミナの熱拡散率が α -アルミナの含有量に強く依存して変化していることがわかる。



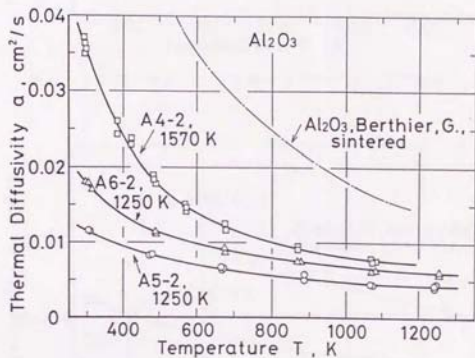
第6. 10図 α -アルミナの含有割合による熱拡散率の変化

アルミナには多くの多形が存在し、溶射することによっても、 α 、 γ 、 δ 、 η などの準安定相が生じることが知られている⁽⁴⁵⁻⁵²⁾。しかし、種々の溶射方法とそれにより生ずる組織には一定の関係

はみられず、使用した粉末材料や溶射方法が本研究と同じ場合でも異なる組織が得られたという報告例⁽⁵³⁾もある。

第6. 11図に、一定の温度で熱処理を受けた溶射アルミナの熱拡散率の測定結果を示す。溶射アルミナの熱拡散率は、熱処理温度が高く α 相の割合が大きくなるほど高い値となるが、同程度の密度をもつ焼結アルミナの熱拡散率⁽⁵⁴⁾と比べると全ての測定温度領域においてより低い値を示している。

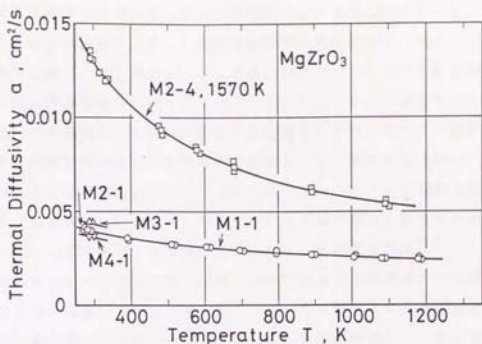
以上より、本研究で使用した溶射アルミナの被覆層は、その大部分が γ -アルミナからなり、第6. 8図におけるA2-1で示す程度アルミナとしては非常に低い熱拡散率をもつこと、またこれは1200K以下の温度範囲における使用状態では変化しないことがわかる。



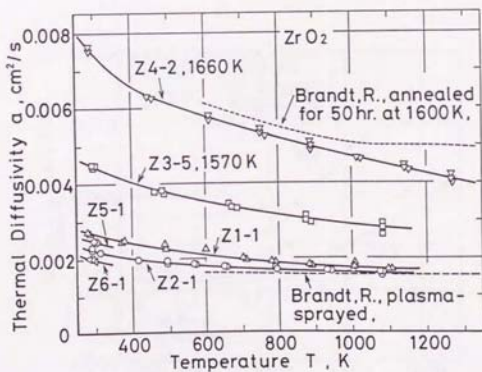
第6. 11図 溶射アルミナの熱拡散率 (熱処理後)

6. 6. 2 溶射ジルコニウム酸マグネシウムおよび溶射ジルコニアの熱拡散率

ジルコニウム酸マグネシウムおよびジルコニアは、それぞれMgOとCaOによる安定化ジルコニアである。溶射ジルコニウム酸マグネシウムの熱拡散率を第6. 12図に示す。溶射直後の状態の熱拡散率はアルミナよりも小さく、また、温度依存性も弱い。常温から1200Kにおける熱拡散率は、5~10%の範囲で第6.



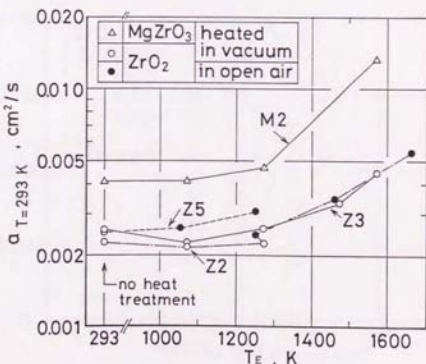
第 6. 1 2 図 溶射ジルコン酸マグネシウムの熱拡散率



第 6. 1 3 図 溶射ジルコニアの熱拡散率

12図における試料M1-1の測定値に一致すると推定される。また、試料M2-4の熱拡散率は1570Kにおける熱処理により大きくなっている。

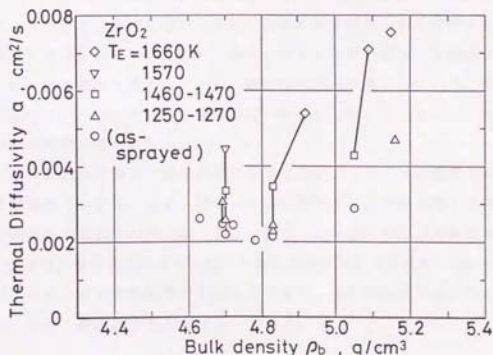
第6.13図には溶射ジルコニアの熱拡散率測定結果を示す。ジルコニアは耐熱性、断熱性に優れ、本研究で使用した3種のセラミックスの中で最も低い熱拡散率を示し温度依存性もきわめて小さい。Z3-5、Z4-2はそれぞれ表示した温度において熱処理された試料に関する測定値を示すが、ジルコニアマグネシウムの場合と同様に熱処理により熱拡散率が高くなる。図中には Brandt⁽⁴⁴⁾により測定されたプラズマ溶射によるCaO(8wt%) - ZrO₂の熱拡散率も示しているが、溶射直後、熱処理後いずれにおいても本研究によるガス溶射法による結果と一致した傾向を示していることがわかる。本研究で使用したジルコニアマグネシウムやジルコニアは、熱力学的には準安定相であり使用する熱環境により熱拡散率は変化する。ジルコニアマグネシウムとジルコニアの熱拡散率に対する熱処理の影響を第6.14図に示す。第6.11図と同様に、一定時間、一定の温度で熱処理を受けた試料の常温における熱拡散率の測定結果を示している。1250Kよりも低い温度領域ではほとんど変化がみられないが、これを越える



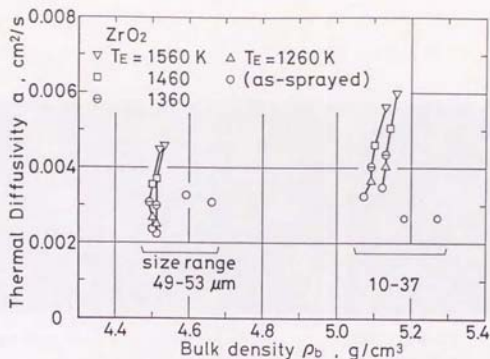
第6.14図 熱処理温度による熱拡散率の変化

温度領域では温度とともに熱拡散率が上昇することがわかる。1800K程度の温度における熱処理の結果、熱拡散率は初期の2～3倍に上昇するが、この割合は、相変態をともなうアルミナの場合よりもはるかに小さい。高温における熱処理により熱拡散率が大きくなるのは、安定化剤のMgOやCaOの粒界への析出や焼結作用によるものと考えられる。

第6. 2表ではジルコニアのかさ密度の測定値が他に比べやや広い範囲に分布していた。そこで第6. 15図に、常温において熱拡散率が測定されている試料について、かさ密度と熱拡散率の関係を示す。溶射後に、図示した一定温度 T_E に保持する熱処理を行った試料についての測定値も示しているが、同一試料の測定値は直線で結んで表している。1860Kの温度に保持された試料では短時間(0.5hr)の処理でも焼結作用に伴う密度の上昇が見られ、熱拡散率も大きくなっている。第6. 15図では、全体的にはかさ密度が大きな場合ほど熱拡散率が高くなる傾向も見られるが、溶射された直後の状態や高温での熱処理を受けない状態における溶射ジルコニアの熱拡散率とかさ密度には一定の関係は見られない。これは溶射ジルコニアの熱拡散率は溶射層の組織構造により強く依存して



第6. 15図 かさ密度と熱拡散率

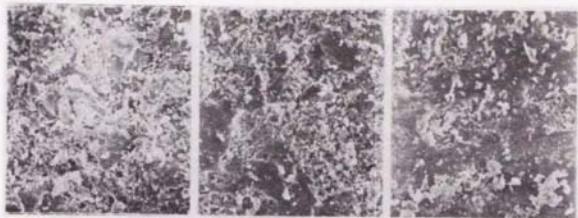


第6.16図 溶射用粉末材料の粒度の影響

いるためと考えられる。第6.16図は、第6.15図と同様に、溶射ジルコニアについてのかさ密度と常温における熱拡散率との関係を示している。使用した試料は、10～53 μmの粒度分布をもつ粉末材料を図示した2種類に分粒し、これを溶射して得られたものである。溶射に使用した原料粉末の粒度により、熱拡散率には一定の傾向は見られないが、溶射層の密度が異なっている。第6.2表における溶射ジルコニアのかさ密度が広い範囲に分布しているのは、粉末材料の粒度分布の影響と考えられる。

第6.17図にかさ密度と熱拡散率が異なる溶射ジルコニア被覆層の組織を走査型電子顕微鏡(SEM)により観察した結果を示す。図中の写真は被覆層表面に平行な研磨面で撮影されたものである。第6.17図(a)は溶射直後の状態であり、溶射層が複雑な形状をした粒子と気孔からなるようすがわかる。(b)、(c)は1660 Kで加熱処理されたものであり、気孔の容積が減少してかさ密度が大きくなり、熱拡散率も大きくなっている。

30 μ m



ZrO₂ (Z6-1)

ZrO₂ (Z2-7)

ZrO₂ (Z4-2)

1660K×0.5hr

1660K×0.5hr

$\rho = 4.78 \text{ g/cm}^3$

$\rho = 4.92 \text{ g/cm}^3$

$\rho = 5.15 \text{ g/cm}^3$

$a = 0.00202 \text{ cm}^2/\text{s}$

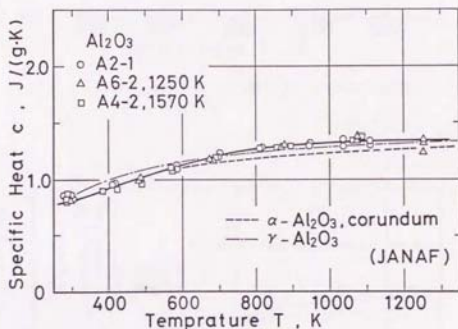
$a = 0.00540 \text{ cm}^2/\text{s}$

$a = 0.00755 \text{ cm}^2/\text{s}$

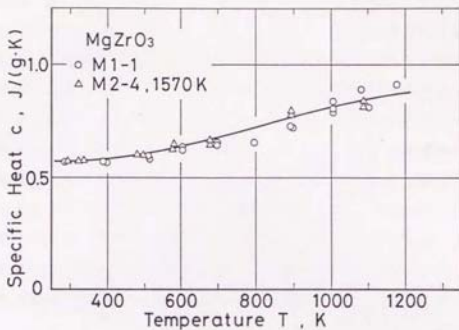
第8. 17図 溶射ジルコニアの電子顕微鏡写真 (SEM)

6. 6. 3 溶射セラミックスの比熱

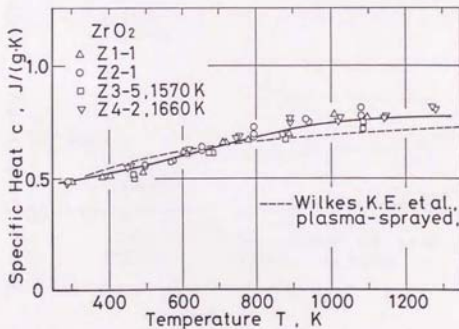
3種類の溶射セラミックスの比熱の測定結果を第6. 18図～第6. 20図に示す。各図には異なる熱処理を受けた状態の試料についての測定値が示されている。溶射アルミナでは第6. 9図に示したように1200K程度以上の温度で γ 相から α 相へ変化するが、第6. 18図に示されているように両相の比熱⁽⁵⁵⁾の差は小さいため、比熱の測定結果には相変態の影響はみられず測定値が一つの曲線上に分布している。溶射ジルコン酸マグネシウム、溶射ジルコニアの測定値も各試料で一致している。第6. 20図には Wilkes⁵⁾によるCaO (5wt%) - ZrO₂の測定値を示すが本研究の結果と比較的良好一致している。



第6. 18図 溶射アルミナの比熱



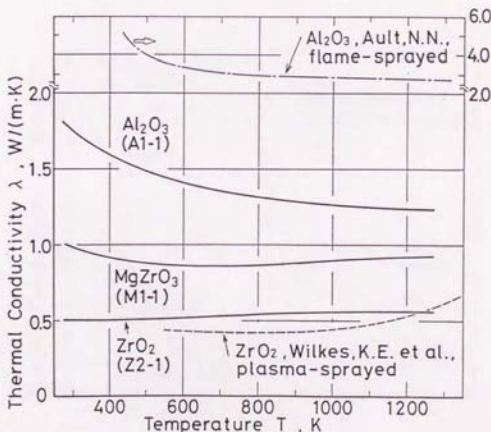
第6. 19図 溶射ジルコン酸マグネシウムの比熱



第6. 20図 溶射ジルコニアの比熱

6. 6. 4 溶射セラミックスの熱伝導率

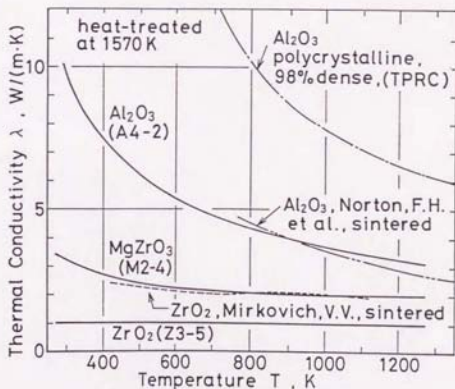
本研究で使用した溶射セラミックスの熱伝導率の代表的な値を第6. 21図に示す。溶射アルミナは γ 相からなり、したがって熱伝導率は α 相の多結晶体から予想される値よりも著しく低い。溶射ジルコニアの熱伝導率は最も低く溶射アルミナの約1/3程度で、温度依存性もきわめて小さく300~1200Kの温度領域でほぼ一定値となっている。比較のため Wilkes ら⁽⁴³⁾のプラズマ溶射によるCaO (5wt%) - ZrO₂の測定値を示すが、本研究におけるジルコニア被覆層の密度が10%大きいことを考えると1200Kまでの温度領域における測定値は本研究結果とほぼ一致している。 γ 相の結晶構造をもつ溶射アルミナの測定値はほとんどなく、Ault⁽⁴⁹⁾により報告されている、溶線法による溶射アルミナの測定値を示したが、本研究より2倍以上大きな値となっている。本研究で使用した溶射セラミックスの熱伝導率の一般的な値は、811~1388Kの温度範囲における平均値として、溶射アルミナが2.74 W/(cm·K)、ジル



第6. 21図 溶射セラミックスの熱伝導率 (溶射直後)

コニアが $1.15 \text{ W}/(\text{cm} \cdot \text{K})$ である⁽⁵⁶⁾とされているが、これらはいずれも本研究結果に比べ約2倍大きい。このように溶射セラミックスの熱伝導率には一様に定まらない面があるが、本研究と同じ粉末材料を使用し、同一の条件下で溶射を行うことにより、第6. 21図に示した値に最大でも10~20%の範囲で一致する熱伝導率をもつ被覆層が得られると推定される。

溶射セラミックスの熱伝導率は、第6. 9図、第6. 14図に示したと同様に、1250Kをこえる温度に加熱されることにより大きくなる。この一例として、1570Kで0. 5hr保持する熱処理を行った後の熱伝導率を第6. 22図に示す。溶射アルミナの熱伝導率は α 相への相変態にともない著しく大きくなる。第6. 22図には参考のため、焼結アルミナの一例とアルミナ多結晶体の熱伝導率⁽⁵⁷⁾を示しているが、本研究における溶射アルミナと同程度の密度をもつ試料の熱伝導率はこの2つの曲線間に分布している⁽⁵⁷⁾。密度が大きい溶射アルミナの熱伝導率は高温における熱処理により焼結体の熱伝導率に近づいていく。溶



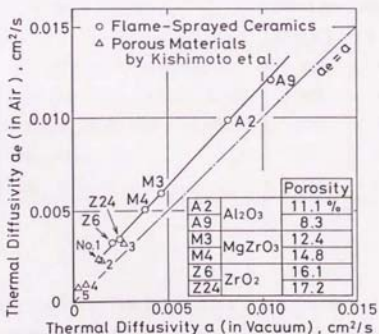
第6. 22図 溶射セラミックスの熱伝導率(熱処理後)

射ジルコン酸マグネシウム、溶射ジルコニアの熱伝導率も熱処理により約2倍になっている。しかし、溶射ジルコニアの熱伝導率は、同程度の密度をもつ焼結体の熱伝導率が $1.5 \sim 3 \text{ W} / (\text{m} \cdot \text{K})$ と報告されている⁽⁵⁷⁾のと比べると、より小さくなっていることがわかる。

6. 7 溶射セラミックスの大気雰囲気下における有効熱伝導度

6. 7. 1 溶射セラミックスの熱伝導率の雰囲気気体圧力に対する依存性

溶射セラミックスには、第6. 17図に示したような電子顕微鏡による観察結果からもわかるように、固相面に衝突し急冷されてきた粒子間に、形状が複雑で、空気分子の平均自由行程に相当するような大きさをもつ微小気孔が数多く存在し、完全に緻密化されていない組織構造をもつ。このため、溶射セラミックスの熱伝導率は、気孔を満たす気体の熱伝導の影響により、雰囲気気圧力によって変化し、見かけ上、大気雰囲気下では真空中で測定されたものとは異なる熱伝導率を示す。本研究で使用した溶射セラミックスに関して、0. 1 Pa程度の真空中と大気雰囲気下とで測定された値の関係を第6. 23図に示す。第6. 23図の測定値は、材質が異なる溶射セラミックス試料、および、材質は同じでも異なる熱伝導率、気孔率をもつ任意の試料を用いて、それぞれ同一の試料について雰囲気気圧力だけを真空と大気圧とに変化させた時に得られた、常温20°Cにおける熱拡散率の値である。いずれの試料についても大気雰囲気下における場合の方が真空中に比べて1. 2~1. 5倍大きな見かけ熱拡散率を示していることがわかる。また、材質、気孔率が異なる試料についての測定値がほぼ一つの直線上に分布し



第6. 23図 大気雰囲気下における見かけの熱拡散率

ており、大気雰囲気下における見かけの熱拡散率に対する気孔部を満たす空気の寄与度は固相部分の熱拡散率によって異なり、アルミナよりも、より低い熱伝導率を示すジルコニアで相対的に大きくなっている。さらに、第6. 23図には、筆者らによる、気孔率が58~85%で開孔の気孔を有する5種類の試作多孔質断熱材に関する室温における測定値⁽⁵⁶⁾も併せて示されている。これらの試料の化学組成、かさ密度および気孔率は第6. 4表に示す通りである。これらの試料については気孔の大きさの分布が異なるものが含まれていることがわかっており、多少傾向を異にするものもあるが、全体の傾向としては本研究における溶射セラミックスの結果と一致していることがわかる。第6. 4表に示した各試料の比熱およびかさ密度については加減律を用いた計算で真空中と大気雰囲気下とではほとんど変化がないので、第6. 23図の関係はそのまま熱伝導率の関係を示していると考えられる。このように溶射セラミックスの熱伝導率は雰囲気気体の圧力によって変化するので、これらを使用する場合には注意を要する。

第6. 4表 多孔質断熱材の主成分、密度および気孔率

Specimen	Main Component	Density	porosity
		[Kg/m ³]	[%]
No.1	Keiselerger, CaO, Asbestos	360	84.9
No.2	Keiselerger, CaO, Organic Binder	475	79.4
No.3	Siliceus Sand, CaO, Asbestos	1058	58.0
No.4	SiO ₂ , TiO ₂	705	71.8
No.5	Clay, SiO ₂	1097	56.1

6. 7. 2 溶射セラミックスの熱伝導率に対する気孔の効果

熱伝導率が低い固相材料からなる多孔質固体では、気孔内に含まれる気体分子の熱伝導の影響で、見かけ上の熱伝導率が雰囲気気体の種類や圧力により変化する

ることが知られている。たとえば、かさ密度が 7.5 Kg/m^3 程度の繊維質断熱材⁽⁵⁹⁾や気孔率88%のシリカブロック⁽⁶⁰⁾の熱伝導率の測定値はヘリウムガス中と空気中では異なり、また、約10 Paから50 KPaに至る程度の圧力範囲において、雰囲気圧力が上昇するとともに見かけの熱伝導率が著しく高くなることが報告されている。低圧力雰囲気中で気体の熱伝導の影響が小さくなるのは、気孔内の気体分子の平均自由行程の上限が気孔の大きさに制限されることに起因している。したがって、大気圧の空気中におけるように気孔の有効径が気体分子の平均自由行程よりも大きく、しかも気孔率が高く包含する気相部分の体積割合が大きい場合には、気孔内を満たす気体の熱伝導の影響が大きく現れる。これらに対して、より高密度な固体材料である溶射セラミックスの熱伝導率の測定値も雰囲気によって比較的大きく変わるという報告例もある。Wilksら⁽⁴³⁾は、プラズマ溶射による安定化ジルコニアのヘリウムガス雰囲気中における熱伝導率の測定値が、550 K、2気圧の状態では真空中の約2倍となることを示し、気孔率が高い断熱材の場合と同様な原理により気孔を満たすヘリウムガスの熱伝導の影響が大きく現れるとしている。本研究で使用した溶射セラミックスの大気圧の空気中における有効熱伝導度も、第6、23図に示したように、真空中で測定された熱伝導率の値よりも高く、材質により1.2~1.5倍となっている。空気の熱伝導率はヘリウムガスに比べ約1/5以下であり、これらは定性的には一致する結果を与えている。溶射セラミックスの熱伝導率に雰囲気効果が認められることについてはこれ以外に報告例はほとんどなく定量的にあまり明らかではないが、熱伝導率が溶射ジルコニアに比べても1/20以下と低い値をもつ空気が気孔を満たすことにより見かけ上、熱伝導率が上昇する現象がみられることは、少なくとも溶射層を形成するセラミックス粒子間の熱的接触状況は極めて乏しい状況にあることを示している。

多孔質固体を介する熱移動に対する気孔の効果は非常に複雑であり、気孔の形や大きさおよびそれらの分布、方向性、温度が高い場合には放射率などの影響も考える必要がある。体積分率としての気孔率はその大きな因子の一つであり、これを用いて多孔質固体の熱伝導率を簡単に表現する方法が検討され、いろいろな推算式が用意されてきている。焼結体セラミックスの熱伝導率に対する気孔の影響を補正して完全に緻密化した状態の熱伝導率を求めるのに使用される式として

は、電気伝導との類似性から導かれた Maxwell-Eucken の式⁽⁶¹⁾がある。多孔質固体を、連続した固相部に球状の気孔が一様に分散した複合体と考えると、多孔質固体の気孔の影響を含めた有効熱伝導度 λ_e は

$$\lambda_e = \lambda_s \cdot \frac{1 - 2V_g (\lambda_s - \lambda_g) / (2\lambda_s + \lambda_g)}{1 + V_g (\lambda_s - \lambda_g) / (2\lambda_s + \lambda_g)} \quad \dots (6-1)$$

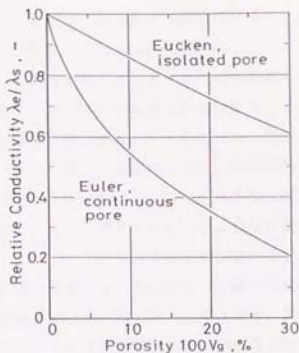
で与えられる。ここで、 λ_s : 固相の熱伝導率、 λ_g : 気孔内の気体の熱伝導率、 V_g : 気孔部分の体積分率、である。また、Francl & Kingery⁽⁶²⁾は、50%までの気孔率の範囲で Loeb による式が最も実測値との対応がよいことを示し、各種の酸化物セラミックスの熱伝導率を無気孔状態の値に換算している。いずれも固相が連続相であると考えた場合に得られている式であり、また、これらを10%程度の気孔率の場合に適用しても結果に大きな差はない。一方、Euler⁽⁶³⁾は、気孔が球状に存在する独立気孔の形態と、逆に固相部が球状に存在する連続気孔の形態を考え、このような各々のモデルについて多孔質材料の熱伝導率を計算している。独立気孔の場合は $\lambda_s \gg \lambda_g$ である場合には式(6-1)に一致する。連続気孔の場合は

$$\lambda_e = \pi (r^2 - 1/4) \cdot \lambda_s \quad \dots (6-2)$$

となる。ただし、 r の値は

$$V_g = \pi (2.67r^3 - 3r^2 + 0.25) + 1 \quad \dots (6-3)$$

から求められる。溶射セラミックスの熱伝導率が低くなる理由として、溶射層が固化したセラミックス粒子間に気孔を含む多孔質構造となっているほか、セラミックス粒子の結晶構造が、固相面への衝突に伴う急冷、凝固の過程で生ずる欠陥の多い乱れた状態になっていることも考えられる。したがって、式(6-1)あるいは式(6-2)を溶射セラミックスに適用するに際し、固相の熱伝導率としてはこのような乱れた組織構造をもつ連続体の熱伝導率を用いるべきであるが、これを正確に推定することは難しい。そこで、気孔内の気体が空気で $\lambda_s \gg \lambda_g$ として、式(6-1)および(6-2)より相対熱伝導度 λ_e / λ_s を計算した結果を第6.24図に示す。同じ気孔率の場合でも連続気孔の方が見かけの熱伝導率が著しく低くなる傾向がわかる。第6.5表は固相部分が一律な材質構造に



第6. 24 図 気孔の形態による相対熱伝導度の変化

なっている場合に得られる結果であり、溶射セラミックスに定量的には適用しがたい面があるが、第6. 6章に示したように溶射セラミックスの熱伝導率とこれと同じ材質で同程度のかさ密度をもつ焼結体の熱伝導率の差が大きいことから、溶射セラミックスの気孔の形態は連続気孔に近いものであることが確認される。溶射セラミックスの10%程度の気孔が連続気孔の形態をとるということは、熔融状態のセラミックス粒子が固相面に衝突してできた比較的大きな偏平の粒子の周囲に微小な気孔が数多く存在する複雑な組織構造となっている電子顕微鏡による観察結果に一致する。そして、これらの気孔が空気で満たされる結果、セラミックス粒子間の熱移動が良好になり、見かけの熱伝導率が高くなるものと考えられる。溶射セラミックスの大気圧の空気中における見かけの熱伝導率が高くなる現象は、このような微小な連続した形態の気孔をもつ組織構造とその気孔を満たす空気の熱伝導による効果と考えられる。

6. 7. 3 大気雰囲気下における溶射セラミックスの有効熱伝導度の 温度依存性

大気雰囲気下における見かけの熱伝導率を高温度領域まで精度良く測定することは対流による熱損失の影響が大きくなるため困難である。そこで既に報告されている測定例に基づいて気孔をもつセラミックスの熱伝導率の温度依存性について検討した。Wilks ら⁽⁴³⁾はプラズマ溶射による安定化ジルコニアの熱拡散率を550~1200Kの温度範囲で測定し、1気圧のヘリウムガス雰囲気では真空中の測定値の1.5~1.8倍、1気圧のアルゴンガス雰囲気ではやはり真空中の1.3~1.5倍となることを報告している。ヘリウムガスの1気圧における熱伝導率はアルゴンガスの8~9倍大きいにもかかわらず測定された熱伝導率の差が小さいこと、また、測定が行われた温度範囲でのヘリウムおよびアルゴンガスの熱伝導率は温度が高いほど大きくなり約2.5倍程度変化するが、これが熱伝導率の測定値にほとんど現れていないことを考えると、雰囲気ガスの影響は小さく母材であるセラミックスの温度依存性にしががった変化を示すことがわかる。荒木ら⁽⁶⁴⁾により、 SiO_2 、 Al_2O_3 を主成分とする多孔性セラミックスの熱拡散率がステップ加熱法により、真空中と大気雰囲気下で常温から850Kの温度範囲で計測されているが、真空中での測定値は大気雰囲気中より一様に約30%小さい値となっている。Binkele⁽⁶⁵⁾により測定された、 Al_2O_3 、 SiO_2 、 Al_2O_3 - SiO_2 、 CaO - SiO_2 系の圓形断熱材の0.1~4MPaのヘリウム雰囲気における見かけの熱伝導率の温度依存性には、各固相材料自体の熱伝導率の温度依存性が反映されている。これらの測定例は、本研究で使用した溶射セラミックスの場合には、真空中での測定値に第6.23図の関係を適用することにより、大気雰囲気下における有効熱伝導度を近似することができることを示す。

6. 8 第6章のまとめ

本研究において液粒の蒸発面として使用した加熱面材質および溶射セラミックス被覆層の熱伝導率とその温度依存性、また、溶射セラミックスについては加熱による変化の有無を明らかにするため、常温から約1200Kの温度範囲で熱拡散率、比熱を実測した。特に溶射セラミックスについては、これが熔融状態のセラミックス粒子が低温度に保たれた固相面に衝突し、急冷されて固化し、積層構造となるというような特異な過程により形成されることに起因して、母材とは大きく異なった熱伝導率を示すことがわかった。これは、単に母材の熱伝導率と気孔率とから推定される値よりも低く、セラミックス粒子内の結晶構造の乱れや粒界に存在する微小な気孔の影響によるものと考えられる。溶射アルミナの場合には、結晶構造が異なる γ -アルミナの生成により、アルミナ多結晶体よりも著しく低い熱伝導率を示すことがわかった。しかし、実際に加熱面温度範囲として使用した1200以下の温度領域では加熱による熱伝導率の変化は特に認められず、本研究で使用した溶射セラミックスの熱伝導率は本章に示した値で代表されると考えられる。また、溶射セラミックスの熱伝導率は雰囲気気体の圧力依存性を示すことが明かとなり、見かけ上、大気中では真空中よりも大きな有効熱伝導率を示す。

本論文においては、単一の液粒が加熱面に衝突して蒸発する現象において、加熱面材質が金属面よりも低熱伝導性のセラミックスである場合、また、より実用的に、金属面表面に低熱伝導性のセラミックスが薄く被覆されている場合には、一般的に使用されているような金属加熱面の場合に比べると、蒸発形態が大きく異なり、高温領域まで固液が直接接触する状態が維持されて広い加熱面温度範囲で寿命が著しく短くなる現象がみられ、蒸発が促進されることを実験により明らかにしてきた。そして、このような液粒が核沸騰状の様相で蒸発する最大蒸発率点前後の広い加熱面温度範囲における現象に対する加熱面材質、セラミックス被覆層の材質や表面粗さ、被覆層厚さ等の影響に関して実験により検討した。また、現象の観察の結果得られた簡単なモデルに基づいて、セラミックス被覆層を有する加熱面から液粒への伝熱量について数値計算による定量的な検討を行い、液粒の種類や被覆層材質、被覆層厚さによる現象の変化に良く対応する傾向が得られることを示した。なお、溶射法によるセラミックス被覆層など、加熱面材質の熱物性値については、現象を定量的に明らかにするうえで非常に重要であるため、これを実測し、明らかにした。以下にこれらの検討から得られた結論を列記する。

1. 加熱面材質の熱伝導率が低い場合ほど最大蒸発率点、ライデンフロスト点が高くなるが、金属系の清浄な加熱面ではこの差は小さい。これに対して、熱伝導率が低く、適当な表面粗さをもつセラミックス加熱面では、金属加熱面の場合のライデンフロスト点を大きく越えるような十分に高い加熱面温度範囲でも液粒の衝突時に固液が直接接触し、また、これにともなって大きな接触面温度降下が生じるため継続的に固液接触状態を維持することができる。したがって、同じ温度領域においてはスフェロイド状の蒸発形態を示す金属系の加熱面の場合に比べると、広範な温度領域で液粒の寿命が著しく短くなる。このような核沸騰状蒸発領域で液粒が示す挙動は加熱面温度に対して連続的に変化する。最大蒸発率点よりも加熱面温度が高い範囲では、加熱面温度が高くなるとともに寿命は徐々に長くなるが、寿命の全期間を通して液粒

の一部が加熱面と直接接状態を保ち、この点が遷移域とは異なる。

2. セラミックス加熱面における遷移域では、沸騰、蒸発の過程で液が分裂するなど不安定な挙動も見られるが、一般的な傾向としては加熱面との最初の接触時に固液接触が起こり途中からスフェロイド状に変わる挙動となる。加熱面温度が高くなるほど固液が接触する時間が短くなり、寿命は著しく長くなる。この加熱面温度範囲における寿命曲線の形状は、温度上昇に対する寿命の増加割合が大きく、核沸騰状蒸発領域とは区別される。熱伝導率が高い金属加熱面の場合も同様な変化が狭い加熱面温度範囲で生じていると考えられ、液粒の蒸発形態から考えると寿命が極小となる最大蒸発率点を核沸騰状蒸発領域と遷移域との境界として扱うのは適当でない。
3. 低熱伝導性のセラミックス加熱面上で核沸騰の状態では沸騰し蒸発する液粒の周囲には、加熱面の表面粗さ程度の厚さをもつ薄い液膜が存在することが確認された。この薄液膜は、液粒が加熱面に接触した直後より寿命末期まで加熱面表面に密着した状態で存在し、時間的な変動が少ない安定した形状、大きさの固液接触面を形成する。また、ライデンフロスト点におけるように加熱面温度が非常に高い場合にも、加熱面に液粒が衝突した直後の短時間の間、同様な表面に密着した薄い液膜が存在することが実験により確認された。これらより、セラミックス加熱面上で気泡を発生するにともない大きく形状を変化させて蒸発する液塊部の底部には加熱面表面に密着した薄い液膜の層が存在し、加熱面から液粒への熱伝達はこの液膜を介して行われると考えられる。
4. 金属製加熱面表面に適当な厚さの溶射セラミックスを被覆すると、被覆がない場合に比べ、核沸騰状蒸発領域が高温度側に広がって最大蒸発率点を中心とした広い加熱面温度範囲で液粒の寿命が著しく短くなる。熱伝導率が低いセラミックス被覆層表面では、液粒との接触により生ずる表面温度降下や液粒に伝達される熱流束が一定範囲の大きさに制限されることにより固液の直接接状態が維持されて、同じ温度の金属加熱面の場合と比べ高温域にお

いても大きな熱流束が伝達される。なお、溶射セラミックス被覆層の熱伝導率は十分に低く、実験に使用したような被覆層厚さの範囲では表面で液粒が蒸発する現象に対し熱伝導率が高い基盤材の影響がほとんど及ばない状態となるため、被覆層材質の種類や被覆層の表面性状が現象を支配する。このため、バルクがセラミックスである加熱面の場合と同様な現象がみられた。

5. 溶射セラミックス被覆層を有する加熱面の核沸騰状蒸発領域において、液粒の寿命期間内に固液接触面を通して加熱面から液粒に伝達される時間平均熱流束は、加熱面温度が高くなるとともに大きくなり、液粒の蒸発挙動も熱流束の大きさに対応した変化を示す。加熱面から伝達される時間平均熱流束の大きさは被覆層の材質や被覆層厚さによって異なり、同一加熱面温度では被覆層材質の熱伝導率が高いほど、また被覆層厚さが薄いほど大きい。そして、表面粗さが同程度であれば、液粒が寿命の全期間固液接触状態を維持できる核沸騰状蒸発領域の上限では、被覆層材質や被覆層厚さが異なる場合でも液粒に伝達される時間平均の熱流束の大きさはほぼ等しくなる。したがって、核沸騰状蒸発領域の上限を与える加熱面温度は低熱伝導性の被覆層を有する加熱面の場合ほど高く、核沸騰状蒸発領域は広くなる。被覆層厚さに関しては、液粒の蒸発による加熱面の温度変化が基盤材に及ぶ範囲内で、被覆層厚さが厚い場合ほど核沸騰状蒸発領域の上限を与える加熱面温度が高く、核沸騰状蒸発領域が広くなる。

6. 核沸騰状蒸発領域において、寿命期間内に固液接触面を通して加熱面から液粒に伝達される平均熱流束の大きさが等しい場合には液粒はほぼ一致する蒸発挙動を示す。そして、寿命期間内に液粒に伝達される平均熱流束と固液接触面積の関係は、被覆層の材質や被覆層の厚さによらず、熱流束が上昇するとともに固液接触面積が減少するが最大蒸発率点を与える熱流束の値を超える範囲では固液接触面積の減少割合がより大きくなるというような、近似的に最大蒸発率点を交点とする傾斜の異なる二本の折線で表され、これにしたがって変化する。たとえば、セラミックス被覆層材質の熱伝導率が高い場合には、同じ加熱面温度において液粒に伝達し得る熱流束は大きい固液接

触面の大きさは小さくなるため、結果として寿命には熱伝導率の差ほど大きな変化は生じない。また、被覆層厚さの相違により熱流束が異なる場合にも同様であり、同じ加熱面温度において被覆層厚さが薄く熱流束が大きい場合には固液接触面の大きさが小さくなり、寿命に大きな変化は生じない。

7. セラミックスが被覆された加熱面における核沸騰状蒸発領域の温度範囲は表面粗さの大きさに比例して高温領域に拡大し、表面粗さが大きくなるほど広範な温度領域で液粒の蒸発時間が著しく短くなる。これは、加熱面の突起状の部分の大ききほど液粒との間に形成される蒸気層を越えて液と直接接しやすいために起因すると考えられる。ただし、加熱面上の液粒が固液直接接触を維持し得る上限の熱流束が存在し、この熱流束を与える加熱面温度までの範囲で粗さによる促進効果が得られる。たとえば本実験と同一条件下で効果の得られる粗さの上限は、寿命曲線の形状より、約 $80 \mu\text{m R}_{\text{max}}$ 程度の範囲と推定される。これに対して、表面粗さが核沸騰状蒸発領域における液粒の寿命に与える影響は小さい。一般的には粗い面の場合に接触面がわずかに拡大する効果により短い時間で蒸発する傾向がみられるが、液粒の種類によって異なる場合もある。また、粗さの幾何学的形状が寿命に影響し、浴射されたままの状態の表面粗さが大きな面よりも、これを研磨しかつ適当な粗さをもたせた面における寿命が最も短くなる傾向がみられた。粗さの形状が固液接触面を形成する液膜の挙動に影響する結果と推定される。

8. セラミックス被覆層厚さが液粒の蒸発に伴う温度浸透厚さよりも薄い範囲の現象は被覆層厚さに依存する。核沸騰状蒸発領域における過熱度が低い温度領域では、被覆層厚さが薄い場合ほど熱伝導率が高い基盤材の影響を受け寿命は短い。最大蒸発率点を越える温度領域で被覆層厚さが温度浸透厚さよりも薄いと熱流束が大きく増し、一定の固液接触面積を維持できない場合には遷移域に移行する。ライデンフロスト温度は、この温度近傍における固液接触時間が非常に短いため、本研究で対象としている厚さの範囲では被覆層厚さの影響は受けない。本研究における浴射ジルコニア被覆層を有する加熱面に関する同一の実験条件下では、 0.3 mm 以上の厚さであれば最大蒸発

率点近傍の現象に大きな変化は生じない。被覆層厚さが非常に薄くなると遷移域が低温側に拡大し、これとともに最大蒸発率点も低温側へ移動する。さらに薄くなるとライデンフロスト温度も低温側へ移動し核沸騰状蒸発領域は狭くなる。

9. セラミックスのような低熱伝導性の加熱面の核沸騰状蒸発領域における液粒の寿命は加熱面からの伝導熱流束に依存する。蒸発過程の液粒底部に薄い液膜が存在するというモデルに基づき、セラミックス被覆層を有する加熱面から液粒への伝熱量について数値計算により定量的に検討を行った結果、液膜の伝熱抵抗を考慮することにより液粒の種類毎に異なる現象を整理して表せる傾向が認められ、被覆層の厚さや材質が異なる場合についても実測値に良く対応する傾向を与える計算結果が得られた。核沸騰状蒸発領域における液粒への熱伝達に対しては、加熱面表面に密着するように存在し、寿命期間内はほぼ一定の大きさを保つ薄い液膜の層が強く影響する。加熱面上の適当な粗さは薄い液膜層を保持することにより一定の大きさの固液接触面を維持する点で有効であるが、一般に液膜の熱伝導率が低いため、粗さなどによる加熱面の表面構造が厚い液膜を保持しやすいような条件下では液粒への熱伝達に対して熱抵抗となると考えられる。

10. 溶射セラミックス被覆層を有する加熱面に液粒が衝突して蒸発する現象には、液相あるいは気相の状態では被覆層内の表面近傍の領域に浸透することによると推定される、被覆層厚さに依存した熱伝達を促進する効果が認められる。

11. 金属加熱面上の核沸騰蒸発領域から遷移域に至る温度領域における液粒の蒸発挙動は、加熱面表面の汚損、酸化膜の形成や粗さなど表面条件の影響を強く受ける。特に、ライデンフロスト温度は軽微な状態の汚損にも影響されやすく、同じ加熱面でも酸化膜等による表面汚損が生じないように考慮された清浄な場合ほど低い温度となり、最大蒸発率点との温度差が小さく、この領域の寿命曲線が先鋭な形状となる。これは、従来報告されているライデン

フロスト温度のばらつきが大きくなっている原因の一つと考えられる。熱伝導率が低く、また濡れ特性の良いセラミックス加熱面の場合には、表面汚損にともなう濡れ性の変化や表面への低熱伝導性皮膜の形成などに起因するような影響は少なく、表面粗さがライデンフロスト温度に影響する。

- 1 2. 溶射セラミックスの熱伝導率、比熱、熱拡散率を実測により明かとした。
溶射セラミックスの熱物性値は、それがセラミックス粒子の熔融、急冷という特異な過程を経て形成されることから、含有する気孔の量や形状、固化した粒子内の結晶構造などの影響により、原料として使用する粉末材料のそれとは大きく異なる。そして、溶射時のセラミックス皮膜が受ける熱環境やその後の熱処理によっても変化する。また、気孔内を満たす空気の影響で、空気中における見かけの熱伝導率は真空中で測定される熱伝導率の値よりも大きくなる。

以上述べたように、本論文では、加熱面材質の相違による液粒の蒸発現象の変化について調べ、主として最大蒸発率点前後の加熱面温度範囲で固液が直接接し核沸騰状に短時間で蒸発する温度領域における現象について検討した。セラミックスが被覆された加熱面では、固液の直接接しが生じ得ないような、温度が非常に高い金属面表面ではセラミックス層との固体接しにより、そして、セラミックス被覆層表面では固液の直接接しにより熱伝達が行われ、同じ温度における金属加熱面と比べると、高温度において大きな熱量が伝達される。高温における実用的な広い温度領域において液粒の蒸発時間が短縮される現象を利用することにより、広い動作温度範囲で高効率な蒸気生成や、潜熱の特徴を生かした必要最小量の流体を利用する冷却が期待される。本論文ではその現象の概要を明らかにしたわけであるが、過熱度が高い表面に薄い液膜が付着する理由について明らかにすることや、表面粗さと気孔を有するセラミックス加熱面表面近傍における熱伝達の機構を被覆層材質の有効熱伝導率との関係も含めてより詳細に検討することなど今後の課題である。

参考文献

- (1) Tamura, Z and Tanasawa, Y., Evaporation and Combustion of a Drop Contacting with a Hot Surface, Proc. 7th International Symposium on Combustion, (1958), pp.509-522.
- (2) Borishansky, V.M., Heat Transfer to a Liquid Freely Flowing over a Surface Heated to a Temperature above the Boiling Point, USAEC-TR-3405, (1953), pp.109-144.
- (3) 手代木・大橋, 燃料液滴の熱面上における蒸発過程について, 機械試験所所報, 20-5 (1966), pp.201-216.
- (4) Baumeister, K.J., Hamill, T.D. and Schoessow, G.J., A Generalized Correlation of Vaporization Times of Drops in Film Boiling on a Flat Plate, Proceedings of the Third International Heat Transfer Conference, Vol.4, (1966), pp.66-73.
- (5) Patel, B.M. and Bell, K.J., The Leidenfrost Phenomenon for Extended Liquid Masses, Chemical Engineering Progress Symposium Series, 62-64 (1966), pp.62-71.
- (6) Satcunanathan, Evaporation Rates of Liquid Droplets Evaporating in the 'Spheroidal' State on a Hot Surface, Journal of Mechanical Engineering Science, 10-5 (1968), pp.438-441.
- (7) Temple-Pediani, R.W., Fuel Drop Vaporization under Pressure on a Hot Surface, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, 184-38 (1969), pp.677-690.
- (8) 廣安・角田・千田, ふん囲気温度および圧力を高めた場合の燃料液滴の壁面蒸発について, 日本機械学会論文集, 39-328 (1973), pp.3779-3787.
- (9) Gottfried, B.S., Lee, C.J. and Bell, K.J., The Leidenfrost Phenomenon: Film Boiling of Liquid Droplets on a Flat Plate, International Journal of Heat and Mass Transfer, 9 (1966), pp.1167-1187.
- (10) Wachters, L.H.J., Bonne, H. and Nouhuis, H.J.V., The Heat Transfer from a Hot Horizontal Plate to Sessile Water Drops in the

- Spheroidal State, Chemical Engineering Science, 21 (1966), pp.923-936.
- (11) Gottfried, R.S. and Bell, K.J., Film Boiling of Spheroidal Droplets, I & EC Fundamentals, 5-4 (1966), pp.561-568.
- (12) Sen, A.K. and Law, C.K., On a Slowly Evaporating Droplet Near a Hot Plate, International Journal of Heat and Mass Transfer, 28-8 (1984), pp.1418-1421.
- (13) Nguyen, T.K. and Avedisian, C.T., Numerical Solution for Film Evaporation of a Spherical Liquid Droplet on an Isothermal and Adiabatic Surface, International Journal of Heat and Mass Transfer, 30-7 (1987), pp.1497-1509.
- (14) Godleski, E.S. and Bell, K.J., The Leidenfrost Phenomenon for Binary Liquid Solutions, Proceedings of the 3rd Heat Transfer Conference, 4 (1966), pp.51-58.
- (15) Baumeister, K.J., Simon, F.F. and Henry, R.E., Role of the Surface in the Measurement of the Leidenfrost Temperature, Augmentation of Convective Heat and Mass Transfer, ASME, New York, N.Y., (1970), pp.91-101.
- (16) Baumeister, K.J. and Simon, F.F., Leidenfrost temperature - Its Correlation for Liquid Metals, Cryogenics, Hydrocarbons and Water, Transactions of the ASME, Journal of Heat Transfer, 95-2 (1973), pp.166-173.
- (17) Wachtors, L.H.J. and Westerling, N.A.J., The Heat Transfer From a Hot Wall to Impinging Water Drops in the Spheroidal State, Chemical Engineering Science, 21 (1966), pp.1047-1056.
- (18) 小竹, 加熱面上での液滴の蒸発の不安定現象, 日本機械学会論文集, 36-287 (1970), pp.1146-1152.
- (19) 西尾・平田, ライデンフロスト温度に関する研究(第1報, ライデンフロスト温度の基本的性格に関する実験的検討), 日本機械学会論文集, 43-374 (1977), pp.3856-3867.

- (20) 西尾・平田, ライデンフロスト温度に関する研究 (第2報, 固液接触面の挙動とライデンフロスト温度), 日本機械学会論文集, 44-380 (1978), pp.1335-1346.
- (21) Seki, M., Kawamura, H. and Sanokawa, K., Transient Temperature Profile of a Hot Wall Due to an Impinging Liquid Droplet, Transactions of the ASME, Journal of Heat Transfer, 100 (1978), pp.167-169.
- (22) Groendes, V. and Mesler, R., Measurement of Transient Surface Temperature beneath Leidenfrost Water Drops, Proceedings of the 7th International Heat Transfer Conference, 4 (1982), pp.131-136.
- (23) 戸田, ミスト・クーリングに関する研究 (第3報, ミスト・クーリングの理論-高熱負荷の高温面上に形成される液膜の熱的挙動), 日本機械学会論文集, 39-323 (1973), pp.2172-2185.
- (24) Bonacina, C. Giudice, S.D. and Comini, G., Dropwise Evaporation, Transactions of the ASME, Journal of Heat Transfer, 101 (1979), pp.441-446.
- (25) Rizza, J.J., A Numerical Solution to Dropwise Evaporation, Transactions of the ASME, Journal of Heat Transfer, 103 (1981), pp.501-507.
- (26) Marzo, M.D. and Evans, B.D., Evaporation of a Droplet Deposited on a Hot High Thermal Conductivity Surface, Transactions of the ASME, Journal of Heat Transfer, 111 (1989), pp.210-213.
- (27) Yang, Wen-Jei, Theory of Vaporization and Combustion of Liquid Drops of Pure Substances and Binary Mixtures on Heated Surfaces, Report, Institute of Space and Aeronautical Science, University of Tokyo, Report No.535 (1975), pp.423-455.
- (28) Michiyoshi, I. and Makino, K., Heat Transfer Characteristics of Evaporation of a Liquid Droplet on Heated Surfaces, International Journal of Heat and Mass Transfer, 21 (1978), pp.605-613.
- (29) Makino, K. and Michiyoshi, I., The Behavior of a Water Droplet on

- Heated Surfaces, International Journal of Heat and Mass Transfer, 27-5 (1984), pp.781-791.
- (30) Meurer, J.S., Evaluation of Reaction Kinetics Eliminates Diesel Knock - The M-Combustion System of MAN, SAE Transactions, 64 (1956), pp.250-272.
- (31) Cumo, M., Farello, G.E. and Ferrari, G., Notes on Droplet Heat Transfer, Chemical Engineering Progress Symposium Series, 65-92 (1969), pp.175-187.
- (32) Carslaw, H.S. and Jaeger, J.C., Conduction of Heat in Solids, Second Edition, (1959), p.58, Clarendon Press, Oxford.
- (33) Carslaw, H.S. and Jaeger, J.C., Conduction of Heat in Solids, Second Edition, (1959), p.88, Clarendon Press, Oxford.
- (34) 藤井・片山・斉藤・服部・戸田, 伝熱工学の進展, Vol.3, (1976), p.221, 養賢堂.
- (35) Carslaw, H.S. and Jaeger, J.C., Conduction of Heat in Solids, Second Edition, (1959), p.264, Clarendon Press, Oxford.
- (36) Rayleigh, L., On the Capillary Phenomena of Jets, Proceedings of the Royal Society, 29 (1879), pp.71-97.
- (37) Avedisian, C.T. and Koplik, J., Leidenfrost Boiling of Methanol Droplets on Hot Porous/Ceramic Surfaces, International Journal of Heat and Mass Transfer, 30-2 (1987), pp.379-393.
- (38) 溝本・早野・猪飼, 加熱平板上における単一燃料液滴の蒸発と着火(第1報, 蒸発過程), 日本機械学会論文集, 44-380 (1978), pp.1366-1372.
- (39) Carslaw, H.S. and Jaeger, J.C., Conduction of Heat in Solids, Second Edition, (1959), p.320, Clarendon Press, Oxford.
- (40) 小林・高野, 熱定数迅速測定法の自動化に関する研究, 日本機械学会論文集 (B編), 48-434 (1982), pp.2062-2069.
- (41) Morrel, P. and Taylor, R., Thermal Barrier Coatings of ZrO_2 Stabilized with Y_2O_3 , High Temperatures-High Pressures, 17 (1985), pp.79-88.
- (42) Pawlowski, L., Lombard, D., Mahlia, A., Martin, C. and Fauchais, P.,

- Thermal Diffusivity of Arc Plasma Sprayed Zirconia Coatings, High Temperatures-High Pressures, 16 (1984), pp.347-359.
- (43) Wilkes, K.E. and Lagedrost, J.F., Thermophysical Properties of Plasma Sprayed Coatings, NASA-CR-121144, (1973).
- (44) Brandt, R., Thermal Diffusivity Measurements on Plasma-Sprayed CaO Stabilized ZrO₂, High Temperatures-High Pressures, 13 (1981), pp.79-88.
- (45) 熊田・小林, 試料すべての面から輻射熱損失を伴う場合の温度伝導率の非定常測定法 (I. ステップ関数状加熱法), 日本原子力学会誌, 11-8 (1969), pp.462-468.
- (46) Kobayasi, K., Nakatani, K. and Takano, T., Determination of Thermal Conductivity of Solids at High Temperatures by the Optical Irradiation of a Single Rectangular Pulse, Proc. 1987 ASME-JSME Thermal Engineering Joint Conference, Vol.4, (1987), pp.297-302.
- (47) 高野・小林・海野, 方形波パルス加熱による高温域熱物性値測定法における試料表面処理法の影響について, 第9回日本熱物性シンポジウム講演論文集, (1988), pp.17-20.
- (48) Touloukian, Y.S., Powell, R.W., Ho, C.Y. and Klemens, P.G., Thermophysical Properties of Matter, The TPRC Data Series, Vol.1 (Thermal Conductivity: Metallic Elements and Alloys), (1970), IPI/Plenum.
- (49) Ault, N.W., Characteristics of Refractory Oxide Coatings Produced by Flame-Spraying, Journal of the American Ceramic Society, 40-3 (1957), pp.69-74.
- (50) Eichhorn, F., Metzler, J. und Eysel, W., Röntgenbeugungsuntersuchungen an Plasmaspritzten Aluminiumoxidschichten, Metalloberfläche, 26-8 (1972), pp.212-213.
- (51) Wilms, V. and Herman, H., Crystallography and Microstructure of Equilibrium and Metastable Phases Resulting from Plasma Spraying of Ceramic Coating, Preprints of Papers for the 8th International

- Thermal Spraying Conference, (1977), pp.236-243.
- (52) Hurley, G.F. and Gac F.D., Structure and Thermal Diffusivity of Plasma-Sprayed Al_2O_3 , American Ceramic Society Bulletin, 58-5 (1979), pp.509-511.
- (53) Iwamoto, N., Makino, Y. and Arata, Y., Crystallographical Consideration on Sprayed Alumina, Preprints of Papers for the 9th International Thermal Spraying Conference, (1980), pp.306-309.
- (54) Touloukian, Y.S., Powell, R.W., Ho, C.Y. and Klemens, P.G., Thermophysical Properties of Matter, The TPRC Data Series, Vol.10 (Thermal Diffusivity), (1970), IFI/Plenum.
- (55) Chase, Jr. M.W., Davies, J.R., Downey, J.R., Frurip, D.J., McDonald, R.A. and Syverud, A.N., JANAF Thermochemical Tables Third Edition, Journal of Physical and Chemical Reference Data, Vol.14, Supplement No.1, (1985).
- (56) Inghan, H.S. and Shepard, A.P., Metco Flame Spray Handbook ; Vol.2 Powder Process, Metco Inc., (1984), p.118.
- (57) Touloukian, Y.S., Powell, R.W., Ho, C.Y. and Klemens, P.G., Thermophysical Properties of Matter, The TPRC Data Series, Vol.2 (Thermal Conductivity : Nonmetallic Solids), (1970), IFI/Plenum.
- (58) 岸本・横山・高野・小林, 多孔質材料の非正常熱物性測定における雰囲気圧力の影響, 第7回日本熱物性シンポジウム講演論文集, (1988), pp.135-138.
- (59) Pratt, A.W., "Heat Transmission in Low Conductivity Materials" in Thermal Conductivity Vol.1 ed. by R.P.Tye, (1969), pp.301-313, Academic Press, New York.
- (60) 川上, 多孔質断熱材の熱伝導率に対する雰囲気効果について, 高温学会誌, 10-1 (1984), pp.10-17.
- (61) Eucken, A., Die Wärmeleitfähigkeit Keramischer Feuerfester Stoffe ; Ihre Berechnung aus der Wärmeleitfähigkeit der Bestandteile, Beilage zu Forschung auf dem Gebiete des Ingenieurwesens, 83,

Forschungsheft No.353 (1932), pp.1-16.

- (62) Franci, J. and Kingery, W.D., Thermal Conductivity:IX, Experimental Investigation of Effect of Porosity on Thermal Conductivity, Journal of American Ceramic Society, 37-2 (1954), p.99.
- (63) Euler, F., Simple Geometric Model for the Effect of Porosity on Material Constants, Journal of Applied Physics, 28-11 (1957), pp.1342-1345.
- (64) 荒木・久保, 電気伝導性セラミックスの熱物性値, 第6回日本熱物性シンポジウム講演論文集, (1985), p.89.
- (65) Binkele, L., Thermal Conductivity of Ceramic Materials under Helium as a Function of Temperature and Helium Pressure, High Temperatures -High Pressures, 15 (1983), pp.131-138.

謝 辞

本研究を遂行するにあたり、未熟な著者を励まし、終始暖かい御指導および御援助を賜りました豊田工業大学、小林清志学長に深く感謝の意を表します。

本論文の作成にあたりましては、東京大学生産技術研究所、棚澤一郎教授、ならびに東京大学工学部、小竹進教授、庄司正弘教授、東京大学生産技術研究所、吉識春夫助教授、西尾茂文助教授に有益な御助言、御教示を賜りました。深く感謝の意を表します。

また、研究遂行上いろいろと御助言をいただきました豊田工業大学、海野祐治助教授に感謝の意を表するとともに、実験の実施に際し多大な労を煩わせた伊丹和弘氏、中村良文氏、小西昌幸氏、川人義雄氏に厚くお礼申し上げます。

最後に、長い間精神的な支えを与えていただきました両親ならびに妻、久仁子に心から感謝いたします。

1990年 12月

高野孝義

発表論文

- [1] 小林清志・高野孝義, 熱定数迅速測定法の自動化に関する研究, 日本機械学会論文集, 48-434, B (1982), pp.2062-2069.
- [2] Kobayasi, K. and Takano, T., An Automatic Measuring Method of Thermophysical Properties for a Finite Disk Specimen, Heat Transfer Japanese Research, Vol.11, No.4 (1982), pp.82-97.
- [3] 小林清志・小山義成・高野孝義, 連続加熱による固相・液相の比熱及び融解潜熱の一貫測定法に関する研究, 第6回日本熱物性シンポジウム講演論文集, (1985-11), pp.61-64.
- [4] Kobayasi, K., Koyama, Y. and Takano, T., Study on a Simultaneous Measurement of Specific Heats of Solid and Liquid Phases and Latent Heat of Fusion by Continuous Heating, Proc. 1st Asian Thermophysical Properties Conference, (1986-4), pp.247-252.
- [5] 岸本隆・横山勝・高野孝義・小林清志, 多孔質材料の非定常熱物性測定における蒸気圧の影響, 第7回日本熱物性シンポジウム講演論文集, (1986-10), pp.135-138.
- [6] 車京玉・高野孝義・小林清志, 方形波パルス加熱によるセラミック誘電体の熱物性値測定, 第7回日本熱物性シンポジウム講演論文集, (1986-10), pp.215-218.
- [7] Kobayasi, K., Nakatani, K. and Takano, T., Determination of Thermal Conductivity of Solids at High Temperatures by the Optical Irradiation of a Single Rectangular Pulse, Proc. 1987 ASME-JSME Thermal Engineering Joint Conference, Vol.4, (1987-3), pp.297-302.
- [8] 高野孝義・小林清志, 加熱されたセラミックス面との衝突による液粒の蒸発に関する研究, 日本機械学会論文集, 53-488, B(1987), pp.1338-1343.
- [9] 高野孝義・小林清志, 方形波パルス加熱による高温域熱物性値測定法における試料表面の放射率について, 第8回日本熱物性シンポジウム講演

論文集, (1987-7), pp.109-112.

- [10] 高野孝義・小林清志, 加熱された溶射セラミックス被覆面に衝突する液粒の蒸発, 日本機械学会論文集, 54-503, B(1988), pp.1820-1825.
- [11] 高野孝義・小林清志・海野紘治, 方形波パルス加熱による高温域熱物性値測定法における試料表面処理法の影響について, 第9回日本熱物性シンポジウム講演論文集, (1988-9), pp.17-20.
- [12] 高野孝義, 加熱された溶射セラミックス被覆面に衝突する液粒の蒸発: 被覆層厚さの影響, 第28回日本伝熱シンポジウム講演論文集, 1 (1989-5), pp.259-261.
- [13] 高野孝義・小林清志, 加熱された溶射セラミックス被覆面に衝突する液粒の蒸発: 表面粗さの影響, 日本機械学会論文集, 55-515, B(1989), pp.2000-2005.
- [14] Takano, T., Nakamura, Y. and Kobayasi, K., Thermal Conductivity, Thermal Diffusivity and Specific Heat of Flame-Sprayed Ceramic Coatings, Proc. 2nd Asian Thermophysical Properties Conference, (1989-9), pp.297-302.
- [15] 高野孝義・藤田嗣広・小林清志, 加圧雰囲気下におけるセラミックス被覆加熱面に衝突する液粒の蒸発, 第27回日本伝熱シンポジウム講演論文集, 1 (1990-5), pp.154-156.
- [16] 小林清志・井上信明・高野孝義, 炭酸塩の固相、液相の比熱及び融解潜熱の測定(第2報), 第11回日本熱物性シンポジウム講演論文集, (1990-11), pp.231-234.
- [17] Takano, T. and Kobayasi, K., Vaporization Behavior of a Single Droplet Impinging on a Heated Surface with a Flame-Sprayed Ceramic Coatings, Heat Transfer Japanese Research, (1991). (掲載予定)

主な発表論文と各章との関係

第2章 [8]

第3章 [10], [17]

第4章 [12], [13]

第5章 [8], [10], [12], [13]

第6章 [1], [2], [7], [14]

