

# 空調用不燃段ボールダクトの性能に関する調査

## 第1報 不燃段ボールダクトの基本性能

### Investigation on Performance of Nonflammable Corrugated Fiberboard Duct for Air Conditioning System

#### The 1<sup>st</sup> Report: Basic Performance of Nonflammable Corrugated Fiberboard Ducts

正会員 ○渡邊智子 (化学物質評価研究機構)

正会員 仲山和海 (化学物質評価研究機構)

正会員 齊藤貴之 (化学物質評価研究機構)

大武義人 (長岡技術科学大学工学研究院)

Tomoko WATANABE \*<sup>1</sup> Kazumi NAKAYAMA \*<sup>1</sup> Takayuki SAITO \*<sup>1</sup> Yoshito OHTAKE \*<sup>2</sup>

\*<sup>1</sup> Chemicals Evaluation and Research Institute, Japan \*<sup>2</sup> Nagaoka University of Technology

Nonflammable corrugated fiberboard duct is constructed from the corrugated fiberboard coated on the surface with aluminum foil, the tape for covering the cut surface, the foam packing for connecting the ducts, the adhesive, the aluminum glass cloth tape. The corrugated fiberboard duct is light in weight and easy to assemble on site and has excellent workability. From the noncombustible performance evaluation, the thermal insulation performance evaluation, the condensation test, and the air leakage measurement, the “applicability”, “non-combustibility” and “air tightness” required for the air conditioning duct are satisfied.

#### はじめに

空調用不燃段ボールダクトは、亜鉛メッキ鋼板製空調用ダクト (0.5mm厚、共板工法: 約4.2kg/m<sup>2</sup>) と比較して単位面積当たりの重量が、1.94kg/m<sup>2</sup> (今回検討した段ボール) と軽量であり、地震等で落下事故が生じたとしても被害が軽微となるため安全性に優れている。不燃段ボールダクトは、工場から平板のまま大量に搬送でき、現地で簡単に組み立てられることに加えて、3層構造により「断熱性」が高く、結露防止用のグラスウールなどの保温材を必要としないなど「施工性」にも優れている。また、紙製段ボール表面にアルミニウム箔による被覆加工を施すことで、段ボールの可燃性かつ湿気に弱い点を克服して「不燃性」、「気密性」など空調用ダクトに要求される性能を充分満たすよう設計されている<sup>1)</sup>。さらに、ダクト解体時は段ボールとアルミニウムに容易に分離でき、リサイクルも可能で、サステイナブル社会に合致した社会的メリットが高く、亜鉛メッキ鋼板製ダクトの代替として使用が拡大することが予想される。しかし、空調用ダクトには設置後30年の耐久性が要求されるにもかかわらず、不燃段ボールダクトに対する耐久性を定量的に評価した例はない。そこで、不燃段ボールダクトの耐久性を評価するために、本報では、まず基本性能と構造について報告する。

#### 1. 空調用不燃段ボールダクトの構造

##### 1.1 構成部品及び段ボールの構造

本評価には、山田ダンボール株式会社製空調用不燃段ボールダクトを用いた。不燃段ボールダクトの構成部品を目視にて確認し、フルートの段数から段ボールの種類を判定した。段ボールの構造はマイクロスコプ及びSEM (走査型電子顕微鏡) で断面を観察し、アルミニウム箔及び板紙の厚さ寸法を測定した。また、段ボールの厚さをデジタルノギスで測定した。

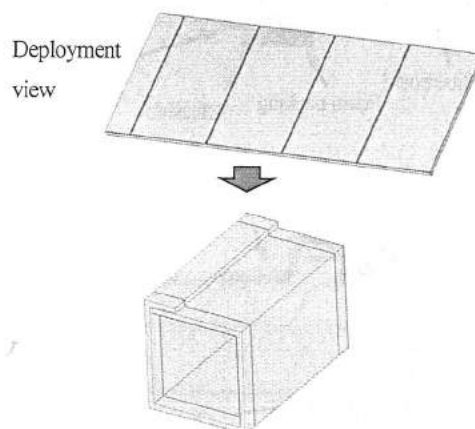


Figure 1 Deployment view and assembly state schematic of nonflammable corrugated fiberboard duct

Figure 1 に不燃段ボールダクトの展開図と組立状態模式図、Table 1 に構成部品及び段ボールの構造調査の結果、Figure 2 に連結部及び組合せ部の断面模式図、Figure 3 に段ボールの断面模式図を示す。

Table 1 Component part of nonflammable corrugated fiberboard duct and structural survey

Item	Result
Component part of nonflammable corrugated fiberboard duct	Corrugated fiberboard
	Aluminum glass cloth tape
	Gray tape
	Foam packing
	Adhesive
	Double sided tape
Corrugated fiberboard structure	ABA flute triple wall corrugated fiberboard
Weight measurement of nonflammable corrugated fiberboard duct*	Per duct : 715 g Per meter of duct : 2380 g
Corrugated fiberboard dimensions Average value	Overall thickness : 12.5 mm Aluminum foil : 34 μm Front paperboard : 240 μm Flute paperboard : 224 μm Liner board : 283 μm

\*Calculated value determined from the weight measured by connecting two ducts of outer dimensions 225mm × 225mm and length 300mm.

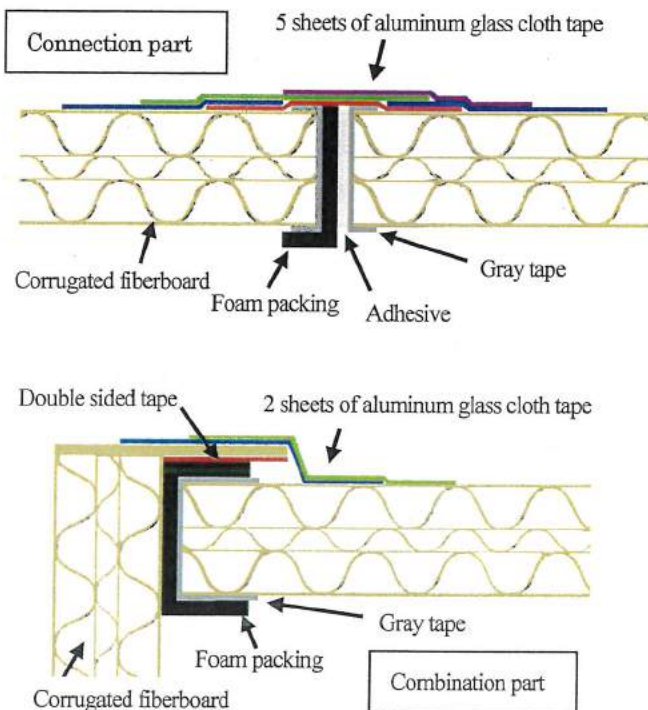


Figure 2 Cross-sectional schematic view of the connection part and the combination part

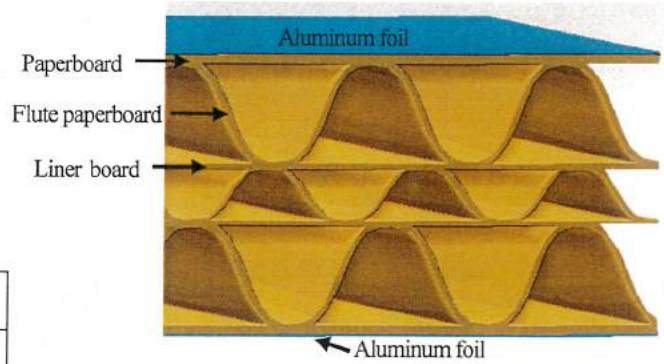


Figure 3 Schematic drawing of corrugated fiberboard cross section

## 1.2 段ボールダクト構成材料の定性分析

構成部品のうち、段ボール、アルミガラスクロステープ、灰色テープ、発泡体パッキン、接着剤、両面テープの定性分析を FT-IR (フーリエ変換赤外分光光度計)、PyGC/MS (熱分解ガスクロマトグラフ/質量分析計)、PyGC/FID (熱分解ガスクロマトグラフ/水素炎イオン化検出器) 及び EPMA (電子線マイクロアナライザー) にて実施した。Table 2 に段ボールダクト構成材料の定性分析結果を示す。

Table 2 Qualitative analysis of corrugated fiberboard duct materials

Analysis part		Result of analysis
Corrugated fiberboard covered with aluminum foil	Flute	Cellulose compounds
	Liner	Cellulose compounds
Aluminum glass cloth tape	Rubber pressure sensitive adhesive	Mixture of Natural rubber and Styrenic polymer
Gray tape	Base material	Polyethylene
	Rubber pressure sensitive adhesive	Mixture of Natural rubber, Carbonate and Petroleum resin
Foam packing	Foam	EPDM (Ethylene propylene rubber)
	Rubber pressure sensitive adhesive	Acrylic polymer
Adhesive		Mixture of polyalkylene glycol and carbonate
Double sided tape	Rubber pressure sensitive adhesive	Mixture of Natural rubber, Carbonate and Petroleum resin

## 2. 段ボールの不燃性能評価

段ボールの不燃性能を確認するため、コーンカロリメータによる発熱性試験を実施した。試験結果を Table 3 に示す。

試験方法：ISO 5660-1:2002 Reaction-to-fire tests

- Heat release, smoke production and mass loss rate  
- Part 1: Heat release rate (cone calorimeter method)

測定装置：(株)東洋精機製作所製 コーンカロリメータ III C3

輻射熱：50 kW/m<sup>2</sup>

試験時間：20分

試験片形状：100mm×100mm、厚さ 12.7mm

Table 3 Noncombustible performance evaluation

Measurement No.	Total calorific value (MJ/m <sup>2</sup> )	Duration over 200kW/m <sup>2</sup> heating rate (Seconds)
1	1.8	0
2	0.2	0
3	0.8	0
Average	0.9	0

加熱後の外観観察の結果、裏面まで達するき裂及び貫通孔は認められず、加熱開始後 20 分で燃焼しないため、建築基準法に基づく不燃材料認定試験において不燃材料の基準を十分に達成していると考えられる。

### 3. 段ボールの断熱性能評価

段ボールの断熱性能を確認するため、熱伝導率を測定した。測定結果を Table 4 に示す。

試験方法：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)

測定装置：NETZSCH 社製 定常法熱伝導率測定装置

HFM 436/3/1 Lambda

試験片形状：150mm×150mm、厚さ 12.5mm

測定温度：23℃

Table 4 Measurement of thermal conductivity

Measurement No.	Sample thickness (mm)	Temperature (°C)	Thermal conductivity [W/(m·K)]
1	12.5	23	0.064
2	12.5	23	0.068
3	12.4	23	0.069
Average	12.5	23	0.067

一般に、SUS304 システンレス鋼の熱伝導率は、約 50 [W/(m·K)]<sup>2)</sup>、建築用グラスウール断熱材の通常品の熱伝

導率は約 0.050 [W/(m·K)]<sup>3)</sup>で、段ボールは断熱材レベルの断熱性能を有することが確認された。

### 4. 段ボールダクトの結露試験

結露トラブルは、換気設備との関連が大きい。段ボールダクトの結露試験は、Figure 4 に示す恒温恒湿室内にてファンコイルユニットに接続された分岐チャンパーに連結した段ボールダクトをセットし、Table 5 に示す条件で実施した。ダクトには風速測定及び温度測定用センサーを取り付け、ダクト内風量 576m<sup>3</sup>/h (一次側風速 4.0m/s)、パターン I ~IV の条件で 12 時間経過後の結露の有無を目視にて確認した。

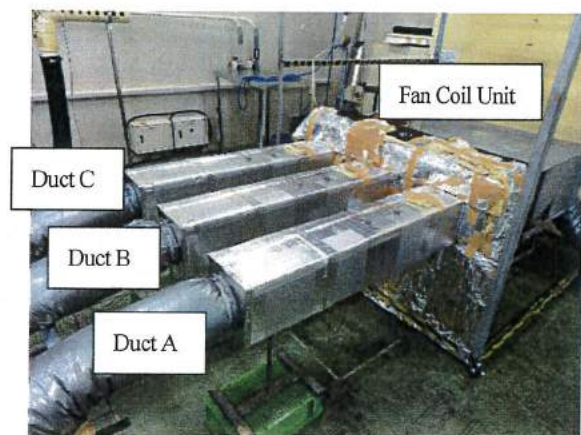


Figure 4 Condensation test status

Table 5 Conditions of condensation test

Pattern	Ambient temperature (°C)	Temperature in the duct (°C)	Temperature difference (°C)	Ambient humidity (%)
I	22	10	12	67.5
II	26	10	16	60.0
III	30	10	20	52.5
IV	26	13	13	67.5

I ~IV いずれの試験パターンにおいても、ダクト A, B, C 表面全体に曇りや結露は認められなかった。

### 5. 段ボールダクトの空気漏れ量測定

Figure 5 に示す試験装置を組み、送風機より湿式ガスメータを介して、連結した段ボールダクト内静圧を 100~1000Pa まで 100Pa ごとに設定し、各設定静圧値にて 1 分間加圧した際の空気漏れ量を測定した。空気漏れ量はダクト連結部の全周長で除し、1m 当りの空気漏れ量を算出した。空気漏れ量測定結果を Table 6, Figure 6 に示す。

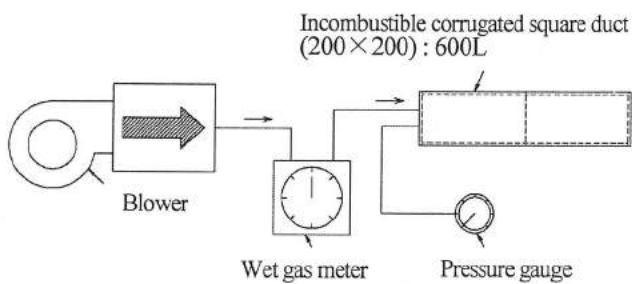


Figure 5 Air leak measuring device

Table 6 Result of air leakage measurement

Static pressure (Pa)	Air leakage (L/min·m)				
	Limit value	Target value	Duct A	Duct B	Duct C
100	11.25	8.44	0.07	0.05	0.03
200	18.91	14.19	0.08	0.10	0.07
300	25.64	19.23	0.12	0.13	0.10
400	31.81	23.86	0.17	0.20	0.12
500	37.61	28.20	0.20	0.23	0.13
600	43.12	32.34	0.23	0.27	0.17
700	48.40	36.30	0.27	0.30	0.18
800	53.50	40.12	0.30	0.37	0.20
900	58.44	43.83	0.33	0.40	0.23
1000	63.25	47.43	0.37	0.43	0.27

※制限値、目標値（制限値の75%）は空気調和・衛生工学便覧を基にしている<sup>4)</sup>。

ダクト A, B, C いずれも空気漏れ量は、空気調和・衛生工学会にて定められた鋼板製ダクトの基準値（制限値、目標値）を大きく下回っており気密性が極めて高いことが確認された。

## 6. まとめ

空調用不燃段ボールダクトの構成部品、構造、構成材料の調査結果、表面はアルミニウム箔で被覆された段ボール、段ボール断面を被覆するテープ、ダクト同士を連結するための発泡体パッキン、接着剤、アルミガラスクロステープなどが使用され、軽量かつ現場で簡単に組み立てられる仕様で施工性に優れていると考えられる。不燃性能評価、断熱性能評価、結露試験、空気漏れ量測定により、不燃段ボールダクトは、建築基準法に基づく不燃材料の基準を満たし、結露し難く（調査の範囲で結露は確認されていない）、空気漏れ量が鋼板製ダクトの基準値を大きく下回り、気密性が高い。

以上より、不燃段ボールダクトは、空調用ダクトに要求される、「施工性」、「不燃性」、「気密性」を満たしていることが確認された。

第2報では、熱劣化処理後の不燃段ボールダクトの性能評価について報告する。

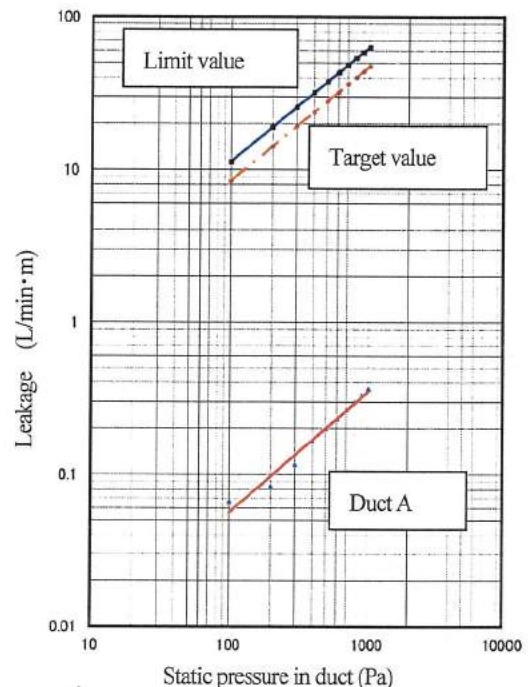


Figure 6 Relationship between static pressure in duct and leakage

## 参考文献

- 1) (株)竹中工務店, 山田ダンボール(株); 空調ダクト形成用乃至建材用不燃性段ボール, 特開 2006-1095
- 2) 熱物性ハンドブック編集委員会編; 熱物性ハンドブック, 養賢堂 (1990)
- 3) 日本工業標準調査会; JIS A9521 建築用断熱材 (2017)
- 4) (社)空気調和・衛生工学会; 第14版 空気調和・衛生工学便覧, 3 空気調和設備編 (2010)

# 空調用不燃段ボールダクトの性能に関する調査

## 第2報 熱劣化後の性能試験

### Investigation on Performance of Nonflammable Corrugated Fiberboard Duct for Air Conditioning System

#### The 2<sup>nd</sup> Report: Performance Test after Thermal Degradation

正会員 ○齊藤貴之 (化学物質評価研究機構)

正会員 仲山和海 (化学物質評価研究機構)

正会員 渡邊智子 (化学物質評価研究機構)

大武義人 (長岡技術科学大学工学研究院)

Takayuki SAITO\*<sup>1</sup> Kazumi NAKAYAMA\*<sup>1</sup> Tomoko WATANABE\*<sup>1</sup> Yoshito OHTAKE\*<sup>2</sup>

\*<sup>1</sup> Chemicals Evaluation and Research Institute, Japan \*<sup>2</sup> Nagaoka University of Technology

Physical property of nonflammable corrugated fiberboard duct after thermal degradation was investigated. The physical property of the duct after aging at 373 K for 50 days was evaluated by puncture resistance test, bend test, peel test, and so forth. Puncture resistance and bending strength of the corrugated fiberboard part were slightly decreased after the aging, whereas peel adhesion of aluminum tape was slightly increased. The degree of degradation was quit low even after the aging at 373 K for 50 days, so that the degradation of the duct will be negligible at ambient temperature, *i.e.* 283-299 K.

はじめに

空調用不燃段ボールダクトは、第1報で報告したとおり、ダクトとしての要求性能を満たしており、また、金属製ダクトより軽量で、地震などでダクトの落下事故が生じたとしても被害が軽微となるため、安全性の面からも使用拡大が期待される。しかし、不燃段ボールダクトは表面をアルミニウム箔で被覆した段ボール、段ボール断面を被覆するテープ、ダクト同士を連結するための発泡体パッキン、接着剤及びアルミガラスクロステープで構成され、複数種の高分子材料が使用されていることから、使用中の劣化の進行による性能低下が危惧される。そこで本報では、長期使用により不燃段ボールダクトが劣化するかどうかを評価するため、加熱による促進劣化処理を施した不燃段ボールダクトについて劣化評価を行った結果を報告する。

#### 1. 空調用不燃段ボールダクトの劣化処理

空調用不燃段ボールダクトを劣化させる因子として熱や湿度が考えられるが、不燃段ボールダクトはアルミニウム箔で被覆されており、実使用環境下において水分をほとんど透過しないことから、湿度が段ボールに及ぼす影響は極めて小さく、主な劣化因子は熱と推察される。そこで、Figure 1に示す山田ダンボール株式会社製の空調用不燃段ボールダクトについて、被覆段ボール部及びダクト連結部から採取した試料と被覆段ボール部にアルミガラスクロステープを貼り付けた試料をギヤー式老化試験機にて 100±1℃で7日、21日、50日間加熱すること

で促進劣化処理を施し、得られた熱劣化後試料について各種劣化評価を行った。

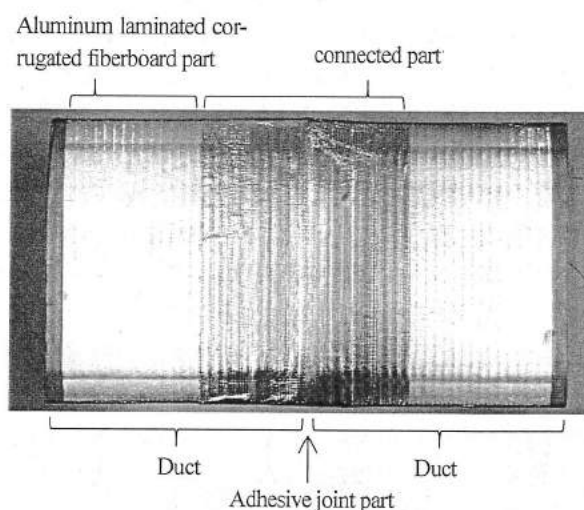


Figure 1 Sampling area for accelerated degradation treatment

#### 2. 熱劣化処理後不燃段ボールダクトの劣化評価

##### 2.1 外観の変化の有無

熱劣化処理後の不燃段ボールダクトを目視にて観察すると、50日までの劣化処理では、段ボールの変形、段ボール表面やアルミガラスクロステープ表面の破損やひび割れ、アルミガラスクロステープの剥離や変色現象は認められなかった。

## 2.2 被覆段ボール部の重量変化率

熱劣化後の被覆段ボール部の重量変化率を測定した結果を Table 1 に示す。加熱によりわずかながら重量減少が進行していることから、被覆段ボール部に吸湿している水分が揮散したものと考えられる。

Table 1 Weight change of aluminum laminated corrugated fiberboard part after aging at 373 K

Aging time (h)	Weight change from pristine aluminum laminated corrugated fireboard (%)
168	-0.7
504	-1.2
1200	-1.3

## 2.3 被覆段ボール部の強度測定

熱劣化処理後の不燃段ボールダクトの強度変化を評価するため、突き刺しに対する強度を測定する貫入抵抗試験及び曲げ変形に対する強度を測定する曲げ試験を実施した。

### 2.3.1 貫入抵抗試験

熱劣化後の不燃段ボールダクトの被覆段ボール部に対して実施した貫入抵抗試験の外観写真及び試験結果を Figure 2 及び Table 2 に示す。ここで、試験速度は 10 mm/min、圧子のサイズは直径 12 mm である。熱劣化処理を施すことで、ばね定数は劣化初期では上昇したものの、処理日数が経過するに伴い低下する傾向が認められた。また、表層破壊時の貫入抵抗と貫入抵抗の最大値については熱劣化処理日数の経過に伴い徐々に低下する傾向が認められた。熱劣化処理後のばね定数、表層破壊時の貫入抵抗、貫入抵抗の最大値がいずれも低下傾向を示していることから、100°Cでの加熱により不燃段ボールダクトの被覆段ボール部の強度がやや低下している。

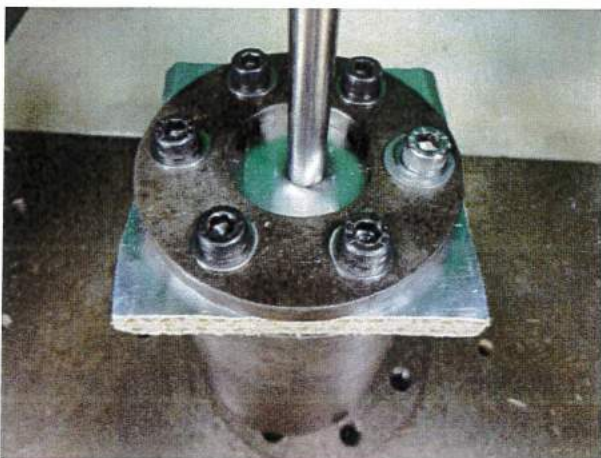


Figure 2 Appearance of puncture resistance test at aluminum laminated corrugated fiberboard part

Table 2 Results of puncture resistance test of aluminum laminated corrugated fiberboard part before and after aging at 373 K

Aging time (h)	Spring constant (N/m)	Puncture Resistance (N)	
		At surface destruction	At maximum
0	67.5	125	336
168	74.5	98.4	258
504	63.7	125	277
1200	60.8	105	236

### 2.3.2 曲げ試験

曲げ試験のためのサンプリング箇所を Figure 3、曲げ試験の外観写真を Figure 4、曲げ試験の結果を Table 3 にそれぞれ示す。Figure 3 及び Figure 4 に示すように、曲げ試験では、段ボールダクトに対して長手方向と周方向の 2 方向についてサンプリングを行い、測定は 3 点曲げにて実施した。ここで、試験速度は 10 mm/min、支点間距離は 80 mm、圧子及び支持部の半径は 5 mm である。長手方向及び周方向のいずれの方向についても、曲げ剛性は熱劣化処理日数の経過に伴い極わずかに低下する傾向が認められた。また、ダクトの周方向で試料を採取した場合、曲げ荷重の最大値は熱劣化処理初期に増大し、その後徐々に低下する傾向が認められたものの、50 日の熱劣化処理後においても初期値以上の値を示した。一方、ダクトの長手方向で採取した場合は、熱劣化処理日数が 50 日を経過しても曲げ荷重の最大値に低下は認められない。

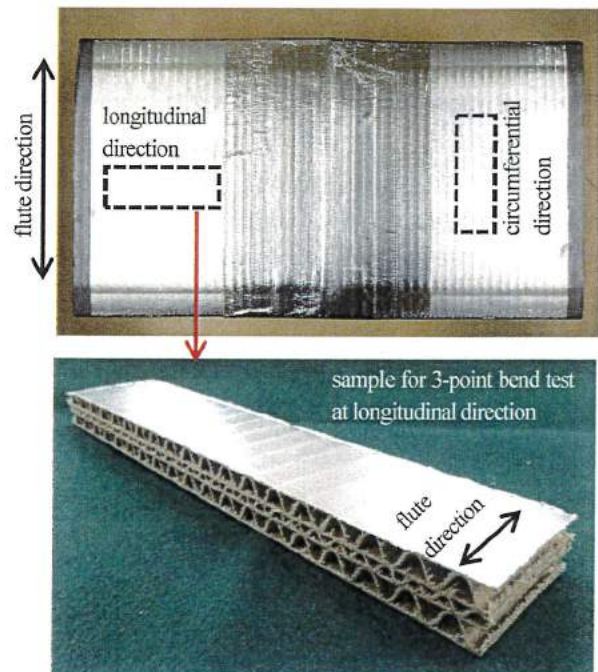


Figure 3 Sampling area and direction for bend test

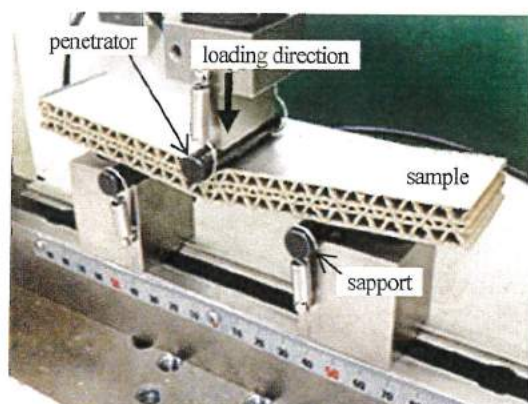


Figure 4 Appearance of 3-point bend test

Table 3 Result of 3-point bend test of aluminum laminated corrugated fiberboard part before and after aging at 373 K

Aging time (h)	Sampling direction to duct	Flexural stiffness (N/m)	Maximum load on bending (N)
0	circumferential	151	117
	longitudinal	64.1	56.7
168	circumferential	151	154
	longitudinal	64.5	54.5
504	circumferential	143	144
	longitudinal	55.0	60.7
1200	circumferential	142	122
	longitudinal	54.1	57.1

試験方法やサンプリング方向の違いによる熱劣化曲線の差異はあるものの、貫入抵抗試験及び曲げ試験のいずれにおいても 100℃での熱劣化処理により被覆段ボール部の強度がやや低下する傾向が認められた。したがって、被覆段ボール部は経年劣化による強度低下が懸念されるものの、空調用不燃段ボールダクトの実使用温度は 10℃～26℃付近と低いため、実使用温度における被覆段ボール部の強度低下はほぼ無視できるものと推察される。

#### 2.4 ダクト連結部の貫入抵抗試験

ダクト連結部の貫入抵抗試験の結果を Table 4 に示す。測定条件は 2.3.1 項と同様である。ダクト連結部のばね定数及び貫入抵抗の最大値は熱劣化初期に上昇し、処理日数の経過に伴い低下する傾向が認められた。また、表層破壊時の貫入抵抗については、熱劣化処理日数の経過に伴い徐々に低下する傾向が認められた。したがって、ダクト連結部についても経年劣化の進行がやや懸念されるものの、被覆段ボール部と同様に、実使用温度が低いことと、100℃で 50 日間熱劣化処理を施しても初期値と比較してほとんど強度が低下していないことから、実使用温度ではダクト連結部の劣化による強度低下はほとんどないものと考えられる。

Table 4 Results of puncture resistance test of coupled part before and after aging at 373 K

Aging time (h)	Spring constant (N/m)	Puncture Resistance (N)	
		At surface destruction	At maximum
0	50.6	692	877
168	61.5	574	1060
504	65.2	650	944
1200	54.9	560	853

#### 2.5 アルミガラスクロステープの粘着力の評価

熱劣化処理によるアルミガラスクロステープの粘着力の変化を調査するため、JIS Z 0237:2009「粘着テープ・粘着シート試験方法」に従い 90°剥離試験を実施した。ここで、母材は被覆段ボールとし、アルミガラスクロステープをヘラにより約 30N の荷重を荷重しながら 5 回圧着することで母材に貼り付けた。また、剥離試験の速度は 5 mm/s である。試験中の外観写真を Figure 5、試験結果を Table 5 にそれぞれ示す。100℃での熱劣化処理により、劣化初期では 90°引きはがし粘着力が上昇し、熱劣化処理日数が経過するにつれて 90°引きはがし粘着力が低下する傾向が認められたものの、50 日後の引きはがし粘着力は初期値よりも高い値を示した。

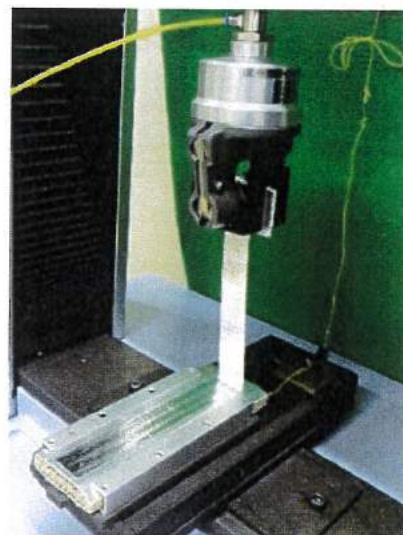


Figure 5 Appearance of peel adhesion test

Table 5 Results of peel adhesion test of aluminum tape before and after aging at 373 K

Aging time (h)	Peel adhesion at 90° (N/25mm)
0	20.7
168	30.8
504	26.0
1200	24.0

剥離試験後サンプルの外観写真を Figure 6 に示す。未処理試料では粘着剤と母材間での界面破壊が生じたのに対し、熱劣化処理後試料では段ボール表面のアルミニウム箔に接着されている板紙の破壊を伴いながら、粘着剤と母材間での界面破壊及び接着剤の凝集破壊が生じた。また、熱劣化処理日数の経過に伴い、接着剤が凝集破壊した領域が広がる傾向が示された。

したがって、アルミガラスクロステープの粘着剤は熱劣化処理により粘着力が変化しているものの、100°Cで50日間の処理後であっても粘着力は未処理と比較して強く、粘着剤としての機能性を保持する十分な粘着性を有していることから、促進劣化処理温度よりも70°C以上低温の実使用温度では長期にわたって粘着性を維持できるものと考えられる。なお、実使用温度における不燃段ボールダクトの推定寿命は第3報を参照されたい。

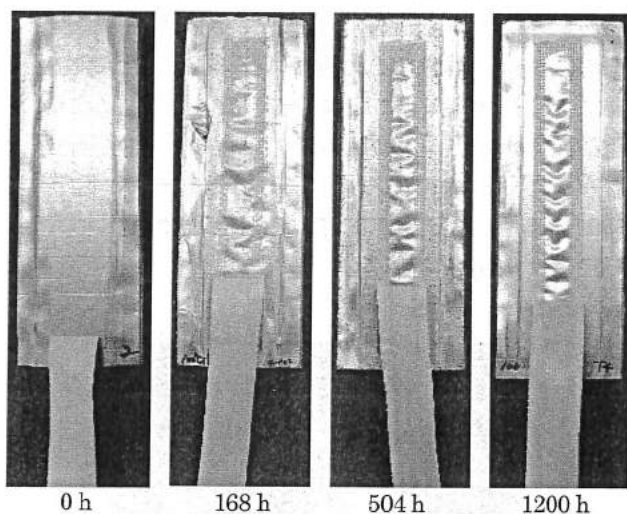


Figure 6 Appearance of peeled area

## 2.6 断熱性能の評価

熱劣化処理を施した不燃段ボールダクトの断熱性能を評価するため、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）」に従って熱伝導率を測定した結果を Table 6 に示す。

Table 6 Thermal conductivity of aluminum laminated corrugated fiberboard before and after aging at 373 K

Aging time (h)	Thermal conductivity ( $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$ )
0	0.067
168	0.061
504	0.062

熱伝導率は100°Cで50日間の熱劣化処理後も変化しなかったことから、不燃段ボールダクトの断熱性は熱劣

化後も低下しないと考えられ、したがって、熱劣化した不燃段ボールダクトについても第1報で報告した未処理試料の結露試験と同様の結果が得られるものと推察される。

## 2.7 透湿度の評価

熱劣化処理による不燃段ボールダクトの耐湿性の変化を評価するため、JIS Z 0208:1976「防湿包装材料の透湿度試験方法（カップ法）」に従いダクト連結部の透湿度を測定した。透湿度試験の結果を Table 7 に示す。ここで、試験温度は  $25 \pm 0.5^\circ C$ 、湿度は  $90 \pm 2\%RH$ 、透過面積は  $28.27cm^2$ （直径 60mm）、透過方向はダクト外表面から内表面として試験を実施した。透湿度はいずれも低い値を示し、また、熱劣化処理後も処理前と比較して上昇していない。不燃段ボールダクトは熱劣化が進行しても水分をほとんど透過しないことから、湿度により段ボールが劣化する可能性は極めて低いと推察される。

Table 7 Result of water vapor transmission test of aluminum laminated corrugated fiberboard before and after aging at 373 K

Aging time (h)	Water vapor transmission rate ( $g \cdot m^{-2} \cdot 24h^{-1}$ )
0	2.8
168	1.6
504	1.4

## 3. まとめ

不燃段ボールダクトに対して熱劣化処理を施し、熱劣化処理に伴う被覆段ボールの重量変化、被覆段ボール部及びダクト連結部の強度変化、アルミガラスクロステープの粘着力の変化、断熱性能の変化、透湿度の変化を調査した。

100°Cで熱劣化処理を施すことで、被覆段ボール部にて吸湿している水分が揮散するとともに、被覆段ボール部及びダクト連結部の強度やアルミガラスクロステープの粘着力がわずかに低下する傾向が認められた。一方、不燃段ボールダクトの断熱性能や透湿度については変化がほとんど認められなかった。

不燃段ボールダクトは実使用温度よりも70°C以上高温の100°Cで50日間熱劣化処理を施しても劣化がほとんど進行しない。したがって、不燃段ボールダクトは実使用温度ではほとんど劣化が進行しないものと推察され、長期にわたって十分な機能性を維持するものと考えられる。実使用温度における不燃段ボールダクトの寿命については第3報で報告する。



# 空調用不燃段ボールダクトの性能に関する調査

## 第3報 不燃段ボールダクトの熱分析法を活用した寿命推定

### Investigation on Performance of Nonflammable Corrugated Fiberboard Duct for Air Conditioning System

#### The 3<sup>rd</sup> Report: Estimation of Life-time for Nonflammable Corrugated Fiberboard Duct Utilizing Thermal Analysis

正会員 ○仲山和海 (化学物質評価研究機構)

正会員 齊藤貴之 (化学物質評価研究機構)

正会員 渡邊智子 (化学物質評価研究機構)

大武義人 (長岡技術科学大学工学研究院)

Kazumi NAKAYAMA\*<sup>1</sup> Takayuki SAITO\*<sup>1</sup> Tomoko WATANABE\*<sup>1</sup> Yoshito OHTAKE\*<sup>2</sup>

\*<sup>1</sup> Chemicals Evaluation and Research Institute, Japan \*<sup>2</sup> Nagaoka University of Technology

**Abstract** The degradation evaluation and the life-time estimation of the nonflammable corrugated fiberboard duct for air conditioning were investigated. The adhesive strength of the aluminum tape was the most remarkable for the degradation of the characteristics due to the aging. A life-time estimation model was constructed based on chemical reaction kinetics. The apparent activation energy for the degradation reaction of the adhesive was determined by thermogravimetry, and the lifetime was estimated. Even after 30 years, the adhesive strength is stronger than the initial one, and it is estimated that the nonflammable corrugated fiberboard duct has sufficient durability.

はじめに

空調用不燃段ボールダクトは現場で組み立てられ素材が有する断熱性能から保温工事も不要であるため、金属製ダクトと比較して輸送及び設置コストが低いことが特長である。また、空気漏洩、結露、強度、断熱性能、遮音性能などのダクト要求性能(第1報参照)も十分に満たしていることから、今後低コスト化、工期短縮の面から使用拡大が期待されている。ダクト本体部の段ボールはアルミニウムで被覆されていることから、実用に耐える耐湿性と耐火性を有している。しかしながら、主要材料がアルミニウム箔被覆段ボール、発泡体パッキン、接着剤及びテープ類の高分子材料を主体としているために、金属材料で注意すべき腐食は生じない材料であるにもかかわらず、耐久性に関して不安視されることがあり、また知見も乏しい。そこで本報では不燃段ボールダクトの劣化評価を行い、寿命を推定した結果を報告する。

#### 1. 空調用不燃段ボールダクトの劣化評価

不燃段ボールダクトを構成する高分子材料の劣化現象は化学反応を伴いながら進行することから、劣化反応を加熱により促進するためにギヤー式老化試験機を用いて山田ダンボール株式会社製不燃段ボールダクトを100±1℃にて7日、21日、50日間加熱することで促進劣化処理を施し、得られた劣化後試料についてTable 1に示す方法で各種劣化評価を行った。その結果、第2報のとおり

アルミガラスクロステープの粘着力とアルミニウム箔被覆段ボールの機械的強度において若干の劣化が確認された。熱劣化処理後のアルミガラスクロステープはテープ外周側で粘着剤の凝集破壊が生じていることから空气中の酸素が劣化因子となり劣化が生じていると考えられる。

Figure 1に連結組立て後の不燃段ボールダクトの外観写真を示す。アルミニウム箔被覆段ボールの折り合わせ部にはアルミガラスクロステープが2重に、連結部には5重に重ねて巻きつけられており、ダクトの形状維持と内圧保持機能の役割を果たしている。粘着剤の劣化が進行すると、まず粘着剤が剥離し内部流体の漏洩につながりダクト性能が損なわれる。また、ダクト設置後はアルミニウム箔被覆段ボールに外力が付与されることはないことから、寿命に寄与する劣化現象はアルミガラスクロステープの粘着力の低下を最も注目すべき劣化指標と考え、寿命推定を行うものとした。

Table 1 Evaluation methods for degradation of nonflammable corrugated fiberboard duct

Object	Method
Mechanical strength of body parts	Puncture resistance test 3-point bend test
Tackiness of aluminum tape	Peel test
Water vapor transmission rate of coupled part of duct	Water vapor transmission test; Dish method
Thermal insulation properties	Heat flow meter method



Figure 1 Photo of nonflammable corrugated fiberboard duct

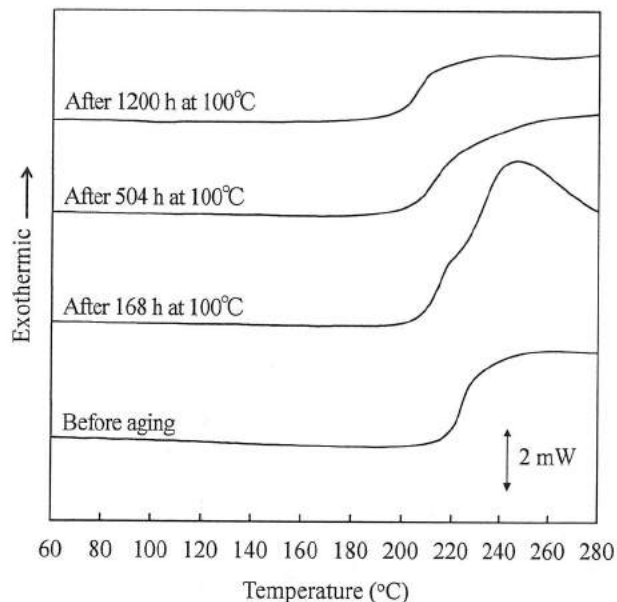


Figure 2 Change of DSC curve for initial oxidation temperature of adhesive on aluminum tape after aging test at 100°C

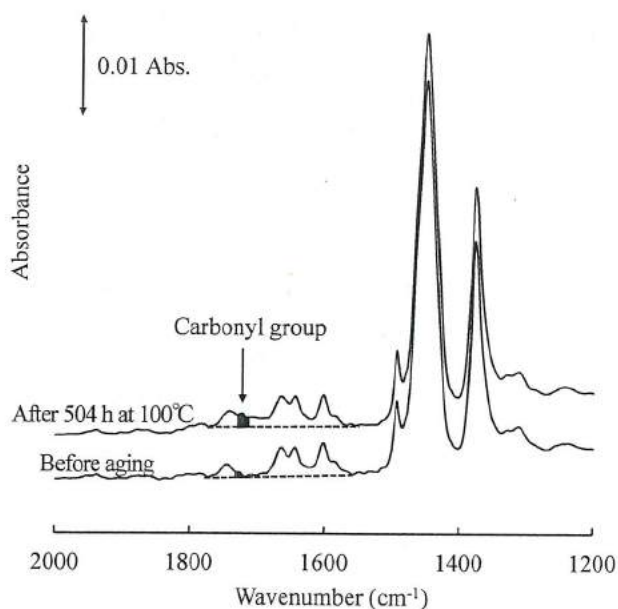


Figure 3 Change of IR spectrum of adhesive on aluminum tape after aging test at 100°C

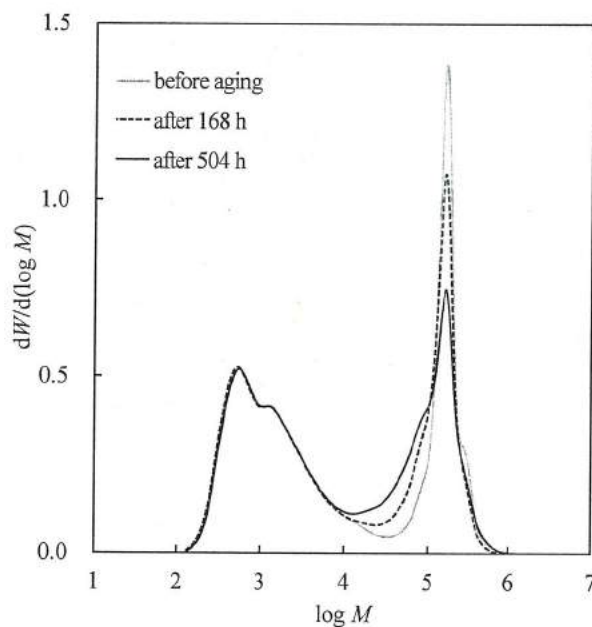


Figure 4 Change of molecular distribution of adhesive on aluminum tape by aging test at 100°C

## 2. アルミガラスクロステープ粘着剤の成分分析と劣化解析

アルミガラスクロステープの粘着剤の化学成分を確認するために、フーリエ変換赤外分光光度法 (FT-IR) で分析した結果、粘着付与剤として石油樹脂を含有する天然ゴム系粘着剤であることを確認した。天然ゴムは熱酸化劣化により解重合型の劣化現象を示す典型的なゴムである。

そこで、粘着剤に生じている劣化現象を把握するため

に、示差走査熱量測定 (DSC) を用いた酸化開始温度測定<sup>1,2)</sup>、顕微鏡 FT-IR による化学構造解析、溶剤抽出-高速液体クロマトグラフィー (HPLC) による酸化防止剤の定量分析、ゲル浸透クロマトグラフィー (GPC) による分子量分布測定を行った。100°C、50 日間熱劣化処理後では Figure 2 に示すとおり酸化開始温度が低下し、また、Figure 3 に示すとおり顕微鏡 FT-IR で酸化劣化により生じるカルボニル基の出現を観測、さらには、酸化防止剤ペンタエリトリールテトラキス[3-(3,5-ジ-*t*-ブチル-4-ヒドロキシ

フェニル)プロピオナート] (商品例: Irganox 1010、アデカスタブ AO-60) が熱劣化処理日数の経過とともに減少していることを確認した。したがって、アルミガラスクロステープの粘着剤は酸化防止剤が減少しながら酸化劣化が進行している。Figure 4 に粘着剤の熱劣化処理に伴う分子量分布変化を示す。紫外検出器と示差屈折率検出器のクロマトグラムより、分子量約 10,000 未満が石油樹脂由来で 10,000 以上が天然ゴム由来であることが確認された。分子量分布図から、熱劣化処理前と比較して 100°C、21 日間熱劣化処理後で分子量 400,000~1,000,000 付近の成分がわずかに増加し、分子量 10,000~100,000 付近の成分が明瞭に増加していることから、一部架橋型の劣化も伴いながら解重合型の劣化が優勢して進行している。

### 3. 寿命推定モデル

1項のとおり、不燃段ボールダクトを構成する材料の中でアルミガラスクロステープの粘着力の低下が最も寿命に寄与する劣化現象と考えられるため、粘着剤の粘着力低下を劣化の指標として寿命推定モデルを次のとおり構築する。

劣化は化学反応によってもたらされ、劣化によりある構造の量  $x$  が時間  $t$  の経過とともに減少していく。この時反応速度式は式(1)で表される。

$$\frac{dx}{dt} = -kx^n \quad (1)$$

ここで、 $k$  は速度定数、 $n$  は反応の次数である。粘着剤の劣化現象は酸化反応を伴っているものの、架橋型劣化より解重合型劣化が優勢であることから、劣化反応においてラジカルが発生した後は自己分解反応が主体になり、粘着力低下をもたらしていると考えられる。このことから劣化反応は 1 次反応であると考え、 $n$  は 1 とした。劣化によりある粘着力に達するには一定の化学構造変化が生じており、その変化が単一の化学反応によってもたらされるとすると式(1)の  $x$  を引きはがし粘着力  $F_{Adh}$  で置き換えて式(2)のように表すことができる。

$$\frac{dF_{Adh}}{dt} = -kF_{Adh} \quad (2)$$

(2)式を積分すると  $F_{Adh}$  と  $t$  の関係を示す(3)式が得られる。ここで、第 2 報で報告した 100°C で熱劣化処理後の剥離試験の結果、 $F_{Adh}$  は 168h 処理後で上昇し、その後処理時間の経過とともに低下しているために、時間は  $t-168$  としモデル式を作成した ( $C$  は定数で熱劣化処理時間 168h のときの  $F_{Adh}$ )。

$$F_{Adh} = C \cdot e^{-k(t-168)} \quad 100^\circ\text{C} \text{ のとき} \quad (3)$$

100°C で熱劣化処理して得られたデータから、(4)式が得られ、100°C のときの  $k=2.23 \times 10^{-4} \text{ h}^{-1}$  が得られた。

$$F_{Adh} = 29.6 \times e^{-0.000223(t-168)} \quad 100^\circ\text{C} \text{ のとき} \quad (4)$$

### 4. 熱分析法を用いた劣化反応に対する見かけの活性化エネルギーの測定

活性化エネルギー  $E_a$  は小澤-Flynn-Wall 法により式(5)から熱重量測定 (TGA) を行い求めた。

$$\log \phi_1 + 0.4567 \frac{E_a}{RT_1} = \log \phi_2 + 0.4567 \frac{E_a}{RT_2} \quad (5)$$

ここに、 $A$  は頻度因子、 $R$  はガス定数、 $T$  は絶対温度、 $\phi_1$  及び  $\phi_2$  は TGA の昇温速度、 $T_1$ 、 $T_2$  は  $\phi_1$  及び  $\phi_2$  で測定したときに一定の重量減少率に達する絶対温度  $E_a$  を求めるための TGA は劣化解析により酸化劣化が観測されていることから、空気気流下にて 2.5、5.0、10、20 K/min の昇温速度  $\phi$  で測定した。Figure 5 に示す重量減少率に達する絶対温度  $T$  を求め、横軸に  $1/T$  を縦軸に  $\log \phi$  をプロットした。 $E_a$  を示す傾きは重量減少率が 3% から 10% に上がるほど一定に近づき、これは分解反応が寿命推定モデルに望ましい単一反応に近づいていることを示している。したがって、 $E_a$  は傾きがほぼ一定になった重量減少率 10% のデータから求め、その値は  $89.4 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$  であった。

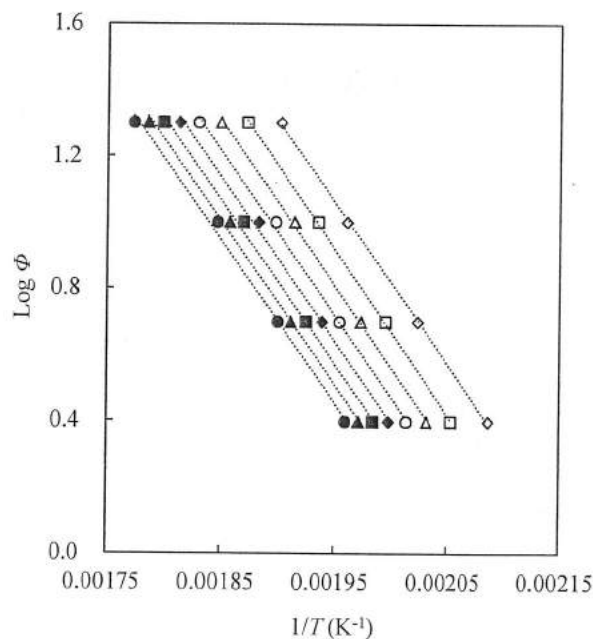


Figure 5 Ozawa-Flynn-Wall plot of adhesive on aluminum tape  
● 10% weight loss; ▲ 9% weight loss; ■ 8% weight loss;  
◆ 7% weight loss; ○ 6% weight loss; △ 5% weight loss;  
□ 4% weight loss; ◇ 3% weight loss

### 5. 寿命推定

使用温度での粘着力の経年劣化を示す式を得るために、化学反応速度の温度依存性を表すアレニウス式(6)を用いた。 $E_a=89.4 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$ 、100°C のときの  $k=2.23 \times 10^{-4} \text{ h}^{-1}$  を式(6)に代入し、 $A=7.29 \times 10^8 \text{ h}^{-1}$  が得られた。

$$k = A \cdot e^{-E_a/RT} \quad (6)$$

不燃段ボールダクトの使用温度を26°Cと40°Cとして、寿命推定を行う。式(6)から26°Cのとき $k=1.79 \times 10^{-7} \text{h}^{-1}$ が、40°Cのとき $k=8.91 \times 10^{-7} \text{h}^{-1}$ 得られた。促進劣化処理により単調に粘着力が低下せず劣化初期で粘着力がやや上昇していることから、反応速度論的扱いから逸脱しているものの寿命推定のために劣化初期と後期で促進倍率は同じであると仮定し、促進倍率を式(7)、式(8)から求め、式(3)、式(4)中の168hに相当する値を26°Cと40°Cに対して算出し、寿命予測のための $t$ と $F_{Adh}$ の関係式(9)、式(10)を得た。

$$\frac{t_{26}}{t_{100}} = \frac{k_{100}}{k_{26}} = e^{-(E_a/R)(1/T_{100} - 1/T_{26})} \quad (7)$$

$$\frac{t_{40}}{t_{100}} = \frac{k_{100}}{k_{40}} = e^{-(E_a/R)(1/T_{100} - 1/T_{40})} \quad (8)$$

$$F_{Adh} = 29.6 \times e^{-0.000000179(t-209458)} \quad (9)$$

(26°Cのとき、 $t \geq 209458 \text{ h}$ )

$$F_{Adh} = 29.6 \times e^{-0.000000891(t-41994)} \quad (10)$$

(40°Cのとき、 $t \geq 41994 \text{ h}$ )

Figure 6 に26°C使用時、Figure 7 に40°C使用時の粘着力変化の予測図を示す。粘着力低下の寿命ラインは市場で使用され劣化が進行したダクトのデータも考慮して決定すべきではあるが、使用期間30年経過後でも初期以上の粘着力を保有しており、十分な耐久性を有していると考えられる。

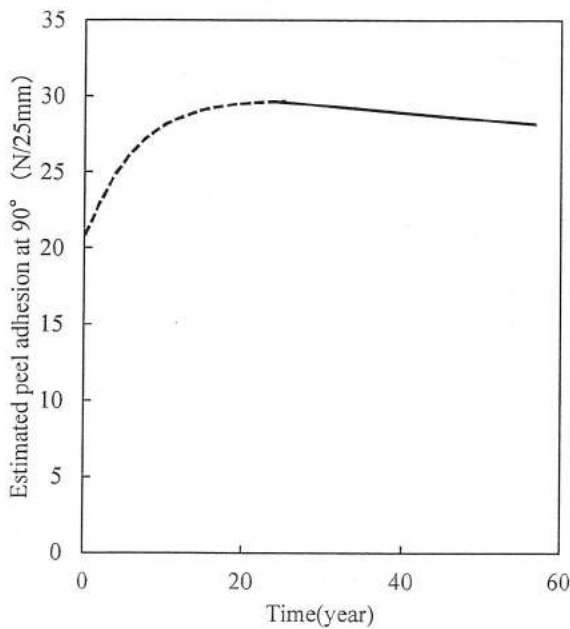


Figure 6 Estimated adhesion force of adhesive on aluminum tape at 26 °C

## 6. まとめ

空調用不燃段ボールダクトの劣化評価及び寿命推定を行った。最も顕著に劣化による特性の低下が観測されたのはアルミガラスクロステープの粘着力で寿命推定における重要な指標になりうると判断した。粘着剤の成分分析の結果、粘着付与剤として石油樹脂を含有する天然ゴム系粘着剤であった。粘着剤の化学的な劣化評価を行った結果、テープの外気に近い外周側から酸化劣化が進行し、一部架橋型の劣化も併いながら解重合型の劣化が優勢的に進行し、粘着力が低下していることが判明した。粘着剤の粘着力低下が単一の化学反応によってもたらされると仮定して、化学反応速度論に基づき寿命推定モデルを構築した。粘着剤の劣化反応に対する見かけの活性化エネルギーを熱重量測定法で決定し、寿命推定を行ったところ、使用期間30年経過後でも初期以上の粘着力を保有しており、ダクトとしての機能性を維持し十分な耐久性を有していると考えられる。

## 参考文献

- 1) 仲山和海, 渡邊智子, 大武義人, 古川睦久: 日本ゴム協会誌, 81, 447(2008)
- 2) 仲山和海, 渡邊智子, 大武義人, 古川睦久: 日本ゴム協会誌, 81, 467(2008)

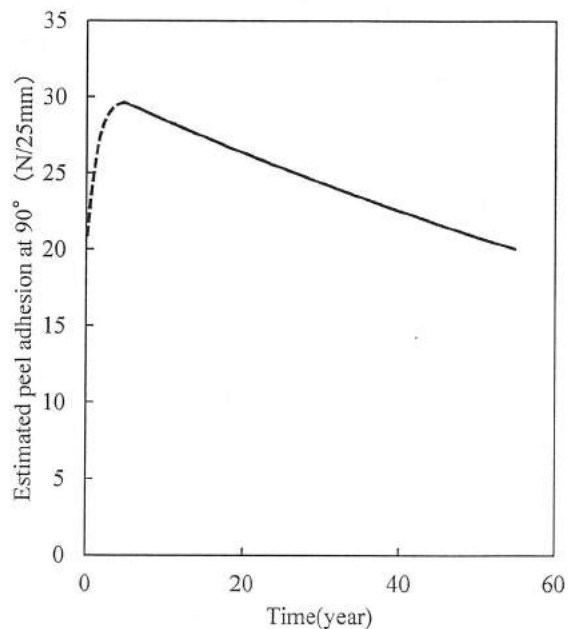


Figure 7 Estimated adhesion force of adhesive on aluminum tape at 40 °C