

ウレタン断熱材の長期断熱性能シミュレーション

中 嶋 佑 平*¹

Long-term Insulation Performance Simulation of Polyurethane Foam

Yuuhei NAKASHIMA

Polyurethane(PU) foams are widely used for buildings because of their excellent thermal insulation performance. However, the thermal insulation performance of PU insulation is known to change with time. Since the insulation performance aging directly leads to an increase in the consumption of energy of buildings, development of insulation materials with less secular change is required. In this research, we report the method for predicting the secular change which is useful for the development of insulation material with excellent long-term performance.

1. 諸 言

ポリウレタン (PU) 及びポリイソシアヌレート (PIR) フォームは、高断熱ガスが封入された微細クローズドセル構造を有し断熱性に優れることから建物の断熱材として広く使用され、特に高難燃 PIR フォームは火災安全性の観点からも有用である。一方、PU/PIR フォームは住宅寿命レベル (25-50 年) での断熱性能経年低下 (熱伝導率上昇) が比較的大きいことが知られており、経年変化の正確な予測と長期断熱性能の向上が課題である¹⁾。建築用断熱材の断熱性能は JISA9521²⁾ で規定され、熱伝導率 (以下、 λ) により区分されている (Table1)。PU/PIR フォームにおける断熱性能の経年変化は、特に透湿面材を使用したラミネートボード (Fig.1) において顕著であるが、対応する JIS 規格では長期性能の規定はなく、製品出荷時の測定値で運用されているのが実情である。

一方で、ゼロエネルギーハウスをはじめとした高断熱住宅への要求の高まりを背景に、住宅用断熱材についてもライフサイクル全般に渡る長期性能で評価すべきとする動きが活発化しており、将来的には建築用断

熱材の耐用年数である 25 年平均の断熱性能が JIS 規格化される見込みである。

上記背景から本稿では、長期性能に優れる PU 断熱材の開発促進に必須となる「経年変化メカニズムの詳細解明」と「長期性能の迅速な予測手法」について報告する。なお本研究は、地球温暖化防止や枯渇資源消

Table 1 Thermal conductivity classification of PU laminate board (JIS A9521)

Classification	Thermal conductivity [mW/m·K]
A	< 26
B	< 25
C	< 24
D	< 23

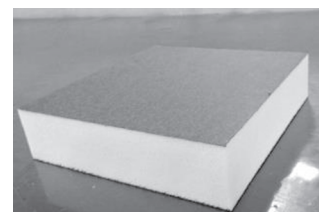


Fig. 1 Laminate board

* 1 ウレタン研究所 硬質フォームグループ

費抑制という社会課題に対し、建物の長期的な断熱性能向上による冷暖房消費エネルギー抑制に貢献することを旨とするものである。

2. 既存の長期性能シミュレーション手法の検証

[1] 既存手法で考慮されるλ決定要因と経時変動要素

PU/PIRフォーム断熱材の熱伝導率(λ foam)は、一般に(1)式で表される。

$$\lambda_{\text{foam}} = \lambda_g + \lambda_r + \lambda_s (+ \lambda_c) \quad (1)$$

ここで、
 λ_g : セル内ガスによる伝導伝熱
 λ_r : 輻射による伝熱
 λ_s : 固相部分による伝導伝熱
 λ_c : セル内ガスの対流による伝熱
 (通常のセルサイズでは考慮する必要なし)

(1)式右辺の内、経年変動する項目は λ_g のみとされ、その変動は発泡セル内外のガス拡散により、初期状態でセル内に封入されていた断熱ガス(ハイドロフルオロオレフィン、CO₂等)が流出するとともに、熱伝導率が相対的に高い空気が流入することで引き起こされるとされている。 λ_g は、セル内ガスの組成比から、理論式(2)により求めることができる^{3) 4) 5)}。

$$\lambda_g = \sum_{i=1}^n \frac{x_i \lambda_i}{\sum_{j=1}^n x_j A_{ij}} \quad (2)$$

ここで、
 λ_g : セル内混合ガスの熱伝導率 [mW/m·K]
 λ_i : 気体*i*の熱伝導率 [mW/m·K]
 x_i : 気体*i*のmol分率
 A_{ij} : 気体*i*と*j*の結合係数

但し、

$$A_{ij} = 0.25 \times (1 + \sqrt{a_{ij}}) \times b_{ij}$$

$$S_{ij} = \sqrt{S_i \times S_j}$$

$$S_i = 1.5 \times T_{b,i}$$

$$a_{ij} = (\eta_i / \eta_j) \times (M_j / M_i) \times 0.75 \times (T + S_i) / (T + S_j)$$

$$b_{ij} = (T + S_{ij}) / (T + S_i)$$

$$S_{ij} = \sqrt{S_i \times S_j} \quad S_i = 1.5 \times T_{b,i}$$

ここで、 $T_{b,i}$ は気体種*i*の沸点 [K]、 η_i は気体種*i*の粘性係数 [mPa·s]、 M_i は気体種*i*の分子量、 T は温度 [K]を表す。

代表的な気体成分の特性値を Table2 に示す。

[2] 長期性能シミュレーションの既存手法

(1) 被覆層を含まないコアフォームでのシミュレーション

断熱材表面に Skin 層や面材がないコアフォームにおけるセル内外のガス拡散は、Fickの拡散方程式から導かれる(3)式に従い^{3) 5)}、セルガス成分の分圧変化は有効拡散係数(以下 $Deff$ 値)、断熱材厚み、及び経時期間の関数として表される。 $Deff$ 値は対象とする気体種、断熱材の樹脂組成、セル構造などに依存する係数であり、 $Deff$ 値が大きい程ガスが拡散しやすいことを意味する。

$$P_i(t) = P_{i,\text{out}} + (P_{i,\text{initial}} - P_{i,\text{out}}) \frac{8}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{(2n-1)^2} \exp[-Deff_i \times [(2n-1)\pi/2L]^2 \times t] \quad (3)$$

ここで、
 $Deff_i$: 気体種*i*の有効拡散係数 [m²/s]
 L : 断熱材中心部から表面までの距離 [m]
 $P_{i,\text{initial}}$: 気体種*i*のセル内初期分圧 [atm]
 $P_{i,\text{out}}$: 気体種*i*の断熱材外部の分圧 [atm]
 $P_i(t)$: t 秒経過後の気体種*i*のセル内分圧 [atm]

上式を用いて、短期の経時変化実測値から $Deff$ 値を同定し、長期経年変化をシミュレーションする以下の手法が報告されている^{5) 6)}。

- 1) フォームサンプルのλ経時変動を一定期間収集する
- 2) セル内外に存在し得る各ガス成分の $Deff$ 値を仮定し、(3)式に $Deff$ 値(仮定値)、サンプル厚み(測定値)、セル内外の各ガス成分の分圧初期値(配合理論値)を代入してセルガス組成の経時変動を求め、更に(2)式を用いてλ g 変動をシミュレーションする
- 4) 【λ g 変動】=【λ foam変動】と見なし、λ foam

Table 2 Typical gas characteristics

	HFO -1233zd	CO ₂	N ₂	O ₂	cyclo pentane
Viscosity coefficient at 20°C [mW/m·K]	0.010	0.015	0.018	0.020	0.007
Thermal conductivity at 20°C [mW/m·K]	10.20	16.20	25.84	26.76	11.60
Molecular weight	131	44	28	32	70
Boiling point [K]	291.6	194.6	77.4	90.2	322.2

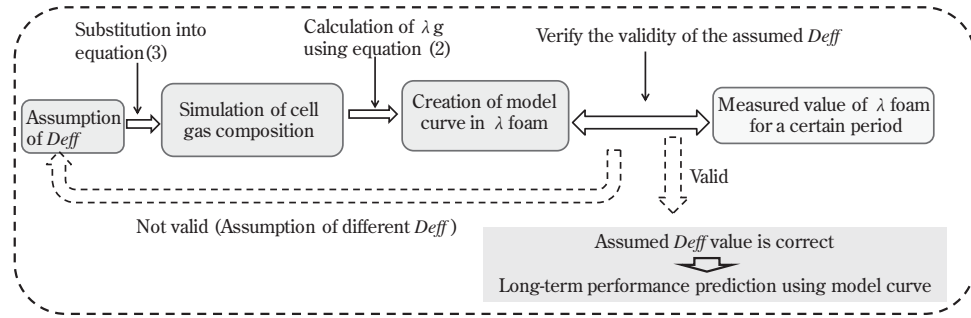


Fig. 2 Procedures for secular change prediction method (Conventional method)

変動モデル曲線を作成する

- 5) モデル曲線を実測値と比較し、両者が一致するまで2)～4)を繰り返すことで妥当な $Deff$ 値を同定する
- 6) 同定された $Deff$ 値により得られたモデル曲線から、経年後の λ foam を予測する

(2) ラミネートボードでのシミュレーション

Fig.3 に示す通り、ラミネートボードの被覆層（高樹脂密度の Skin 層及び面材）ではガスの拡散が抑制され、拡散速度がコア部と異なる為、表層の拡散抵抗を考慮する必要がある。

表層での拡散抵抗を考慮したガスの拡散は、下記(4)式で表される³⁾⁵⁾。

$$P_i(t) = P_{i,out} + (P_{i,initial} - P_{i,out}) \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2 \times \mu_i^2 \exp[-D_{eff,i} \times \beta_n^2 \times t / L^2]}{\beta_n^2 (\beta_n^2 + \mu_i^2)} \quad (4)$$

- ここで、
- $Deff,i$: コア部での気体種 i の有効拡散係数 [m²/s]
 - L : 断熱材中心部から表面までの距離 [m]
 - $P_{i,initial}$: 気体種 i のセル内初期分圧 [atm]
 - $P_{i,out}$: 気体種 i の断熱材外部の分圧 [atm]
 - $P_i(t)$: 気体種 i の t 秒経過後のセル内分圧 [atm]
 - μ_i : $L \times \alpha_i / Deff, i$
 - α_i : 気体種 i の表層における物質移動係数 [m/sec]
 - β_n : $\beta_n \tan \beta_n = \mu_i$ を満たす n 個の解

$Deff, i$ は前項のコア部のシミュレーションで同定した値を使用し、表層における各ガス成分の物質移動係

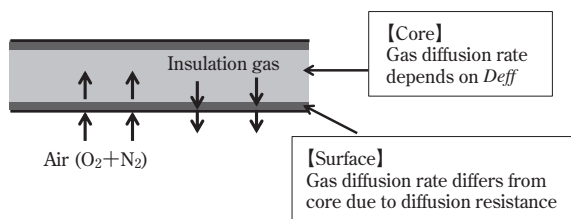


Fig. 3 Diffusion resistance on the surface

数 (α_i) を同定することにより、表層の拡散抵抗を考慮した経年変動シミュレーションが可能である。シミュレーションの手順としては、Fig.2 とほぼ同様の流れとなり、使用する理論式を(4)式として仮定する項目を α_i 値とする点のみが異なる。

[3] 既存手法の課題

Fig.4 に、既存手法によるコアフォームのシミュレーション例を示す。異なる $Deff$ 値を仮定した 3Case (Case1-3) のモデル曲線を、約 300 日間の経時測定データと比較した。長期経年後の λ 予測値は各 Case で大きく異なるものの、経時 30 日目から 300 日程度までの期間は全 Case で実測値とほぼ一致している為、より長期間の測定データと比較しないと正しい予測値を特定できない。また Fig.5 に示す通り、実測データで確認される経時初期の特異的な挙動（急激な上昇とその後の安定）は、全く再現されない。

3. 既存手法で考慮されていない変動要因の推定

前項で示した通り、従来のシミュレーション手法では十分な予測精度の確保が困難であるため、 λ 変動経日変化を詳細に確認することにより既存手法で考慮されていない変動要因を推定した。

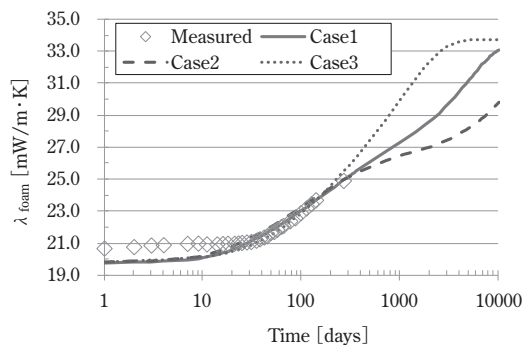


Fig. 4 Model curve and measurement value

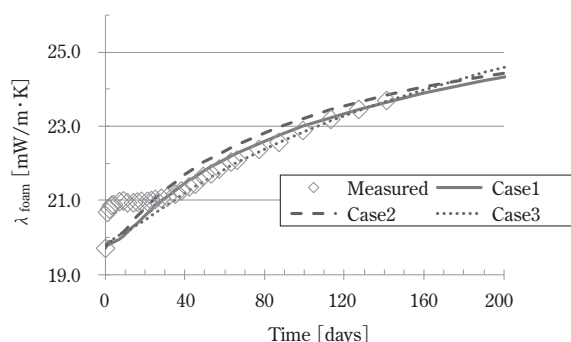


Fig. 5 Enlarged view of the early part

[1] 測定サンプル

Table3 に示す断熱ボードサンプルについて、詳細な経時変化測定を行なった。処方 A は一般的な分子設計に基づいた PU システムであり、処方 B はフタル酸ポリエステルポリオールをベースとした高難燃 PIR システムである。何れも、イソシアネートとしてジフェニルメタンジイソシアネート (MDI) を使用した。物理発泡剤には、低環境負荷の高断熱発泡剤である HFO-1233zd (ハイドロフルオロオレフィン) を使用し、化学発泡剤である水 (MDI と反応して CO₂ を発生することで発泡) との比率を等 mol 比とした。

それぞれ、透湿性面材付ラミネートボード (50mm 厚) を作製し、側面の SKIN 層のみを切り落として面材付のままとしたサンプル (A-1, B-1: Fig.6) と、上下面もスライスしてコア部 (25mm 厚) のみとしたサンプル (A-2, B-2: Fig.7) を準備した。

[2] 経日変化測定

(1) 測定条件

1) 初期値

断熱ボード成形後、直ちに所定サイズにカットし、

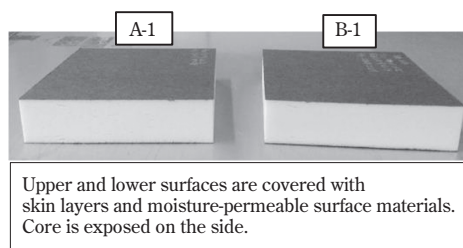


Fig. 6 Laminate board sample

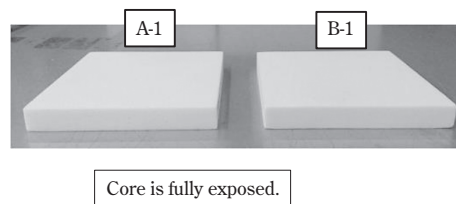


Fig. 7 Core cutting sample

λ 及び重量測定を行なった。

2) 経日変化

初期値測定後のサンプルを 23°C /50% R.H. の恒温恒湿室に保管し、所定期間毎に λ 及びサンプル重量を測定した。

(2) 測定結果

約 1 年間にわたるボードサンプルの熱伝導率 (以下、λ board) およびサンプル重量の経時変化測定結果を Fig.8, Fig.9 に示す。処方 A, B の何れについても、経時変動挙動の異なる 3 つの期間 (Stage1-3) が確認された。Stage1 では、λ board が急上昇し、重量は急上昇後にやや減少に転じた。Stage2 では、λ board はほぼ変化せずに安定し、重量の大きな減少が確認された。Stage3 においては、λ board、重量共に比較的緩

Table 3 Insulation board sample used for measurement

Sample name	A-1	A-2	B-1	B-2
Composition	Polyether polyol/MDI	←	Polyether polyol/MDI	←
Blowing agent	H ₂ O (generate CO ₂)/HFO Equimolar ratio	←	H ₂ O (generate CO ₂)/HFO Equimolar ratio	←
NCO INDEX	110	←	200	←
Surface materials	Fiberglass-based papers (Top and bottom face)	None (Core is fully exposed)	Fiberglass-based papers (Top and bottom face)	None (Core is fully exposed)
Skin layer	Present (Top and bottom)	Absent	Present (Top and bottom)	Absent
Density [kg/m ³]	38 (Include Skin layer)	34	38 (Include Skin layer)	34
Sample size [mm]	L200×W200×T50	L200×W200×T25	L200×W200×T50	L200×W200×T25
Notes	PU system	Sample with core cut from A-1	Flame Retardant PIR system	Sample with core cut from B-1

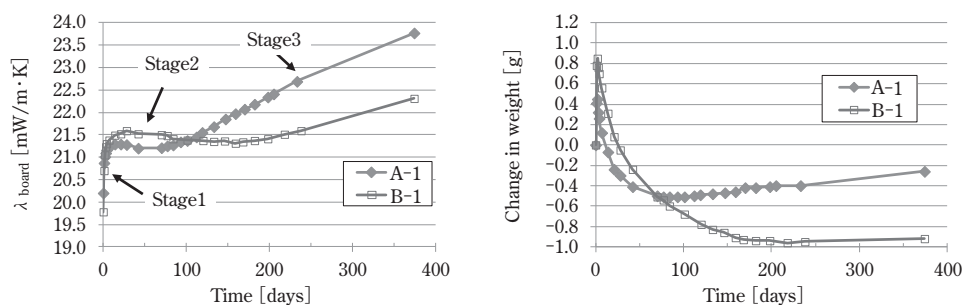


Fig. 8 Change over time of laminate board sample

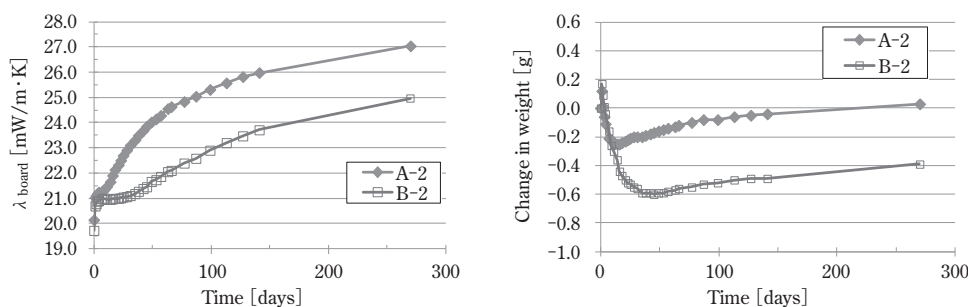


Fig. 9 Change over time of core cutting sample

やかに上昇し続けた。各 Stage におけるこれらの特徴的な挙動は、50mm ラミネートボードサンプルで特に顕著に確認された。

[3] 変動要因推定

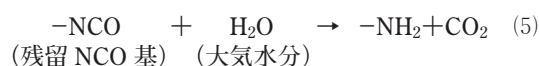
前項で示した特徴的な変動挙動を論理的に説明し得る変動要因を、Fig.10 の通り推定した。

各推定要因の詳細を以下に説明する。

(1) 残留 NCO 基と大気水分の反応

PU/PIR フォームは、ポリイソシアネート化合物の末端 NCO 基とポリオール及び水の活性水素の反応により高分子量化しながら CO₂ 発生と物理発泡剤の気化により体積膨張することで形成される。NCO 基は

活性水素に対して過剰に配合されるのが一般的である。特に PIR 処方では大過剰の NCO 基を配合することで、NCO 基の三量化反応により難燃性を付与するが、NCO 基の過剰配合率 (NCO INDEX) 上昇に伴い、フォーム中に未反応のまま残留する NCO 基 (以下、残留 NCO 基) の量が多くなる。残留 NCO 基は、成形後の経時により徐々に消失することが確認されており、その消失は(5)式によるものと考えられる。



この反応により、CO₂ が発生するためにセルガス組成が変動し、(1)式における λ_g が変動するものと考えられる。CO₂ の熱伝導率は HFO の熱伝導率より高い為、CO₂ 発生による HFO 組成比の相対的な低下は、

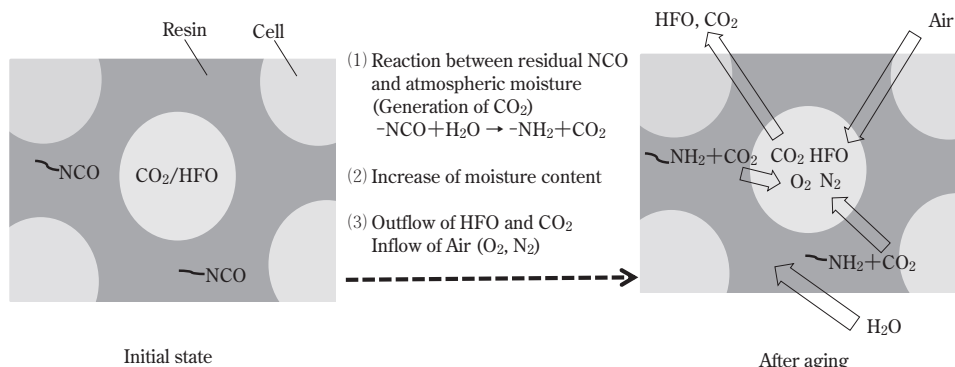


Fig.10 Change over time of insulation board

λg 上昇要因となる。また、残留 NCO 基の消失反応は、サンプルの重量変動にも影響する因子である。残留 NCO 基 1mol の消失反応は 1mol の大気水分吸収を伴い、18g の質量増加要因となる。更に、発生した CO_2 は経時の比較的早い段階で断熱ボード外へ拡散するため、最終的には初期値から 26g の質量減少になる。即ち、成形直後の残留 NCO 基が多いほど、経時での質量増減幅が大きいと考えられる (Fig.11)。

(2) 含水率変動

前項の通り、断熱ボード内に吸収された大気水分の一部は残留 NCO 基と反応するが、反応せずに断熱材中に留まる水分も存在する。含水率は経時的に上昇して一定量で平衡に至り、それ以上の吸湿は起こらない。含水率上昇は、ボードサンプルの重量増加要因であると共に、 λ 変動要因にもなることが知られている⁷⁾。 λ 値への水分の影響の機構は非常に複雑であり、(1)式右辺の熱伝導率決定要因 (λg 、 λr 、 λs) 全てに影響し得る。従って含水率変動による λ 値変動を理論的に推定することは困難であるが、モデルボード (残留 NCO の消失反応およびセルガス組成変動が完全に終息している PU 断熱ボード) での検証の結果、 λ_{board} は、含水率に対して直線的且つ可逆的に変動することが実験的に確認されている (Fig.12)。

本知見より、本研究では水分が λ_{board} に与える影響を独立した因子 (λ_{moist}) として近似して取扱い、

λ_{board} の変動因子を(6)式のように定義した。

$$\Delta \lambda_{board} = \Delta \lambda g + \Delta \lambda_{moist} \quad (6)$$

ここで、

$\Delta \lambda_{board}$: 断熱ボードの λ 変化値 [mW/m \cdot K]

$\Delta \lambda g$: セルガス組成変動による λg 変化値 [mW/m \cdot K]

$\Delta \lambda_{moist}$: 含水による λ 変化値 [mW/m \cdot K]

(3) セル内外のガス拡散

ガス拡散によるセルガス組成変動、及び λg 変動への影響は、既存の理論式 (式(2)、(3)、(4)) に従うものとする。また、ガスの流入出によりセル中のガス質量が変動するために、ボードサンプル重量変動にも影響を及ぼすと考えられる。

4. 推定要因の詳細分析による新規シミュレーション手法の検討

[1] 残留 NCO 基変動分析

(1) 測定方法

- 所定期間毎にボードサンプルのコア部を切り出して FT-IR を測定し、2250cm⁻¹ (NCO 基) と 1600cm⁻¹ (ベンゼン環) の吸光度比を算出した。
- 原料系に含まれる NCO 基含有量と同吸光度比からの比例計算により、ボードサンプル中の NCO 基残存量を算出した。

(2) 測定結果

Fig.13 に示す通り、残留 NCO 基は成形後 1 週間以内に急激に減少し、2 週間程度で消失反応がほぼ終息することが確認された。残留 NCO 量の経時変化が、(5)式に従うとした場合の、断熱材内部における CO_2 発生量を Fig.14 に示す。成形直後の残留 NCO 量が多いサンプル B-2 では経時初期に多量の CO_2 が発していると推定され、経時初期 (Stage1) の λ 変動及び重量変動に大きく影響していると考えられる。

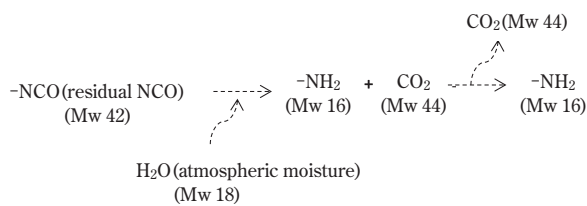


Fig.11 Mass change with disappearance of residual NCO

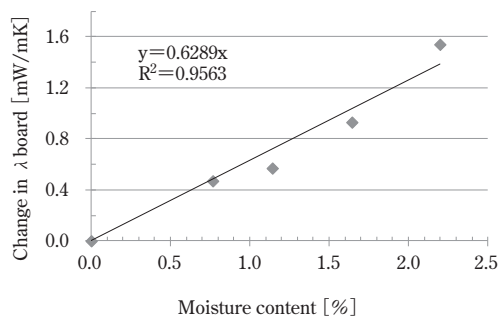


Fig.12 Moisture content and change in λ board of model board

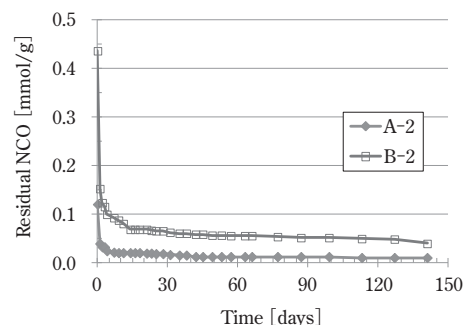


Fig.13 Change in amount of residual NCO

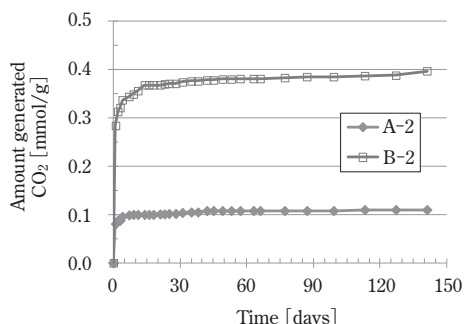


Fig.14 Estimated amount of generated CO₂

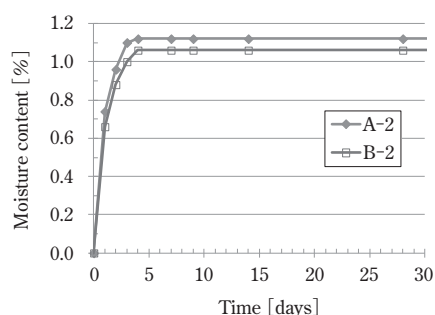


Fig.15 Change in moisture content

[2] 含水率変動分析

(1) 測定方法

所定期間毎にボードサンプルからコア部を切り出し、水分気化装置で気化させた水分をカールフィッシャー水分計により定量した。

(2) 測定結果

Fig.15 に示す通り、含水率は成形後1週間以内に急上昇し、平衡含水率に至ることが確認された。Fig.12 で示した含水率変動と λ moist の関係を使用して、測定サンプルの λ moist 変動を推定した結果を Fig.16 に示す。含水率変動による λ 上昇は、残留 NCO 基量変動と同様、経時初期 (Stage1) に大きく影響するものと考察される。

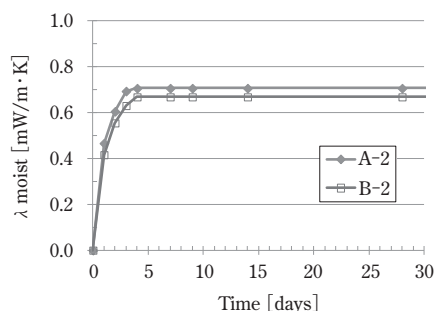


Fig.16 Change in λ moist

[3] Deff 値同定

上記詳細分析結果を考慮し、Fig.17 に示す手順でコア切り出しサンプル (サンプル A-2、B-2) の経年変動モデル曲線を作成して Deff 値同定を行なった。

Table4 に示す 3Case の仮定 Deff 値を用いたモデル曲線と実測値の比較結果を Fig.18、Fig.19 に示す。約 200 日の経時期間において、重量変動と λ 変動の何れもが実測値と一致するのは Case1 のみとなり、Deff 値特定に要する期間を従来手法より大幅に短縮可能な結果が得られた。本例では、100 日程度までの測定を行えば Case1 への特定が可能である。

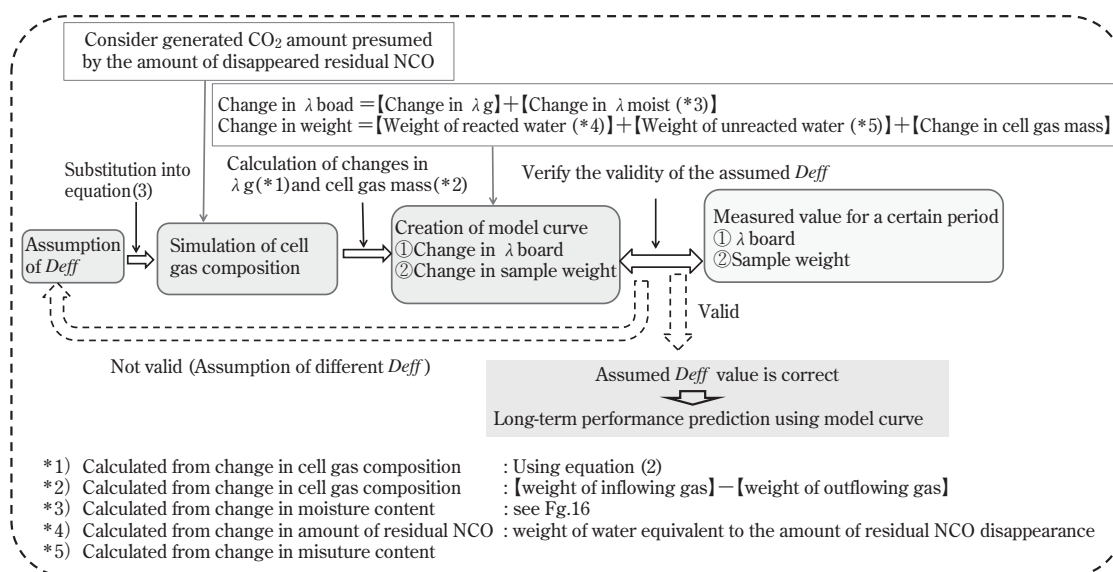


Fig.17 Procedures for secular change prediction method (New method)

Table 4 Assumed $Deff$ for simulation

Case	A-2 Assumed $Deff$ [$10^{-13}m^2/s$]				B-2 Assumed $Deff$ [$10^{-13}m^2/s$]			
	HFO	CO ₂	O ₂	N ₂	HFO	CO ₂	O ₂	N ₂
1	2.68	1580	170	49.0	1.56	825	29.8	17.5
2	1.00	2200	180	55.0	0.50	1100	50.0	19.0
3	10.0	2200	130	33.0	5.00	700	20.0	13.0

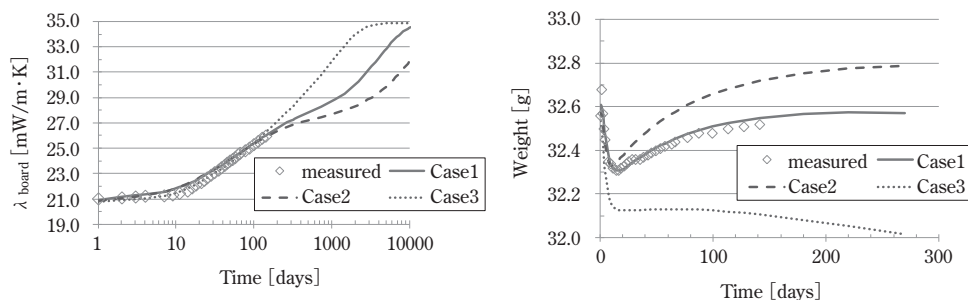


Fig.18 Model curve and measurement value (sample A-2)

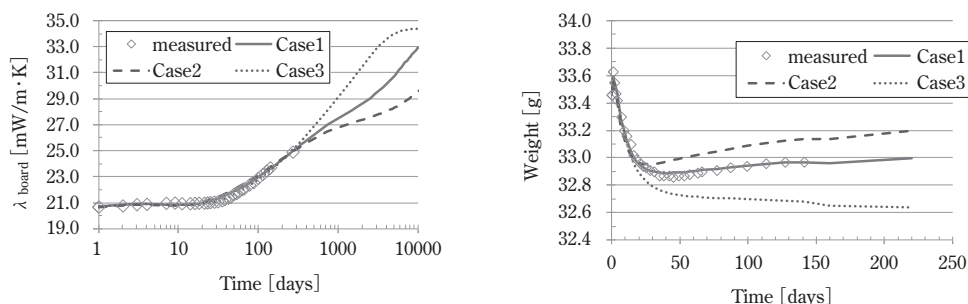


Fig.19 Model curve and measurement value (sample B-2)

[4] ラミネートボードの経年変動シミュレーション

前項で特定した $Deff$ 値を使用し、ラミネートボード（サンプル A-1、B-1）の経年変動シミュレーションを行なった。シミュレーション手順は Fig.17 とほぼ同様であり、ガス組成変動に用いる理論式を拡散抵抗を考慮した(4)式とし、仮定する項目を α_i 値として行なった。 $Deff$ 値および α_i 値を Table5 の通りに特定したシミュレーション結果 (Fig.20) は実測値との一致性が非常に高く、経時初期～中期の特異的な変動

挙動 (Stage1 の急上昇、Stage2 の安定) も忠実に再現されることが確認された。Fig.21 及び Table6 には、30 年間の長期経年変動シミュレーション結果を示す。

5. シミュレーション結果からの経年変動メカニズム考察

前項までの結果より、PU/PIR 断熱ボードにおける経年変動メカニズムを整理し考察する。

Table 5 $Deff$ and α_i for simulation

Sample name	A-2				B-2			
	HFO	CO ₂	O ₂	N ₂	HFO	CO ₂	O ₂	N ₂
$Deff$ (Core) [$10^{-13}m^2/s$]	2.68	1580	170	49.0	1.56	825	29.8	17.5
α_i (Surface) [$10^{-10}m^2/s$]	1.40	100	41.0	6.00	0.70	35.0	28.0	9.00

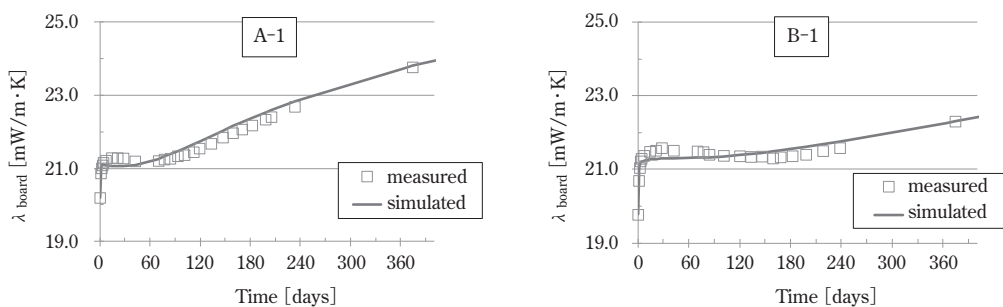


Fig.20 Simulation considering diffusion resistance (Laminate board)

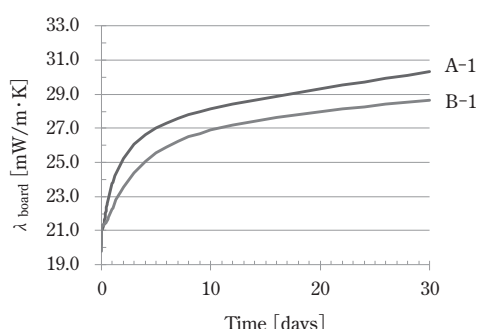


Fig.21 Long-term performance simulation of laminate board

Table 6 Predicted λ_{board} after aging

sample		A-1	B-1
Predicted value of λ_{board} [mW/m·K]	initial	20.2	19.8
	after 10 years	28.1	26.8
	after 20 years	29.3	27.9
	after 30 years	30.3	28.7
	Average over 25 years(*)	27.8	26.4

(*) Calculated based on JIS A1486

Stage1における λ_{board} の急激な変動は、残留NCO基の消失反応(CO_2 発生による λ_g 変動)と含水率上昇による λ_{moist} 変動が主要因である。

Stage2以降の λ_{board} 変動は、ガス拡散によるセル

ガス組成変動が主要因となる。Fig.22、Fig.23に、セルガス分圧と λ_g の変動シミュレーション結果を示す。

Stage2においては、 CO_2 のボードサンプル外への拡散により、熱伝導率が最も低いHFOの相対比率が上昇して λ_g 低下要因となる一方、 N_2 、 O_2 の流入が λ_g 上昇要因となる。結果として両者の影響が釣り合うことで λ_g が殆ど変化せずに安定期となる。

一方Stage3では、 CO_2 の拡散がほぼ終息しており、 N_2 、 O_2 の流入が主要因となる為に、 λ_g が上昇し続ける。

Fig.24に、各Stageにおける変動主要因をまとめる。特異的な挙動を引き起こすメカニズムを全て矛盾なく説明することが可能である。

6. 結論

本研究においては、PU/PIR断熱ボードの熱伝導率経年変動要因として従来手法では考慮されていない「残留NCO基の消失反応」および「含水率変動」を追加し、これらの詳細確認により新規シミュレーション手法を構築した。本シミュレーション手法は、短いデータ収集期間で高精度の予測が可能であるために長期断熱性能改善検討が実質的に可能となり、省エネ住宅実現に必須である高性能断熱材の開発促進に貢献できる。

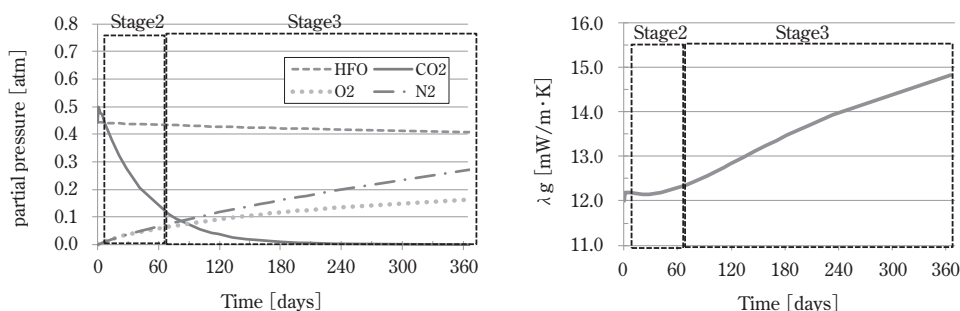


Fig.22 Fluctuations of Cell gas partial pressure and λ_g (sample A-1)

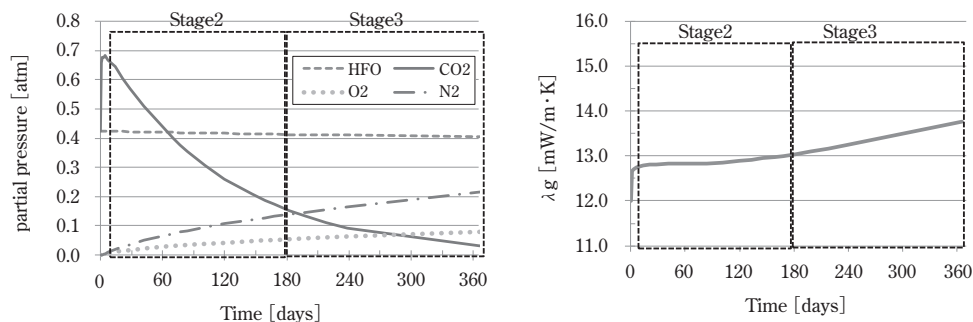


Fig.23 Fluctuations of Cell gas partial pressure and λg (sample B-1)

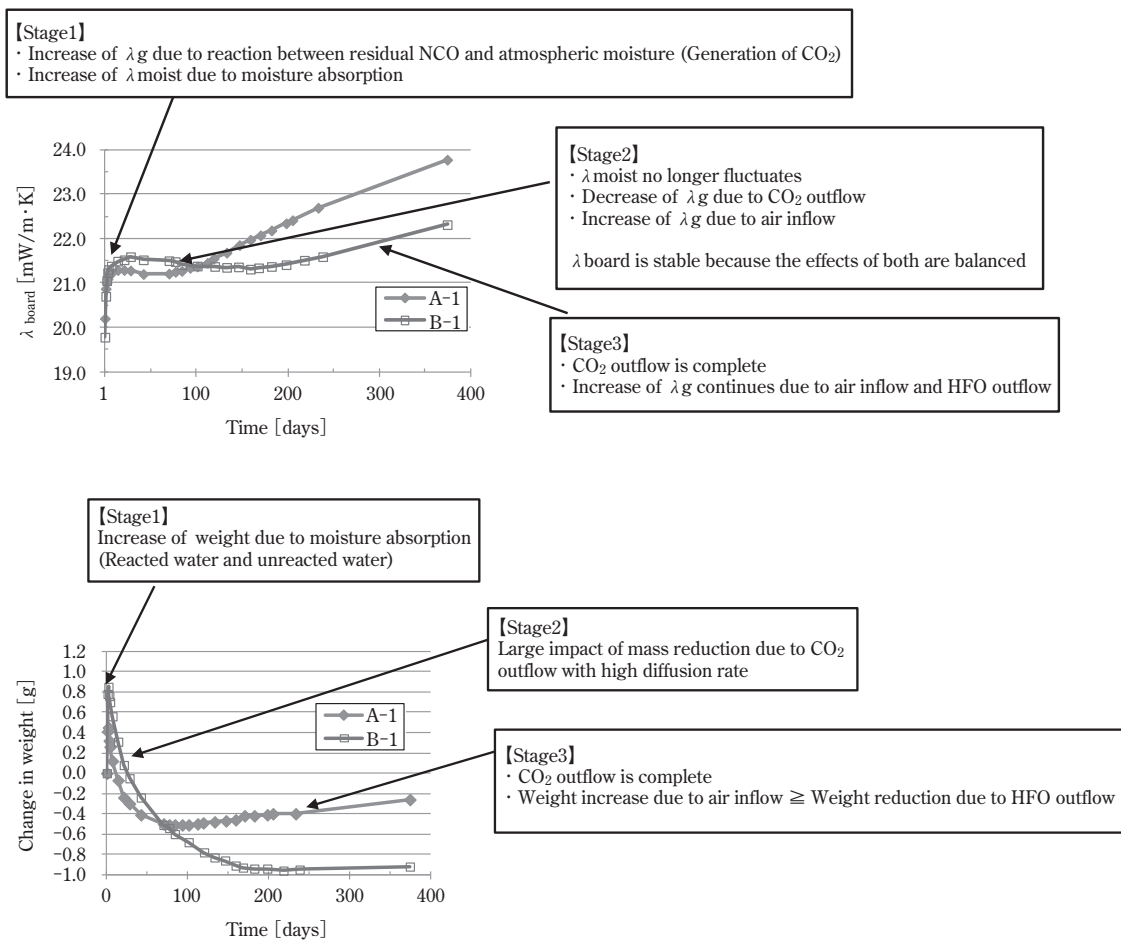


Fig.24 Summary of aging mechanism

7. 参考文献

- 1) F.J.Norton, Journal of CELLULAR PLASTICS, 3 (1), 23 (1967)
- 2) JIS A9521:2017 建築用断熱材
- 3) JIS A1486:2014 発泡プラスチック系断熱材の熱抵抗の長期変化促進試験方法
- 4) G.F.Smith and J.A. Theon, Journal of CELLULAR PLASTICS, 29, 57 (1993)
- 5) 近藤康文、長澤康弘、藤本哲夫、田坂太一、建築学会環境系論文集、73 (634)、1361 (2008)
- 6) Mark Bomberg and Mavinca Kumaran, Final report on the joint NRC/SPI RESEARCH PROJECT, (1995)
- 7) 近藤康文、岩前篤、長澤康弘、藤本哲夫、菊池祐介、田坂太一、日本建築学会環境系論文集、75 (649)、261 (2010)