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岡崎 亨^{*1}, 及川 一摩^{*1}, 酒谷 茂昭^{*1}, 倉敷 哲生^{*2}Study on the rigidity improvement of non-woven composite aerogel insulation material
according to the non-woven fabric oriented designToru OKAZAKI^{*1}, Kazuma OIKAWA^{*1}, Shigeaki SAKATANI^{*1} and Tetsusei KURASHIKI^{*2}^{*1} Panasonic Corporation

2-7 Matsuba-cho, Kadoma-shi, Osaka 571-8502, Japan

^{*2} Graduate School of Engineering, Osaka University

2-1 Yamadaoka, Suita-shi, Osaka 565-0871, Japan

Received 31 March 2016

Abstract

The aerogel composite insulation sheet which is complexed with fibers such as non-woven fabric and aerogel has been launched. However, it is one of the biggest problems for practical use that the insulation material has low strength and low rigidity because the main material is a fragile silica aerogel. Therefore, its durability as a structural material is a concern to use in various situations. So, in this study, for the five models modelled on the basis of the actual structure of non-woven fabric, which have respectively characteristic orientation distributions, it was examined whether the rigidity of the insulation material was improved by the design of the orientation of the non-woven fabric by using a structural analysis about the deflection evaluation due to its own weight of the insulation material. Consequently, it was confirmed that the rigidity of the material can be improved by aligning the non-woven fabric along the direction of deflection at the time of bending loads. In addition, for the non-woven fabric model that was targeted in this study, the distribution of orientation of the non-woven fabric doesn't affect increasing in the thermal conductivity (the deterioration of the thermal insulation properties) of the insulation by using a heat transfer analysis.

Key words : Aerogel composite insulation sheet, Fiber orientation, Improving the rigidity, Thermal conductivity, Structural analysis, Heat transfer analysis

1. 緒 言

近年, 新たな断熱材として, かねてより各国で研究がなされてきたエアロゲルを活用する動きが盛んである。エアロゲルは, 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を発表したのが始まりとされる (Kistler, 1931)。以来, 薄い厚さのものでも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 (Thapliyal and Singh, 2014)。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 (Panasonic, 2015)。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 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 (以降, エアロゲル不織布複合断熱材と記載) が断熱材として活用されている。こうしたエアロゲル不織布断熱材を種々の場面で活用していくためには, エアロゲルのゲル構造の強化, あるいは, 骨格

No.16-00135 [DOI:10.1299/transjsme.16-00135], J-STAGE Advance Publication date : 14 September, 2016

^{*1} パナソニック (株) 生産技術本部 (〒571-8502 大阪府門真市松葉町 2-7)^{*2} 正員, 大阪大学大学院 工学研究科 (〒565-0871 大阪府吹田市山田丘 2-1)

E-mail of corresponding author: okazaki.toru@jp.panasonic.com

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必要がある。

前者（エアロゲル自体の強化）については、かねてより多くの研究（例えば、田尻，2002，依田他，2008）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した。

不織布の配向分布と剛性の関係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、積層板理論にて剛性と変形状態をまとめたもの（前川他，1990）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（高橋他，1977；高橋，尹，1991），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（佐野村他，2006）などがある。

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配向の主方向が定まっておらず（一方向材として扱い難く）、複数の繊維が互いに絡まりあって構成される長繊維を対象とするため、上記の研究内容をそのまま活用することが難しい。さらに、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を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、繊維構造）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）を評価した。結果として得られた配向分布により、元々の不織布構造に対し、エアロゲル不織布複合断熱材として約 1.5 倍の剛性を持つことを確認し、また、配向の違いによって、断熱材の断熱性（熱伝導率）に影響を与えないことも確認したので報告する。

Fig.1 Overview of aerogel non-woven thermal insulator.

2. 不織布の配向分布の違いによる断熱材の剛性評価

2・1 検証方法

本研究では、エアロゲル不織布断熱材の熱伝導率に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をベースにモデル化したシミュレーションモデルを用い評価を行った。

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 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。本研究では、不織布繊維の配向の向きを定義を行うべく、配向を図 3 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 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、

Fig.2 Definition of x and y direction. Fig.3 Definition of the orientation in x - y plane.

Fig.4 Observation points and their images of the insulation material.

Fig.5 Orientation distribution of the insulator.

Fig.6 3D X-ray image of out-of-plane of the insulator.

Fig.7 Overview of out-of-plane structure of the insulator.

図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 40mm 角の不織布より十分大きく (40mm 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7に示すような z 軸に向かっている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)ミツ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・3 シミュレーションモデル化

上記結果より、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 $16\text{ }\mu\text{m}$ である。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 $60\text{ }\mu\text{m}$ 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8に示すように、 y 方向について $60\text{ }\mu\text{m}$ の間隔を空けて x 方向に直径 $16\text{ }\mu\text{m}$ 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5に示した配向分布になるよう、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 mm であることから、図 8 に示すように、不織布 15 レイヤー分の厚みが 0.211 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 $16\text{ }\mu\text{m}$ であることから、繊維は x 方向に $1\text{ }\mu\text{m}$ 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し、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中に微量に混合し、熔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 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。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 9、表 1 に示す。

Fig.8 Setting the size configuration and the orientation angle of the insulation model.

Fig.9 Simulation model of the current structure of the insulator.

Table 1 Number of nodes and elements of current model.

	Number of nodes	Number of elements
Current model	1352852	496226

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 10(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抑えた。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

Fig.10 Experimental and computational condition about deflection of the insulation for accuracy verification.

Table 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 3 Accuracy of verification result.

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

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、自重におけ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 10(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 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（中上, 川上, 2002）,（Niimi et al., 2012）を、PET のヤング率、密度については文献（Cambridge- MIT Institute, 2003）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 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する。

2・5 種々の配向分布比較モデルと検証方法

前節の精度検証結果より、2・4 節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。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
- (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 11(a)～(e)に示す。図 11(b)は、前節の図 5 に示した配向分布図と同一のものである。図 11 の各分布にしたがい、前節の図 8 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 12(a)～(e)に示す。また、各モデルの節点・要素数を表 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 $+5^\circ$ 、 -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 $-85^\circ \sim +85^\circ$ までランダムに均等配置する構造とした。モデル E については、各繊維が $-85^\circ \sim +85^\circ$ までランダムに均等に配置する構造とした。検証方

Fig.11 Orientation distributions of the various models of non-woven composite aerogel insulation material.

Fig.12 Simulation models of the insulation material of various fabric orientation distribution.

Table 4 Number of nodes and elements of model A to E.

	Number of nodes	Number of elements		Number of nodes	Number of elements
Model A	861548	315906	Model C	1458990	574874
Model B	1352852	496226	Model D	1280624	495530
(Current model)	(same as Table 2)	(same as Table 2)	Model E	863650	316234

法については、前節の精度検証と同様の方法にて、図 10(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 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・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 13, 図 14 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 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 14 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・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 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)。よって、繊維含有率が大きい、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 5 に各モデルにおける繊維部分の体積を、表 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

Table 5 Volumes of fiber models.

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

Table 6 Number of junction points of fiber models.

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

Fig.13 Contour diagram of the deflection (deformation of z -axis) of 5 orientation models.

Fig.14 Computational result about maximum deflections of 5 orientation models. It is possible to control the deflection due to the self-weight of the thermal insulation material from -33% to +74% by the orientation design of non-woven (Stiffening of the thermal insulator is possible by the orientation design of non-woven).

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第4章にて行う。

3. 配向分布の違いによる断熱材の熱伝導率に対する影響の確認

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(1)で表される。

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

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 における熱流計法では、上記の式(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15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 $Q=0.1(\text{W})$ 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 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(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7に示す。なお、表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（山岸他，2007）を、PETの熱伝導率については文献（竹澤，2009）を参照した。

Fig.15 Settings of heat transfer analysis for calculation of thermal conductivity.

Table 7 Thermal properties.

	Thermal conductivity {W/(m·K)}
Silica aerogel	0.017
PET	0.2

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16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考ええる(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)。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。

Fig.16 Computational result about thermal conductivities of 5 orientation models. The orientation distribution of the non-woven as the subject of this study does not significantly affect the thermal conductivity of the thermal insulation material.

4. 考 察

以上により行ってき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する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(佐野村他, 2006)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。

前章の検証結果より、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)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。なお、式(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。

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

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 のような配向構造のものは、第 1 章にて述べた配管用の断熱材として、曲げ剛性の大きい主軸方向(0°方向)を配管の向きに向け、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 17(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 17(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 10(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 12 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)構造になっていると考える。

Fig.17 Examined structure of thermal insulation material.

5. 結 言

本研究では、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、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。本検討内容は、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であると考えられる。今後は、2・7 節でも言及したように、モデル化方法を改善し、断熱材モデルの中の不織布繊維の含有率は同じで、異なる配向分布を持つ種々の断熱材についての剛性評価を行っていく。また、X 線 CT 撮像装置等を用いた不織布配向の 3 次元構造が把握できる画像からのモデリング（イメージベースドモデリング）により、より実構造に近いシミュレーションモデルの簡便な構築と評価が行えるよう取組みを進めていく。

文 献

- Cambridge-MIT institute, Web database: Materials data book 2003 edition(2003), Multidisciplinary design project (online), available from <<http://www-mdp.eng.cam.ac.uk/web/library/enginfo/cueddatabooks/materials.pdf>>, (参照日 2016 年 1 月 24 日).
- Kistler, S. S., Coherent expanded aerogels and jellies, *Nature*, Vol. 127, No.3211 (1931).
- 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(1990), pp. 667-673.
- 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 (2002), pp.74-77.
- 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*, Vol.744, No.18(2012).
- Panasonic corporation, Panasonic newsroom: Press release in the company homepage, available from <<http://news.panasonic.com/press/news/data/2015/05/jn150528-1/jn150528-1.html>>, (参照日 2016 年 1 月 25 日).
- 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 (2006), pp. 293-299.
- 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(2002), p.19.
- 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(1977), pp. 1232-1237.
- 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(1991), pp. 595-608.
- 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(2009), pp.5-10.
- Thapliyal, P. C. and Singh, K., Aerogels as promising thermal insulating materials: An overview, *Journal of materials*(2014), Article ID 127049, p.2.
- 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(2007), pp. 67-75.
- 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(2008), H305.

References

- Cambridge-MIT institute, Web database: Materials data book 2003 edition(2003), Multidisciplinary design project (online), available from <<http://www-mdp.eng.cam.ac.uk/web/library/enginfo/cueddatabooks/materials.pdf>>, (accessed on 24

January, 2016).

Kistler, S. S., Coherent expanded aerogels and jellies, *Nature*, Vol. 127, No.3211 (1931).

Maekawa, Z., Yamada, S., Kaji, A. and Mizouchi, H., Estimation of rigidity and deformation of fiber reinforced composites with consideration for fiber oriented distribution, *Journal of the society of materials science, Japan*, Vol. 39, No.441(1990), pp. 667-673 (in Japanese).

Nakaue, A. and Kawakami, N., Evaluation of the mechanical properties of thin films using nanoindentation, *Kobe steel industrial report*, Vol.52, No.2(2002), pp. 74-77 (in Japanese).

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*, Vol.744, No.18(2012).

Panasonic corporation, Panasonic newsroom: Press release in the company's homepage, available from <<http://news.panasonic.com/press/news/data/2015/05/jn150528-1/jn150528-1.html>>, (accessed on 25 January, 2016).

Sanomura, Y., Hayakawa, K., Mizuno, M. and Kawamura, M., Effect of process conditions on Young's modulus and strength of extrudate in short-fiber-reinforced polypropylene, *Journal of the Japan society of polymer processing*, Vol. 18, No. 4(2006), pp. 293-299 (in Japanese).

Tajiri, K., A doctoral thesis of Nagoya institute of technology(2002), p. 19 (in Japanese).

Takahashi, K., Harakawa, K., Tanaka, K. and Sakai, T., Analysis on the effect of filler orientation distribution in elastic reinforcement theory, *Journal of the society of materials science, Japan* Vol.26, No.291(1977), pp. 1232-1237 (in Japanese).

Takahashi, K. and Yoon, H., Effects of orientation distribution of particles or fibers on elastic reinforcement of composites, *Japanese journal of polymer science and technology*, Vol. 48, No.10(1991), pp. 595-608 (in Japanese).

Takezawa, Y., High thermal conductive epoxy resin composites with controlled higher order structures, *Hitachi chemical technical report* No.53(2009), pp.5-10 (in Japanese).

Thapliyal, P. C. and Singh, K., Aerogels as promising thermal insulating materials: An overview, *Journal of materials*(2014), Article ID 127049, p. 2.

Yamagishi, A., Yano, H., Okudaira, K., Kobayashi, K., Yokobori, S., Tabata, M. and Kawai, H., TANPOPO: Astrobiology exposure and micrometeoroid capture experiments, *Biological sciences in space*, Vol.21, No.3(2007), pp.67-75 (in Japanese).

Yoda, S., Kameda, T., Matsumoto, H., Manako, S. and Furuya, T., Creating a new silica aerogel complex and its application to thermal insulation material, *The 40th autumn meeting of the society of chemical engineers, Japan*(2008), H305 (in Japanese).