

〈一般研究課題〉 住宅・ビルのリアルタイム Q 値推定方法の開発

助成研究者 大同大学 高木 康夫



住宅・ビルのリアルタイムQ値推定方法の開発

高木 康夫
(大同大学)

Q-Value Evaluation Method for an Existing Building

Yasuo Takagi
(Daido University)

Abstract :

The new estimation method of Q-value that is the index expressing heat penetrating rate per unit floor area, is proposed and the values are estimated for a campus building in Daido University. In diagnosis of the building in view of energy saving, the building total energy consumption and peak energy consumption are both very important issue. The total energy consumption is closely related to building insulation performance that is expressed by Q-value. New Q-value estimation method for existing buildings is proposed using only building interior temperature and classical heat transfer theory. The method is tested by measuring the campus building insulation performance.

1. はじめに(研究背景と目的)

日本は2050年までに温室効果ガスの排出量の80%削減を目指している。平成24年度のエネルギー起源CO₂排出量は、産業部門が32.7%、業務その他部門が21.4%、家庭部門が16.0%、運輸部門が17.7%となっている。この中でも、ビルや店舗の消費エネルギーが含まれる「業務その他部門」は、京都議定書の基準年と比べて65.8%もの大幅増加となっている [環境省, 2014]。このため、「業務その他部門」の省エネルギーは大変重要である。特に、「業務その他部門」の中心を占めるビルの消費エネルギーの中で、空調システムが消費するエネルギーは、ビルの消費エネルギーの約40%を占めている [ECCJ, 2015]。そこで、本研究ではビルの空調エネルギーの削減を扱う。ビルの空調エネルギーを節約するための方法として、様々な手段が提案されている。主なものとして、窓をは

はじめとする壁の断熱性を上げる、夏に日光を制御する庇を設ける、外気の取り入れの工夫や空調システムの制御を改善する、などが上げられる。最も効果があり理解しやすい方法は、断熱性能の向上であり、断熱性能を向上させた多くの先進的なビル工法が提案されている [鹿島建設, 2015]。新しい先進的なビルの普及も重要であるが、すでに多量に存在している既存ビルの断熱性能の改善も空調エネルギー削減には重要である。効果的に既存ビルの断熱性改善改修を行うためには、稼動しているビルの断熱性能を計測し、弱点を洗い出す必要がある。それによっではじめて、改修費用と改善効果の定量評価が可能となる。

家(ビル)の省エネ性能は、Q値と呼ばれる指標で表される [IBEC, 2015]。Q値は熱損失係数と呼ばれ、室内外の温度差が1℃の時、家全体から単位時間に床面積1m²あたり逃げ出す熱量と定義される。単位はW/m²℃である。Q値は従来新築住宅の断熱性能を示す指標として扱われてきた。一方、既存のビルや住宅に対してQ値を測定する手段は確立されていない。この理由は、既存ビルの場合、構造が複雑かつ多くの材料が使われているので、計算によりQ値を出すのは多くの労力を要し、容易ではない。また、測定によりQ値を求めるのも容易でない。外部の気象条件が大きく変わる一方で、ビルや家は外気温に対する遅れ伝達関数を持ち [上坂、鈴木、半谷、水野、高木, 2014]、外気温との差が1℃の時の放熱量を推定することは容易でない。また、太陽の輻射によっても外壁の温度は上昇するので、これらの影響を除いた真のQ値を推定するのは困難である。本論文では、既存ビルのQ値推定の重要性に鑑み、既存ビルや家に対応したQ値の瞬時推定方法を提案する。2章で推定方法を示し、3章でこの方法を実際のビルに適用して測定した例を示す。また、4章で別の方法により推定したQ値と比較することにより検証を試みた。

2. Q値推定方法

提案する推定方法は、ビルの内側から壁に流れる熱流量 Q_m と壁から外部環境に流れる熱流速 Q_{out} は、平均的に見れば等しいこと、および、ビルの内側の風速、気温などの環境条件はほとんど一定であることを利用する。すなわち、部屋の内部から壁への熱流速を推定することにより、Q値を推

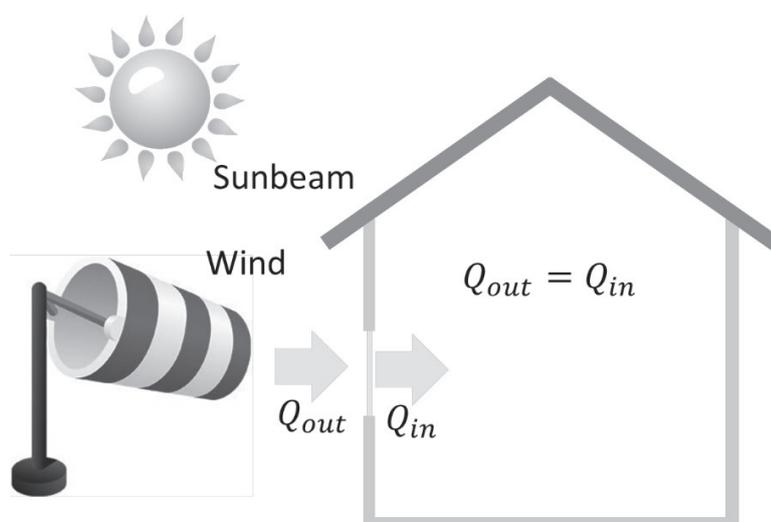


Fig.1 The concept of heat flow of a house

定する。また、ここでは断熱性能を推定するので、太陽の輻射は考慮しない。

部屋の内部から壁への熱流速の推定は、壁にセンサーを取り付け直接計測する方法と、伝熱工学

の知識により推定する方法がある。直接計測する方法は、一様な大きな熱流速が存在する時は容易であるが、壁の部位によって異なるときや、熱流速が小さい時には精度を高めることができない。そこで、伝熱工学の知識を用いて熱流速を推定する方法を採用する。部屋の内部は一般的には強い風が吹く環境ではないので、垂直な壁の自然対流熱伝達としてモデル化した。対象とする壁や窓の温度は一様 T_w とし、部屋の中心部の温度を T_r とする。すると、熱伝達の関係式は以下の式で表現される [日本機械学会, 1975]。

平均ヌセルト数と熱伝達率の関係式：

$$N_{um} = \frac{\alpha_m l}{\lambda_\infty} \quad (1)$$

N_{um} ：平均ヌセルト数, l ：壁の高さ[m], λ_∞ ：部屋の中心部における空気熱伝導率[W/m°C], α_m ：平均熱伝達率：[W/m²°C]

平均ヌセルト数と局所ヌセルト数の関係式：

$$N_{um} = \frac{4}{3} N_{ux} \quad (2)$$

N_{ux} ：局所ヌセルト数

局所ヌセルト数の式：

$$N_{ux} = K_1 \left(\frac{v_\infty}{v_w} \right)^{0.21} (G_{rx} P_r)^{1/4} \quad (3)$$

v ：動粘性係数[m²/s], G_{rx} ：グラスホッフ数, P_r ：プラントル数

グラスホッフ数の計算式

$$G_{rx} = \frac{x^3 g \beta (T_w - T_r)}{v_\infty^2} \quad (4)$$

x ：壁の下端からヌセルト数を計算する場所までの距離[m], β ：空気の膨張係数[1/°C], T_w ：壁の温度[°C], T_r ：部屋の中心温度[°C], g ：重力係数[m²/s],

$$K_1 = \frac{3}{4} \left\{ \frac{2P_{r\infty}}{5(1+2P_{r\infty}^{1/2}+2P_{r\infty})} \right\}^{1/4} \quad (5)$$

$$P_r = \frac{\nu}{\alpha} \quad (6)$$

ヌセルト数から計算される熱伝達率を用いて、Q値は(7)式により計算される。

$$Q = \sum \frac{S_w \alpha_m (T_w - T_r)}{S_{floor} (T_{amb} - T_r)} \quad (7)$$

S_w ：壁(窓)の面積 [m²], S_{floor} ：床面積 [m²].

以上の計算式よりQ値を推定するので、必要となる測定データは、(i)部屋の温度と(ii)壁の温度のみとなり、容易に測定することができる。

3. Q値の測定

本論文では、容易に室温及び壁温度を測定する方法として、赤外線サーモグラフィと黒体テープを用いた。温度測定したい場所に黒体テープを貼り、赤外線サーモグラフィにより温度を測定する。まず、サーモグラフィカメラにより、部屋の中で断熱性能の低いところ、すなわちQ値に大きな影響を与えている場所を探し、次のステップで、黒体テープを貼り温度を測定する。また、実際にQ値に影響を与える



Fig. 2 Infrared thermography camera

のは、熱伝達率の大きいガラス窓であるが、ガラス窓は環境からの日射の影響を強く受ける。南側の直達日射のみでなく北側の窓であっても散乱日射の影響を受ける。Fig.3には2013年11月のつくば市で測定された散乱日射量を示す [気象庁, 2015]。

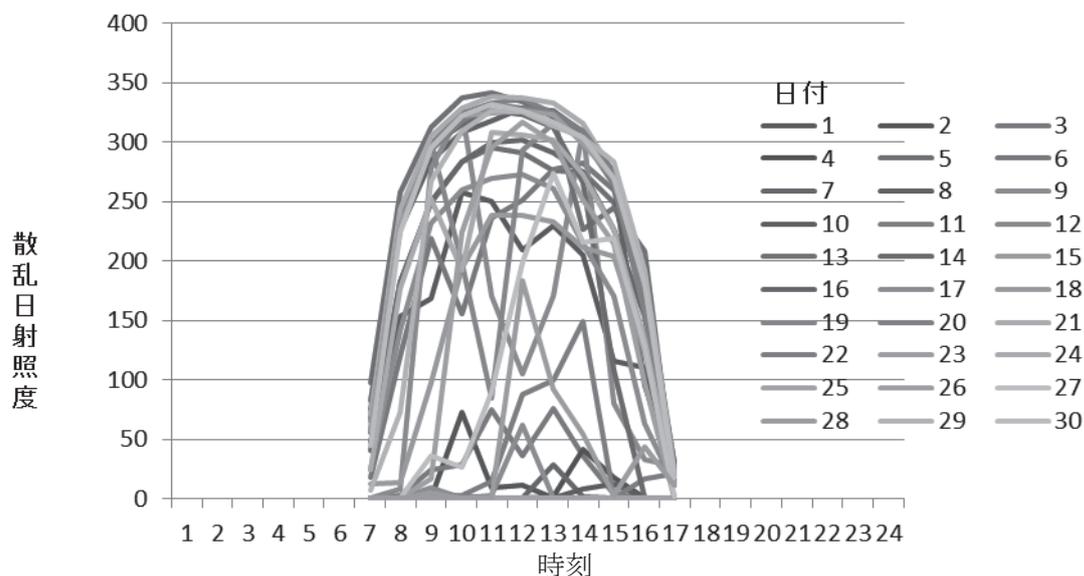


Fig. 3 The diffuse solar radiation at Tsukuba city, Nov. 2013.

つくばにおける11月の日の出は6:00～6:30、日没が16:20～16:40であるので、日没後に測定すれば散乱日射の影響を受けることなく測定できることがわかる。

以上、説明した方法を用いて、大同大学のA棟のQ値を測定した。

3.1 対象ビルの概要

測定対象のビルは、Fig.4の14階建ての主に研究室のある建物である。Fig.4aにはその全景を、Fig.4bには実際に測定したフロアの部屋割りを示す。小さな部屋は教員の研究室、大きな部屋は学生の実験室である。これら大部屋、小部屋は、それぞれまったく相似な部屋となっているので、すべての部屋に入って測定する必要はなく、代表的な部屋について測定し推定した。また、直達日射や散乱日射の影響がない夜間に測定したが、念のために、東西南北それぞれについて代表的な部屋の温度を測定し、Q値を求めた。また、本来のQ値には換気や隙間風による熱損失を含める必要があるが、対象ビルについてはこれらの値を適切に推定する方法がないので、熱伝達による熱損失のみ扱うこととする。



Fig.4a The measured building

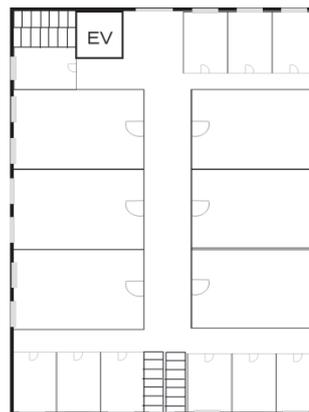


Fig.4b The allocation of rooms

3.2 結果

2014年の10月から12月にかけて、対象ビルの熱損失を測定した。結果をFig.5に示す。Fig.5aは外気温に対するQ値の推定値の関係を示し、Fig.5bは外気の風速に対するQ値の推定値の関係を示す。室内の温度がおおよそ25℃であることを考慮すると、外気温の低下とともにQ値が大きくなるのは、外気温の低下とともに壁の温度が低下し、それにより室温との差が大きくなることにより、自然対流熱伝達率が大きくなることによるものと推定され、合理的である。風速に対する関係は、風速が大きいほど外気と建物の壁との熱伝達率が大きくなり、Q値が大きくなることを示している。これも風が強いほど外気に熱が奪われやすくなることを示し、合理的である。

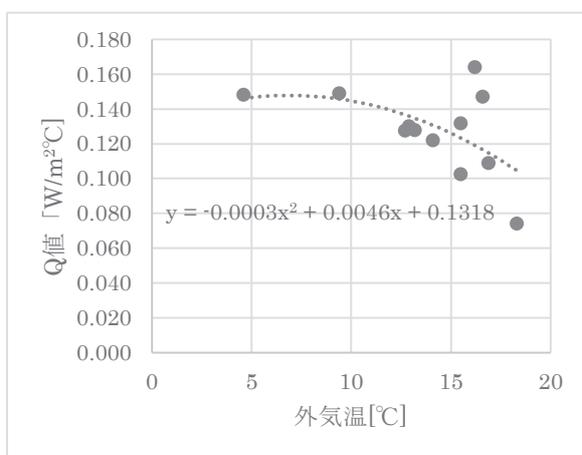


Fig.5a Q-values versus ambient temperature

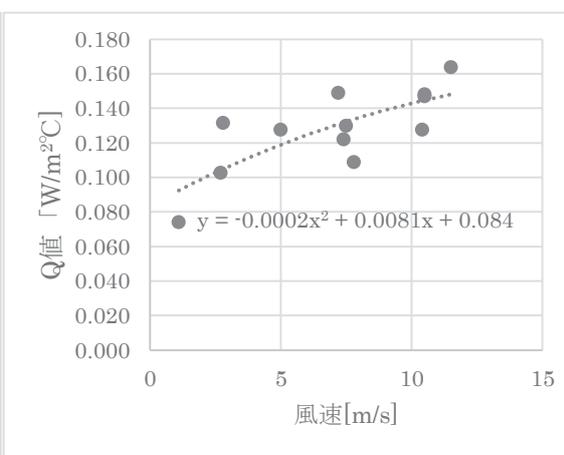


Fig.5b Q-values versus wind velocity

このように、物理現象と整合性の取れた合理的なQ値を推定することができた。また、東西南北でシステマティックな推定値の偏りは見られず、日射の影響が排除できていることが確認できた。

4. 検証

提案したQ値推定アルゴリズムの検証を行うために、外気条件も加味した別のQ値推定アルゴリズムを考案し、両者の結果を比較した。検証のために考案したQ値の推定方法を示す。この方法では、室内と壁との熱流速は、2節で説明したように自然対流熱伝達とする。また、壁の熱流速は壁の材料から求められる熱伝導率を用いる。ほとんどの熱は窓から放熱しているため、ここでの検討ではガラスの熱伝導率を用いる。また、壁外面と外気との熱伝達率は風が吹いているのが一般的

であるので、平板の強制対流熱伝達とする。この伝熱の様子をFig.6に示す。これらの伝熱式は [日本機械学会, 1975]による。平板の強制対流熱伝達率はヌセルト数(8)式を用いる。

$$Nu_m = 0.664Re^{0.5}Pr^{1/3} \quad (8)$$

ここで、 Re :レイノルズ数である。これを用いて、外気との熱伝達率 α_{amb} は(9)式にて計算する。

$$\alpha_{amb} = Nu_m \lambda_{amb} \quad (9)$$

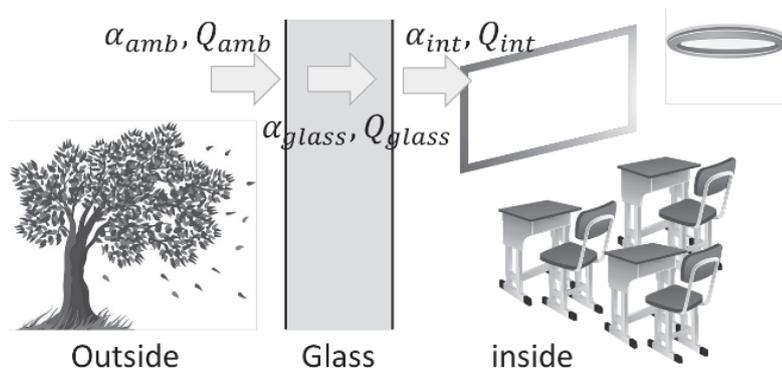


Fig.6 Heat transfer model for the comparison purpose

Fig.6に示す全体の熱伝達モデルを以下に定式化する。

$$Q = Q_{amb} = Q_{glass} = Q_{int} \quad (10)$$

Q_{amb} :窓外表面と外気との交換熱量, Q_{glass} :ガラスを伝導する熱量, Q_{int} :窓内表面と室内空気との交換熱量, また、温度の関係は下式に分解できる。

$$T_{amb} - T_{int} = (T_{amb} - T_{out}^{glass}) + (T_{out}^{glass} - T_{in}^{glass}) + (T_{in}^{glass} - T_{int})$$

T_{amb} :外気温度, T_{int} :室内温度, T_{out}^{glass} :窓ガラス外表面温度, T_{in}^{glass} :窓ガラス内表面温度,

ここで、全体の熱抵抗 R を(11)式で定義する。

$$Q = \frac{T_{amb} - T_{int}}{R} \quad [W/m^2] \quad (11)$$

熱の流れ Q はどこで見ても、また、全体で見ても同じなので、下式が成立する。

$$RQ = R_{amb}Q + R_{glass}Q + R_{int}Q$$

なお、ここで熱伝達率 α と熱抵抗 R の関係は、逆数の関係にある。

$$R = 1/\alpha$$

整理すると、各熱抵抗と全体の熱抵抗は(12)式で表現できる。

$$R = R_{amb} + R_{glass} + R_{int} \quad [m^2C/W] \quad (12)$$

ガラスの一般的な熱伝達率($\alpha_{glass} = 5.9[W/m_2C]$)と(8)、(9)式で計算される α_{amb} を用いて、(12)式により熱抵抗 R をもとめ、(11)式を用いて Q 値を求めた。その結果をFig.7に示す。

風のない時の Q 値や全体の傾向は概ね一致するものの、強風域での Q 値は、比較手法のほうがやや小さい。この方法では、完全に検証されたとはいえない。

5. おわりに

従来、新築住宅の断熱性能を示す指標として扱われてきた Q 値を、既存のビルや住宅に対して測定する手段を提案した。既存のビルに適用されてこなかった理由は、ビルの構造が複雑かつ多くの材料が使われているので、計算により Q 値を出すのは多くの労力を要し容易ではない。また、測定

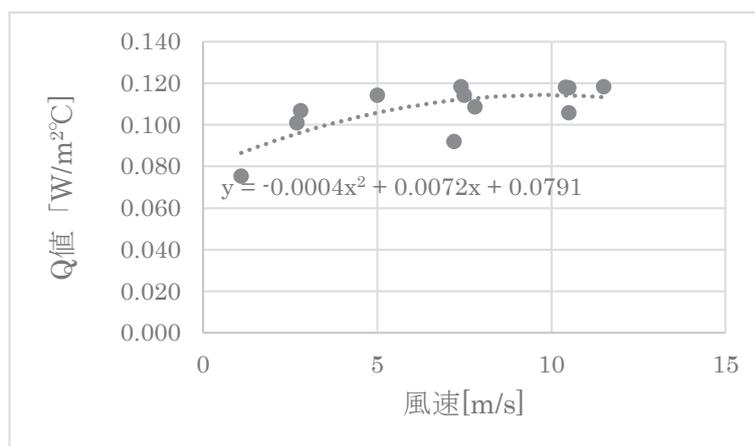


Fig.7 Q-value by the comparison method

によりQ値を求める場合、外部の気象条件が大きく変わる一方で、ビルや家は外気温に対する遅れ伝達関数を持ち [上坂、鈴木、半谷、水野、高木, 2014]、外気温との差が1℃の時の放熱量を推定することは容易でない。また、太陽の輻射によっても外壁の温度は上昇するので、これらの影響を除いた真のQ値を推定するのは困難であった。そこで、本論文では、ほとんど年間変化のない室内の状態量のみからQ値を推定する方法を提案した。3章では、この方法を実際のビルに適用して測定した例を示した。また、4章で別の方法により推定したQ値と比較することにより検証を試みた。

概ね提案方法は検証できたものの、まだ、定量的な検証には至っていない。今後はさらに定量的な検証を重ねて、信頼性のある方法に改良していく。

参考文献

- (1) ECCJ. (2015). ビルの省エネルギー. https://www.eccj.or.jp/office_bldg/01.html.
- (2) IBEC. (2015). 熱損失係数Q値. <http://www.ibec.or.jp/pdf/sjuutaku7.htm>.
- (3) 環境省. (2014). 平成26年版 環境・循環型社会・生物多様性白書. P14.
- (4) 気象庁. (2015). 日射・赤外放射に関するデータ集
http://www.data.jma.go.jp/gmd/env/radiation/data_rad.html.
- (5) 鹿島建設. (2015). ZEB・省エネルギー>エコデザイン.
http://www.kajima.co.jp/tech/energy_save/design/index.html.
- (6) 上坂、鈴木、半谷、水野、高木. (2014). The characteristic analysis of a university building. pp.1242-1246: SICE Annual Conference 2014.
- (7) 日本機械学会. (1975). 伝熱工学資料. 3rd edition, pp.20-21.