

平成14年度経済産業省委託

建築材料分野（建築部材の熱伝導率試験）に おける不確かさに関する調査研究成果報告書

平成15年3月

財団法人 日本建築総合試験所

報告書目次

第1章 調査研究の目的と実施体制	
1.1 調査研究の背景	1
1.2 調査研究の目的	1
1.3 調査研究実施体制	3
1.4 調査研究の期間	4
1.5 委員会記録	4
第2章 測定の不確かさについての一般的概念	
2.1 不確かさの概念導入の経緯	5
2.2 ISO/IEC 17025 (JIS Q 17025) における測定の不確かさの要求事項	7
2.3 不確かさ表現ガイド (GUM) の概要	9
2.4 ILAC の方針	11
2.5 APLAC のポリシー	13
2.6 JNLA の暫定方針	16
第3章 熱伝導率試験における測定の不確かさの評価	
3.1 熱伝導率試験の概略	17
3.2 測定の不確かさの算出手順	19
3.2.1 数式モデルと不確かさの誘導	19
3.2.2 特性要因図	20
3.2.3 不確かさを評価する成分と評価方法	20
3.2.4 不確かさを評価しない要因とその理由	28
3.3 JIS の規定による測定の不確かさの評価	30
3.3.1 標準不確かさから相対不確かさへの表現の変更	30
3.3.2 JIS の要求精度と不確かさの見積もり	30
第4章 繰返し測定における測定の不確かさ評価の確認	
4.1 実験内容	33
4.2 供試体	33
4.3 実験結果	34
4.3.1 高密度グラスウール板の実験結果	34
4.3.2 塩化ビニル樹脂板の実験結果	35
4.3.3 フロート板ガラスの実験結果	36
4.3.4 NIST の標準板の熱伝導率測定結果	37
4.4 共通検証実験	38
第5章 測定の不確かさの検証と JIS 規格の表現	
5.1 測定の不確かさの検証	40

5.2 JIS の表現としての測定の不確かさ	43
5.2.1 JIS A 1412-1:1999 の記述	43
5.2.2 JIS A 1412-1:1999 記述の解釈	43
5.2.3 測定の不確かさの表記の提案	43
第6章 総括	
6.1 まとめ	45
6.2 今後の課題	46
Appendix 熱伝導率試験における測定の不確かさ評価例	48

【参考文献】

- 参考文献 A : ILAC, 「ISO/IEC 17025 の適用に関する試験における測定の不確かさ概念の導入」(翻訳)
- 参考文献 B : APLAC, 「試験における測定の不確かさ評価のポリシー, 解釈及びガイダンス」(翻訳)
- 参考文献 C : 独立法人製品評価技術基盤機構, 「JNLA の試験における測定の不確かさの適用に関する暫定方針 (第2版)」

第1章 調査研究の目的と実施体制

1.1 調査研究の背景

ISO/IEC 17025「General requirements for the competence of testing and calibration laboratories」は JIS Q 17025「試験所及び校正機関の能力に関する一般的要求事項」として 2000 年 6 月 20 日付けで制定され、工業標準化法に基づく試験事業者認定制度(JNLA)においても認定試験事業者に要求する事項となった。JIS Q 17025 に基づく試験所の能力の審査に当たり、「試験における測定の不確かさ評価」の要求が懸案事項になっている。測定の不確かさは誤差に代わる新しい概念で、それが実体として捉えにくいこと、その評価には数学的、統計的知識が必要であること、いくつかの評価方法が組み合わされることによって計量学的な厳密性が決定しにくいこと、試験方法や品目によって適切な評価方法が異なることなどの理由で、評価された値の妥当性が検証しにくいという問題がある。また新しい概念であるから、測定の不確かさが表記された試験報告書の扱いにおいて、試験所、依頼者及び試験報告書のユーザー間で共通の認識に至っていないことも不確かさの普及が進まない原因のひとつである。

JIS 等の公に認められた試験方法は測定の不確かさの評価結果が反映された試験方法であることが一般に期待されるが、現状ではすべての JIS に(不確かさの表記を求めないという結論も含めて)測定の不確かさが適切に考慮されているとは言いがたい。今後、JIS の改訂時に測定の不確かさを評価し、その結果と評価の根拠を明示することが期待される。一方で不確かさ評価の具体例等の情報が不十分であるので、JIS 作成者が JIS の中に測定の不確かさを取り入れるのは困難であるという事情もある。したがって、不確かさの評価が JIS で考慮されるためには、評価例や何らかの指針が必要であると考えられる。

1.2 調査研究の目的

ISO/IEC GUIDE 2 によると、**試験**は次のように定義されている。Technical operation that consists of the determination of one or more characteristics of a given product, process or service according to a specified procedure.「所与の製品・工程又は付帯サービスの一つ以上の特性を、所定の手続きに従って判定するための技術的操作」。「所定の手続きに従って」は特定の試験方法に従うことと理解されている。一方、**校正**は VIM6.13 に次のように定義されている。Set of operations that establish, under specified conditions, the relationship between values of quantities indicated by a measuring instrument or measuring system, or values represented by a material measure or a reference material, and the corresponding values realized by standard.

「計測器又は測定システムによって示される数値又は実量器で示される数値と、測定量の対応する既知の数値との関係を特定の条件下で確立する一連の操作」。校正においては、その操作は特定の条件下(温度、湿度など)で行えば良く、特定の方法に従う必要はない。逆に言えば、方法を規定しないからこそ測定値を保証するために不確かさの表記が必要になる。これに対して、試験は所定の手続き、すなわち試験方法に従うことが前提となっており、個々の試験方法は測定値のばらつきが小さくなるようにばらつきの主要な要因に制限を設けている。ある試験方法による測定結果に含まれるばらつきが一定の範囲内にあることを共通の認識としてその試験報告書が関係者間で利用される場合、測定の不確かさもまた許容範囲内にあるという暗黙の合意が期待できる。

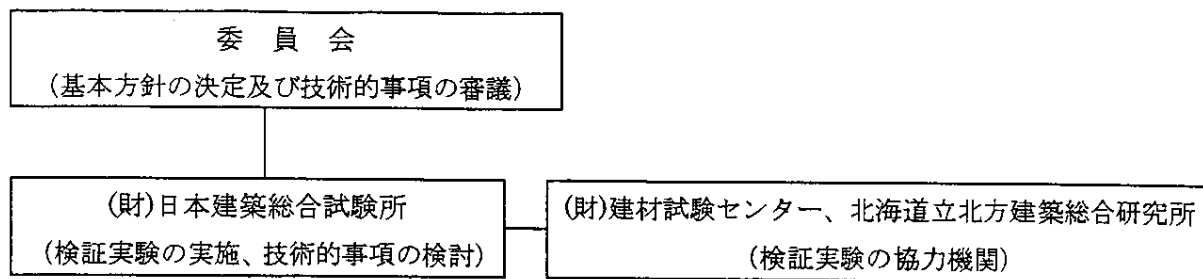
ISO/IEC 17025, 5.4.6.2 には「試験所は、測定の不確かさを推定する手順をもち、適用する」と

規定されており、また同参考 2 には次のように記されている。「広く認められた試験方法が測定の不確かさの主要な要因の値に限界を定め、計算結果の表現形式を規定している場合には、試験所はその試験方法及び報告方法の指示に従うことによってこの項目を満足すると考えられる」。この記述については、APLAC でも多くの議論がなされ、標準試験法でこれに該当する試験方法には既に測定の不確かさが考慮されているとして、個々の試験所で測定の不確かさを求める必要がないことが合意されている。測定の不確かさが標準試験法の中で考慮されていることの判断基準として、「測定の不確かさの主要な要因の値に限界を定める」と「計算結果の表現形式を規定している」の二つが上げられている。前者は測定条件や使用する機器の精度などを規定していること、後者は測定結果の値の有効桁数を規定していることと解釈され、諸条件の制限によって測定の不確かさが結果の有効桁以下であることが期待できると理解される。JIS 等の標準試験法が ISO/IEC 17025, 5.4.6.2, 参考 2 に該当するか否かは上の二つの基準で判断されるが、諸条件の規定と結果の有効桁数の規定との間に整合が取られている必要がある。

本調査研究では、JIS A 1412-1:1999, 「熱絶縁材の熱抵抗及び熱伝導率の測定方法一第 1 部：保護熱板法（GHP 法）」を取り上げ、当試験方法に記載の諸条件の制限から見積もられる測定の不確かさを評価する。これを検証するための評価実験を行い、測定の不確かさ評価の妥当性を検討する。さらに、複数の試験所間で測定諸条件の妥当性を検討し、測定の不確かさの観点から当 JIS の表現を提案する。なお、当試験方法は、建築部材の中では測定の不確かさにおける試料の特性値のばらつきが小さく、測定の不確かさを評価するには最適であることから選択したものである。

1.3 調査研究実施体制

(1) 研究組織及び管理体制（委員会，組織）



(2) 委員

委員長	銚井 修一	京都大学大学院 工学研究科 生活空間専攻 教授
委員	池田 哲朗	近畿大学 理工学部建築学科 教授
	佐野 浩一	経済産業省 産業技術環境局認証課 課長補佐
	倉山 千春	国土交通省 国土技術政策総合研究所 建築研究部 環境・設備基準研究室 主任研究官
	榎原 研正	独立行政法人 産業技術総合研究所 計測標準研究部門 物性統計科 応用統計研究室 室長
	菅原 昭栄	独立行政法人 製品評価技術基盤機構 適合性評価センター 認定センター 認定業務課 参事官
	祖父江 良蔵	独立行政法人 製品評価技術基盤機構 適合性評価センター 認定センター 認定企画課 主査
	藤本 哲夫	財団法人 建材試験センター 中央試験所 品質性能部 環境グループ 統括リーダー代理
	伊庭 千恵美	北海道立北方建築総合研究所 環境科学部 居住環境科
	井上 豊	財団法人 日本建築総合試験所 所長
	西村 宏昭	財団法人 日本建築総合試験所 建築物理部耐風試験室 室長 (兼) LA化推進室 室長
	倉橋 岩夫	財団法人 日本建築総合試験所 建築物理部環境試験室 室長
	小南 和也	財団法人 日本建築総合試験所 建築物理部環境試験室 主査

(3) 研究協力者

吉田 正友	財団法人 日本建築総合試験所 建築物理部 部長
上田 哲夫	財団法人 日本建築総合試験所 品質保証部 部長
行貝 光史	財団法人 日本建築総合試験所 品質保証部計測器校正室 室長
小早川 香	財団法人 日本建築総合試験所 建築物理部環境試験室

(4) 事務局

中安 進 財団法人 日本建築総合試験所 試験業務室 室長

衣笠 隆幸 財団法人 日本建築総合試験所 試験業務室 係長

1.4 調査研究の期間

平成14年 7月22日～平成15年 3月15日

1.5 委員会記録

	年月日	場所	委員会名	議事概要
平成 14 年	7月30日(火)	八重洲ダイビル 会議室	第1回委員会	・委員長の選任 ・調査研究実施計画の説明 ・熱伝導率試験・不確かさ算定手 順, 実験計画の審議
	10月9日(水)	日本建築総合試験所 講堂	第2回委員会	・実験検証結果及び熱伝導率の不 確かさ評価の審議 ・報告書目次(案)の審議 ・APLAC POLICYに関する説明
	12月11日(水)	日本建築総合試験所 講堂	第3回委員会	・実験検証結果及び熱伝導率の不 確かさ評価の審議 ・報告書(案)の説明 (一部) ・NISTによる熱伝導率標準板の不 確かさ評価に関する説明
平成 15 年	3月3日(月)	日本建築総合試験所 講堂	第4回委員会	・報告書(案)の審議

第5章 測定の不確かさの検証と JIS 規格の表現

5.1 測定の不確かさの検証

高密度グラスウール板、塩化ビニル樹脂板及びフロート板ガラスの熱伝導率の異なる3種類の試験体について、3章の不確かさの算出手順に従って測定の不確かさを計算した結果を表-5.1に、JISの測定条件から算出される測定の不確かさを表-5.2に、また4章の10回及び20回の繰返し測定から算出した実験標準偏差を表-5.3に示す。

表-5.1 測定の不確かさの算出結果(3.2参照)

試験体	熱伝導率 λ [W/(m·K)]	合成標準不確かさ $u(\lambda)$ [W/(m·K)]	相対標準不確かさ $u(\lambda)/\lambda$ (%)
高密度グラスウール板	0.0385	0.385×10^{-3}	1.00
塩化ビニル樹脂板	0.155	0.725×10^{-3}	0.47
フロート板ガラス	0.884	4.10×10^{-3}	0.46

表-5.2 JISの条件に基づく測定の不確かさの算出結果(3.3参照)

試験体	熱伝導率 λ [W/(m·K)]	合成標準不確かさ $u(\lambda)$ [W/(m·K)]	相対標準不確かさ $u(\lambda)/\lambda$ (%)
高密度グラスウール板	0.0385	0.298×10^{-3}	0.773
塩化ビニル樹脂板	0.155	1.20×10^{-3}	0.773
フロート板ガラス	0.884	6.83×10^{-3}	0.773

表-5.3 繰返し測定結果(4章に基づく)

試験体	熱伝導率 λ [W/(m·K)]	標準偏差 $\sigma(\lambda)$ [W/(m·K)]
高密度グラスウール板	0.0377~0.0389	0.34×10^{-3}
塩化ビニル樹脂板	0.155~0.159	1.23×10^{-3}
フロート板ガラス	0.878~0.889	3.78×10^{-3}

上記の試験体について、JISで定められている規定値から見積もられる合成標準不確かさ(JIS)、3章の評価手順から計算で求めた合成標準不確かさ(計算)及び繰返しによる実験結果から得られた実験標準偏差(実験)を比較すると図-5.1に示すような結果が得られた。3種類の試験体は、一般の建材としては熱伝導率が比較的小さい、中程度、大きい材料を選んでおり、そのため図-5.1の縦軸のスケールが互いに異なっているので、試験体相互の比較には注意を要する。「JIS」の値は当JISの規定を満たした場合に、測定結果に付随すると推測される測定の不確かさの大きさである。「計算」の値は、当JISの規定を遵守したとする条件の下で、GUMの積み上げ方式を用いて評価した値、「実験」の値は繰返し測定によるばらつきの実験値である。

これらの評価値と実験値は比較的良い一致を示している。「計算」の値は、JISの規定の下で当試験所の測定条件を定め（3.1参照）、不確かさ成分の効果を積み上げているので、「JIS」の値を超えないはずである。その結果、塩化ビニル樹脂板とフロート板ガラスでは「計算」値は「JIS」値より小さく、定めた測定条件が適切であることを示している。ところが、高密度グラスウール板では「計算」値が「JIS」値より大きく、一部の条件がJISの規定を満足していないことを示している。また、「JIS」値及び「計算」値が考えられる不確かさの要因に適切と考えられる仮定を設けて算出しているのに対し、「実験」値は与えられた条件下での繰返し実験で得られたばらつきの値であるので、適切な実験と適切な要因抽出がなされていれば、「計算」値よりも小さい値をもつことが期待できる。高密度グラスウール板とフロート板ガラスでは「実験」値は「計算」値よりも小さいが、塩化ビニル樹脂板では逆に「実験」値が「計算」値よりも大きい結果になっている。この実験では、抽出されていない要因が結果に影響している可能性が考えられる。また、硬い材質の試験体では、試験体と熱板との間に空気層ができやすく、これが実験結果に影響を及ぼしている可能性がある。建築用断熱材としては硬い材料はほとんどないが、これらの材料における熱伝導率の測定には特別の注意が必要となるであろう。しかし、それは試験方法の妥当性の検討に属する領域の事項であるので、ここでは試験方法に若干の改良の余地があることを指摘するに留めておく。実際に、「計算」値と「実験値」との差はさほど大きくはないので、決められた試験方法に従った測定値の不確かさ評価は概ね妥当であると考えられる。

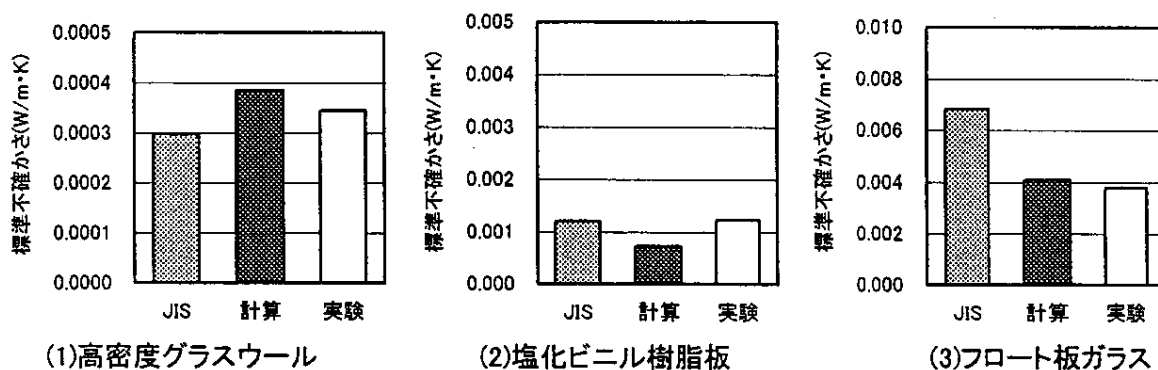


図-5.1 標準不確かさの比較

JISは測定条件を測定値に対する相対値で表しており、また結果の表現も有効数字で表しているため、比較のために標準不確かさから相対標準不確かさを計算し、これを図-5.2に示す。JISの規定値から見積もられる相対合成標準不確かさは $u(\lambda)/\lambda=0.773\%$ で、「計算」値及び「実験」値も概ねこれに近い。

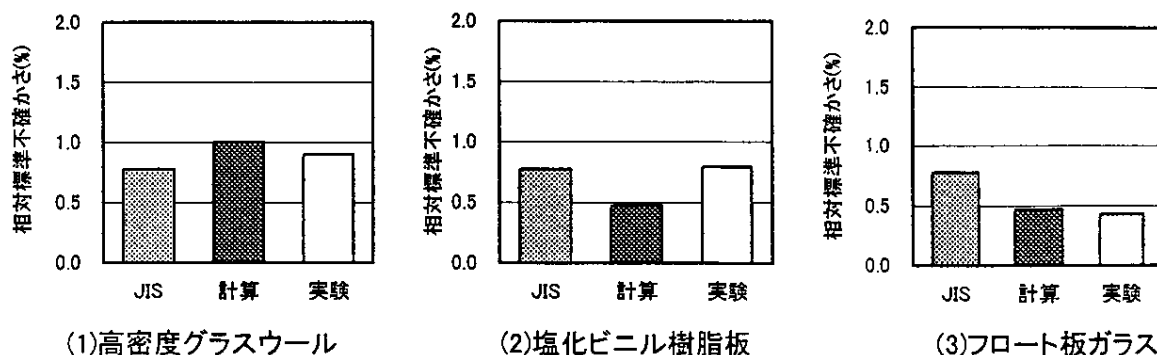


図-5.2 相対標準不確かさの比較

これを詳しく検証するために、各不確かさ成分の相対不確かさを図-5.3 に示す。高密度グラスウール板の結果(図-5.3(1))から、当試験所の測定条件の内、電力測定の不確かさはJISの規定値を満たしていないことがわかる。熱伝導率の合成不確かさは4つの成分からなるが、高密度グラスウール板においては電力測定の不確かさが規定値より大きいため、「計算」の合成不確かさが「JIS」の値を超えているといえる(図-5.2(1))。ところで、4つの不確かさ成分の内、温度差、面積、厚さの測定値は試験体によってあまり変化しないが、電力測定値のみが試験体の熱伝導特性によって大きく変化する。 $\lambda \propto \Phi$ (3.2.1 参照)より、電力測定値の大きさは試験体によって、(高密度グラスウール板) < (塩化ビニル樹脂板) < (フロート板ガラス) の関係にあり、電力測定の標準不確かさ $u(\Phi)$ が試験体によってあまり変化しなければ、高密度グラスウール板における相対不確かさ $u(\Phi)/\Phi$ が他に比べて大きいことが理解できる。また、電力測定の不確かさの内、最も影響が大きいのは非平衡による熱損失の不確かさであることが表-3.1 で明らかにされている。すなわち、熱伝導率の小さい材料の測定においては、電力測定、特に非平衡による熱損失が測定の不確かさ評価に大きく影響するので、熱非平衡におけるより厳密な測定条件の設定が必要であると結論付けられるであろう。逆に、熱伝導率の大きい材料の測定においては、試験体への供給熱量が大きいことから熱非平衡の影響は相対的に小さく、温度差測定の不確かさの影響が相対的に大きいとも言うことができる。なお、熱非平衡による熱損失の程度は試験方法(試験体1枚法と試験体2枚法)によって違いがあるかもしれないので、試験方法ごとに評価する必要があるだろう。

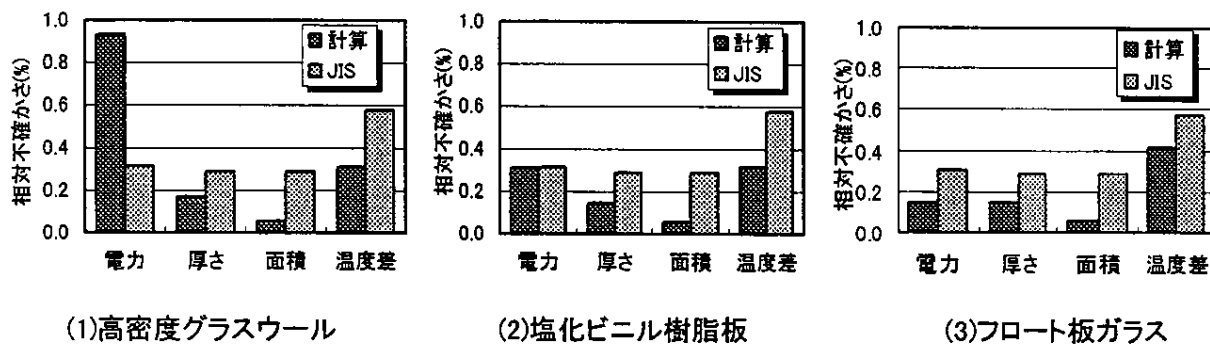


図-5.3 不確かさ成分の相対不確かさ

5. 2 JIS の表現としての測定の不確かさ

5. 2. 1 JIS A 1412-1:1999 の記述

第3章の検討により、熱伝導率試験における測定の不確かさは JIS A 1412-1:1999 で規定される不確かさより大きい可能性があることが明らかになった。一般に、試験方法で規定される測定の不確かさの値は試験結果の有効数字の最小桁より小さい値であることが期待されている。これに係る記述は当該 JIS における「3.5.2 c 結果の表示」および当該 JIS の解説にあり、次のように記されている。

本文, 3.5.2 c) 結果の表示 各伝熱特性値は有効数字 2 けたで表示する。試験体の温度差, 厚さ, 熱流量 (供給電力) 等を有効数字 3 けたで測定できた場合は 3 けたで表示してもよい。

備考 適当に分布した試験体平均温度に対する熱伝導率測定結果が, 3 点以上得られていて試験体平均温度と熱伝導率の間に相関が認められるときは, 熱伝導率を試験体平均温度の 1 次又は 2 次以上の回帰式で表すことができる。このとき有効温度範囲及び相関係数を明記する。

解説, 3.15 伝熱特性の算出 特に温度測定の精度を勘案すると, 表示できる有効数字は 2 けたであるが, 熱伝導率の一次測定装置としての必要性から, 入念に測定することによって, 3 けたまで表示してよいことにしてある。特に回帰式は, 有効数字 3 けたまでの測定値から求めた方が, よりよい近似式が得られる。

5. 2. 2 JIS A 1412-1:1999 記述の解釈

本報告 3.3 からわかるように、熱伝導率の測定の不確かさに影響する要因の内、最も影響度が高いのは温度測定である。温度測定の相対不確かさが 1%以下であるとき熱伝導率の測定の相対不確かさは 1%以下にあることが概ね期待でき (十分ではない)、有効数字 2 桁の表示は妥当であると考えられる。ただし、熱伝導率の測定結果を有効数字 3 桁で表示する場合には、温度測定の相対不確かさが 0.1%以下であるばかりでなく、厚さの測定やその他の要因までもが、少なくとも、相対不確かさ 0.1%以下の制約を受ける。それらの厳しい精度条件が実現可能であるかどうかは試験所の品質管理に負うところである。

一方、有効数字 3 桁の表示の主な目的は、熱伝導率が平均温度に依存する特性を用いて、測定された平均温度範囲内の任意の平均温度における熱伝導率を計算で求める、あるいは一般化するための式で表すことにあるのが前節の「備考」および解説で暗示されている。不確かさの評価では、通常、計算途中の有効数字は最終に表示される有効数字より 1 桁多くとることが推奨されているので、この場合においても、近似式を求める際の注意事項として当該事項を備考に記載し、本文に含めないことが妥当であると考えられる。その結果、測定結果の有効数字は 2 桁で表示することとすれば、測定条件としての温度測定に要求される精度 1% (2.4.1.2 加熱板と冷却板の温度) と整合するであろう。

5. 2. 3 測定の不確かさの表記の提案

当該 JIS に不確かさを表記するか否かおよび表記する場合の適切性は JIS 原案作成委員会の検討

に任せ、当調査委員会の任ではないが、当調査研究の目的にも記述されているように、測定の不確かさを多くの規格に取り入れるためには表記の事例が有効かつ必要であると思われることから、以下に提示することにした。ただし、いずれの規格にもそれぞれの特徴があり、測定の不確かさの議論も十分であるとは言えない状況であるので、一つの例として考えられたい。

以上より、結果の表示の項は次の記述が適切であると考えられる。

本文, 3.5.2 c) 結果の表示 各伝熱特性値は有効数字 2 けたで表示する。ただし、さらに厳密な測定値が要求される場合は、測定の不確かさを評価し、これと整合する適切な有効数字を設定してもよい。この場合、評価された測定の不確かさの値を表示しなければならない。

備考 測定の不確かさの評価は GUM に基づくものとする。熱伝導率の測定の不確かさ算出例を Appendix に示している。

適当に分布した試験体平均温度に対する熱伝導率測定結果が、3 点以上得られていて試験体平均温度と熱伝導率の間に相関が認められるときは、熱伝導率を試験体平均温度の 1 次又は 2 次以上の回帰式で表すことができる。このとき有効温度範囲及び相関係数を明記する。

解説, 3.15 伝熱特性の算出 温度測定の精度を勘案すると、表示できる有効数字は通常 2 けたであるが、測定の不確かさを評価して、その値と整合する有効数字を採用できるとした。特に厳密な測定を行う必要性としては、熱伝導率の標準としての値付けの場合などがある。測定の不確かさの評価及び表記方法は GUM に従うことを原則とし、評価値の妥当性の表明が要求される場合は、測定者の責任において、Appendix に示した算出例のような証拠を提示しなければならぬ。

回帰式の定数の有効数字は測定値の有効数字より 1 けた多くとることが望ましい。回帰式を用いてある平均温度での伝熱特性値を決定するときには測定値の有効数字に合わせる。この場合、決定される伝熱特性値の有効数字は回帰式の定数の有効数字より 1 けた小さく丸めて表示する。

第6章 総括

6.1 まとめ

測定の不確かさは試験結果の信頼性を確保する重要な指標であり、今後、多くの JIS に測定の不確かさの概念が導入されることが期待される。測定の不確かさは、ISO/IEC 17025 の要求事項として明記され、試験所認定制度においては、その品質システムへの移行が 2002 年 12 月に完成するという ILAC の目標に向けて進められてきた。

ISO/IEC 17025, 5.4.6.2, Note2 では、試験所は広く認められた試験方法に従うとき、個別に測定の不確かさを求めなくともよいとされている。このことは、JIS 等の公的試験方法に測定の不確かさが考慮されていることが前提となっている。当委員会では、測定の不確かさが考慮されている公的試験方法の表現について討議した。本報告書は、以下の構成になっている。

第1章 調査研究の目的と実施体制

当調査研究の背景、目的について述べ、委員会の実施体制、期間及び委員会の簡単な討議内容について記している。

第2章 測定の不確かさについての一般的概念

本章では、測定の不確かさの概念と試験所認定制度における一般的要求事項について、これまでの世界的動向を概観し、重要な文書について簡単な解説を行っている。ISO/IEC 17025 で要求される測定の不確かさ評価の具体的な指針として、ILAC 及び APLAC のポリシーが重要であることが確認され、わが国においては完全実施までの経過措置として JNLA の暫定方針が公表されていることが確認された。

第3章 熱伝導率試験における測定の不確かさの評価

JIS A 1412-1:1999, 「熱絶縁材の熱抵抗及び熱伝導率の測定方法—第1部：保護熱板法（GHP 法）」を取り上げ、当試験方法の概略、測定の不確かさ算出手順について述べている。また、当該 JIS の中に記されている測定条件から見積もられる測定の不確かさの大きさについての評価結果を示した。

第4章 繰返し測定における測定の不確かさ評価の確認

本章では、第3章の検討結果を確認するために行った実験の詳細について述べている。また測定値の妥当性を確認するために、NIST の標準板を用いその測定値と比較を行い、良好一致をみている。関係協力試験機関の実験結果との対比を行い、試験機関間で大きな差異はなかったことが確認された。

第5章 測定の不確かさの検証と JIS 規格の表現

本章では、第3章と第4章の結果を検証し、不確かさ成分の効果について述べている。その結論から、当該 JIS に測定の不確かさを表現する際の提案を行っている。当提案では、測定条件とそれらから見積もられる測定の不確かさの整合性に注目し、特に、有効数字の扱いを明確にしている。

第6章 総括

本章では、当調査研究のまとめと今後の課題について述べている。

測定の不確かさの評価は、わが国においては、関係諸団体間で広くコンセンサスが得られている

状態であるとは言えないであろう。一方で、産業の国際化が急速に進む今日において、各試験所において ISO/IEC 17025 に基づく品質システムの的確な運用が強く求められている現実がある。当委員会では、短期間で密度の濃い議論を重ね、測定の不確かさの評価における問題点を討議した。ただし具体的に取り上げたのは、建築材料の熱伝導率試験の一試験方法だけであり、当委員会の報告がどこまで一般性を有するか定かではない。今後の多方面での検討において、本報告が参考になれば幸いである。

当委員会の主たる結論は次のように記述できる。

試験における測定結果の信頼性を保証するために、測定の不確かさを検討することは有益である。特に、測定量 (measurand) に対する不確かさ成分の効果はそれぞれの成分の不確かさの値と感度係数の積で表されるので、成分ごとに不確かさを見積もった後にそれらを合成するという GUM に基づく測定の不確かさ評価方法は有効である。

試験結果のばらつきの推定は測定の不確かさの値を用いて表現でき、適切な場合、有効数字で測定の不確かさの表現に置き換えることができる。測定結果の有効数字は、測定の不確かさが測定結果の最小桁より小さい範囲に含まれていることを暗示している。したがって、測定結果を有効数字で表す場合、試験方法で規定された測定条件下で見積もられる不確かさの大きさと結果の有効数字とは整合していなければならない。

ISO/IEC 17025 では測定の不確かさを小さくすることを必ずしも要求しているわけではないが、測定の不確かさを小さくすることを考えてみる。測定量がいくつかの成分で表される場合、測定量の測定の不確かさを主に決定するのは重要な要因であるので、全ての不確かさ成分の不確かさを小さくすることは実際的でない場合がある。試験における測定の不確かさは試験方法に依存しており、測定機器の精度 (校正の不確かさ) の影響は相対的に充分小さいことが多い。この場合、機器の精度を向上させても測定の不確かさは期待される程に充分小さくならないことが予想される。測定の不確かさを小さくするためには、不確かさ成分の効果の評価して、効果の大きいものから見直していく必要がある。

また、当委員会で行った実験の一部で明らかになった例のように、測定値のばらつきが測定の不確かさの推定値を上回る場合 (好ましくないことであるが)、測定方法の見直しや不確かさ要因の再抽出などの活動によって、試験結果の信頼性を向上させる機会が与えられるという効果も期待できる。

6. 2 今後の課題

委員会の中で討議されたその他の事項を以下に挙げておく。

1) 測定の不確かさを考慮した JIS 改正のガイドライン

測定の不確かさを考慮した JIS の改正に向けて、その作業の指針となるガイドラインの作成が早急になされることが望ましい。当委員会ではひとつの JIS を取り上げて詳細な検討を行ったが、建築材料分野に限っても非常に多くの JIS があるので、それらのすべてについて当委員会で行ったような実験を伴う検討を行うことは実際的でない。指針となるガイドラインに副って各 JIS における測定の不確かさを見直し、それぞれの JIS 作成の関係機関でその検証をなすのが適切であ

と思われる。多くの試験所では QC 活動のための蓄積されたデータがあり、それらを用いて検討結果の妥当性を検証するのは比較的容易であると思われる。

2) 試験条件の記述

試験条件は、それに従うことによって、試験結果のばらつきが小さくなるように制限が設けられていると考えられる。その結果、試験結果に期待される測定値のばらつきの程度は有効数字で簡易に表すことができ、試験結果のユーザーも同じ理解で利用することができる。このため、試験条件を満たすことによって達成される結果のばらつきの程度と結果の表示に要求される有効数字が確実に整合していなければならない。両者の整合性を確保することが測定の不確かさを考慮した JIS の条件になる。

3) 機器の精度と測定の精度の区別

測定の不確かさの評価では、機器の精度と測定の精度を区別する必要がある。機器の精度は通常、校正又は検証によって明らかであることが多いが、測定の精度は試験環境条件や要員の技能に影響されることが知られている。「測定は 0.1% 以内の精度の機器を使って行う」のか、「測定は 0.1% 以内の精度で行う」のかは明確に区別されなければならない。前者では機器の精度しか述べていないので、これ以外に測定に伴う不確かさを合成しなければならないが、後者は機器の精度だけでなく測定に伴う不確かさが含まれていると解釈できる。なお、「0.1% 以内の精度」とは「 $\pm 0.1\%$ 以内の精度」と解釈されるが、正確な記述が望まれる。

4) 用語の統一

VIM では、一般計測用語を定義しているが、できる限りこれに従う用語を用いることが望まれる。ISO/IEC 17025 の普及に伴い、校正証明書では測定の不確かさが表記されている。これに対して JIS の試験方法で「誤差」という表現で精度が規定されている場合、それが拡張不確かさを指すのか、限界値を指すのか明確でないことから、試験における測定の不確かさを適切に評価できない。一般に、規格の中で「誤差」を規定している場合、許容最大誤差を指すことが多く、他に情報がないときは、規定された誤差を限界値とする一様分布と考えることにより、測定の不確かさを評価できる。

5) 有効数字について

GUM では、不確かさの表示は、有効数字 2 桁を用い、その最小桁に合わせて測定結果を表示するのを原則としている。ところが、試験における測定の不確かさの表示はこれと異なる場合がある。測定結果を要求される有効数字で表し、その最小桁に合う不確かさの値を表示する例が見られ、必ずしも測定の不確かさの値を 2 桁で表してはいない場合がある。これは GUM が主として校正における測定の不確かさを対象としているため厳密な不確かさ評価を求めているのに対し、試験における測定の不確かさ評価では個々の測定値の信頼性を保証するために測定の不確かさが求められているに過ぎないからであるとも考えられる。有効数字の扱いは重要で、特に ISO/IEC 17025, 5.4.6.2, Note 2 が適用される試験方法にあつては測定の不確かさの値の表明を求めないこともあるので、今後の議論の課題の一つとして挙げておきたい。

熱伝導率 λ は JIS A 1412-1, 3.5.2 伝熱特性に示される次式で定義される。

$$\lambda = \frac{\Phi \cdot d}{A \cdot (T_1 - T_2)}$$

ここで、 Φ : 加熱板の主熱板に供給される平均電力 (W)

d : 試験体の厚さ (m)

A : 伝熱面積 (m²)

$T_1 \cdot T_2$: (= ΔT) 試験体両側表面の温度差 (K)

それぞれの成分の標準不確かさを $u(i)$ とし、 $u(T) = u(T_1) = u(T_2)$ とすれば、合成分散は次式になる。

$$u^2(\lambda) = \left(\frac{\partial \lambda}{\partial \Phi}\right)^2 u^2(\Phi) + \left(\frac{\partial \lambda}{\partial d}\right)^2 u^2(d) + \left(\frac{\partial \lambda}{\partial A}\right)^2 u^2(A) + 2\left(\frac{\partial \lambda}{\partial \Delta T}\right)^2 u^2(T)$$

感度係数 c_i は以下で与えられる。

$$c_\Phi = \frac{\partial \lambda}{\partial \Phi} = \frac{d}{A \cdot \Delta T} \quad \left(\frac{1}{m \cdot K}\right)$$

$$c_d = \frac{\partial \lambda}{\partial d} = \frac{\Phi}{A \cdot \Delta T} \quad \left(\frac{W}{m^2 \cdot K}\right)$$

$$c_A = \frac{\partial \lambda}{\partial A} = -\frac{\Phi \cdot d}{A^2 \cdot \Delta T} \quad \left(\frac{W}{m^3 \cdot K}\right)$$

$$c_{\Delta T} = \frac{\partial \lambda}{\partial \Delta T} = -\frac{\Phi \cdot d}{A \cdot \Delta T^2} \quad \left(\frac{W}{m \cdot K^2}\right)$$

このモデルの評価の例として以下の仮定を設ける。

- 1) 2.4.3 電力測定には、「加熱板へ供給する電力測定は全計測範囲内で 0.1%以内の精度で行う」とある。0.510Wの電力では該当測定器を用いた測定の不確かさは $5.10 \times 10^{-4} W$ になる。また、3.2.1 試験体の寸法及び選定には「非平衡誤差及び端面損失誤差の合計は 0.5%が限度となるようにする」との記述から、これらの不確かさは $2.55 \times 10^{-3} W$ であるとする。したがって、電力測定の不確かさはこれらを合成して、 $2.60 \times 10^{-3} W$ とできる。
- 2) 2.4.2 厚さ測定には「試験体の厚さ測定は、0.5%以内の精度で測定できるものを用いる」とある。試験体は厚さ 24.5mm のガラスウールで、その厚さは 0.5%の精度のノギスで測定されたとすると、厚さ測定の不確かさは $1.225 \times 10^{-4} m$ になる。
- 3) 伝熱面積は $0.15m \times 0.15m = 0.0225m^2$ であった。主熱板はステンレス板で作られているとき、文献から熱膨張率 $\alpha = 14.7 \times 10^{-6}/K$ を得て、測定範囲の設定温度変化 $\Delta \theta = 40K = \pm 20K$ を限界値としたときの伝熱面積の変動がその範囲で一様に分布すると仮定すると、伝熱面積の不確かさは $8.82 \times 10^{-5} m^2$ になる。
- 4) 試験体両側表面の温度差の独立した測定によって、次の 5 つの値が得られたとする。15.1, 15.3, 14.9, 15.1, 15.0K。これら 5 つの結果の平均値は 15.08K で、標準偏差は 0.1483K である。温度の測定は試験体両側表面で行われたが、温度測定の平均の不確かさはこれに等しいとして標準偏差 0.1483K を用いる。

これらの仮定から、厚さ 24.5mm のガラスウールを、伝熱面積 0.0225m² の試験装置に取り付け、0.510W の電力を与えて、試験体の表面温度差 15.08K の結果を得た。これより熱伝導率は $\lambda=0.0368$ W/m · K と計算される。

また、感度係数は次のように評価できる。

$$c_{\Phi} = \frac{\partial \lambda}{\partial \Phi} = 0.0722 \text{ (1/m} \cdot \text{K)}, \quad c_d = \frac{\partial \lambda}{\partial d} = 1.503 \text{ (W/m}^2 \cdot \text{K)},$$

$$c_A = \frac{\partial \lambda}{\partial A} = -1.6367 \text{ (W/m}^3 \cdot \text{K)}, \quad c_{\Delta T} = \frac{\partial \lambda}{\partial \Delta T} = -0.00244 \text{ (W/m} \cdot \text{K}^2)$$

したがって、合成分散は $u^2(\lambda)=2.92 \times 10^{-7} \text{ W}^2/\text{m}^2 \cdot \text{K}^2$ であり、これより、合成標準不確かさ $u(\lambda)=5.41 \times 10^{-4} \text{ W/m} \cdot \text{K}$ が導かれる。

包含係数を $k=2$ とすると、

$$\text{拡張不確かさ } U=k \cdot u(\lambda)=1.08 \times 10^{-3} \text{ W/m} \cdot \text{K}$$

以上から測定結果を次のように記述できる。

「この試験体の JISA 1412-1 で定義される熱伝導率は 0.037W/m · K で、その不確かさは包含係数 $k=2$ を用いた拡張不確かさで $\pm 0.001 \text{ W/m} \cdot \text{K}$ であった。」

不確かさ評価の概要

不確かさの要因	評価値	分布/除数	感度係数	自由度	標準不確かさ
電力測定	$2.60 \times 10^{-3} \text{ W}$	矩形/ $\sqrt{3}$	0.0722	∞	$1.08 \times 10^{-4} \text{ W/m} \cdot \text{K}$
厚さ測定	$1.225 \times 10^{-4} \text{ m}$	矩形/ $\sqrt{3}$	1.503	∞	$1.06 \times 10^{-4} \text{ W/m} \cdot \text{K}$
伝熱面積	$8.82 \times 10^{-5} \text{ m}^2$	矩形/ $\sqrt{3}$	-1.6367	∞	$-8.33 \times 10^{-5} \text{ W/m} \cdot \text{K}$
温度差測定	0.1483K	正規/1	-0.00244	4	$-7.24 \times 10^{-4} \text{ W/m} \cdot \text{K}$
包含係数			2		
合成標準不確かさ			0.000541 W/m · K		
拡張不確かさ			0.00108 W/m · K		

注) 測定結果の拡張不確かさの評価に用いた包含係数 $k=2$ は、いつもその値の使用が勧められるものではない。能力のある試験所は、不確かさ要因の確率分布を考慮した信頼水準に基づいて、例えば次のように包含係数を決定するであろう。

電力、厚さ及び伝熱面積の各不確かさ要因の評価は、タイプ B の方法によったので自由度を無限大とし、温度差測定の自由度は $(n-1)=4$ とする。Welch-Satterthwaite の式を用いて、有効自由度 ν_{eff} は次式で求められる。

$$\nu_{\text{eff}} = \frac{u^4(\lambda)}{\frac{C^4_{\Phi} u^4(\Phi)}{\infty} + \frac{C^4_d u^4(d)}{\infty} + \frac{C^4_A u^4(A)}{\infty} + \frac{C^4_{\Delta T} u^4(\Delta T)}{4}} = \frac{0.000541^4}{(-0.00244)^4 (0.1483)^4} \cong 5$$

スチューデントの分布表を用いて、95%信頼水準で自由度 5 に対応する包含係数 k は 2.57 と求められる。そこで、拡張不確かさ U は、

$$U=k \cdot u(\lambda)=(2.57)(5.41 \times 10^{-4})=0.0014 \text{ W/m} \cdot \text{K}$$

なお、ここでは簡単のために5つの温度差測定のを挙げたが、実際にはさらに多くの繰返し測定によって有効自由度を大きくすることが望ましい。この例では、50回以上の繰返し測定によって約95%信頼水準での包含係数は $k=2$ になる。