

Title	薄型エアロゲル不織布複合断熱材の設計と特性評価手法に関する研究
Author(s)	岡崎, 亨
Citation	大阪大学, 2017, 博士論文
Version Type	VoR
URL	https://doi.org/10.18910/61786
rights	
Note	

Osaka University Knowledge Archive : OUKA

<https://ir.library.osaka-u.ac.jp/>

Osaka University

博士学位論文

薄型エアロゲル不織布複合断熱材の
設計と特性評価手法に関する研究

岡崎 亨

2017年1月

大阪大学大学院工学研究科

ビジネスエンジニアリング専攻

目次

	頁
第1章 緒論	1
1.1 断熱材の成り立ちとエアロゲル不織布複合断熱材について	1
1.2 薄型エアロゲル不織布複合断熱材の設計と特性評価に関する課題	2
1.2.1 薄型エアロゲル不織布複合断熱材の剛性設計	2
1.2.2 薄型エアロゲル不織布複合断熱材の熱伝導率評価方法	4
1.2.3 薄型エアロゲル不織布複合断熱材の高温時の断熱性確保	6
1.3 本研究の目的	7
1.4 本論文の構成	9
第2章 剛性向上のための不織布配向設計手法の提案	13
2.1 緒言	13
2.2 不織布の配向分布の違いによる断熱材の剛性評価	15
2.2.1 検証方法	15
2.2.2 現行構造の把握	15
2.2.3 シミュレーションモデル化	18
2.2.4 精度検証	21
2.2.5 種々の配向分布モデルによる剛性の評価方法	22
2.2.6 結果	23
2.2.7 繊維の接合点数と繊維含有率の影響について	27
2.3 断熱材の熱伝導率に及ぼす配向分布の影響の確認	28
2.3.1 確認方法	28
2.3.2 結果と考察	29
2.4 考察	30
2.5 結言	32
第3章 薄型断熱材の熱伝導率測定方法の構築	35
3.1 緒言	35

3.2	測定原理および測定装置	35
3.3	測定検証	39
3.3.1	検証内容	39
3.3.2	複合体設置方法の検討	40
3.3.3	ベースプレート仕様の検討	43
3.3.3.1	検討内容	43
3.3.3.2	繰返し測定時のばらつき評価	45
3.3.3.3	JIS 規格における熱抵抗条件の検討	45
3.3.3.4	熱伝導率の基準値との比較検証	49
3.4	拡張性検証	50
3.5	結言	53
第4章	エアロゲル複合断熱材のふく射低減設計手法の提案	55
4.1	緒言	55
4.2	シリカエアロゲルの有効熱伝導率	57
4.3	解析モデル化の提案と精度検証	58
4.3.1	モデル化方法の提案	58
4.3.2	有効熱伝導率評価方法	62
4.3.3	簡易モデルの条件構築	63
4.3.4	精度検証	66
4.4	有効熱伝導率低減効果検証	70
4.5	結言	76
第5章	断熱材の設計と特性評価手法の適用検証	79
5.1	緒言	79
5.2	配管パイプ用断熱材への適用検証	79
5.3	車載機器用断熱材への適用検証	85
5.4	住宅の断熱性能向上に向けての適用検証	89
5.5	結言	96
第6章	結論	99

6.1 本研究のまとめ	99
6.2 今後の展望	101
謝辞	103
参考文献	105
研究業績	113

第1章 緒論

1.1 断熱材の成り立ちとエアロゲル不織布複合断熱材について

「地球温暖化」の問題が初めて取り沙汰されたのは、1985年、オーストラリアのフィラハで開催された、気候変動に関する科学的知見整理のための国際会議(フィラハ会議)である[1]。図1.1に示すように、世界の年平均気温[2]は右肩上がりでも上昇しており、産業革命時から現在(2014年)までに約0.85°Cも高くなっている。この温暖化の原因は、太陽放射の変化による地表温度の上昇ということも考えられるが、主たるものは、1750年以降の人類の活動が多く影響していると言われている[3]。以来、我々人類は、30年以上に亘り、「環境保護」、「省エネ」を方針に掲げ、様々な技術により、地球の温暖化を防ぐ施策を打ってきた。

建造物や熱機関、自動車等にて発生する熱エネルギーを、室外や機器の外部に逃がすのを防ぐ“断熱材”は、こうした省エネの観点で開発されてきた材料であり、現在まで

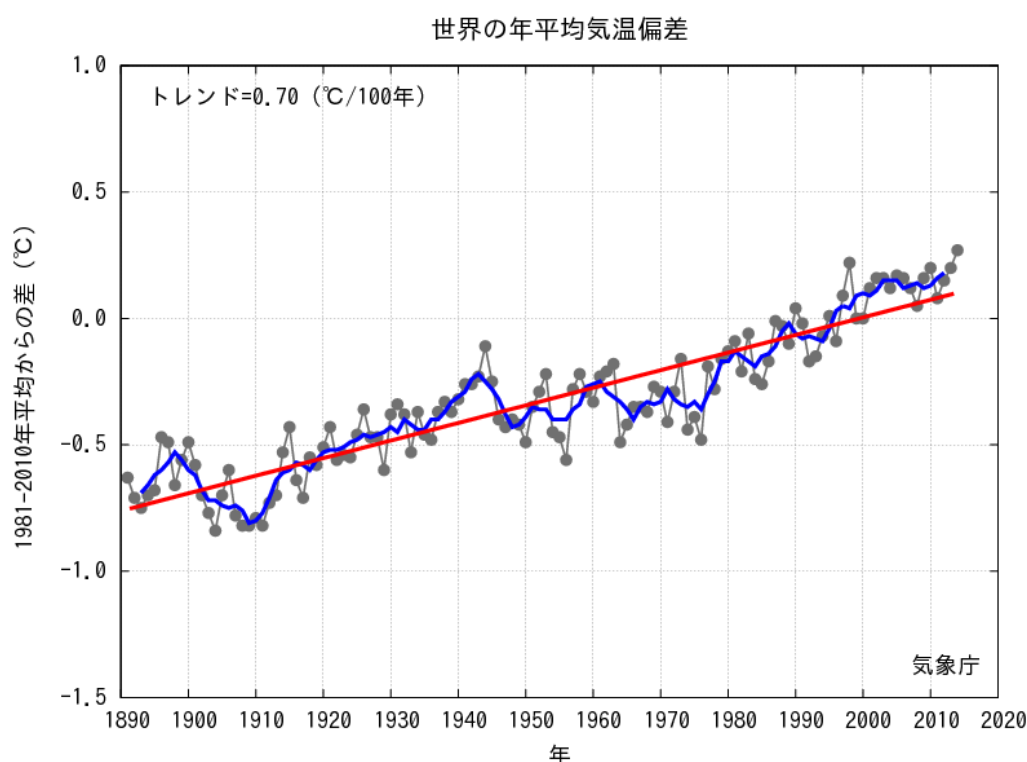


Fig1.1 Changes in the annual average temperature of the world[2]



Fig.1.2 Overview of aerogel non-woven thermal insulator

に様々な種類の断熱材が考案，開発，実用化されている。

シリカエアロゲルは，こうした断熱技術の進歩の過程で，断熱材としての活用が模索されてきた材料である。エアロゲルの歴史は，アメリカの研究者 S. S. Kistler が，シリカ材をはじめとするエアロゲルの生成に成功したことに遡る[4]。以来，薄い厚さのもので十分な断熱性を有するということから，エアロゲルを断熱材として活用できないかとの議論がなされ，現在，石油パイプライン等の配管向けに，綿状の不織布繊維とエアロゲルを複合させた断熱材が実用化されている[5]。また，近年，ますます高速化，高性能化するスマートフォンやウェアラブルデバイスなどの発熱による，ユーザへの低温やけどを防止するべく，デバイス内の発熱体と筐体の間に挟んで用いる厚さ 1 mm 以下の薄型エアロゲル不織布複合断熱材も実用化された[6]。上記のようにエアロゲルは，構造上非常に脆い材料であることから，単体では用いず，図 1.2 に示すように，主に面内に配向する長繊維の不織布を骨格材とし，そこにエアロゲルを形成したものが断熱材として活用されている。

しかしながら，上記の断熱材を，これまで断熱材活用の主分野であった住宅（建物）や，これから断熱材の活用が期待される車載機器の断熱材として展開していくためにはまだいくつもの課題がある。本研究は，薄型エアロゲル不織布複合断熱材の設計・製造から評価にまつわる種々の課題に着目し，それらを解決することにより，断熱材の多分野への展開を目指すものである。

1.2 薄型エアロゲル不織布複合断熱材の設計と特性評価に関する課題

1.2.1 薄型エアロゲル不織布複合断熱材の剛性設計

エアロゲル不織布複合断熱材は、断熱成分であるエアロゲルの脆弱性を、骨格材であり剛性が大きい不織布でカバーすることにより製品化が実現した。すなわち、エアロゲル不織布複合断熱材に付与される外力、圧力等を不織布繊維が吸収し、脆弱なエアロゲルが破壊、破損しないよう支えている。電子部品用の断熱材として実用化された薄型エアロゲル不織布複合断熱材を他の分野へ展開していくためには、断熱材の剛性を向上させる設計が不可欠である。

エアロゲル不織布複合断熱材の剛性を高める方法には、下記2つの施策が考えられる。1つは、エアロゲルのゲル構造の強化であり、もう1つは、骨格材である不織布による強化によって、エアロゲルが持つ脆い機械特性を向上あるいはカバーするものである。

前者（エアロゲル自体の強化）については、エアロゲルの修飾体による強化[7][8]、構造を改良による強化[9][10]、基材の検討による強化[11][12]、表面改質による強化[13][14]など、かねてより多くの研究がなされ、剛性の高いエアロゲル材が開発されている。一方、後者（不織布繊維による強化）については、エアロゲル不織布複合断熱材に関する研究分野では確認できない。しかしながら、エアロゲルを母材、不織布を強化材とする繊維強化複合材料として考えれば、この分野に関する諸研究内容が活用できる可能性がある。

不織布の剛性向上に関する研究は、繊維の太さや含有率の設計により剛性向上を行う主旨のものと、繊維の太さや含有率は設計せず、不織布の配向分布設計により剛性向上を行う主旨のものに大別される。エアロゲル不織布複合断熱材に関しては、断熱材としての機能（低熱伝導率）を満たすことが第一優先であり、熱伝導率の上昇につながる不織布繊維の太さや含有率の大きな変更が困難であるため、本研究では不織布の配向分布による剛性向上に関するものに着目する。

不織布の配向分布と剛性に関するこれまでの研究には、不織布繊維が配向分布を持つ複合材料を一方向繊維材の積層材として置き、積層板理論にて引張剛性と変形状態をまとめたもの[15]、同じく積層板理論により曲げ剛性を基準に複合材料の設計を行うもの[16]や、短繊維を楕円形の物体とした等価介在物理論をベースとして分布配向にまで拡張対応させたもの[17][18]、同じく等価介在物理論におけるせん断方向の荷重の伝達を改良したもの[19]、短繊維強化樹脂に対し、マトリックス中の単一繊維の力の伝達

から剛性を求めたもの[20]，成形条件と配向パラメータの関係を明確化し，パラメータと成形品の弾性率，強度を紐付けたもの[21]，短繊維の配向分布と剛性，疲労特性の関係を明らかにしたもの[22][23]，射出成形後の各部位のローカルな配向に対する強度の分析を行ったもの[24]，短繊維の配向分布と剛性の関係を計算する手法の構築[25]など多数ある。

しかしながら，エアロゲル不織布複合断熱材に適用する不織布は，上記文献の対象である，樹脂成形によって成形時に配向が決定する短繊維ではなく，また，繊維のレイヤーごとにおおよそ配向の主方向が定まっている一方向材とも異なり，複数の繊維が互いに絡まりあって構成される長繊維である。よって，上述したこれまでの研究をそのまま設計に活用することが難しい。また，本構造の断熱材では，設計した配向構造が断熱材としての熱伝導率上昇につながらないかも併せて確認する必要もあるため，本研究では，実際の構造（シリカエアロゲルと繊維の複合構造）をベースに，断熱材をシミュレーションモデル化し，構造解析により不織布配向分布と剛性の関係を明確化した上で，同モデルを用いた熱伝導解析により，断熱性（熱伝導率）を評価する。

1.2.2 薄型エアロゲル不織布複合断熱材の熱伝導率評価方法

断熱材においては，その性能（熱伝導率）が商品価値を左右する。特に近年では，政府のCO₂削減目標達成の一施策として，省エネ住宅の断熱性能の向上が掲げられ，断熱性能を司る住宅用断熱材の熱伝導率を正しく評価することが，住宅の断熱性能を設計・評価する上で重要である。

図 1.3 は，文献[26]に記載されている，同一のポリウレタンフォーム材の熱伝導率を，異なる測定方法（周期加熱法，非定常熱線法およびホットディスク法）にて測定した結果である。図中の曲線は，非定常熱線法のデータから最小二乗近似によって描いたものであるが，測定方法によっては，曲線から±10%を遥かに越える差があるものもあり，方法の違いによって，計測される熱伝導率に大きな違いが出ることがわかる（非定常熱線法が適切な測定方法という意味ではない）。一方，薄型エアロゲル不織布複合断熱材は，ウレタンフォーム等の建築・家電用断熱材と同等の0.02 W/(m・K)程度，あるいはそれ以下の低い熱伝導率を持ち，厚さ1 mm 以下という非常に薄い構造であり，熱伝導率を測

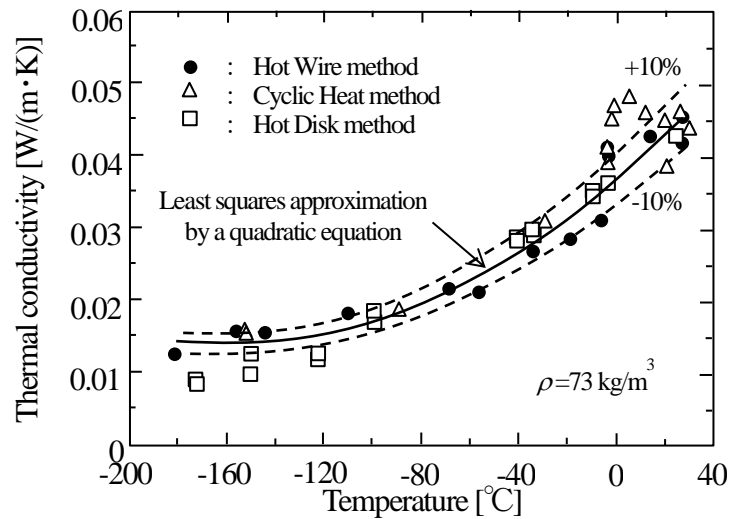


Fig. 1.3 Thermal conductivity of polyurethane foam (73 kg/m^3)

定することが難しい。こうした“薄く断熱性の高い”材料に対しては、現在も、住宅用断熱材の測定規格をベースに、測定方法について国際的な議論がなされている段階である[27]。“薄い”材料の測定手法としては、 3ω 法[28]-[31]がある。しかしながら、本手法の適用対象は、導電性のある数 100 nm までの厚みの薄膜であるため、本断熱材への適用は難しい。また、レーザ周期加熱法[32]、光熱反射率法[33]、通電加熱法[34]、マイクロビームセンサ[35]を用いた手法がそれぞれあるが、同様に導電性薄膜を対象としたものであり、面内方向の熱伝導率を測定する手法でもあるため適用ができない。一方、“断熱性の高い”材料の測定方法としては、主に真空断熱材を対象とした、伝導・対流・放射の各々に起因する熱伝導率を複数の測定により求める手法[36]や、芯材部分の熱伝導率を推定する手法[37]、絶対法といわれる保護熱板法により測定する手法[38][39]、周期加熱法、ホットディスク法、熱線法を用いた手法[40]など多数研究されている。しかしながら、どの手法も厚み 10 mm 以上の真空断熱材をはじめとする各種断熱材を対象としており、本研究で対象とする 1 mm 以下の厚みの断熱材に適用することは難しい。この代用策として、断熱材を複数枚重ね、熱伝導率が測定できる厚みを設けて測定する方法が考えられるが、本方法では、不良品のロットアウト等、1枚1枚の製品保証手法としての適用ができない。さらには、こうした熱伝導率が未知である薄い繊維系材料の熱伝導率を、既知の材料と積層して測定し、のちに未知の材料の熱伝導率を算出する手法[41]

が研究されているが、 $0.1 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ に近い熱伝導率の繊維が対象であり、測定ばらつきのレンジも $0.005 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 程度あるのが現状である。

そこで、本研究では、建築・家電用断熱材の熱伝導率測定の標準手法である熱流計法 (JIS A 1412-2)[42]をベース技術として、厚さ 1 mm 以下の薄い断熱材に対し、1枚ずつ熱伝導率を測定する手法を検討する。

1.2.3 薄型エアロゲル不織布複合断熱材の高温時の断熱性確保

シリカエアロゲル不織布複合断熱材は、放射率の大きいシリカが微粒子状に三次元ネットワークを形成しており表面積も大きいため、非常にふく射伝熱が生じやすい構造である。ふく射による熱の伝播は、 100°C を越える環境において主となると言われており [7]、ふく射伝熱が増すことによって、断熱材の見かけの熱伝導率（有効熱伝導率）が上昇してしまう。

上記に対しては、研究開発が先行するウレタンフォーム等のふく射伝熱の抑制に用いられる、放射吸収材あるいは放射反射材[43][44]と呼ばれるふく射伝熱低減粒子を断熱材に複合させることがその解決策として考えられる。放射吸収材は、比較的指向放射率が大きい（吸収率が大きい）粒子であり、 SiC 、 SiO_2 、 TiO_2 などがこれに当てはまる。黒色の粒子であり耐熱性があることから核融合炉などの高温炉の放熱体として適用されてきた SiC [45]-[48]以外の SiO_2 [49]-[51]、 TiO_2 [52]-[55]は、半透明あるいは白色の粒子で散乱性があることから、可視光領域（数 10 nm ～数 100 nm ）の径の粒子が化粧品分野で汎用されてきた。ふく射伝熱低減粒子として適用する場合は、近赤外線を吸収・散乱させる必要があるため、 $1 \mu\text{m}$ オーダの径の粒子[56]が用いられる。また、放射反射材は、比較的指向放射率が小さい（反射率が大きい）粒子であり、 Al_2O_3 、 ZrO_2 などがこれに当てはまる。 Al_2O_3 [57][58]、 ZrO_2 [59][60]の各粒子も、白色であり反射性があることから、 SiO_2 、 TiO_2 とともに粒子径の小さいものが化粧品分野で活用されてきた。こうした粒子については、断熱材中のふく射伝熱抑制の用途に加え、大気中に散布することによる地表温度の上昇抑制[61][62]に対しても研究がなされている。

しかしながら、シリカエアロゲルより熱伝導率が2～4桁大きいふく射伝熱低減粒子を断熱材に多量に添加すれば、粒子を複合させたことによる断熱性の低下（固体熱伝導率

の上昇) が起こることも想像に難くない。

これまで、断熱材へのふく射伝熱低減粒子の複合化は、先行するウレタンの分野でも、その材料選定や配合率などの設計について、各メーカーの経験・ノウハウに依ってきた。従来の研究でも、断熱材中の粒子の配合量とふく射の減衰量との関係は示唆されている[63]ものの、粒子配合量と固体熱伝導率の上昇の関係は見出されていない。そこで本研究では、薄型シリカエアロゲル不織布複合断熱材を対象とし、ふく射伝熱の影響が出やすいと考えられ、シリカエアロゲル不織布複合断熱材の適用展開が期待されている150°C環境でのふく射を考慮した熱伝導解析により、シリカエアロゲルに複合し、150°Cにおける有効熱伝導率を低減することができるふく射伝熱低減粒子の種類と配合率の範囲について検討を行った。特に本取組みでは、数10 nm オーダーの径をもつシリカエアロゲル粒子と数 μm オーダーの径のふく射伝熱低減粒子の寸法差に対するモデル化手法を提案して検討を行った。

今後、真夏には壁面や屋根の温度が70°C近くになる住宅の断熱や、100°Cを越えるエンジンルームの近傍で稼動する車載機器の断熱（自動車に搭載されるECUや電動モータなどの電子制御基板の発熱源からの断熱など）に本断熱材を適用展開していくためには、150°C近傍での断熱性の低下を克服することが必須となる。

1.3 本研究の目的

本研究では、薄型エアロゲル不織布複合断熱材の適用範囲拡大のため、断熱材の設計・評価に関する上述の課題を解決することを目的とする。これらのエアロゲル不織布複合断熱材に関する課題に対し、既存研究で提唱されている内容の問題点を照らし合わせ、本研究で論じる研究課題を以下にまとめる。

(1) 不織布の配向設計に関する研究課題

- これまでは、配向設計に関し、不織布繊維を一方向繊維材の積層体に置き換えたもの、短繊維を対象とするものであれば研究がなされていた。
- 材料の断熱性（熱伝導率）評価に関しては未考慮である。

- ・ エアロゲル不織布複合材料を構成する不織布の構造である，複数の繊維が互いに交差している（一方向に配向が定まらない）長繊維を対象とした不織布の配向設計手法と熱伝導率評価手法の構築が必要

(2) 断熱材の熱伝導率測定方法に関する研究課題

- ・ これまでは，薄型材料に対しては，導電性材料のための標準的な熱伝導率評価手法があった．また，厚肉の断熱性材料に対しても，標準的な評価手法があった．
- ・ 薄型の断熱性材料に対しては，既知の熱伝導率を持つ材料との組合せにより熱伝導率を算出する手法が提案されていた（測定精度は未考慮）．
- ・ 薄型エアロゲル不織布複合断熱材のような，熱伝導率が小さく，かつ厚みが1 mm 以下の材料に関する，測定精度の高い熱伝導率測定手法の確立が必要

(3) 断熱材の高温使用時(150°C近傍)の断熱性能向上に関する研究課題

- ・ これまでは，化粧品分野にて可視光領域の光線を反射・吸収・散乱させる複数種の粒子の研究がなされてきた（粒子径：数10 nm～数100 nm，ふく射伝熱の低減とは無関係）．
- ・ ウレタンフォーム等の分野で，こうした粒子（ふく射伝熱低減粒子）による，近赤外線領域でのふく射伝熱低減の検討がなされている（粒子径：数 μm ）．
- ・ 断熱材中の粒子配合量とふく射伝熱の減衰の関係については研究がなされている．
- ・ 断熱材中のふく射伝熱低減粒子に関する，ふく射伝熱の低減と固体部分の熱伝導の上昇を考慮した，粒子種類と配合率を決定する設計手法の構築が必要

こうした課題を，図1.4に示す薄型シリカエアロゲル不織布複合断熱材の設計の全体像に照らし合わせると，まず，mm オーダのマクロな領域では，シリカエアロゲルが不織布と複合体を形成しており，不織布の配向が断熱材の剛性や熱伝導率に影響する．一方，ミクロな領域に関しては，nm オーダのシリカエアロゲル粒子群の中に μm オーダのふく射伝熱低減粒子が存在し，これが断熱材の高温時の断熱性向上に有用となる．また，こうしたマクロな領域，ミクロな領域に共通して，断熱材の特性（熱伝導率）を計測する技術が必要となっている．

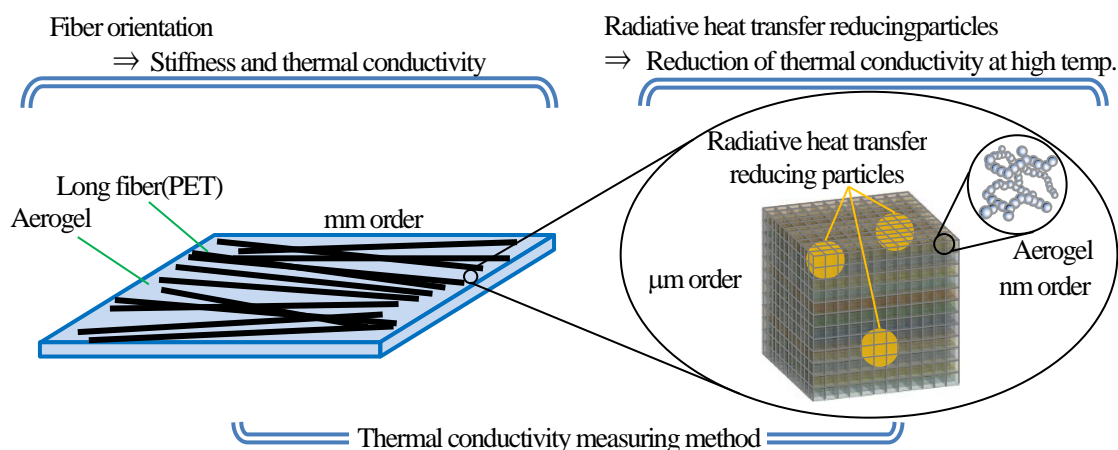


Fig. 1.4 Overview of problems related to the design of thin silica aerogel non-woven composite insulator

上記に示した課題の解決のため，本研究では以下を研究内容とする．

- (1) 構造解析シミュレーションによる，長繊維不織布骨格材の構造を考慮した配向設計による断熱材の剛性向上の検討と，熱伝導解析シミュレーションによる断熱材の断熱性（熱伝導率）の評価ができる手法の確立
- (2) 熱流計法をベースとした，熱伝導率 $0.02 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 以下，厚み 1 mm 以下の薄型断熱材の熱伝導率評価手法の確立（目標精度：ばらつき $0.002 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 以内）
- (3) 断熱材の 150°C 近傍でのふく射に起因する熱伝導率の上昇を抑制するための，ふく射熱低減粒子の選定と配合率設計に関するシミュレーション評価手法の確立

1.1 節にて述べたように，薄型エアロゲル不織布複合断熱材は，断熱性の高いシリカエアロゲルをベースとして初めて断熱材として製品化されたものである．電子機器の断熱用途で開発された薄型エアロゲル不織布複合断熱材を，住宅や車載機器等に展開していくためには，上記の設計と評価に関する課題を解決することが不可欠であり，これらの課題解決により用途展開ができることで，地球環境の保全に貢献するものとする。

1.4 本論文の構成

本論文は6章で構成される．図 1.5 に研究の流れを示す．

第1章の緒論では、断熱材の成り立ちから薄型エアロゲル不織布複合断熱材の開発までの経緯を述べ、住宅や車載機器といった多分野への適用展開を図るために必要な課題と、それらに対する本研究の目的と研究項目について示す。

第2章では、エアロゲル不織布複合断熱材の剛性向上のため、骨格材である長繊維の不織布構造による剛性設計を検討した。特に骨格材構造による断熱材の断熱性の低下を抑えるため、不織布の配向分布のみによる剛性向上の方法を構造シミュレーションにより検討し、熱伝導シミュレーションも併せて活用することにより、配向分布設計による剛性向上と断熱性の維持を両立することを示す。

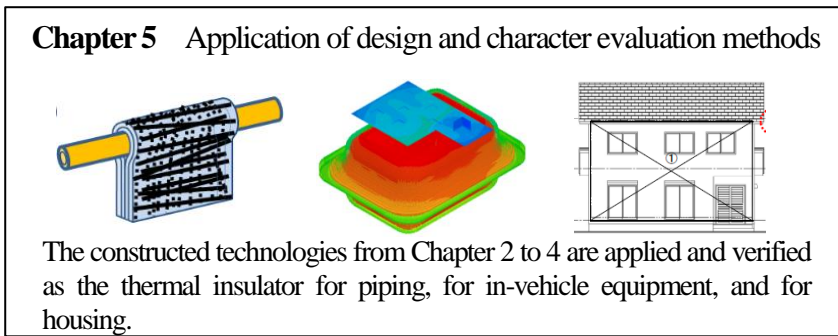
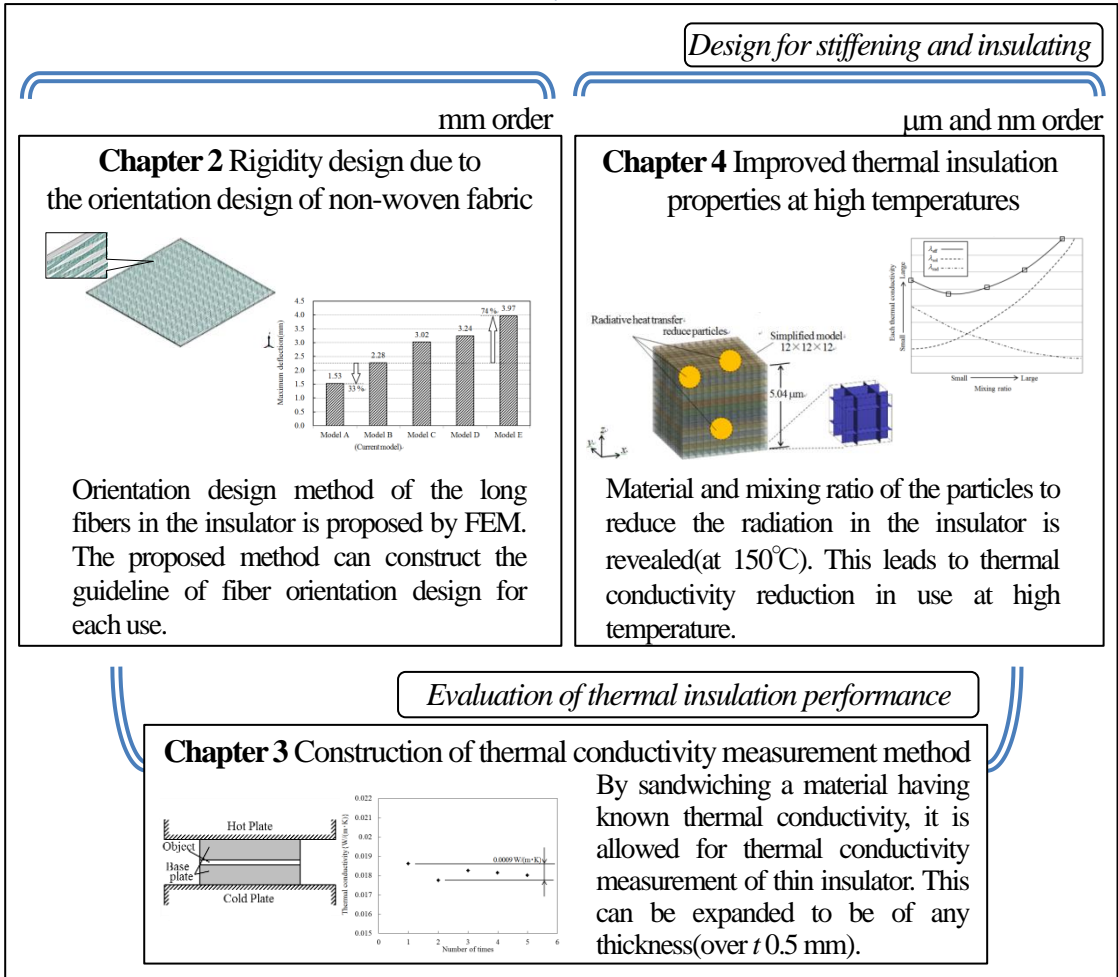
第3章では、本研究の対象である断熱材を含む薄型の断熱材に対する熱伝導率測定を行うため、熱流計法をベースに、既知の熱伝導率を有する材料を介在させて測定する方法を検討する。剛性の異なる複数の既知材料について検討し、熱流計法の評価基準を満たし、高精度な測定を可能とする材料と厚み、設置方法の選定を行う。

第4章では、断熱材の高温使用時のふく射伝熱による断熱性の低下（有効熱伝導率の上昇）を抑えることを目的とし、ウレタンフォーム等の分野で活用されている種々のふく射伝熱低減粒子に対し、薄型エアロゲル不織布複合断熱材にて効果のある材料の選定と、その配合率について、ふく射伝熱を考慮した熱伝導シミュレーションによる評価を行う。

第5章では、第2章から第4章まで研究を行ってきた設計手法・評価手法の内容を盛り込み、配管パイプ用断熱材、車載機器用断熱材、住宅用断熱材としてのエアロゲル不織布複合断熱材の適用検証を行う。骨格材である不織布の配向は配管パイプ用断熱材としての初期性能に大きく影響し、断熱材の性能向上は車載電子機器やエンジンユニットの設計自由度を高め、住宅の断熱性能ならびにCO₂削減量を高めることを示す。

第6章では、各章で得られた研究成果と今後の展望をまとめる。

Chapter 1
Issues about the design and evaluation
of thin aerogel non-woven composite thermal insulation material



Chapter 6 Summary and conclusion

Fig. 1.5 Scope and the outline of each chapter

第2章 剛性向上のための不織布配向設計手法の提案

2.1 緒言

断熱性の高い材料として生成方法が確立されたエアロゲルが、近年に至るまで、断熱材として活用されていなかった要因の一つに、エアロゲルの構造の脆さがある。すなわち、断熱材としてエアロゲルを被断熱体に設置しても、振動や衝撃などでそのゲル構造が保てず、長期信頼性に欠けるといえるものである。近年、こうした問題をカバーするべく、主に面内に配向する長繊維の不織布を骨格材とし、そこにエアロゲルを形成したものの（エアロゲル不織布複合断熱材）[6][64]が開発され、不織布の剛性により、エアロゲル構造を維持し、ゲル構造の破損、脱落を守護する構造のものが、現在断熱材として活用されている。

本断熱材について、エアロゲルを母材、不織布を強化材とした複合材料として考えた場合、不織布の配向設計により複合材料としての剛性を高める手法の適用が考えられる。不織布の配向分布と剛性に関するこれまでの研究には、不織布繊維が配向分布を持つ複合材料を一方向繊維材の積層材として置き、積層板理論にて引張剛性と変形状態をまとめたもの[15]、同じく積層板理論により曲げ剛性を基準に複合材料の設計を行うもの[16]や、短繊維を楕円形の物体とした等価介在物理論をベースとして分布配向にまで拡張対応させたもの[17][18]、同じく等価介在物理論におけるせん断方向の荷重の伝達を改良したもの[19]、短繊維強化樹脂に対し、マトリックス中の単一の繊維の力の伝達から剛性を求めたもの[20]、成形条件と配向パラメータの関係を明確化し、配向パラメータと成形品の弾性率、強度を紐付けたもの[21]、短繊維の配向分布と剛性、疲労特性の関係を明らかにしたもの[22][23]、射出成形後の各部位のローカルな配向に対する強度の分析を行ったもの[24]、短繊維の配向分布と剛性の関係を計算する手法の構築[25]など多数存在する。

しかしながら、エアロゲル不織布複合断熱材に適用する不織布は、上記文献の対象である、樹脂成形によって成形時に配向が決定する短繊維ではなく、また、繊維のレイヤーごとにおおよそ配向の主方向が定まっている一方向材とも異なり、複数の繊維が互いに絡まりあって構成される長繊維である。よって、上述したこれまでの研究をそのまま設

計に活用することが難しい。また、本構造の断熱材では、設計した配向構造が断熱材としての熱伝導率上昇につながらないかも併せて確認する必要もあるため、本研究では、実際の構造（シリカエアロゲルと繊維の複合構造）をベースに、断熱材をシミュレーションモデル化し、構造解析により不織布配向分布と剛性の関係を明確化した上で、同モデルを用いた熱伝導解析により、断熱性（熱伝導率）を評価する。

本章にて提案する設計手法を図 2.1 にフローチャートで示す。まずは、断熱材を構成する現行の不織布構造を模擬したモデリングを行う[図 2.1(a)]。次に自重たわみなど剛性を評価するための構造シミュレーションを行い、剛性を評価する[図 2.1(b)]。ここでは、断熱材の剛性向上の目標値として、現行比 120%以上の剛性が得られることとする。

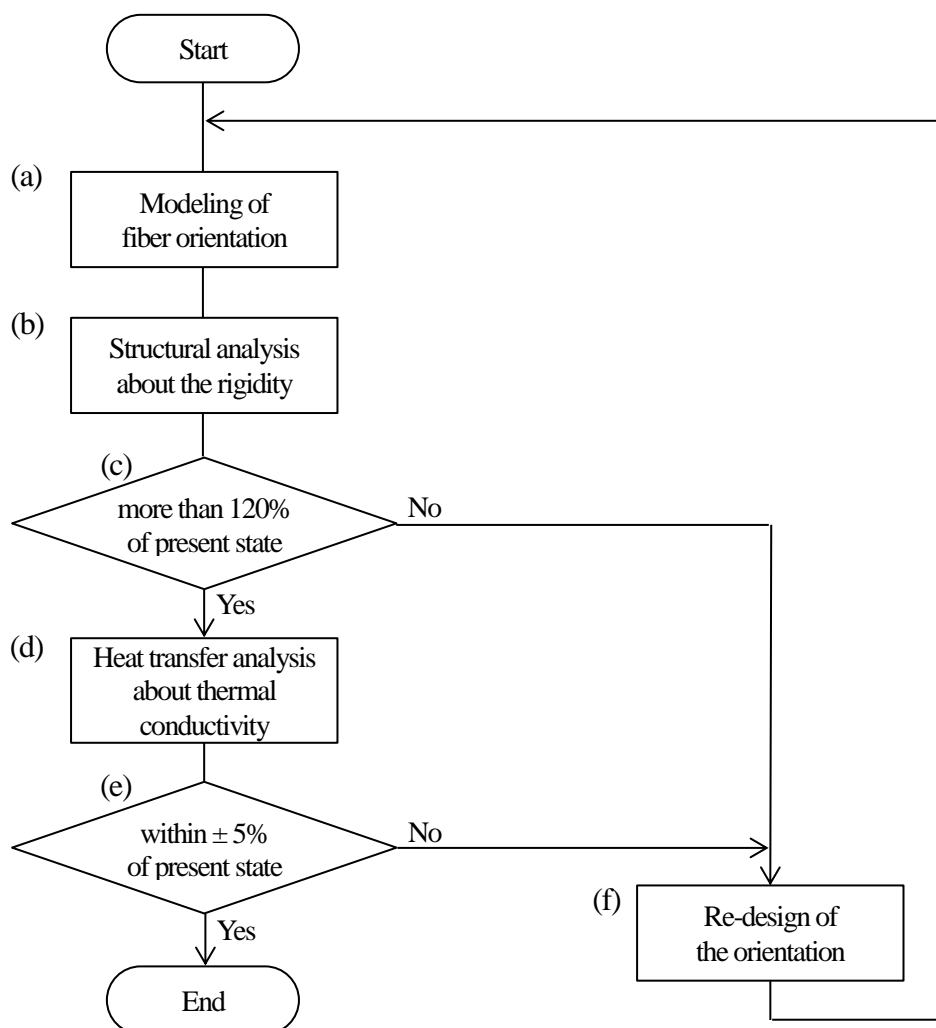


Fig. 2.1 Flowchart of design method proposed in this chapter

計算された断熱材の剛性が、図 2.1(c)に示す判定により現行の不織布構造のものより 120%以上である場合、図 2.1(d)の熱伝導率の評価に進む。一方、現行比 120%に満たない場合は図 2.1(f)に示す不織布配向の再設計に移り、設計変更した不織布のモデリング [図 2.1(a)]に戻って解析評価をやり直す。また、図 2.1(d)の熱伝導率の評価に進める場合は、断熱材の熱伝導率の計算に移る。ここでは、断熱材の熱伝導率の目標値として、現行比±5%以内に収まることとする。図 2.1(e)に示す判定により現行の不織布構造のものより熱伝導率が±5%以内である場合は、剛性向上と熱伝導率の維持ができたものとして設計を完了する。一方、熱伝導率が現行比±5%以内に収まらなかった場合は、図 2.1(f)に示す不織布配向の再設計に移り、設計変更した不織布のモデリング [図 2.1(a)]に戻って解析評価をやり直す。このフローを剛性向上と熱伝導率の維持が両者目標達成できるまで繰り返す。

2.2 不織布の配向分布の違いによる断熱材の剛性評価

2.2.1 検証方法

本章では、エアロゲル不織布複合断熱材の熱伝導率に及ぼす影響が小さいと考えられる不織布の配向分布に着目し、どのような配向分布であればエアロゲル不織布複合断熱材の剛性向上につながるかという点について、実際のシリカエアロゲルと不織布の配向構造をベースに構築したシミュレーションモデルを用いて評価を行う。

2.2.2 現行構造の把握

本研究で、エアロゲル不織布複合断熱材の骨格材として対象とした不織布は、繊維同士の接合をサーマルボンド接合法により行っており、不織布繊維の配向は、図 2.2 に示すように、紡糸方向を主とし、これに幾分かの角度を持つ分布となっている。本章では、不織布繊維の配向の向きを定義を行うべく、配向を図 2.2 に示すように紡糸方向を主軸の x 軸とし、面内の直交方向を y 軸、面外方向を z 軸とした。また配向の向きについては、主軸 (x 軸) からの y 軸に対する傾きを角度で定義することとした。

現状の不織布の配向分布を把握するべく、面内 (x, y) 方向、面外 (z) 方向に分けて観察を行った。面内方向については、オリンパス (株) 製工業検査用顕微鏡 MX51 を用

い、まず、図 2.4 に示すように、不織布の各所を等間隔に選択した。顕微画像の焦点を

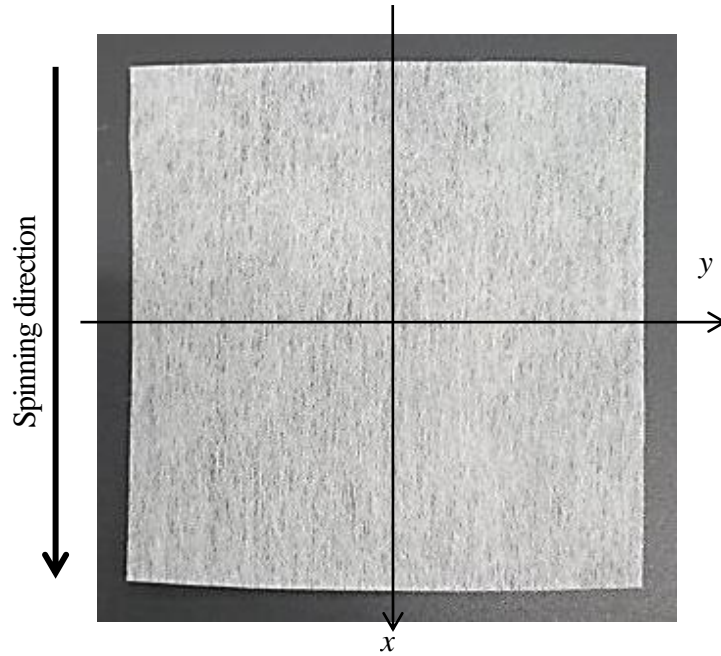


Fig. 2.2 Definition of x and y direction

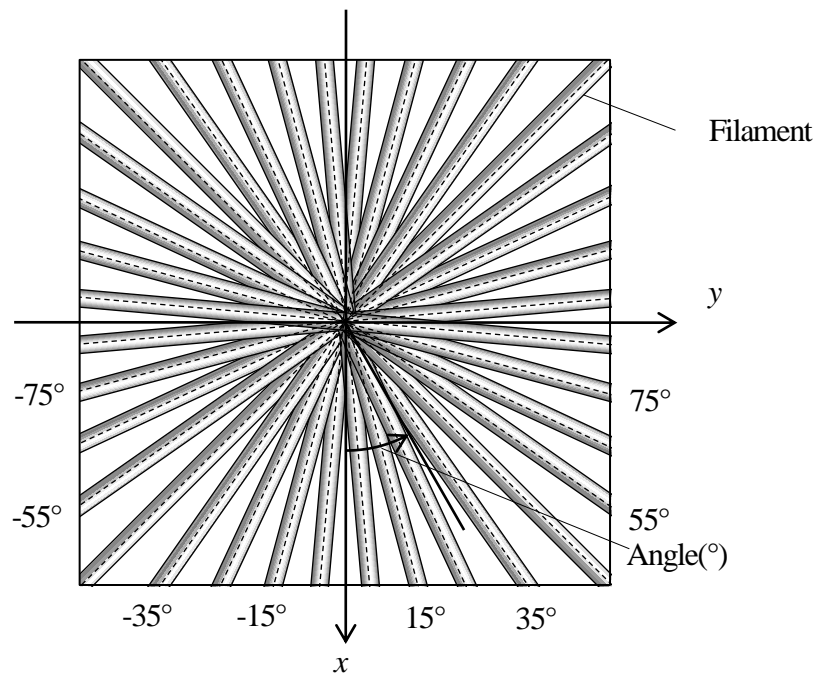


Fig. 2.3 Definition of the orientation in x - y plane

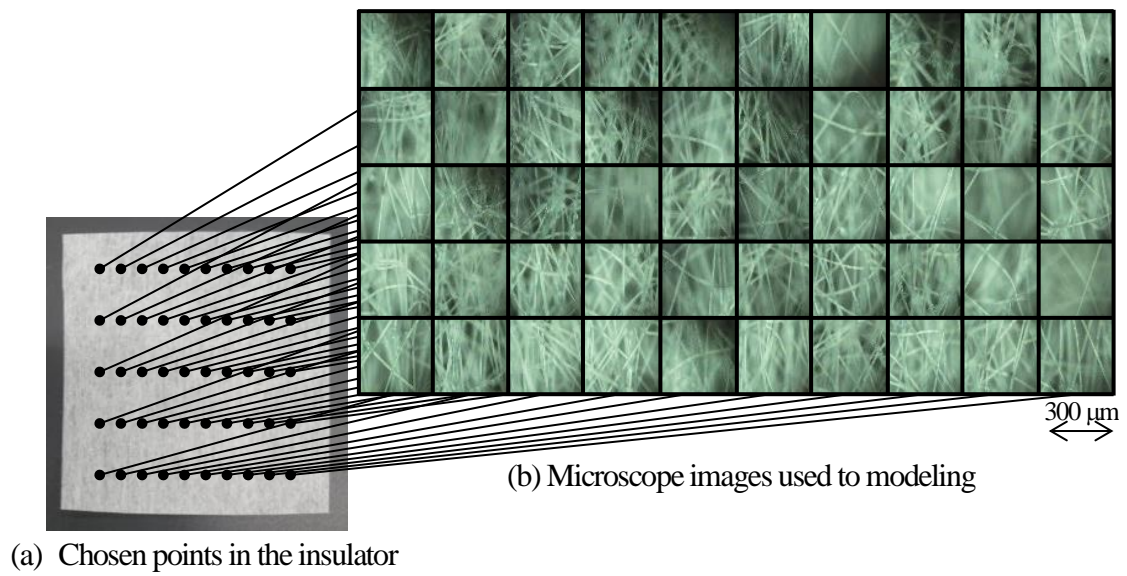


Fig. 2.4 Observation points and their images of the insulation material

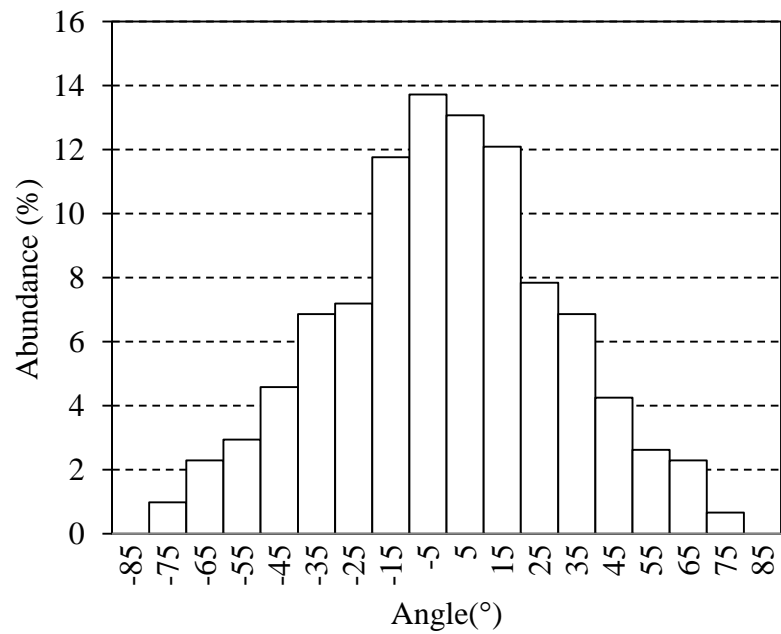


Fig. 2.5 Orientation distribution of the insulator

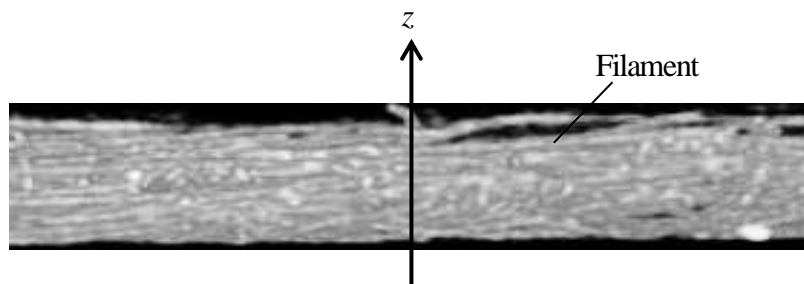


Fig. 2.6 3D X-ray image of out-of-plane of the insulator

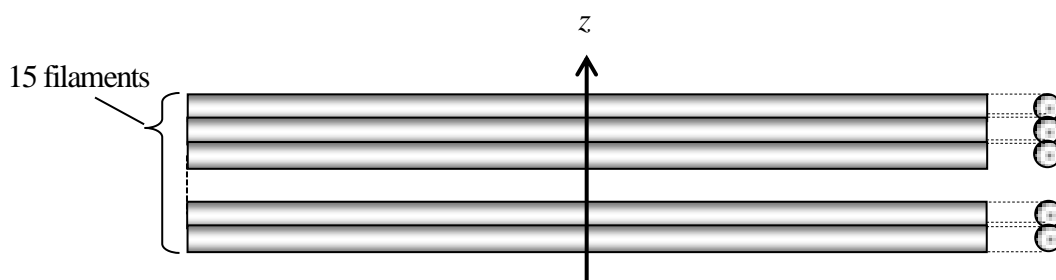


Fig. 2.7 Orientation distribution of the insulator

固定し，焦点が合った繊維のみを同じレイヤーにあるものとカウントし，図 2.3 にしたがって配向角の区分を行った．なお，例えば，配向角が $0^{\circ} \sim 10^{\circ}$ の間にある場合は，その中央値である 5° とカウントすることとした．不織布を構成する長繊維の長さは，対象とした 40 mm 角の不織布より十分大きく (40 mm より十分長く)，顕微画像内で湾曲あるいは屈曲している繊維については，画像内で最も繊維の体積割合が大きい角度を配向角とした．結果として得られた配向分布を図 2.5 に示す．面外方向については，(株) 島津製作所製 X 線検査装置 SMX-100 を用い，配向分布を観察した．結果として，図 2.6 に示すように，繊維はほぼ面内 (x - y 面) に並行に配向していることが確認できた．また，同図から， z 方向には 15 本のレイヤーの不織布により構成されており，面外方向については，図 2.7 に示すような z 軸に向かっての傾きのない構造になっていることが確認された．また，エアロゲル不織布複合断熱材のサンプルの厚みを，(株) ミットヨ製デジマチックインジケータ ID-H530 (押圧 5.00 kPa) により測定したところ， 0.211 mm であった．

2.2.3 シミュレーションモデル化

上記の結果より、現状の不織布構造をベースとしたエアロゲル不織布複合断熱材の構造シミュレーションモデルを作成した。モデルは、次節に示す自重によるたわみの評価を鑑み、40 mm 角の断熱材を想定した。図 2.4(b)の画像による計測結果より、本不織布の平均繊維径は $16\ \mu\text{m}$ であり、また、面内における、同じレイヤーの繊維と繊維の間隔の平均値は $60\ \mu\text{m}$ であった。また、面外方向については、前述の通り 15 レイヤーの不織布が重なっていることから、図 2.8 に示すように、 y 方向について $60\ \mu\text{m}$ の間隔を空けて x 方向に直径 $16\ \mu\text{m}$ の繊維を配置し、 z 方向には 15 本の繊維が鉛直に並ぶように配置した。面内方向の配向分布については、図 2.5 に示した配向分布になるよう、実際の配向に応じてランダムに紡糸方向 (x 方向) の中央を中心として、 z 軸周りに配向させ、 x 軸との角度を配向角とした。また、前節より、エアロゲル不織布複合断熱材の厚みが $0.211\ \text{mm}$ であることから、図 2.8 に示すように、不織布 15 レイヤー分の厚みが $0.211\ \text{mm}$ になるようにし、周りをエアロゲルが埋めている構造とした。この時、繊維径が $16\ \mu\text{m}$ であることから、繊維は z 方向に $1\ \mu\text{m}$ ずつ重なる構成となるが、重なり部分は、対象とした不織布がサーマルボンド接合法を採用していることから、2 本の繊維を重なり部分にてブーリアン加算を行い、接合 (接着) した状態としてモデル化を行った。なお本来のサーマルボンド接合は、不織布を構成する繊維より低融点である樹脂繊維を製造工程

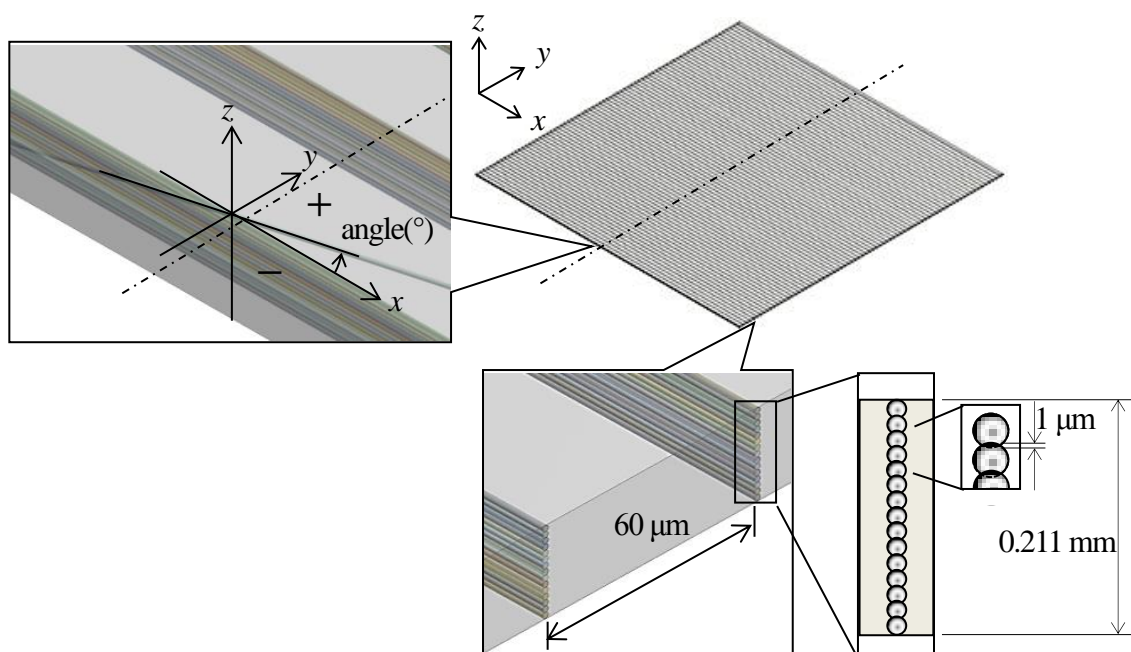


Fig. 2.8 Setting the size configuration and the orientation angle of the insulation model

中に微量に混合し、溶融した低融点繊維により不織布を構成する繊維の交錯点を接着させて不織布繊維が解けないように構造強化するものであるが、本取組みでは低融点繊維はモデル化せず、単純に交錯点で2本の繊維が接合しているものとした。また、同じレイヤーにて重なり合っている繊維同士についても、上記と同様、サーマルボンド接合を考慮したブーリアン加算によりモデル化（接合）した。モデルは、後述する ANSYS の3次元ソリッド二次要素 SOLID186[65]により作成し、エアロゲルの部分については、不織布を覆う $40\text{ mm} \times 40\text{ mm} \times 0.211\text{ mm}$ の直方体から不織布部分をブーリアン減算するこ

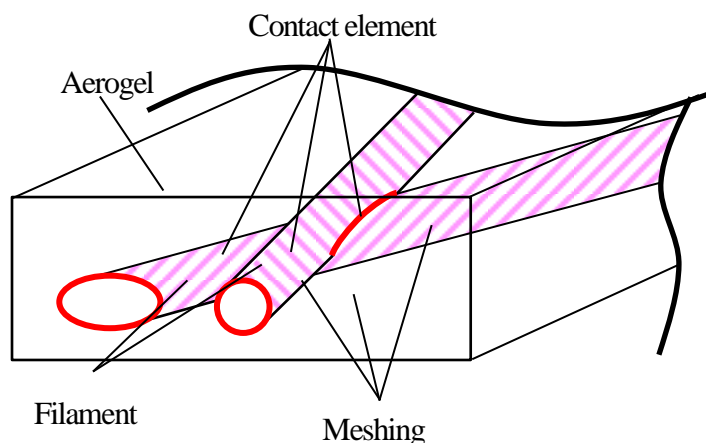


Fig. 2.9 Modeling method of silica aerogel non-woven composite insulator

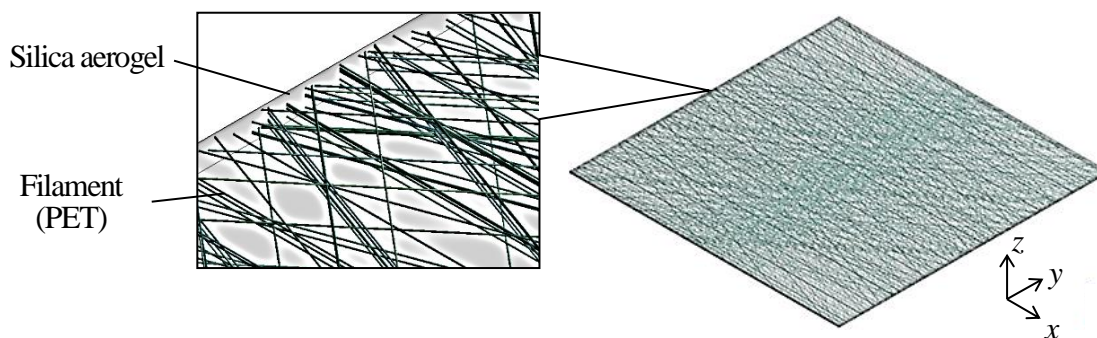


Fig. 2.10 Simulation model of the current structure of the insulator

Table 2.1 Number of nodes and elements of current model

	Number of nodes	Number of elements
Current model	1352852	496226

とでモデル化した。エアロゲルと不織布の接触部分については ANSYS の自動判定機能により接触判定し、接触要素 CONTA175 と TARGE170 を用い、滑りのない固着（ボンド接触）条件を適用した。エアロゲル、不織布の各々のメッシング部分と接触部分の模式図を図 2.9 に示す。また、構築したエアロゲル不織布複合断熱材のモデル図と節点・要素数をそれぞれ図 2.10, 表 2.1 に示す。

2.2.4 精度検証

作成したモデルの精度を検証するべく、まずは、実験にて、エアロゲル不織布断熱材

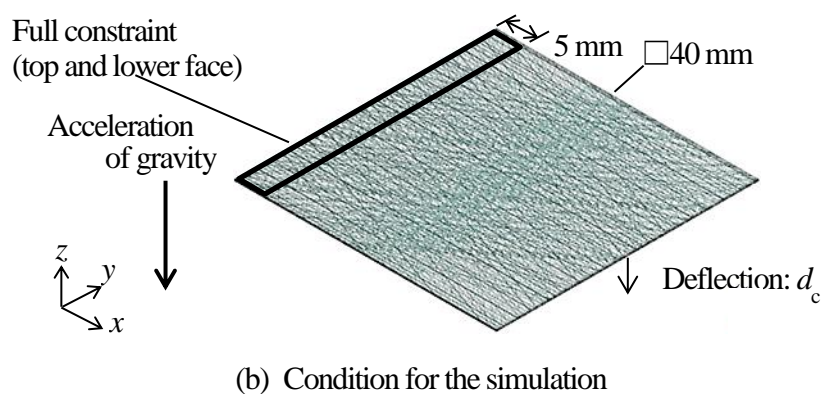
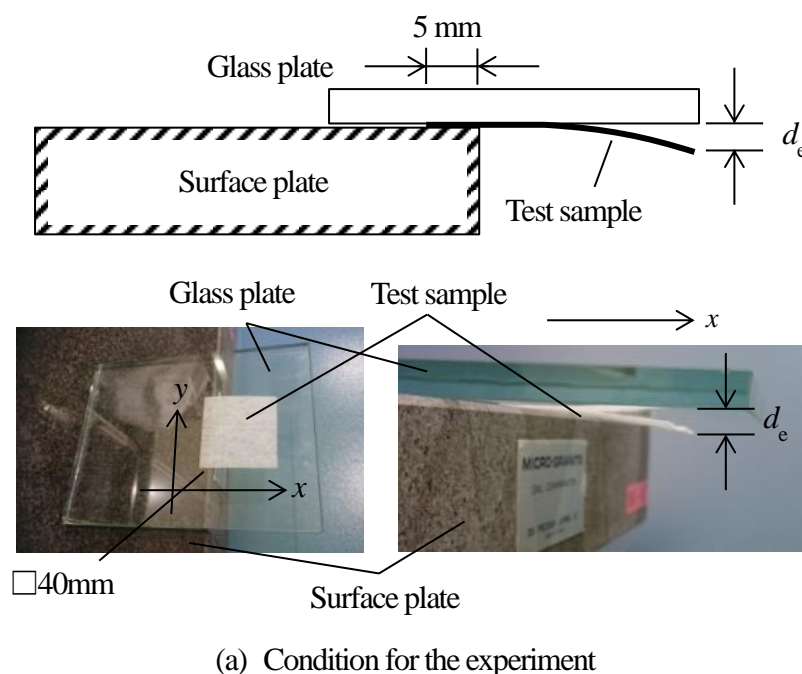


Fig. 2.11 Experimental and computational condition about deflection of the insulation for accuracy verification

の自重によるたわみを測定し、これを、作成したシミュレーションモデルにて再現し、計算されたたわみと比較した。たわみの測定は、シミュレーションモデルと同様に40 mm角に切り取ったエアロゲル不織布断熱材の試験体を対象とした。図 2.11(a)に示すように、定盤の上に試験体を、紡糸方向が x 軸になるようにして設置し、端から 5 mm の部分が固定できるように上部からガラス板で押さえた。このときのガラス板の底面と不織布の端部との距離を測定し、たわみ量とした。試験体は、座屈することなくたわみ、たわみ量は 2.3 mm であった。一方、シミュレーションにおいては、実験の様子を再現するべく、40 mm 角のモデルの端部から 5 mm の部分までの上下面を完全固定し、自重に対するたわみの解析を行った。計算には ANSYS 16.0 (構造解析) を適用した。図 2.11(b)にシミュレーションモデルの設定条件を示す。なお、シミュレーションは、板厚の 1/3 より大きい変形を伴うと考えられることから大変形解析を実施した。計算に用いた物性を表 2.2 に示す。シリカエアロゲルのヤング率、密度についてはそれぞれ文献[66], [67]を、PET のヤング率、密度については文献[68]を参照し、ポアソン比については、文献値が確認できなかったため 0.3 とした。結果を表 2.3 に示す。実験にて測定したたわみ量に対する、シミュレーションでのたわみ量の計算結果の差は 1%程度とよく一致することから、本モデルならびに解析条件は、たわみの実現象を定量的に表現できているものと考えられる。

2.2.5 種々の配向分布モデルによる剛性の評価方法

前節の精度検証結果より、2.2.4 項に示したモデル化指針に基づき、種々の配向分布を持つ構造をモデル化し検証を行った。なお、本来であれば、前節の図 2.1 に示した設計フローに基づき、順次断熱材内の不織布の配向分布を更新してシミュレーションによる評価を行うべきであるが、本研究では、長繊維不織布と断熱材の剛性ならびに熱伝導率の関係の明確化を主に考えるため、現行の不織布構造をベースに、あらかじめ特徴的な配向分布を複数検討しモデル化を行った。比較検証に用いた配向分布モデルは以下の 5 種類である。

- (A) 紡糸方向に偏って配向しているもの
- (B) 現状構造

Table 2.2 Mechanical properties

	Young's modulus (GPa)	Poisson's ratio	Density (mg/cm ³)
Silica aerogel	0.12	0.3	20
PET	2.76	0.3	1.4

Table 2.3 Accuracy of verification result

	Symbol	Deflection (mm)	Accuracy (%)
Experimental result	d_e	2.3	—
Computational result	d_c	2.277	1.3

- (C) 各方向に均等に (放射状に) 配向しているもの
- (D) 現状構造が 90°回転したもの
- (E) A の構造が 90°回転したもの

上記のモデル B は、前節にて検証を行った現状構造である。上記の 5 モデルは、紡糸方向 (x 方向) に偏って配向したモデル A から、徐々に紡糸方向に垂直な方向 (y 方向) に偏って配向したモデル E までを段階的に表現するべく設定した。モデル A~E の配向分布をそれぞれ図 2.12(a)~(e)に示す。図 2.12(b)は、前節の図 2.5 に示した配向分布図と同一のものである。図 2.12 の各分布にしたがい、前節の図 2.7 に示したモデル化手法を踏襲して作成したモデル A~E 各々のシミュレーションモデルをそれぞれ図 2.13(a)~(e)に示す。また、各モデルの節点・要素数を表 2.4 に示す。モデル A については、紡糸方向に偏って配向している構造として、各繊維を +5°, -5°のいずれかに均等に配置する構造とした。モデル C については、各繊維が -85°~+85°までランダムに均等に配置する構造とした。検証方法については、前節の精度検証と同様の方法にて、図 2.11(b)に示したように、モデル端部から 5 mm の上下面を完全拘束し、重力加速度を負荷して、表 2.2 に示した物性にてモデルの最大たわみ量を、大変形解析にて求めた。

2.2.6 結果

計算結果であるたわみのコンター図と最大たわみの集計結果をそれぞれ図 2.14, 図 2.15 に示す。紡糸方向 (x 軸) 近傍に偏った配向をしているモデル A が最もたわみが小

さい (エアロゲル不織布断熱材としての剛性が大きい) 結果となった。一方、モデル A

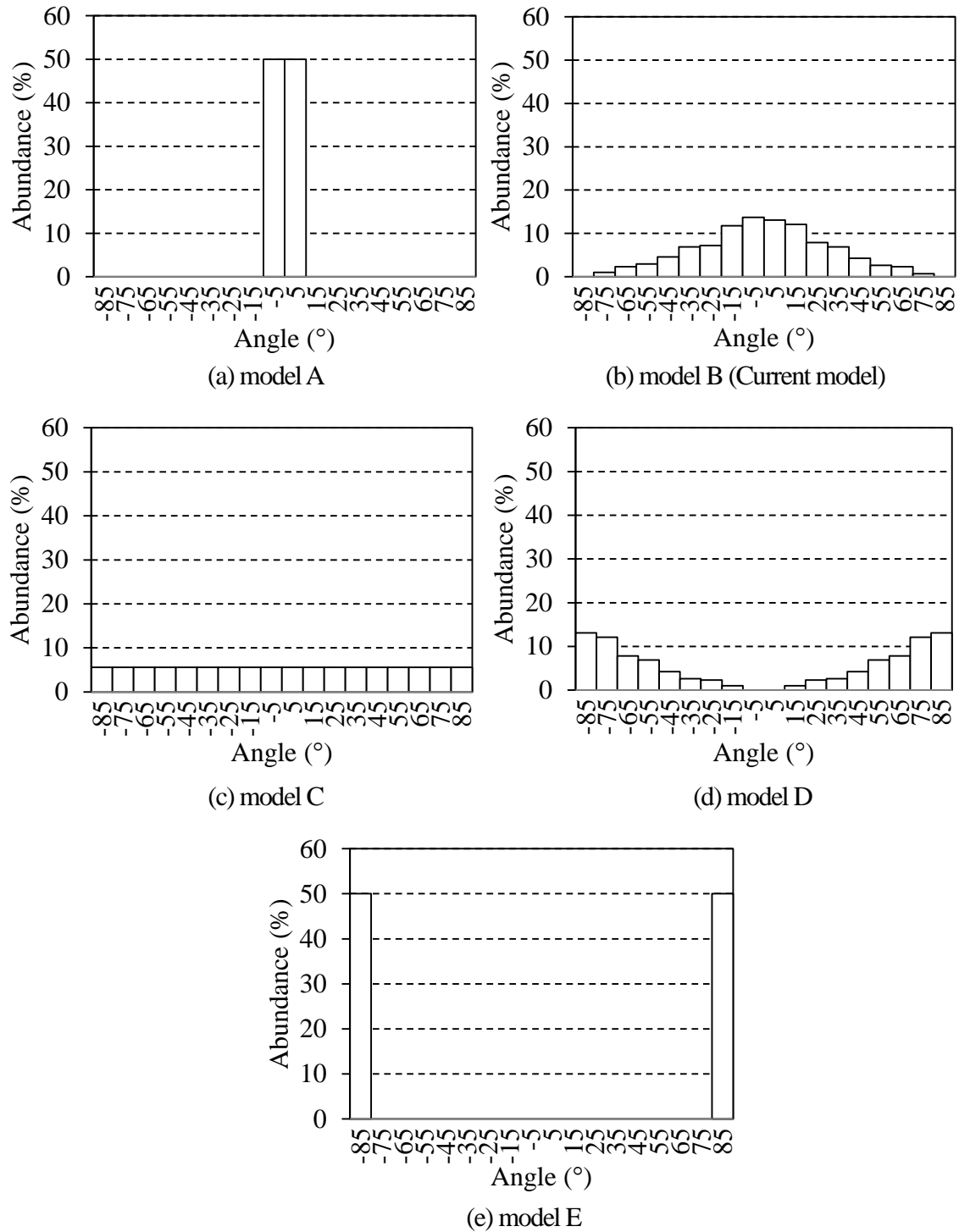


Fig. 2.12 Orientation distributions of the various models of non-woven composite aerogel insulation material

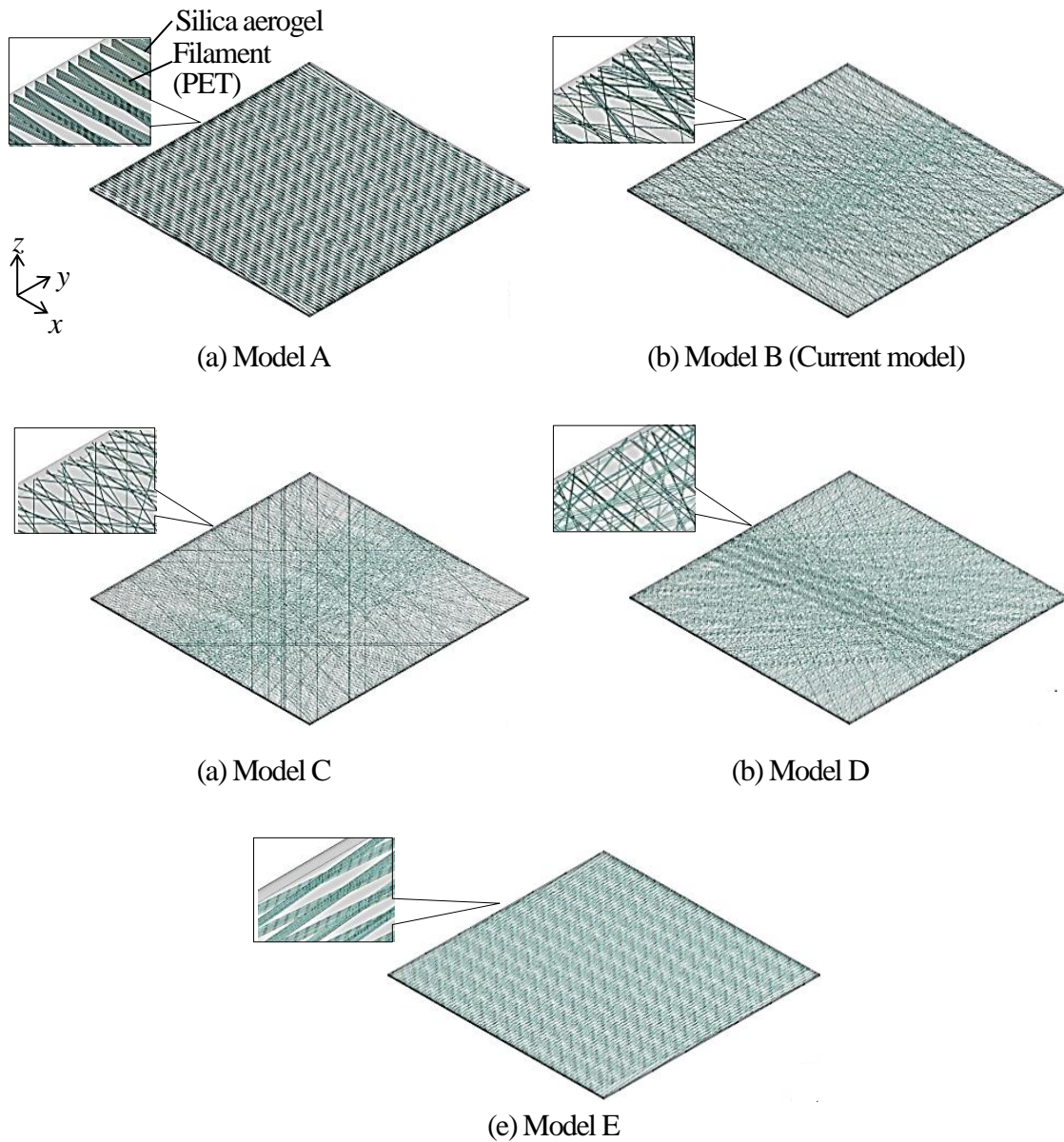


Fig. 2.13 Simulation models of the insulation material of various fabric orientation distribution

Table 2.4 Number of nodes and elements of model A to E

	Number of nodes	Number of elements
Model A	861548	315906
Model B (Current model)	1352852 (same as Table 2.1)	496226 (same as Table 2.1)
Model C	1458990	574874
Model D	1280624	495530
Model E	863650	316234

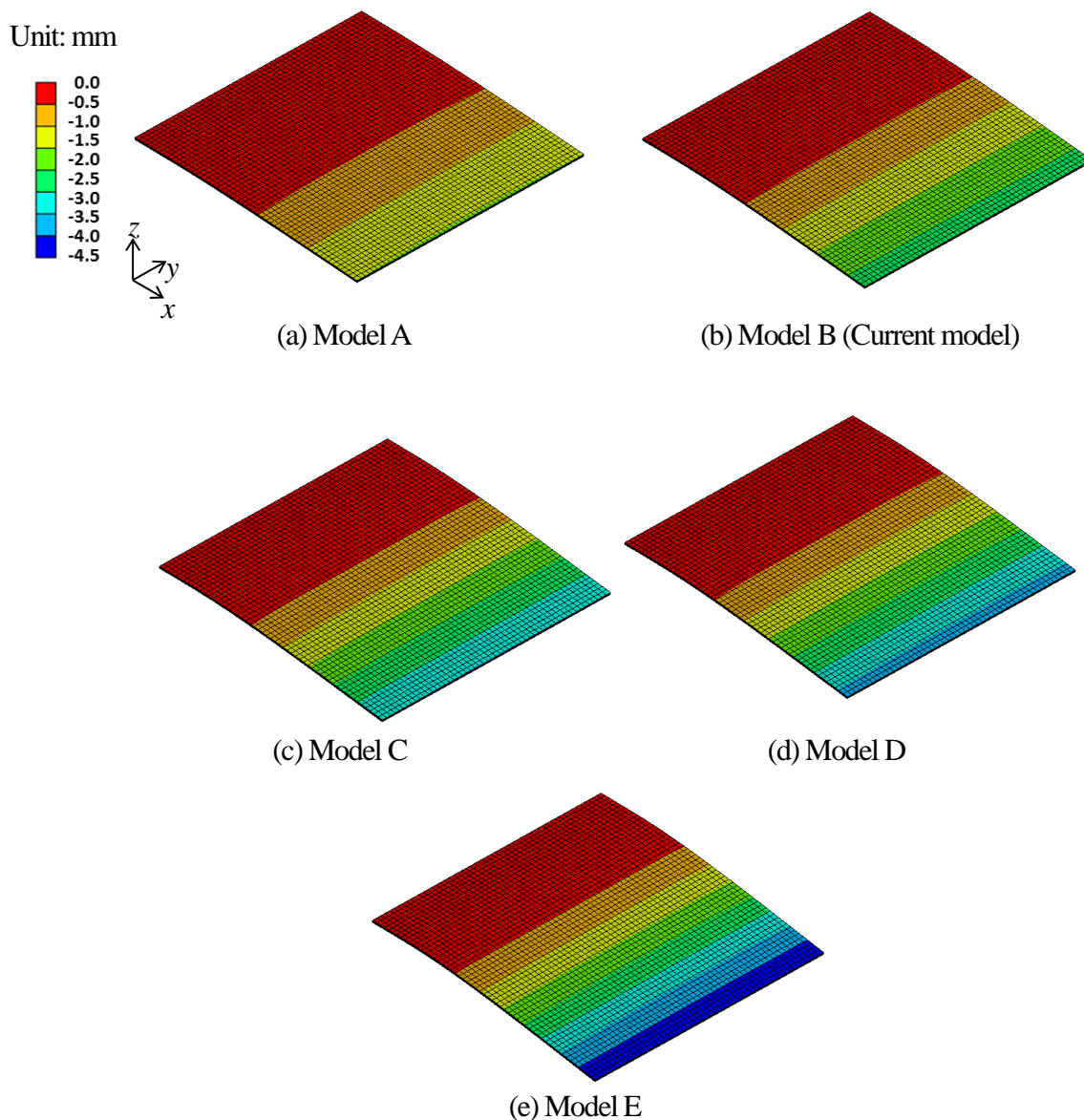


Fig. 2.14 Contour diagram of the deflection (deformation of z -axis) of 5 orientation models

を 90° 回転させたモデル E のたわみが最も大きい（エアロゲル不織布複合断熱材としての剛性が小さい）結果となった。また、前述の通り、評価した 5 つのモデルは、紡糸方向（ x 方向）に偏って配向しているモデル A から、徐々に紡糸方向に垂直な方向（ y 方向）に偏って配向しているモデル E までを表現したものであるが、図 2.15 に示す結果は、この順列がモデル A～E の順番に並んでおり、同図から、配向分布を設計することにより、自重によるたわみ量を、現行モデルから +74%～-33% まで変化させることが可能（高剛性化が可能）であることがわかる。

2.2.7 繊維の接合点数と繊維含有率の影響について

上記にて配向分布に対応する最大たわみの結果を示したが、本研究における不織布のモデル化手法は、図 2.8 を用いて説明したように、元々は一方向に等間隔に並んでいる繊維形状を、断熱材全体モデルの中央 (yz 平面) にて、 z 軸を回転軸とし、配向分布 (配向角) にしたがってそれぞれの繊維形状を回転させて不織布構造を構成しているため、モデル A~C において、断熱材全体モデルの中の繊維含有率が異なり、また、繊維同士の接合点数もモデル A~C で異なる (モデル D はモデル B と同一、モデル E はモデル A と同一である)。よって、繊維含有率が高い、あるいは接合点数が多いモデルであれば、繊維の接合部で剛性が上がることによって、配向分布と関係なく不織布全体の剛性が引き上げられている可能性がある。そこで、各モデルによって最大たわみに差が出た主要

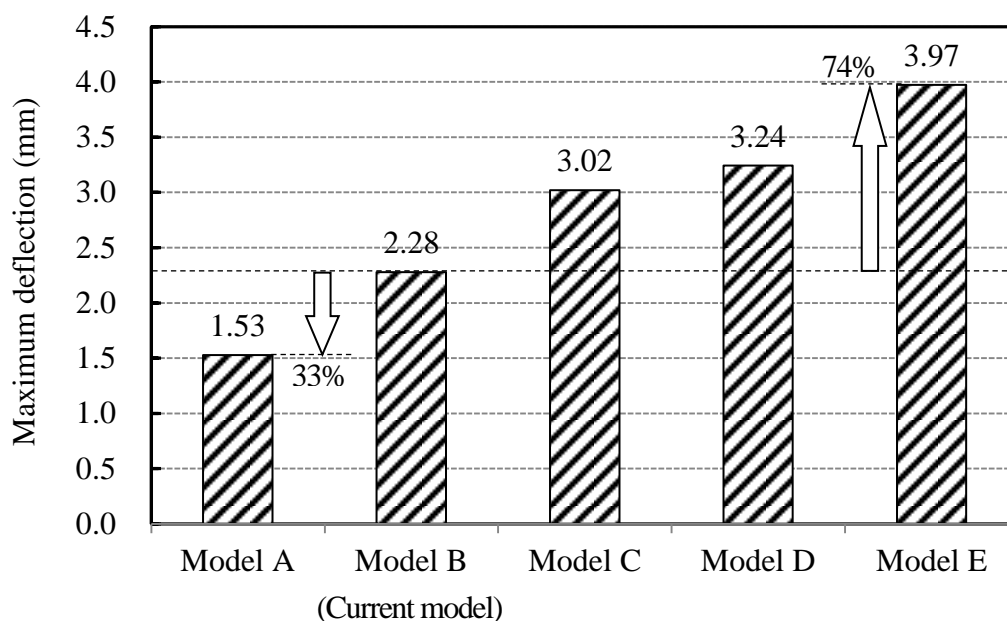


Fig. 2.15 Computational result about maximum deflections of 5 orientation models

Table 2.5 Volumes of fiber models

	Volume (m ³)
Model A (E)	7700990213
Model B (D)	9451815124
Model C	9627229750

Table 2.6 Number of junction points of fiber models

	Number of junctions
Model A (E)	36342
Model B (D)	37068
Model C	37187

因が、配向分布によるものであるか、繊維含有率や接合点数によるものであるかを検討した。表 2.5 に各モデルにおける繊維部分の体積を、表 2.6 に各モデルの繊維同士の接合点数をそれぞれ示す。紡糸方向への配向が主であるモデル A は、全ての繊維の配向角が小さく、断熱材全体モデルの対角線方向（対角線に配向する繊維が最長となる）に配向がないため、繊維体積は小さい。また同じく、配向角が小さいため、1 本の繊維が他の繊維と交差・接合される数も少ない。一方、モデル C は、モデルの対角線方向にも多く配向しているため、最も繊維体積が大きく、また、1 本の繊維が異なる配向角を持つ他の繊維と交差・接合される数が多い。以上の分析より、最も繊維体積（繊維含有率）が小さく、かつ接合点数が少ないにも関わらず、モデル A の最大たわみが最も小さい結果となっていることから、前節に示した最大たわみの違いは、配向分布が主要因となって決まっていることがわかる。前節の結果に関する詳細な考察を 2.4 節にて行う。

2.3 断熱材の熱伝導率に及ぼす配向分布の影響の確認

2.3.1 確認方法

最大たわみ量の比較を行った各モデルについて、配向分布と熱伝導率の上昇（エアロゲル不織布断熱材の断熱性の低下）への影響がないか確認した。本研究では、熱伝導シミュレーションを活用し、計算により、評価したモデルの熱伝導率を求めた。熱伝導率算出の一般式は式(2-1)で表される。

$$\lambda = \frac{Q \cdot t}{\Delta T \cdot A} \quad (2-1)$$

ここで、 λ は熱伝導率、 Q は測定対象物（サンプル）を通過する熱量、 t はサンプルの厚さ、 ΔT はサンプルの上下面の温度差、 A はサンプルの断面積である。断熱材の熱伝導率測定の規格の一つである JIS A 1412-2における熱流計法[42]では、上記の式(2-1)に基づき、サンプルの上下面に温度差を生じさせ、サンプルを通過する熱流（サンプルを挟んだ熱板と冷却板を通過する熱流）と寸法情報（サンプル厚さ、断面積）から熱伝導率を求める。評価に用いた熱伝導シミュレーションでは、この熱流計法に基づき、図 2.16 に示すように、断熱材モデルの上面を室温（25℃）に温度固定し、仮想の熱流として $Q=0.1$ (W) を下面から引くことにより、室温での熱伝導率測定を模擬した。なお、計算には ANSYS

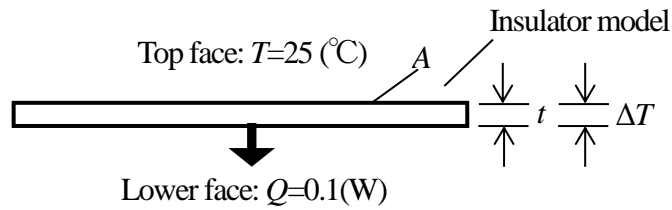


Fig. 2.16 Settings of heat transfer analysis for calculation of thermal conductivity

Table 2.7 Thermal properties

	Thermal conductivity [W/(m·K)]
Silica aerogel	0.017
PET	0.2

16.0（伝熱解析）を適用し，定常解析にて計算を行った．計算結果として得られる上下面の温度差 ΔT （下面は平均温度にて計算）を求め，サンプルの厚み t ，断面積 A と合わせて式(2-1)に代入することにより，熱伝導率 λ を求めた．熱伝導率の計算に用いた各部材の物性を表 2.7 に示す．なお，表 2.7 において，シリカエアロゲルの熱伝導率については文献[69]を，PET の熱伝導率については文献[70]を参照した．

2.3.2 結果と考察

5 つのモデルの熱伝導率の計算結果を図 2.17 に示す．モデル A～E に対し，前章の剛性に関する結果のような配向と熱伝導率に関する関連性は確認できず，どのモデルも現行モデルに対し最大 1.4% の熱伝導率の違いに収まった．上記の結果となった理由として以下の考察を行う．本研究では，対象としたエアロゲル不織布複合断熱材の骨格材である不織布の構造をベースとし，図 2.7 に示すような， z 方向に不織布が配向していない構造としたモデル化を行った．したがって，エアロゲル不織布複合断熱材中の熱伝導を司る不織布繊維（PET 樹脂）は， z 方向に，サーマルボンドの接合点のみが 3 次元状に点接触にて連続した構造となっており，不織布の配向分布に因らず，エアロゲル不織布複合断熱材として，主たる断熱成分であるシリカエアロゲルの物性に近い熱伝導率になったものとする（サーマルボンドの接合点数と熱伝導率の間にも相関は確認できない）．

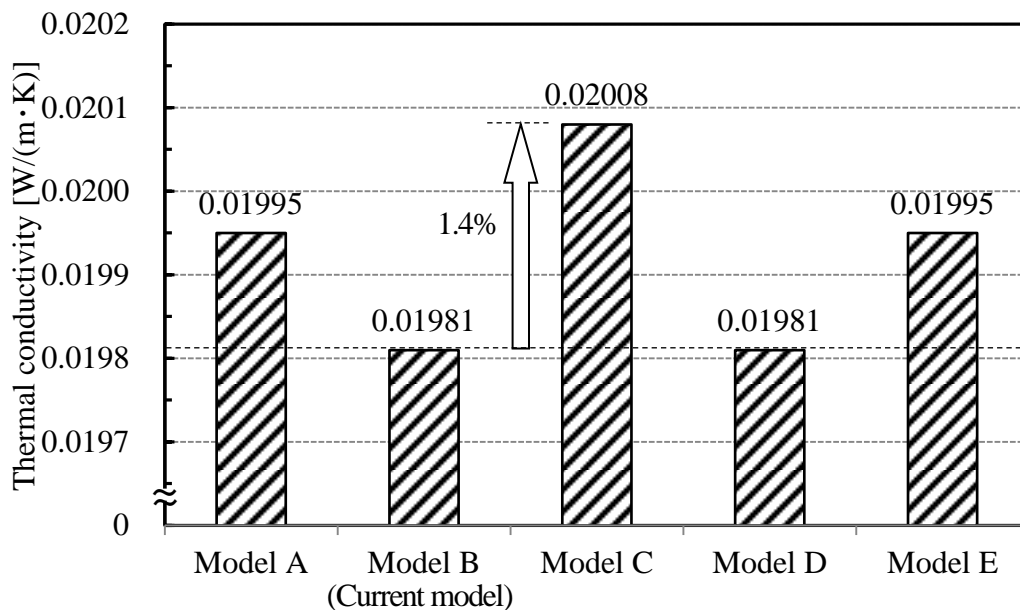


Fig. 2.17 Computational result about thermal conductivities of 5 orientation models

なお、本研究で対象とした不織布材では上記のような結果となったが、 z 方向にも配向している不織布等を用いる場合等、傾向が異なることが予想される。

2.4 考察

以上の取組みにより行った検証結果に対する考察を以下に示す。

- エアロゲル不織布複合断熱材中の不織布が、たわみの固定端に対して垂直方向に偏った配向をしている方がたわみは小さい（曲げ剛性が大きい）。
- エアロゲル不織布複合断熱材中の不織布が、たわみの固定端に対して平行方向に偏った配向をしている方がたわみは大きい（曲げ剛性が小さい）。
- 本研究にて、実際の不織布構造から構成した不織布モデルにおいては、配向の違いとエアロゲル不織布複合断熱材としての熱伝導率に関連性は確認できなかった。但し、本モデルは z 方向に配向をほとんど持たない長繊維不織布構造を模したものであり、適用する不織布の構造によっては、不織布の構造が断熱材の熱伝導率に影響を及ぼす可能性もあると考えられる。

不織布繊維強化複合材料における不織布の配向分布と剛性の関係を示したこれまで

の研究論文に、対象を短繊維強化ポリプロピレンとし、評価した剛性が引張荷重時の縦弾性係数である文献[18]がある。ここでは、本研究にて扱うものと評価対象(短繊維材)、評価する剛性(引張剛性)が異なるが、上記文献で示された結果と本研究で得られた結果を比較する。上記文献では、短繊維強化ポリプロピレンの押出成形時の押出し比(R_A :ピレットと押出し材の直径の比の自乗値)と不織布配向分布の関係、押出し比と引張試験時の短繊維強化ポリプロピレンの縦弾性係数の関係がそれぞれ示されている。文献では、押出し比が大きいもの($R_A=9.68$)は、本研究におけるモデル A のように引張方向に配向が主のものであり、押出し比が小さいもの($R_A=1.00$)は、モデル C のように配向が各方向に対して均等に分布しているものであるが、押出し比 R_A が大きいほど、縦弾性係数が大きいという結果が示されている。以上のように、評価した対象・剛性の種類は異なるものの、本研究にて構造解析シミュレーションを活用して求めた不織布配向分布と断熱材の剛性の関係は、これまでの研究における両者(配向分布と剛性)の関係と傾向が一致している。

前節の検証結果より、どの程度見かけの剛性が向上するかということを考えると、現状構造のモデル B (最大たわみ 2.28 mm) に対する、最もたわみの小さいモデル A (最大たわみ 1.53 mm) の最大たわみ量は、約 67% に抑えられている。これを、式(2-2)に示す片持ち梁の自重(単位荷重)によって発生する最大たわみ y_{\max} の式に当てはめれば、剛性(構造全体の見かけのヤング率 E_T) は、約 1.5 倍に改善されていることがわかる。

$$y_{\max} = \frac{ql^4}{8E_T I} \quad (2-2)$$

なお、式(2-2)において、 y_{\max} は片持ち梁の最大たわみ量、 q は梁に架かる単位荷重、 l は梁の長さ、 E_T は梁全体(本研究の場合、不織布とエアロゲルを有するエアロゲル不織布複合断熱材全体)の見かけのヤング率、 I は梁の断面二次モーメントを示す。

また上記より、検証を行ったモデル A が最も剛性の大きい構造であるように思われるが、最もたわみが大きいモデル E は、モデル A を単純に 90°回転させた構造であり、実際に使用する際には、材料の固定箇所、変形発生箇所(力の架かり方)を考慮して設計を行う必要があると考える。モデル A あるいは E のような一方向に特化した配向構造のものは、例えば、配管用のエアロゲル不織布複合断熱材[64]として、曲げ剛性の大きい

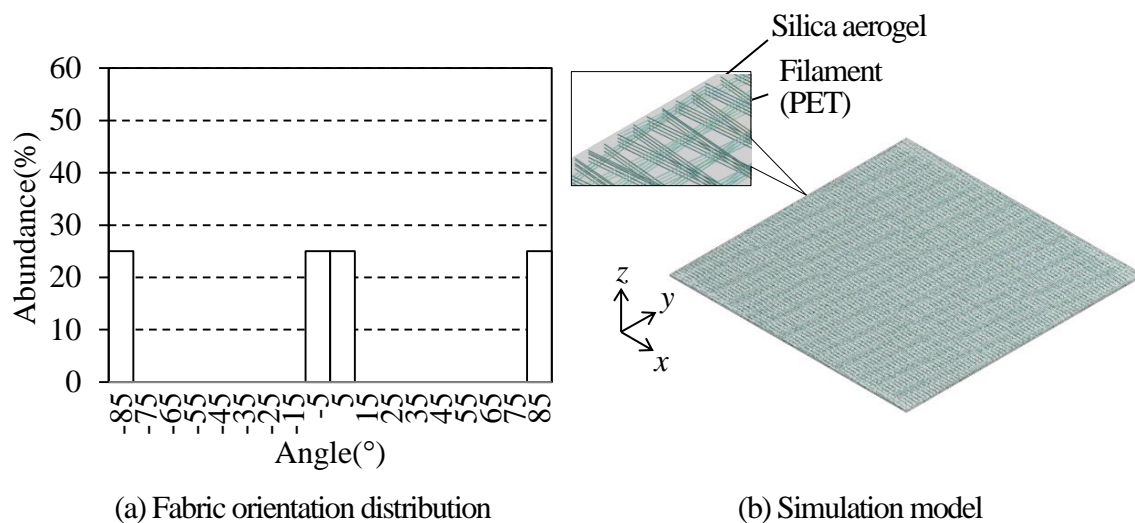


Fig. 2.18 Examined structure of thermal insulation material

主軸方向 (0° 方向) を配管の方向に向け、曲げ剛性の小さい直交方向 (90° , -90° 方向) を巻き付け方向とすることで、巻き付けの施工性と信頼性を両立する断熱材として活用することが期待できるが、繊維配向が全くない直交方向の強度については考慮が必要である。そこで、 x 方向への配向が主であるモデルAと、それを 90° 回転させた (y 方向への配向が主である) モデルEの両者の特性を兼ね備える構造として、図2.18(a)に示す配向分布を持つモデル[同図(b)]を検討し、そのたわみ量を評価した。図2.18(a)に示す通り、本構造は、各不織布繊維の配向について、 x 方向に主であるものを半数、 y 方向に主であるものを半数、ランダムに振り分けたものである。上記の検討モデルについて、図2.11(b)に示す解析条件によりたわみ量を計算した。計算の結果、最大たわみは 2.60 mm であり、図2.13に示したモデルAとモデルEの最大たわみのほぼ中間の値をとった。検討モデルは、現行モデルの最大たわみ (2.28 mm) より大きい結果となったが、現行モデルよりも不織布の剛性の異方性を考慮した (x 方向が主軸であっても、 y 方向が主軸であっても同じ剛性となる) 構造になっているものと考えられる。

2.5 結言

本章では、主に面内に配向する長繊維の不織布を骨格材とするエアロゲル不織布複合断熱材の多工業分野での活用展開のため、構造解析シミュレーションを用い、断熱材の

骨格材である不織布の配向分布を検討することにより、断熱材（複合体）として剛性を向上できる構造を明確にした。また、本研究で対象とした不織布の構造においては、不織布の配向により、断熱材の断熱性能に大きな影響を及ぼさないことも熱伝導解析シミュレーションを活用して確認した。結果として、現状の不織布の配向分布構造で構成した断熱材に対し、配向設計により約 1.5 倍の剛性を有する断熱材を構成するための配向分布を明確化した。これを、2.1 節の図 2.1 に示した設計フローにあてはめて考えると、現行の不織布配向モデルに対して、図 2.1(a)にてモデル化した配向が 2.2.3 項にて評価したモデル C, D, E のいずれかであった場合、同図 2.1(b)の構造シミュレーションにおいて、剛性が現行のモデル B よりも小さいため、同図 2.1(c)の判定(目標の剛性が現行比 1.2 倍以上)にて “No” の判定となり、同図 2.1(f)に進んで配向を再設計することとなる。一方、モデル A のような構造が設計できれば、同図 2.1(b)の構造シミュレーションにおいて、剛性が 1.5 倍となるため、同図 2.1(c)の判定(目標の剛性が現行比 1.2 倍以上)にて図 2.1(d)の熱伝導解析に進む。また、熱伝導解析においても、モデル A は同図 2.1(e)の判定値である現行比±5%以内をクリア(図 2.17 において現行比 0.7%の上昇)しているため、設計完了となる。上記のように、本章で検討したモデル化手法、構造・熱伝導シミュレーションを用いて、設計に活用することができる。なお、本章にて検討した内容は、エアロゲル以外の材料を母材とする他の不織布強化複合材料（不織布より剛性が小さい材料を母材とした複合材料）の骨格材としての不織布の配向設計にも有効となるものであると考える。

第3章 薄型断熱材の熱伝導率測定方法の構築

3.1 緒言

薄型エアロゲル不織布複合断熱材は、ウレタンフォーム等の建築・家電用断熱材と同等の $0.02 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 程度、あるいはそれ以下の低い熱伝導率を持ち、厚さ 1 mm 以下という非常に薄い構造である。こうした“薄く断熱性の高い”材料に対しては、断熱材の性能指標の一つである「熱伝導率」を測定することが難しく、現在も、その方法について国際的な議論がなされている段階である[27]。“薄い”材料の測定方法としては、導電性薄膜を対象とした 3ω 法[28]-[31]など種々の測定方法[33]-[35]が提案されているが、非導電性の本断熱材への適用は困難である。また“断熱性の高い”材料に対しては、主に真空断熱材を対象に、複数の測定から算術的に熱伝導率を求める手法[36]、芯材のみの熱伝導率を推定する手法[37]、保護熱板法[38][39]など既存の測定手法に工夫点を加え測定する手法[40]などがあるが、どの方法も厚み 10 mm 以上の断熱材を対象としており、本研究で対象とする 1 mm 以下の厚みの断熱材に適用することは難しい。この代用策として、断熱材を複数枚重ね、熱伝導率が測定できる厚みを設け測定する方法が考えられるが、本方法では、不良品のロットアウト等、1枚1枚の製品保証手法としての適用が困難である。また、こうした熱伝導率が未知である薄い繊維系材料の熱伝導率を、既知の材料と積層して測定し、後に未知の材料の熱伝導率を算出する手法[41]が研究されているが、 $0.1 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ に近い熱伝導率の繊維が対象であり、測定ばらつきのレンジも $0.005 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 程度あるのが現状である。

本研究は、上記の課題を解決するものであり、断熱材の熱伝導率測定規格に準じた方法にて、既知の材料と1枚の薄型エアロゲル不織布複合断熱材を積層して測定し、のちに断熱材の熱伝導率を算出する手法を構築する。特に熱伝導率 $0.02 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 程度の断熱性の高い本断熱材を対象に、既知の熱伝導率をもつ材料の材質、厚み等を検討し、 $0.002 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 以下のばらつきで収まる手法の確立を目指す。

3.2 測定原理および測定装置

図3.1は、種々の熱伝導率評価方法の種類を示したものである。この中で、ポリウレ

タンフォーム等のいわゆる住宅・家電用途の断熱材に関しては、図中丸で囲った平板比較法熱流量計法（熱流計法）での測定が慣用されている[71].

本研究では、上記の熱流計法(JIS A 1412-2)[42]をベース技術として、厚さ 1 mm 以下の薄い断熱材に対し、1 枚ずつ熱伝導率を測定する手法を検討した。なお、特に指定がない限り、本文記載の「熱伝導率」は、熱伝導率測定装置により測定された「見かけの熱伝導率」を指す。本研究では、「熱流計法」の測定方法をベースに、母材と強化材で構成される複合材料の物性を求める際に用いられる「複合則」の概念を組み合わせた測定方法を提案する。熱流計法に基づく熱伝導率測定装置として、本研究では、図 3.2 に示す Erich NETZSCH GmbH 製 HFM436/3/1（以下、HFM と記載）を用いる。図 3.3 に HFM の装置概要図を示す[72].

以下、HFM の基本的な測定原理について示す。HFM では、サンプルを異なる温度に設定された上下面 2 枚のプレートで挟み（押圧 4.08 kPa）、サンプルを介して流れる熱流 Q と熱・寸法条件から熱伝導率を算出するものである。測定時に温度平衡状態に到達すると測定が完了し、サンプルの中心部分にて熱伝導率の解析計算がなされる。サンプル

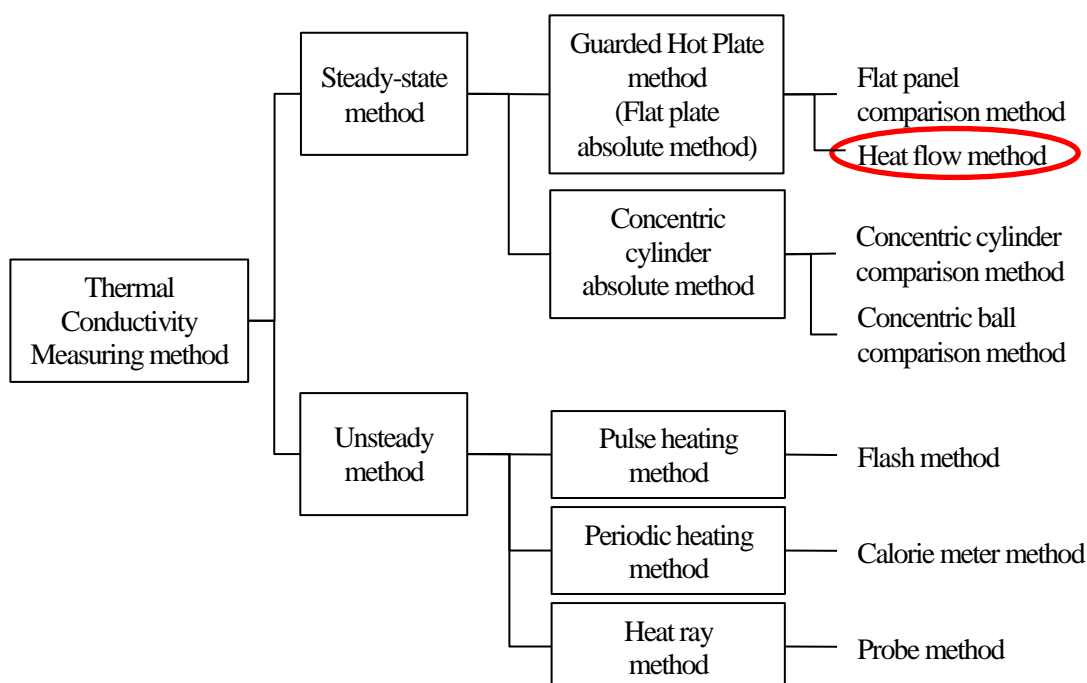


Fig. 3.1 Measurement methods of thermal conductivity

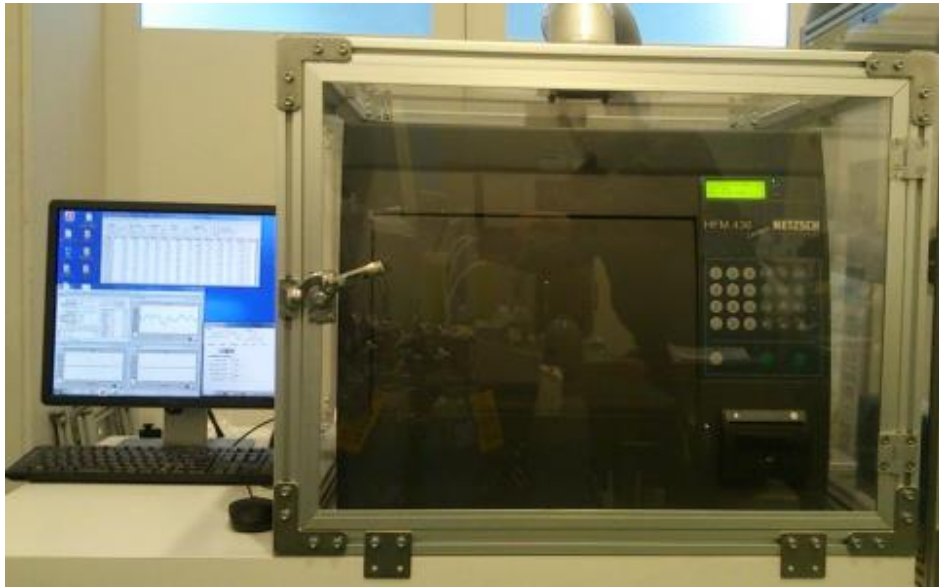


Fig. 3.2 Measurement environment of thermal conductivity

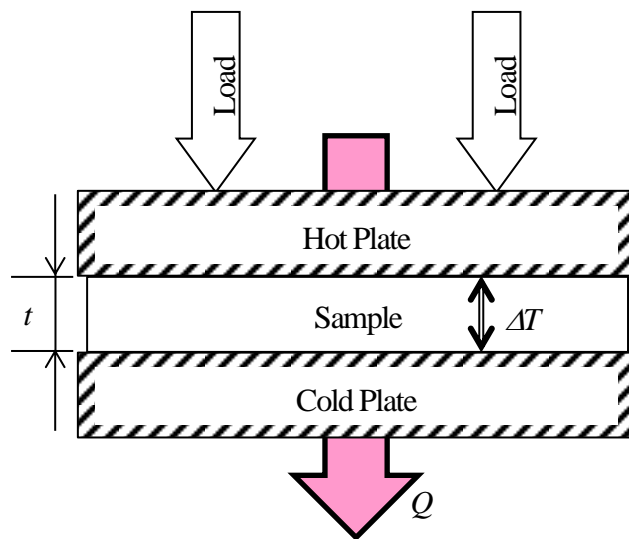


Fig. 3.3 Equipment principle diagram of HFM 436/3/1

が温度平衡状態になったときの各パラメータと、式(3-1)に示す Fourier の熱伝導方程式とは次の関係が成立する。

$$Q = \lambda A \frac{\Delta T}{\Delta x} \quad (3-1)$$

ここで、 Q はサンプルを通過する熱流、 λ はサンプルの熱伝導率、 A はサンプル中の熱流の影響断面積、 ΔT はサンプル上下面の温度差、 Δx はサンプル厚さである。

測定時には、2つの熱流束トランスデューサがサンプルを介した熱流を計測する（図3.3参照）。熱流束トランスデューサからの電圧信号 V は、トランスデューサを介した熱流に比例する。HFM436では、熱流束トランスデューサの面積、つまり、熱流の通る面積（熱流の影響断面積）は、全てのサンプルにおいて共通となり、

$$Q = N \cdot V \quad (3-2)$$

となる。ここで、 N は熱流束トランスデューサの出力電圧とサンプルを介した熱流間のキャリブレーション係数であり、次式(3-3)により熱伝導率が算出される。

$$\lambda = k = N \frac{V \Delta x}{\Delta T} \quad (3-3)$$

JIS A 1412-2[42]には、熱流計法を用いる時の最低限の熱抵抗値 $R = 0.5 \text{ (m}^2 \cdot \text{K/W)}$ が記載されており、本研究で対象とする断熱材についてもこの熱抵抗値以上での熱伝導率測定ができるよう目標として定める。

一方、複合材料における複合則[73]は、弾性率や強度、熱伝導率などの特性 X について、強化材と母材の物性値などを、それぞれ X_f 、 X_m 、強化材と母材の体積含有率をそれぞれ V 、 $(1-V)$ としたとき、複合材料としての特性値の理論値 X_c が式(3-4)で与えられるという、複合した材料の合成特性を表す数式として汎用されている。

$$X_c = X_f V + X_m (1-V) \quad (3-4)$$

複合則は、強化材と母材の配置により、並列則と直列則に大別され、熱伝導率の算出式としては、並列則が(3-5)式、直列則が(3-6)式で表される。

$$\lambda_c = V \cdot \lambda_f + (1-V) \lambda_m \quad (3-5)$$

$$\frac{1}{\lambda_c} = \frac{V}{\lambda_f} + \frac{1-V}{\lambda_m} \quad (3-6)$$

本研究では、図3.4に示すように、異なる熱抵抗を持つ厚いベースプレート（既知の熱伝導率）と、測定対象である薄い断熱材（未知の熱伝導率）を、熱板から冷却板に対し直列を配置することから、(3-6)式の直列則の式を用いる。

具体的な測定方法を以下に示す。まず、図3.4(a)に示すように、熱伝導率が既知であるベースプレート（2枚）のみを装置に挟み、厚さを計測して熱伝導率を測定する。次に、図3.4(b)に示すように、ベースプレートと測定対象であるエアロゲル複合断熱材

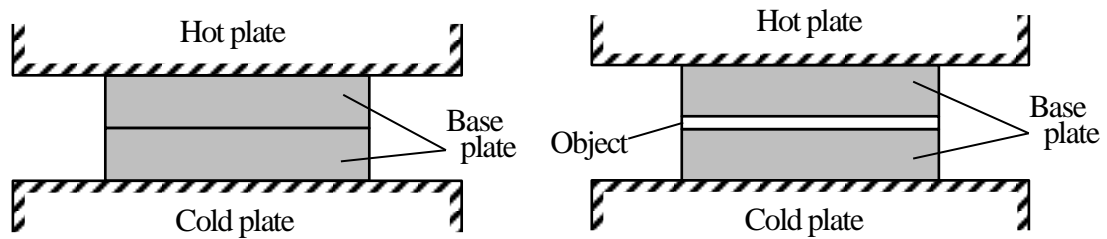


Fig. 3.4 Proposed measurement method

(Object) を重ねた複合体を装置に挟み、厚さを計測して熱伝導率を測定する。このとき、図 3.4 (a)に示すベースプレート (2 枚) の熱伝導率を λ_B 、厚さを t_B 、図 3.4(b)に示すベースプレートと断熱材の複合体の熱伝導率を λ_c 、エアロゲル複合断熱材の熱伝導率を λ_l 、厚さを t_l とすると、(3-6)式は(3-7)式のように変形できる。

$$\lambda_l = \frac{t_l}{t_l + t_B} \cdot \frac{\lambda_c \lambda_B}{\lambda_B - \left(\frac{t_B}{t_l + t_B} \right) \lambda_c} \quad (3-7)$$

なお、式中のエアロゲル複合断熱材の厚さ t_l は、図 3.4 (b)の複合体の厚さ測定値($t_l + t_B$) から図 3.4(a)のベースプレート (2 枚) の厚さ t_B を減算することにより取得できる。最後に(3-7)式により、測定対象の熱伝導率 λ_l を算出する。

本章では、上記の(3-7)式を用い、前述の通り、特に熱伝導率が $0.02 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 周辺部あるいはそれ以下の領域である薄型エアロゲル不織布複合断熱材に対して、ばらつきが少なく ($0.002 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 以下)、再現性に優れるベースプレートの材料、厚みについて検討した。

3.3 測定検証

3.3.1 検証内容

本測定方法では、(3-6)式に示す複合則を応用させた計算式を用いることから、計測値の違いが、計算式上の誤差として拡大される可能性がある。特に(3-7)式は、分数式であることから、分母と分子の値のばらつきが、測定対象の熱伝導率算出結果に大きく影響

すると考えられる。そこで、本章では、測定値のばらつきを低減するべく、以下の項目について検証を行った。

- ・測定対象とベースプレートを複合体として測定するとき[図 3.4(b)の状態]の設置方法について
- ・ベースプレートの材質・厚さ仕様について

なお、検証に用いたエアロゲル複合断熱材サンプルは、設計厚さ 0.5 mm のもの (1 種類) であり、以降、特別な記載がないものについては、すべて本サンプルで検証した結果である。HFM では、熱板と冷却板の中央を中心に、図 3.3 に示す□105 mm の熱流計トランスデューサが設置されている。したがって、熱流計トランスデューサを覆うよう、サンプル、ベースプレートについては、□120 mm サイズのものを準備した。測定環境としては、周囲温度 24℃、湿度 48%に制御されたアクリルケース内にて測定した (図 3.2 参照)。

3.3.2 複合体設置方法の検討

図 3.5 に示す不織布にエアロゲルを複合した断熱材を、熱板・冷却板に直接設置すると、接触部における不織布表面の凹凸による、測定結果への影響が大きいと考える。そこで本取組みでは、図 3.6 (a)に示す、ベースプレートと試験体を直列配置し、試験体と

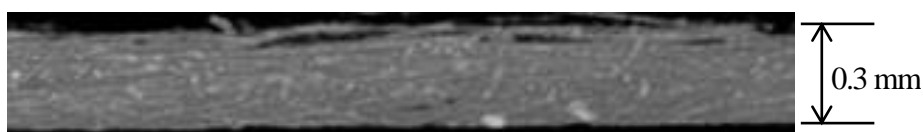


Fig. 3.5 Sectional image of non-woven used in thermal insulation material

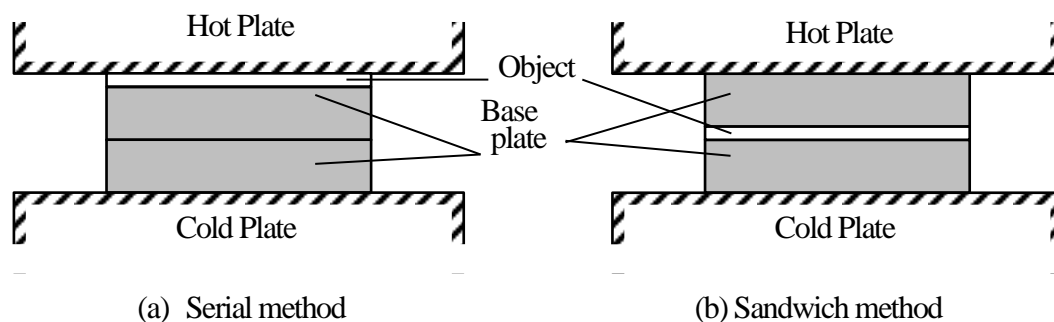


Fig.3.6 Evaluation of installation method

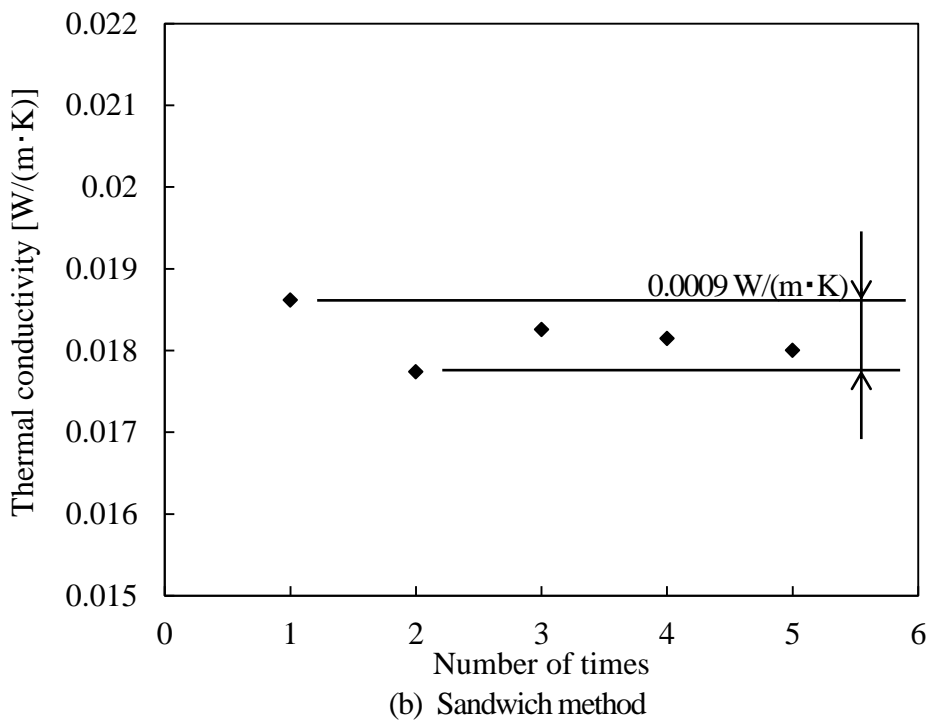
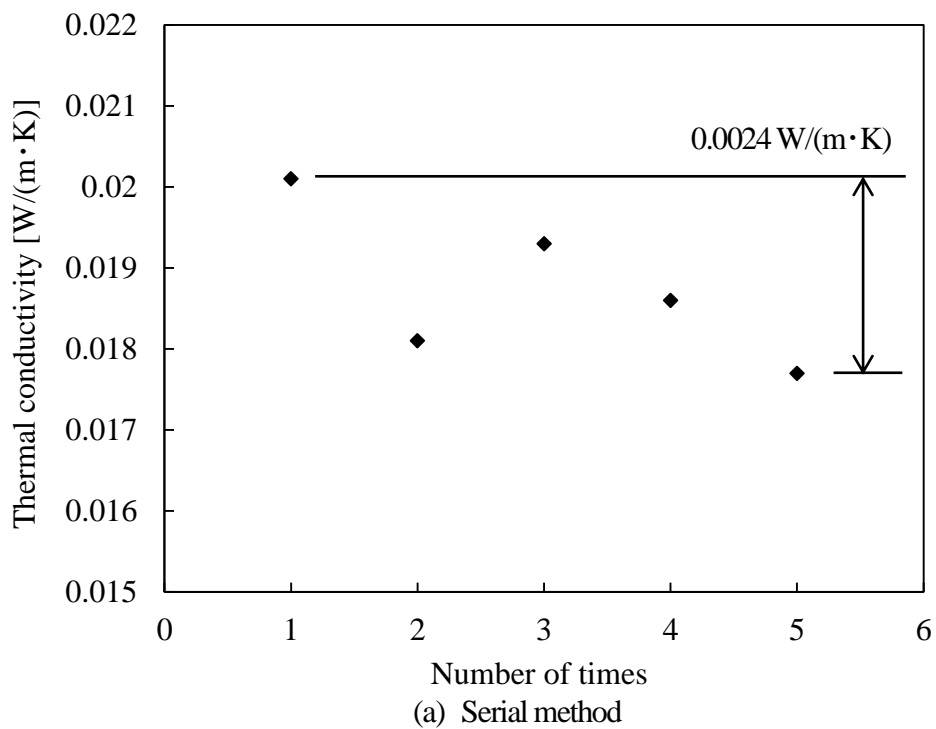


Fig. 3.7 Results of reproducibility of thermal conductivity measurement

熱板が接触するようにした **Serial method** と、同図(b)に示す、ベースプレートで試験体を挟み、試験体と熱板が接触しないようにした **Sandwich method** の2種の方法に対し、繰返し5回の熱伝導率測定を行い、測定値のばらつきを評価することにより方法を選択することとした。ベースプレートの材料については、次節の図 3.8(c)に示す押出法ポリスチレンフォームを用いた。図 3.7(a), (b)にそれぞれ、**Serial method**, **Sandwich method** の測定結果を示す。同図(a)に示す **Serial method** の結果では、最大値と最小値の差が $0.0024 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ であるのに対し、同図(b)に示す **Sandwich method** の結果では、最大値と最小値の差が $0.0009 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ と格段に小さい。また、この差は、HFM の機器精度ばらつき $\pm 3\%$ (カタログ値) を考えると、サンプルの熱伝導率が $0.020 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ であるとした場合のばらつきが $\pm 0.0006 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ (差 $0.0012 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$, ばらつき $\pm 2.1\%$) に収まっており、精度よく繰返し再現性が確保できているといえる。さらには、本研究にて目標としているばらつき $0.002 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ 以内にも収まっている。よって、本研究では、ベースプレートと断熱材の複合体の設置方法について、図 3.6(b)に示す **Sandwich method** を採用する。

上記の **Serial method** と **Sandwich method** にばらつきの差が出る理由について、薄型断熱材と接する材料の剛性(弾性率)に起因する接触熱抵抗のばらつきの出やすさに差が生じるからであると考えられる。図 3.5 に示したように、本断熱材には表面の凹凸がある。こうした材料に対し、**Serial method** では、上面にて機器の熱板にあたる鉄板が接する。一方、**Sandwich method** では、ベースプレート材の押出法ポリスチレンフォームが接することになる。本断熱材のサンプルの圧縮弾性率を(株)島津製作所製 卓上型精密万能試験機 AGS-X にて測定したところ、 1230 MPa であった。この値は後述する押出法ポリスチレンフォームの圧縮弾性率 2064 MPa より少し小さく、鉄板の弾性率(縦弾性係数) 206 GPa (206000 MPa) よりはるかに小さい。よって、断熱材と鉄板、押出法ポリスチレンフォーム間はそれぞれ、図 3.8 に示す模式図のような状態になっているものと考えられる。すなわち、同図 3.8(a)は断熱材と鉄板が接する状態(**Serial method** の状態)を示すが、断熱材の剛性に対し、鉄板の剛性は格段に大きいため、鉄板は全く変形をせず、凹凸がある断熱材と鉄板の間に空気層が出来やすくなり、空気層の状態によって(時に対流などが生じ)、断熱材と鉄板の間の接触熱抵抗がばらつく(不安定になる)ものと考えられる。一方、同図 3.8(b)に示した断熱材と押出法ポリスチレンフォームが接する状態(**Sandwich**

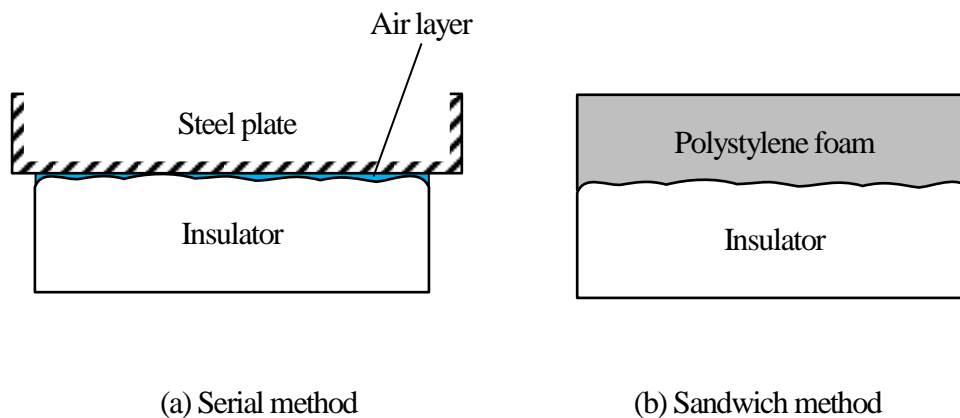


Fig. 3.8 Contact state between the thermal insulator and the other material

method の状態)では、両者の剛性が近いいため、ポリスチレンフォームも幾分断熱材の凹凸形状にならって変形し、結果として断熱材とポリスチレンフォーム間に空気層が出来にくくなるため、接触熱抵抗のばらつきの影響が出にくいものと考えられる。

3.3.3 ベースプレート仕様の検討

3.3.3.1 検討内容

ベースプレートの選定においては、(3-7)式の計算における試験体の厚みや熱伝導率に、ばらつき等の影響を及ぼさず、安定した測定が維持できる材質、厚みのものを検討する必要がある。本研究では、上記を実現できるベースプレート材を選択するため、以下に示す、低弾性材、中弾性材、高弾性材の異なる3材料を候補として挙げ、複数の厚みの材料に対して検討を行った。

<検討材料>

低弾性材： フェルト材（アオキ産業（株）製 ニードルフェルト）

厚さ 10 mm×2 枚, 15 mm×2 枚

中弾性材： ビーズ法ポリスチレンフォーム（（株）キョーリン製 発泡スチロール）

厚さ 10 mm×2 枚, 15 mm×2 枚

高弾性材： 押出法ポリスチレンフォーム（（株）カネカ製 カネライトフォーム）

厚さ 10 mm×2 枚, 20 mm×2 枚, 30 mm×2 枚

図 3.9 に各材料の概観を示す。

また、各材料の圧縮弾性率を表 3.1 に示す。圧縮弾性率の測定には、前述の（株）島津製作所製 卓上型精密万能試験機 AGS-X を使用したが、フェルト材については低弾性であるため反力が安定せず、圧縮弾性率を得られなかった。

前節でも用いた設計厚さ 0.5 mm のエアロゲル複合断熱材を対象サンプルとし、測定を行った。ここで上記 3 材の材質、厚みを選定するための評価の指針としたのは、以下 3 点である。

<評価指針>

- (1) 繰返し測定時の熱伝導率、厚みのばらつき的大小
- (2) 熱流計法の規格である JIS A1412-2 に示される熱抵抗値の条件 ($R = 0.5 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$ 以上) を満たしているか。
- (3) (3-7)式で得られた熱伝導率の計算値が、規格に基づいて測定された試験体の基準値とかけ離れていないか。

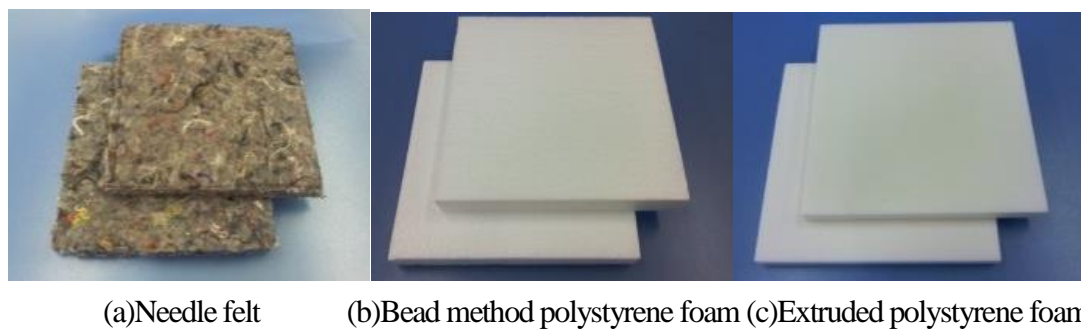


Fig. 3.9 Overview of base plate candidates

Table 3.1 Mechanical property of base plate candidates

	Needle felt	Bead method polystyrene foam	Extruded polystyrene foam
Compressive elastic modulus [MPa]	Unmeasurable	1010	2064

3.3.3.2 繰返し測定時のばらつき評価

図 3.9 に示した、それぞれ厚みの異なる 3 種のベースプレート候補を用い、繰返し測定におけるばらつきの評価を行った。(3-6)式において、最終的に求める試験体の熱伝導率に影響する“ベースプレート単体のばらつき”と“ベースプレートと試験体の複合体のばらつき”それぞれに対し、各部材、各厚みごとに 3 回ずつ熱伝導率と厚みを測定した。厚みは、HFM での Hot plate 下降時の押圧 (4.08 kPa) にて自動計測された値を記録している。試験体については、前章の評価でも用いた設計厚み 0.5 mm のエアロゲル複合断熱材サンプルを用いた。

ここでは、“熱伝導率”と“厚み”の両方のばらつきを評価しなければならない。したがって、本取組みでは、上記の両者のばらつきを評価する指標として、(3-8)式に示すばらつき D [W/K] を考えた。

$$D = \sqrt{\frac{\sum (t - \bar{t})^2}{3}} \times \sqrt{\frac{\sum (\lambda - \bar{\lambda})^2}{3}} \quad (3-8)$$

ここで、 t は厚み、 λ は熱伝導率を示す。(3-8)式を用いてまとめた“ベースプレート単体”の各材料のばらつきを表 3.2 に示す。同表の結果より、ビーズ法ポリスチレンフォーム 10 mm×2 枚、押出法ポリスチレンフォーム 10 mm×2 枚、20 mm×2 枚のばらつきが小さく、ベースプレート材として期待される。

同様にまとめた“ベースプレートと試験体の複合体”のばらつきを表 3.3 に示す。同表の結果より、各材料について厚みが厚くなるほど、誤差が大きくなっている。これより、ベースプレートの厚みは、可能な限り薄い方が良いものと考えられる。また、表 3.3 のデータを、横軸をベースプレートの圧縮弾性率、縦軸を(3-8)式のばらつき D として、図 3.10 にまとめる。同図内の矢印に示す通り、圧縮弾性率が大きく、厚みは小さい方がベースプレート材候補のばらつきが小さいことがわかる。すなわち、ベースプレートは可能な限り変形しない材料がよいといえる。

3.3.3.3 JIS 規格における熱抵抗条件の検討

JIS A 1412-2[42]には、熱流計法の測定方法が適用できる非硬質試験体の熱抵抗値とし

Table 3.2 Dispersion among several evaluated materials for base plates [Based on Eq.(3-8)]

	Felt 10mm×2	Felt 15mm×2	Bead Poly. 10mm×2	Bead Poly. 15mm×2	Ext. Poly. 10mm×2	Ext. Poly. 20mm×2	Ext. Poly. 30mm×2
D [W/K]	4.234E-07	2.272E-07	1.176E-08	1.018E-08	3.849E-09	1.176E-08	1.484E-07

Table 3.3 Dispersion among several evaluated materials for base plates and test sample

[Based on Eq.(3-8)]

	Felt 10mm×2	Felt 15mm×2	Bead Poly. 10mm×2	Bead Poly. 15mm×2	Ext. Poly. 10mm×2	Ext. Poly. 20mm×2	Ext. Poly. 30mm×2
D [W/K]	2.146E-07	2.839E-07	4.807E-08	1.176E-07	3.111E-08	9.051E-08	3.625E-07

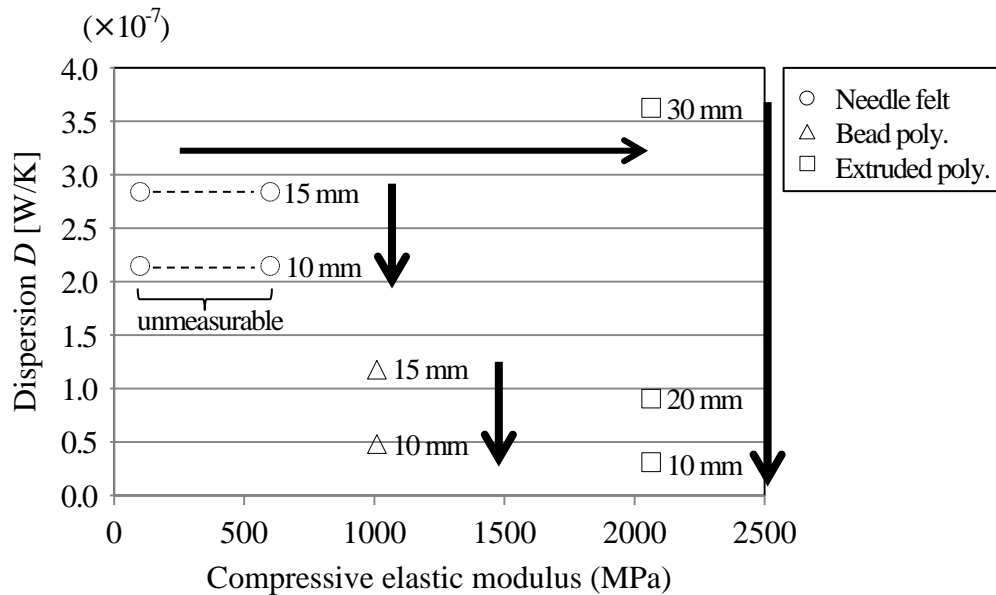


Fig. 3.10 Relationship between dispersion and rigidity about several base plates

て、 $0.5 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$ 以上を指標として設けている。本取組みでは、この熱抵抗値の視点で、前節にて測定した、ベースプレート単体、ベースプレートと試験体の複合体がそれぞれ条件に適合しているかの検討を行った。図 3.11 にベースプレート単体の熱抵抗と熱伝導率の関係を、図 3.12 にベースプレートと試験体の複合体の熱抵抗と熱伝導率の関係を示す。図 3.11, 図 3.12 より、フェルト $10 \text{ mm} \times 2$ 枚とビーズ系ポリスチレンフォーム $10 \text{ mm} \times 2$ 枚は、JIS に示される熱抵抗値の下限 ($R=0.5 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$) とほぼ同値であり、安定した測定のためにはもう少し熱抵抗が大きい方が望ましいと考える。また、図 3.13 に、(3-7)

式を用いた試験体の計算上の厚み（ベースプレートと試験体の積層体の厚みからベースプレートの厚みを引いたもの）と熱伝導率を示すが、フェルト 10 mm×2 枚、15 mm×2 枚、ビーズ系ポリスチレン 10 mm×2 枚では、設計厚み 0.5 mm の試験体に対して厚みが過小評価されている。これは、HFM 測定時の上板（Hot Plate）の押圧（4.08 kPa）により、ベースプレートが圧縮され（元の厚さを維持できず）、計算された試験体の厚みがマイナス側に誤差を多く含んだからであると考えられる。なお、本測定用試験体の実質厚みは、デジマチックインジケータ（(株)ミットヨ製 ID-H530, 押圧 5.00 kPa）で測定の結果、 $t=0.492$ (mm)であった。同図を用いた同様の観点から、押出法ポリスチレンフォーム 20 mm×2 枚、30 mm×2 枚は厚みが過大に評価されており、これにより、他と比べて試験体の熱伝導率が大きめに評価されているものと考えられる。よって、厚みが 0.5 mm より少し小さい値で測定できている、ビーズ系ポリスチレンフォーム 15 mm×2 枚、押出法ポリスチレンフォーム 10 mm×2 枚がベースプレートとして有望視される。

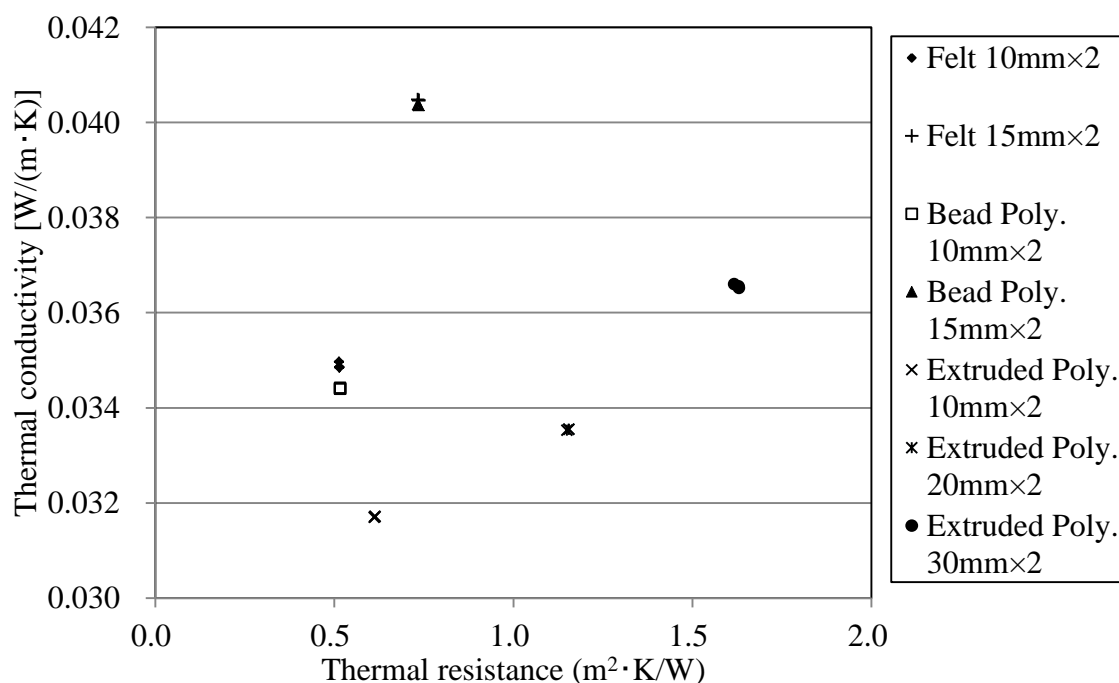


Fig. 3.11 Relationship between thermal resistance and thermal conductivity
(Base plate)

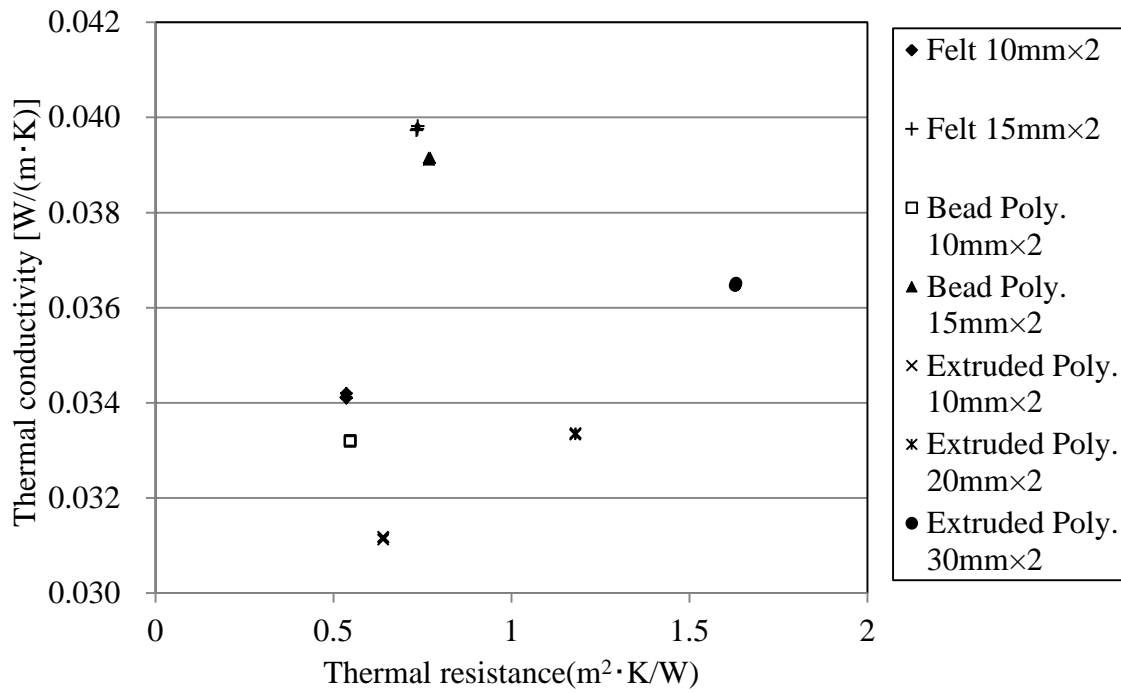


Fig. 3.12 Relationship between thermal resistance and thermal conductivity

(Base plate and test sample)

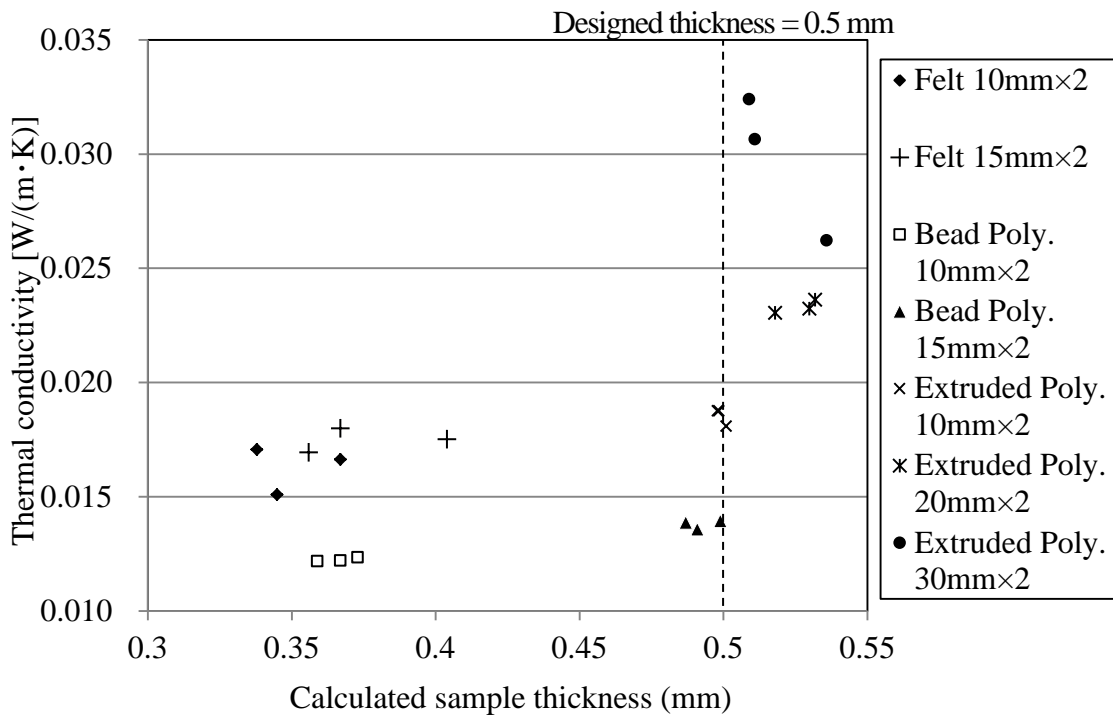


Fig. 3.13 Relationship between calculated sample thickness and thermal conductivity

3.3.3.4 熱伝導率の基準値との比較検証

3.1 節に示した通り、こうした薄くて熱伝導率の小さい材料の熱伝導率は、規格に基づいた測定が難しく、国際的に議論されている段階である。そこで、本取組みでは、測定対象サンプルと同ロットで製造した設計厚さ 0.5 mm のエアロゲル不織布複合断熱体を、図 3.14 に示すように 10 枚、20 枚、30 枚、40 枚、50 枚と複数枚重ねたもののうち、JIS 規定の熱抵抗値条件 ($R = 0.5 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$ 以上) を満たす厚みで測定した時の熱伝導率を“基準値”と定義した。

前項まででベースプレート候補に挙げられたビーズ系ポリスチレンフォーム 15 mm×2 枚、押出法ポリスチレンフォーム 10 mm×2 枚に対し、上記基準値との比較を行った。

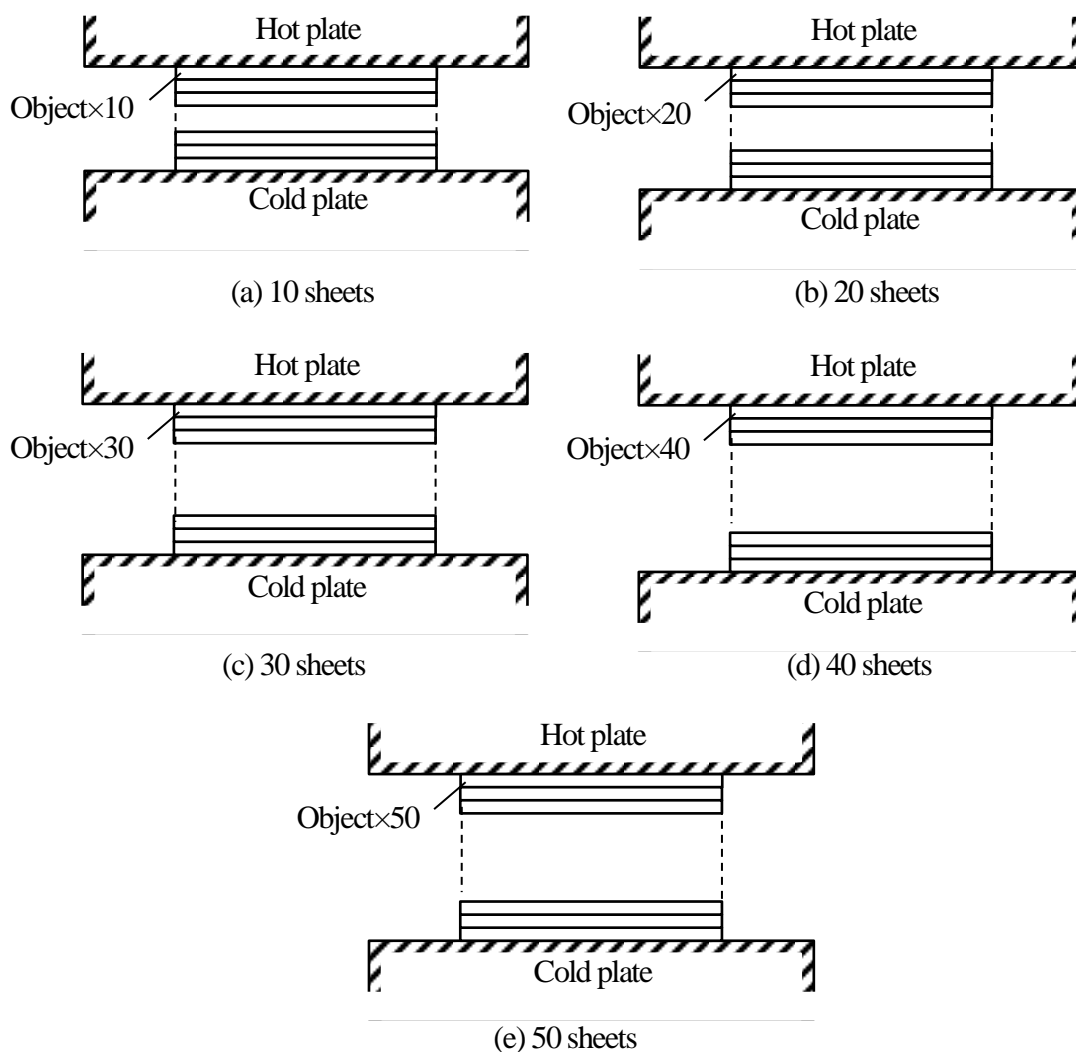


Fig. 3.14 Schematic diagram of measurement of thermal conductivity of plural sheets

図 3.15 に、(3-6)式を用いて算出したベースプレート材による試験体の熱伝導率算出結果と厚みの関係を、図 3.16 に同じ製造ロットのエアロゲル不織布複合断熱材を複数枚重ねて測定した熱伝導率と測定厚みの関係を示す。図 3.16 の複数枚測定の結果より、JIS A 1412-2[42]に規定の熱抵抗条件を満たしているのは 30 sheets 以上の枚数のものであり、このときの熱伝導率は、 $\lambda=0.01853 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ である。図 3.15 において、この熱伝導率の近辺には、押出法ポリスチレンフォーム 10 mm×2 枚の結果があり、このベースプレートによる測定が、基準値に近い測定値を得ることができると言える。したがって、押出法ポリスチレンフォーム 10 mm×2 枚をベースプレートとして採用する。

3.4 拡張性検証

以上にて、サンプル厚さ 0.5 mm のエアロゲル複合断熱材の測定方法の検討を行った。本章では、本手法が他の厚さの断熱材にも適用可能かということを検証するため、1.0 mm 厚の断熱材、2.0 mm 厚の断熱材についても熱伝導率の評価を行った。なお、1.0 mm 厚のサンプルとして設計厚み 1.0 mm の断熱材を準備し、2.0 mm 厚のサンプルについては、現状 2.0 mm 厚の断熱材が無いため、上記の設計厚み 1.0 mm の断熱材（同ロットの

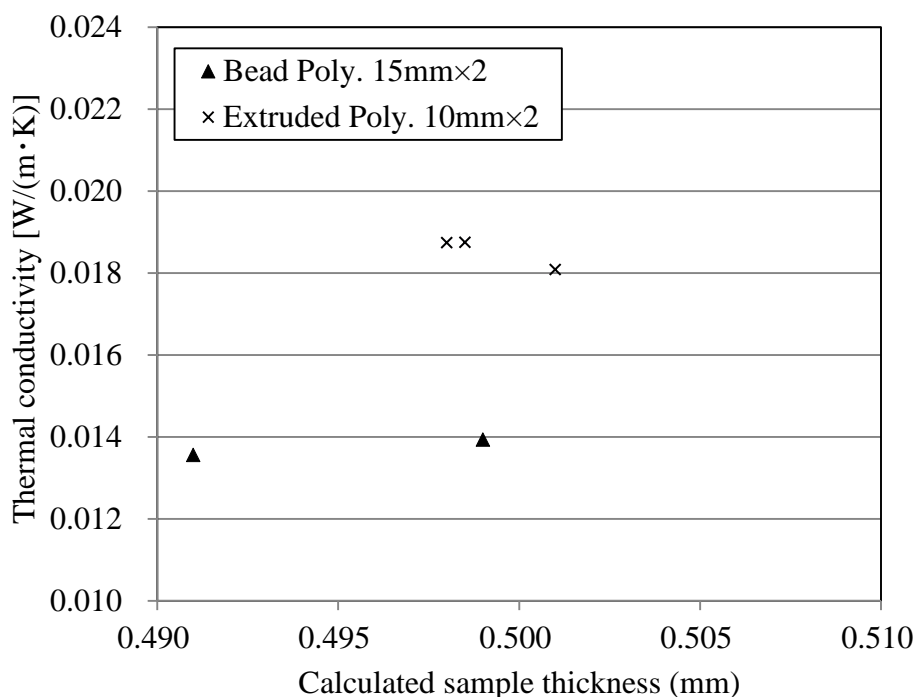


Fig. 3.15 Calculated thickness and thermal conductivity of test sample

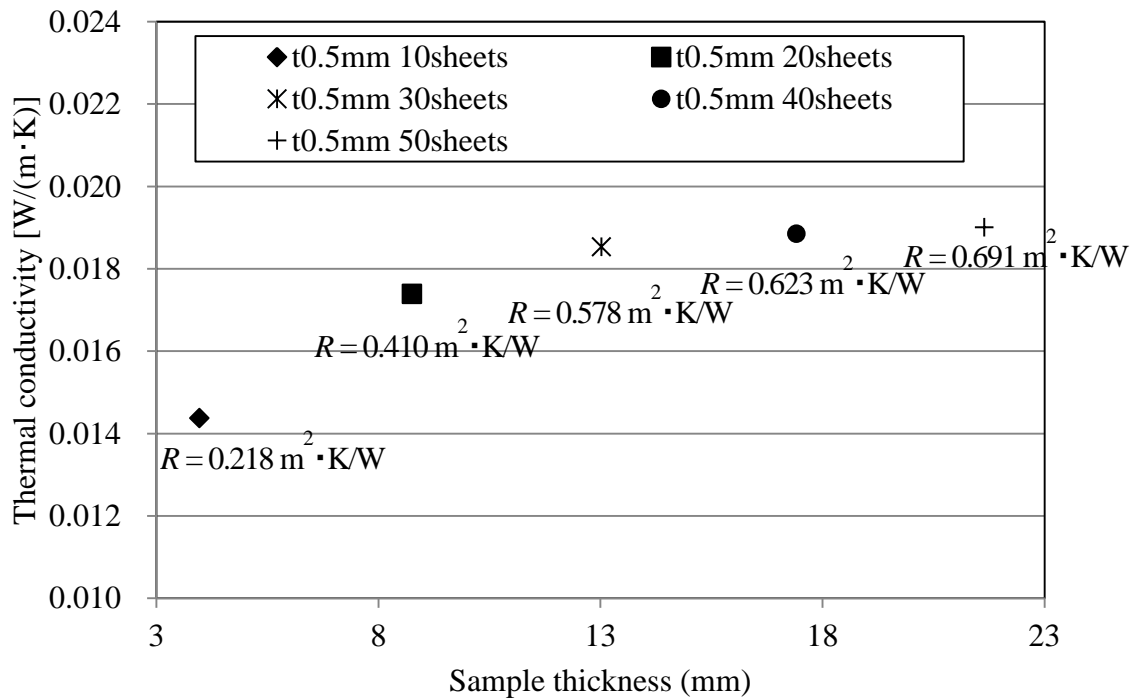


Fig. 3.16 Measurement results of sample thickness and thermal conductivity with thermal resistance of plural sheets

もの) を2枚重ねて構成した。1.0 mm 厚のサンプル, 2.0 mm 厚のサンプルそれぞれを, 前節にて採用した押出法ポリスチレン 10 mm×2 枚のベースプレートにて挟み, 3.3.2 項の方法を5回繰返して再現性の評価を行った。1.0 mm 厚, 2.0 mm 厚の測定・算出結果をそれぞれ図 3.17, 図 3.18 に示す。両図に示すとおり, 繰返し時のばらつきは1.0 mm 厚のもので 0.0008 W/(m·K), 2.0 mm 厚のもので 0.0009 W/(m·K)であり, とともに厚さ 0.5 mm の時と同様にばらつきの小さい測定ができていると考える。本手法は, 厚み 1.0 mm, 2.0 mm の断熱材にも適用可能である。

エアロゲル不織布複合断熱材の, 多分野 (住宅用途や車載機器向け用途など) への展開にあたっては, 現在の薄肉構造のものを厚肉化していく必要がある。本熱伝導率評価手法は, 断熱材が厚肉化された場合にも対応できるものとする。

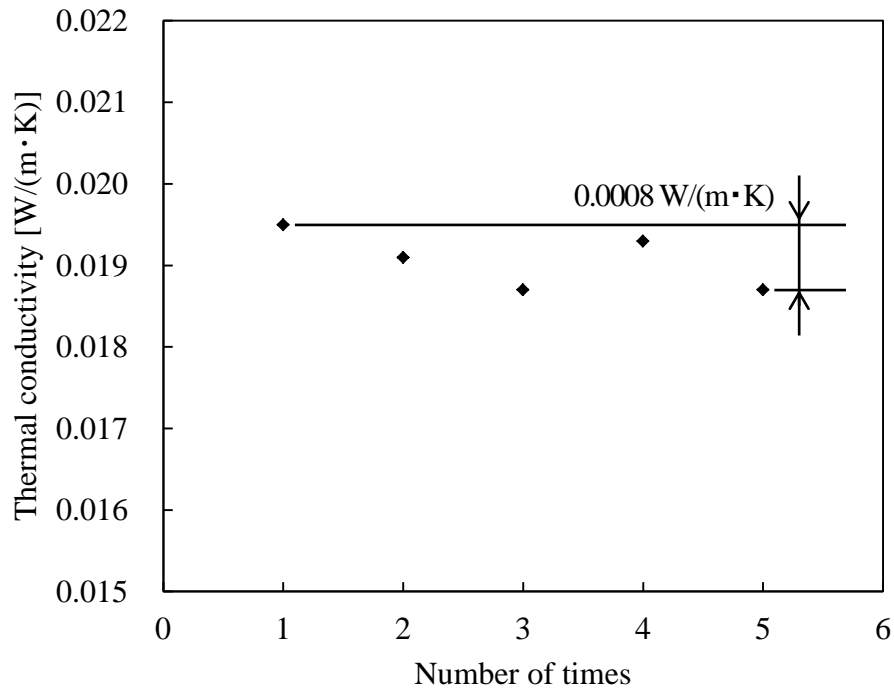


Fig. 3.17 Evaluation of reproducibility of measurement of thermal conductivity for test sample of

t 1.0 mm

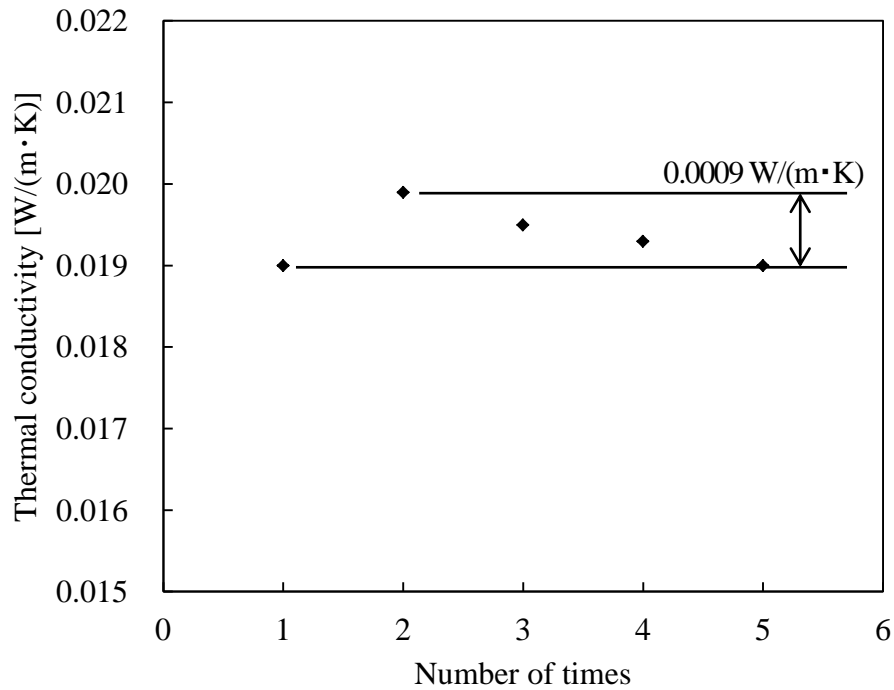


Fig. 3.18 Evaluation of reproducibility of measurement of thermal conductivity for test sample of

t 2.0 mm

3.5 結言

1 mm 厚以下の薄く熱伝導率が低い [$\lambda = 0.02 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 以下]エアロゲル複合断熱材の熱伝導率測定方法について検討した。本研究にて得られた結論を以下に示す。

- ベースプレートで試験体を挟む方法(Sandwich method)にて機器の仕様に収まる精度 (5回の繰返し再現性試験にて $\pm 2.1\%$)での測定が可能である。
- 押出法ポリスチレン (カネカ製カネライトフォーム) 10 mm 厚をベースプレートとする測定にて、本研究の目標値である $0.002 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 以内のばらつきで測定できることが確認できた。
- 厚さ 0.5 mm~2.0 mm のエアロゲル複合断熱材の熱伝導率測定に適用可能である (2.0 mm 以上の厚さのものに対しても適用可能であると考える)。

第4章 エアロゲル複合断熱材のふく射低減設計手法の提案

4.1 緒言

エアロゲル不織布複合断熱材の主材料であるシリカエアロゲルは、シリカ粒子のポーラス構造により断熱性の高い性質を持つことから、薄い厚さであっても十分な断熱性を確保できるため、狭い空間での活用展開に期待されている。また、シリカエアロゲルが主材の断熱材は、一般に 200°C程度までの耐熱性を有することから、車載機器や配管用途など、ウレタン等の樹脂系断熱材の適用が難しい 150°C近傍の温度域での使用が期待されている。しかしながら、こうしたシリカエアロゲルを主とする断熱材を 100°C以上の温度域で使用する場合、高い放射率を有し、表面積が大きい構造であるシリカ粒子群の、ふく射伝熱による断熱性の低下を無視することができない。すなわち、室温以下の温度域では、シリカ粒子群のポーラスな構造に由来し、シリカの固体部分の熱伝導と狭小な細孔内の空気の伝熱がともに起こりにくいことにより、エアロゲルの見かけの（有効）熱伝導率は、0.02 W/(m·K)以下の小さい値となるが、100°C以上の温度域では、ふく射による等価熱伝導率が大きくなり、有効熱伝導率が増大して、高い断熱性を維持することが困難になる。また、このようなふく射伝熱を低減するために、ウレタンフォーム等の樹脂系断熱材では、表面に低放射率のシートを貼付することがあるが、本断熱材は表面に脆弱なシリカ粒子が露出しているため、こうしたシートを貼付設置することが難しい。

したがって、断熱材の製造工程において、ふく射伝熱の低減に寄与する粒子（以下、ふく射伝熱低減粒子と記載）を追加複合して、ふく射伝熱による有効熱伝導率の上昇を

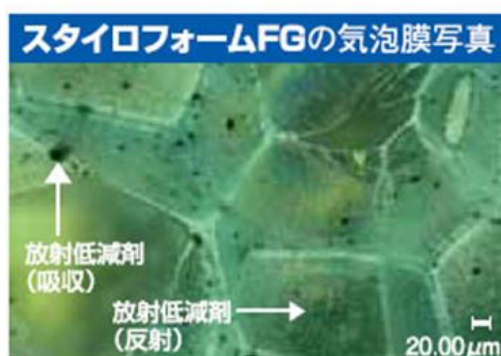


Fig. 4.1 Radiative heat transfer reduce particle in urethane-based insulator[43]

抑える方法が考えられている。粒子の複合化が試行されているウレタンフォームの分野では、図 4.1 に示すように、ふく射伝熱低減粒子について、放射率が大きい放射吸収材 (SiC, SiO₂, TiO₂ など) と、放射率が小さい放射反射材 (Al₂O₃, ZrO₂ など) に分け、これらを組み合わせることでふく射伝熱が低減できるよう検討がなされている[43][44]。放射吸収材について、黒色の粒子であり耐熱性があることから核融合炉などの高温炉の放熱体として適用されてきた SiC[45]-[48]以外の SiO₂[49]-[51], TiO₂[52]-[55]は、半透明あるいは白色の粒子で散乱性があることから、可視光領域 (数 10 nm～数 100 nm) の径の粒子が化粧品分野で汎用されてきた。ふく射伝熱低減粒子として適用する場合は、近赤外線を吸収・散乱させる必要があるため、1 μm オーダの径の粒子[56]が用いられる。また、放射反射材について、Al₂O₃[57][58], ZrO₂[59][60]の各粒子も、白色であり反射性があることから、SiO₂, TiO₂ とともに粒子径の小さいものが化粧品分野で活用されてきた。こうした粒子については、断熱材中のふく射伝熱抑制の用途に加え、大気中に散布することによる地表温度の上昇抑制[61][62]に対しても研究がなされている。

しかしながら、シリカエアロゲルより熱伝導率が 2～4 桁大きいふく射伝熱低減粒子を断熱材に多量に添加すれば、粒子を複合したことによる断熱性の低下 (固体部分の熱伝導率の上昇) が起こることも想像に難くない。

そこで本研究では、ふく射伝熱を考慮した熱伝導解析により、シリカエアロゲルに複合し、断熱材の有効熱伝導率低減に寄与することができるふく射伝熱低減粒子の材質 (熱伝導率と放射率) と配合率の検討を行った。なお本研究では、粒子の放射率として、波長 7 μm における指向放射率を対象として比較した (以降、「放射率」と記載のものは波長 7 μm における指向放射率を示す)。本取組みでは、特に、数 10 nm オーダの径をもつシリカエアロゲル粒子と数 μm オーダの径のふく射伝熱低減粒子の寸法差に対するモデル化手法を提案して検討を行った。

本章にて提案する設計のフローを図 4.2 に示す。まずは、断熱材を構成するエアロゲルのモデルにふく射伝熱低減粒子のモデルを複合した解析モデルを作成する[図 4.2(a)]。次にこのモデルを用い、ふく射伝熱を考慮した熱伝導解析にて、第 2 章の図 2.16 に示した手法にてモデルの有効熱伝導率を計算する[図 4.2(b)]。ここでは、高温時のモデルの熱伝導率低減の目標値として、仮に現行より 0.2%低減していることとする。図 4.2(c)の判

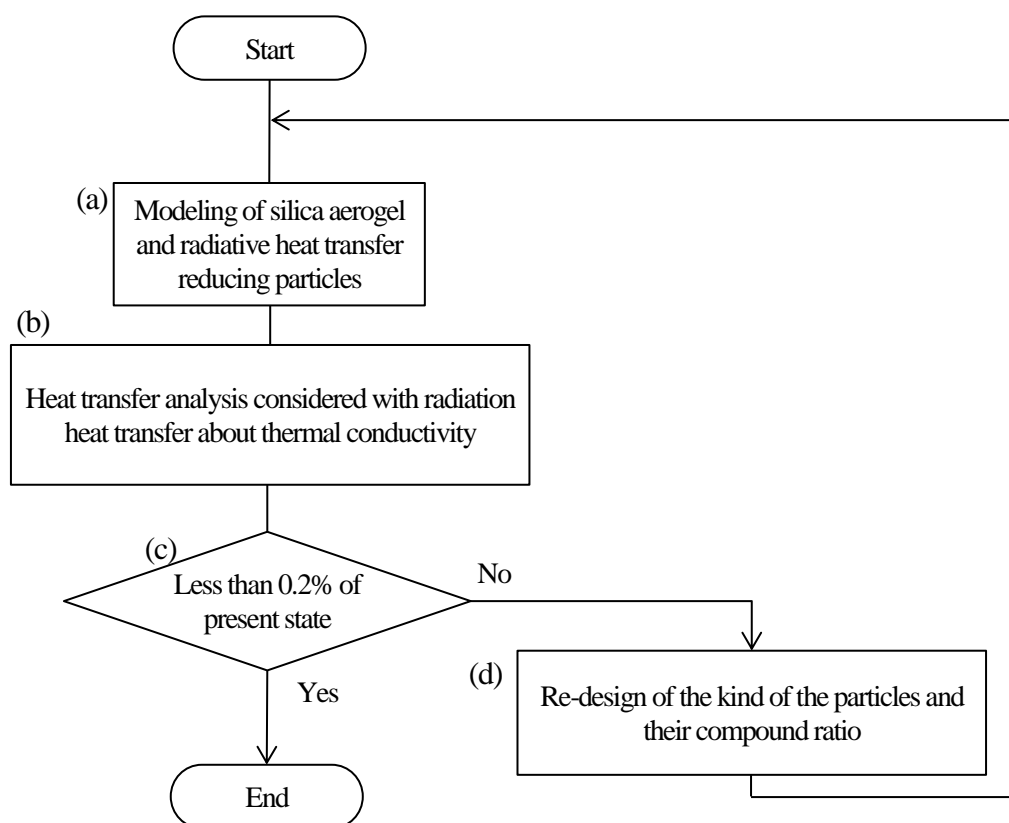


Fig. 4.2 Flowchart of design method proposed in this chapter

定により、この目標をクリアしていれば設計完了となるが、目標をクリアしない場合は、粒子の材質や配合率を再検討し、再度モデル化を行う[図 4.2(d)]. この設計フローを、目標をクリアするまで繰り返す. なお本来であれば、図 4.2 のフローにしたがい、順次断熱材内のふく射伝熱低減粒子の状態を更新してシミュレーションによる評価を行うべきであるが、本研究では、種々のふく射伝熱低減粒子による熱伝導率低減効果の検証に重きを置くため、あらかじめ種々の粒子候補の効果をシミュレーションにて検証し、その結果を図 4.2 の設計手順に照らし合わせた場合について、結言にて論じる.

4.2 シリカエアロゲルの有効熱伝導率

シリカエアロゲルをはじめとする多孔質断熱材の有効熱伝導率 λ_{eff} は、(4-1)式で表現できる[74].

$$\lambda_{\text{eff}} = \lambda_{\text{sol}} + \lambda_{\text{gas}} + \lambda_{\text{rad}} \quad (4-1)$$

ここで、 λ_{sol} は固体部分の熱伝導率、 λ_{gas} は気体に寄与する熱伝導率、 λ_{rad} はふく射による等価熱伝導率である。シリカエアロゲルの場合、直径10~30 nm程のシリカの二次粒子が、構造中に3次元のネットワークを組んでいるため λ_{sol} の値は小さい。また、ネットワーク内の細孔径は、空気の主成分である窒素分子の平均自由行程に近いかそれ以下であるため、分子同士の衝突による伝熱がほとんど起こらず λ_{gas} は非常に小さな値を取る。よって、他の材質の断熱材と異なり、 λ_{rad} がシリカエアロゲルの有効熱伝導率に大きく影響する。同文献[74]によれば、(真空中での)エアロゲル内の λ_{eff} は-108°C以上で λ_{rad} が主となり、それ以上の温度域では、 λ_{rad} が λ_{eff} を代表する。また、文献[7]には、シリカエアロゲルに対しては、100°C以上での使用があり得る場合に、ふく射伝熱を考慮に入れた材質設計をする必要があるとされている。よって、シリカエアロゲルを主材とする断熱材の高温使用では、ふく射伝熱(ふく射による等価熱伝導率の上昇)を抑制することが重要となる。

4.3 解析モデル化の提案と精度検証

4.3.1 モデル化方法の提案

ふく射伝熱を考慮した熱伝導解析により、シリカエアロゲルの二次粒子ネットワーク内にふく射伝熱低減粒子が含有された場合の、粒子の材質と配合率の違いによる、シリカエアロゲルの有効熱伝導率の違いを求め、ふく射伝熱を抑制できる材質、配合率の領域を明確にする。なお、本来であれば、対象とする不織布シリカエアロゲル複合断熱材に対しては、構成材料であるシリカエアロゲルと不織布繊維の両者をモデル化するべきであるが、骨格材として適用する不織布材料はPETをはじめ種々存在することと、特にふく射による等価熱伝導率への影響が大きく出ると考えられるシリカエアロゲルの性質に着目するため、本研究ではシリカエアロゲルのみをモデル化することとした。

しかしながら、シリカエアロゲルとふく射伝熱低減粒子の固体部分の伝導とふく射伝熱を考慮したシミュレーションモデルの構築を考える場合、図4.3に示すような、直径が数10 nmオーダーのシリカエアロゲルの二次粒子と、直径が数 μm オーダーのふく射伝熱低減粒子という、およそ100倍のオーダー差を持つ両粒子の現象を表現できるモデルでなければならない。上記のオーダーの差を単一のモデルで表現することは、計算コ

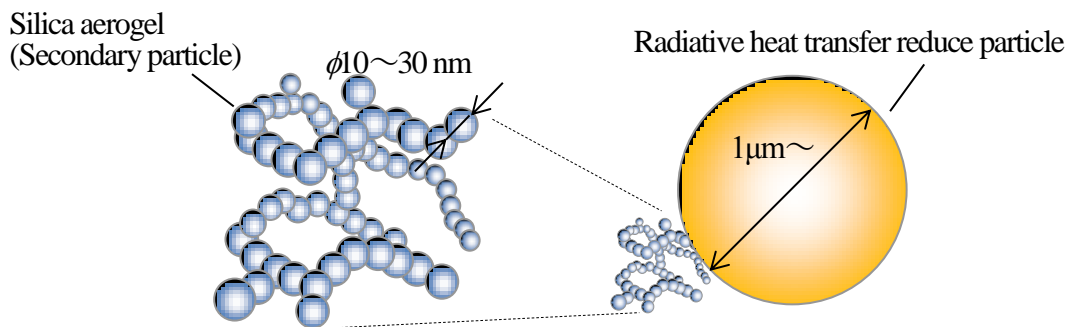


Fig. 4.3 Difference of the particle diameter range between silica aerogel and radiative heat transfer reduce particle

ストの点から現実的ではない。そこで、本研究では、まず、シリカエアロゲル内部の固体部分の伝導とふく射伝熱の現象を表現できる簡易モデルを構築し、その簡易モデルとふく射伝熱低減粒子のモデルを組み合わせることで、ふく射伝熱を抑制できる粒子の材質と配合率を検討することとした。以下、図 4.4 の手順をベースに図 4.5～図 4.8 の各図を用いながら、上記のモデル化方法について説明する。

まず、図 4.4 の左側に示すユニットセルから詳細モデルの構築について、図 4.5 に示すように、シリカエアロゲルの二次粒子ネットワークと細孔 1 つを、エアロゲルの構造を代表する単位（ユニットセル）とし、エアロゲル内部は、本構造が 3 次元に周期的に連なっているものとする。本研究では、ユニットセルを細孔径 59 nm、シリカの二次粒子径 15 nm のエアロゲル構造（1 辺 70 nm の立方体）とし、二次粒子間はそれぞれ 1 nm 分ずつ重なり合った構造になっているものとした。二次粒子部分については、シリカの熱伝導率を与えて固体熱伝導を表現し、粒子表面ではふく射が放射されると考えられるため、シリカの波長 $7 \mu\text{m}$ の指向放射率を与えてふく射伝熱を表現した。

また、エアロゲル以外の細孔部は同図 4.5(b)に示すように空気であるが、空気の主成分である窒素分子の平均自由行程よりも小さい領域であるため、分子の衝突による熱の伝達が極端に少ないと考えられる。したがって、エアロゲルの細孔内の空気の熱伝導率として、静止空気の熱伝導率 $0.026 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ から、(4-2)式[75]に示す分子の衝突による熱の伝達に起因する熱伝導率 λ_g を引いた $0.012 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ を適用した。

$$\begin{aligned}
\lambda_a &= \frac{1}{3} C_r l v \\
&= \frac{1}{3} [1255 \text{ J}/(\text{m}^3 \cdot \text{K}) \times (68 \times 10^{-9}) \text{ m} \times 493 \text{ m/s}] \\
&= 0.014 [\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})]
\end{aligned}
\tag{4-2}$$

(C_r : 窒素の定積比熱容量, l : 窒素分子の平均自由行程, v : 窒素分子の平均速度)

本研究では、シリカエアロゲルの粒子ネットワークの寸法オーダーを、ふく射伝熱低減粒子の寸法オーダーに近づけたモデルを構築するため、このユニットセルを x, y, z 方向にそれぞれ 6 個ずつ (計 216 個) 並べた詳細モデル[図 4.6]に対し、熱的に同じ条件 (モデルの有効熱伝導率とふく射量が同じ) となる簡易モデルを考える[図 4.7(b)]. 図 4.4 の右側に示す簡易モデル構築とふく射伝熱低減粒子の評価までの流れを以下に説明する. 簡易モデルでは、図 4.7(b)に示すようにエアロゲル粒子と細孔内の空気の熱伝導部分を合わせて固体 A として表現する. そして、エアロゲル粒子表面の放射現象を、 xy 平面, yz 平面, zx 平面にそれぞれ平行に 2 枚ずつ配したふく射伝熱を表現するプレートにて表す. さらに、構築した簡易モデルを、図 4.8 に示すように、 x, y, z 方向にそれぞれ 12 個ずつ (計 1728 個) 並べ、同図に示すようにふく射伝熱低減粒子を複合する (埋め込む). 以上によって構築した簡易モデル (1728 個分) と、それにふく射伝熱低減粒子を複合したモデルを用い、シミュレーションによる評価を行った. 次節以降では、有効熱伝導率評

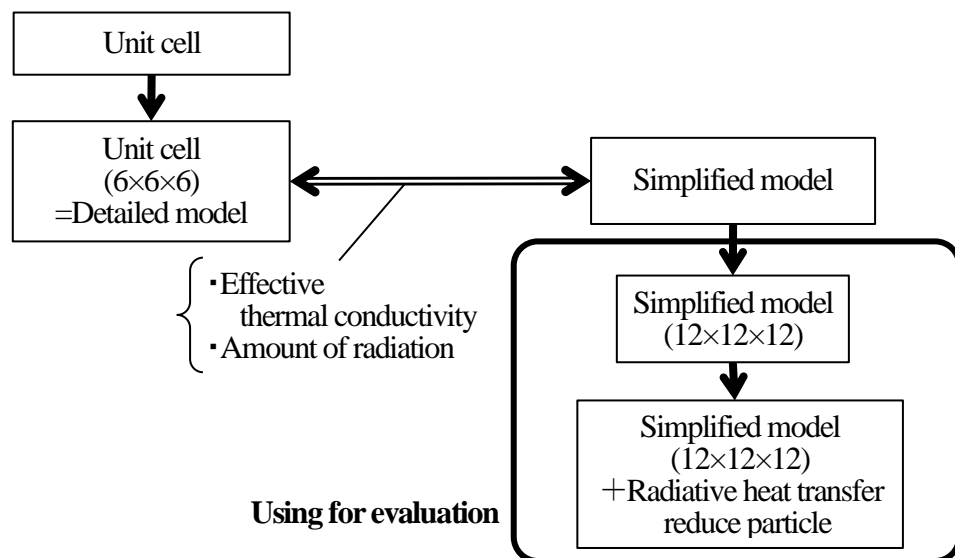


Fig. 4.4 Procedure of formulation of evaluation model

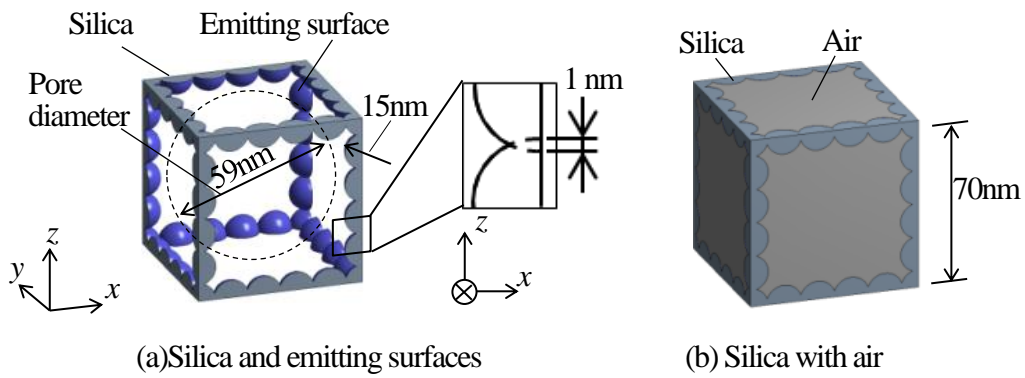


Fig. 4.5 Definition of the unit cell of silica aerogel's network

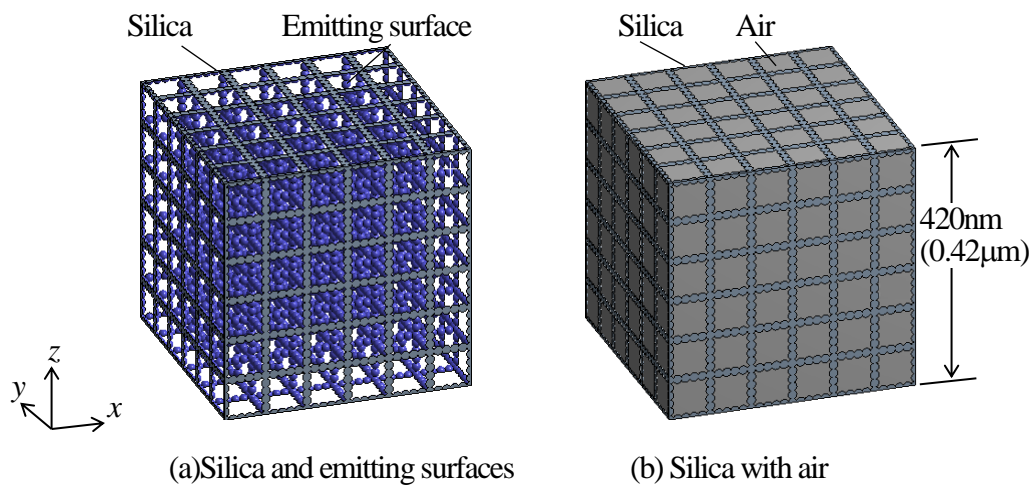


Fig. 4.6 Detailed model of silica aerogel's network

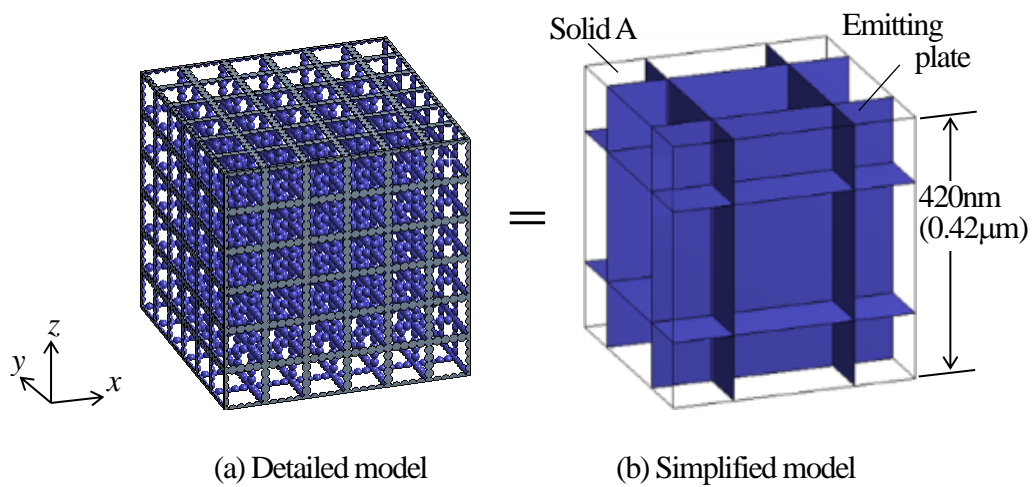


Fig. 4.7 Simplification of detailed model

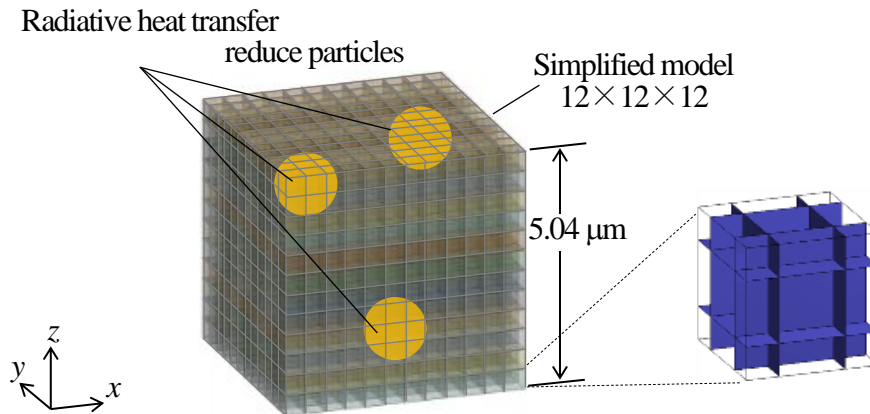


Fig. 4.8 Combination of aerogel and radiative heat transfer reduce particles

価方法と，上記の解析モデルにおけるエアロゲル部分に相当する簡易モデルの諸物性の条件構築の内容，精度検証結果について説明する．

4.3.2 有効熱伝導率評価方法

本章では，以降の簡易モデルの構築，精度検証，各種ふく射伝熱低減粒子の検証において，各解析モデルの有効熱伝導率を求めるため，下記に示す，ふく射を考慮した熱伝導解析を用いた手法を適用する．

熱伝導率算出の一般式は式(4-3)で表される．

$$\lambda = \frac{Q \cdot t}{\Delta T \cdot A} \quad (4-3)$$

ここで， λ は熱伝導率， Q は測定対象物（サンプル）を通過する熱量， t はサンプルの厚さ， ΔT はサンプルの上下面の温度差， A はサンプルの断面積である．第3章にも示した断熱材の熱伝導率測定の規格である JIS A 1412-2 の熱流計法[42]では，式(4-3)に基づき，サンプルの上下面に温度差を生じさせ，サンプルを通過する熱流（サンプルを挟んだ熱板と冷却板を通過する熱流）と寸法情報（サンプル厚さと断面積）から熱伝導率を求める．評価に用いた熱伝導解析では，この熱流計法に基づき，図 4.9 に示すように，モデル上面を 4.3.4 項の精度検証では 50°C，4.4 節の評価では 150°C，350°C，550°C に温度固定し，仮想熱流として $Q = 30$ (nW) を下面から引くことにより，高温環境での熱伝導率測定

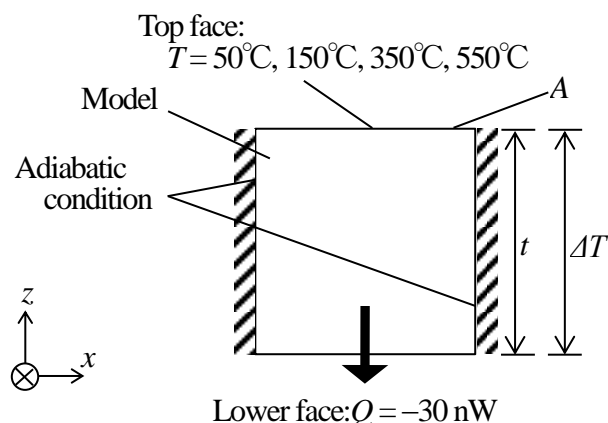


Fig. 4.9 Settings of heat transfer analysis of thermal conductivity

を模擬した。なお、計算には ANSYS 16.0（定常伝熱解析）を用いた。ふく射に関する条件として、4.3.4 項の精度検証では雰囲気温度 50°Cでのふく射伝熱を、4.4 節の評価では 150°C, 350°C, 550°Cでのふく射伝熱を ANSYS におけるラジオシティ法を用いて計算した。ユニットセルが周期的に連なる構造を想定することから、モデル周囲 (yz 平面, zx 平面に平行する面) には断熱条件を設けた。計算結果として得られる上下面の温度差 ΔT (下面は平均温度にて計算) を求め、モデルの厚み t , 断面積 A と合わせて式(4-3)に代入することにより、熱伝導率 λ を求めた。

4.3.3 簡易モデルの条件構築

ここでは図 4.7(b)に示した簡易モデルを構築する。まずは、図 4.7(a)に示す詳細モデルを用いてエアロゲルと空気の熱伝導とエアロゲル表面のふく射伝熱を解き、有効熱伝導率と正味ふく射量を求める。本取組では、ANSYS 16.0 のモデル化手法を適用し、図 4.5(b)あるいは図 4.6(b)に示すシリカ粒子部分と空気の空隙部分は別々に固体要素 SOLID186[65]にてモデル化し、その界面にて接触要素 CONTA175, TARGE170[65]により固着接触（滑り無し）した。放射する面を図 4.5(a)あるいは図 4.6(a)に示すようにシリカ粒子の内表面に設定し、ラジオシティ法によるふく射伝熱の計算を行った。詳細モデルに設定した諸熱物性を表 4.1 に示す。4.3.2 項の方法により、詳細モデルについて計算したところ、有効熱伝導率は 0.01725 W/(m·K), 正味ふく射量は -8.6572 pW であった。

次に簡易モデル[図 4.7(b)]について物性同定を行った。ここで同定したのは、同図に示す固体 A の熱伝導率とプレートの放射率である。簡易モデルは、まず図 4.7(a)に示す詳細モデルと同サイズの立方体を形成し、プレートの設置面(xy 面に平行に 2 枚, yz 面に平行に 2 枚, zx 面に平行に 2 枚)にて計 27 個の立方体に分割したものを、分割した界面にて接触要素 CONTA175, TARGE170[76]により固着接触 (滑り無し) した。またこのとき、隣り合う 2 つの立方体の界面には 2 枚のプレートが存在するが、どちらか一方の面を放射する面として放射率を設定した。4.3.2 項の評価手法を、固体 A の熱伝導率とプレートの放射率を調整しながら実施したところ、固体 A の熱伝導率を 0.01651 W/(m・K)、プレートの放射率を 0.35 に設定することで、前述の詳細モデルの諸数値にほど近い、有効熱伝導率 0.01724 W/(m・K)、正味ふく射量 -8.6580 pW を得た。詳細モデルと物性同定した簡易モデルの有効熱伝導率と正味ふく射量を表 4.2 にまとめる。簡易モデルの固体 A の熱伝導率とプレートの放射率について、詳細モデルのそれらとの乖離は非常に小さいため、上記の値を採用することとした。

なお、本モデルの構築にあたって、細孔径が異なるモデルも検討した。図 4.10(a)に示

Table 4.1 Thermal properties of detailed model

Material	Thermal conductivity [W/(m・K)]	Emittance
Silica	1	0.9
Air	0.012	—

Table 4.2 Result of identification of thermal properties

Model	Thermal conductivity of Solid A [W/(m・K)]	Emittance of plates	Effective thermal conductivity [W/(m・K)]	Net amount of radiation (pW)
Detailed model	—	—	0.01725	-8.6572
Simplified model	0.01651	0.35	0.01724	-8.6580
[Deviation(%)]			[0.06]	[0.01]

すのは細孔径が 31 nm のモデル，同図(b)に示すのは細孔径が 129 nm のモデルである。この両詳細モデルに対し，図 4.7(b)に示した簡易モデルに関する物性（固体 A の熱伝導率とプレートの放射率）の同定を行った。図 4.10 に示す Small pore model, Large pore model の計算結果をそれぞれ表 4.3，表 4.4 に示す。

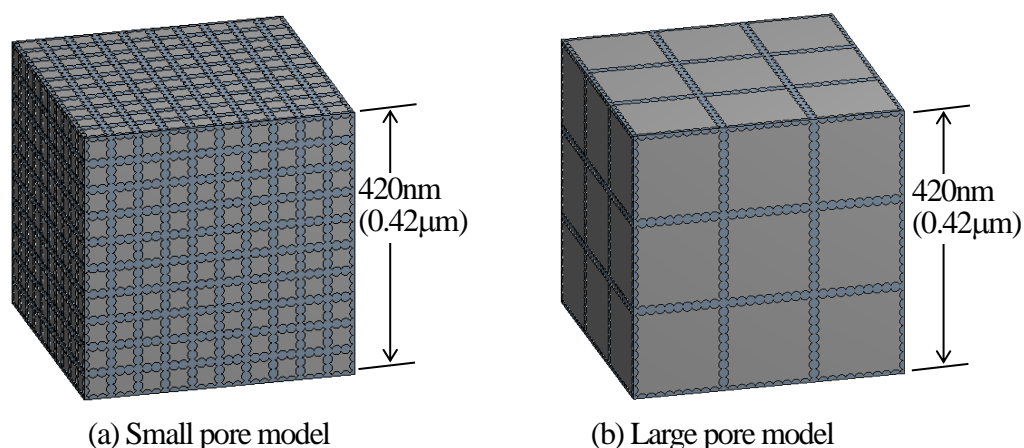


Fig. 4.10 Other detailed models for comparison

Table 4.3 Result of identification of thermal properties(Small pore model)

Model	Thermal conductivity of Solid A [W/(m·K)]	Emittance of plates	Effective thermal conductivity [W/(m·K)]	Net amount of radiation (pW)
Detailed model	—	—	0.03144	−3.6995
Simplified model	0.031	0.32	0.03141	−3.7101

Table 4.4 Result of identification of thermal properties(Large pore model)

Model	Thermal conductivity of Solid A [W/(m·K)]	Emittance of plates	Effective thermal conductivity [W/(m·K)]	Net amount of radiation (pW)
Detailed model	—	—	0.01408	−7.3939
Simplified model	0.0141	0.30	0.014	−7.4031

以上の結果から、Small pore model は、シリカの体積含有率が大きく、熱伝導率が $0.031 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ にもなり、断熱成分としてのシリカエアロゲルの構造を表現できているとは考えがたい。また、Large pore model についても、細孔が大きく（窒素分子の平均自由行程よりはるかに大きく）、固体 A の熱伝導率も約 $0.014 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ と、第 2 章の表 2.7 に示した文献[69]に記されるシリカエアロゲルの熱伝導率 $0.017 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ よりはるかに小さいため、シリカエアロゲルの構造を表現できているとは考えがたい。よって、本章にて対象とするエアロゲルの構造について、図 4.6、図 4.7 に示す細孔径 59 nm のモデルを確定した。

4.3.4 精度検証

提案したモデル化手法が実現象を表現できているか検証した。本研究では、図 4.8 に示したように、簡易モデルを x , y , z の各方向に各 12 個ずつ並べ、計 1728 個の簡易モデル群の中にふく射伝熱低減粒子を複合して、ふく射伝熱低減粒子の有無、含有量の大小による有効熱伝導率の増減を評価する。ここでは、本モデル化方法の精度検証の対象として、不織布シリカエアロゲル複合断熱材に、ふく射伝熱低減粒子の一つである TiO_2 粒子を、配合率を異ならせて複合させたものと考え、サンプルを作製し測定した熱伝導率と、シミュレーション上で求めた有効熱伝導率を比較することにより検証を行った。サンプルの作製においては、 120 mm 角、設計厚さ 0.6 mm の不織布シリカエアロゲル複合断熱材の製造過程において、 TiO_2 粒子（テイカ株式会社製 JR-1000、平均粒径 $1 \mu\text{m}$ ）[76]を所定量含有させることで、断熱材製造後に TiO_2 粒子が内部に複合されている構造を構成した。また、作製サンプルの熱伝導率測定には、HFM 法熱伝導率測定装置 HFM436/3/1（Erich NETZSCH GmbH 製）[72]を用い、サンプルの平均温度を 50°C にして行った（後述する各種ふく射伝熱低減粒子の評価も鑑み、高い温度域で精度検証を行うのが望ましいが、装置の仕様上 50°C 環境にて評価した）。なお今回対象とした厚さ 0.6 mm の薄い断熱材の測定に対し、上述の測定装置は許容熱抵抗値の仕様範囲外であることから、第 3 章にて提案した測定方法を用い、熱伝導率を求めた。一方、解析では、図 4.8 に示すように、簡易モデル 1728 個で構成したエアロゲルモデルから、直径 $1 \mu\text{m}$ のふく射伝熱低減粒子（ TiO_2 粒子）を模した球形モデルをブーリアン減算することで、エアロ

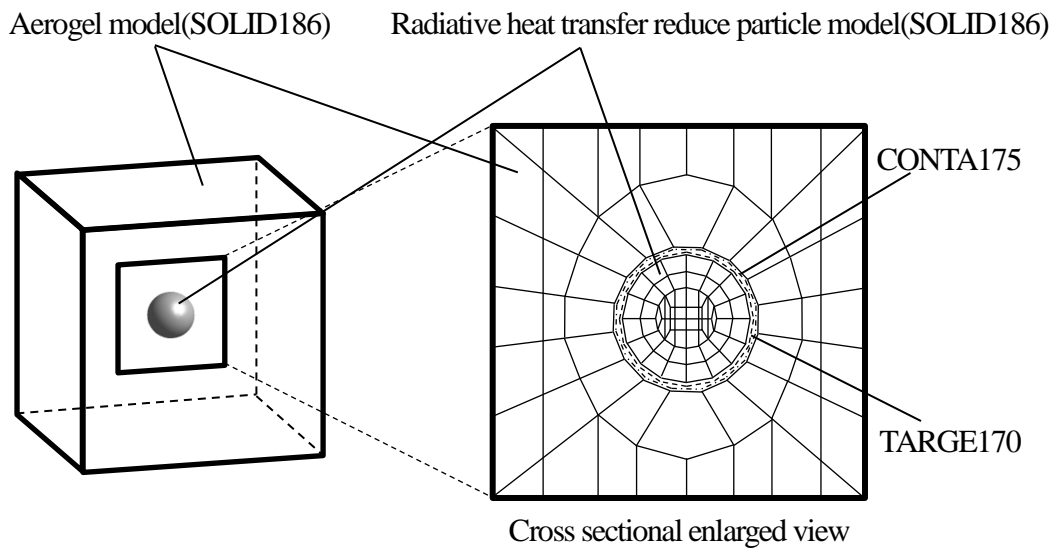


Fig. 4.11 Combination between aerogel model and radiative heat transfer reduce particle model

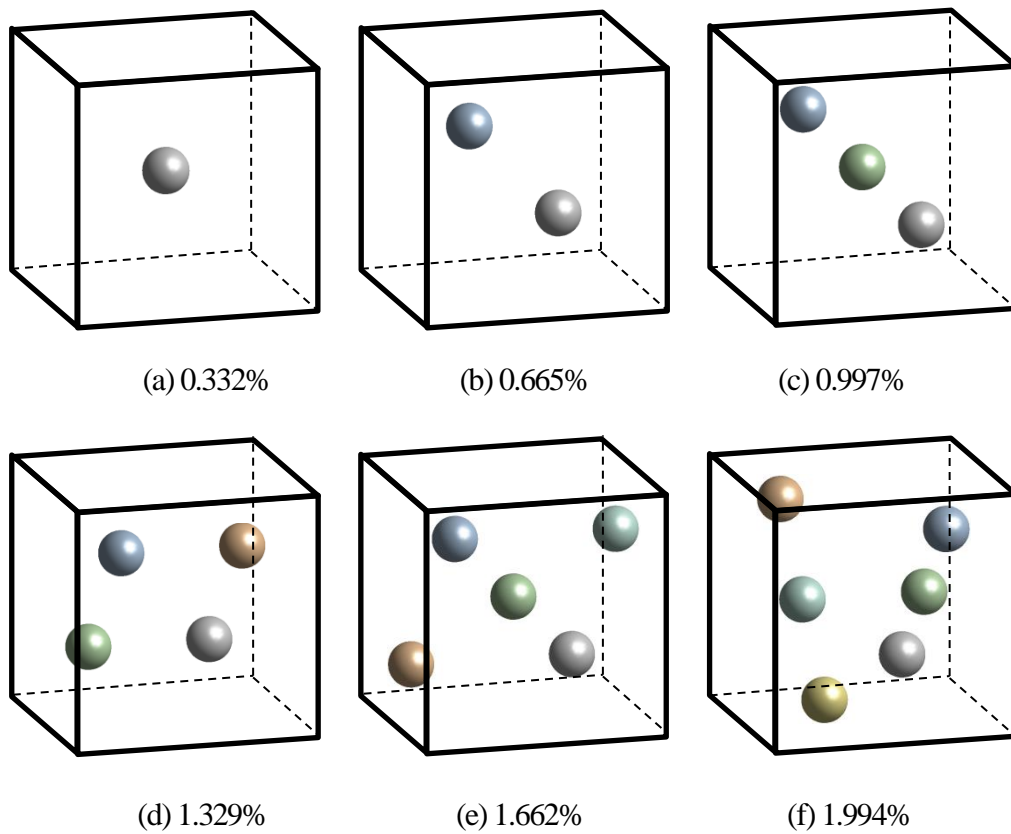


Fig. 4.12 Dispersed states of radiative heat transfer reduce particles and their combination ratio in the aerogel models

Table 4.5 Thermal properties of TiO₂

Material	Thermal conductivity [W/(m·K)]	Emittance
TiO ₂	4	0.5

ゲルと TiO₂ の複合モデルを構築した。エアロゲルモデル内のふく射伝熱低減粒子のモデル化の模式図を図 4.11 に示す。粒子は、配合率に応じ簡易モデル内に均等に配置した。エアロゲルモデルに対する配合率に応じた粒子モデルの配置状態を図 4.12 に示す。エアロゲルモデルと TiO₂ モデルの界面は、接触要素 CONTA175, TARGE170[65]により固着接触（滑り無し）した。また、TiO₂ の表面には放射率を設定した。解析に用いた TiO₂ の物性を表 4.5 に示す。

エアロゲルと TiO₂ の複合モデルに対し、4.3.2 項に示した方法にて有効熱伝導率を求めた。サンプルの熱伝導率測定結果と、解析で得られた有効熱伝導率の結果を、横軸を TiO₂ の配合率とし、図 4.13 に整理する。なお本図以降では、微小な熱伝導率の差について論ずるため、熱伝導率の単位を mW/(m·K)にて表示する。図 4.13 にて、実測値と解析結果の間に、一定して平均 1.5 mW/(m·K)程度の差が認められるが、これは、断熱材の実構造では、不織布 (PET) が骨格材として含まれるのに対し、本研究では、解析モデルに不織布を含んでいないためである。この差については、第 1 章の図 1.4 に示したエアロゲルと不織布で構成される mm オーダの領域での解析と、本章でターゲットとしている nm オーダのエアロゲルモデルの中に μm オーダで存在するふく射伝熱低減粒子を扱う解析をつなぐ手法を今後構築することで埋めていく。図 4.13 中の点線は、計算結果と解析結果のプロット点からそれぞれ、近似曲線を描いたものであるが、ともに TiO₂ 粒子による有効熱伝導率の低減効果が、ほぼ同じ粒子配合率（約 0.7 vol%まで）のところで現れており、かつ、最も熱伝導率が低減している部分（0.33 vol%付近）の低減量が約 0.06 mW/(m·K)とよく一致している。したがって、提案した解析モデルにより、ふく射伝熱低減粒子による、有効熱伝導率の低減できる領域と低減量を予測できるものとする。また、有効熱伝導率が粒子配合量によって増減するメカニズムについて、図 4.14（図 4.13 において熱伝導率が低下し再度上昇する四角部の拡大図）を用いて説明する。断熱材の有効熱伝導率は、(4-1)式に示すように λ_{sol} と λ_{rad} の合算で表される。ふく射伝熱低減粒子

が無い場合、表面積が大きいエアロゲルのふく射による等価熱伝導率は大きいですが、これ

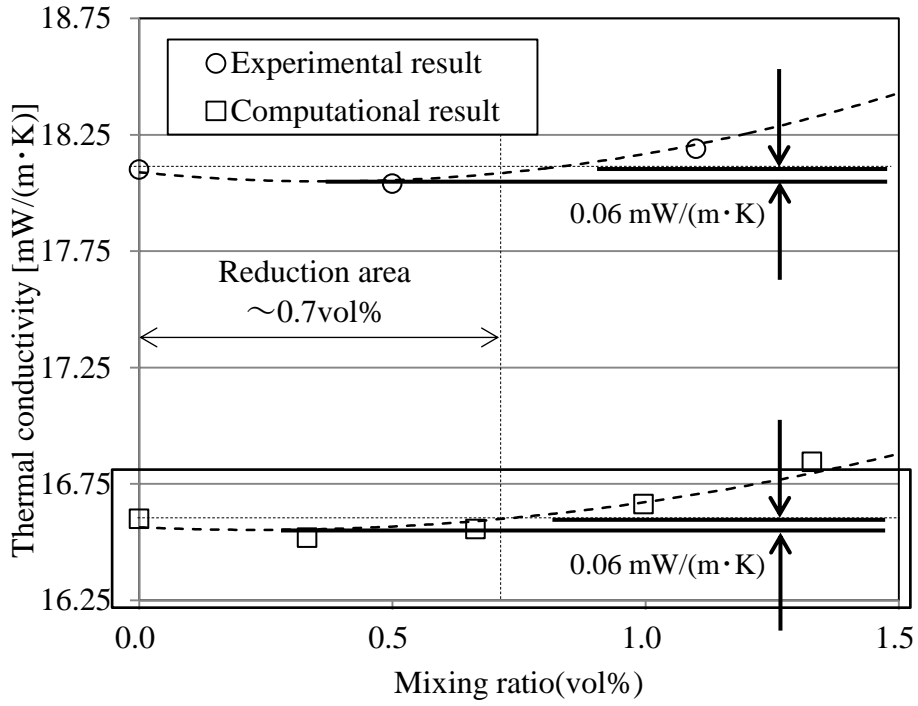


Fig. 4.13 Accuracy verification result

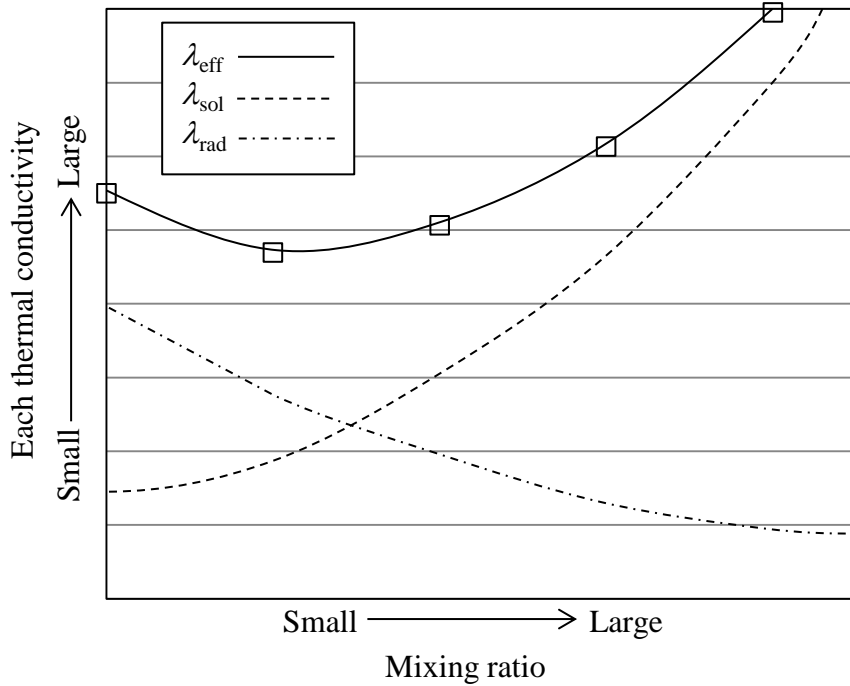


Fig. 4.14 Analyzing of combination of thermal conductivities

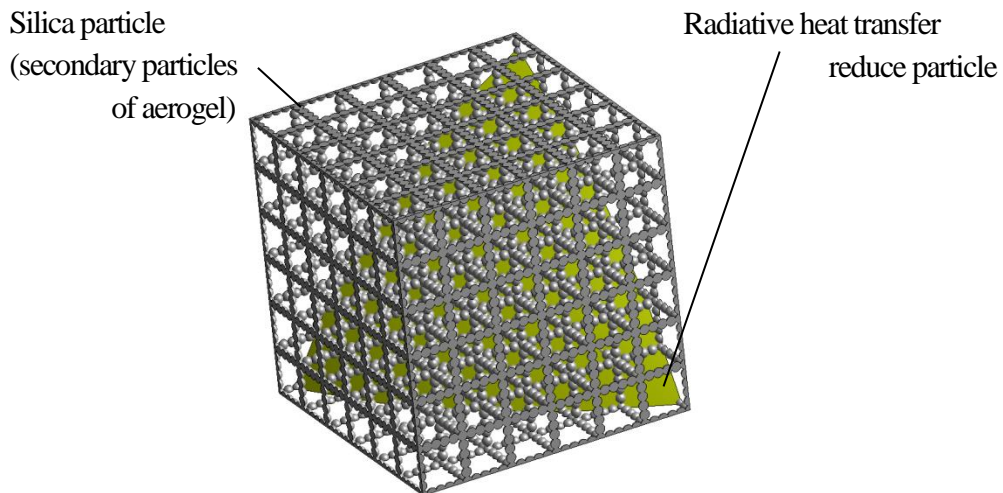


Fig. 4.15 Condition of radiative heat transfer reduce particle contained in silica aerogels

に、エアロゲルに比べ直径が 100 倍ほどある粒子を複合することにより、エアロゲルの表面積が相対的に小さくなり、 λ_{rad} が低下すると考えられる。図 4.15 は、直径 15 nm のシリカエアロゲルの二次粒子群（図 4.6 の詳細モデル）の中に、直径 1 μm の SiO_2 粒子（放射吸収材粒子）が含まれる状態を模式的に示したものであるが、例えば、図 4.8 に示した 1 辺 5.04 μm のサイズの“詳細”モデルがある場合、エアロゲルモデルの内表面積は 3621.0 μm^2 であるが、直径 1 μm の粒子モデルが 1 つずつ加えられるごとに 14.8 μm^2 ずつ内表面積が減少する。すなわち、シリカエアロゲル単体の状態に比べ、ふく射伝熱低減粒子が含まれることで、ふく射伝熱が盛んに行われるシリカエアロゲルの表面積が小さくなる。よって、ある粒子含有率までは、放射率の大きいシリカの表面でのふく射伝熱が低減され、有効熱伝導率が低減するものと考えられる。しかしながら、粒子を過剰に複合すれば、 λ_{sol} が大きくなり有効熱伝導率が上昇するものとする。本検証を通じ、実験・解析の両面で、ふく射伝熱低減粒子による有効熱伝導率の低減効果を確認できた。

4.4 有効熱伝導率低減効果検証

前述のモデル化手法を用い、各種ふく射伝熱低減粒子の含有率の違いによる有効熱伝導率低減領域を検証した。ここで検討したのは、ふく射伝熱低減粒子のうち、比較的放射率が小さく、放射反射材に分類される Al_2O_3 、 ZrO_2 と、比較的放射率が大きく、放射

吸収材に分類される SiC, SiO₂ と前述した TiO₂ の各粒子である. 各ふく射伝熱低減粒子の物性を表 4.6 に示す (TiO₂ の物性は表 4.3 に記載). 図 4.16 に示すように, 一般に, 放射反射材は, 粒子の表面でふく射ビームを跳ね返すことで, 物体内で熱に変わるふく射伝熱を抑える. 一方, 放射吸収材は, 粒子表面でふく射ビームを吸収して熱に変換し, 変換した熱の多くを全方位に再度ふく射ビームとして散乱することにより, ふく射ビームの半分を後方 (ふく射ビームの入射側) へ逃し, 前方へ熱を伝えるのを防ぐ働きをする. 各粒子の代表的な粒径は様々であるが, 本検証では材料ごとの特性の比較するため, 前述の TiO₂ 粒子に合わせ, 各粒子の粒径を 1 μm であるものと仮定しモデル化を行った. なお, SiO₂ 粒子は本研究の対象であるシリカエアロゲル不織布複合断熱材の主材と同一の材料であることに他ならないが, SiO₂ 粒子をふく射伝熱低減粒子として採用する断熱材も上市されており, エアロゲルを構成するナノオーダーの SiO₂ 粒子群にミクロンオーダーの粒子を混ぜることによる効果を検討するためにも評価対象に含めた.

Table 4.6 Thermal properties of radiative heat transfer reduce particles

Material	Thermal conductivity [W/(m·K)]	Emittance
SiC	200	0.8
Al ₂ O ₃	32	0.3
ZrO ₂	3	0.2
SiO ₂	1	0.9

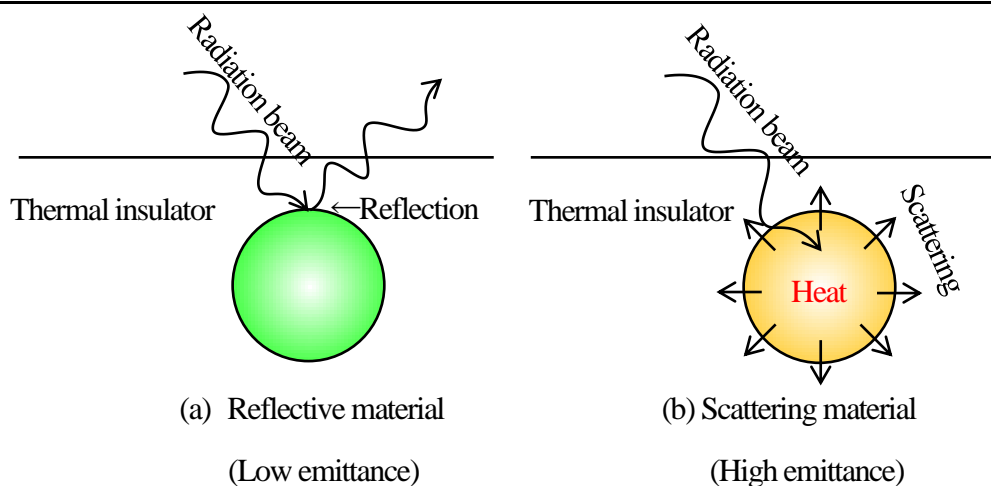


Fig. 4.16 The role of each of the radiative heat transfer reduce particle

上記 5 種の粒子を含有した断熱材の有効熱伝導率の計算結果を図 4.17 に示す。まず、ふく射伝熱低減粒子を含まないエアロゲルモデルの有効熱伝導率は、同図の配合比 0 のところに示す 16.64 mW/(m・K)である。これに対するふく射伝熱低減粒子の効果を比較したところ、5 種に関し、放射率に関わらず有効熱伝導率の低減が確認できた。また、断熱材の有効熱伝導率が低減する配合率（配合率 0.33 vol%にて最も低減）にほとんど差は見られなかった。また同図より、粒子の配合率が増すにつれ、有効熱伝導率が上昇する挙動も粒子間でほとんど差異が無い。しかしながら、この挙動に関しては、粒子の放射率、熱伝導率と断熱材の有効熱伝導率の関係性が見出せる。図 4.18 は、図 4.17 において、ふく射伝熱低減粒子の効果によりエアロゲルの有効熱伝導率が大きく低減する領域(A)を拡大したものである。同図では、縦軸の有効熱伝導率の順が粒子の放射率の大きさの順になっている（図 4.16 に示したふく射伝熱低減粒子の 2 つの役割と各粒子の放射率に合わせ、各粒子のプロットに色の変化をつけている）。すなわち、放射率が大きい方が有効熱伝導率をより低減できることがわかる。本検証では、放射率が最も大きい SiO₂ 粒子において、粒子を含まないときの有効熱伝導率に対し、約 0.07 mW/(m・K)の低減が確認できた。また、図 4.19 は、図 4.17 において熱伝導率が最も小さくなる部分から上昇

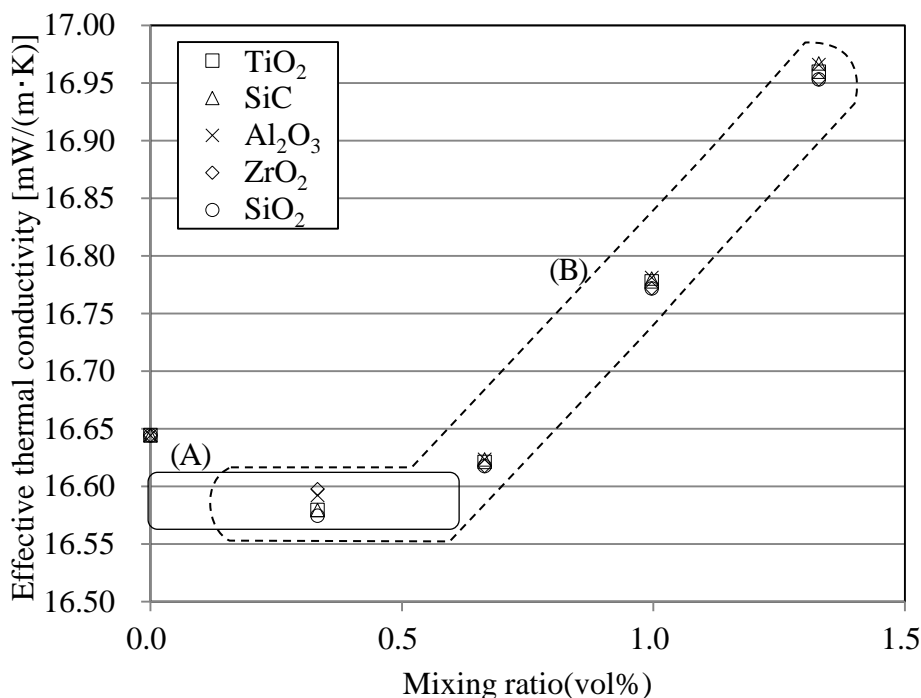


Fig. 4.17 Evaluation result about radiative heat transfer reduce particles

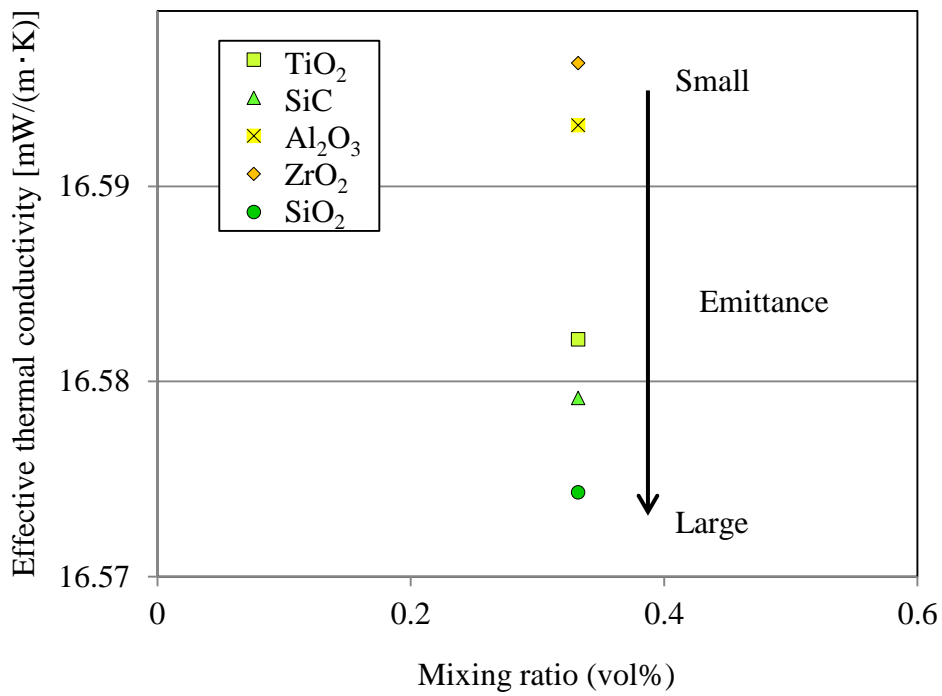


Fig. 4.18 Enlarged view of (A) in Fig.4.16

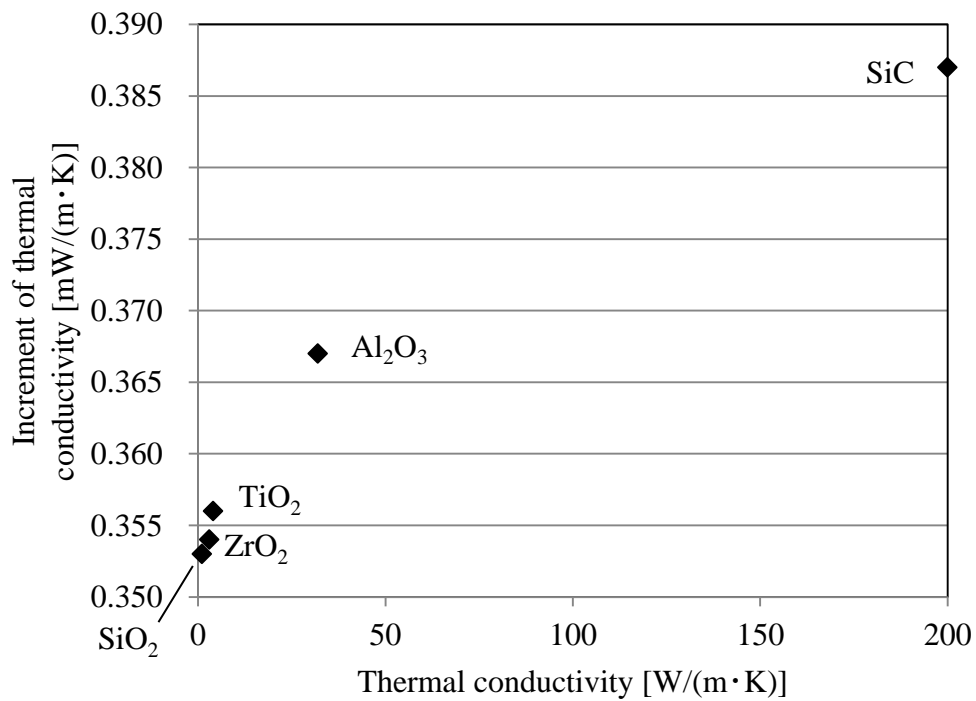


Fig. 4.19 Increment of (B) in Fig.4.16 and thermal conductivity of radiative heat transfer reduce particles

していく領域(B) (ふく射伝熱低減粒子の固体熱伝導の寄与が大きくなる領域)における、エアロゲルの有効熱伝導率上昇量を、粒子の熱伝導率を横軸にしてまとめたものであるが、粒子の熱伝導率が小さい方が、粒子を過剰に添加したときの有効熱伝導率の上昇量が小さい。以上の考察より、断熱材のふく射伝熱に関する有効熱伝導率の低減量を増すには、放射率の大きい粒子がよく、断熱材内部の粒子含有量の偏り等による配合ばらつきを考慮する必要がある（特に含有率が大きくなる箇所がある）場合は、断熱材の有効熱伝導率の上昇防止のために、熱伝導率の小さい粒子がよい（放射率が大きく熱伝導率が小さい粒子がよい）と考えられる。本研究で対象とした材料では SiO_2 粒子がこれにあてはまる。ここで、図4.17に示したふく射伝熱低減粒子の配合率0.33 vol%のときの ZrO_2 粒子と SiO_2 粒子の解析結果（温度コンター図）を図4.20に示す。図4.20(a),(b)は、それぞれ ZrO_2 粒子と SiO_2 粒子を複合した解析モデル全体の温度を示したものであるが、両図にてほとんど温度の差は無いように見える。しかしながら、同図(a),(b)に四角形状で示した中央平面で切断した断面のコンターを示す同図(c),(d)には、特に粒子部分近傍で差

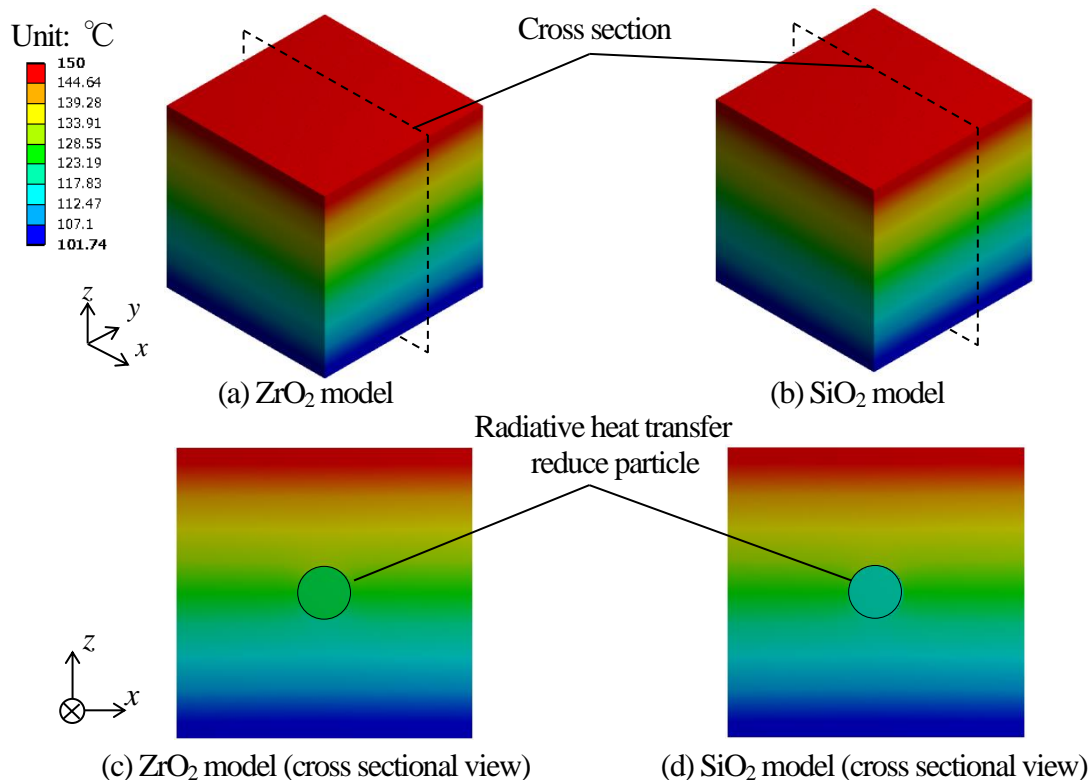


Fig. 4.20 Difference of temperature distribution between ZrO_2 model and SiO_2 model

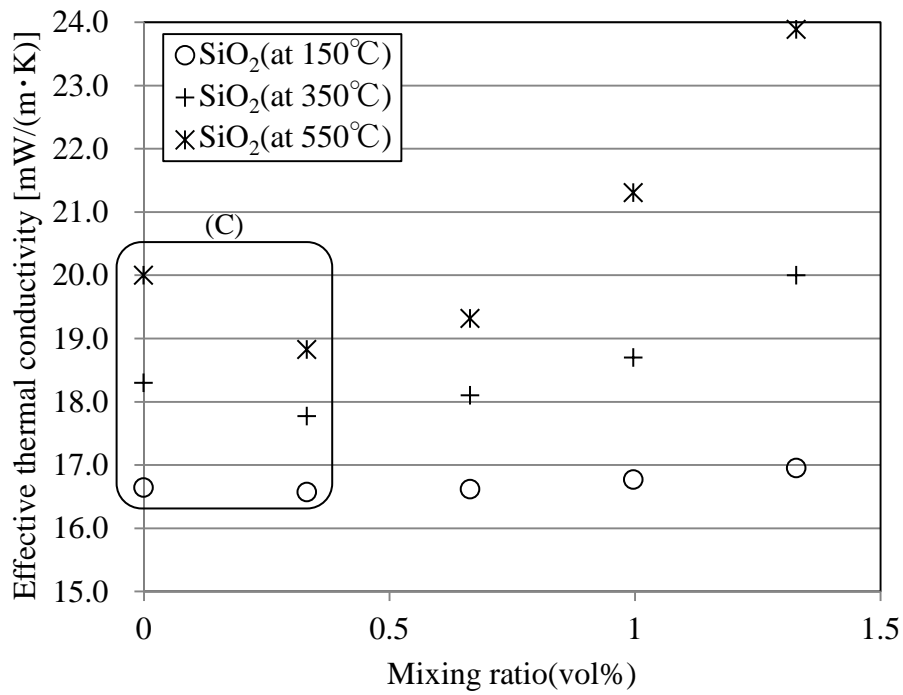


Fig. 4.21 Result of effective thermal conductivity at high temperature ranges

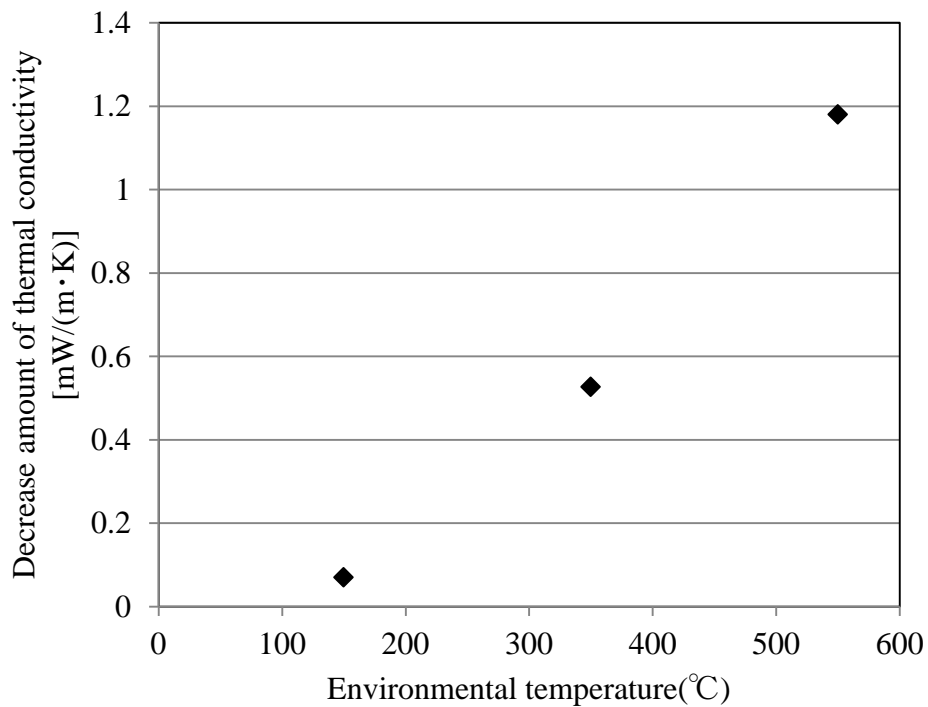


Fig. 4.22 Decrease amount of effective thermal conductivity [(C) on Fig. 4.20]

が確認できる。同図(b)に示す SiO₂粒子は、同図(a)に示す ZrO₂粒子より低い温度になっており、これが、ふく射伝熱を低減できた結果であると考えられる。こうした粒子近傍での温度の低減により、150°Cに温度固定をしている面と対する面の平均温度が低減され、有効熱伝導率に差が生まれる。

また、本断熱材の適用可能温度域(150°C)では、SiO₂粒子による有効熱伝導率の低減量は上記の通りであるが、より高い温度域で断熱材の使用が可能である場合、ふく射伝熱低減粒子による有効熱伝導率の低減効果は増すと考えられる。図 4.21 に示すのは、前述の解析モデルを用い、雰囲気温度を 150°Cから 350°C、550°Cまで変更して計算した SiO₂粒子の有効熱伝導率計算結果である。なお、雰囲気温度の変更に伴い、図 4.9 に示したモデル上面の温度固定値も変更した。図 4.22 は、図 4.21 の領域(C)に示したふく射伝熱低減粒子を含まない場合と、SiO₂粒子を 0.33 vol%含む場合の有効熱伝導率の低減量をプロットしたものである。ふく射伝熱の影響が大きいと考えられる 550°Cの高温域では、約 1.18 mW/(m・K)もの有効熱伝導率低減ができると考えられ、高温対応の断熱材に対してもふく射伝熱低減粒子の複合は有効であると考えられる。なお、本章にて検証した粒子の中では、SiO₂粒子が断熱材の有効熱伝導率低減に有効であると記したが、一般にこのようなサイズの微細な SiO₂粒子は一般的に高価である。よって、実際にふく射伝熱低減粒子を工業的に用いる場合には、コストパフォーマンス（費用対効果）を検討した上で、最も有効な粒子を選択することが望ましい。

4.5 結言

薄型不織布シリカエアロゲル複合断熱材の 150°C環境での有効熱伝導率低減を目的としたふく射伝熱低減粒子の材質、配合率を検討した。ふく射伝熱低減粒子の直径を 1 μm とした数値実験の結果から、有効熱伝導率低減には、粒子の適切な量の配合が重要であり、含有率が大きいときの有効熱伝導率の上昇を抑えるためには、放射率が大きく、熱伝導率が小さい粒子を用いることが有効であることを示唆した。また、この熱伝導率の低減効果は高温であるほど大きいため、本研究で検討したふく射伝熱低減粒子は、高温対応の断熱材に対しても有効熱伝導率の低減に有効であるものとする。これを、4.1 節の図 4.2 に示した設計フローにあてはめて考えると、同図 4.2(a)にて、ふく射伝熱低減

粒子としてにある材質（熱伝導率と放射率）と配合率を設定した熱伝導シミュレーションモデルを構築し、同図 4.2(b)の解析においてモデルの有効熱伝導率が現行比で 0.2%の低減量を上回らない場合[同図 4.2(c)の判定にて“**No**”となった場合]、同図 4.2(d)に移り、粒子の材質、配合率の再設計を行わなければならない。本章にて検証した複数の粒子に関しては、図 4.17 に示すように、ふく射伝熱低減粒子を含まないシリカエアロゲルのみ
の簡易モデル（現行構造）に対し、粒子を 0.33 vol%配合し有効熱伝導率が低減している部分においては、最も熱伝導率の低減量が小さい ZrO_2 であっても現行比 0.24%の熱伝導率
低減が確認できている。したがって、目標値である低減量 0.2%[図 4.2(c)の判定値]を上回っているため、断熱材の熱伝導率低減に寄与する粒子の材質・配合率の設計を完了することになる。このように、本章で検討したエアロゲルの簡易モデル化手法、ふく射伝熱を考慮した熱伝導シミュレーションを用いて、本提案フローを設計に活用することができる。

第5章 断熱材の設計と特性評価手法の適用検証

5.1 緒言

前章までにおいて、薄型エアロゲル不織布複合断熱材に対して、不織布骨格材の配向設計による剛性向上に関する評価手法の確立、熱伝導率測定方法の確立、高温時（150℃近傍）のふく射伝熱低減のための設計手法の確立を行ってきた。本章では、これまでの研究内容ならびに構築した断熱材を、配管パイプ用断熱材、車載機器用断熱材、住宅用断熱材のそれぞれの用途へ適用し、その効果について検証を行う。内容の詳細を以下に示す。

- (1) 配管パイプ用断熱材への適用検証を行い、骨格材である不織布の繊維配向分布と巻き付け後（施工後）の初期性能との関連について論じる。
- (2) 車載機器用断熱材への適用検証を行い、断熱材の有無によるエンジンユニットの小型化に対する効果について論じる。
- (3) 住宅用断熱材への適用検証を行い、住宅の省エネ性向上に対する効果について論じる。

次節以降にて、上記の3テーマに対する内容及び効果を記す。

5.2 配管パイプ用断熱材への適用検証

第2章において、薄型エアロゲル不織布複合断熱材の不織布の配向分布が、断熱材を配管パイプへ巻き付ける際の初期性能に影響することを示唆した。本節では、配向分布の異なる薄型エアロゲル不織布複合断熱材を、実際に配管パイプに巻き付け、その際に生じる初期性能への影響とそのメカニズムを実証により明確化するとともに、配管への適用時に検討すべき内容を明らかにする。第2章では、極端な一方向配向分布を持つ図2.11(a)記載のモデルAと、これを90°回転させた同図(e)記載のモデルEの自重によるたわみに関して剛性の比較を行った。また2.4節の考察にて、モデルAとEの配向を組み合わせた構造[図2.16(b)]により、剛性に関し方向性が小さい構造を明らかにした。

本節では、検証する対象として、モデルA、モデルEあるいはモデルAとEを組み合わせた不織布構造を実際に製造することが困難であるため、モデルAの代用として、あ

る程度一方向を主に配向している現行構造（図 2.13 のモデル B に相当）を，モデル E の代用として，現行構造を 90°回転したもの（図 2.13 のモデル D に相当）を，設計厚さ 1 mm の断熱材として準備した．また，図 2.18(b)に示した構造の代用には，それぞれ設計厚み 0.5 mm の現行構造，現行構造を 90°回転させた断熱材を重ね合わせ，およそ 1 mm の厚さにしたものを準備した．また，後の熱伝導率の評価のため，各サンプルは□120 mm 角にて作製した．対象とした 3 種のサンプルを以下にまとめる．

サンプル A：現行構造の配向をもつ断熱材（設計厚み 1.0 mm，□120 mm 角）

サンプル B：現行構造を 90°回転した断熱材（設計厚み 1.0 mm，□120 mm 角）

サンプル C：現行構造の配向をもつ断熱材（設計厚み 0.5 mm）と現行構造を 90°回転した断熱材（設計厚み 0.5 mm）を重ね合わせたもの（□120 mm 角）

第 3 章に示した熱伝導率測定方法により，上記 3 種のサンプルの熱伝導率を測定・算出したところ，それぞれ 0.0199 W/(m·K)，0.0195 W/(m·K)，0.0197 W/(m·K)であった．

検証方法として，図 5.1 に示すように，配管パイプに高温の流体が流れる状態を想定し，Cu 製のパイプにそれぞれの断熱材サンプルを巻き付け，巻き付け後（施工後）の断熱性能（表面温度と熱伝導率）の比較を行った．なお，図 5.2 に示すように，パイプ内

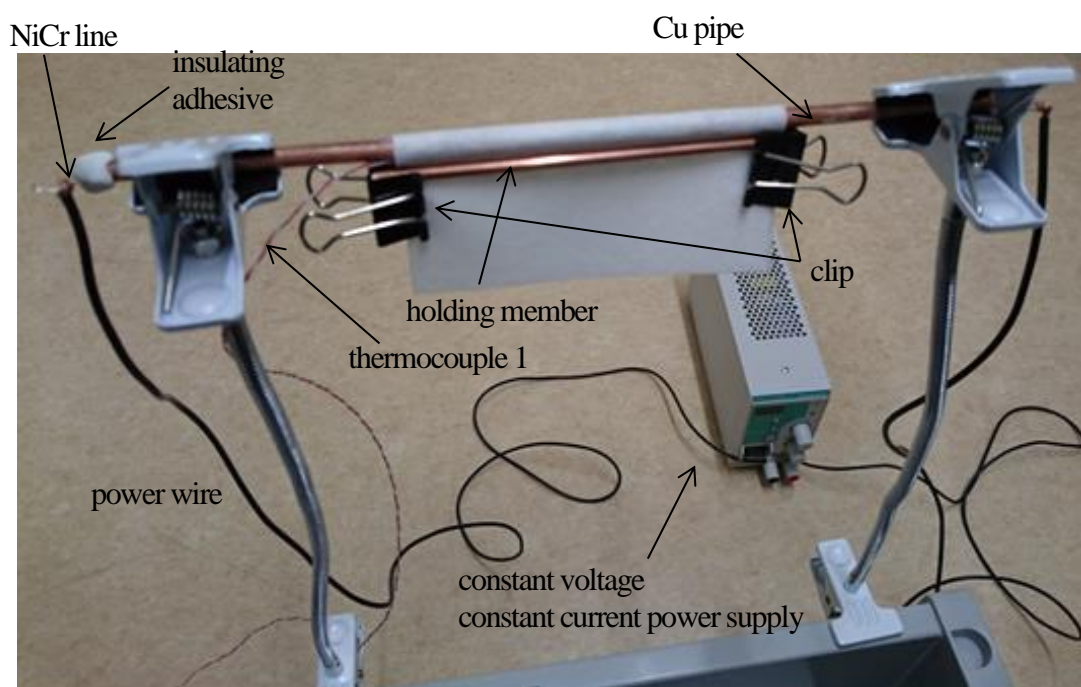


Fig. 5.1 Test equipment

の流体を想定した熱源として、Cu パイプの中にニクロム線を通し、パイプの表面に設置した熱電対(thermocouple 1)によりモニターされる温度がおよそ 90°Cになるよう、ニクロム線に流す電流・電圧を調整した。また、以降説明する断熱材の表面の温度を測定するため、同図 5.2 に示すように、パイプに巻き付けた断熱材の表面にも熱電対(thermocouple 2)を設置した。パイプ巻き付け時における 3 種のサンプルの構造と不織布の配向分布の位置関係を図 5.3 に示す。

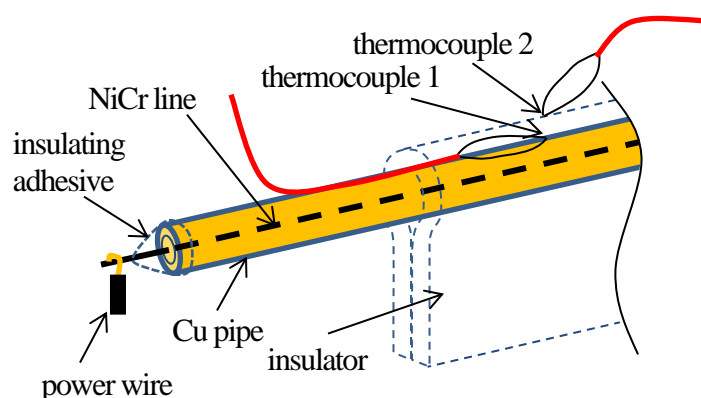


Fig. 5.2 Detail of test equipment

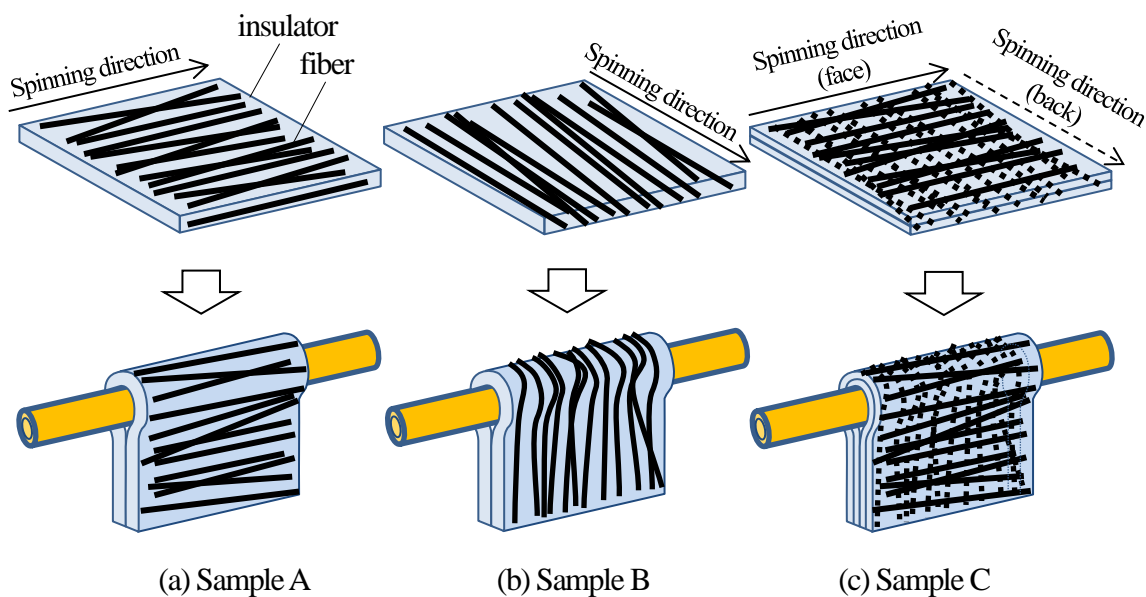


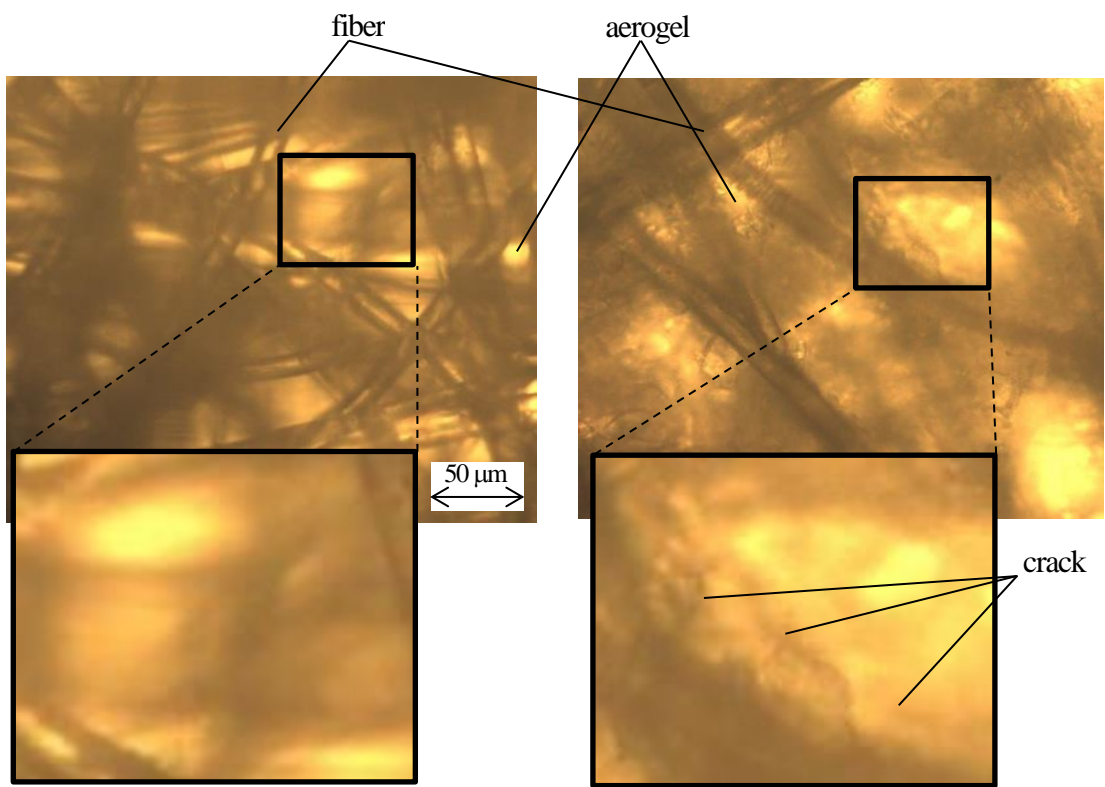
Fig. 5.3 Positional relationship of the fabric orientation in the insulator and the winding state

Table 5.1 Results of temperature measurement

	Sample A	Sample B	Sample C
Temp. of surface of pipe (°C)	90.1	89.9	90.0
Temp. of surface of insulator (°C)	79.7	83.2	81.1
ΔT (°C)	10.4	6.7	8.9

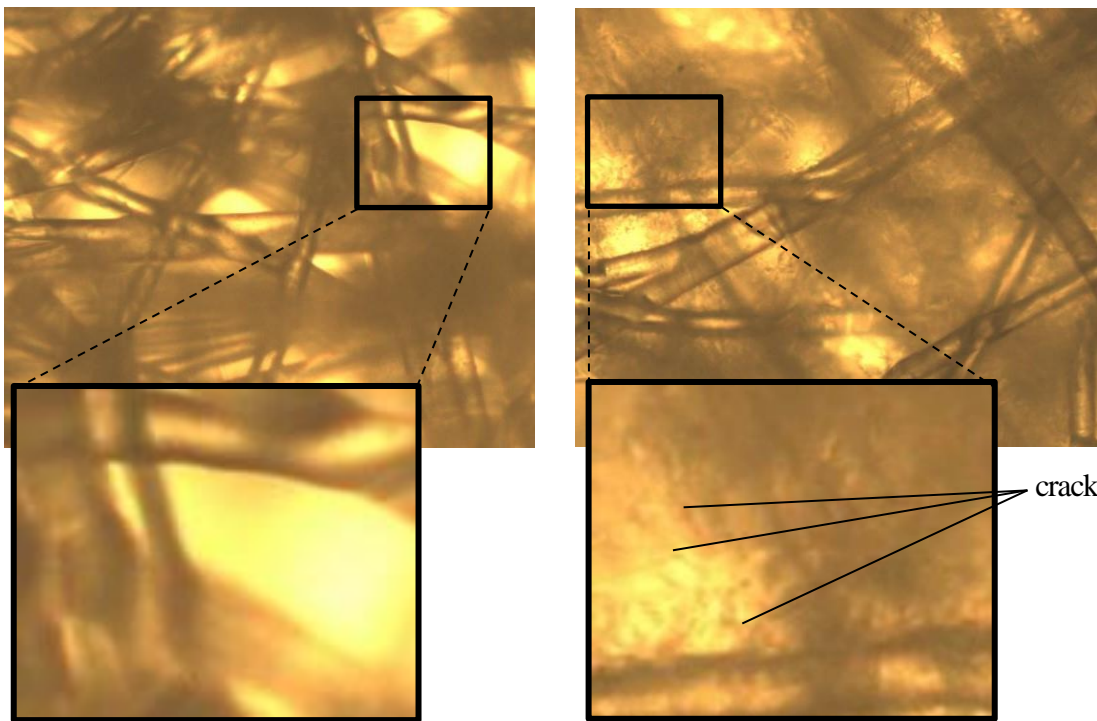
3種のサンプルについて、パイプ表面温度(thermocouple 1)と断熱材の表面温度(thermocouple 2)を計測したところ、それぞれのサンプルにおいて温度の違いが見られた。3種のサンプルにおけるパイプ表面温度とサンプル上面温度、両者の温度差を表 5.1 にまとめる。

表 5.1 より、サンプル A の表面温度差に比べ、サンプル B は温度差が小さい。また、サンプル C はサンプル A に比べ温度差は小さいが、サンプル B ほど小さくはない。これは、それぞれのサンプルにおいて何らかの理由により断熱性に差が出たものであると考える。そこでパイプからサンプルを取り外し、それぞれパイプに巻き付けた部分を顕微鏡（オリンパス（株）製工業検査用顕微鏡 MX51）にて観察した。なお、サンプル C については、断熱材の表と裏で不織布配向が異なるため、表面と裏面に対しそれぞれ観察した。図 5.4 に観察した写真を示す。図中の繊維状の部分は不織布繊維、光っている部分は顕微鏡の光源の光が漏れているエアロゲル部である。図 5.4(b),(d)より、サンプル B とサンプル C の裏面側には、エアロゲル部に全体的にクラックが入っていることが確認できる。すなわち、パイプ巻き付け時には、図 5.5(b)に示すようにサンプル B のエアロゲルには全体的に、同図(c)に示すようにサンプル C には裏面側の断熱材のエアロゲルのみにクラックが入っていることになる。これは、図 5.6(b)に示すように、パイプへ巻き付ける方向が不織布繊維の配向の主方向と一致しており、パイプへの巻き付け部分にて、剛性の大きい不織布繊維が、脆弱なエアロゲルを押し上げて破壊しているものと推察される。一方、サンプル A とサンプル C の表面側は、図 5.6(a)に示すように、パイプへの巻き付け方向と不織布繊維の配向の主方向が直交しており、繊維とパイプの向きが一致しているため、繊維がエアロゲルの変形を阻害することがないと考えられる。クラックが生じたことによる断熱性の変化（悪化）は、その内部に空気の動き（分子の振動に



(a) Sample A

(b) Sample B



(c) Sample C (face)

(d) Sample C (back)

Fig. 5.4 Stereomicroscope view of thin aerogel non-woven composite insulator

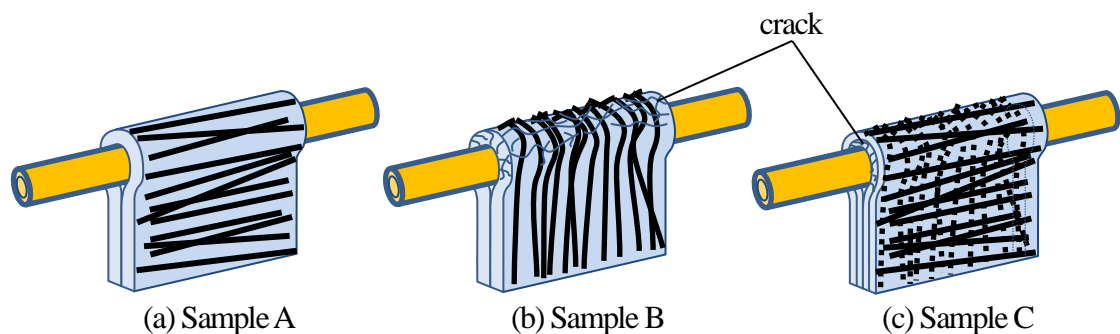
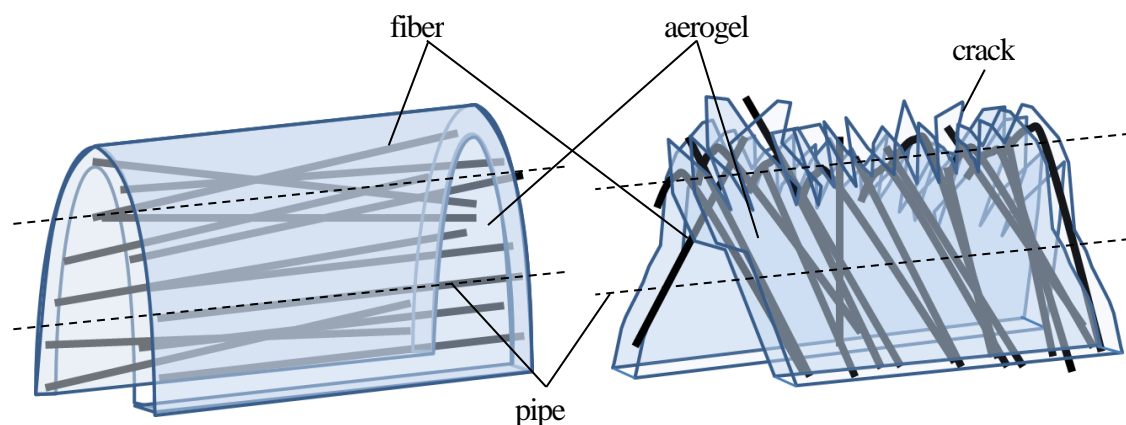


Fig. 5.5 Distribution of cracks in aerogel



(a) Winding and orientation direction is orthogonal (b) Winding and orientation direction is same

Fig. 5.6 Mechanism of occurrence of cracks

Table 5.2 Changes in thermal conductivity before and after construction

	Sample A	Sample B	Sample C
Before [W/(m·K)]	0.0199	0.0197	0.0195
↓	↓	↓	↓
After [W/(m·K)]	0.0201	0.0238	0.0209
Difference [W/(m·K)]	+0.0002	+0.0041	+0.0014

よる伝熱)がほとんどないエアロゲルの微細なポーラス構造がクラックにより分断され、クラック部分に空気が入り込んで、対流による伝熱が生じたからであると考えられる。

こうしたパイプ巻き付け後の状態の違いにより、3種のサンプルにどの程度断熱性の差が生じたかを確認するため、パイプから外した後のサンプルに対し、第3章に示した方法を用い熱伝導率の評価を行った。前述のパイプ巻き付け前のサンプルの熱伝導率の

値と併せて、表 5.2 にまとめる。サンプル A は、パイプ巻き付け前の熱伝導率とほとんど変化していないのに対し、サンプル B は大きく上昇している。また、サンプル C もサンプル A に比べ、熱伝導率が上昇しているもののサンプル B に比べ上昇量は非常に小さい。これは、サンプル B は構造全体にクラックが入っているため、断熱材の上面から下面まで空気の対流が生じやすいが、サンプル C は上部半分のエアロゲルにクラックが入っていないため、上部では空気の流れを遮断できているからであると考えられる。

上記の結果より、熱伝導率（断熱性）の観点からは、パイプ巻き付け材としてサンプル A の構造が最も適しているように思われる。しかしながら、第 2 章に示したように、剛性の観点から考えれば、サンプル A の不織布は、パイプと平行な方向への配向が主であり、パイプの巻き付け方向への配向が少なく、シリカエアロゲルが力を受け持つ巻き付け方向は非常に脆弱である。こうした巻き付け方向の脆弱性は、パイプの温度サイクル時に、巻き付け方向に応力（繰り返し熱応力）が加わることによって、エアロゲルの破壊を導いてしまうことも考えられる。したがって、第 2 章にて提案し、本節においてサンプル C として評価した配向のものは、パイプ巻き付け後の熱伝導率の上昇も大きくなく、パイプと平行な方向、垂直な方向（巻き付け方向）のいずれにも剛性を確保できる構造であり、こうした配管用の断熱材として有効な構造であると考えられる。エアロゲル不織布複合断熱材内の不織布骨格材の配向を設計することは、本節で示した配管用以外の各種断熱用途に対しても、必要不可欠な設計項目であると考えられる。

5.3 車載機器用断熱材への適用検証

近年、自動車の電子化が進み、ECU(Engine Control Unit)等の電子機器が、高温であるエンジンルームの近傍に配置されるケースが増えてきている。薄型エアロゲル不織布複合断熱材は、こうしたエンジンルームの熱から車載電子機器を保護できる断熱材としても期待がなされている。本節では、本研究にて開発した断熱材の車載機器への適用効果を、エンジンルームと車載電子機器内の回路基板を模擬した熱流体解析モデルにて検証する。

評価対象として、図 5.7(a), (b)に示すエンジンルームの直上に電子回路基板が設置されているものを仮定したモデルを作成した。エンジンは湾曲した形状のアルミニウム製

のケーシングの中に収まっており、同図(c)に示すエンジンを見立てた温度 150°Cの発熱体が収まっている。電子回路基板はこのケーシングの直上 10 mm の位置にあり、エンジンルームからの熱を直接授受する構造である。図 5.7(a)は、断熱材がないモデル 1 であり、同図(b)は、ケーシングに 1 mm 厚の薄型エアロゲル不織布複合断熱材(Insulator 1)を被せたモデル 2 と、ふく射伝熱低減粒子(SiO₂粒子)を薄型エアロゲル不織布複合断熱材に含有させたもの(Insulator 2)を被せたモデル 3 の構造を示したものである。こうした 150°C近傍の温度域では、ウレタンフォーム系の断熱材は耐熱性が及ばず使用することができない。また、ヒュームドシリカ等を主とする耐熱性のあるセラミックボード系断熱材であっても、こうした狭小で湾曲した形状のところに適用することは困難である。ここでは、断熱材がないモデル 1 に対し、断熱材を配したモデル 2、モデル 3 では、電子回路基板の温度にどの程度の差が出るかを熱流体解析により求める。なお、計算には STREAM V12 を用いた。表 5.3 に解析に用いた材料物性値を示す。薄型エアロゲル不織布複合断熱材(Insulator 1)の熱伝導率については、第 4 章の図 4.17 に示した 150°Cにおける

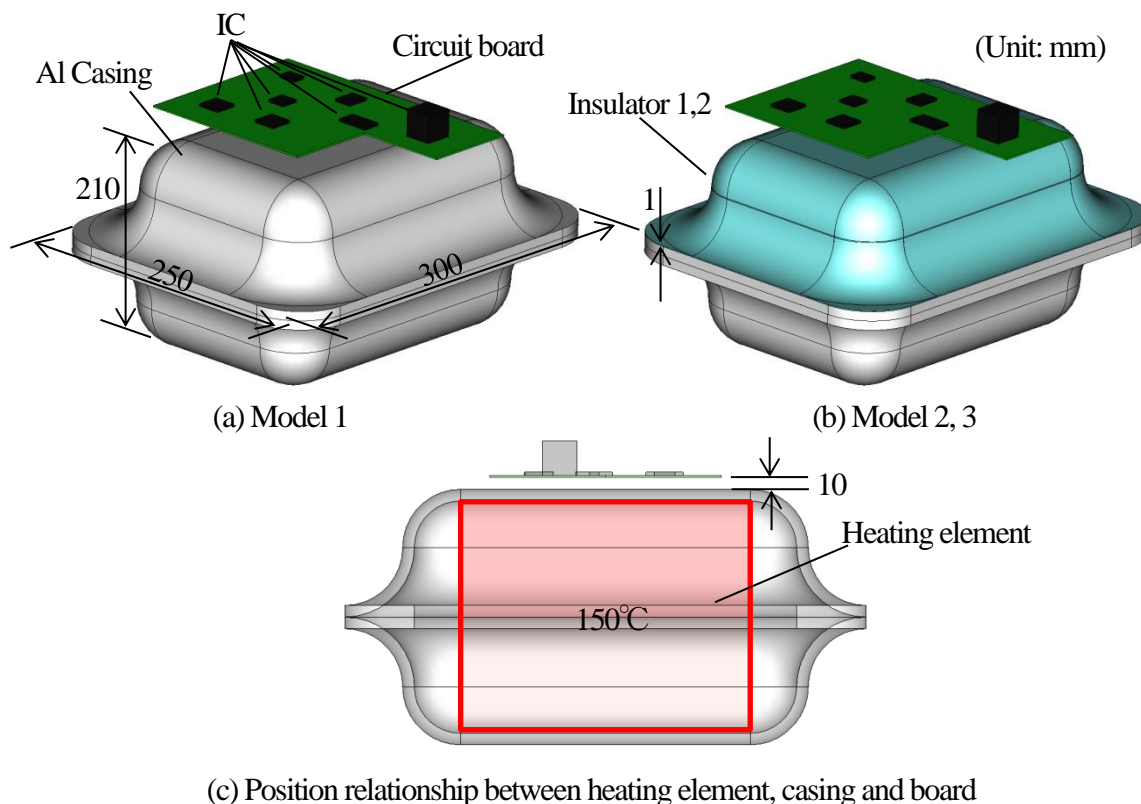


Fig. 5.7 Object of analysis of engine room

Table 5.3 Mechanical properties

Part	Material	Thermal conductivity [W/(m·K)]
Casing	ADC12	96
Circuit board	Glass-epoxy board & Cu wiring	0.3
IC	Molded resin & Cu lead flame	50
Insulator 1	Aerogel non-woven composite insulator	0.01814
Insulator 2	Aerogel non-woven composite insulator (with SiO ₂ particles)	0.01808

るふく射伝熱低減粒子を含まないエアロゲルモデルの熱伝導率が 16.64 mW/(m·K)であり、同章の図 4.13 に示した、不織布を含む実構造の実測結果とエアロゲルモデルの解析結果の差が約 1.5 mW/(m·K)であることから、両者を足した 18.14 mW/(m·K)とした。また、ふく射伝熱低減粒子(SiO₂)を含む断熱材(Insulator 2)の熱伝導率については、第 4 章の図 4.13 において、粒子配合率 0.33 vol%の時のエアロゲルモデルの熱伝導率低減量が 0.06 mW/(m·K)であることから、Insulator 1 の熱伝導率からこの低減分を差し引いた 18.08 mW/(m·K)とした。図 5.8 にエンジンユニットの温度コンター図を示す。断熱材が被覆されているモデル 2，モデル 3 より、断熱材を設けていないモデル 1 の方が、電子基板の温度が高くなっている。図 5.9 は基板部を拡大した温度コンター図である。基板表面の最高温度は、断熱材を設けていないモデル 1 が 69.5℃であったのに対し、薄型シリカエアロゲル不織布複合断熱材を被覆したモデル 2 は 64.8℃，さらに SiO₂粒子を含有させ

Table 5.4 Comparison among results of thermal simulation of 3 models

Constitution	Max. Temp. of board (°C)	Difference
Model 1 Non-insulator	69.5	
Model 2 Aerogel non-woven composite insulator	64.8	-6.7%
Model 3 Aerogel non-woven composite insulator (with SiO ₂ particles)	64.1	-7.7%

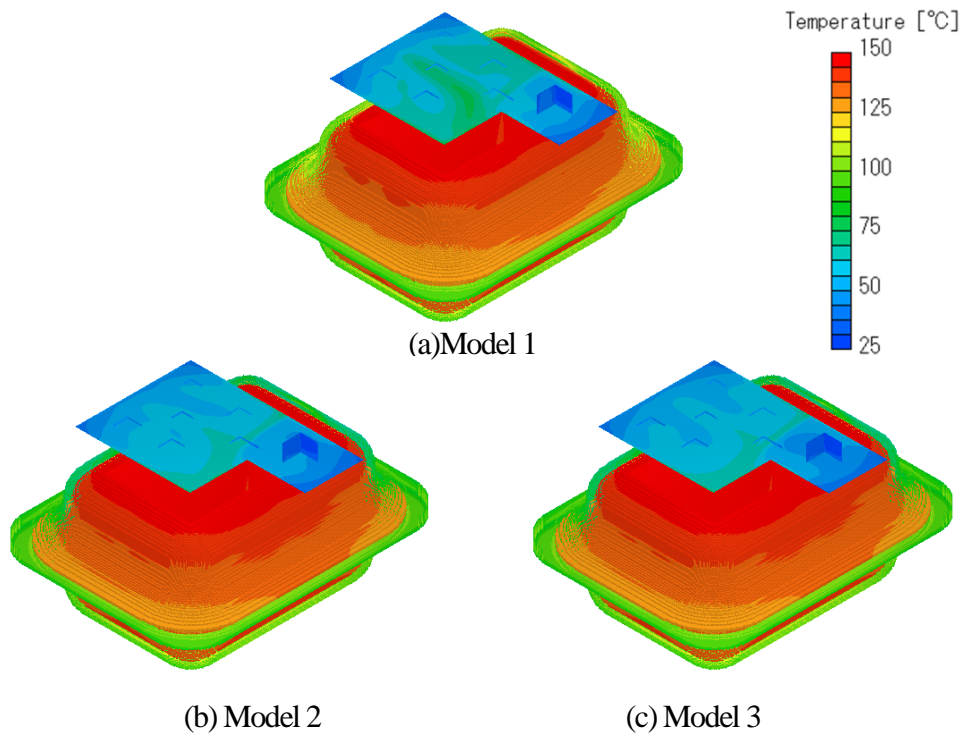


Fig. 5.8 Contour diagram of temperature distribution(engine unit)

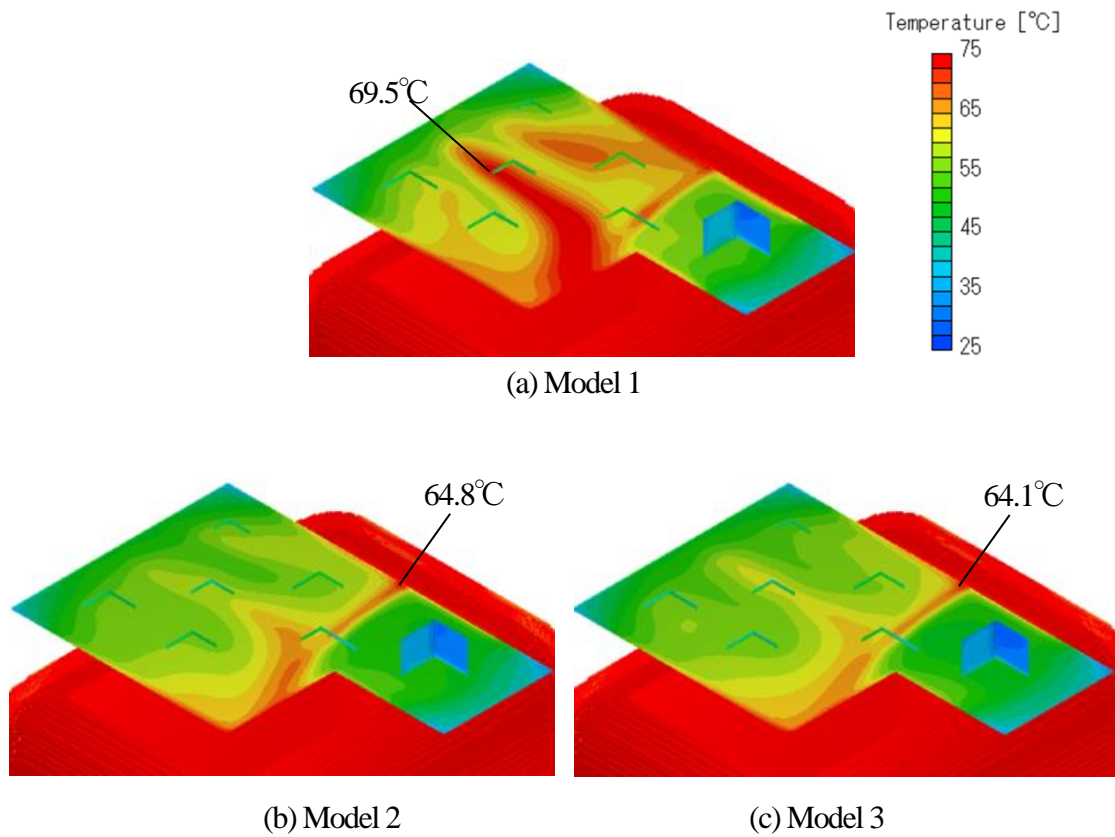


Fig. 5.9 Contour diagram of temperature distribution (circuit board)

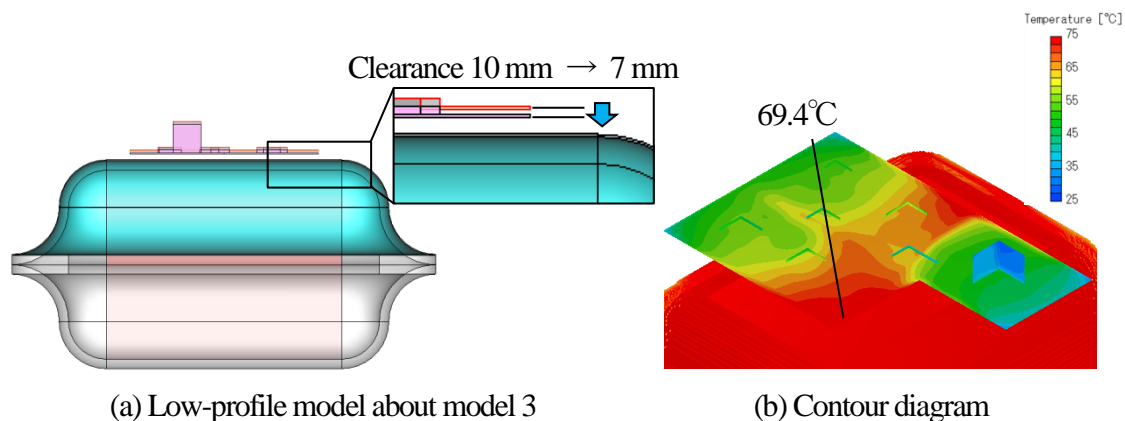


Fig. 5.10 Result of thermal simulation of low-profile model about model 3

た断熱材を被覆したモデル3は64.1°Cであった。解析結果のまとめを表5.4に示す。断熱材を設けていない従来の構成のモデル1に対し、薄型シリカエアロゲル不織布複合断熱材を被覆したモデル2では6.7%、 SiO_2 粒子を含有させた断熱材を被覆したモデル3では7.7%、基板の表面温度が低減できている。こうした基板温度の低減は、電子基板とエンジンルームをより接近させることができる自由度を生み、エンジンユニットの小型化につながるとともにIC部品の耐熱レベルを下げてコストダウンができるなど、複数の効果が期待できる。例えば図5.10は、モデル3（ SiO_2 粒子を含む薄型エアロゲル不織布複合断熱材を適用）の電子基板とエンジンルームの隙間を3mm近づけた（隙間10mmを7mmにした）モデルの解析結果であるが、基板の表面温度の最大値は、図5.9に示したモデル1の結果と同等の温度になっている。すなわち、モデル3の断熱材を適用することで、3mm分、エンジンユニットの小型化（低背化）ができるようになる。このように、本研究で取り組んだ薄型エアロゲル不織布複合断熱材により、エンジンユニットの設計自由度を確保することができ、第4章にて取り組んだ SiO_2 などのふく射伝熱低減粒子によって、この自由度をさらに大きくできるものとする。

5.4 住宅の断熱性能向上に向けての適用検証

住宅などの建物の断熱性を高めることは、第1章に示した地球環境の保護のための最重要テーマの一つであり、断熱材が担う使命の一つでもある。近年は、ZEH(Zero Emission House)[77][78]といった、住宅の断熱性と省エネ、蓄エネ、創エネの各機器を組み合わせ

て住宅のエネルギー収支をゼロにする政策の推進が国家レベルでなされており、今後も住宅の高断熱化は、継続的に取り組まれていく。シリカエアロゲル不織布複合断熱材は、こうした住宅の断熱性向上に対しても期待がなされている材料である。本節では、本研究で取り組んだ断熱材を住宅の断熱材として適用する場合を想定し、断熱性能の向上効果を検証する。特に、住宅の壁材の断熱材として現在の主流である硬質ウレタンフォームを、シリカエアロゲル不織布複合断熱材に置き換えた場合、さらに、第4章にて検証したふく射伝熱低減粒子を配合した断熱材に置き換えた場合の断熱性能の比較を行う。

住宅における、特に夏場の断熱性能を比較するため、まずは、真夏時に壁材が達すると言われている温度70°Cまでのシリカエアロゲル不織布複合断熱材の熱伝導率を測定した。測定に用いたサンプルは、以下の2種である。

サンプル1：設計厚み1 mmのシリカエアロゲル不織布複合断熱材（□ 120 mm）

サンプル2：作製時にふく射伝熱低減粒子TiO₂(平均粒径1 μm)を0.33 vol%配合した設計厚み1 mmのシリカエアロゲル不織布複合断熱材（□ 120 mm）

なお、サンプル2における粒子の配合率0.33 vol%は、第4章に示した検証（図4.14）において、断熱材の有効熱伝導率が最も低減した配合率である。

これらのサンプルに対し、第3章に示した熱伝導率測定手法を適用し、高温時の断熱材の特性を評価する。サンプル温度を30°Cから10°Cずつ、70°Cまで上げ、それぞれの温度帯で測定した。それぞれのサンプルについて3回測定した結果を、横軸を温度、縦軸を熱伝導率として図5.11に整理する。

図中、点線で示しているものはそれぞれ、ふく射伝熱低減粒子を含まないサンプルとふく射伝熱低減粒子(TiO₂)を含むサンプルの各温度での測定値の平均値を直線をつないだものである。両サンプルの測定値（平均値）を比較すると、30°Cから70°Cにかけて、両者の差は開く傾向にある。これは、高温時では、断熱材内部の伝熱形態において、ふく射伝熱の占める割合が大きくなるため、ふく射伝熱低減粒子の有効熱伝導率上昇の抑制効果がより大きく発揮されるためであると考えられる。同図5.11に示すとおり、70°Cにおける両サンプルの平均値の差は、1.2 mW/(m・K)であり、この値がふく射伝熱低減粒子(TiO₂)による有効熱伝導率上昇の抑制効果であるといえる。これより本節にて行う検証において、70°Cにおけるエアロゲル不織布複合断熱材の熱伝導率を0.0223 W/(m・K)、

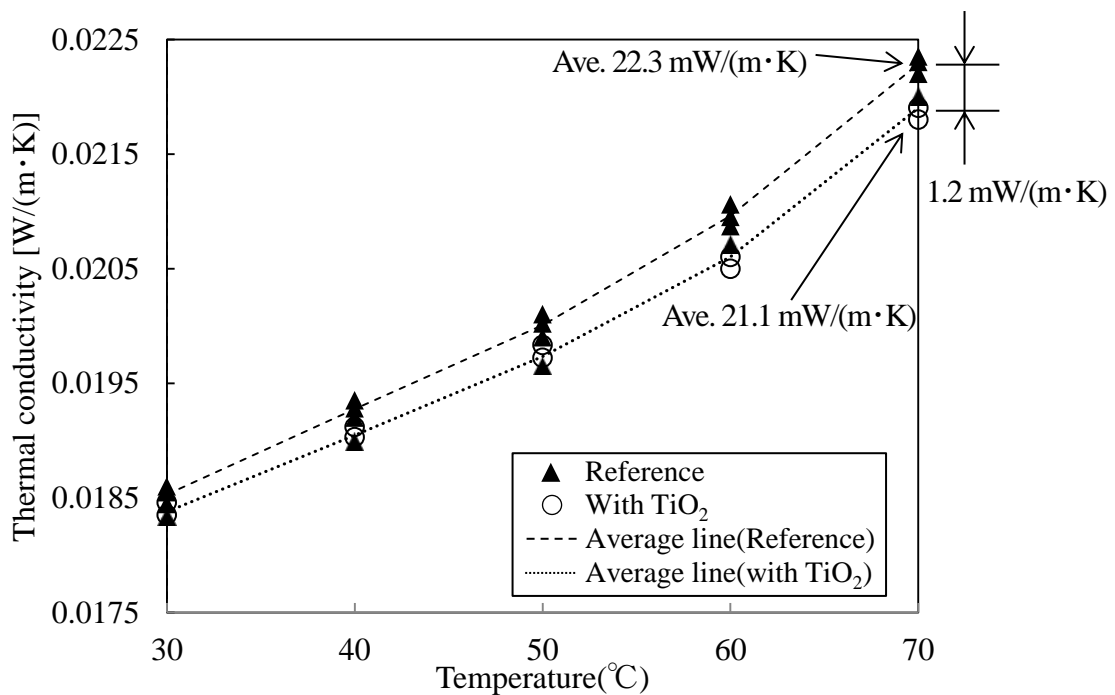


Fig.5.11 Results of thermal conductivity with and without TiO₂

断熱材にふく射伝熱低減粒子(TiO₂)を配合したものの熱伝導率を 0.0211 W/(m·K)とする。また、比較対象とするウレタンフォームの 70°Cにおける熱伝導率は、文献[79]より 0.032 W/(m·K)とする。

住宅の断熱性能の評価指標の一つとして、外皮熱貫流量 Q_{all} を計算する方法がある[80]。外皮熱貫流量は、屋根や外壁など、いわゆる屋外に接する建物の外皮を介して室内から屋外へ流出する熱流量のことで、(5-1)式によって求められる。

$$Q_{all} = Q_R + Q_C + Q_{Wa} + Q_{Wi} + Q_D + Q_F \quad (5-1)$$

ここで、それぞれ Q_R は屋根、 Q_C は天井、 Q_{Wa} は外壁、 Q_{Wi} は窓、 Q_D は扉、 Q_F は床の熱貫流量を示す。また、屋根、天井、外壁、窓、扉、床の熱貫流率をそれぞれ U_R , U_C , U_{Wa} , U_{Wi} , U_D , U_F , 面積をそれぞれ A_R , A_C , A_{Wa} , A_{Wi} , A_D , A_F とすると、各部位の外皮熱貫流量は、

$$Q_R = U_R \cdot A_R \quad (5-2)$$

$$Q_C = U_C \cdot A_C \quad (5-3)$$

$$Q_{Wa} = U_{Wa} \cdot A_{Wa} \quad (5-4)$$

$$Q_{Wi} = U_{Wi} \cdot A_{Wi} \quad (5-5)$$

$$Q_D = U_D \cdot A_D \quad (5-6)$$

$$Q_F = U_F \cdot A_F \quad (5-7)$$

と表される。さらに、本節にて対象とする“外壁”の熱貫流率は、外壁を図 5.12 に示すように、石膏ボードと断熱材（硬質ウレタンフォームあるいはシリカエアロゲル不織布複合断熱材）で構成されると仮定すれば、(5-8)式にて表される。

$$U_{wa} = \frac{1}{R_i + \frac{t_g}{\lambda_g} + \frac{t_a}{\lambda_a} + R_o} \quad (5-8)$$

ここで、 R_i は室内側表面熱伝達抵抗、 R_o は外気側表面熱伝達抵抗、 λ_g 、 λ_a はそれぞれ石膏ボード、断熱材の熱伝導率、 t_g 、 t_a はそれぞれ石膏ボード、断熱材の厚さである。本節では、検証の対象として、文献[81]に記載の住宅（図 5.13）を考える。本住宅の屋根、天井、壁、窓、ドア、床のそれぞれの占有面積は表 5.5 に示すとおりである。各部の熱貫流率については、文献[82]に示されるデータを適用した。同表に併記する。

住宅の各部の熱貫流量は(5-2)～(5-7)式にて計算できる。このうち、壁材を図 5.14 に示す構成とし、70°Cの環境において、硬質ウレタンフォームを用いた場合、エアロゲル不織布複合断熱材を用いた場合、これにふく射伝熱低減粒子を配合した断熱材を用いた場合のそれぞれの熱貫流量を求めれば、(5-8)式にしたがって、それぞれ次式(5-9)～(5-11)のようになる。

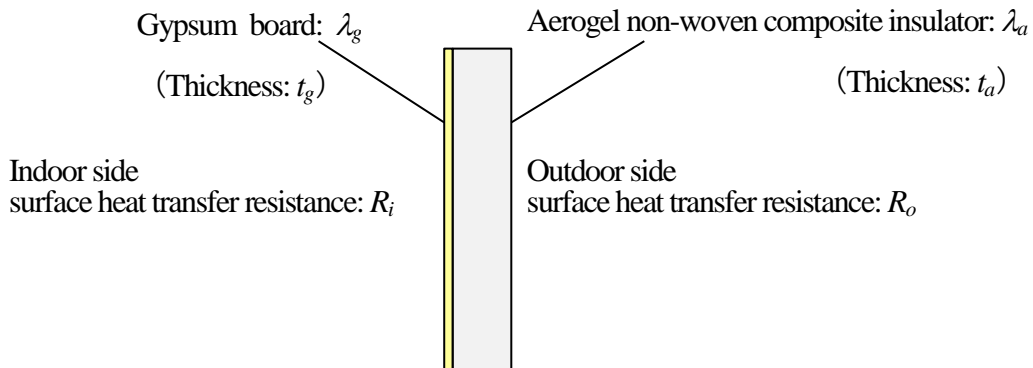


Fig.5.12 Settings of wall condition

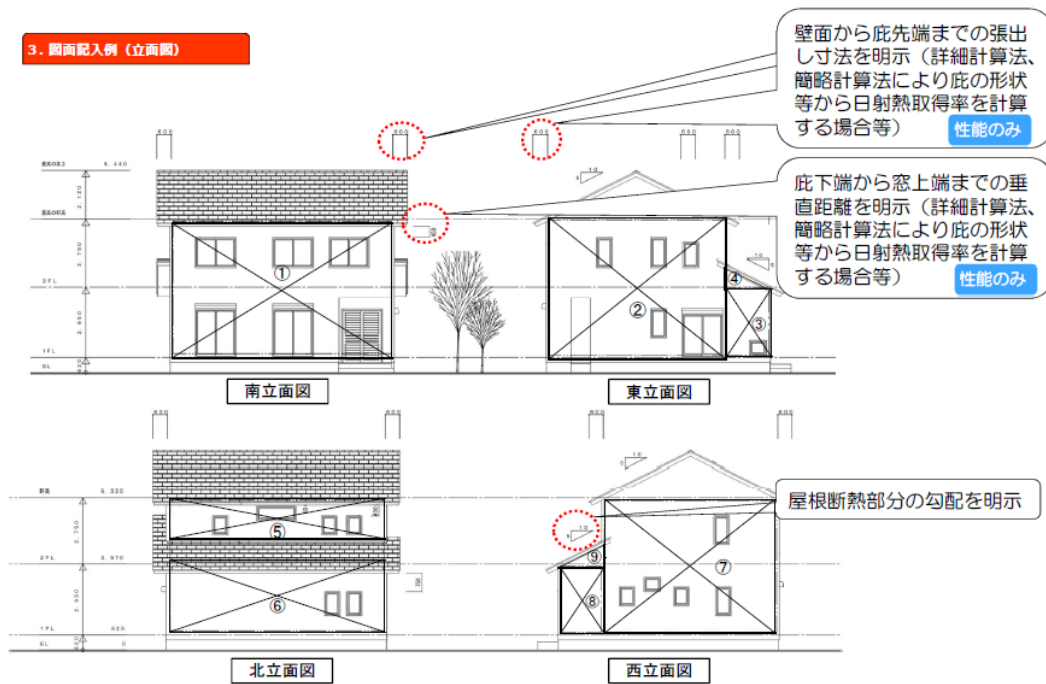


Fig. 5.13 Example of targeted housing

Table 5.5 List of area and U value of several parts in housing

Location	Area(m ²)	U value [W/(m ² ·K)]
Roof	18.5163	0.434
Ceiling	66.2480	0.450
Wall	160.4338	Otherwise stated
Window	17.0554	6.51
Door	1.8900	2.91
Floor	75.9395	0.5
Total	346.9535	—

$$U_{Wa(Urethane)} = \frac{1}{R_i + \frac{t_g}{\lambda_g} + \frac{t_a}{\lambda_a} + R_o} = 0.325805 \text{ (W / m}^2\text{K)} \quad (5-9)$$

$$U_{Wa(Insulator)} = \frac{1}{R_i + \frac{t_g}{\lambda_g} + \frac{t_a}{\lambda_a} + R_o} = 0.232993 (\text{W} / \text{m}^2 \text{K}) \quad (5-10)$$

$$U_{Wa(InsulatorwithTiO_2)} = \frac{1}{R_i + \frac{t_g}{\lambda_g} + \frac{t_a}{\lambda_a} + R_o} = 0.221071 (\text{W} / \text{m}^2 \text{K}) \quad (5-11)$$

ここで、真夏に壁材が 70°C に熱せられ、室内の温度を外気より 5°C 低く保つよう空調機器の設定を行った場合の、断熱材中のふく射伝熱低減粒子の有無による住宅からの CO₂ 排出量の差を求める。

まず、壁材の断熱材が、硬質ウレタンフォームで構成される場合、エアロゲル不織布複合断熱材で構成される場合、これにふく射伝熱低減粒子を含んだ断熱材で構成される場合の住宅全体の熱貫流量をそれぞれ表 5.6, 表 5.7, 表 5.8 にまとめる。ウレタンフォームで構成される場合の熱貫流率は 244.6 W/K, エアロゲル不織布複合断熱材で構成される場合は 229.7 W/K, これにふく射伝熱低減粒子を含んだ断熱材で構成される場合は 227.8 W/K である。ここで真夏を想定し、年 4 ヶ月間(120 日)、壁材が 70°C の外気に晒されると仮定すると、室内の温度を室外より 5°C 低く保つためには、室外から室内に侵入する熱量は、硬質ウレタンフォームの場合を $Q_{Urethane}$, エアロゲル不織布複合断熱材の場合を $Q_{Insulator}$, これに TiO₂ 粒子を配合したものを $Q_{Insulator\ with\ TiO_2}$ と置くと、それぞれ、

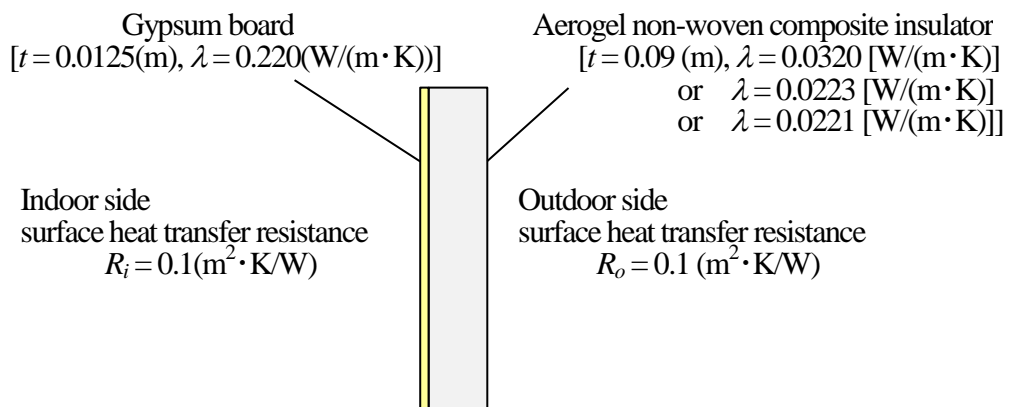


Fig. 5.14 Settings of wall condition

Table 5.6 Calculation of heat transmission amount (Urethane foam)

Location	Area (m ²)	<i>U</i> value [W/(m ² ·K)]	Heat transmission (W/K)
Roof	18.5163	0.434	8.04
Ceiling	66.2480	0.450	29.81
Wall	160.4338	0.325805	52.27
Window	17.0554	6.51	111.03
Door	1.8900	2.91	5.50
Floor	75.9395	0.5	37.97
Total	—	—	244.62

Table 5.7 Calculation of heat transmission amount (Proposal insulator)

Location	Area (m ²)	<i>U</i> value [W/(m ² ·K)]	Heat transmission (W/K)
Roof	18.5163	0.434	8.04
Ceiling	66.2480	0.450	29.81
Wall	160.4338	0.232993	37.38
Window	17.0554	6.51	111.03
Door	1.8900	2.91	5.50
Floor	75.9395	0.5	37.97
Total	—	—	229.73

Table 5.8 Calculation of heat transmission amount (Proposal insulator with TiO₂)

Location	Area (m ²)	<i>U</i> value [W/(m ² ·K)]	Heat transmission (W/K)
Roof	18.5163	0.434	8.04
Ceiling	66.2480	0.450	29.81
Wall	160.4338	0.221071	35.47
Window	17.0554	6.51	111.03
Door	1.8900	2.91	5.50
Floor	75.9395	0.5	37.97
Total	—	—	227.82

$$Q_{Urethane} = 244.6 \text{ (W/K)} \times 5 \text{ (K)} \times 24 \text{ (h)} \times 120 \text{ (days)} / 1000 = 4403.1 \text{ (kWh)} \quad (5-12)$$

$$Q_{Insulator} = 229.7 \text{ (W/K)} \times 5 \text{ (K)} \times 24 \text{ (h)} \times 120 \text{ (days)} / 1000 = 4135.1 \text{ (kWh)} \quad (5-13)$$

$$Q_{Insulator with TiO_2} = 227.8 \text{ (W/K)} \times 5 \text{ (K)} \times 24 \text{ (h)} \times 120 \text{ (days)} / 1000 = 4100.6 \text{ (kWh)} \quad (5-14)$$

の熱量を空調により消費（冷却）しなければならない。空調機器の冷却効率を2倍とすると、壁材に硬質ウレタンフォーム、エアロゲル不織布複合断熱材をそれぞれ採用した場合に必要な電気量の差は、硬質ウレタンフォームの時の電気量を $W_{Urethane}$ 、エアロゲル不織布複合断熱材の時の電気量を $W_{Insulator}$ とすると、

$$W_{Urethane} - W_{Insulator} = 4403.1/2 - 4135.1/2 = 134.0 \text{ (kWh)} \quad (5-15)$$

である。また、硬質ウレタンフォームとふく射伝熱低減粒子(TiO_2)を配合したエアロゲル不織布複合断熱材の差は、 TiO_2 粒子を配合したエアロゲル不織布複合断熱材の時の電気量を $W_{Insulator with TiO_2}$ とすると、

$$W_{Urethane} - W_{Insulator with TiO_2} = 4403.1/2 - 4100.6/2 = 151.3 \text{ (kWh)} \quad (5-16)$$

である。

電力量の CO_2 排出係数[83]は $0.419 \text{ kg-}CO_2/\text{kWh}$ であることから、上記にて計算した電力量の差は、住宅1棟に対し、硬質ウレタンフォームをエアロゲル不織布複合断熱材に変えた場合で年間 56.1 kg 、硬質ウレタンフォームをふく射伝熱低減粒子(TiO_2)を配合したエアロゲル不織布複合断熱材に変えた場合で年間 63.4 kg の CO_2 削減になる。これは、冷房によって1世帯から排出される CO_2 の量が年間 96.7 kg [84]であることから、硬質ウレタンフォームをエアロゲル不織布複合断熱材に変えることで約58%の CO_2 削減になり、ふく射伝熱低減粒子を配合することでさらに約8%の CO_2 を削減することができる。

本節では、住宅1棟の CO_2 削減効果についてのみ検証を行ったが、本断熱材が国内、海外にまで普及すれば、 CO_2 削減量は多大なものになると考える。

5.5 結言

第2章から第4章まで研究を行ってきた設計手法・評価手法の内容を盛り込み、配管パイプ用断熱材、車載機器用断熱材、住宅用断熱材としてのエアロゲル不織布複合断熱材の適用検証を行った。骨格材である不織布の配向は配管パイプ用断熱材としての初期性能に大きく影響し、断熱材の性能向上は車載電子機器やエンジンユニットの設計自由

度を高め、住宅の断熱性能ならびに CO₂削減量を高めることを示した。こうした設計・評価技術は、シリカエアロゲル不織布複合断熱材の多分野への展開に関し、欠くことのできない技術であると考えらる。

第6章 結 論

6.1 本研究のまとめ

薄型エアロゲル不織布複合断熱材は、薄くて軽い断熱材として、多くの用途での適用が期待されている。しかしながら、車載機器や住宅用途といった他の分野に適用展開していくためには、設計・評価の各分野において解決が必要な課題がある。設計分野では、エアロゲルを把持する骨格材である不織布について、断熱材の断熱性を維持するため、繊維の径や複合できる最大の目付量については各メーカーにて指標があるものの、強度・剛性を司る不織布の配向設計については手が付けられていない。また、性能評価においては、本断熱材のような熱伝導率が $0.02 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ 程度と低く、かつ 1 mm 以下と薄い構造のものについては、汎用の熱伝導率測定機において規定の熱抵抗値が得られず、的確な熱伝導率を測定することが困難である。さらに本断熱材は、放射率が大きいシリカの粒子が、微細な3次元ネットワークを構成し、表面積が大きい状態で存在しているため、車載機器用途など 100°C を越えるような温度領域ではふく射伝熱による断熱性の低下（有効熱伝導率の上昇）が問題となる。本研究では、上記の課題に対し、種々の設計・評価手法について提案・検証し、課題の解決に取り組んだ。

不織布の配向分布と剛性の関係に関し、従来の研究では、不織布繊維が配向分布を持つ複合材料を一方向繊維材の積層材として置き、積層板理論にて剛性と変形状態をまとめたもの、短繊維を楕円形の物体とした等価介在物理論をベースとして分布配向にまで拡張対応させたもの、短繊維強化樹脂の成形条件と配向パラメータの関係を明確化し、パラメータと成形品の弾性率、強度を紐付けたものなど、一方向繊維材として置き換えられる構造、あるいは短繊維の構造に関するものがなされてきた。しかしながら、本断熱材を構成する不織布は、短繊維や一方向材と置き換えられる繊維と異なり、複数の繊維が互いに絡まりあって構成される長繊維であるため、こうした長繊維の配向分布と剛性の関係について明確化する必要がある。第2章では、上記の課題に対し、種々の配向分布を持つ不織布をモデル化し、断熱材の自重を想定した構造解析によるたわみのシミュレーションにより、断熱材の剛性と配向分布の関係を明確にした。これにより、配管巻き付け用途の断熱材に対しては施工時の初期特性を考慮した一方向配向の不織布構

造を提案し、繰り返し熱荷重を受ける住宅の外壁材や電子デバイス向き用途に対しては、放射状の配向を持つ不織布構造の提案を行った。

また、断熱材の性能指標である熱伝導率の測定方法に関し、断熱材の熱伝導率測定に関する規格(JIS A 1412-2, ASTM C518[85], ISO 8301:1991[86]など)はあるものの、薄型エアロゲル不織布複合断熱材のように、熱伝導率が $0.02 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 程度、あるいはそれ以下の低い熱伝導率を持ち、厚さ 1 mm 以下という薄い構造のものに対しては、汎用の熱伝導率測定機において規定の熱抵抗値を得ることが難しい(本件については現在も、現行の規格をベースに、測定方法について国際的な議論がなされている段階である)。また、従来の研究では、熱伝導率が既知である材料と組み合わせて測定し、のちに未知材料の熱伝導率を算出手法があるが、熱伝導率のレンジが大きい材料が対象であり、良好な測定精度も得られていない。第3章では、上記の課題に対し、熱伝導率が既知である材料と対象の断熱材とを組み合わせた熱伝導率測定・算出手法を構築した。規定の熱抵抗値が得られ、変形が生じにくいベースプレート材(押出法ポリスチレンボード)を選択することで、熱伝導率が $0.02 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 程度の本断熱材に関し、高精度に測定できる手法を確立した。また、本手法により、厚さ 0.5 mm 以上の薄型エアロゲル不織布複合断熱材の熱伝導率を測定できることを確認した。

さらに車載機器用途など、 100°C を越える環境での使用においては、本断熱材は、放射率が大きいシリカの粒子が、微細な3次元ネットワークを構成し、表面積が大きい状態で存在しているため、ふく射伝熱による断熱性の低下(有効熱伝導率の上昇)が問題となる。これに対し、従来、ウレタンフォーム等の断熱材において適用が進められているふく射伝熱低減粒子の適用が考えられる。しかしながら、粒子の材質や適切な配合率(配合率)に対しては、各メーカーのノウハウによるものが多く、確固とした指標が無かった。第4章では、こうした課題に対し、数 10 nm オーダーのエアロゲル粒子群と、数 μm オーダーのふく射伝熱低減粒子の熱的特性を両者同時に表現するモデル化手法を構築し、 150°C 環境において断熱材の有効熱伝導率を低減させるために有効な、エアロゲル内に複合するふく射伝熱低減粒子の材質と配合率について明確にした。

第5章では、第2章から第4章まで研究を行ってきた設計手法・評価手法の内容を盛り込み、配管パイプ用断熱材、車載機器用断熱材、住宅用断熱材としてのエアロゲル不

織布複合断熱材の適用検証を行った。骨格材である不織布の配向は配管パイプ用断熱材としての初期性能に大きく影響し、断熱材の性能向上は車載電子機器やエンジンユニットの設計自由度を高め、住宅の断熱性能ならびにCO₂削減量を高めることを、検証を通じて示した。

6.2 今後の展望

以上に示した本研究の成果から、今後の展望を述べる。まず第2章では、断熱材中の不織布についていくつかの配向分布を想定し、剛性ならびに熱伝導率の評価を行った。これを不織布設計のプロセスに展開するためには、実際の不織布構造を、本論文中にも示したX線CT装置等で読み取り、イメージベースモデリングによる解析モデルの構築が重要であると考え。本モデル化手法の構築により、各方向に依存する所望の剛性、熱伝導率を有する断熱材の設計が実現できるものと考え。

第3章について、本研究では薄型エアロゲル不織布複合断熱材を対象に熱伝導率の測定手法を構築したが、同程度の熱伝導率や薄さである樹脂系断熱材あるいはセラミック系断熱材も開発されつつある。こうした本研究で対象としたもの以外の断熱材に対しても、適切なベースプレート材を選択することにより展開が可能であると考え。

また、第4章について、ふく射伝熱低減粒子は、本文内で示したウレタンフォーム断熱材への適用も進められている。本章で示したシミュレーションを活用した粒子の材質、配合率に関する評価方法をウレタンフォームのモデルにて実行することにより展開が可能であると考え。また本章では、より高温域の場合にふく射伝熱低減粒子の有効熱伝導率の低減効果が大きいことも示した。よって、ヒュームドシリカ等の高温対応のセラミック系断熱材に対しても展開が可能であると考え。

さらに、第2章、第4章の研究内容については、第4章でも言及したように、mmオーダーの領域での解析と、本章でターゲットとしているnmオーダーのエアロゲルモデルの中に μm オーダーで存在するふく射伝熱低減粒子を扱う解析をつなぐ手法の研究を今後進めていく。

第5章においては、配管パイプ用の断熱材としての初期特性に関して配向設計の検討を行い、車載機器用断熱材としての回路基板へのエンジンの熱の遮蔽効果を示した。ま

た、住宅の壁材の断熱材として、省エネ性についての試算（ケーススタディ）を行った。今後は、本研究にて提案・検討した内容を上記の各分野へ展開し、エアロゲル不織布複合断熱材の実設計に活用していくとともに、自動車業界において普及しつつある電気自動車の電費低減に本断熱材を活用していく。電気自動車では、車内の空調温度を維持するためにバッテリーにて、走行用モータと空調機器を同時に駆動させる必要があり、電費を削減することが重要である。湾曲した形状が多くあり、しかも高温時の断熱性確保が必要となる自動車用断熱材に対し、骨格材である不織布の配向設計や高温時に低熱伝導率を維持できる断熱材の適用が有効になるものとする。

謝辞

本論文をまとめるにあたり、暖かい激励と御指導を頂いた大阪大学大学院工学研究科ビジネスエンジニアリング専攻 教授 大村 悦二 博士，同ビジネスエンジニアリング専攻 教授 上西 啓介 博士，同マテリアル生産科学専攻 准教授 岩田 剛治 博士に対し，ここに深く御礼申し上げます。また，本論文の作成において，有益な御指導と御助言を賜りました大阪大学 名誉教授 座古 勝 博士に厚く御礼申し上げます。

大阪大学大学院工学研究科ビジネスエンジニアリング専攻 准教授 倉敷 哲生 博士には，本研究を遂行するにあたり，直接の御指導と御教授を賜り，本論文の内容について詳細で有益な御助言を頂きました。倉敷准教授には，筆者の研究遂行にあたり終始暖かい御指導を頂きましたことをここに記し，心より感謝の意を表します。

また，本研究における不織布の構造の観察・把握に関し，分析装置の使用について御教授・御助言を賜りました大阪大学大学院工学研究科ビジネスエンジニアリング専攻 助教 向山 和孝 先生に厚く御礼申し上げます。

博士課程への国内留学を快く快諾下さり，多くの御支援を頂いたパナソニック株式会社 オートモーティブ&インダストリアルシステムズ社 インダストリアル事業担当 デバイスソリューション事業部 西田 一人 理事，同生産技術本部 環境生産革新センター 南尾 匡紀 所長，同製造力強化センター 石井 彰一 所次長，同オートモーティブ&インダストリアルシステムズ社 インダストリアル事業担当 デバイスソリューション事業部 新蓄電デバイス開発室 西脇 健太郎 課長，同生産技術本部 生産技術研究所 NASBISプロジェクト 酒谷 茂昭 チームリーダー，同環境生産革新センター 冷熱システムプロジェクト 浅井田 康浩 プロジェクトマネージャー，瀬川 彰継 チームリーダーに深謝いたします。また，本研究の遂行，論文の作成にあたり多大なご協力を頂いた職場の先輩・同僚諸氏に感謝の意を表します。

最後に，陰ながら支えてくれた妻と子供の理解と協力に感謝します。

参考文献

- [1] “平成 18 年度エネルギーに関する年次報告（エネルギー白書 2007）”, 資源エネルギー庁, p. 100, (2007).
- [2] 気象庁 Website, http://www.data.jma.go.jp/cpdinfo/temp/an_wld.html, (accessed on 5 September, 2016)
- [3] R. B. Alley, T. Berntsen, N. L. Bindoff, Z. Chen, A. Chidthaisong, P. Friedlingstein, J. M. Gregory, G. C. Hegerl, M. Heimann, B. Hewitson, B. J. Hoskins, F. Joos, J. Jouzel, V. Kattsov, U. Lohmann, M. Manning, T. Matsuno, M. Molina, N. Nicholls, J. Overpeck, D. Qin, G. Raga, V. Ramaswamy, J. Ren, M. Rusticucci, S. Solomon, R. Somerville, T. F. Stocker, P. A. Stott, R. J. Stouffer, P. Whetton, R. A. Wood and D. Wratt, “IPCC Working Group I: Fourth Assessment Report Summary for Policymakers” , *IPCC A report of Working Group I of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, p. 16, (2007).
- [4] S. S. Kistler, “Coherent expanded aerogels and jellies” , *Nature*, Vol. 127, No.3211, (1931).
- [5] P. C. Thapliyal, and K. Singh, “Aerogels as promising thermal insulating materials: An overview” , *Journal of materials*, Article ID 127049, p. 2, (2014).
- [6] パナソニック株式会社 Website,
<http://news.panasonic.com/press/news/data/2015/05/jn150528-1/jn150528-1.html>,
(accessed on 25 January, 2016).
- [7] 田尻耕治, “シリカエアロゲル及びその修飾体の作製と構造及び熱的・機械的物性評価に関する研究”, 名古屋工業大学 博士論文, p.19, (2002).
- [8] H. Luo, H. Lu, N. Leventis, “The compressive behavior of isocyanate-crosslinked silica aerogel at high strain rates”, *Mechanics of Time-Dependent Materials*, Vol. 10, Issue 2, pp. 83-111, (2006).
- [9] 依田智, 亀田孝秀, 松本博文, 眞子祥子, 古屋武, “新規シリカエアロゲル複合体の作成と断熱材料への応用”, *化学工学会 第40回秋季大会論文集*, H305, (2008).
- [10] P. Wang, A. Emmerling, W. Tappert, O. Spormann, J. Fricke and H.-G. Haubold, “High-temperature and low-temperature supercritical drying of aerogels - structural

- investigations with SAXS”, *Journal of Applied Crystallography*, Vol. 24, pp. 777-780, (1991).
- [11] 齋藤継之, “研究最前線 強靱で透明な高断熱性ナノセルロースエアロゲル”, *ナノファイバー学会誌*, Vol. 6, No. 1, pp. 29-31, (2015).
- [12] M. Einarsrud, E. Nilsen, “Strengthening of water glass and colloidal sol based silica gels by aging in TEOS”, *Journal of Non-Crystalline Solids*, Vol. 226, Issues 1–2, pp. 122-128, (1998).
- [13] 磯貝明, “表面酸化セルロースナノファイバーの構造解析および改質”, *Journal of the Japan Petroleum Institute*, Vol. 58, No. 6, pp. 365-375, (2015).
- [14] 富田衷子, 田尻耕治, 多井豊, “担持金触媒および鉄添加白金触媒の低温 CO 酸化における金属-酸化物界面の重要性”, *Journal of the Japan Petroleum Institute*, Vol. 58, No. 4, pp. 218-227, (2015).
- [15] 前川善一郎, 山田信司, 加地秋好, 溝内博行, “繊維配向分布を考慮した繊維強化複合材料の剛性と変形の推定”, *材料*, Vol. 39, No. 441, pp. 667-673, (1990).
- [16] 三木光範, “曲げ剛性を基準とする複合材料積層板の材料設計”, *日本機械学会論文集中集 A 編*, Vol. 50, No. 451, pp. 448-455, (1984).
- [17] 高橋清久, 原川和久, 田中賢治, 酒井哲也, “弾性率強化理論におけるフィラの配向分布の解析法”, *材料*, Vol. 26, No. 291, pp. 1232-1237, (1977).
- [18] 高橋清久, 尹昊圭, “粒子及び繊維の配向分布と弾性率強化”, *高分子論文集*, Vol. 48, No. 10, pp. 595-608, (1991).
- [19] 津田皓正, “配向カーボンナノチューブ/エポキシ複合材料の力学特性強化機構に関する実験的・解析的研究”, *東京大学大学院 博士論文*, pp. 2-6, (2013).
- [20] 福田博, 河田幸三, “短繊維複合材料の成形条件と剛性”, *東京大学宇宙航空研究所報告*, Vol. 10, No. 3(A), pp. 471-490, (1974).
- [21] 佐野村幸夫, 早川邦夫, 水野衛, 川村宗弘, “短繊維強化ポリプロピレン押出材の縦弾性係数と強度に及ぼす成形条件の影響”, *成形加工*, Vol. 18, No. 4, pp. 293-299, (2006).
- [22] 中野光一, 西田新一, 中垣通彦, 柳田祐二, 玉崎英俊, 小金丸正明, “金属繊維強

- 化複合材料の創製とその特性評価”, *TAKADA TECHNICAL REPORT*, Vol. 13, pp. 16-21, (2003).
- [23] 古江治美, 平野一美, “熱可塑性プラスチックの疲労特性に及ぼす強化繊維および配向性の影響”, *材料*, Vol. 41, No. 461, pp. 232-238, (1992).
- [24] 森澤諭, 齋藤猛, 田中雅夫, “炭素繊維強化熱可塑性樹脂射出成形品の引張強度と耐候性の評価”, *三重県工業研究所 研究報告*, No. 37, pp. 50-54, (2013).
- [25] 平井恒夫, 片山伝生, 平井三友, 米田慎, “射出成形における強化繊維の配向に関する研究”, *材料*, Vol. 34, No. 378, pp. 2-7, (1985).
- [26] 大村高弘, 坪井幹憲, “周期加熱法, 非定常熱線法およびホットディスク法によるポリウレタンフォームの熱伝導率測定”, 第21回日本熱物性シンポジウム論文集, pp. 147-149, (2000).
- [27] 菊池裕介; “「低熱伝導率材料の熱伝導率測定方法の標準化」にかかる北米動向調査報告”, *建材試験情報* Vol. 5, pp. 20-24, (2013).
- [28] D. G. Cahill, M. Katiyar and J. R. Abelson, “Thermal Conductivity of a-Si:H Thin films”, *Physical Review B*, Vol. 50, pp. 6077-6081, (1994).
- [29] 鄭東, 田中三郎, 宮崎康次, 高尻雅之, “ビスマステルライド系薄膜の格子熱伝導率における応力とナノサイズ効果(OS5 マイクロ・ナノと熱電変換, ポスターセッション)”, *マイクロ・ナノ工学シンポジウム 2013*, Vol. 5, pp. 63-64, (2013)
- [30] 畑迫芳佳, 加藤邦久, 宮崎康次, “マイクロ相分離によるナノ構造薄膜の作製と熱伝導率(OS-7: マイクロ・ナノ熱工学(4))”, *日本機械学会熱工学コンファレンス講演論文集 2013*, pp. 225-226, (2013)
- [31] 川路均, 東條壮男, 阿竹徹, “3 ω 法 熱容量スペクトロスコーピーと誘電率測定との同時測定”, *熱測定*, Vol. 29, No. 1, pp. 16-20, (2002).
- [32] 川原庸資, 岩田尚, 萩野春俊, 宮崎康次, “レーザー周期加熱による Si 薄膜の面方向熱伝導率測定(OS.3 環境とエネルギー1)”, *日本機械学会九州支部講演論文集 2013*, No. 66, pp. 19-20, (2013).
- [33] 村上友介, 田口良広, 長坂雄次, “高温超伝導 YBCO 薄膜熱伝導率の 7T までの強磁場下測定”, *日本機械学会熱工学コンファレンス講演論文集 2014*, G144-1-

- G144-2, (2014).
- [34] 萩野春俊, 岩田尚, 谷村直樹, 宮崎康次, “多孔 Si 薄膜の熱・電気輸送特性”, *熱物性*, Vol. 28, No. 3, pp. 114-120, (2015).
- [35] 別府充心, 福永鷹信, 藏田耕作, 高松洋, “マイクロビームセンサを用いた薄膜の面方向熱伝導率の測定法(OS-1: 広がる熱物性), *日本機械学会熱工学コンファレンス講演論文集 2012*, pp. 185-186, (2012).
- [36] 大村高弘, “断熱材の熱伝導率解析に関する研究”, *ニチアス技術時報 2012*, No. 2, pp. 4-10, (2012).
- [37] 大村高弘, 田坂太一, 小川光恵, 阿子島めぐみ, 藤本哲夫, “真空断熱材芯材部分の熱伝導率推定方法”, *熱物性*, Vol. 30, No. 2, pp. 92-97, (2016).
- [38] 岩前篤, 馬淵賢作, 萩原伸治, 田坂太一, 村上哲也, 藤本哲夫, “建築用真空断熱材の性能評価方法の検討:(その1)保護熱板法を用いた評価方法の検討(真空断熱材, 環境工学 II, 学術講演会・建築デザイン発表会)”, *日本建築学会学術講演梗概集 2015(環境工学II)*, pp. 97-98, (2015).
- [39] 田坂太一, “低熱伝導率材料の熱伝導率測定方法に関する検討”, *建材試験情報*, Vol. 6, pp.1-9, (2014).
- [40] 大村高弘, “広い温度範囲における各種測定方法による断熱材の熱伝導率比較”, *ニチアス技術時報 2007*, No. 351, pp. 1-10, (2007).
- [41] 真壁文子, 高久明, “保護熱板法による布の熱伝導率測定における試験片形態の影響”, *東京家政大学研究紀要*, Vol. 44, No. 2, pp.109-115, (2004).
- [42] 日本工業規格 JIS A 1412-2:1999, “熱絶縁材の熱抵抗及び熱伝導率の測定方法—第2部:熱流計法(HFM法)”, (1999).
- [43] ダウ化工株式会社 Website, <http://www.dowkakoh.co.jp/product/styrofoamfg.html>, (accessed on 30 July, 2016).
- [44] 白川好弘, “高性能断熱材「スタイロフォーム™FG」について”, *熱と環境*, Vol. 22, ダウ加工株式会社, p.13, (2014).
- [45] 浅野澄忠, “SiC 発熱体の輻射特性に就て”, *応用物理*, Vol. 20, No. 6・7, pp. 239-241, (1951).

- [46] 船津賢人, 川田光宏, 小西健太, 森岡元, 宮内明祐美, “プラズマジェット中のケイ素系耐熱材料周りの放射測定(GS4 粒子流・プラズマ)”, *日本機械学会流体工学部門講演会講演論文集 2013, G0404-01-G0404-02*, (2013).
- [47] 石山新太郎, “核融合炉用高熱伝導セラミックス製ダイバータプレートモデル試験体に関する基礎的研究”, *日本原子力学会和文論文誌*, Vol. 3, No. 3, pp. 288-297, (2004).
- [48] 若井栄一, 室賀健夫, 長谷川晃, “最近の核融合炉壁候補材料の照射損傷(核融合炉構造材料の照射損傷)”, *プラズマ・核融合学会誌*, Vol. 84, No. 9, pp. 571-582, (2008).
- [49] 佐々木隆好, “高機能真球状シリカ"サンスフェア"の特徴と化粧品用途への応用”, *旭硝子研究報告*, No. 61, pp. 37-41, (2011).
- [50] 馬場優, 川向裕志, 松井芳明, 五十嵐正, 中村文彦, 柴田雅史, “無機有機ハイブリッド集合体を活用した高持続口紅の開発”, *日本化粧品技術者会誌*, Vol. 42, No. 3, pp. 226-230, (2008).
- [51] 増渕祐二, “薄片状シリカを利用した機能性粉体の開発と化粧品への応用 (特集 粒子や粉体を利用した加工技術)”, *粉体と工業*, Vol. 39, No. 12, pp. 31-38, (2007).
- [52] 大久保真吾, “パール顔料の基礎と最近の技術”, *色材協会誌*, Vol. 88, No. 5, pp. 132-136, (2015).
- [53] 黒田章裕, 佐藤祝, 児玉晃季, 青木逸, 前田秀一, “皮膚の光学特性を模倣した奥行き感に優れたスクリーンの開発”, *日本画像学会誌*, Vol. 54, No. 3, pp. 199-204, (2015).
- [54] 本間茂継, “化粧品開発に用いられる紫外線防御素材”, *日本化粧品技術者会誌*, Vol. 48, No. 1, pp. 2-10, (2014).
- [55] 上原孝一, 南浩治, 岩本啓, 長田みゆき, 五十嵐崇訓, 中尾啓輔, 大崎和友, 植松隆史, 野尻尚材, 樫本明生, 福田啓一, “透過光制御による若顔印象ファンデーションの開発”, *日本化粧品技術者会誌*, Vol. 44, No. 1, pp. 48-56, (2010).
- [56] 宮崎康次, 木原正裕, 鮫島良輔, 塚本寛, “シリカマイクロ粒子最密構造の赤外線反射特性”, *日本機械学会熱工学コンファレンス講演論文集*, No. 07-5, pp. 415-416,

(2007).

- [57] 次田章, 福島隆司, 水口昭憲, 永澤久直, “酸化チタン-アルミナ二層被覆雲母の調製とその光学的特性”, *色材協会誌*, Vol. 61, No. 12, pp. 685-691, (1988).
- [58] 野村浩一, 高須賀豊, 西村博睦, 本好捷宏, 山中昭司, “化粧くずれ防止のための脂肪酸選択吸着”, *日本化粧品技術者会誌*, Vol. 33, No. 3, pp. 254-266, (1999).
- [59] 檜本明生, “無機粉体の形状・形態がメイクアップ化粧品の仕上がりに及ぼす影響”, *Journal of the Society of Inorganic Materials, Japan*, Vol. 11, pp. 384-388, (2004).
- [60] 伊藤元章, 長谷昇, 旭正彦, 鈴木敏幸, “酸化ジルコニウム被覆球状シリカの光学的特性とファンデーションへの応用”, *日本化粧品技術者会誌*, Vol. 34, No. 2, pp. 166-171, (2000).
- [61] 円山重直, 長山岳史, 小宮敦樹, “ナノ粒子散布による地球冷却の可能性”, *日本機械学会熱工学コンファレンス講演論文集*, No. 09-33, pp. 245-246, (2009).
- [62] 円山重直, 長山岳史, 小宮敦樹, “ナノ粒子散布による地球温暖化防止策の提案と粒子の最適化”, *第47回日本伝熱シンポジウム講演論文集*, Vol. 2, pp. 393-394, (2010).
- [63] 大村高弘, 内藤牧男, “断熱材中の粒子がふく射の減衰に与える影響”, *日本伝熱シンポジウム講演論文集 2011*, C113, (2011).
- [64] ニチアス株式会社, “保温機能を回復させ, 省エネに貢献する『e'-AIM 工法』”, *ニチアス技術時報 2012*, No. 2, (2012).
- [65] ANSYS Inc., “ANSYS Mechanical APDL Element Reference Release 15.0”, (2013).
- [66] 中上明光, 川上信之, “ナノインデンテーション法による薄膜の機械的特性評価”, *神戸製鋼技報*, Vol. 52, No. 2, pp.74-77, (2002).
- [67] Niimi, R., Toshihiko, K., Tsuchiyama, A., Okudaira, K., Hasegawa, S., Tabata, M., Watanabe, T., Yagishita, M., Machii, N., Nakamura, M. A., Uesugi, K., Takeuchi, A. and Nakano, T., “Size and density estimation from impact track morphology in silica aerogel: Application to dust from comet 81P/WILD 2”, *The Astrophysical Journal*, 744:18, Doi:10.1088/0004-637X/744/1/18, (2012).
- [68] Cambridge-MIT Institute, Web database: Materials Data Book 2003 Edition(2003),

<http://www-mdp.eng.cam.ac.uk/web/library/enginfo/cueddatabooks/materials.pdf>,

(accessed on 24 January, 2016).

- [69] 山岸明彦, 矢野創, 奥平恭子, 小林憲正, 横堀伸一, 田端誠, 河合秀幸, “TANPOPO : 有機物と微生物の宇宙空間曝露と微隕石および微生物の捕集実験”, *Biological Sciences in Space*, Vol.21, No.3, pp. 67-75, (2007).
- [70] 竹澤由高, “自己配列によって高次構造を制御した高熱伝導エポキシ樹脂絶縁性と高熱伝導性を両立したコンポジット材料と放熱材料テクノロジー”, *日立化成テクニカルレポート*, No.53, pp.5-10, (2009).
- [71] 三谷幸寛, “熱伝導率測定の現状について”, *IIC REVIEW*, No. 45, pp. 42-49, (2011).
- [72] “Heat Flow Meter-HFM 436 Lambda”, *Erich NETZSCH GmbH*, (2013).
- [73] 藤井太一, 座古勝, “複合材料の破壊と力学”, *実教出版*, p.10, (1978).
- [74] 小針達也, 岡島淳之介, 小宮敦樹, 円山重直, “拡散近似を用いた高温多孔質断熱材におけるふく射伝熱評価”, *熱物性*, Vol. 28, No. 4, pp. 179-184, (2014).
- [75] マイクロ・ナノ熱流体ハンドブック編集委員会編, “マイクロ・ナノ熱流体ハンドブック”, *エヌ・ティー・エス*, p. 35, (2006).
- [76] 福田淳, “機能性酸化チタン材料の開発”, *生産と技術*, Vol. 66, No. 1, pp. 54-59, (2014).
- [77] “住宅・建築物分野の将来像 (ゼロエミッション化イメージ) について”, *環境省 住宅・建築物WG 資料2*, (2005).
- [78] 宮森剛, “住宅・建築物の省エネルギー施策について”, *環境省 ぐらしからの省エネを進める政策デザイン研究国際ワークショップ 講演資料*, (2014).
- [79] グンゼエンジニアリング株式会社 Website, <http://www.gunze.co.jp/engineering/lineup/aero3.html>, (accessed on November 6, 2016)
- [80] 藤井忠征, 岩嶋洋平, 遠藤崇光, 広瀬拓哉, 清瀬英人, 坂本伸司, 高口洋人, “既存集合住宅における断熱性能の評価”, *空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集*, pp. 529-532, (2010).
- [81] 株式会社CI 東海 Website, <http://www.ci-tokai.jp/document/flat35.html>, (accessed on 21 September, 2016).

- [82] “部位の熱貫流率早見表”, マグ・イズベール株式会社, (2014).
- [83] 環境省 Website, https://www.env.go.jp/earth/ondanka/suishin_g/08.pdf, (accessed on 4 October, 2016).
- [84] 国立研究開発法人国立環境研究所音温室ガスインベントリオフィス Website, <http://www-gio.nies.go.jp/aboutghg/nir/nir-j.html>, (accessed on 4 October, 2016).
- [85] ASTM C518, “Standard Test Method for Steady-State Thermal Transmission Properties by Means of the Heat Flow Meter”, (2004).
- [86] ISO 8301:1991, “Thermal insulation - Determination of steady-state thermal resistance and related properties - Heat flow meter apparatus”, (1991).

研究業績

1. 投稿論文

- [1] 岡崎亨, 及川一摩, 酒谷茂昭, 倉敷哲生, “薄型断熱材の熱伝導率測定方法の検討”, *熱物性*, Vol. 30, No. 2, pp. 86-91, (2016).
- [2] 岡崎亨, 及川一摩, 酒谷茂昭, 倉敷哲生, “不織布配向設計によるエアロゲル不織布複合断熱材の剛性向上に関する研究”, *日本機械学会論文集*, Vol. 82, No. 842, p. 16-00135, (2016).
- [3] 岡崎亨, 及川一摩, 酒谷茂昭, 和田享, 倉敷哲生, “薄型断熱材の 150°C近傍のふく射伝熱低減に関する検討”, *スマートプロセス学会誌*, Vol. 6, No. 2, (2017), (予定).

2. 学会発表

- [1] 岡崎亨, 及川一摩, 酒谷茂昭, 倉敷哲生, “配向設計による薄型エアロゲル不織布複合断熱材の剛性向上に関する研究”, *日本機械学会 関西支部第92 期定時総会講演会*, (2017), (2017年3月14日発表).
- [2] 岡崎亨, 及川一摩, 酒谷茂昭, 和田享, 倉敷哲生, “エアロゲル不織布複合断熱材の 150°Cにおけるふく射伝熱低減に関する検討”, *第8回日本複合材料会議(JCCM-8)*, (2017), (2017年3月16日発表)