

ニチアス 技術時報

No.380

2018

1号

Contents

【解説】

ニチアスの保冷技術
冷蔵倉庫の防熱事業について

【技術レポート】

繊維系多孔質吸音材料のBiot/パラメータの推定



【新技術紹介】

吸音性に優れた
超軽量無機質スポンジ状素材



ニチアス

目次

【巻頭言】

- ◆新年雑感 1
取締役 執行役員 基幹産業事業本部長 亀津 克己

【解説】

- ◆ニチアスの保冷技術 2
基幹産業事業本部 工事事業部 工事技術部
- ◆冷蔵倉庫の防熱事業について 10
基幹産業事業本部 工事事業部 工事技術部
株式会社イノクリート

【技術レポート】

- ◆繊維系多孔質吸音材料の Biot パラメータの推定 18
研究開発本部 CAE 室 三木 達郎

【新技術紹介】

- ◆吸音性に優れた超軽量無機質スポンジ状素材 24
研究開発本部

【連載】

- ◆シール材 Q&A (第 10 回) 26

表紙写真：

- ①超軽量無機質スポンジ状素材
現在開発中の素材で、軽量かつ耐熱性を有する防音材などとして多方面での応用が期待される。
- ② LNG 受入基地
国内 LNG 受入基地の多くで使用されているニチアスの保冷技術。保冷部材の生産から施工までの一貫した技術でエネルギー産業を支えている。



送り先ご住所の変更、送付の停止などにつきましては、下に記載の連絡先までご連絡ください。
なおその際は、宛て名シールに記載されている 7 桁のお客様番号を必ずお知らせくださいますよう、お願いいたします。

〈連絡先および本誌に関するお問い合わせ先〉

ニチアス株式会社 経営企画部広報課
TEL:03-4413-1194
FAX:03-3552-6149
E-mail: info@nichias.co.jp

本誌の内容は当社のホームページでもご紹介しております。
<http://www.nichias.co.jp/>

新年雑感



取締役 執行役員 基幹産業事業本部長 亀津克己

明けましておめでとうございます。

昨年は、2020年の東京オリンピック需要やアベノミクスが先導する財政出動および金融緩和の効果が徐々にあらわれ、過去最高益を見込む企業も増え、日経平均株価は26年ぶりの高値をつけるなど、明るい話題が出てまいりました。引き続き本年も雇用・所得環境の改善に加え、経済対策の効果が各方面に及んでくるとみられることから、景気は緩やかな拡大基調が続いていくと予想されます。

一方で日本の生産年齢人口は、少子高齢化により1995年をピークに減少の一途をたどっており、そのペースは総人口の減少を上回ると推測されています。政府はその対策として、一億総活躍社会の実現に向けた「働き方改革」を進めています。その内容は、長時間労働の解消、正規雇用と非正規雇用の格差是正、女性・若者の活躍しやすい環境づくりなどが主となり、日本の企業文化やライフスタイル、働くことに対する考え方そのものの改革となっています。このような動きの中、ものづくりの世界で技術を伝承し、発展させていくためには、AI、IoTや産業ロボットに代表される省力・省人化技術の活用が重要なテーマになっています。これら新しいツールを利用するためには、従来経験や勘に頼っていた、いわゆる匠の世界を数値で捉える必要があります。その分析作業の中で、私たちはこれまでに築いてきた技術とは何かについて再度考えさせられる事になるでしょう。この事が、新たな技術の未来を切り開く第一歩となるのかもしれませんが。

弊社は「断つ・保つ」技術を基盤とした製品と、施工技術を兼ね備えていることを強みとして、幅広い産業分野のお客様に製品・サービスを提供してきました。その多くは、普段皆さまの目にとまらない部分に使用されており、主役となる製品を縁の下で支えるような役割を担っています。世の中の要求が日々変化していく中で、弊社が今後も社会に貢献していくために、これまでに築いてきた技術をもう一度見つめ直し、お客さまの立場に立ったものづくりを常に考え努力していく所存です。

本号では、弊社が長年培ってきた「断つ・保つ」技術のうち、保冷および防音技術について、歴史や新技術を織り交ぜながらご紹介させていただきます。今後とも、ニチアス技術時報のご愛読と弊社製品のなご一層のご愛顧を賜りますようお願い申し上げます。

ニチアスの保冷技術

基幹産業事業本部 工事業部 工事技術部

1. はじめに

当社では自社製の断熱材製品を主体として用いたプラントの保温・保冷工事を事業のひとつとしている。保温・保冷工事の対象は -253°C の液体水素プラントから千数百 $^{\circ}\text{C}$ 以上となる焼却炉や工業炉に至るまで幅広い温度領域にわたるが、本稿では特に保冷工事の概要について解説する。

2. 保冷の市場

一般に断熱は対象となる流体の温度領域により、常温よりも高い温度範囲は保温、常温未満の温度範囲は保冷と区別しており、それぞれ使用される断熱材やその施工方法が異なる。

保冷工事の対象となる、冷熱を利用する産業分野はエネルギー、石油化学、食品製造および物流など多岐にわたる。その一例を図1にまとめた。例えばエネルギー産業で使用される天然ガスは輸送効率を高めるため -162°C のLNG（液化天然ガス）として輸送される。また、食品物流では生鮮食品や冷凍食品の生産、保存から消費に至るコールドチェーンにおいて冷凍・冷蔵倉庫、保冷車、冷凍・冷蔵ショーケースといった施設や機器が利用される。

これらの産業で使用される設備、機器は低温流体を扱うため、周囲への冷熱の遮断が必須である。保冷の不備は機器の結露や、運転負荷の増大など種々の障害に結びつくため、保冷技術が果たすべき役割は重要である。その意味で保

冷技術は目立たないながらも、冷熱利用産業全てを縁の下で支えており、現代社会にはなくてはならない存在といえる。

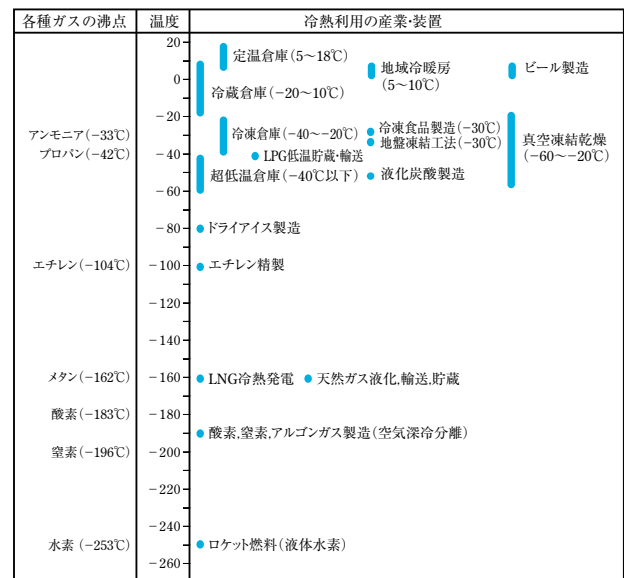


図1 冷熱利用の産業と装置の例

3. 保冷工事の概要

当社が事業とする保冷工事は主としてプラントが対象であり、エネルギー、石油化学、冷凍冷蔵倉庫、地域冷暖房施設など広範囲にわたる。実際の保冷工事では対象となる装置、機器の温度や構造などの仕様に合わせて選定すべき断熱材（保冷材）や保冷構造、施工方法が決められる。ここでは代表的なものに関してその概要を説明する。

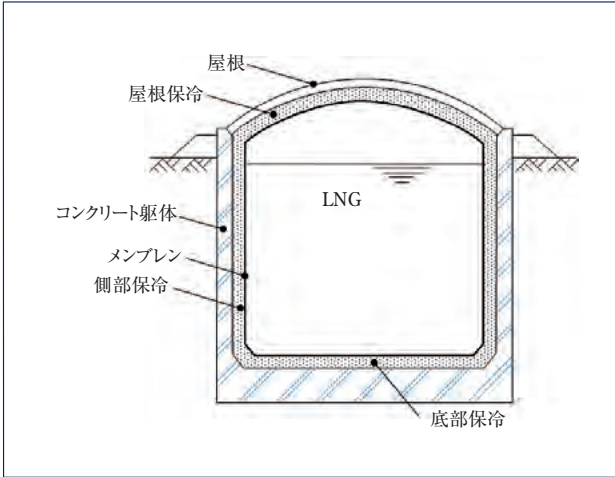


図6 地下タンクの一般構造

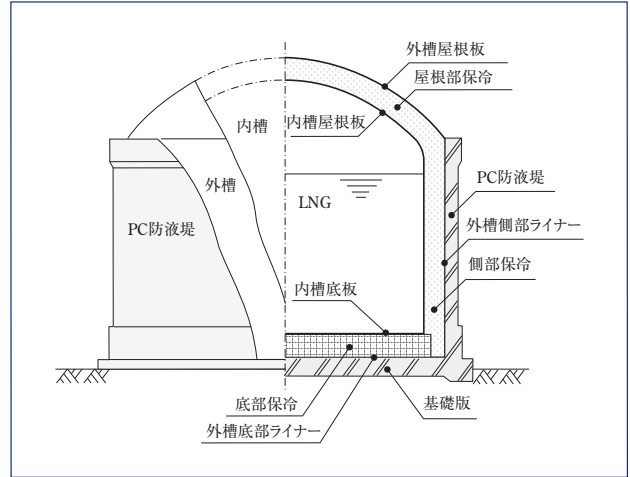


図8 PC-LNGタンクの一般構造

(近年の地上タンクは防液堤とタンク外殻が一体化したPC-LNGタンクが主流である)



図7 地上タンク

(LNG受入基地。写真奥が地上タンク。手前はLNG船からLNGを受入れるための配管)

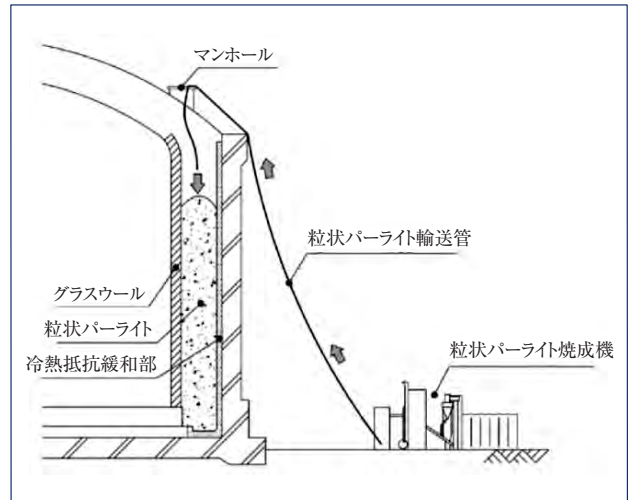


図9 PC-LNGタンクのパーライト充填工事

(タンク外に設置した焼成機でパーライトを焼成してタンク上部まで空気圧送し、タンク内殻と外殻の間に充填する)

一方、地上タンク（図7）はLNGを貯蔵する内殻と保冷材を保持する外殻の二重殻構造となっている。地上タンクは万一の流出事故に備えてタンクの周囲に防液堤が設けられるが、近年は防液堤とタンク外殻が一体化され、立地面積が少ない利点を持つPC-LNGタンクが主流である（図8）。PC-LNGタンクも地下タンクと同様に容量20万kL級と大型化し、外径80mを越える大規模な構造物である。

保冷材としては、タンクの床部にはLNGの液圧を支持するために強度が高い泡ガラス、軽量

断熱コンクリートなどが使用され、タンク側部は粒状パーライトが使用される。タンクの側部断熱工事は粒状パーライトをタンク内に空気圧送して二重殻の間の空間に充填する作業となる（図9）。

表1にこれらのLNGタンクの建設に関わる当社の保冷工事の主要な実績をまとめた。

3.2 LNG配管

LNGタンクにはLNGの受入、払出し配管や、気化器など多種の付帯設備が設けられ、それらも保冷が必要となる。これらの施工は設置時だ

表1 当社のLNGタンクの保冷工事主要実績

形式	案件	建設時期	タンク容量
地下タンク	東京ガス(株) 根岸	1970	10,000kL
	東京ガス(株) 根岸	1972	60,000kL
	東京ガス(株) 袖ヶ浦	1974	60,000kL×2基
	大阪ガス(株) 泉北	1974	45,000kL
	東京ガス(株) 袖ヶ浦	1974	60,000kL×5基
	東京ガス(株) 根岸	1976	95,000kL
	東京ガス(株) 袖ヶ浦	1976	62,000kL
	東京ガス(株) 根岸	1978	95,000kL
	東京電力(株) 袖ヶ浦	1980	60,000kL
	東京ガス(株) 根岸	1980	95,000kL
	東京電力(株) 東扇島	1981	60,000kL
	東京ガス(株) 袖ヶ浦	1981	130,000kL
	東京電力(株) 東扇島	1983	60,000kL×2基
	東京電力(株) 新袖ヶ浦	1984	90,000kL×2基
	東京電力(株) 富津	1984	90,000kL
	東京電力(株) 富津	1984	90,000kL
	東京電力(株) 東扇島	1986	60,000kL
	東京ガス(株) 袖ヶ浦	1988	140,000kL
	東京ガス(株) 根岸	1978~1990	60,000kL×2基
	東京電力(株) 富津	1989	125,000kL
	東京ガス(株) 根岸	1992~1994	60,000kL×2基
	東京ガス(株) 根岸	1993~1995	200,000kL×2基
	清水エル・エヌ・ジー(株) 袖師	1995~1996	80,000kL
	東京ガス(株) 扇島	1996	200,000kL
	仙台ガス局 新港	1996	80,000kL
	知多エル・エヌ・ジー(株) 知多	1996	160,000kL
	東京電力(株) 富津	1997	125,000kL
	清水エル・エヌ・ジー(株) 袖師	1999~2000	94,000kL
	西部ガス(株) 熊本	1999	2,000kL
	東邦ガス(株) 知多緑浜	1999~2001	200,000kL
	東京電力(株) 富津	2001	125,000kL×2基
	東京ガス(株) 扇島	2001	200,000kL
西部ガス(株) 熊本	2006	2,000kL	
東邦ガス(株) 知多緑浜	2008~2009	200,000kL	
清水エル・エヌ・ジー(株) 袖師	2008~2009	160,000kL	
東邦ガス(株) 知多緑浜	2015~2016	220,000kL	
東京電力(株) 富津	2017~	125,000kL×2基	
中部電力(株) 四日市火力発電所	1987	80,000kL×4基	
大分エル・エヌ・ジー(株) 柳井	1989	80,000kL×5基	
中国電力(株) 柳井	1989	80,000kL×6基	
東邦ガス(株) 四日市	1989	80,000kL×2基	
大阪ガス(株) 泉北第2	1993	140,000kL×2基	
マレーシアサラワク	1982	65,000kL×4基	
東京ガス(株) 袖ヶ浦	1986	45,000kL×1基	
東京電力(株) 袖ヶ浦	1988	45,000kL×2基、60,000kL×4基	
インドネシアア alun	1992	140,000kL×4基	
大阪ガス(株) 泉北第一	1993	45,000kL×3基	
関西電力(株) 姫路	1995	80,000kL×2基	
岡山ガス(株) 築港工場	2003	7,000kL×1基	
北海道ガス(株) 函館みなと工場	2006	5,000kL×1基	
台湾中油社 Northern LNG Receiving Terminal	2009	160,000kL×3基	
沖縄電力(株) 吉の浦火力発電所	2012	140,000kL×2基	
中部電力(株) 川越火力発電所	2013	180,000kL×2基	
JX日鉱日石エネルギー(株) 釧路LNG基地	2013	10,000kL×1基	
東北電力(株) 新仙台火力発電所	2013	160,000kL×2基	
東部ガス(株) 秋田	2014~2015	14,000kL×1基	

けでなく、保冷材などの経年劣化のため定期的なメンテナンスが必要である。当社ではメンテナンス工事として配管内部にLNGを通じた状態での冷間保冷施工なども実施している。代表的な配管の保冷構造を図10に示した。

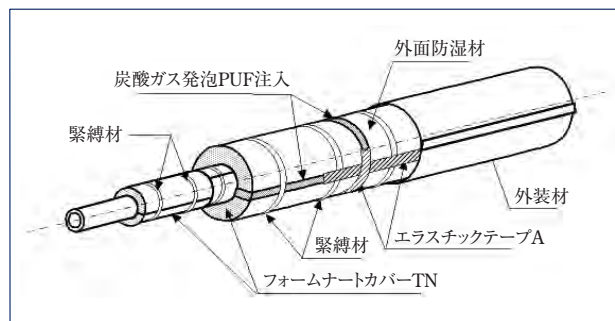


図10 代表的な配管の保冷構造

3.3 LNG船

LNGの海上輸送に使用されるLNG船は、積荷であるLNGの冷熱から船体を保護するため、高度な防熱設計^(※1)と施工技術が必要となる(図11)。



図11 今治造船株式会社殿建造のLNG船TRINITY ARROW (GTT Mark III型、貨物容量155千kL)

写真は今治造船株式会社殿ご提供(本船および同型船の防熱材にはノンフロンタイプでは世界初となる当社製R-PUFが採用された)

LNG船は搭載されるタンクの構造により、球形タンクを備えたMOSS型、メンブレンタンクをもつGTT Mark III, GTT NO96型, 自立角型タンクを持つIHI-SPB型が代表的な形式である(図12)。

LNG船の防熱工事では当社のグループ会社である株式会社イノクリートがこれら4種全ての施

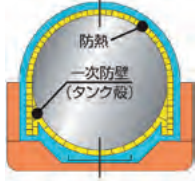
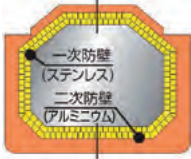
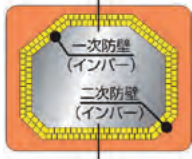

形式	MOSS	GTT Mark III	GTT NO96	IHI-SPB
タンク構造	アルミニウム独立球形タンク 	ステンレスメンブレンタンク 	インバーメンブレンタンク 	アルミニウム自立角型タンク 
防熱材	プラスチックフォーム	ガラス繊維補強硬質ウレタンフォーム	パーライト	硬質ウレタンフォーム

図12 LNG船の主な形式

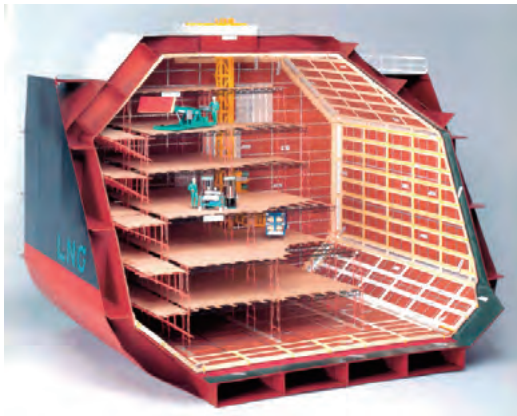


図13 GTT Mark III 型LNG船の防熱工事の様子 (模型)



図14 ノンフロンR-PUFを用いたGTT Mark III型の防熱パネル

工実績を持つ。特にGTT Mark III型については、防熱材として当社はノンフロン品では世界初となるガラス繊維補強硬質ウレタンフォーム (R-PUF) を開発し、その製造から防熱工事まで一貫して実施した実績がある (図13, 14)。

※1 LNG船の場合、積荷のLNG冷熱から船体を保護するという意味で、保冷ではなく「防熱」という用語が用いられる。

3.4 冷凍・冷蔵倉庫

食品物流の中で大きな比重を占める冷凍・冷蔵倉庫は、18℃から-40℃以下の広い温度域で運用されており、倉庫のきめ細かい温度管理のため、高い断熱施工技術が必要となる。この施工についても当社グループ会社の株式会社イノクリートが行っており、発泡ポリスチレンによるパネル工法や硬質ウレタンフォームの吹付け発泡工法などを採用している。冷凍・冷蔵倉庫の保冷工事については本号の別稿を参照されたい。

3.5 宇宙ロケット

純国産のH-II A, B両ロケットの推進薬 (燃料)

には液体水素および液体酸素が用いられている。ロケットは通常のプラント機器と異なり、推進薬の極低温と空力加熱や推進薬の燃焼熱による高温とが保冷材の内外に同居する過酷な環境であり、保冷材や保冷構造の設計にも特別な配慮が要求される。

当社ではH-Iロケット以来、継続して保冷材を提供させていただいている。現在のH-II A, Bロケットには機体を構成する推進薬タンクやその付帯配管の断熱材として自社開発したポリイソシアヌレートフォーム^(※2)「フォームナート® PIF」を供給している (図15)。液体水素は-253℃という極低温であり、保冷の信頼性を確保するために推進薬タンクには吹付け発泡、配管には接着施工を採用し、保冷材が対象物に強固に密着、固定される構造になっている。

※2 ポリイソシアヌレートフォームは硬質ウレタンフォームを変性して耐熱性を持たせた発泡プラスチックの一種である。

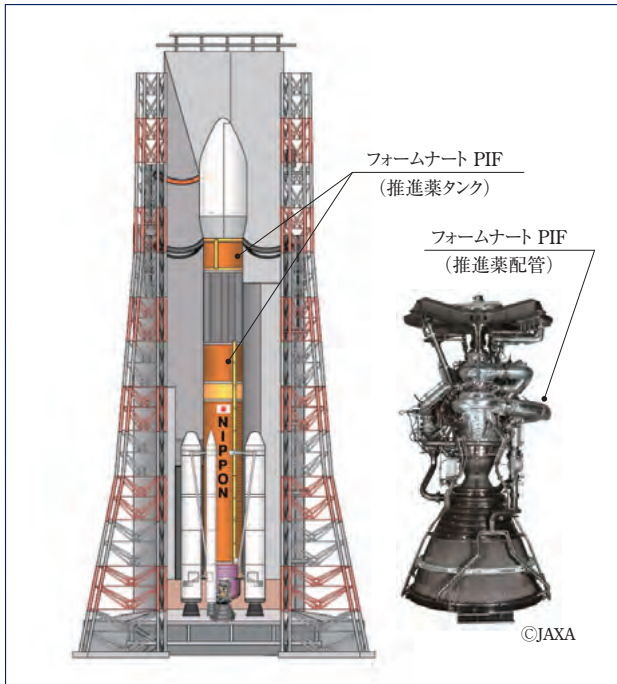


図15 ロケットの保冷

(タンクおよびエンジン周り配管の保冷に「フォームナート PIF」が用いられる)

層を施工対象物と一体的に形成可能であることが他の材料にはない最大の特長である。

当社では「フォームナート®」ブランドの保温板、保温筒や、現場施工用の注入発泡原液の製品を品揃えしている(図16～18)。これらの「フォームナート®」製品は全て発泡剤に炭酸ガスを主として使用したノンフロン製品である。



図16 硬質ウレタンフォーム保温材

「フォームナート ボード TN」, および「フォームナート カバー TN」
(2004年オゾン層保護地球温暖化防止大賞優秀賞受賞)

4. 保 冷 材

保冷の設計において必要なことは、冷熱による霜や氷の発生を防止することだけではなく、保冷材内部に外気から湿分を浸透させないことが、保冷性能を長期間にわたり維持するために重要である。このため通常、保温に使用されるロックウールやけい酸カルシウムのような繊維質、あるいは多孔質保温材は保冷には使用せず、独立気泡から構成され、透湿性が小さい発泡プラスチックが主として用いられる。

4.1 硬質ウレタンフォーム

保冷材として最も多用されているのが硬質ウレタンフォームである。保冷施工においては、冷気を漏らさず表面に霜や氷が発生しないように、保冷構造には外気に通じる隙間を設けない工夫が求められる。その点、硬質ウレタンフォームは2成分の液体原料を常温で化学反応させて生成させるため、工場における成形品製造はもとより、施工現場においても原液を直接に施工対象物にスプレーや注入して発泡させ、継目がない保冷



図17 「フォームナート カバー TN」のLNG温度における性能実証試験

(極低温での使用に即した試験により性能実証を行っている)



図18 「フォームナート カバー TN」による配管保冷施工

4.2 その他の保冷材

硬質ウレタンフォーム以外には発泡ポリスチレンなど独立気泡の発泡プラスチック材料のほかに、用途に応じて特色ある保冷材が使用されることがある。

(1) エアロジェル保冷材

最近では高性能保冷材として米国 Aspen Aerogels, Inc. の製品である「Cryogel® Z」(図19)が一部で使用されるようになってきた。「Cryogel® Z」は繊維系保温材のマットにシリカエアロジェルを担持させたものをアルミニウム箔と複合化した保冷材であり、空気分子の平均自由行程よりも空隙の大きさが小さい多孔質構造のシリカエアロゲルの特性を活かした高い断熱性を持ち、同時にマットの柔軟性による施工性の良さを兼ね備えた点が特長の保冷材である。



図19 「Cryogel Z」

(2) 軽量断熱コンクリート

軽量断熱コンクリートは保冷材としては特殊であるが、3.1項で紹介したLNG地上タンクの底部用断熱材のほか、万一のLNG漏洩事故におけるLNGの初期蒸発を抑制する目的でLNG地上タンク周辺に施工される。当社製品としては黒曜石系軽量骨材を使用したTOMBO™ No.5870「ライトン®」での施工実績がある。

4.3 断熱サポート

断熱サポートは断熱性能と荷重支持の2つの機能を兼ね備えた製品であり、極低温流体の配管を支持するために使用される。断熱サポートは配管の冷熱から配管架構を保護し、同時に配管や流体

の自重を支える重要な役割を担っており、低温配管には欠かすことができない。当社では、高密度の硬質ポリウレタンフォームを主構成部材とするTOMBO™ No.5010「フォームナート® サポート」、TOMBO™ No.5012「フォームナート® アンカーサポート」、TOMBO™ No.5014「フォームナート® フルサポート」を用意している(図20～22)。



図20 LNG配管に取り付けられた「フォームナート サポート」
(写真は配管に保冷材が施工される前の状況)

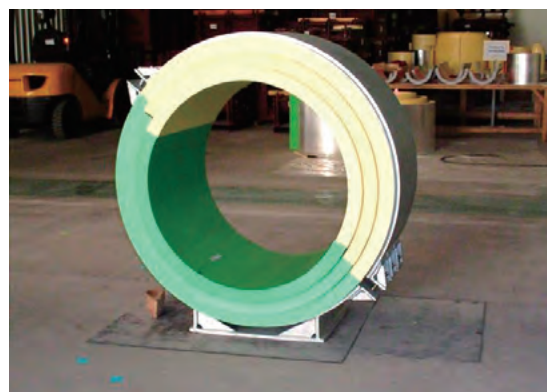


図21 「フォームナート フルサポート」
(写真は36°配管用の製品)



図22 「フォームナート サポート」の性能実証試験
(サポートの性能実証は配管を実使用温度まで冷却した状態で設計荷重を負荷して行っている)

5. 保冷の設計と施工

5.1 保冷の設計

保冷の設計は保冷材の選定、保冷厚さの算定、保冷構造および施工方法の選定の3つに大別される。

保冷材は「フォームナート®」製品に代表される硬質ウレタンフォーム保温材を選定することが基本となるが、施工対象の構造、立地による施工上の制約や、運転条件などを考慮して他の材料を採用あるいは併用する場合もある。

保冷厚さの算定は、詳細はJIS A9501「保温保冷工事施工標準」に譲るが、例として配管の場合は基本的な考え方として運転時の周囲温度、湿度条件を設定し、その条件において保冷材表面が結露しないように保冷厚さを決定する。JIS A9501では標準的な条件として周囲温度30℃、相対湿度85%が例示されている。また、結露しない要件としては保冷材表面温度が運転時の周囲条件における露点を越えるように設定する。具体的にはJIS A9501に従い、露点+0.3℃とすることが多い。わずか0.3℃と思われるかもしれないが、保冷材表面温度をさらに高めようとするとも図23に示すように保冷材厚さが著しく厚くなるため、経済性と実際の外気の湿度変動を考慮し、実用的条件として上述のように設定されている。

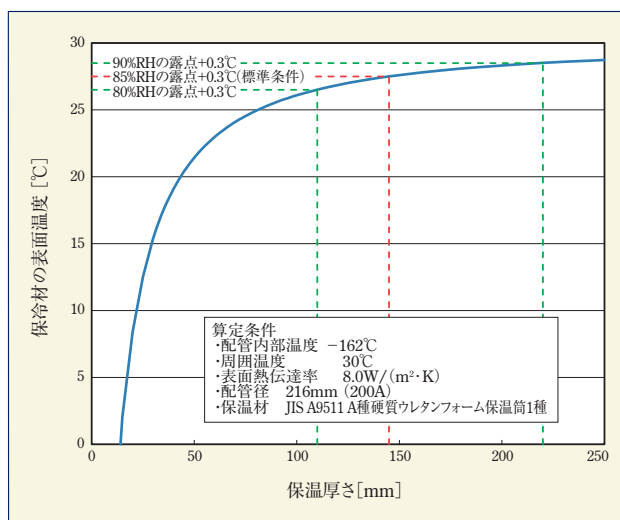


図23 LNG配管の保冷厚さと保冷材表面温度の関係

(JIS A9501記載の熱伝導率参考値を用い、配管径8B、管内部温度-162℃、周囲温度30℃とした場合。湿度85%RH(露点27.2℃)に対応する保冷厚さは145mmであるが、例えば湿度90%RH(露点28.2℃)でも結露しないようにするには保冷厚さ220mmが必要となる)

保冷構造は断熱性能以外にも、外気と施工対象の温度差に起因して保冷材内部に発生する熱応力に対する健全性、外気中の湿分の保冷材内部への侵入防止、そして施工のしやすさ、施工品質の高さ、経済性が主要な設計ポイントとなる。

5.2 施工方法

保冷の施工方法は対象物の形状、構造、運転温度、保冷材の種類によりさまざまである。硬質ウレタンフォームを例とすると、対象物の形状によって最適な施工方法が任意に選択できる。例えば、冷凍倉庫の壁面のように広い面を保冷する場合はスプレー施工やボードを貼り付ける工法が、配管の保冷など複雑な構造に対しては成形品と注入発泡の組合せなどの方法が適する。その反面、保冷工事現場において硬質ウレタンフォームの原液を用いて保冷施工するにはそれに応じた化学的知識と熟練が必要である。

6. おわりに

以上、当社の保冷工事と製品について紹介した。特にLNGを対象とする保冷工事は約50年の歴史があり、技術的には既に成熟期にある。今後は、既存のプラントの保全に関連する技術や、高齢社会における人手不足への対応として、施工の省人化が重要な課題となってくると考えられる。

既に一部で「Cryogel® Z」を用いた既存の保冷構造の改修工事や、工程が複雑で熟練を要する硬質ウレタンフォームの現場注入発泡作業を簡易化するための新技術開発などの取り組みをおこなっているところである。これらに関してはまた折を見て紹介することとしたい。

本稿に関するお問い合わせは基幹産業事業本部 工事事業部 工事技術部までお願いいたします。

*「TOMBO」はニチアス㈱の登録商標または商標です。

*「フォームナート」、「ライトン」はニチアス㈱の登録商標です。

*「Cryogel」はAspen Aerogels, Inc.の登録商標です。

冷蔵倉庫の防熱事業について

基幹産業事業本部 工事事業部 工事技術部
株式会社イノクリート

1. はじめに

株式会社イノクリート（以下、イノクリート）がニチアスグループに仲間入りし6年目を迎えた。

イノクリートは、LNG（液化天然ガス）を輸送するLNG船や果物、肉、魚、野菜、乳製品などの食品を輸送する冷凍船の防熱工事^{*1}を手掛ける海洋事業部と、冷蔵倉庫の防熱工事を手掛けるコールドエンジニアリング事業部（以下、CE事業部）からなり、いずれも豊富な実績と大型案件に対応可能な動員力や技術力を強みとしている。

いずれも私たちの生活には欠かせないものであり、防熱工事を通じてエネルギー産業や食品産業を支えている。本稿ではCE事業部が手掛ける冷蔵倉庫の防熱事業について、日本国内の冷蔵倉庫の生い立ちや最近のトレンドなどを交えて解説する。

^{*1} LNG船、冷蔵倉庫の業界では、断熱（保冷）を防熱と呼ぶことが多いため、本稿では表記を「防熱」に統一した。

2. 冷蔵倉庫の歴史

2.1 生い立ち

冷蔵倉庫業はもともと水産品の鮮度を保つために製氷業から発展したものであり、主に漁港を中心に拡大してきた。その後、流通の近代化に伴い、畜産物や農産品も保管対象となった。

冷蔵倉庫は、戦後に建設が進み、拡大の契機は1970年の大阪万博であったと言われている。大阪万博では、半年間で6420万人（1日平均35

万人）の入場者があった。そこで短時間に多くの食事を提供するため、会場から遠く離れた工場で食材が調達・加工され、冷凍されたものをトラックで万博会場へ運ぶ、セントラルキッチン方式が採用された。同方式は、集中調理方式と言われ、複数のレストランや学校・病院など大量の料理を要する施設の調理を一手に引き受ける方法である。調理場と消費施設が必然的に離れた場所にあり、一度調理されたものが冷凍食品や半製品の形で保存されるため、温度管理が可能な輸送車や保管用の倉庫が必要となった。

大阪万博が開催された1970年はファミリーレストランの第1号である、すかいらーく府中店がオープンした年でもあり、翌年1971年にはロイヤルホスト1号店、マクドナルドの日本1号店が開店し、さらに1972年にはロッテリア、モスバーガーが続いて誕生した。これら外食チェーンのその後の発展については周知の通りである¹⁾。その後も冷凍食品の簡便性や冷蔵倉庫の品質保持機能は急速に発展し、食品にとどまらず、医薬品、化学品、電子部品、生花などに温度管理を要した輸送・貯蔵が広がり、1990年頃まで急速に冷蔵倉庫の設備能力（所管容積）は伸び続けた。

2.2 最近のトレンド

1990年台に入り、老朽化した倉庫の立て替えができない中小企業の撤退により営業用の冷蔵倉庫（倉庫業法により営業の登録を受けた冷蔵倉庫）の事業所数は減少に転じた。その一方で、新規施設の規模が大型化したため、2000年頃ま

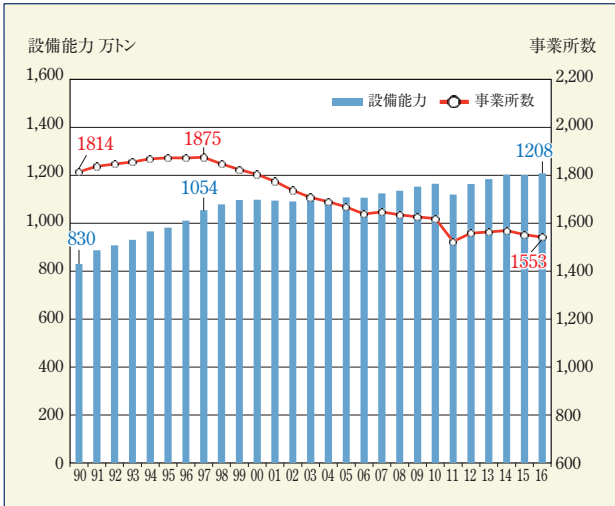


図1 冷蔵倉庫の総設備能力と事業所数の推移²⁾

※2011年は震災の影響で一部データが収集できていない。
 ※冷蔵倉庫の設備能力は1トン=2.5m³として容積換算できる。

では冷蔵倉庫の設備能力は伸び、以降は横ばいから微増で推移している (図1)。

現在、冷蔵倉庫は、日本国内だけで1000社以上が保有しているが、冷蔵の大手企業20社が占める設備能力の割合は、90年代初頭に30%程度であったのに対し、現在は半数程度となっている。今後も老朽化した小型倉庫が解体され、新規の大型倉庫に集約される流れは続くと思われる。

2017年4月現在の企業 (グループ) 別冷蔵倉庫の設備能力上位10社を示す (表1)。主に加工食品 (冷凍食品) や水産物を取り扱う製造業、また顧客の荷物を預かり保管・運送を手掛ける物流専門業などが名を連ねている。

表1 冷蔵大手10社の設備能力³⁾ (2017年4月現在)

順位	企業名	棟数	設備能力 (万トン)
1	ニチレイグループ	133	146.7
2	横浜冷凍	59	84.7
3	マルハグループ	61	63.5
4	東洋水産グループ	32	48.4
5	C&F ロジホールディングス	37	47.6
6	日本水産グループ	31	40.9
7	松岡	9	27.3
8	キューソー流通システム	44	25.9
9	鴻池運輸	29	24.9
10	二葉グループ	13	22.4

3. 保管温度帯の区分

配送・保管時の保管温度帯は、一般には冷凍・冷蔵・常温の3種類で呼ばれる。冷蔵倉庫では、C級 (クーラー級) やF級 (フリーザー級) の温度帯での室温管理を行っている。実際には配送商品の特性に合わせて非常に細かい区分がなされており、さらにチルド (-5~+5℃)、氷温冷蔵 (-2.2~+2℃)、パーシャル (-3~-2℃) などの区分もあり、食品のおいしさを保つための工夫がなされている (図2)。

また保管する荷物が時期毎に異なる場合は、幅広い温度範囲が制御できるFC級冷蔵室が建造される。

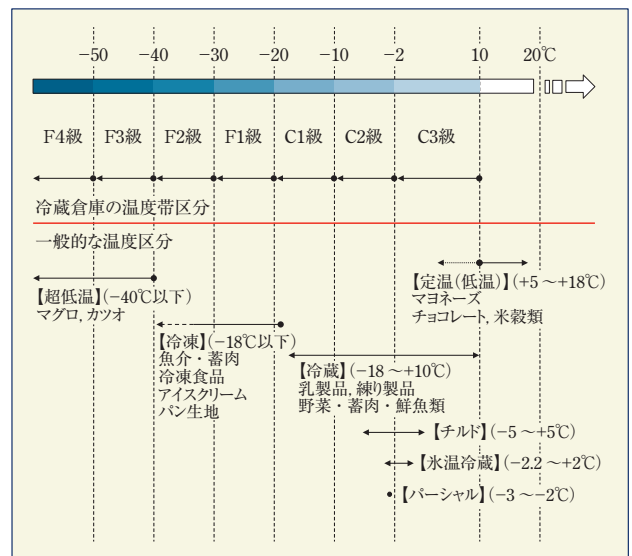


図2 冷蔵倉庫の保管温度帯⁴⁾

4. 近年の冷蔵倉庫の建設需要

現在、冷蔵倉庫の建設需要は建て替えが主であるが、荷物を預ける荷主の要求も年々、高度・多様化しており、建て替えと同時に倉庫の機能向上を図るケースや、増築、補修、改修工事なども増えている。ここでは冷蔵倉庫建設に関わる要因について紹介する。

4.1 老朽化

冷蔵倉庫の法定耐用年数は約20年と普通倉庫 (約30年) より短いですが、減価償却終了後、相当の

年数が経過している冷蔵倉庫が多数残存している。実質的なライフサイクルや投資回収期間は非常に長く、築後30年を超える冷蔵倉庫は全体の半数を超える（図3）。

一般的には築後40年に達すると、維持費用がかさんでくるため、総改修に踏み切るケースが増えてくる。

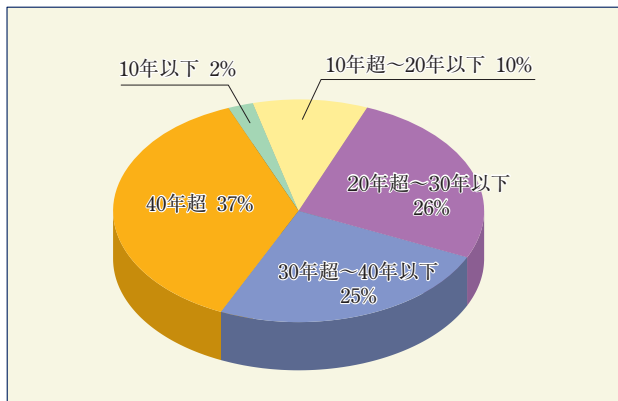


図3 冷蔵倉庫の築後経過年数 (2015年6月時点) 5)

4.2 フロン規制への対応

かつて冷凍設備の冷媒や防熱材の発泡剤として使用されてきたフロンガスは、オゾン層破壊・温室効果ガスであるため、順次規制されている。日本国内ではCFC (R-11, R-12など) は1995年に、HCFC (R-22など) は2020年に全面生産停止が決定している。また2016年には、代替フロンHFC (R-134a, R-404Aなど) についてもモントリオール議定書 (MOP28) により、今後全世界で生産量が大幅に削減されることが決定した。ユーザー側の環境意識も確実に高まってきており、今後は自然冷媒 (アンモニア・二酸化炭素など) やノンフロン防熱材の採用が進むと考えられる。

4.3 新規の省エネ対策・温度管理精度の改善

2011年の震災以降、国が企業に課する省エネ基準も高まっている。LED照明や省エネ設計の冷蔵設備を導入するケース、また荷捌き場での荷物の温度変化を極力小さくするために高性能ドックシェルター、外気の流入を防ぐための陽圧設備の採用なども進んでいる。

4.4 その他

食品の安全・安心を保つため、部外者が冷蔵倉庫内に入り込めないようにセキュリティゲートや顔認証システムの導入、監視カメラの設置箇所を増やしたりするなど、人為的な異物混入を防ぐための対策 (フードディフェンス) も広がっている⁶⁾。また、運送業の過重労働問題に対応してマテハン (Material Handling) 技術やIT技術による荷積みの予約システムの導入のほか、冷蔵倉庫敷地内のトラックの動線を整備し、待機時間や交通渋滞の解消に積極的に取り組むケースが増えている。

5. 冷蔵倉庫の防熱方式

冷蔵倉庫は家庭で使われる電気冷蔵庫を大きくしたような構造をとっており、内部の保管物が防熱材で覆われている、また隣室と異なる温度で運転される場合は、間仕切りの部分も防熱の対象となる。

工事は主に新築と改築 (改造) があり、新築で冷蔵倉庫を計画する際に採用される防熱方式はおおむね「プレハブ式」と「築造式」に大別される。「プレハブ式」は、工場製作された防熱パネルを組み立てて、冷凍冷蔵室を形成することをいう。一方、「築造式」とは構造物 (または下地材) に防熱材を施工して構造物と一体となって冷蔵倉庫を構築することをいう。

以下に主だった防熱方式を紹介する。

5.1 外防熱方式

屋外や躯体などを下地にして防熱する方式 (図4) で、躯体コンクリートが蓄熱効果を持ち、入庫品の状態、扉の開閉頻度に比較的影響を受けずに庫内温度を維持できる。後述の内防熱方式に比べると、同じ躯体であれば、庫内容積を大きく取ることができる。また仕上げがコンクリートになる部屋が多くなるので、防湿層の破損が少ない。一方で温度条件の多様な倉庫には不向きであり、運転開始後に倉庫の温度条件を変更することが困難である。

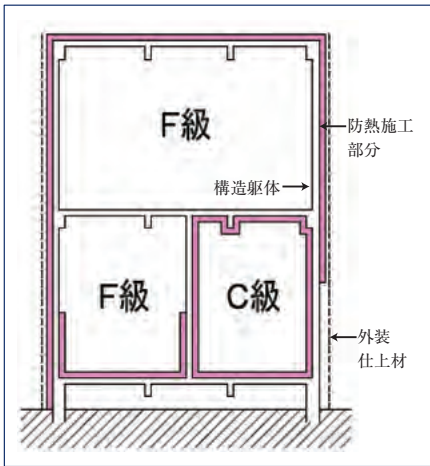


図4 外防熱方式

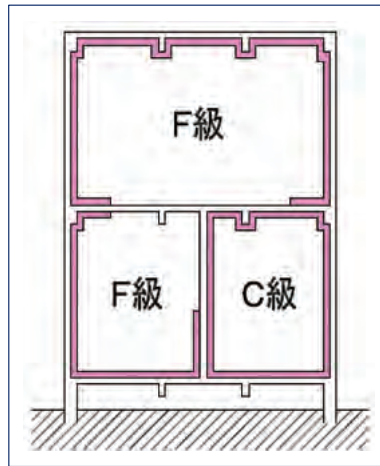


図5 内防熱方式

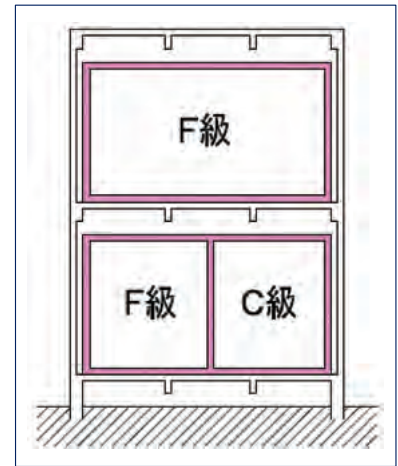


図6 自立式パネル方式

5.2 内防熱方式

屋内から躯体などを下地にして防熱する方式（図5）で、改造時に採用される場合が多い。多様な温度帯の倉庫を混在でき、竣工後の温度条件変更による改造工事にも対応しやすい。一方で、梁や支柱部分の構造が複雑になり、コスト高となりやすく、工期がかかる傾向にある。

5.3 自立式パネル防熱方式

構造物（建物）の中に自立したパネル式冷蔵倉庫を組み立てる方式（図6）で内防熱方式一つと言える。通常の内防熱方式は防熱材を建物（躯体）に直接貼り付けたり吹付けたりするのに比べ、自立式パネル防熱方式は建物に密着している部分は床だけである。清潔感のある仕上がりで撤去後に現状復旧がしやすい。パネルが工場製作品のため現場施工や現状復旧期間が短い。一方で他方式に比べて構造物（建物）の容積に対して庫内容積が小さくなる。

（JRS-0001）が有用であり、その指針が熱流密度 Ψ で示されている。表2に防熱の熱流密度の基準値を示す。また表3に冷蔵倉庫の防熱計算に使用される表面の熱伝達率を、表4に周囲の温度条件を示す。

熱流密度 Ψ (W/m^2) の算出は、次式から求められる。

$$\Psi = K (\theta_a - \theta_r)$$

K : 熱通過率 [$W / (m^2 \cdot K)$]

θ_a : 外部温度 [$^{\circ}C$]

θ_r : 室内温度 [$^{\circ}C$]

表2 防熱の熱流密度（JRS-0001の基準値）

規格	室温 [$^{\circ}C$]	熱流密度 [W/m^2]
標準型	+10 ~ -60	8.5
省エネルギー型	+10 ~ -34	7.1
	-35 ~ -60	6.5

表3 表面の熱伝達率（JRS-0001の基準値）

部位	熱伝達率 [$W/m^2 \cdot K$]
冷蔵室内部	5.8 ~ 8.14
冷蔵室外壁外部	23.3

表4 周囲の温度条件

部位		温度 [$^{\circ}C$]
外壁の表面温度		+33
天井温度		+40
床下温度	地盤に接している場合	+15
	地盤に接していない場合	+25

6. 防熱設計と防熱材料⁷⁾

6.1 防熱設計

冷蔵倉庫の防熱性能は防熱材の厚みが大きくなるほど向上し省エネルギーになるが、イニシャルコストが高くなる。そこで実際の設計では、費用対効果を考慮し仕様を決定する。冷蔵倉庫の建屋防熱に関しては、日本冷凍空調学会規格

この規定に基づき計算された防熱厚さの一例を表5に示す。冷蔵倉庫としてはもっともポピュラーな-25℃程度の運転温度でも防熱厚さは200mm程度となり、一般的な液化天然ガス(-162℃)の運転設備と比較しても、防熱厚さは同等かそれ以上となっている。冷蔵倉庫はライフサイクルが長く、ヒートロスが即運転コスト(電気代)に反映されるため、省エネルギーを重視した防熱設計となっているためである。さらに日照時間も考慮して、建物の方角毎に外壁の防熱厚さを設計するケースもある。

表5 防熱厚さの計算例

単位 [mm]

室内温度 [℃]	場所		
	天井	外壁	床
+10以上	125	100	50
5	150	100	75
0	150	125	100
-5	175	150	125
-10	200	175	150
-15	225	200	150
-20	250	200	175
-25	250	225	200
-30	275	250	225
-35	300	275	250
-40	325	300	250
-45	350	325	275
-50	400	375	325
-55	425	400	350
-60	450	425	375

A種押し出し法ポリスチレンフォーム保温板で省エネ型設計を行った場合

JIS A9511 3種

熱伝導率 λ [W/m・K] = 0.029 + 0.00014 θ (θ : 平均温度℃)

6.2 防熱材の種類

防熱材の種類は防熱方式や倉庫躯体の形状、現場での施工性を考慮して選定される。

6.2.1 ポリスチレンフォーム

ポリスチレンフォームは、それ自体を押し出し成形し、一定の規格サイズのボード状となっている。

工場生産品のため、品質が安定しており、寸法精度も良好である。施工方法は接着剤や防熱ピンを使用した貼り付け方法となる。防熱性能が高く、安価であるため、冷蔵倉庫のみならず住宅建材としても多方面に使用されている。また圧縮強度が高いため、冷蔵倉庫の床防熱材として適している。

6.2.2 ポリウレタンフォーム

硬質ポリウレタンフォームは、防熱材の中では最も防熱性能が良いことが特長で透湿抵抗も高い。

原料であるポリオールとイソシアネートの反応によりウレタン樹脂を形成する反応過程で、他の材料とウレタン自身が自己接着する特徴を有するため、接着剤を介することなく、躯体との密着が可能となる。吹付け施工によれば、形状を選ばずシームレスの防熱層を形成することが可能となる。

吹付け施工用ポリウレタンフォームの発泡剤は、現在代替フロン(HFC)が主流であるが、各社とも環境に配慮した次世代発泡剤(HFO)を使用した製品開発の目処が立っており、今後は冷凍機の冷媒と同様に切り替えが進んでいくとみられる。

6.2.3 サンドイッチパネル

2枚の鋼板を成形加工し、その間に防熱材を挟み一体化させたパネル型の防熱材である。意匠性も高く軽量でありながら、すぐれた防熱性、強度、防耐火性、耐久性、施工性を持っており、防熱材と外装板の取り付けを同時に済ませることができる。間に挟みこむ防熱材は、ポリウレタンフォームやロックウールなど、用途によって選定される。

7. イノクリートの防熱工事

近年の冷蔵倉庫は大型化する傾向にあり、新築案件は冷蔵能力2万トン(所管容積5万m³)を超えるケースも珍しくなくなった。ここでは防熱工事の一例を紹介する。

大型冷蔵倉庫は外防熱方式が採用されること

が多い。通常、外壁防熱工事は、建屋の周囲を足場で囲い、防熱材料は大型クレーンを使って足場上に間配りされる。外壁には外装材（板金）を取り付けるための胴縁を固定するブラケット（束）が設置されているため、防熱パネルは切り欠き加工を行ったのち、防熱ピンなどを使って外壁に直接固定される（図7）。その後、切り欠き部分はポリウレタンフォームの吹付け発泡を行い、防熱処理される。

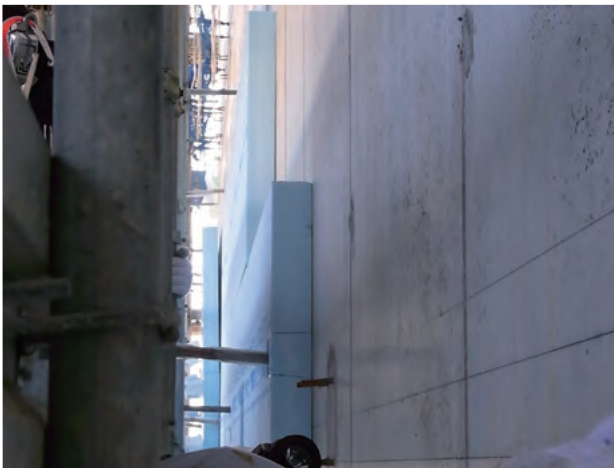


図7 外壁防熱工事

防熱パネルを外壁に直接固定する。足場つなぎやブラケット（束）部分などは切り欠き加工を行う。

床部分は防熱パネルが敷設された後、コンクリートが打設される（図8）。壁の立ち上がりや間仕切り部分は防熱パネルが取り付けられた後、外装板で仕上げられる（図9）。またコンクリート壁の代わりに防熱機能を兼ねた金属板サンドイッチパネルで間仕切りを設けるケースもある。天井や梁などの形状が複雑な部分にはポリウレタンフォームの吹付け発泡が行われる。

このように各防熱材の特長を上手く組み合わせて防熱工事は進められる。

またイノクリートでは小規模の冷蔵・冷凍室であれば、冷蔵設備の選定や設置工事も行っている。冷蔵設備の選定には高い専門性が必要であり、冷蔵室の容積、運転温度、入熱量、保管物の比熱や倉庫の開け閉めの回数などに加えて冷蔵能力の尤度や故障に備えた冗長性なども考慮される。



図8 床および立ち上がり部分の防熱工事

防熱パネルを敷設する。床部分はコンクリートが打設されて完成となる。

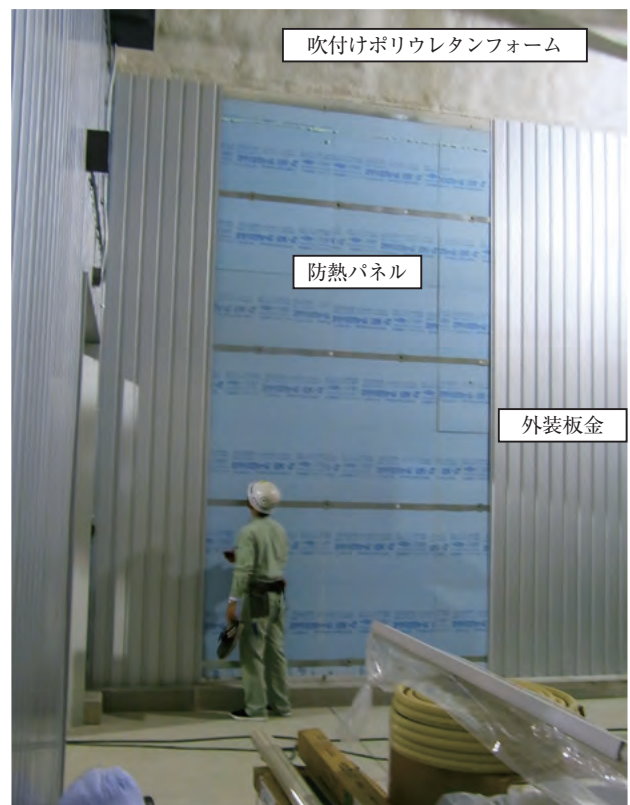


図9 間仕切り部分の防熱工事

防熱パネルと吹付けポリウレタンフォームで防熱処理を行い、表層は外装板金で仕上げられる。

8. おわりに

近年、私たちの食生活は多種多様化し、食品の輸送や貯蔵の技術も発展してきた。冷蔵倉庫もその一翼を担っている。

今後望まれる冷蔵倉庫は、例えば、電気を節

約し、環境に配慮した材料で、食の安全を確保できる冷蔵倉庫と考えられ、ノンフロン防熱材の採用や防熱の高性能化、難燃化などが進んでいくと考えられる。

また少子高齢化に伴う労働人口の減少や2020年に控える東京五輪に向けて建設業界の労働者不足も深刻となることが予想されるため、リニューアル需要に応えるための工事の省力化技術も必要になると考えられる。

イノクリートの防熱工事は、日本各地で日々、改良や工夫を加えながら、今日も複数の案件が同時進行している。個別の案件については、また機会を改めて紹介することとしたい。

今後も高品質の防熱工事を提供するため、営業、設計、工務が一体となり、お客さまのニーズに応じていきたいと考えている。本稿に対するお問い合わせは株式会社イノクリート（東京営業部）までお願いいたします。

参考文献

- 1) 森隆行, 石田信博, 横見宗樹, コールドチェーン, 晃洋書房, p20-25 (2013年)
- 2), 3), 5) 日本冷蔵倉庫協会 資料
- 4) 公益社団法人 日本冷凍空調学会, 改定新版 冷蔵倉庫, p218 (2012年)
- 6) 首都圏を支える冷蔵倉庫～冷蔵倉庫を「あるく, みる, きく」2～, 水産タイムズ社, p90, p105, p134, p139, p143 (2017年)
- 7) 公益社団法人 日本冷凍空調学会, 改定新版 冷蔵倉庫, p76-80, p90-95 (2012年)

エネルギー産業を支えるニチアスの保冷技術



ノンフロン硬質ウレタンフォーム
フォームナート® TNシリーズ

低温流体用の配管などに使用されるウレタンフォーム保温材です。



低温配管用断熱支持材
フォームナート® サポート

断熱性と耐加重性を備えた低温流体配管用の支持材です。



低温配管用うず巻形ガスケット
グラシール® ボルテックス® ガスケット-L

低温のフランジやバルブなどに使用されるシール材です。



保冷工事

LNG基地や化学プラントなどの低温設備に保冷材を取りつける工事です。

株式会社イノクリート

株式会社イノクリートは、2013年、ニチアス株式会社の完全子会社として設立。2014年3月株式会社井上冷熱よりコールドエンジニアリング事業および海洋事業を譲り受け、着実に成長の道を歩んでいます。

これからも、冷凍、冷蔵のエンジニアリング会社として環境保護と省エネルギー社会の実現に向けて貢献してまいります。



● 事業紹介

コールドエンジニアリング部門



食の安全と人々の健康を考える
断熱・冷却のスペシャリスト

海洋部門



生活の安全と人類の豊かさを提供する
断熱・冷却のスペシャリスト

● 会社概要

商号	株式会社 イノクリート
設立	平成25年11月27日
資本金	2,000万円
代表者	代表取締役 高野 哲郎
社員数	52名(2018年1月現在)

本社

〒542-0081

大阪府中央区南船場4-11-10 ニチアス(株)大阪支社5階

TEL(06)6120-1910(代表) FAX(06)6120-1912

東京営業部

〒104-0043

東京都中央区湊1-6-11 ACN八丁堀ビル8階

TEL(03)3551-6756(代表) FAX(03)3551-6766

<http://www.inocrete.co.jp>

繊維系多孔質吸音材料のBiotパラメータの推定

研究開発本部 CAE室 三木達郎

1. はじめに

2016年から国内で自動車の車外騒音規制が施行された¹⁾。2020年には2dB, 2024年には4dB (いずれも2016年基準)の騒音低減が要求されている。また、燃費・CO₂基準や規制が強化され、2020年からは2015年より20%以上の燃費改善が必要になる²⁾。騒音と燃費両面の規制強化に対応するため、防音部品のさらなる性能向上と軽量化が期待されており、これに有効な材料が繊維系多孔質材料である^{3), 4)}。繊維系多孔質材料の音響性能はBiot理論によって計算できることが知られている⁵⁾。Biot理論は、材料特有のBiotパラメータを測定することで、任意形状の製品や、組み合わせた材料の音響性能を予測することが可能である。すなわち、Biot理論を用いることで、製品試作を行うことなく迅速に材料の組み合わせを検討することができる。しかしながらBiotパラメータは、同種材料であってもかさ密度が異なれば、再試作し再測定する必要がある。

当社はこれまでに自動車の防音部品の高性能化と設計迅速化を目的に、Biot理論を用いた音響性能の予測モデル構築に取り組んできた。今回、Biotパラメータを繊維特性から定量的に推定する技術を構築した。その結果再測定を伴わなくても材料の密度や繊維径からBiotパラメータの推定が可能になった。これにより繊維系多孔質材料の繊維特性から吸音率を予測可能な技術を確立したので、その技術について紹介する。

2. 吸音率予測の流れ

本稿ではまず、繊維系多孔質材料の音響系Biotパラメータをそれぞれ実測し、繊維特性とBiotパラメータの相関を確認する。次に繊維特性から、Biotパラメータを推定する式を作成し、その精度を確認する。さらに熱的特性長、粘性特性長を繊維特性から求める既存理論式の精度を確認する。最後に、推定したBiotパラメータとBiotモデルをベースとしたJCA (Johnson-Champoux-Allard) モデルを用いて、吸音率を予測し、実測吸音率と比較する。

3. JCAモデル

JCAモデルでは、多孔質材料中の隙間を通過する空気伝播音は、実効密度と実効体積弾性率で表現する。特に、空気の粘性摩擦によるエネルギー減衰を実効密度に、空気の圧縮膨張による熱的散逸を実効体積弾性率に組み込んだことを特徴とする。さらに、Biotモデルをベースとすることで、多孔質材料の骨格を介した固体伝播音も表現に加えることができる。ここで、一般的な吸音率はエネルギー反射率を用いて式(1)で表される。

$$a = 1 - |r|^2 \dots\dots\dots(1)$$

詳細な式展開は省略するが、エネルギー反射率は、JCAモデルを用いることで以下の式(2), (3)で示す実効密度、実効弾性率によって表すことができる。

$$\tilde{\rho}(\omega) = \frac{\alpha_\infty \rho_0}{\varphi} \left[1 + \frac{\sigma \varphi}{i \omega \rho_0 \alpha_\infty} \sqrt{1 + i \frac{4 \alpha_\infty^2 \mu \rho_0 \omega}{\sigma^2 \Lambda^2 \varphi^2}} \right] \dots\dots\dots (2)$$

$$\tilde{K}(\omega) = \frac{\gamma P_0 / \phi}{\gamma - (\gamma - 1) \left[1 - i \frac{8 \kappa}{\Lambda^2 \omega} \sqrt{1 + i \frac{\Lambda'^2 \omega}{16 \kappa}} \right]^{-1}} \dots\dots\dots (3)$$

ここで、 α_∞ は迷路度、 ρ_0 は空気の密度、 ϕ は空隙率、 σ は流れ抵抗、 i は虚数単位、 ω は角振動数、 μ は空気の粘度、 Λ は粘性特性長である。また、 γ は比熱比、 P_0 は平衡時の圧力、 κ は温度拡散率、 Λ' は熱的特性長を示す。音響性能をBiotモデルで表現することにより、周波数領域に連続的に表現された吸音率スペクトルをBiotパラメータに縮約することができる。表1にBiotパラメータの一覧を示す。なお、 ρ はかさ密度で真密度の ρ_t とは以下の関係式が成り立つ。

$$\rho = \rho_t (1 - \phi) \dots\dots\dots (4)$$

表1 Biotパラメータ

音響系Biotパラメータ		構造系Biotパラメータ	
σ	流れ抵抗 [Ns/m ⁴]	ρ	かさ密度 [kg/m ³]
ϕ	空隙率 [-]	η	損失係数 [-]
α_∞	迷路度 [-]	E	ヤング率 [N/m ²]
Λ	粘性特性長 [m]	ν	ポアソン比 [-]
Λ'	熱的特性長 [m]		

4. 実験

4.1 試験体

試験体には、平均繊維径1.5、1.8、2.4、4.1、5.0 μm のグラスウールを用いて、かさ密度7～33kg/m³の繊維系多孔質材料を60種類用意した。繊維の代表径の評価はSEM（走査型電子顕微鏡、日本電子製、JSM7600F）で形状観察（図1）を行い、体面積平均径を代表径とした。

4.2 流れ抵抗測定

作製した試験体の流れ抵抗を評価するため、流れ抵抗測定装置（日本音響エンジニアリング製、AirReSys）を用いて流速0.5、1.0、1.5、2.0、2.5、3.0mm/sにおける圧力損失を測定し、流れ抵抗を換算した。その流れ抵抗値を縦軸にし、横軸

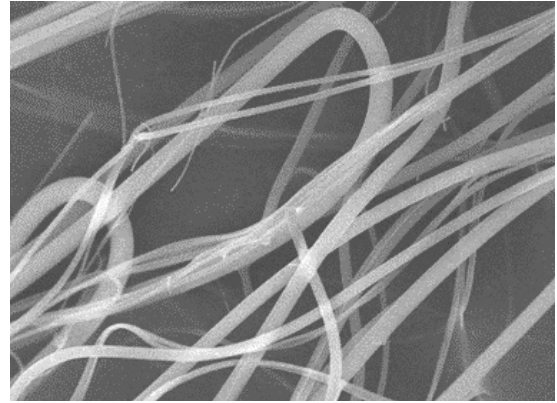


図1 試験体を使用したグラスウールの一例（SEM像）

に各試験体のかさ密度、媒介変数を各試験体の平均繊維径としたグラフを図2に示す。気孔率の値が同じ場合は、平均繊維径が小さい1.5 μm の流れ抵抗が最も大きくなり、平均繊維径が大きい5.0 μm の流れ抵抗が最も小さくなった。

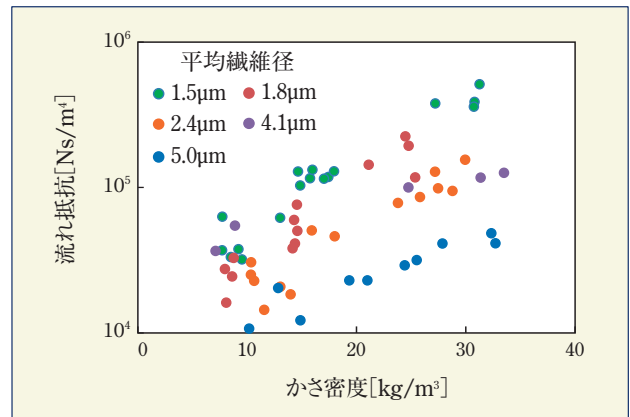


図2 試験体のかさ密度と流れ抵抗の関係

4.3 迷路度・特性長測定

作製した試験体の迷路度、粘性特性長、熱的特性長を超音波測定装置（日本音響エンジニアリング製、Torvith）を用いて測定した。迷路度はn2法、特性長はアルゴンガスと空気を用いたQ δ 法で求めた。測定周波数は100～1000kHzである。

迷路度の代表的な測定結果を図3に示す。迷路度については繊維種や多孔度によらず、ほぼ1であることがわかった。

熱的特性長および粘性特性長の代表的な測定結果を図4、5に示す。



図3 n2法で求めた試験体の迷路度

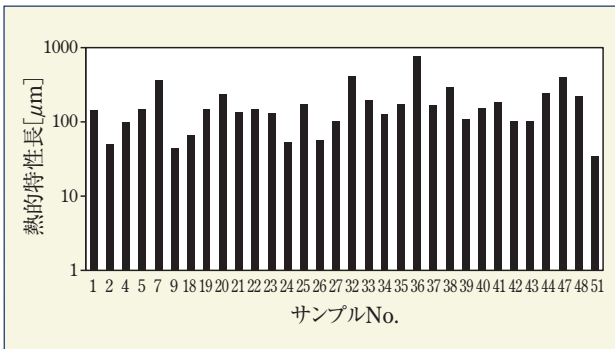


図4 Qδ法で求めた試験体の熱的特性長

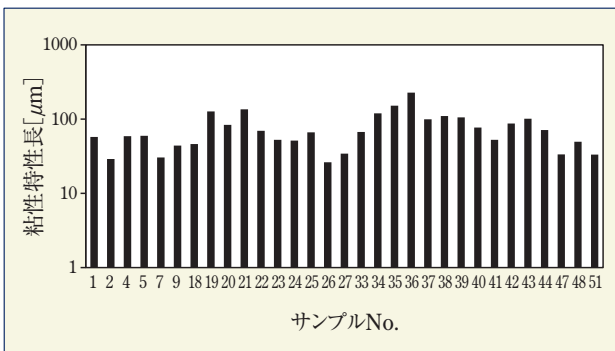


図5 Qδ法で求めた試験体の粘性特性長

ここで u は空気の流速, L は試験体厚さ, k は透過率。

一方, 流れ抵抗の定義式は式 (6) で表される。

$$\sigma = \frac{\Delta p}{uL} \dots\dots\dots (6)$$

従って, 流れ抵抗は空気の物性値である粘度と多孔質体の形状因子である透過率で表すことができる。

$$\sigma = \frac{\mu}{k} \dots\dots\dots (7)$$

そこで本稿では, 流れ抵抗を空気の粘度と繊維特性の関数を用いた実験式で表せると考え, 未知係数を流れ抵抗の実験値から最小二乗法を用いて決定した。

$$\sigma = A\mu(1 - \phi)^B D^C \dots\dots\dots (8)$$

ここで, D は繊維径, A, B, C は実験から求めるフィッティング係数である。

流れ抵抗に対する近似関数のカーブフィット結果を図6に示す。それぞれ $A = 8.89 \times 10^5$, $B = 1.40$, $C = -1.12$ とすると良好にフィットしていることがわかる。なお, 平均繊維径が $5.0 \mu\text{m}$ の試験体については, 試料中に密度のバラツキが大きく, 局所的に密度の低い部分が生じるため, 実測の流れ抵抗が近似式よりも低くなる傾向にあると考えられる。

5. 音響系Biotパラメータ推定

5.1 流れ抵抗

多孔質材料中における低レイノルズ数流体の場合, Darcyの法則に従い, 式5に示すように圧力損失は粘度, 流速, 厚さに比例し, 透過率に反比例することが知られている⁶⁾。

$$\Delta p = \frac{\mu u L}{k} \dots\dots\dots (5)$$

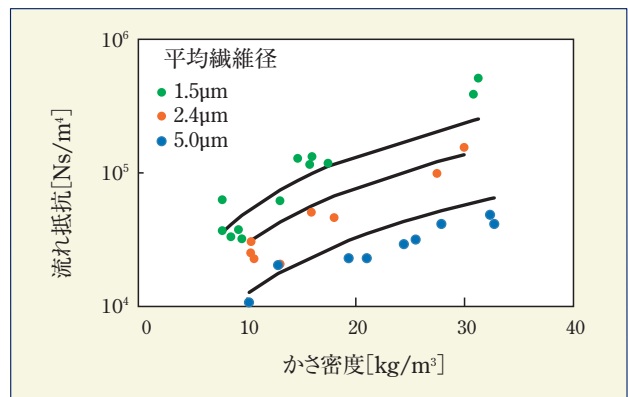


図6 流れ抵抗に対する近似関数のカーブフィット

5.2 熱的特性長・粘性特性長

4.3.で用いたQδ法は、超音波のエネルギー減衰を異なるガス中で測定することで2種類の特性長を算出することができる。しかしながら、細径繊維の試料においては超音波のエネルギー減衰が大きくなるので、超音波が試料を透過しづらくなり測定が困難になる問題がある。そこで、本稿では超音波による特性長測定を他の測定法と比較することで測定の妥当性を評価するとともに、各特性長に対しての予測式を検証した。

熱的特性長は式(9)で示すように表面積と空隙体積で定義されており⁷⁾、式(10)のように変換することで比表面積と多孔度で置き換えることができる。

$$\Lambda' = 2 \frac{\int_V dV}{\int_S dS} \dots\dots\dots (9)$$

$$\Lambda' = 2 \frac{\phi}{(1-\phi)S_v} \dots\dots\dots (10)$$

ここで、Sは繊維表面積、Vは空隙の体積、S_vは繊維の比表面積（単位体積当たりの全表面積、体積と表面積は固体分の実質体積と実質表面積）である。

また、繊維を円柱形状と近似すれば、式(11)のように多孔度と繊維径のみで表現することもできる。

$$\Lambda' = \frac{\phi}{2(1-\phi)} D \dots\dots\dots (11)$$

つまり、SEMおよび比表面積測定装置（BET）を用いて繊維径や比表面積を測定することで熱的特性長を求めることが可能である。図7にSEMと超音波（Qδ法）で測定したそれぞれの熱的特性長の比較例を示す。また、図8にBETと超音波（Qδ法）で測定したそれぞれの熱的特性長の比較例を示す。超音波測定と繊維径および比表面積から求めた熱的特性長に大きな差異はなく、式(11)で予測可能であることが分かった。

粘性特性長はJohnsonらによると式(12)で予測することができる⁸⁾。cは多孔質体の空隙形状に依存するパラメータでありおおむね1であることが知られている。

$$\Lambda = \sqrt{\frac{8\eta\alpha_\infty}{\sigma\phi}} \frac{1}{c} \dots\dots\dots (12)$$

c=1として、式(12)と超音波（Qδ法）の測定結果との比較を図9に示す。式(12)が超音波の測定結果をよく表していることがわかる。

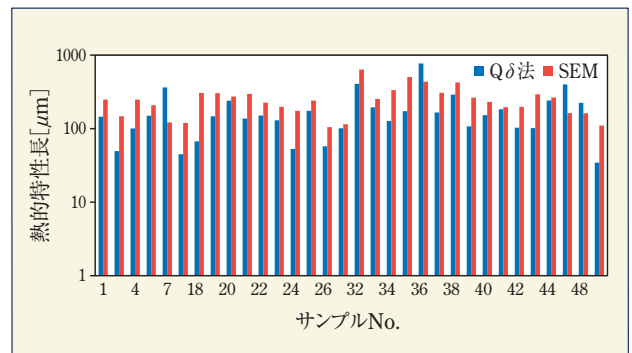


図7 繊維径および超音波（Qδ法）で測定した試験体の熱的特性長の比較例

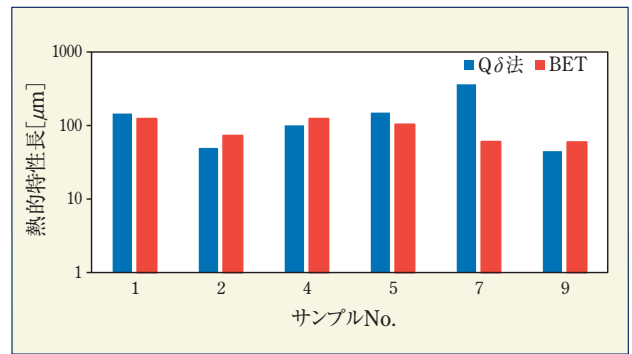


図8 BETおよび超音波（Qδ法）で測定した試験体の熱的特性長の比較例

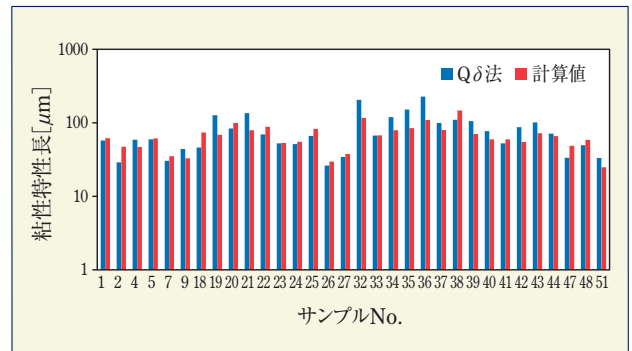


図9 式(12)による計算結果と超音波（Qδ法）で測定した試験体の粘性特性長の比較

このことから、式(12)において $c=1$ としても非常に有益な結果が得られることがわかった。

熱的特性長と粘性特性長の比は、試料の繊維配向分布によって0.5から1.0までの値をとることがAllardらによって予測されている⁹⁾。そこで、本測定から熱的特性長と粘性特性長の比を取った結果、0.56(標準偏差0.3)となり、おおむねAllardらの予測範囲に収まった。なお、大きな標準偏差となった理由としては、試験体中の密度のバラツキの可能性があると考えられるが、今後詳細を明確にしたい。

6. 垂直吸音率によるBiotパラメータ推定値の検証

各試験体の背後剛壁条件における垂直入射吸音率を測定し、前章で推定したBiotパラメータを用いてJCAモデルから求めた吸音率の予測値との比較を行った。結果の一例を図10～12に示す。図10、11から平均繊維径 $1.5\mu\text{m}$ 、 $2.4\mu\text{m}$

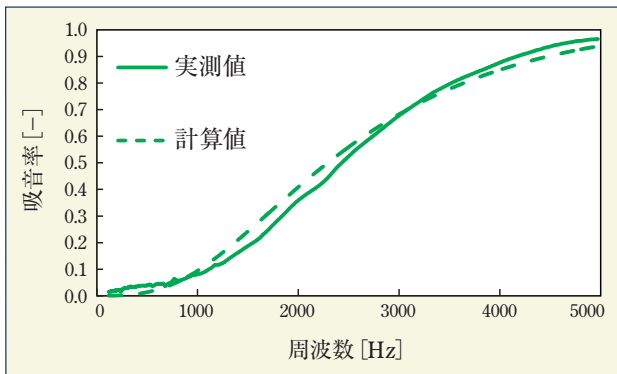


図10 垂直入射吸音率の実測値と予測値の比較(平均繊維径 $1.5\mu\text{m}$)

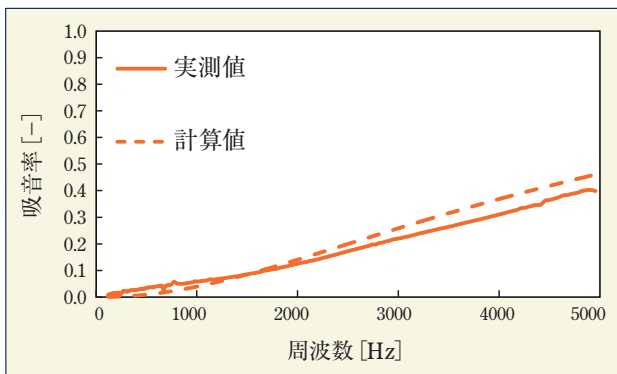


図11 垂直入射吸音率の実測値と予測値の比較(平均繊維径 $2.4\mu\text{m}$)

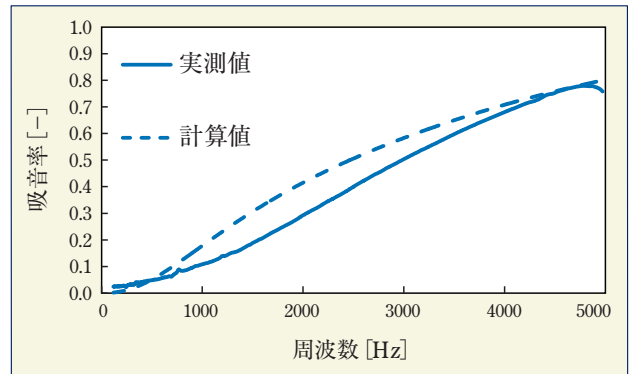


図12 垂直入射吸音率の実測値と予測値の比較(平均繊維径 $5.0\mu\text{m}$)

の試験体は、吸音率の測定値と予測値が良好にフィットしていることがわかる。平均繊維径 $5.0\mu\text{m}$ の試験体(図12)は、前章でも示したように試験体内の密度のバラツキが大きく、局所的に密度の低い部分が生じ、実測の流れ抵抗が近似式よりも低くなる傾向にあるため吸音特性の誤差が大きくなったと考えられる。

以上より、本稿で示した繊維径、多孔度、気体の粘度による流れ抵抗の推定式と、繊維径、多孔度、繊維の比表面積を用いて熱的特性長、粘性特性長を求める既存理論式を用いることにより吸音率が予測可能であることが示された。

7. おわりに

Biotパラメータの実測結果に基づいて、繊維特性によりBiotパラメータを定式化した。その定式化した値を用いてJCAモデルで吸音率を予測し、実測値と比較検討した結果、吸音率を繊維特性である繊維径、多孔度と空気の物性値で予測可能であることがわかった。これにより、防音部品の材料選定や形状設計が容易になり、音響性能の高い防音材料開発の方向性を迅速に決定することが可能になった。

当社は防音材メーカーとして自動車向け防音材を供給し、自動車の性能向上に貢献してきた。今後も今回の成果を取り入れながら、より高性能な防音材の開発を迅速に行っていく所存である。

参考文献

- 1) Proposals for the 03 series of amendments to Regulation, No. 51 (Noise of M and N categories of vehicles).
- 2) 乗用自動車のエネルギー消費性能の向上に関するエネルギー消費機器等製造事業者等の判断の基準等（平成二十五年経済産業省・国土交通省告示第二号）。
- 3) 野口，土居隆之，多田寛子，見坐地一人：次期大衆車軽量防音パッケージの開発，自動車技術会学術講演会前刷集，No.123-05，p.11-15(2005)。
- 4) Tada, H., "Establishment of Performance Design Process for Vehicle Sound-Roof Packages Based on SEA Method," SAE Int. J. Passeng. Cars - Mech. Syst. 8(1):8-15, 2015.
- 5) J. F. Allard and N. Atalla: Propagation of Sound in Porous Media, New York, John Wiley & Sons, Ltd., 2009, 372p.
- 6) H. P. G. Darcy: Les Fontaines Publiques de la Ville de Dijon, Paris, Victor Dalmont, 1856, 655p.
- 7) Y. Champoux and J. F. Allard: Dynamic tortuosity and bulk modulus in air - saturated porous media, Journal of Applied Physics volume 70, issue 4, pp.1975-1979 (1991).
- 8) D. L. Johnson, J. Koplik and R. Dashen: Theory of dynamic permeability and tortuosity in fluid-saturated porous media, Journal of Fluid Mechanics, volume 176, pp.379-402 (1987).
- 9) J. F. Allard and Y. Champoux: New empirical equations for sound propagation in rigid frame fibrous materials, The Journal of the Acoustical Society of America, volume 91, issue 6, pp.3346-3353 (1992).

*本研究は日本大学見坐地教授との共同研究の成果であり，自動車技術会2017年 秋季大会における発表内容の概要である。

著者紹介



三木 達郎

研究開発本部 CAE 室
防音材の音響解析に従事

ニチアスの自動車部品



クルマの環境イノベーションに
『断つ・保つ』技術で貢献します。



シール関連部品

- ゴム/金属複合ガスケット
メタコート®
メタフォーム®
- 排気系&軟質ガスケット
CR ボルテックス®
ジョイントシート
- 摺動材
エクセライド®

熱関連部品

- 遮熱・保温材
インサルカバー™
N-フレチューブ™
- 熱制御
ウォータージャケットスパーサー
- 触媒担体保持材
エコフレックス™

音関連部品

- ブレーキシム材
メタプラス™積層シム
- 防音カバー
エアトーン®

※®が付されている名称はニチアス(株)の登録商標です。
※TMが付されている名称はニチアス(株)の商標です。
ただし「エコフレックス」は英国Safill Ltdの商標です。

吸音性に優れた超軽量無機質スポンジ状素材

研究開発本部

1. はじめに

工場や交通機関などから生ずる騒音は、生活に影響を与える環境問題として捉えられており、種々対策が講じられている。当社には、「断つ・保つ」の技術の一つとして防音技術があり、住宅やプラント向けにロックウールやグラスウールを用いた無機繊維質防音材のほか、有機繊維を主体とした自動車用超軽量防音カバー TOMBO™ No.6690-B「エアトーン®」など各種防音材を製造・販売し、幅広い種類の騒音対策に貢献している。

近年、自動車の車外騒音規制が世界レベルで強化されている。これに対応するため、防音材には高性能化、高耐熱化、さらなる軽量化などの技術革新が求められている。

従来から無機繊維質防音材は耐熱性に優れた防音材として広く用いられているが、必要な防音性能を発現するためには重量増加を伴う場合があり、耐熱性と軽量性を併せ持った無機質防音材の開発が要望されていた。防音技術は吸音と遮音に大別されるが、現在当社では、吸音性に



図1 超軽量無機質スポンジ状素材

優れた超軽量無機質スポンジ状素材（図1、以下、無機スポンジ）を開発中である。ここではその概要について紹介する。

2. 無機スポンジの概要と特長

2.1 無機スポンジの概要

無機スポンジと従来の無機繊維質吸音材であるガラスマットの電子顕微鏡写真を図2に示す。無機スポンジは無機繊維からなるセル状の空隙を無数に形成した、いわゆるスポンジ構造を持つ。

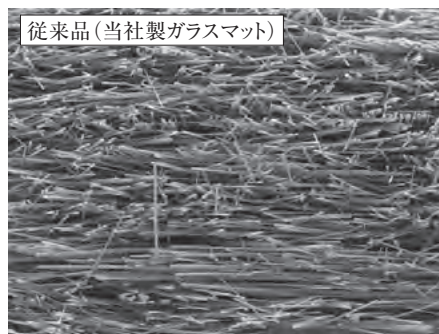
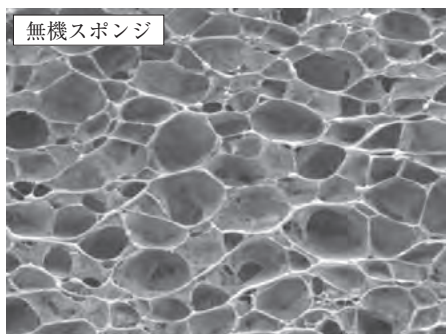


図2 無機スポンジと従来品の構造の違い

この独特な内部構造によって、無機繊維が持つ特性の一つである耐熱性を維持しつつ、従来にない軽量性を実現した（図3）。また、この構造により、吸音性、断熱性、シール性、圧縮復元性など従来の無機繊維質成形体にはないさまざまな特長ある性能を発現する。

無機スポンジは作製条件を変えることで、空隙のサイズを0.1-0.5mm、かさ密度を0.005-0.03g/cm³の範囲で任意に、かつ個別にコントロールすることができる。また、ガラス繊維、ロックウールなどさまざまな無機繊維で作製可能で、耐熱性は使用する繊維相当となる。

作製には、当社の無機繊維の湿式成形技術を応用することができるため、将来的には平板以外の複雑形状にも対応すべく開発を進めている。

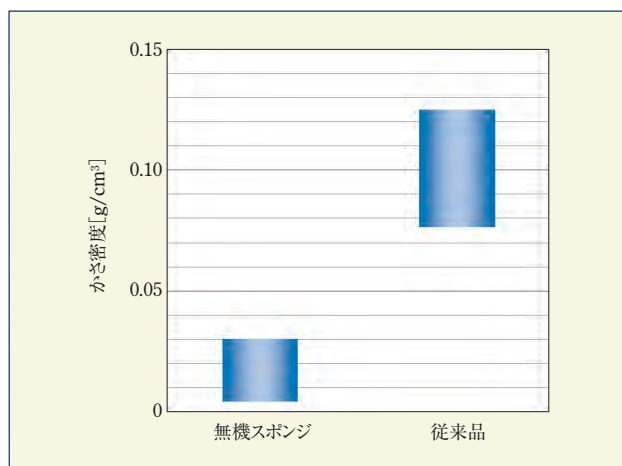


図3 無機繊維質吸音材のかさ密度

2.2 吸音性能

無機スポンジの大きな特長のひとつである吸音性能について紹介する。

吸音率を従来製品のガラスマットと比較したデータを図4に示す。なお、測定に使用した試験体の仕様を表1に示す。吸音率はJIS A1405-2に従い、背後空気層のない剛壁密着条件における垂直入射吸音率を測定した。

試験の結果、無機スポンジは重量（かさ密度）が従来のガラスマットに対して1/5であるにも関わらず、吸音ピークが低周波側にシフトしていることがわかる。

一般に吸音性能は、吸音材の質量や、構造に

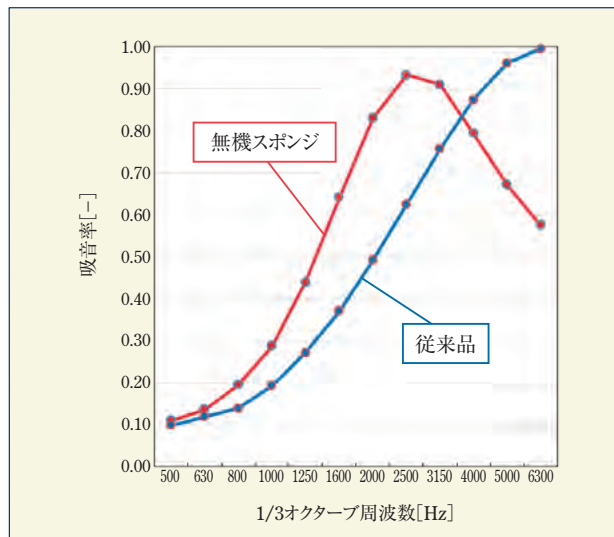


図4 吸音率測定結果

表1 吸音率測定試験体の仕様

	無機スポンジ	ガラスマット
かさ密度 [g/cm ³]	0.02	0.11
厚み [mm]	10	10
材質	ガラス繊維	ガラス繊維

起因する空気の流れ抵抗などに依存する。特に低周波側は質量に依存する割合が多く、重量がかさむ要因となっていた。これに対し無機スポンジは、独自のスポンジ状構造により流れ抵抗の割合が増加したため、軽量でも低周波吸音特性の向上が実現した。この流れ抵抗は、作製法で述べた空隙サイズにより制御可能なため、材料単体で吸音周波数域の調製が可能である。

3. おわりに

新技術として開発中の吸音性に優れた超軽量無機質スポンジ状素材について紹介した。軽量かつ、有機系防音材にない耐熱性を有するため、輸送機器を含めた多方面での応用が期待される。

現在開発継続中の技術のため、製品化時期、サンプル提供時期、価格に関しては未定であるが、今後お客さまのご要望を取り入れ、本技術をさらに進化させ応用製品の開発に努めていく所存ですので、ご意見いただければ幸いです。

本開発品に関するご質問、お問合せはinfo-rd@nichias.co.jpまでお願いいたします。

Q

メタルジャケットガスケットが漏えいしやすいのですが、どのような対策が考えられますか？

A

メタルジャケットガスケットは無機質のクッション材を中芯として、その外周を金属薄板で被覆した構造（図1）をしており、主に大口径の熱交換器や反応器などのフランジに使用されている。

構造的にフランジとの接触面が金属であるためフランジに馴染みにくく、シール性を得るには高い初期締付力が必要である。

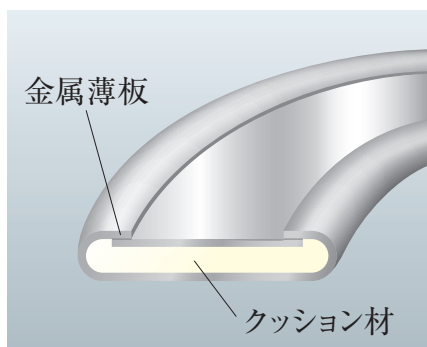


図1 メタルジャケットガスケットの構造

このため、長年の使用でフランジの表面が荒れてきたり、フランジの歪みが大きくなるとガスケットと馴染みにくくなり、今までと同じ締付力でも漏えいする場合があります。また、熱交換器など昇温や降温時の温度変化によって発生するフランジやボルトの熱膨張・収縮にガスケットが追従できなったり、ガスケットの締付力が変動すると漏えいする場合もある。

メタルジャケットガスケットの漏えい対策としては、フランジとの馴染み性を向上させるために、シール補助材を使用したり（対策1）、よりフランジへ追従しやすくシール性に優れたガスケットに変更する（対策2）などの対策が有効である。

【対策1】シール補助材の使用

①ガスケット表面に膨張黒鉛テープ（TOMBO™ No.1221）を貼る（耐熱温度：max400℃）。

膨張黒鉛は、柔軟性に富み耐熱性・耐薬品性に優れた素材でフランジに馴染みやすくなりシール性を改善する。

②ガスケットペーストをガスケット表面に塗布する（耐熱温度：製品による）。

ガスケットペーストによってフランジとガスケット界面の隙間を埋める事でシール性を改善する。

【対策2】 ガasketの変更

対策に有効なガasketの代表例2種類を下記に紹介する。これらのガasketは日本石油学会規格 JPI-7B-88「機器フランジ漏れ防止対策資料」にも機器フランジの漏えい対策に有効なガasketとして紹介されている。

① TOMBO™ No.1804-GRシリーズ「グラシール® ボルテックス® ガasket」(耐熱温度：max450℃)

金属フープと膨張黒鉛フィラーを交互にうず巻状に巻いた構造のセミメタルガasketで、高温・高圧の条件で幅広く使用される。圧縮復元特性に優れフランジに追従しやすく、膨張黒鉛フィラーがフランジに馴染みやすくシール性に優れている。フランジ座面の形状によりガasketに内外輪と呼ばれる補助金属リングを取り付ける必要がある。

② TOMBO™ No.1891-GR「カンプロファイルガasket」(耐熱温度：max400℃)

リング状の金属製平板の表面に特殊形状の山溝加工を同心円状に施し(金属基材)、その表面に膨張黒鉛を張付けた構造のセミメタルガasketである。表面の膨張黒鉛がフランジに馴染みやすく、さらに平らに加工された山の頂上部に締付荷重が集中することで、シール性にも優れ高温・高圧の条件まで使用される。ボルテックスガasketの様に内輪を必要としないため、メタルジャケットガasketと同じ寸法で使用が可能である。構造上、ボルテックスガasketに比べて、ハンドリング性が良いため大口径の場合に施工がしやすい。

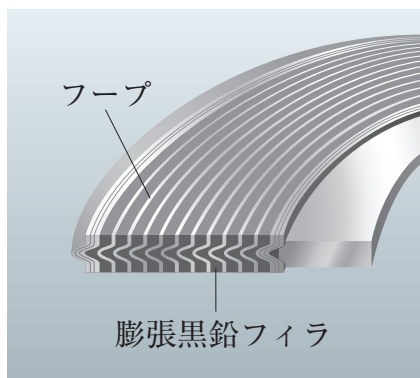


図2 TOMBO™ No.1804-GRシリーズ「グラシールボルテックスガasket」の断面形状
(図は内輪付TOMBO™ No.1804-R-GR)

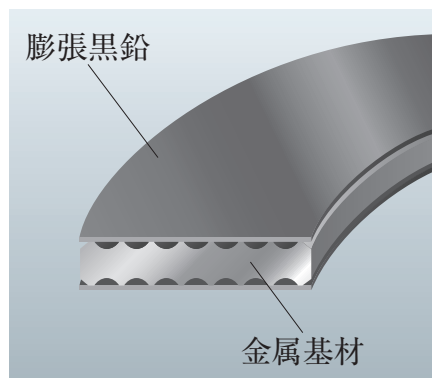


図3 TOMBO™ No.1891-GR「カンプロファイルガasket」の断面形状

参考文献

日本石油学会規格 JPI-7B-88「機器フランジ漏れ防止対策資料」

*本稿は、月刊トライボロジー誌(2014年9月号)に掲載された記事に一部加筆修正を加えたものです。

*「TOMBO」はニチアス(株)の登録商標または商標です。

*「グラシール」、「ボルテックス」はニチアス(株)の登録商標です。

ニチアスの建材製品は、 人と環境の調和をめざし、 安心・安全・快適を 提供しています。



断熱材 | ホームマット®、ホームマットNEO®
MG ビルパック®、MGボード™
マキベエ® ダンネツ、スーパーフェルトン® II, III

耐火被覆材 | マキベエ®、マキベエ® WTA, CLA

煙突材 | カポスタック® スーパー、セラスタック®

内装材 | エコラックス®、エコラックス® エンボス
エコラックス® のき天
エコラックス® エンボスのき天
まがるラックス®
NPラックス® L、NPラックス® H

化粧板 | アスラックス® 200R、アスラックス® 600R

**フリーアクセス
フロア** | ニチアスシグマフロア®
ニチアス オメガフロア®
ニチアス パットフロア®
ニチアス デルタフロア® V

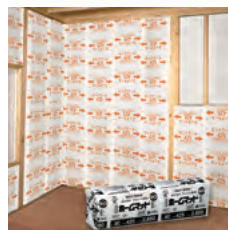
免震耐火材 | メンシンガード® S、メンシンメジ®

その他 | ニチアスカグスベール®

※®が付されている名称はニチアス(株)の登録商標です。
※TMが付されている名称はニチアス(株)の商標です。



巻付け耐火被覆材



住宅用断熱材



フリーアクセスフロア

「ニチアス技術時報」 バックナンバー

2017/4号 通巻 No. 379



- 〈巻頭言〉 浜松研究所の新棟竣工にあたって
- 〈紹介〉 技術展示室 “Innovation Gallery” 開設
- 〈製品紹介〉 断熱材にアルカリアースシリケートウールを使用した TOMBO™ No.9999-NA 「NA ベロー Q®」
- 〈製品紹介〉 クッション材にアルカリアースシリケートウールを使用した TOMBO™ No.1841/1861 「NA メタルジャケットガasket」 シリーズ
- 〈解説〉 医療用マルチルーメンチューブ成形技術
- 〈連載〉 シール材 Q&A (第9回)

2017/3号 通巻 No. 378



- 〈新製品紹介〉 ファインフレックス BIO® 応用製品 TOMBO™ No.5655 「ファインブロック®」
- 〈製品紹介〉 ニチアスのフィルター製品
- 〈製品紹介〉 低濃度有機溶剤濃縮機 TOMBO™ No.8805-SC 「ソルベントクリーン®」
- 〈製品紹介〉 産業用除湿ロータ TOMBO™ No.8800-AC-SG 「ハニクル® SG」 TOMBO™ No.8800-MS 「ハニクル® MS」
- 〈製品紹介〉 気化式加湿+ケミカル物質除去装置 TOMBO™ No.8805-HW 「ハニカムウォッシャー®」
- 〈製品紹介〉 気化式加湿エレメント TOMBO™ No.8808-HE-H 「ヒューセル®」
- 〈連載〉 シール材 Q&A (第8回)

2017/2号 通巻 No. 377



- 〈新製品紹介〉 高温耐熱ボード TOMBO™ No.5461-16LDA 「RF ボード™ 16LDA」 TOMBO™ No.5461-17MDA 「RF ボード™ 17MDA」
- 〈新製品紹介〉 ペースト状不定形耐火物 TOMBO™ No.5675 「ファインフレックス BIO® キャスト」
- 〈サービス紹介〉 プラント設備の省エネルギー対策と保全に貢献する 「e-AIM®工法」
- 〈製品紹介〉 耐薬品性・耐熱性・純粋性に優れたふっ素樹脂製品
ふっ素樹脂ライニング製品
- 〈連載〉 シール材 Q&A (第7回)

2017/1号 通巻 No. 376



- 〈巻頭言〉 新年雑感
- 〈新製品紹介〉 耐高温蒸気性パーフロロエラストマー TOMBO™ No.2675-S2 「ブレイザー® Oリング-S2」
- 〈技術レポート〉 耐高温蒸気性に優れた新規架橋構造の開発
- 〈新製品紹介〉 「ファインフレックス BIO®」 応用製品
- 〈新製品紹介〉 抗菌仕様化粧けい酸カルシウム板 TOMBO™ No.6462-200R 「アスラックス® 200R」 TOMBO™ No.6462-600R 「アスラックス® 600R」
- 〈連載〉 シール材 Q&A (第6回)

次号 2018/2号 通巻 No. 381 は 2018年4月発行予定です。

ニチアス株式会社

<http://www.nichias.co.jp/>

【東日本地区】

札幌支店	TEL (011) 261-3506
苫小牧営業所	TEL (0144) 38-7550
仙台支店	TEL (022) 374-7141
福島営業所	TEL (0246) 38-6173
日立営業所	TEL (0294) 22-4321
鹿島支店	TEL (0479) 46-1313
宇都宮営業所	TEL (028) 610-2820
前橋営業所	TEL (027) 224-3809
千葉支店	TEL (0436) 21-6341
東京支社	TEL (03) 4413-1191
横浜支店	TEL (045) 508-2531
新潟営業所	TEL (025) 247-7710
山梨営業所	TEL (055) 260-6780

【中部地区】

富山営業所	TEL (076) 424-2688
若狭支店	TEL (0770) 24-2474
静岡支店	TEL (054) 283-7321
浜松支店	TEL (053) 450-2200
名古屋支社	TEL (052) 611-9200
豊田支店	TEL (0565) 28-0519
四日市支店	TEL (059) 347-6230

【西日本地区】

京滋支店	TEL (0749) 26-0618
大阪支社	TEL (06) 6252-1371
堺営業所	TEL (072) 225-5801
神戸営業所	TEL (078) 381-6001
姫路支店	TEL (0792) 89-3241
岡山支店	TEL (086) 424-8011
広島支店	TEL (082) 506-2202
宇部営業所	TEL (0836) 21-0111
徳山支店	TEL (0834) 31-4411
四国営業所	TEL (0897) 34-6111
北九州営業所	TEL (093) 621-8820
九州支社	TEL (092) 739-3639
長崎支店	TEL (095) 801-8722
熊本支店	TEL (096) 292-4035
大分営業所	TEL (097) 551-0237

本社 〒104-8555 東京都中央区八丁堀1-6-1

・基幹産業事業本部	TEL (03) 4413-1121
工事業業部	TEL (03) 4413-1124
基幹製品事業部	TEL (03) 4413-1123
プラント営業部	TEL (03) 4413-1126
・工業製品事業本部	TEL (03) 4413-1131
海外営業部	TEL (03) 4413-1132
・高機能製品事業本部	TEL (03) 4413-1141
・自動車部品事業本部	TEL (03) 4413-1151
海外営業部	TEL (03) 4413-1155
・建材事業本部	TEL (03) 4413-1161

研究所

・浜松 ・鶴見

工場

・鶴見 ・王寺 ・羽島 ・袋井 ・結城

海外拠点

・インドネシア ・マレーシア ・シンガポール ・ベトナム
・タイ ・中国 ・インド ・ドイツ ・イギリス ・チェコ
・メキシコ