HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	液滴ラジエーターにおける液滴流の排熱特性
Author(s)	髙梨, 知広
Degree Grantor	北海道大学
Degree Name	博士(工学)
Dissertation Number	甲第13644号
Issue Date	2019-03-25
DOI	https://doi.org/10.14943/doctoral.k13644
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/74135
Type	doctoral thesis
File Information	Tomohiro_Takanashi.pdf

Hokkaido University Collection of Scholarly and Academic Papers : HUSCAP

北海道大学　大学院工学院　博士学位論文

液滴ラジエーターにおける液滴流の排熱特性

Exhaust Heat Characteristics of Liquid Droplet Stream for Liquid Droplet Radiator

北海道大学　大学院工学院　機械宇宙工学専攻

宇宙環境システム工学研究室

髙梨　知広

目次

記号一覧 2
図表目次 3
第 1 章　序章 5
1.1 宇宙と排熱 6
1.2 液滴ラジエーターについて 9
1.3 液滴ラジエーターに関する先行研究 10
1.4 液滴の放射率の取得方法 11
1.5 本研究の目的 13
第 2 章　低温下におけるふく射センサーの放射率の同定 14
2.1 はじめに 15
2.2 実験装置 18
2.3 実験手順 24
2.4 実験結果 25
2.5 黒色放射球の数値解析 27
2.6 実験結果および考察 35
第 3 章　液滴流の排熱特性の取得 37
3.1 単一液滴流の実験装置 38
3.2 実験手順 40
3.3 実験条件 41
3.4 実験結果および考察 43
3.5 単一液滴流の数値解析 46
3.6 結果および考察 49
第 4 章　結論 52
謝辞 54
参考文献 57

記号一覧

アルファベットおよびギリシャ文字

A	:	Surface Area	[m^2]
T	:	Temperature	[K]
ε	:	Emissivity	
σ	:	Stefan-Boltzmann constant	[$W/(m^2 \cdot K^4)$]
E	:	Energy	[W]
M	:	Particles to the RFS	
n	:	Particles from the objects	
V	:	Voltage	[μV]
S	:	Sensitivity	[$\mu V/(W/m^2)$]
θ	:	Horizontal surface angle	[rad]
φ	:	Vertical face angle	[rad]
R	:	Random number	
ΔP	:	Pressure difference	[MPa]
f	:	Frequency	[kHz]
γ	:	Initial radius of droplet flow	[m]
v	:	Velocity	[m/s]
κ	:	dimensionless wave number	

添字

1	:	Injection position
2	:	Injection direction
RFS	:	Radiant Flux Sensor
P	:	Particle

図表目次

Fig. 1 国際宇宙ステーション 7
Fig. 2 国際宇宙ステーションのラジエーターパネルに開いた穴 8
Fig. 3 液滴ラジエーターの概念図 9
Fig. 4 ふく射センサー外観 15
Fig. 5 輻射センサーの内部構造[18] 16
Fig. 6 シュラウド上に固定されたふく射センサー 17
Fig. 7 黒色放射球の実験装置外観 19
Fig. 8 黒色放射球の実験装置概略図 20
Fig. 9 シュラウド内壁面の様子 21
Fig. 10 シュラウド概略図 22
Fig. 11 黒色放射球外観 22
Fig. 12 分割時の黒色放射球概略図 23
Fig. 13 組み立て後の黒色放射球概略図 23
Fig. 14 実験 1 の温度履歴 25
Fig. 15 実験 1 のふく射センサー出力履歴 25
Fig. 16 実験 2 の温度履歴 26
Fig. 17 実験 2 のふく射センサー出力履歴 26
Fig. 18 黒色放射球の数値解析モデル 28
Fig. 19 エネルギー粒子の射出点座標決定モデル 29
Fig. 20 エネルギー粒子の射出方向決定モデル 30
Fig. 21 黒色放射球の数値解析のためのフローチャート 32
Fig. 22 アルミ蒸着ポリイミドフィルムの全半球放射率の温度依存性[24] 36
Fig. 23 単一液滴流の実験装置外観 38
Fig. 24 単一液滴流の実験装置概略図 39
Fig. 25 液滴生成ノズル形状概略 39
Fig. 26 単一液滴流の様子 43
Fig. 27 実験 3 の温度履歴 43
Fig. 28 実験 3 のふく射センサー出力履歴 44
Fig. 29 実験 4 の温度履歴 45
Fig. 30 実験 4 のふく射センサー出力履歴 45
Fig. 31 液滴流の数値解析モデル 46
Fig. 32 液滴流に対する数値解析のためのフローチャート 48
Fig. 33 無限遠排熱モデル 50

Table 1 ふく射センサー諸元 15
Table 2 黒色放射球の実験結果 27
Table 3 黒色放射球の数値解析における放射率，吸収率および反射率 34
Table 4 数値解析モデルと形態係数の比較 34
Table 5 黒色放射球の数値解析結果 35
Table 6 シリコーンオイルの物性値 42
Table 7 単一液滴流の実験条件 42
Table 8 実験 3 の結果 44
Table 9 実験 4 の結果 46
Table 10 ふく射センサーの放射率 49
Table 11 液滴の放射率 49
Table 12 実効放射率 50

第 1 章　序章

1.1 宇宙と排熱

人類は有史以来この世界を研究し様々な発見をしてきた．そして発見から物理法則を組み立て，それらを応用することで数々の機械システムを発明してきた．機械システムは基本的に運動エネルギーや電気エネルギーなどを使って動作する．熱力学第二法則よりエネルギーを用いて何らかの仕事を機械が行った時，エネルギーの一部は必ず熱エネルギーに変換される．そして変換された熱エネルギーは他のエネルギーに変換して再利用することはできず，廃熱として処理しなければならない．したがって機械システムには排熱機構が備わっていることが一般的であり，機械システムが巨大化するとともに排熱機構の効率が課題となってくる．

地球上での機械システムについて考えると，排熱は主に空気による対流熱伝達が用いられる．空気を冷媒とする空冷は，空気が地球上に普遍的に存在すること，加熱された空気は密度が低くなって上昇気流を発生させ熱交換部の空気入れ替えが容易なこと，ファンなどを使用して強制的に流れを作る場合でも構造が簡易なことなどから広く利用されている．液体を冷媒とする液冷も存在するが，機械から熱を受け取った液体を作動部から移動させ最終的に空気に熱を移動させる液冷空冷併用の仕組みが多い．現在世界で広く使われている自動車用エンジンやコンピューターなどは上記のような対流熱伝達による排熱システムを採用している．

近現代において科学技術が隆盛を極めると人類は地上を離れて空を飛び，さらに遠くの宇宙空間へ進出した．無人有人を問わず，宇宙空間，特に真空中での宇宙機にとっても排熱機構は必須のシステムである．真空中では大気を使った対流熱伝達による排熱は行えないため，ふく射を利用した排熱システムを開発しなければならない．現在地球低軌道を周回している国際宇宙ステーションのラジエーターシステムに注目して考えてみる．

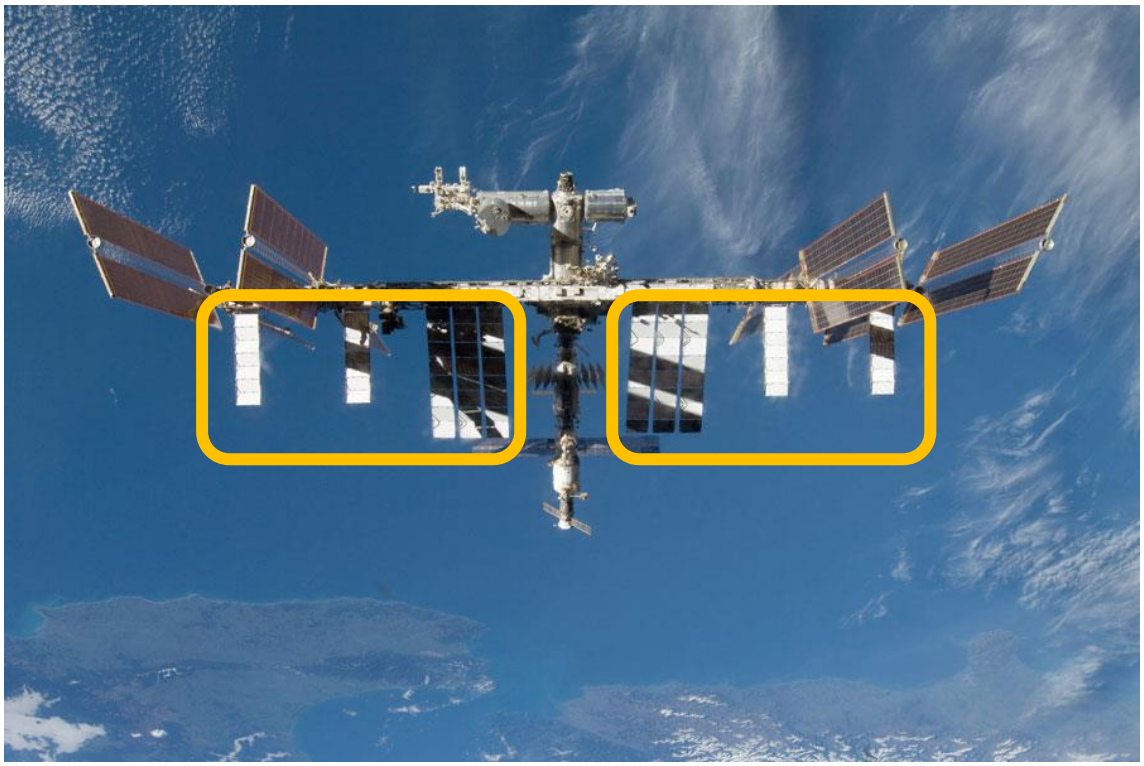


Fig. 1 国際宇宙ステーション

Fig. 1 は国際宇宙ステーションの全景を撮影した画像である[1]．枠で囲われたパネル群がラジエーターの放熱部である．国際宇宙ステーションではアンモニアを冷媒とした液冷と固体パネルからのふく射を併用した排熱システムを採用している．各部の廃熱を冷媒であるアンモニアが受け取り，配管を通して放熱部となる固体パネルまで運ばれる．アンモニアから固体パネルへ熱が移動し，固体パネルからふく射によって宇宙空間に排熱を行う．固体パネルは一枚 2.7 m ×3.4 m の大きさで 8 枚連なったビームが 10 本展開し運用されている．太陽光発電パネルとともに国際宇宙ステーションの構造体の中で大きな割合を締めているのが Fig. からわかる．1998 年の最初の構成要素打ち上げから 20 年が経過した国際宇宙ステーションであるが，Fig. 2 のように極小隕石や軌道上デブリの衝突によりラジエーターの固体放熱パネルが損傷したケースが NASA から報告されている[2].

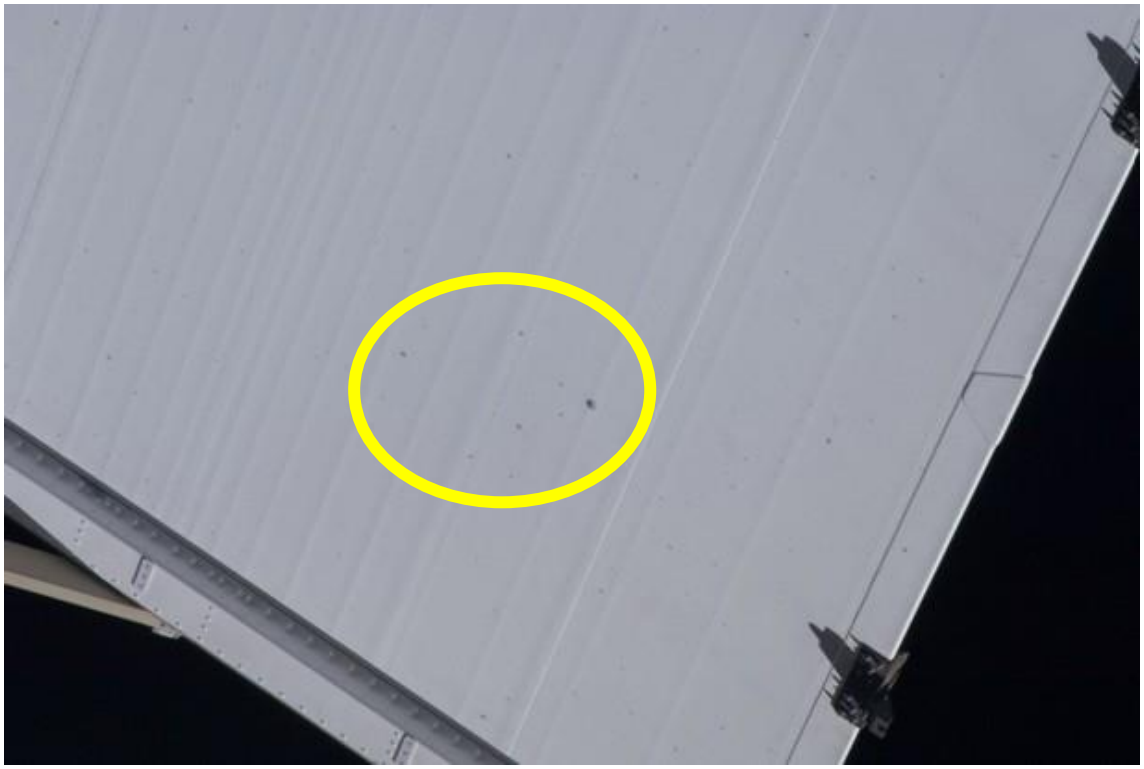


Fig. 2 国際宇宙ステーションのラジエーターパネルに開いた穴

また固体放熱部の故障により作動流体のアンモニアが漏出した事例も存在する．冷媒であるアンモニアの漏出が続けばラジエーターが排熱能力を失い，国際宇宙ステーションが機能不全に陥る可能性もある故障であった．この故障の際には星出宇宙飛行士が船外活動によって故障したビームの機能を停止し，予備のビームを展開して対応している[3].

上記のように固体パネル型のラジエーターには極小隕石あるいは軌道上デブリの衝突による放熱部破損のリスクが存在する．また損傷の監視および故障への対応には現状では宇宙飛行士による船外活動が必要となり維持および管理コストが高くなっている．今後人類の宇宙進出が更に活発になり宇宙機が大型化していくと排熱機構も巨大化していき前述の課題に対して現状の固体パネル型ラジエーターの改良だけでは対応できないと考えられる．そこで固体パネル型ラジエーターの弱点を克服し大型宇宙機に対応した排熱システムとして研究が進められているのが液滴ラジエーターである．

1.2 液滴ラジエーターについて

作動流体を液滴流として宇宙空間に暴露し，液滴表面からのふく射によって排熱を行うのが液滴ラジエーターである．液滴ラジエーターの概念図を Fig. 3 に示す．

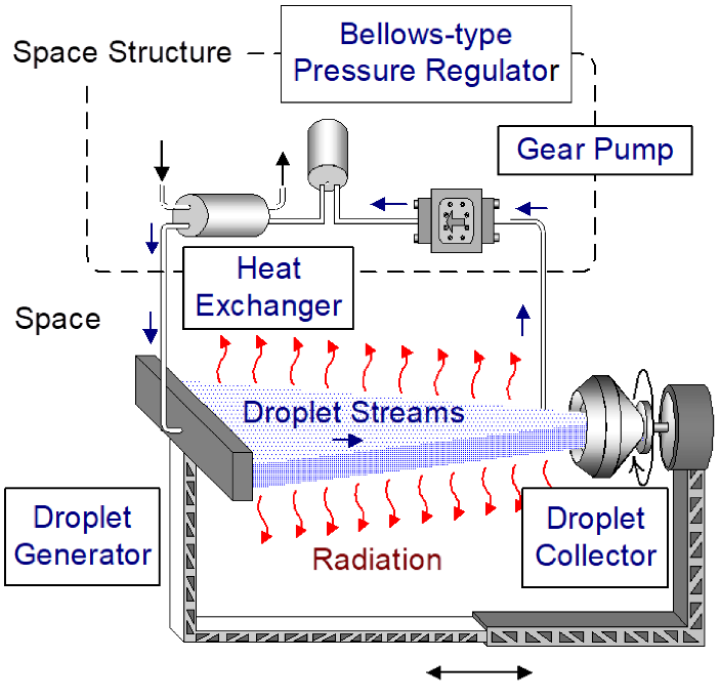


Fig. 3 液滴ラジエーターの概念図

液滴ラジエーターでは熱交換器によって廃熱により高温になった作動流体が液滴生成器に送られ，多数のノズルから微小な液滴として宇宙空間に直接射出される．ノズルから断続的に射出された液滴は液滴流となり，放熱部は液滴流が列をなした液滴シートを形成する．真空である宇宙空間で液滴一つ一つからふく射によって排熱が行われる．排熱後の冷えた液滴流は液滴回収器によって集められ，ギアポンプによって再び熱交換器に送られてラジエーター内を循環するサイクルを繰り返す．固体パネルなどの放熱部材を廃し，液滴から直接ふく射によって排熱することで作動流体と宇宙空間との間の伝熱抵抗を最小限に抑えることができる．放熱部材が存在しないということは極小隕石あるいは軌道上デブリの衝突の際はごく少量の作動流体損失だけで済み，故障リスクが著しく小さくなる．先行研究では作動流体を追加せずとも 30 年間作動できる設計寿命が可能であると試算されている[4]．このことは従来型の固体パネル型ラジエーターに比べて維持および管理コストが低くなることに加え，宇宙飛行士の船外活動によるメンテナンスが少なくなるメリットがある．また少ない構造部材で建造が可能なので打ち上げ時のコストも低減できる．先行研究では固体パネル型ラジエーターと液滴ラジエーターの単位重量あたりの排熱量における比較もされて

いる[5]．その結果従来型のラジエーターが 0.2 kW/kg なのに対して液滴ラジエーターでは 1.4 kW/kg という約 7 倍程度の排熱効率上昇を達成できる可能性が示唆された．宇宙機の廃熱は作動させる機器の種類や数によって時間とともに変化するが，液滴ラジエーターではノズルの数や液滴生成器と回収器との距離を制御することによって放熱部の液滴シート面積を変化させ，排熱量を調節することも可能である．

昨今盛んに研究開発が行われている宇宙太陽光発電衛星などでは国際宇宙ステーションの 1000 倍近くにあたる MW から GW 級の発電量となることが予想されており，排熱システムはこれまで以上に高効率化が求められることになる．前述のような特徴を持った液滴ラジエーターはこれからの宇宙開発において活躍する可能性のあるシステムであり実現のための研究開発が進められなければならない．

1.3 液滴ラジエーターに関する先行研究

液滴ラジエーターは 1980 年代からその設計概念が研究され始めた．これまでに NASA グレン研究所，南カリフォルニア大学，ジェノバ大学および電子技術総合研究所（現：産業技術総合研究所）などにおいて，作動条件によるラジエーター重量などを試算したシステム解析[5][6]，液滴シートによる放熱量の計算に関する研究やスペースシャトルでの使用を想定した研究[7]，液滴ラジエーターを用いた太陽熱発電モジュールの研究[8]などが行われている．北海道大学では 6.3 MW の排熱を行うことが可能な液滴ラジエーターを検討している[9]．さらに主要要素の研究として液滴生成器および液滴回収器の研究が挙げられる．液滴生成器については，液滴射出部のノズル形状，製造技術および均一液滴流生成の諸条件に関する研究がある[10][11][12]. 液滴回収器については遠心力を利用して作動流体をギアポンプまで送ることができる構造の研究や液滴が壁面に衝突した際の挙動に関する研究などがある[13]．また液滴ラジエーターの主要要素である液滴生成器，液滴回収器，ギアポンプおよびベローズ式レギュレーターの 4 要素を連結し，地上での通常重力下における循環作動に成功し，作動流体を自律制御する条件が明らかにされた[14].

上記のように液滴ラジエーターの設計概念や主要要素の検討および研究開発については数々の先行研究がある．しかしながら液滴ラジエーターを実現させようとした際に設計に必要となる作動流体の排熱特性に関する研究はほとんど行われていない．液滴ラジエーターを設計するときに重要となるのは，放熱部においてどの程度の液滴個数および液滴シート面積であれば想定される廃熱量を処理できるかを正確に見積もることである．これを達成するためには使用が想定される作動流体の液滴形状時の放射率および液滴流全体を一つの物体とみなした時の実効放射率に関するデータが必要不可欠である．

Mattick らは使用温度範囲による作動流体の物性値を用いた選定を行っている[4]．さらに同論文では，数値解析を用いて液滴の放射率，液滴シートの実効放射率およびふく射の透過しにくさの指標となる光学厚さの関係を明らかにしている．しかしながら物性値には放射

率が含まれておらず，数値解析結果は実験的には検証がなされていない．一方，大谷らは実験によって液滴シート状の平行液滴流からの排熱量を測定し，排熱量を計算するモデル式を提案した．大谷らの実験では平行液滴流射出前の作動流体の温度と液体窒素によって冷やされた実験装置を通過して放熱した後の作動流体の温度を計測し，それらの差から排熱量を求めている[15]．しかしこの手法では液滴流からのふく射伝熱を直接計測できておらず，実験装置から液滴流への入熱が考慮されていない．また放熱後の作動流体温度を実験装置下部に設置された液滴回収器での計測温度を用いているため，実際には回収器部分でも入熱が存在すると考えられ，液滴流の排熱量を正確に測定できているとは言えない．計算モデル式に関しても液滴シート厚み方向からのふく射を無視し，液滴シート内部における伝熱状況を十分に考慮できていないため実験値との乖離が見られる．

1.4 液滴の放射率の取得方法

1.3 項で述べた大谷らの実験の欠点を回避してより厳密にふく射伝熱量を測定し，液滴の放射率を取得するための手法について考える．物体の放射率を測定するにはカロリーメータ法を用いた実験，FT-IR 装置やサーモグラフィーを用いた実験が考えられる．

カロリーメータ法を用いた実験[16]では液体窒素の中に試料を入れた容器を投入する．シートヒーターによって試料の温度を調節し平衡状態になったときの熱収支から試料の全球放射率を計算する．比較的小型で固体の物体に用いられる方法であるが，液体の放射率の測定には適さない．また本研究では液滴の放射率を求めることが目的であるため，カロリーメータ法による実験装置では作動流体を液滴あるいは液滴流として生成しながら放射率を測定するのは非常に困難である．

液体の放射率測定は薄膜の生成や熱の制御の点が非常に難しい．地球上で代表的な液体である水であっても放射率は 0.9 以上であるという報告がなされている一方でどれも実験条件が明瞭でなく十分に確かさのあるデータ取得の困難さが伺える[17]．液滴の放射率測定のために FT-IR の使用を想定した場合，計測時に液体が数 mm オーダーの厚みを持ってしまうと想定されている直径約 $100\,\mu$m の液滴と比較して透過率等の光学特性が変化すると考えられることから適切ではない．その問題を回避するために透過率の高い物質で液体を挟み込み厚さを小さくしたとしても，液膜厚さの調整の難易度が高いこと，容器の光学特性の影響を完全には排除できないことや先述のような容器そのものの入手が困難なことから，総じて FI-IR での液滴の放射率測定は困難であると言える．

サーモグラフィーは放射率が既知の物体の温度を測定する使用法が一般的であるが，対象物の温度が正確に測定できている場合，放射率を逆算することが可能である．しかしながら液体の放射率を測定するにはガラス容器などを用いる必要があり，その場合にガラス容器の透過率が測定に影響を及ぼしてしまう．また大気中で測定すると大気の放射の影響を受け正確な測定は困難である．真空チャンバー内にサーモグラフィーを設置しようとする

と装置全体が大型化および複雑になってしまうため現実的とは言えない.

ふく射センサーを使用する場合は，センサーが小型の薄膜であることから真空チャンバー内に容易に設置可能であり，実験装置を小規模に設計することができる．真空環境下での実験が可能となり大気の影響が排除できると，次は真空チャンバーを始めとした実験装置自体からのふく射，すなわちバックグラウンドからのふく射の影響が問題になる．この影響を最小限にするには壁面を液体窒素で冷却したシュラウドを真空チャンバー内部に設置するという方法が最適である．ふく射のエネルギーは絶対温度の 4 乗に比例するため，冷却されたシュラウド内壁にふく射センサーを設置し，液滴流を通過させるようにすればバックグラウンドからのふく射の影響を最小限に抑えて液滴流からのふく射を直接計測することができる.

ふく射センサーを使用して取得した実験結果はそれだけでは液滴流のみのふく射量を示すものにはならない．なぜならば液滴流がバックグラウンドからのふく射を一定量吸収してしまうからである．したがって得られた実験結果からバックグラウンドからのふく射の影響を取り除く必要がある．2 物体間のふく射伝熱状況に関する係数である形態係数を用いて解析的に実験装置内のふく射伝熱を解くのは非常に困難である．そこで数値解析を用いて数値的に液滴流およびバックグラウンドからのふく射伝熱を解くことで，その結果から実験結果を分析することが可能となる．一方，数値解析のみで液滴流からの排熱のモデル化を試みた場合，液滴の放射率が不明であるため液滴 1 個からのふく射エネルギーを設定できない．また液滴間の伝熱モデルが現実に即しているか判断できないため，液滴流からの排熱量を求めるには実験と数値解析の併用が必要となる.

1.5 本研究の目的

これまで述べてきたように液滴の放射率を求めるには，ふく射センサーを用いた液滴流からのふく射の直接測定と，実験装置内部のふく射伝熱状況を模擬した数値解析を行う必要がある．これらの実験と数値解析を行うにあたりふく射センサーの放射率が重要になってくるが，冷却されたシュラウド内壁面にふく射センサーを設置するためにふく射センサーの放射率が常温で測定されたカタログ値から変化する可能性が考えられた．したがって液滴流からのふく射を測定する前にふく射センサーの低温環境下でのふく射率を測定する必要がある．また現象を単純化し液滴の放射率を求めやすくするため，本研究では液滴流として液滴が一列に並んで流れる単一液滴流を選択した．

以上より，本研究の目的を以下のように定める．

・低温環境下におけるふく射センサーのふく射率を明らかにする．

・実験と数値解析から単一液滴流の排熱量を求め，その結果から液滴の放射率を取得する．

・液滴の放射率を用いて液滴流の排熱モデルを確立する．

第 2 章　低温下におけるふく射センサーの放射率の同定

2.1 はじめに

本研究の最終的な目標は液滴の放射率を求め，液滴流の排熱特性を明らかにすることである．序論で述べた通り上記の目標を達成するため，構造が簡素で実現可能な実験装置としてふく射センサーを用いる手法を考案し製作した．用いたふく射センサーは Captec 社製 RF-100 で外部からセンサーに投射されるふく射熱とセンサーから外部に投射されるふく射熱の差に比例した電圧を出力するものである．その外観を Fig. 4 に，諸元を Table 1 に示す．

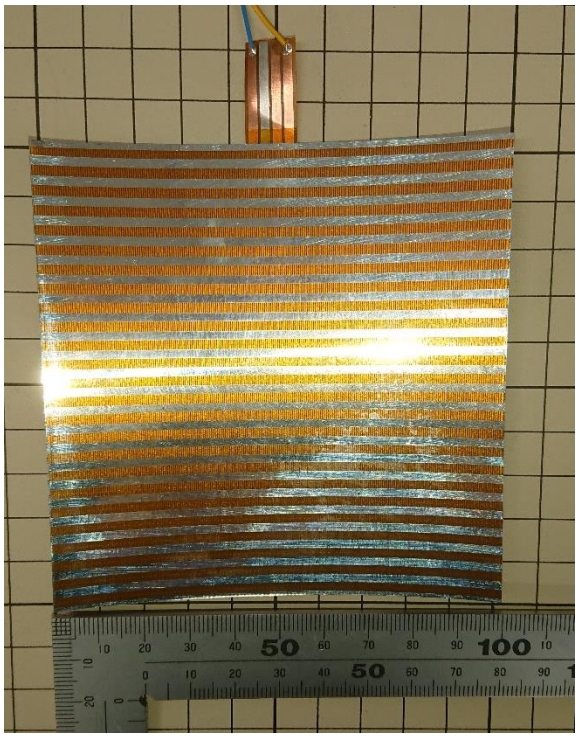


Fig. 4 ふく射センサー外観

Table 1 ふく射センサー諸元

サイズ [mm×mm]	100×100
厚み [mm]	0.3
感度 [μV/(W/m^2)]	18.7
放射率（室温） [-]	0.8
測定精度 [%]	±3

100 mm×100 mm の正方形でポリイミドフィルムを母材とした熱吸収フィルム上にアルミニウムを蒸着し，そのアルミ蒸着の面積を変更することによって表面の放射率を指定値に調整している．本実験装置ではカタログ値で放射率が 0.80 のものを採用した．ふく射センサーの内部構造は Fig. 5 のようになっている．

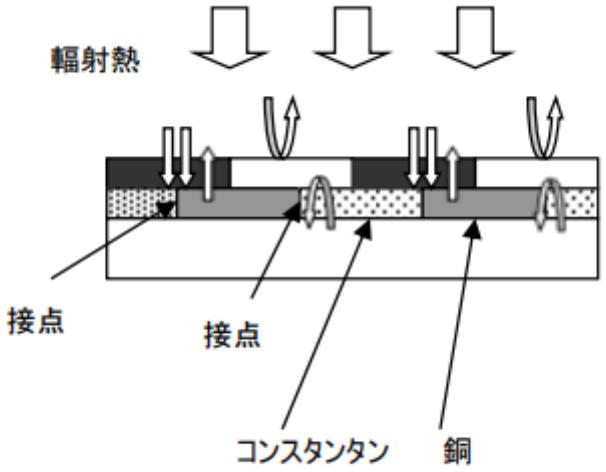


Fig. 5 輻射センサーの内部構造[18]

輻射センサー表面の吸熱フィルムには，反射板が一定間隔で蒸着されており，輻射熱のみがサーモパイルの各接点に温度差を発生させ，センサーに起電力が生じる．対流熱は一様にセンサーの内部に伝わり，熱電対（銅－コンスタンタン）の各々の接点に温度差は生じない．輻射センサーの出力電圧は、輻射熱流束による熱収支（外部からセンサーに投射される輻射熱とセンサーから外部に投射される輻射熱の差）に比例する[18][19][20].

ふく射センサーは実験装置自体のふく射を抑えるためのシュラウドに Fig. 6 のように固定されている．半径 50 mm の曲率を持ったシュラウド内壁面に両面テープ(3M 966)でふく射センサーを貼り付け，さらにステンレス製の押さえで 4 辺を覆ってネジ締め固定している．ステンレス製の押さえは 1 辺あたり 5 mm の幅を覆っている．ふく射センサー中心部には表面温度測定のための白金抵抗測温体を両面テープとアルミ蒸着フィルムで固定している．

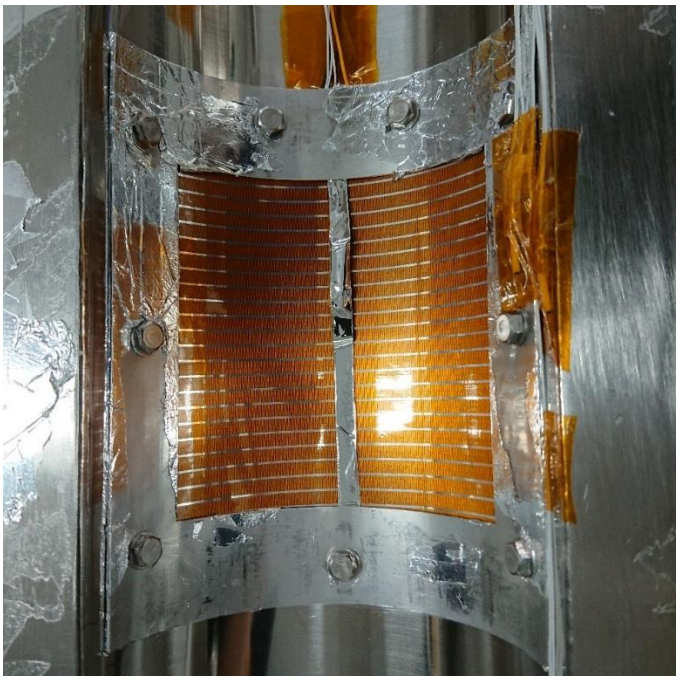


Fig. 6 シュラウド上に固定されたふく射センサー

シュラウドは液滴窒素によって-196℃付近まで冷却されるため，直接シュラウドに接しているふく射センサーは同様の温度まで冷却される．一般的に物質は温度が低くなるに従って放射率も低下するため，常温環境下で設定されたふく射センサーの放射率が冷却によって低下することが予想された．本研究の手法では液滴の放射率を求めるための数値解析プログラム内で，実験装置を模擬するためふく射センサーの放射率が必要である．したがって液滴の放射率を測定する前に低温下でのふく射センサーの放射率を同定する実験を行った．

FT-IR など既存の装置では液体窒素の沸点-196℃付近の物質の放射率を測定するのは困難である．過去の文献などを調査しても-100℃を下回る低温下での放射率測定は多くは行われていないのが現状である．そこで本研究では液滴流の排熱測定でも使用できるシュラウドを内蔵した実験装置を用いることによってふく射センサーの放射率を取得する手法を考案した．

本手法では実験装置の内部に放射率が既知の物体を置き，未知のパラメーターをふく射センサーの放射率のみにする．数値解析中のふく射センサーの値を変化させて計算を行い，実験結果と数値解析結果が一致したときの値が低温下におけるふく射センサーの放射率となる．ふく射センサーの放射率を同定するための実験装置では真空チャンバーの中にシュラウドが設置され，シュラウド内壁面にふく射センサーをステンレス製の押さえで固定している．ふく射センサー以外のシュラウド内壁面はアルミ蒸着フィルムで覆われているため放射率は低く抑えられており既知である．そこに表面を黒色酸化皮膜加工した球体を設置した．以降この球体を黒色放射球と呼称する．

2.2 実験装置

Fig. 7 に実験装置外観図，Fig. 8 に概略図を示す．装置は主に真空チャンバー，シュラウドおよび黒色放射球から構成されている．実験中は真空チャンバー内部圧力が 100 Pa 以下になるように真空ポンプによって真空引きしている．シュラウドは Fig. 9 のように円筒を長軸方向に分割したような形状のパーツになっており，それらを組み合わせて円筒の空間を形成している．シュラウド内側の直径は 100 mm，長軸方向の長さは 700 mm である．温度を計測するための白金抵抗測温体(1Pt100 KN 0815)がシュラウドのそれぞれのパーツ内壁面の上端部，中央部および下端部に 1 つずつ両面テープおよびカプトンテープによって固定されている．したがってシュラウド内壁面の温度計測点は合計で 6 点となる．真空チャンバー由来のふく射の侵入をできる限り防ぐためシュラウド上端面および下端面にはアルミ板の蓋がネジ締結によって固定されている．これらの蓋は第 3 章で述べる単一液滴流の実験で使用する蓋と同じ物であるため，液滴流通過用の穴が空いている．穴の直径は上端面の蓋が 10 mm，下端面の蓋が 20 mm である．上端面の穴については黒色放射球を吊るすためのワイヤーを通すための役割も担う．上下の蓋にはそれぞれ白金抵抗測温体が 1 つずつシュラウド内壁面と同様に貼り付けられている．真空チャンバー内の圧力を計測するための圧力センサーおよびシュラウド温度計測用の白金抵抗測温体はロガー(Keyence NR-1000)に接続されている．白金抵抗測温体およびふく射センサーは真空チャンバーの壁に取り付けられている電流導入端子によってチャンバー外側との配線が可能になっている．シュラウドは上部に突きだした配管が真空チャンバー上端のフランジを介してチャンバー外側まで伸びている．したがってシュラウド壁内部の空間は配管を通じてチャンバー外側の空間と繋がっており，チャンバー内側の真空環境とは切り離されている．この配管と液体窒素タンクをフレキシブルホースで接続することによって，シュラウド壁内部に液体窒素を充填し，シュラウド壁面を冷却することができる．ふく射センサー(Captec 社製 RF-100)はシュラウド片側の長軸方向における中心位置に固定されている．ふく射センサーの出力値はロガー(KEITHLEY 2000MULTIMETER)によって読み取られる．ふく射センサーの放射率は 26℃において 0.8 となるように製造されている．出力感度については 18.7 μV/(W/m^2)でセンサーの温度によらず一定である．ふく射センサー出力値は 3%の測定誤差を含む．ふく射センサー部を除くシュラウド内壁面および上下の蓋にはアルミ蒸着フィルムが貼り付けられており，シュラウドおよび蓋からのふく射を限りなく小さく抑えている．

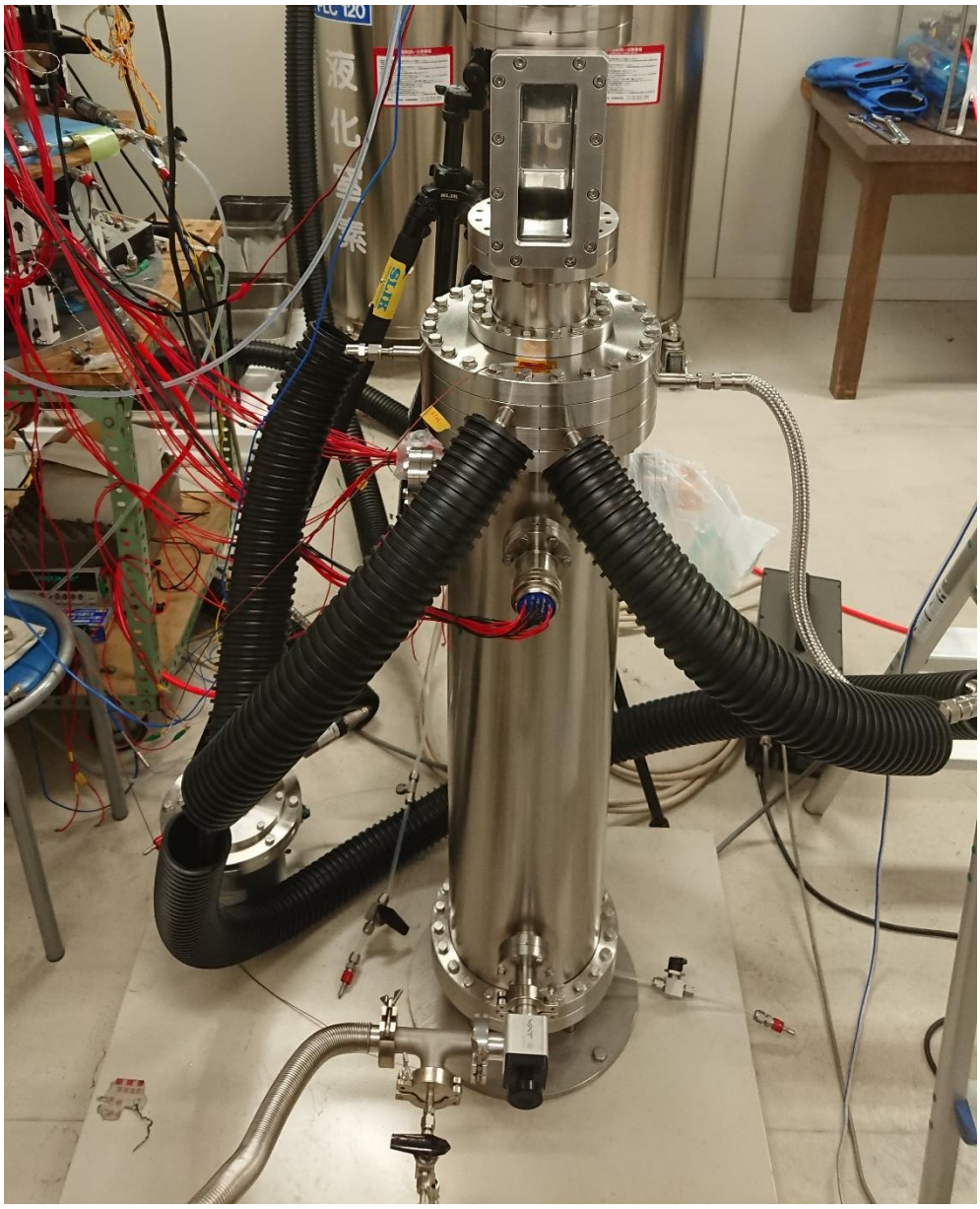


Fig. 7 黒色放射球の実験装置外観

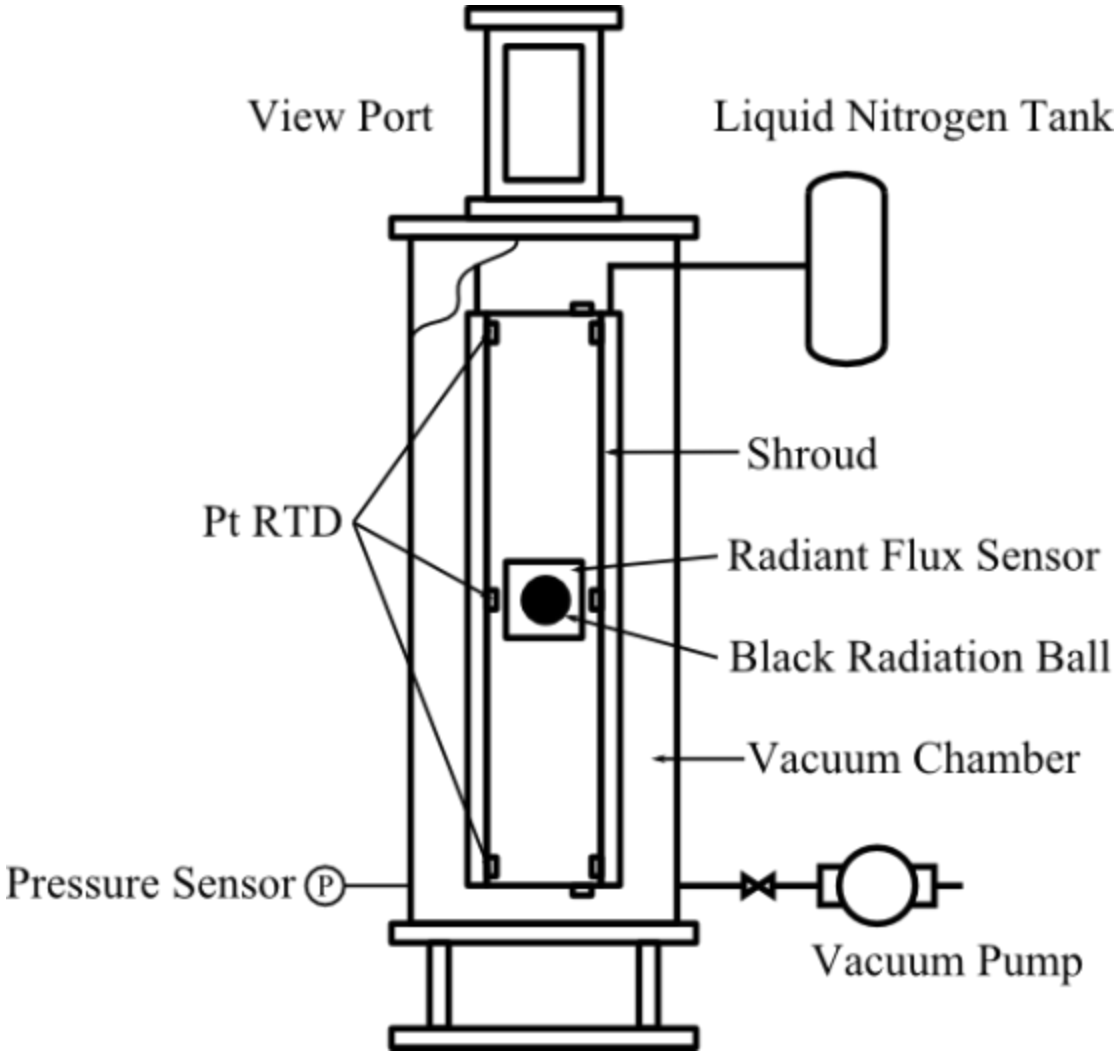


Fig. 8 黒色放射球の実験装置概略図



Fig. 9 シュラウド内壁面の様子

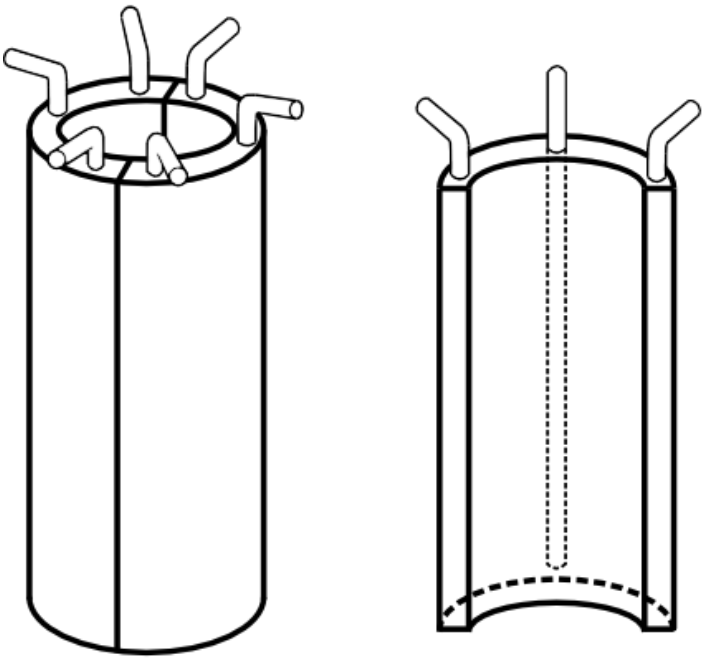


Fig. 10 シュラウド概略図

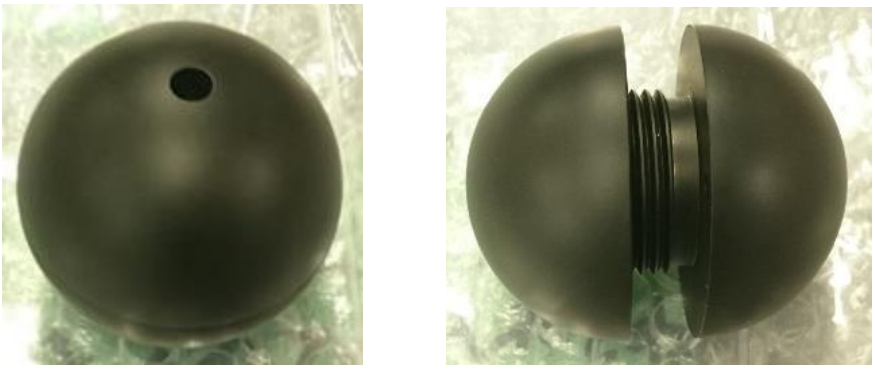


Fig. 11 黒色放射球外観

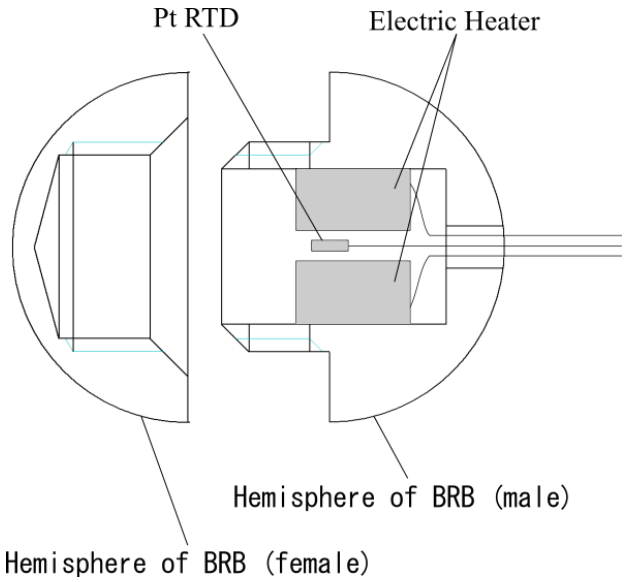


Fig. 12 分割時の黒色放射球概略図

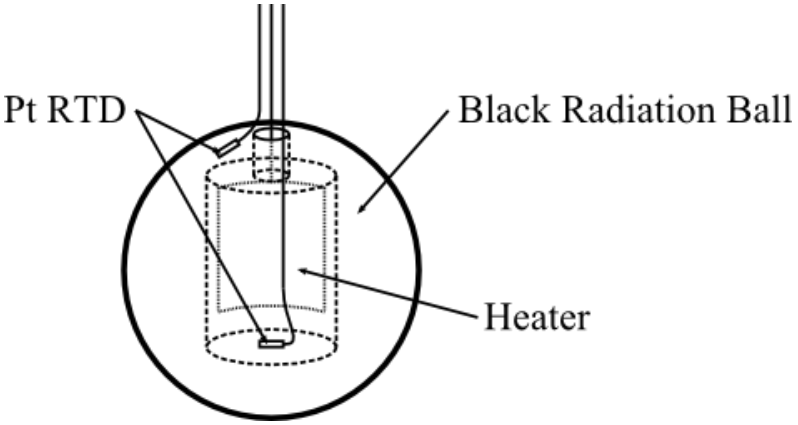


Fig. 13 組み立て後の黒色放射球概略図

黒色放射球は Fig. 11，12 および 13 のような構成となっている．ネジが切られた半球状のステンレス製部品に円柱状の溝が設けられており，2 つのパーツを組み合わせると内部に円柱状の空間が存在する直径 50 mm の球体となる．内部の空間は直径 22.2 mm，高さが 33.1 mm である．材質はステンレスであるが放射率を高くするために表面を黒色酸化皮膜加工している[21]．黒色酸化皮膜加工は鉄材を苛性ソーダに浸し約 140℃で加熱することで表面を四酸化三鉄で覆う表面処理技術である．皮膜の厚さは 1 μm ほどなので公差の範囲内で寸法に大きな影響を与えない．FT-IR (Thermo Scientific Nicolet iS50[22])によって放射率 0.98 の金をバックグラウンドとして使用した計測で，表面温度 26℃のとき放射率は 0.66 と判明している．FT-IR では試料に赤外光を照射して反射させ反射スペクトルを計測する．黒色放射球は不透明体であるため透過率 0 としキルヒホッフの法則に従って 1 から反射率を引いた値

が放射率となる．本実験では放射率はプランクの法則に則り 2.5 から 10 μm の波長で実測し計算された数値である．黒色放射球内部の空間の壁面にはシートヒーターが 2 枚貼り付けられており，底面には白金抵抗測体が 1 つ固定されている．それらの配線は黒色放射球上部に空いている直径 5 mm の穴から外部に伸びている．また黒色放射球上部穴付近に表面温度計測用の白金抵抗測温体が取り付けられている．黒色放射球を吊り下げるため直径 2 mm のステンレスワイヤーの一端が黒色放射球内部空間で固定されており，上部の穴を通ってシュラウド上端の蓋まで伸びている．ワイヤーは上端蓋の穴を通ってステンレス棒に固定されている．シュラウドに固定されている白金抵抗測温体などと同様に黒色放射球のヒーターおよび白金抵抗測温体も電流導入端子を介して真空チャンバー外部と接続されている．ヒーターは変圧器に接続されている．黒色放射球の放射率は 26℃の時の値を測定しているため，実験も黒色放射球の温度を 26℃に保っている間を計測範囲とした．本研究では上記の実験条件設定において再現性を確認するため同一条件の実験を 2 回行った．

2.3 実験手順

実験手順を以下に示す．

(1) 真空チャンバーの圧力を 100 Pa 以下になるまで真空引きする．真空引きは実験終了まで継続する．

(2) ロガー(Keyence NR-1000)による白金抵抗測温体の出力値の記録を開始する．

(3) 液体窒素タンクにフレキシブルを接続し，シュラウド壁内部に液体窒素の供給を開始する．

(4) 白金抵抗測温体の出力値によってシュラウド内壁面全体が-190℃以下まで冷却されたことを確認した後，変圧器を接続して電圧をかけ黒色放射球をヒーターによって加熱する．

(5) BRB の表面温度が 26℃に到達したら，その温度を維持するよう変圧器を操作し続ける．ふく射センサーの出力値をロガー(KEITHLEY 2000 Multimeter)によって 5 分間記録する．

(6) ふく射の測定が完了したら黒色放射球のヒーターへの電力供給を終了し，液体窒素の供給も止める．

手順(3)から実験終了までの間は白金抵抗測温体の出力値に注意し，シュラウド内壁面温度が低温に保たれるように液体窒素の供給量を調整する必要がある．

2.4 実験結果

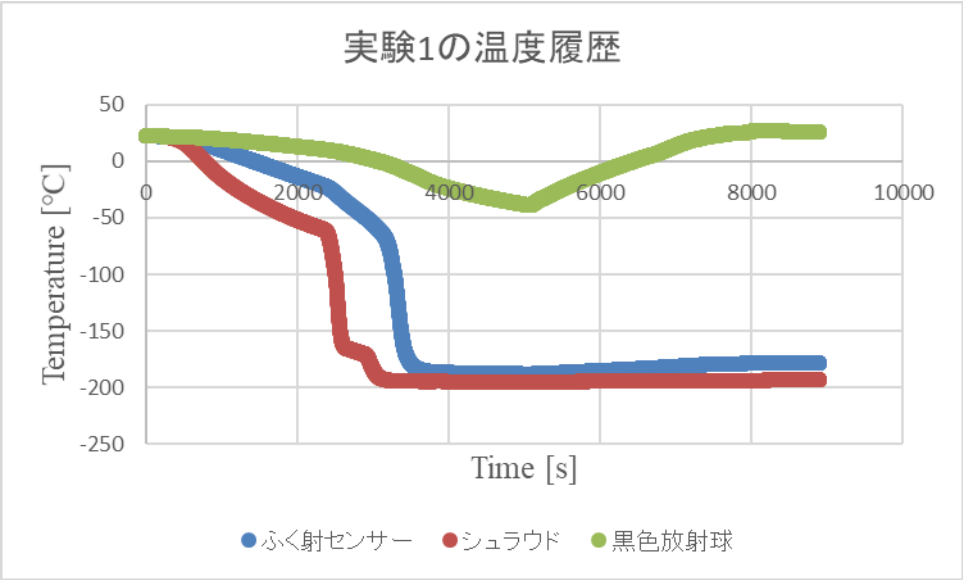


Fig. 14 実験 1 の温度履歴

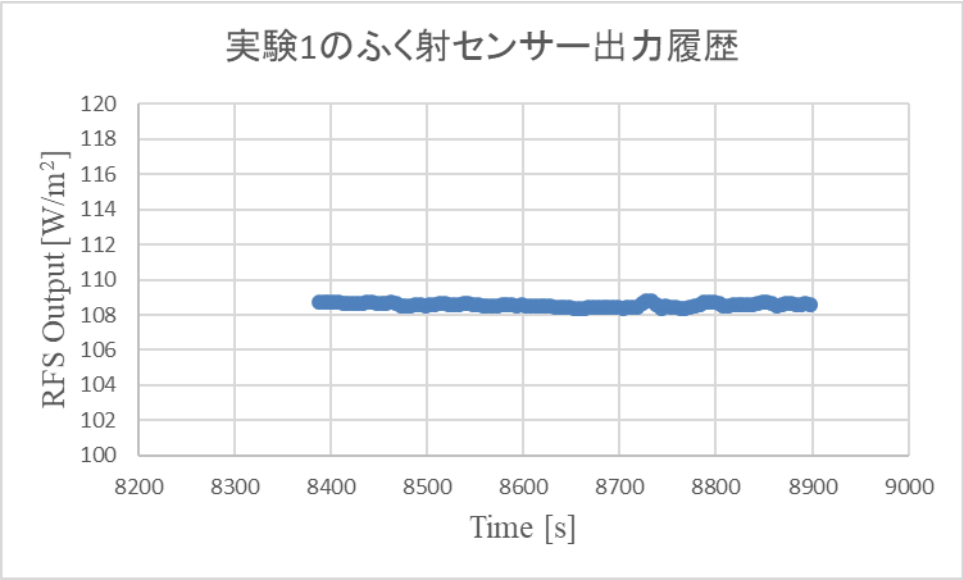


Fig. 15 実験 1 のふく射センサー出力履歴

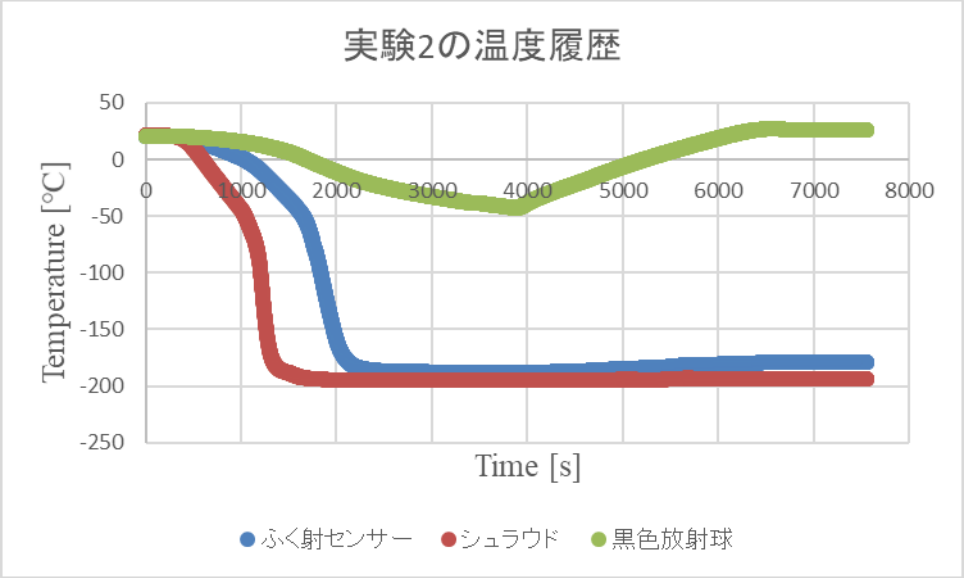


Fig. 16 実験 2 の温度履歴

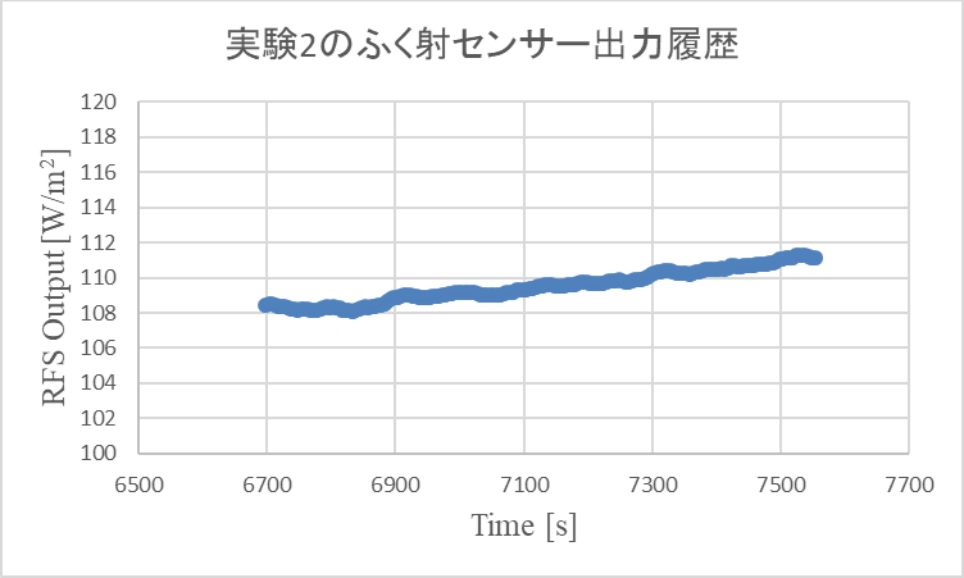


Fig. 17 実験 2 のふく射センサー出力履歴

Table 2 黒色放射球の実験結果

	Shroud [℃]	RFS [℃]	RFS output [W/m^2]
Experiment 1	-193	-179	109
Experiment 2	-193	-178	110

Fig. 14 に実験 1 の温度履歴，Fig. 15 にふく射センサーの出力履歴を示す．同様に Fig. 16 に実験 2 の温度履歴，Fig. 17 にふく射センサーの出力履歴を示す．実験 1 では実験開始から 8000 秒付近から，実験 2 では 6500 秒付近から黒色放射球の表面温度が安定しているのがわかる．また出力履歴も安定していることがわかる．実験 2 の出力は上昇傾向に見えるがその差は 1%未満であり十分に安定していると言える．Table 2 は黒色放射球を用いた 2 回の実験結果を示している．表中の数値は黒色放射球の表面温度を 26±0.4℃で 5 分間安定させた時の平均値である．シュラウドの平均温度からどちらの実験でもシュラウド壁面が十分に冷却されていることが確認できる．ふく射センサー温度は壁面温度までは到達していないが，低温に冷却されていることが確認できた．両者ともに標準偏差は 0.1℃未満であったため，一定の温度状態で安定していたと考えられる．ふく射センサーの表面温度が-190℃以下にならなかったのは黒色放射球からのふく射によって温められたことが原因と考えられる．ふく射センサーの変換後の出力は実験 1 と 2 でそれぞれ 109 W/m^2，110 W/m^2 となった．これらの出力値には±3%の測定誤差が含まれている．同一条件下での実験として十分な再現性がある結果となった．

2.5 黒色放射球の数値解析

i. モンテカルロ法

本研究で行う数値解析では，モンテカルロ法を用いて物質からのふく射伝熱をシミュレーションする．モンテカルロ法とは乱数を用いて素過程の解を求め，多数の素過程の結果を合成してマクロ的な物理現象を記述する数値計算手法である[23]．素過程の数が多い，すなわち解を得る試行回数が多いほど誤差が少なく，対象となる物理現象と異なる解になる確率を低くすることができる．数値解析の計算時間を非常に長く取ることができればそれだけ誤差を少なくすることができるが，実際にはコスト等の問題から現実的な計算時間の中で十分な確度を持った解を得られるように試行回数を決定しなければならない．本研究では物質からのふく射伝熱がマクロ的な物理現象に相当する．物体表面の任意の一点からのふく射について考えた時，ふく射のエネルギーは空気中を伝わる音波のように一点から広がりを持って空間を伝わっていく．この時のふく射エネルギーの広がり方は後述するランベルトの余弦法則に従うが，数値解析ではエネルギーの広がり方を素過程に分割し再現する必要がある．本論文中で使用した数値解析モデルではふく射エネルギーを多数のエネル

ギー粒子の運動と置き換える．エネルギー粒子 1 個の運動を素過程とし，その挙動を計算してエネルギー粒子の到達点を求める．この試行を繰り返すことによって得られる素過程の結果を合成すると物体表面から放射されるふく射エネルギーの伝熱状態を知ることができる．

ii. 数値解析モデル

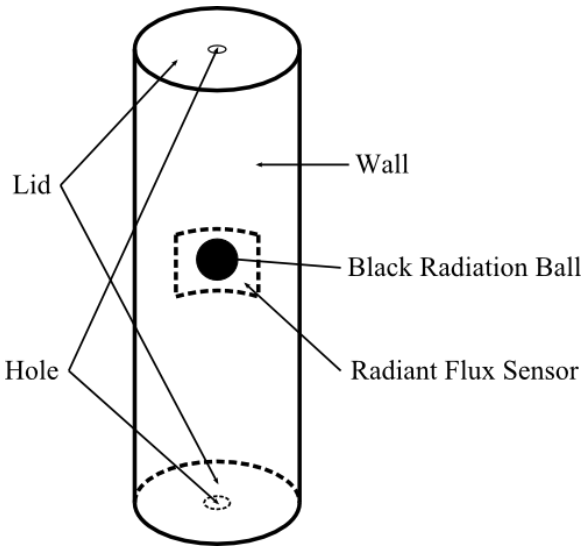


Fig. 18 黒色放射球の数値解析モデル

黒色放射球の実験装置を模擬したモデルを Fig. 18 に示す．シュラウド内壁面を模した円筒は直径 100 mm，長さ 700 mm で実験装置と同じ寸法である．上下面には実験装置の穴を再現しており上端面の穴は直径 10 mm，下端面の穴は直径 20 mm である．ふく射センサーはその中心点がシュラウド壁面の長軸方向中心と一致するように配置されている．実際の実験装置を考慮してフレーム部と中心抑え部分の面積は除外しているため数値解析上のふく射センサー面積はとなる．黒色放射球はシュラウドと同軸上でその中心点が長軸方向中心と一致するように配置されている．実際にはケーブルが存在するが他の部品に比べて細く，MLI で巻かれているため数値解析では影響が小さいとして無視した．

iii. 射出点の決定

Fig. 19 に黒色放射球表面におけるエネルギー粒子の射出点座標を決めるためのモデルを示す．O は黒色放射球の中心点，a は射出点である．ここで黒色放射球の半径を r，Oa と z 軸のなす角を φ_1，Oa を xy 平面に投影した線と x 軸とのなす角を θ_1 とすると座標 a は極座標系を用いて以下のように表される．

$$a(x, y, z) = (r\sin\varphi_1\cos\theta_1, r\sin\varphi_1\sin\theta_1, r\cos\varphi_1) \qquad (1)$$

黒色放射球は表面からあらゆる方向にふく射を発生している．これをモンテカルロ法に則

って表現するには乱数を用いて射出点をランダムに決めてやれば良い．そこで 0 から 1 の間の実数を取る乱数 R を用いて φ_1 および θ_1 を以下のように定める．

$$\varphi_1 = \pi R_{\varphi_1} \quad (2)$$

$$\theta_1 = 2\pi R_{\theta_1} \quad (3)$$

エネルギー粒子の射出点を決める際には乱数 $R\varphi_1$ および $R\theta_1$ をそれぞれ生成し角度を決め，式(1)に代入することでランダムな黒色放射球表面上の座標を得ることができる．

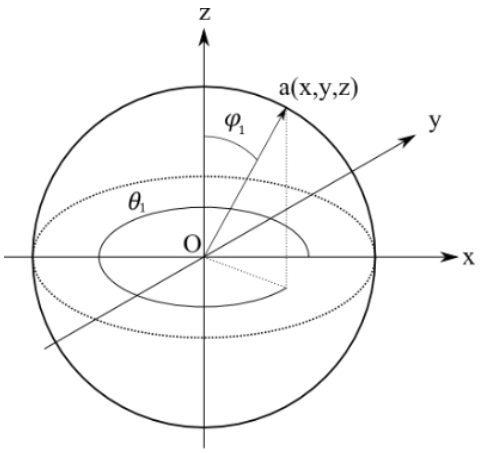


Fig. 19 エネルギー粒子の射出点座標決定モデル

iv. 射出方向の決定

黒色放射球やシュラウド内壁などの表面上での射出点が決定された後に新たな乱数を生成しエネルギー粒子の射出方向を決定する．Fig. 20 は射出方向決定のためのモデルを示している．射出点を P，P を原点とした空間におけるエネルギー粒子の座標を b とする．エネルギー粒子が 1 ステップで進む距離を d，Pb と k 軸のなす角を φ_2，Pb を ij 平面に投影した線と i 軸とのなす角を θ_2 とすると座標 b は極座標系を用いて以下のように表される．

物体表面から放射されるふく射エネルギーの角度による分布はランベルトの余弦法則としてまとめられている．これに従い 0 から 1 の間の実数を取る乱数 R を用いて φ_2 および θ_2 を以下のように定めることができる．

$$\varphi_2 = cos^{-1}\sqrt{1 - R_{\varphi_2}} \quad (4)$$

$$\theta_2 = 2\pi R_{\theta_2} \quad (5)$$

上に述べたエネルギー粒子の射出方向の決定手法は黒色放射球，シュラウド壁面および穴からのふく射全てに適用される．また射出されたエネルギー粒子が他の物体表面に到達した際に反射と判定された場合は，新たな乱数を生成し同様の射出方向決定プロセスを経て

反射される．

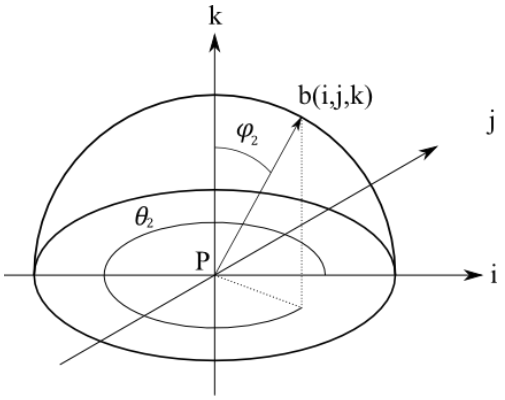


Fig. 20 エネルギー粒子の射出方向決定モデル

v. エネルギー量

物質表面からのふく射エネルギーを E [W]とすると，E は以下の式で表される．

$$E = \varepsilon\sigma T^4 A \tag{6}$$

ここで ε は物質の放射率，σ はステファン・ボルツマン定数 5.67×10^{-8} W/(K^4・m^2)，T は物質の絶対温度[K]，A は物質の表面積[m^2]である．

任意の面積から放射されるふく射エネルギーを個数 n のエネルギー粒子に置き換えるとすると，エネルギー粒子 1 個あたりのエネルギーE_p は式(6)を n で除せばよいので以下のようになる．

$$E_P = \frac{\varepsilon\sigma T^4 A}{n} \tag{7}$$

今回の数値解析ではふく射センサーに到達するエネルギー量を求めたい．ふく射センサーに到達したエネルギー粒子の個数を M とすると，ふく射センサーによって観測されるエネルギー量 E_{RFS} は以下のようになる．

$$E_{RFS} = E_P M \tag{8}$$

実験値と数値解析結果からふく射センサーの放射率を求める手法を述べる．

まずふく射センサーの感度は，下記の式を満たすように較正されている．

$$\frac{V}{S} = \sigma\left(T^4_{surroundings} - T^4_{RFS}\right) \tag{9}$$

ここで V はふく射センサーの出力電圧 [μV]，S はふく射センサーの感度 [μV/(W/m^2)]である．較正作業ではふく射センサーの正面にヒーターを設置し，ヒーターからふく射センサーに向けてふく射熱を与える．ヒーター熱源の温度を $T_{surroundings}$ [K]，ふく射センサーの温度を T_{RFS} [K]として式(9)を満たすような感度が決定されている．この感度はふく射センサーの温

度によらず一定である．実験によって出力電圧を得た時，その出力値をふく射センサー感度で除することによってふく射センサーへのふく射熱流束が得られる仕組みとなっている．

本研究で用いている実験装置について考えると，出力電圧 V およびふく射センサー温度 T_{RFS} は実験によって得られる値である．先述の較正作業ではふく射センサー自身が放射したふく射はふく射センサーに戻ってこないと仮定しているが，シュラウド内部では壁面でふく射が反射しふく射センサーに再び吸収されるエネルギーが存在する．ここで式(9)を変形すると下記のようになる．

$$\frac{V}{S} + \sigma T_{RFS}^4 = \sigma T_{surroundings}^4 \qquad (10)$$

左辺は実験で取得したふく射センサーへのふく射熱流束にふく射センサー自身が放射するふく射エネルギーの影響を考慮した値で単位は[W/m^2]となる．数値解析ではふく射エネルギーに到達するふく射熱流束を計算するので，ふく射センサーの面積を A_{RFS} とし，式(8)を用いると式(10)は下記のように表される．

$$\frac{V}{S} + \sigma T_{RFS}^4 = \frac{E_{RFS}}{A_{RFS}} \qquad (11)$$

式(11)中の E_{RFS} は式(7)よりふく射センサーの放射率を内包することがわかる．この放射率を変化させて数値解析を複数回行い，式(11)を満たした時の放射率が実験時のふく射センサーの放射率となる．

vi. フローチャート

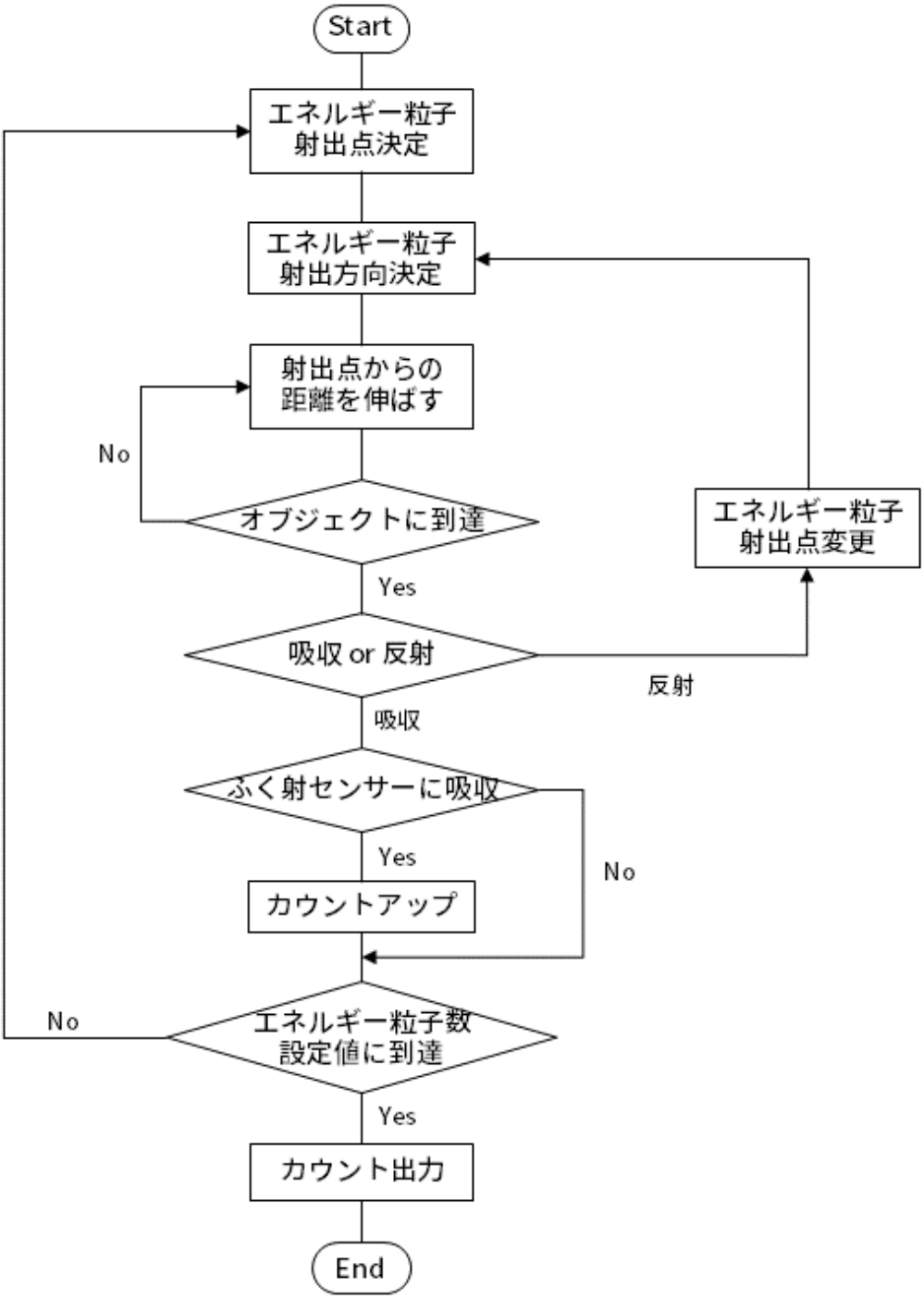


Fig. 21 黒色放射球の数値解析のためのフローチャート

黒色放射球の実験に対応した数値解析のフローチャートを Fig. 21 に示す．2.で述べたとおり本研究で用いた数値解析ではふく射センサーに到達および吸収されたエネルギー粒子の個数よりふく射伝熱量を計算する．数値解析プログラムは実験装置内部のパーツごとに分かれている．分け方は数値解析モデルで示された黒色放射球，ふく射センサー，側壁面，上蓋，下蓋，上開口部および下開口部の 7 種である．それぞれのプログラムを実行して各パーツからふく射センサーへのふく射伝熱量を計算し，最後に全ての結果を合計することで実験装置内部のふく射センサーへのふく射伝熱量を求めることができる．エネルギー粒子射出点の決定以降は全てのプログラムで Fig. 21 に示された同じフローに従う．

ここでは例として黒色放射球からのふく射伝熱量を求める際のプログラムのフローについて述べる．数値解析にはあらかじめ対象のパーツから射出されるエネルギー粒子の個数が与えられている．黒色放射球では 1,000,000 個のエネルギー粒子が射出される．プログラムが実行されると 1 個目のエネルギー粒子について計算が始まる．最初に黒色放射球表面上でのエネルギー粒子射出点が第 2 章 5 項 iii の手法に従って決定される．次に同項 iv に従って射出方向が決定される．そこから 1 mm ずつ距離を伸ばしエネルギー粒子は黒色放射球から離れていく．1 mm 距離を伸ばすごとにエネルギー粒子が存在している座標が実験装置内部のパーツに当たっているかどうかの判定が行われる．フローチャート内ではパーツをオブジェクトと表記した．ここでエネルギー粒子の座標がシュラウド内の空間でありオブジェクトに到達していない場合はさらに距離を伸ばすループを繰り返す．オブジェクトに到達したと判定されたら，新しい乱数が生成され対象のオブジェクトの反射率と比較される．例として吸収または反射の判定用乱数を 0 から 1 の実数 R としシュラウド内壁面の反射率が 0.01 だとすると，R>0.01 のときエネルギー粒子は吸収，R≤0.01 のとき反射と判定される．反射と判定された場合はそのオブジェクト上の到達点座標から再度射出されるものと考えエネルギー粒子射出方向決定のシーケンスまで戻る．吸収と判定された場合は，その到達点がふく射センサー領域だったときカウント用の変数に 1 が加えられふく射センサーに到達したエネルギー粒子の個数が数えられる．1 個目のエネルギー粒子がオブジェクトにおいて吸収と判定されると次の 2 個目のエネルギー粒子射出シーケンスに戻り挙動を計算する．黒色放射球の場合では 1,000,000 個となっているエネルギー粒子の設定値に射出および吸収された個数が到達したら，最後にふく射センサーに吸収されたエネルギー粒子の個数を出力してプログラムは終了する．

数値解析プログラムによって得られたエネルギー粒子の個数は式(8)中の M となる．これによってふく射センサーへのふく射伝熱量が計算され，その計算結果と実験結果が一致するときのふく射センサーの放射率が求めたい値となる．

vii. 数値解析条件

本数値解析ではキルヒホッフの法則に則り放射率と吸収率は等しく設定されている．また全ての物体に対して吸収および反射は物体表面で起こるものとし，透過率を 0 と仮定した．従って反射率は 1 から放射率を引いた値となる．

Table 3 黒色放射球の数値解析における放射率，吸収率および反射率

	放射率[-]	吸収率[-]	反射率[-]
黒色放射球	0.66	0.66	0.34
ふく射センサー	X	X	1- X
シュラウド内壁面	0.01	0.01	0.99
上下蓋	0.01	0.01	0.99
上下開口部	1.0	1.0	0.0

黒色放射球の数値解析で用いた放射率，吸収率および反射率を Table 3 に示す．黒色放射球の放射率はあらかじめ FT-IR 装置(Thermo Scientific Nicolet iS50)を用いて実測され，プランクの放射則にしたがって 2.5 － 10 μm の波長域での放射率を計算した値である．ふく射センサーの放射率は未知数であり，数値解析においては 0.01 刻みで変化させ計算を行った．シュラウド内壁面および上下蓋の放射率は，実際の実験装置に用いた両面アルミ蒸着ポリエステルフィルム(宇部興産　USI-012P-AANN)の放射率を適用している．上下開口部はシュラウド外部からのふく射の侵入と一度外部に出たふく射は戻ってこないと仮定するため，放射率および吸収率は 1.0 となっている．

viii. 数値解析の妥当性

本数値解析では球から球への放射や球から壁面への放射などを模擬したモデルを内包している．これらのプログラムの妥当性を検証するため，理論的に求められた形態係数との比較を行った．形態係数は JOHN R. HOWELL による”A Catalog of Radiation Heat Transfer Configuration Factors 3rd Edition”[24]を参考にしている．Table 4 が結果である．

Table 4 数値解析モデルと形態係数の比較

	形態係数との一致率 [%]	
条件	エネルギー粒子 100 個	エネルギー粒子 10000 個
球から湾曲した壁面	95	100
球から上部蓋	95	100
球から球	94	99

Table 4 よりエネルギー粒子を 10000 個以上飛ばせば形態係数と非常によく一致したふく射伝熱モデルであると言える．球から球への場合の一致率が若干小さいのは放射する球に対して他の条件ではエネルギー粒子を捉えやすい側に湾曲あるいは平面が向いているのが，球から球ではエネルギー粒子を逃がす方向に曲面が設置され球近傍でのエネルギーの捕獲条件が他のオブジェクトよりゆるくなるためである．しかしながら本数値解析では十分な数のエネルギー粒子を飛ばすため結果に影響はないと考える．

2.6 実験結果および考察

Table 5 黒色放射球の数値解析結果

	RFS ε [-]	Error [-]
Analysis 1	0.50	0.47 - 0.52
Analysis 2	0.51	0.48 - 0.53

Table 5 は 2 回の実験に対する数値解析の結果を示している．実験結果の表に示された温度条件において実験結果と数値解析の結果が一致したふく射センサーの放射率はそれぞれ 0.50 および 0.51 であった．表中の右側に示された数値解析の誤差はふく射センサーの測定誤差 3%に起因する．数値解析によって低温下ではふく射センサーの放射率がカタログ値の 0.80 から低下することが確認された．実験と数値解析からふく射センサーの放射率は-180℃の時 0.50 まで低下する．大西[25]によって示されたポイリミドにアルミ蒸着を施したフィルムにおける放射率の温度依存性を表したグラフを Fig. 22 に示す．輻射センサーに使用されているポリイミドフィルムとアルミ薄膜それぞれ単体での極低温下における放射率測定データが過去に存在しないため，Fig. 22 のグラフが最も本研究のふく射センサーに近い参考データとなる．グラフから，低温側に向けて上に凸の遷移となり，極低温下においてふく射センサーの放射率が本論文中の実験結果のような遷移を示す可能性があることがわかる．またふく射センサーの表面温度が更に低下した場合，放射率も 0.50 を下回ると考えられる．

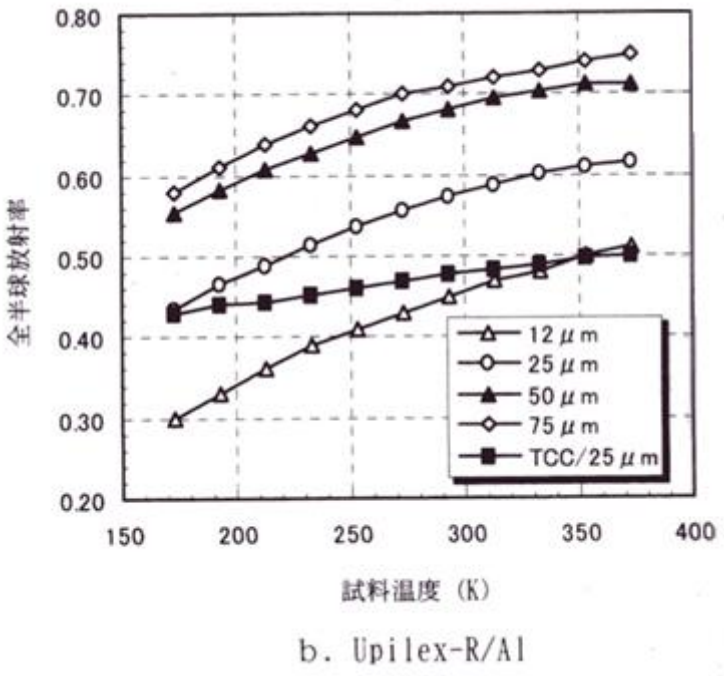


Fig. 22 アルミ蒸着ポリイミドフィルムの全半球放射率の温度依存性**[25]**

第 3 章　液滴流の排熱特性の取得

3.1 単一液滴流の実験装置

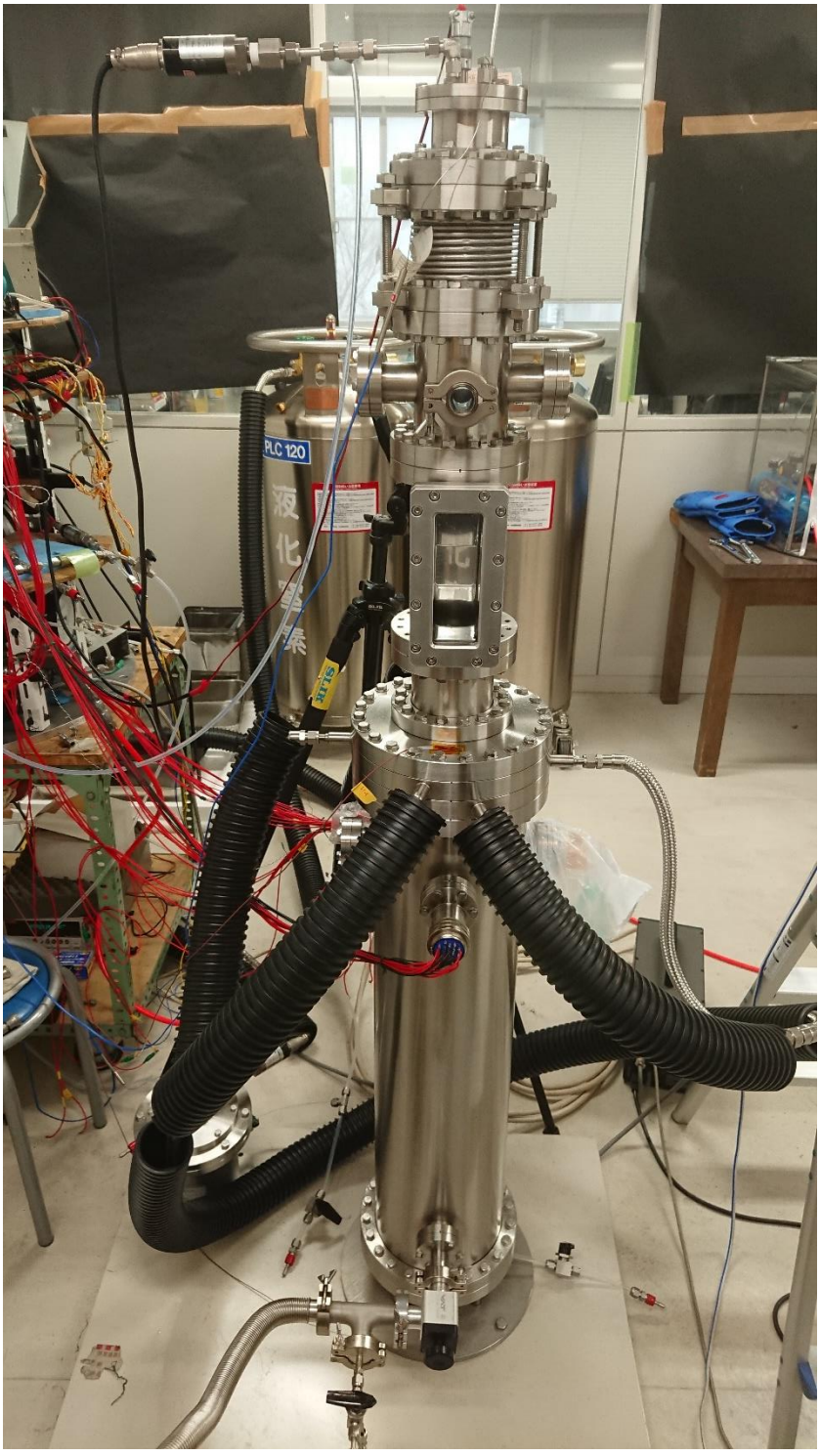


Fig. 23 単一液滴流の実験装置外観

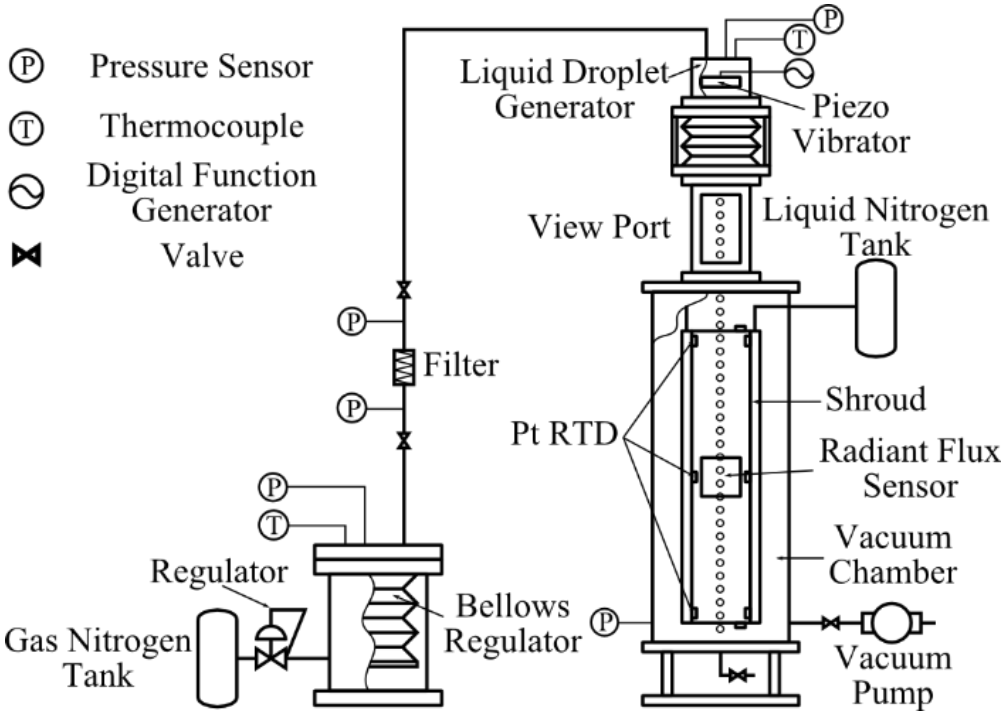


Fig. 24 単一液滴流の実験装置概略図

Fig. 23，24 に単一液滴流の実験装置を示す．黒色放射球の実験装置にベローズレギュレーターという作動流体への加圧装置が追加されている．また真空チャンバー上部にビューポートおよび液滴生成器が追加されている．ベローズレギュレーターで加圧された作動流体は配管を通って液滴生成器に送られ，液滴生成器内に設置されたノズルの前後圧力差によって真空チャンバー側へ押し出され液滴流が生成される．ノズル形状は Fig. 25 のようになっている．本実験ではノズル直径 D_2 が 0.1 mm，l_2 の長さが 0.1 mm となっている．

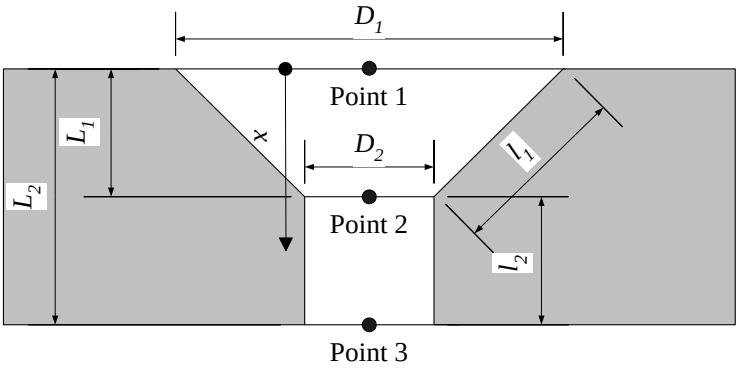


Fig. 25 液滴生成ノズル形状概略

3.2 実験手順

実験手順は下記の通りである.

(1) 脱気装置にシリコーンオイルを充填して真空ポンプによって脱気を開始する. 30 分ほど真空ポンプを可動させ, 気泡が発生しなくなったら脱気が完了したものとする. 脱気が不完全だと液滴流を生成した際に液滴が破裂してしまうため十分に脱気する必要がある.

(2) 実験装置内部を真空引きする. 実験装置の真空引きには 2 台の真空ポンプを使用する. 1 つは真空チャンバーに常時接続されていて, 真空チャンバー, シュラウドおよびビューポートまで連なる空間を実験終了時まで真空引きする. もう一方の真空ポンプは脱気装置に繋がっているものであり, 脱気装置を通じてベローズレギュレーターの作動流体充填部分, 配管および液滴生成器内部を真空引きする. 真空ポンプと脱気装置の間にある分岐から伸びる空気用の真空引きラインを使用してベローズレギュレーターの気体窒素充填部分の真空引きを行う. 配管内を真空引きする際にはバルブの開閉を数回行いバルブ内に溜まっている気体を吸わなければならない. ベローズレギュレーター, 配管および液滴生成器の真空引きが完了したら真空ポンプの接続を解除する.

(3) 脱気装置をベローズレギュレーター内側の作動流体充填部分に接続する. 脱気装置の可動式の蓋を大気圧によって押し, 作動流体をベローズレギュレーターに充填する. 1 時間ほど充填したあと脱気装置の蓋が動かなくなり, ベローズレギュレーター内部の圧力センサーが真空以上の圧力を検知したら充填完了とする.

(4) データロガー(Keyence NR-1000)によるセンサー出力値の記録を開始する.

(5) 液体窒素タンクからシュラウド壁内部への液体窒素の供給を開始する. シュラウドに貼り付けられている白金測温体の出力値により冷却状況を逐次確認する.

(6) シュラウドが十分に冷却されたらデータロガー(Keithley Model 2000 Digital Multimeter)によりバックグラウンドのふく射量を測定する.

(7) バックグラウンドの測定が完了した後, ベローズレギュレーターに気体窒素を充填し加圧を開始する. 配管中程にあるバルブを開け, 作動流体を液滴生成器に送る.

(8) ピエゾ振動子の振動を開始する. 液滴生成器が作動流体で満たされるとノズルから液滴流が生成される.

(9) ビューポートから液滴流がシュラウド上部の穴を通過していることを確認する．またシュラウド下部の蓋の温度が上昇していないことを確認する．シュラウド上部の穴を液滴流が通過せずに蓋などに当たっている，もしくはシュラウド下部の蓋の温度が上昇していて液滴流が衝突している可能性がある場合は，液滴生成器直下にある蛇腹機構を調整し液滴流がシュラウドの中心を通るようにする．

(10) 液滴生成器内圧力が目標値に達するようにレギュレーターを調節してベローズレギュレーターを加圧する．液滴生成器内圧力が目標値に達したら，ビューポート横に設置されたハイスピードカメラで液滴流の動画を撮影し，均一な液滴流が生成されているかどうかを確認する．均一でない場合はピエゾ振動子の周波数を調節して再度撮影し確認する．

(11) 液滴流が均一であることが確認されたら，データロガー(Keithley Model 2000 Digital Multimeter)によって排熱量を取得する．

(12) 液滴流を流しているときの排熱量の計測が終了したら，配管のバルブを閉じるとともに液滴生成器に脱気装置を接続し液滴生成器内の作動流体を吸い取る．

(13) 液滴流が流れなくなったら，再びバックグラウンドのふく射量を計測して実験を終了する．

3.3 実験条件

作動流体にはシリコーンオイル（信越シリコーン　KF-96-10cs）を用いる．シリコーンオイルは化学的に安定で蒸気圧が非常に小さい．A.T.Mattick らの研究[4]によって，蒸気圧が小さいことから真空環境下での蒸発損失を無視できる程度に抑えられるために，250 K から 350 K の利用温度域においてシリコーンオイルが液滴ラジエーターの作動流体に適しているとされた．実測されたシリコーンオイルの物性値を Table 6 に示す．この実測はピクノメータ法[26]に則り，試料を変えて 2 回の試験の平均を取った値である．測定精度は±0.1 %程度と推定される。本測定は、密度既知の試料（蒸留水）で目盛りと体積の関係を検定したピクノメータに試料を入れ、測定温度に設定された恒温槽中で安定化する。安定化後、ピクノメータの目盛りを読み取り、試料の体積 Vs を求める。この Vs と、試料封入前後のピクノメータの重量差から求めた試料重量 Ws から、下式(12)より試料の密度 ρ を求める。ここで、ρ a は浮力補正項(1.2 kg m-3)である。

$$\rho = \frac{W_s}{V_s} + \rho_a \qquad (12)$$

Table 6 シリコーンオイルの物性値

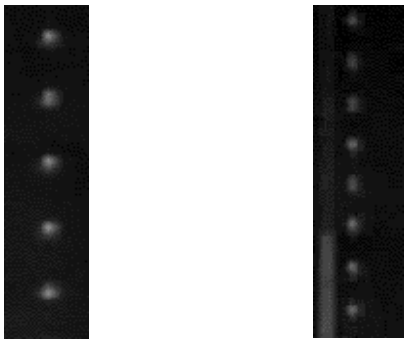
密度ρ [kg/m^3]	929
動粘度ν [m^2/s]	8.8×10^{-6}
表面張力S_i [N/m]	20.5×10^{-6}

Table 7 単一液滴流の実験条件

	Experiment 3	Experiment 4
Temperature of the working fluid [℃]	28.6	28.7
Pressure difference around the nozzle ΔP [MPa]	0.18	0.10
Frequency of the piezo vibrator, f [kHz]	15	15
Diameter of the droplet [mm]	0.25	0.22
Distance between the centers of the droplets [mm]	1.05	0.733
Velocity ν [m/s]	15	11
Number of droplets in the shroud	664	953

Table 7 に実験条件を示す．実験 3 と 4 ではピエゾ振動子の振動数を 15 kHz で固定した．ノズル前後の圧力差を変化させ，液滴直径および液滴中心間隔を変えることで排熱量に違いが出るかどうかを確認する．作動流体温度，ノズル前後圧力差およびピエゾ振動子の振動周波数は実験時の値である．ノズル直径および液滴初期半径は 0.10 mm である．液滴直径，液滴中心間隔および液滴の速度は先行研究[27]にて示された計算式に実験時の値を代入して求められた計算値である．この値は 10%ほどのエラーを含んでいる．またシュラウド内に存在する液滴個数はシュラウドの長さを液滴中心間隔で除した数である．

3.4 実験結果および考察



(a) (b)

Fig. 26 単一液滴流の様子

Fig. 26 はハイスピードカメラで撮影された液滴流の様子である．実験 3 の液滴流が Fig. 26(a)，実験 4 で生成された液滴流の画像が Fig. 26(b)である．2 つの画像は同じ画素数および同じ領域を撮影している．画像から均一な液滴間隔の単一液滴流が生成されていることが確認できた．ノズル前後圧力差が小さくなるほど実験値から計算された液滴直径と液滴中心間隔も小さくなるが，Fig. 26 のように画像からも同様の結果となっていることがわかる．

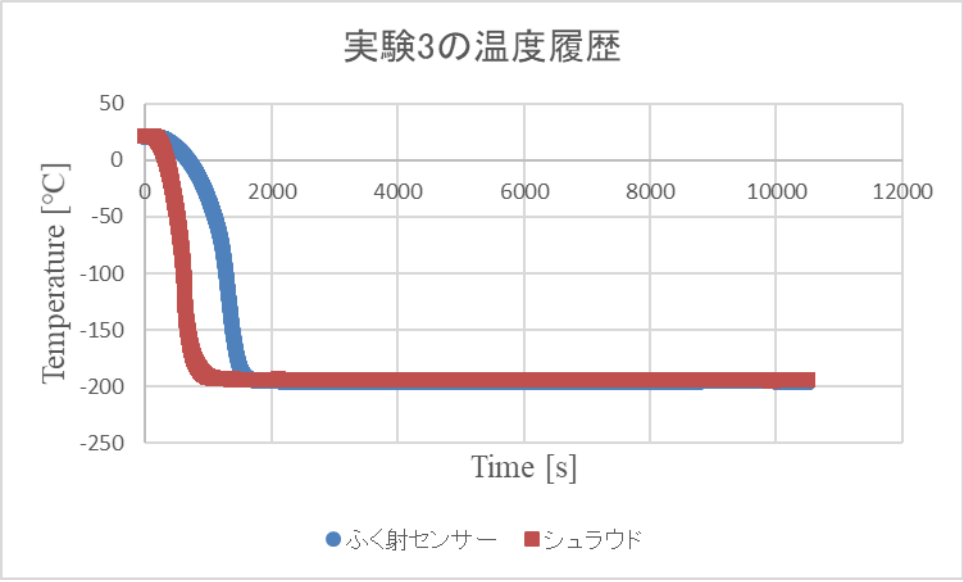


Fig. 27 実験 3 の温度履歴

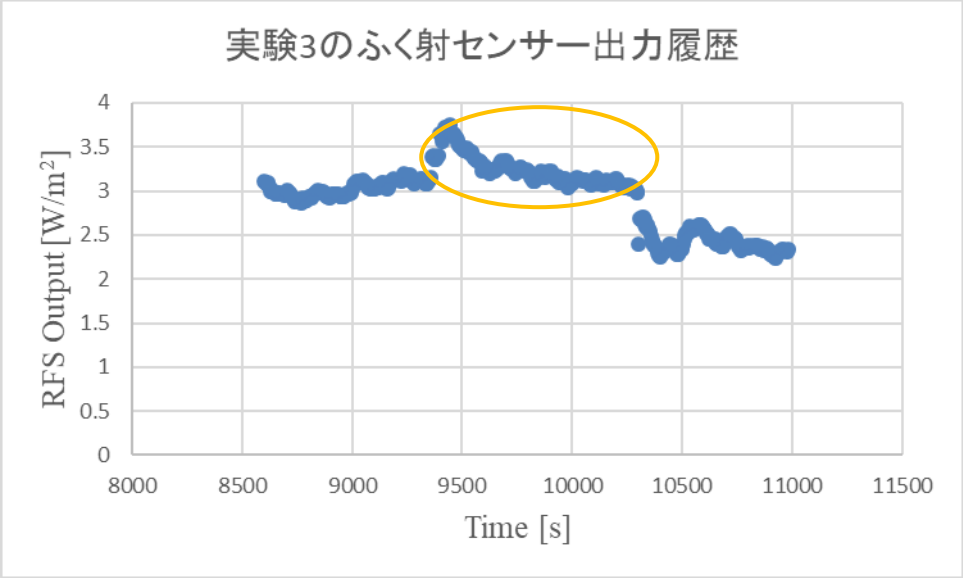


Fig. 28 実験 3 のふく射センサー出力履歴

Table 8 実験 3 の結果

	Shroud [℃]	RFS [℃]	RFS output [W/m^2]
Background	-194	-194	2.28
Liquid Droplet Stream	-194	-194	3.06

Fig. 27 および 28 に実験 3 のデータを示す．温度履歴からふく射センサーおよびシュラウドともに低温に冷却された状態で安定しているのがわかる．十分に冷却された 8500 秒付近からふく射センサーの出力を測定している．Fig. 28 では〇で囲われている時間帯が液滴流が生成されている時間である．後半に出力の安定した期間があり液滴流の生成が終わると排熱量が減り出力が下がっているのがわかる．

Table 8 は実験 3 の結果を示している．上段はバックグラウンド計測時の温度とふく射センサーの出力値，下段は液滴流生成時の温度とふく射センサー出力値である．5 分間の計測でシュラウド表面およびふく射センサー表面の温度の平均値は-194℃であった．両者の温度の標準偏差は 0.2℃であり十分に安定した状態であったと言える．シュラウドとふく射センサーの温度差が無いにも関わらずふく射センサーが値を出力しているのは，シュラウド上下の穴を通過してくる真空チャンバー由来のふく射およびふく射センサー自身から発生しシュラウド壁面で反射して返ってくるふく射の影響である．生成した液滴流が単一液滴流であることから排熱量は小さいことが予想されていたが，その予想が正しいことを裏付ける結果となった．バックグラウンドと液滴流生成時の排熱量に差があることから，液滴流が

排熱をしており，その量をふく射センサーを用いた本研究の手法によって観測できることが確認できた．

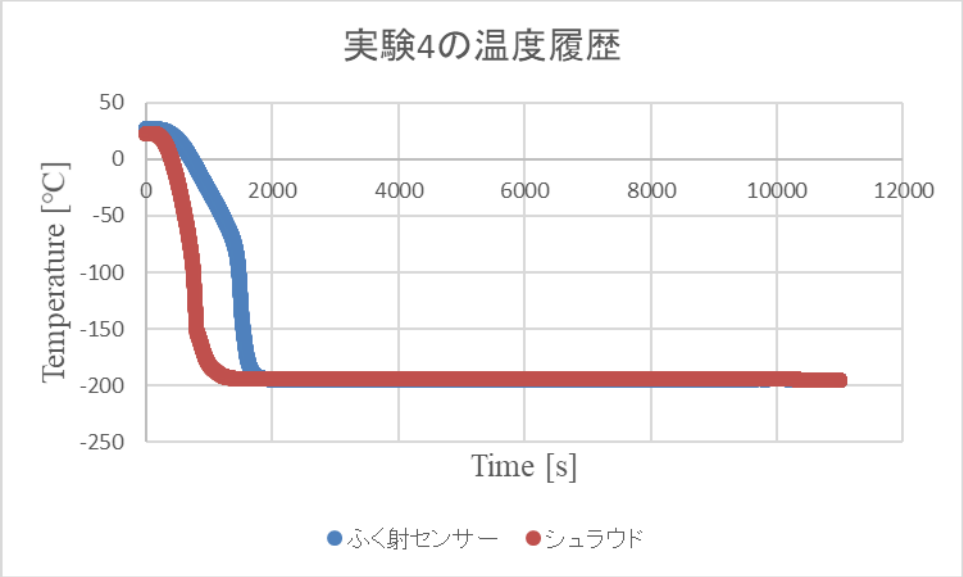


Fig. 29 実験 4 の温度履歴

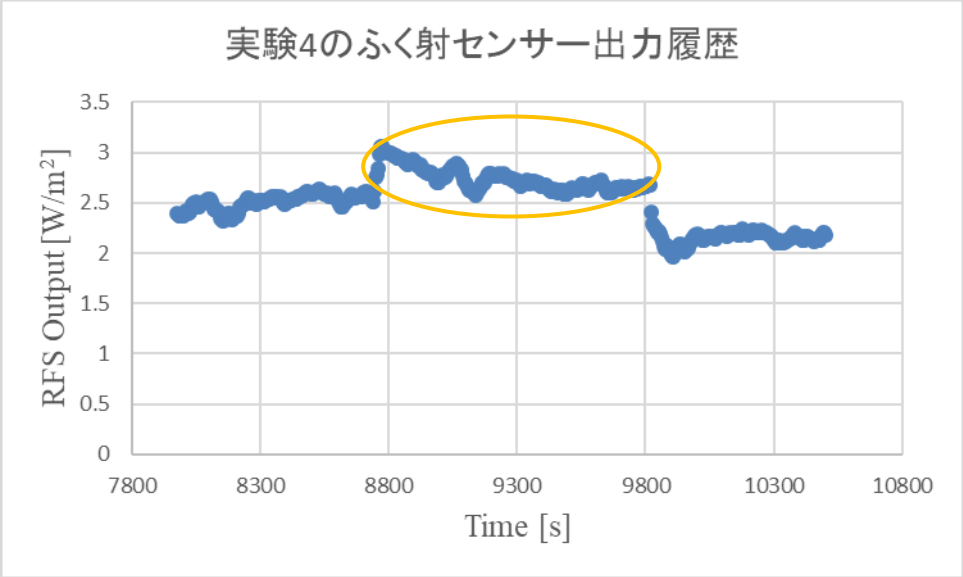


Fig. 30 実験 4 のふく射センサー出力履歴

Table 9 実験 4 の結果

	Shroud [℃]	RFS [℃]	RFS output [W/m^2]
Background	-194	-194	2.05
Liquid Droplet Stream	-194	-194	2.78

Fig. 29 および 30 は実験 4 の温度履歴とふく射センサーの出力履歴を示している．実験 3 と同様に実験装置は低温で安定して冷却された．またふく射センサーの出力において液滴流が生成されている時間に増加し，液滴流が無くなると減少する傾向も実験 3 と 4 で同様であった．

Table 9 は実験 4 の結果を示している．実験 3 と同様にシュラウドおよびふく射センサー表面温度は-194℃で安定していた. バックグラウンドと液滴流との出力差により実験 4 でも単一液滴流からの排熱量を計測したことが確認できる. 実験条件が異なるため実験 3 と 4 の結果を単純に比較することができないが，両者でおおよそ同じ値の出力を得た.

3.5 単一液滴流の数値解析

i. 数値解析モデル

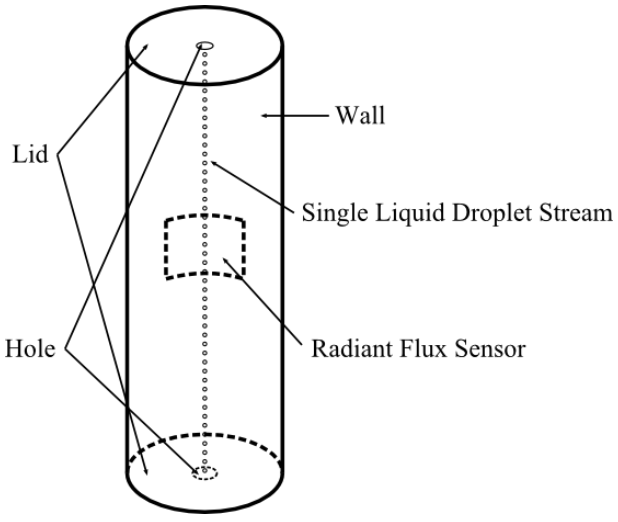


Fig. 31 液滴流の数値解析モデル

Fig. 31 は液滴実験装置を模した数値解析モデルである．シュラウドの直径，長さ，ふく射センサーの位置は黒色放射球の数値解析モデルと同様である．上部の穴の直径は 10 mm, 下部の穴の直径は 20 mm である．液滴直径および液滴中心間隔の値は実験値を使用して先

行研究の式から得られた値を適用している．ふく射センサーに到達するエネルギー粒子の挙動や乱数を使った計算手法は黒色放射球の数値解析と同様である．液滴流の数値解析では各液滴から 10,000 個ずつのエネルギー粒子を放射してその到達位置を計算する．実際の実験ではふく射は光の速度で伝搬するので数値解析においては任意の瞬間のエネルギー伝搬を計算するために液滴の位置および温度の時間変化は考えないものとした．実験で対象としているふく射の波長は 10 μm である．液滴直径が 200 μm 以上であることから液滴表面でのふく射の挙動は幾何光学的に反射するものとした．

ii. フローチャート

Fig. 32 に液滴流の実験に対応する数値解析のフローチャートを示す．ほとんどのフローは黒色放射球の数値解析と変わらないが，液滴流中の液滴一つ一つからエネルギー粒子を射出するためのループが追加されている．プログラムが実行されるとあらかじめ配列に格納されている液滴座標から最初の 1 個が選択される．選択された液滴を射出源としてエネルギー粒子の射出点決定に進み，挙動を計算するシーケンスに入る．1 個の液滴に対して 10,000 個のエネルギー粒子の挙動計算が終了すると次の液滴座標を取得し，選択された液滴を射出源としてさらに 10,000 個のエネルギー粒子を射出する．全ての液滴からエネルギー粒子が射出され挙動を計算し終えたら，ふく射センサーに到達したエネルギー粒子の数を出力しプログラムが終了する．

ふく射センサー，シュラウド内壁面，上下蓋および上下開口部の数値解析フローは Fig. 21 のフローチャートと同様となる．内部に黒色放射球があるか液滴流があるかの違いとなっている．バックグラウンドのみの状況を数値解析で求める際は液滴流が存在しないようにプログラムを変更して計算を行った．

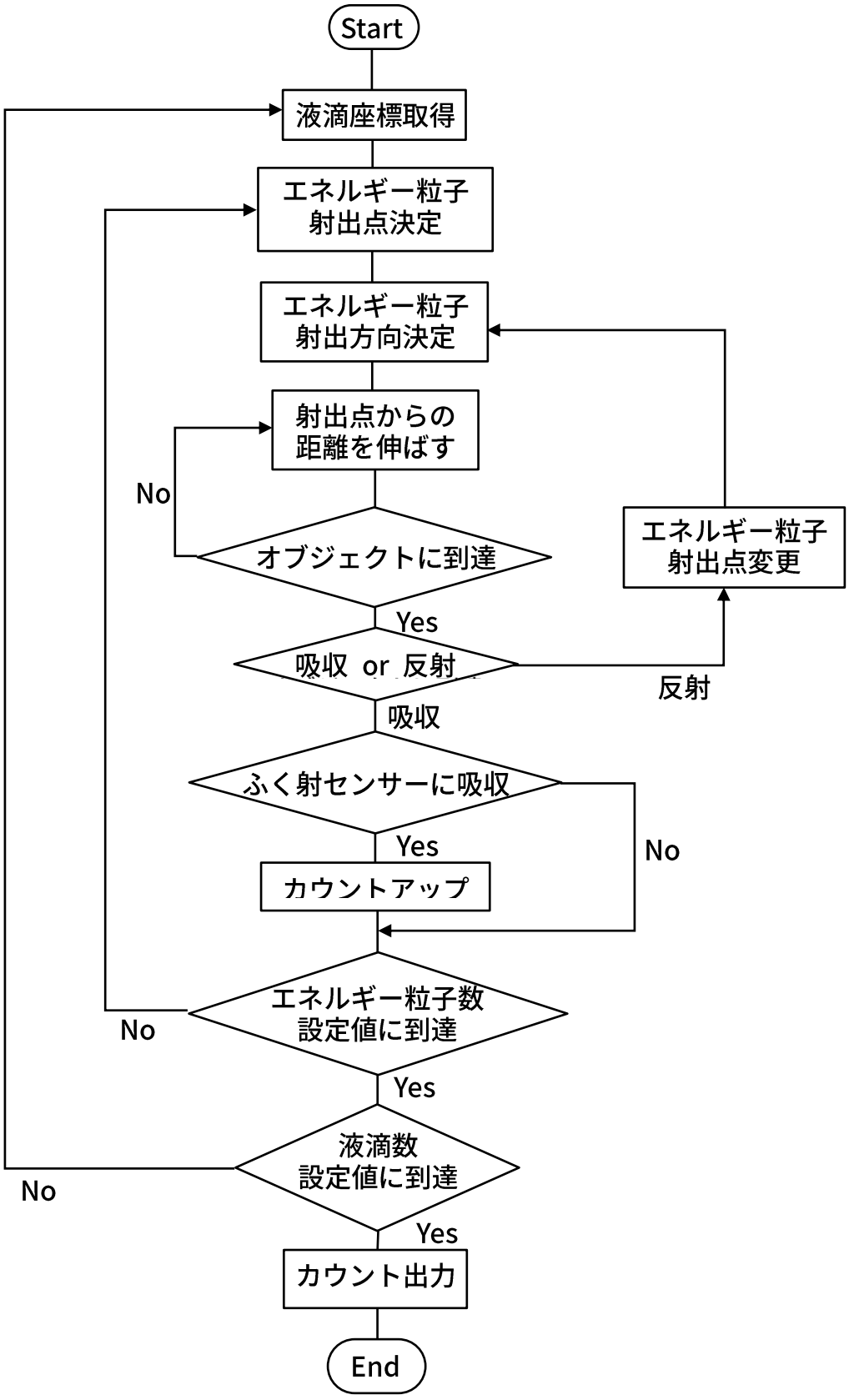


Fig. 32 液滴流に対する数値解析のためのフローチャート

iii. 単一液滴流の数値解析条件

液滴 1 個から放射されるエネルギー粒子の数は 10,000 である．ふく射センサー，シュラウド内壁，上下蓋および上下穴から放射されるエネルギー粒子はそれぞれ 1,000,000 個である．バックグラウンドの数値解析においてはふく射センサーの放射率は 0.01 刻みで計算しそれぞれの実験における放射率を求める．取得されたふく射センサーの放射率を用いて液滴の放射率を 0.01 刻みで計算する．シュラウド内壁面および上下蓋の放射率はアルミ蒸着フィルムの放射率を適用する．エネルギー粒子が上下穴を通過するとシュラウド内への熱的な影響が無くなることから穴の放射率は 1.0 とした．

3.6 結果および考察

Table 10 ふく射センサーの放射率

	RFS ε [-]	Error of RFS ε [-]
Analysis 3	0.48	0.47 - 0.49
Analysis 4	0.45	0.44 - 0.46

バックグラウンドの排熱量に対する数値解析をはじめに行った．得られたふく射センサーの放射率を Table 10 に示す．Analysis 3, 4 ともに黒色放射球の結果よりも小さい値となった．これはふく射センサーの表面温度が黒色放射球の実験時より液滴流の実験時のほうが低くなっていることが要因である．

Table 11 液滴の放射率

	Liquid Droplet ε [-]	Error of ε [-]
Analysis 3	0.51	0.41 - 0.60
Analysis 4	0.42	0.33 - 0.52

Table 10 の結果を用いて液滴流についての数値解析を行った．液滴の放射率を Table 11 のように設定した時，実験の結果と数値解析の結果が一致した．Analysis 3 と Analysis 4 の放射率が約 0.1 違うのはふく射センサーの測定誤差 3%が数値解析結果に影響を及ぼすからである．誤差を考慮すると今回の数値解析は十分に妥当であると言える．単一液滴流からの排熱量は微小であるため誤差範囲が大きくなってしまう．液滴流の数を増やして観測する排熱の絶対量を増やせば，バックグラウンドやふく射センサーの測定誤差の影響が減少すると予想される．

実験値と数値解析値が一致し，シリコーンオイルの放射率が存在しうる範囲で求められ

たことから本数値解析手法は実際のふく射のシミュレーションに使用できることが確認された．このことから今回の数値解析を応用して単一液滴流の実効放射率を求めることが可能となった．液滴流の数値解析モデルにおいて液滴間でのエネルギー粒子の反射および吸収のみを考慮し，シュラウド内壁面などは全てを吸収する設定とする．これにより宇宙空間に存在する単一液滴流から無限遠にふく射が行われる排熱モデルを模擬できる．

Table 12 実効放射率

	Effective Emissivity ε [-]	Error of ε [-]
Analysis 3	0.095	0.077 - 0.11
Analysis 4	0.10	0.078 - 0.12

Table 12 は無限遠排熱モデルの数値解析により得られた実効放射率の値を示している．第章で示した実験条件では液滴直径および液滴中心間隔が異なるため 2 つの数値解析を比較して論じるのは難しい．2 つの数値解析から実効放射率は液滴の放射率よりも低い値を示している．無限遠排熱モデルでは Fig. 33 のように液滴直径を 1 辺とし単一液滴流を内包するような直方体の表面を排熱のための面とした．

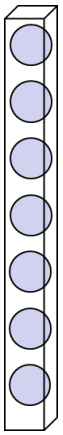


Fig. 33 無限遠排熱モデル

これにより無限遠排熱モデルの総表面積は液滴の表面積の合計よりも大きくなっている．この影響により実効放射率のほうが液滴 1 個の放射率よりも値が小さくなっている．これらの数値解析では液滴から放射された排熱のうち 1%弱が隣り合う液滴に吸収され，残りの 99%以上が宇宙空間に排熱されている．先行研究[13]では液滴流の流速および液滴直径が大きくなるほど実効放射率が小さくなることが示されている．この傾向は本研究の数値解析でも確認された．加えて先行研究では厚さ 50 mm の液滴シートの等価放射率を推定している．液滴直径 0.2 mm の条件において，流速が 10 m/s のとき等価放射率は 0.9，15 m/s のとき 0.8 である．先行研究で述べられている平行液滴流の等価放射率と本研究の結果には隔た

りがある．これは先行研究が対象としている平行液滴流では排熱面積に比例した排熱量の大きさが単一液滴流とは比較できないほど大きいからである．

先行研究では無次元波数と排熱量の関係を明らかにする試みも行っている．κ を無次元波数とすると κ は以下の式で与えられる．

$$\kappa = \frac{2\pi\gamma f}{\nu} \tag{13}$$

平行液滴流の液滴シート厚さは小さいとして無視された条件で単位長さあたりの排熱量が求められた．無次元波数が 0.4 のとき平行液滴流からのふく射排熱量はおよそ 32 W/m と計算されている．本研究の Analysis 4 について考えると無次元波数は 0.43 となり単一液滴流からのふく射は 0.0415 W/m となった．先行研究の平行液滴流は単一液滴流が 7,500 本集まった構成になっている．本論文の単一液滴流を 7,500 本束ねるとして単純に積を求めると排熱量は 311 W/m となる．これは先行研究の平行液滴流の 10 倍近い値となる．平行液滴流では液滴間の熱の吸収が単一液滴流よりも多く起きる．このことから平行液滴流の排熱量は単一液滴流の排熱量の本数倍よりも小さい値となる．序章で述べた液滴流の形状によるふく射への影響が先行研究の結果と本研究の結果の比較によって証明された．

Mattick らの報告[4]によれば液滴の放射率が 0.5 のとき液滴シートの光学厚さが大きくなるにしたがって液滴シートの実効放射率が 0.8 に漸近するとされている．このことは単一液滴流が集まった平行液滴流や収束液滴流の層が重なることによって液滴シートの表面積に対する液滴の総表面積の比が大きくなることに起因する．したがって平行液滴流においては実効放射率は単一液滴流の値よりも大きくなると考えられる．

第 4 章　結論

実験と数値解析を併用することで得られた液滴の放射率を用いて単一液滴流の実効放射率を計算する手法を確立した.

放射率が既知の黒色放射球を用いて低温下におけるふく射センサーの放射率の低下を確認した. またふく射センサーの温度に基づいた放射率の測定も可能になった. 本研究ではふく射センサーの表面温度が 26℃のとき放射率 0.8 から-180℃で 0.5 までの放射率の低下を確認した.

単一液滴流の排熱量を実験で取得することが可能になった. 本研究で用いたシリコーンオイルの条件下では液滴の放射率は 0.42-0.51 と求められた. 液滴の放射率をもとに単一液滴流の実効放射率を計算する手法を確立した. 本研究の条件下では単一液滴流の実効放射率は 0.1 であった.

本研究の手法は平行液滴流や収束液滴流の実効放射率を求めるのに応用が可能である. 液滴流の実効放射率の計算が可能になったことにより液滴ラジエーターの実現に道が開けた.

謝辞

本研究を進めるにあたり，多くの方々からご指導とご協力をいただきまして，誠に有難うございました．

永田晴紀教授，戸谷剛教授，脇田督司助教には私が研究室に所属してからの 7 年間，要所で適切かつ有用な御助言を頂き誠に感謝しております．特に戸谷剛教授には平素から熱心なご指導を賜わり，研究を通して楽しさと喜びを教えていただきました．ここに敬意を表し厚く感謝いたします．

主査の永田晴紀教授をはじめとして，戸谷剛教授，藤田修教授，大島伸行教授には学位論文審査委員をお努め頂きました．大変お忙しい中，拙稿を査読して頂き誠にありがとうございました．

渡部正夫教授を委員長とした学位授与審議委員会の永田晴紀教授，戸谷剛教授，藤田修教授，大島伸行教授，中村孝教授，近久武美教授，小川英之教授，村井祐一教授，佐々木克彦教授，小林一道准教授，黒田明慈准教授の皆様には学位授与の審議に対しまして多大な御助力を頂きましたことを深く感謝いたします．

研究室秘書の清水王緒子さんには事務手続きなどでお世話になりました．

液滴班として活躍してくれた 4 人の後輩達，木村優斗君，嶋田泰三君，両門健人君，池田華子さんには感謝してもしきれません．木村君は排熱量測定のための実験装置の礎を築いてもらいました．木村君の存在なくして我々の実験結果は生まれなかったでしょう．嶋田君はスペースチャンバーでの実験を主導し，液滴実験の進化に貢献して頂きました．忍耐力と行動力をこれからも失わないで欲しいと思います．両門君は研究室生活 3 年間を液滴班として貫き通し，黒色放射球実験を始めとして，各種数値解析，実験装置の大改修およびノズル変更後の全く新しい実験など液滴ラジエーター研究の最前線を共に戦って頂きました．趣味の話題で盛り上がった時間もとても楽しい思い出です．約束タワーの麓で煌きを失わずに，星を摘むための宇宙開発，頑張ってください！！池田さんは収束液滴流の数値解析という未踏の領域にチャレンジして頂きました．コンピューター演習での教えが布石になるとは誰が予想したでしょうか．池田さんには磨きをかけた英語力と持ち前の底力を武器にたくましく生き延びてほしいと思います．

液滴班の皆さんには私の力不足故に大変な苦労を掛けてしまうことが多々ありました．それでも力尽きることなく研究に対して真摯に向き合ってくれたことは，私の研究活動の支えおよび素晴らしい刺激にもなりました．歴代の諸先輩方を含め，このメンバーで液滴ラ

ジエーターの可能性を後世に繋げたことを心から誇りに思います．ありがとうございました．

研究室同期の色川俊雄君，遠藤瞳君，菊地敬太君，國拓也君，斉藤竜也君，寺木勇人君，縄田和也君には研究室に一人残った私に卒業後も変わらずの友情と楽しさを感じさせてくれました．菊地君と國君は結婚おめでとう．独身組は自由すぎて流石自分の同期だなとつくづく思います．気ままに会って気楽に語り合える関係が続くようにお互いそれなりで生きていきましょう．これからもどうぞよろしくお願いします．

昨年御卒業された研究室 OB/OG の尾村和信君，清谷優理香さん，佐藤潤弥君，松岡将司君，山口亮君の名前は修士論文には書かれていないと思うのでこちらに書いておきます．恐らく最後の miniCAMUI プロジェクトチームとなるであろう皆さんのことは私だけは忘れずにいることでしょう．GasCAMUI を垂直着陸させた伝説の世代をこれからも語り継いで行こうと思います．お疲れ様でした．

博士後期課程の桧物恒太郎さん，Tor VISCOR さん，Landon KAMPS 君，津地歩君とは D の意志を継ぐ者として苦楽を共にしてきました．研究室内でも研究分野が全く異なる中，お互いの課題について議論し，理解し合い切磋琢磨できたと思います．これからもそれぞれの研究と後輩達の指導に全力を尽くして下さい．応援してます．

修士課程の後藤凌平君，井上卓君，奥谷勇士君，神谷朋兆君，君野正弥君，櫻井和人君，中西勇作君，両門健人君，池田華子さん，内山絵里香さん，押見灯里さん，小水弘大君，藤原航太郎君，本谷誠正君，吉丸利君，そして学部 4 年生の伊藤聖司君，奥田晃崇君，奥田椋太君，影山理沙さん，深田真衣さん，山田藍さんとは語り尽くせないほどの楽しい時間を過ごすことができました．皆の中で C215 という場所が憩いの空間であったなら，それ以上に嬉しいことはありません．学生生活のクライマックスをこんなに沢山の個性的なメンバーと迎えられて本当に良かったです．

宇シスバイク部の山口君と櫻井君は私の限界速度への挑戦に余力を持った走りでお付き合い頂きました．また一緒に北の大地を走りましょう．二輪免許は早急に取得します．はい．

顧問の加藤博之准教授を始め，北海道大学人力飛行機制作サークル Northern Wings (旧鳥人間研究会)に携わった方々および全国の鳥人間の皆様に高梨先輩の学生生活が遂に完結することをお知らせ致します．人力飛行機製作が私の人生の大きな割合を占めるプロジェクトであることは疑う余地がありません．サークル活動を通して得た知識・技術・経験は大きな糧となり，研究活動でも活かされた場面が数多くありました．これからも鳥人間を応援し，

できる限りの貢献をしていく所存です.

アニソンバーS およびボカロアニソンバーMELT のキャスト並びにまさしさんを始めとした常連客の皆様には癒やしを頂き，幸福な時間を共有できたことに心から感謝致します. 共通の趣味を持った大人が集まって笑顔になれる，そんな場が末永く続くことを願っています.

最後に，これまでの 30 年その人生を掛けて応援し続けてくれた母，それぞれの生きる道を見つけた弟と妹，元気でいてくれた父，そして全ての家族に感謝の気持ちを伝えたいと思います．今まで本当にありがとうございました.

2019 年 1 月 19 日

北海道大学　大学院工学院
機械宇宙工学専攻
宇宙環境システム工学研究室
髙梨　知広

参考文献

[1] “Astronomy Picture of the Day”, https://apod.nasa.gov/apod/ap091005.html, December 13, 2018.

[2] Eric Christiansen, NASA Johnson Space Center
https://www.nasa.gov/sites/default/files/files/E_Christiansen-MMODriskOverview.pdf,
December 13, 2018.

[3] JAXA, “US EVA20 について”
http://iss.jaxa.jp/iss/jaxa_exp/hoshide/eva/121101_evaoverview.pdf, December 13, 2018.

[4] A. T. Mattick and A. Hertzberg, Liquid Droplet Radiators for Heat Rejection in Space, Journal of Energy, 5, 6, (1981), 387-393.

[5] A. F. Presler, C. E. Coles, et al., Liquid Droplet Radiator Program at the NASA Lewis Research Center, ASME Paper 86-HT-15, (1986).

[6] K. A. White, “Liquid Droplet Radiator Development Status”, Proc. AIAA 22nd Thermophysics Conference, Honolulu, Hawaii, Jun. 1987, AIAA-87-1537, 1987.

[7] S. Pfeiffer, A. White, “Conceptual Design of a Liquid Droplet Radiator Space Flight Experiment”, SAE Technical Paper Series 89-891565, 1989.

[8] A. F. Massardo, L. A. Tagliafico, and A. Agazzani, Solar Space Power System Optimization with Ultralight Radiator, Journal of Propulsion and Power, 13, 4, (1997), 560-564.

[9] Tsuyoshi Totani, Takuya Kodama, Harunori Nagata, and Isao Kudo, “Thermal Design of Liquid Droplet Radiator for Space Solar-Power System”, Journal of Spacecraft and Roket, vol.42, No.3, pp.493-499, 2005

[10] 戸谷剛，永田晴紀，工藤勲，“短時間微小重力実験による液滴ラジエータ要素の機能試験”，日本マイクログラビティ応用学会誌，Vol. 20，No. 1，2003 (22-29)

[11] T. totani, et al., “Performance of Droplet Generator and Droplet Collector in Liquid Droplet Radiator under Microgravity”, Microgravity Science and Technology, XIII/2, 2002 (42-45)

[12] 細川俊介，川田正国，岩崎晃，工藤勲，“液滴ラジエータ用均一液滴流の生成”，日本航空宇宙学会誌，第 39 巻，第 453 号，(10, 1991)

[13] T. Totani, et al., Performance Test under Microgravity on a Centrifugal Droplet Collector for Liquid Droplet Radiator, Transactions of the japan Society of Mechanical Engineers, 68, 674, B, (2002), 110-117 (in Japanese).

[14] Tsuyoshi Totani, et al., “Numerical and experimental studies on circulation of working fluid in liquid droplet radiator”, Acta Astronautica, 59, 2006 (192-199)

[15] 大谷雄一，“液滴ラジエーターの放熱特性に関する研究”，第 35 回日本伝熱シンポジウム講演論文集，B213-214，1998.

[16] A. Ohnishi, “Thermal Radiation Property of Thermal Control Materials for space Use”, https://www2.kek.jp/engineer/oho/giken/procedng/paper/met019.pdf, accessed on January 19, 2019

[17] 市川眞人，西岡明久，“中，遠赤外放射に対する水の吸収率と浸透深さの分光特性”，照明学会誌，第 72 巻，第 2 号，1988

[18] テクノオフィス株式会社，“輻射センサーRF シリーズ”，http://www.techno-office.com/file/captec-rfs.pdf, accessed on January 19, 2019

[19] テクノオフィス株式会社，“Radiant flux sensors Series”，http://www.techno-office.com/file/radiant_flux_sensors.pdf, accessed on January 19, 2019

[20] テクノオフィス株式会社，“CAPTEC SCIENTIFIC CATALOGUE”，http://www.techno-office.com/file/captec-scientific-catalog.pdf, accessed on January 19, 2019

[21] 三和メッキ工業株式会社 ”黒染加工処理” https://www.sanwa-p.co.jp/mekki/black/, accessed on January 19, 2019

[22] Thermo Fisher Scientific, https://www.thermofisher.com/order/catalog/product/912A0760, accessed on January 19, 2019

[23] 谷口博，“パソコン活用のモンテカルロ法による放射伝熱解析”，コロナ社，1994.

[24] JOHN R. HOWELL, ” A Catalog of Radiation Heat Transfer Configuration Factors 3rd Edition”, http://www.thermalradiation.net/indexCat.html, accessed on January 19, 2019

[25] 大西晃，“新編熱物性ハンドブック”，日本熱物性学会編，養賢堂，2008，p. 374

[26] イビデンエンジニアリング株式会社，“密度測定” http://www.ibieng.co.jp/analysis-solution/g0013/, accessed on January 19, 2019

[27] T. Totani, et al., “Peformance of Droplet Emittor For Liquid Droplet Radiator under Microgravity”, Transactions of the japan Society of Mechanical Engineers, 68, 668, B, (2002), 202-209 (in Japanese).