

電子機器の熱解析への EXCEL 表計算機能の適用* (日射を受ける筐体のビジュアルな熱回路網法解析例)

富村 寿夫*¹, 石塚 勝*²

Application of Spreadsheet of Excel to Thermal Analysis on Electronic Equipment (An Example of Visualized Thermal Network Method Applied to Housing Heated by Solar Radiation)

Toshio TOMIMURA*³ and Masaru ISHIZUKA

*³ Graduate School of Science and Technology, Kumamoto University,
2-39-1 Kurokami, Kumamoto-shi, Kumamoto, 860-8555 Japan

Recently, some practical numerical analyses using simple programming process of Excel have been reported. In the analysis, each cell of the spreadsheet can be regarded as a nodal point, and calculations are performed by using equations written in those cells. Accordingly, a concrete image corresponding to the physical model can be drawn on the spreadsheet, and by doing classification based on colouring boundary and interior cells, writing and debugging are visually conducted with ease. In the present study, as an application of the useful method to thermal analysis on electronic equipment, visualization of programming and calculation processes by thermal network method have been shown by using the concrete example of a housing heated by solar radiation.

Key Words: Electronic Equipment, Excel, Heat Transfer Design, Numerical Analysis, Spreadsheet, Thermal Network Method

1. 結 言

科学技術計算の分野でよく使われている BASIC, FORTRAN あるいは C などでは、解析のための設計図ともいえるフローチャートを見ながらプログラミングを行い、デバッグを何度も繰り返した末に目的とする解を得ることができる。しかし、苦勞して得られたそのような解も、高級なソフトは別として、単に数字の並びとしてしか表示されないため、データセットとして一旦保存した後、別に用意したグラフィックソフトの助けを借りて図示し、やっと対象とする現象の全体像が把握できるというのが一般的のようである⁽¹⁾。このことから、BASIC, FORTRAN あるいは C などは、文字認識型の解析手法といえる。

これに対し、Excel を用いた解析では、マクロや VBA などを使用しなくても相当な程度までの計算が、プロ

グラムを組むことなく可能となる。また、ワークシート分析の機能を利用することにより、数値や数式が組み込まれたセルとセルとの間の参照関係を視覚的に捉えることができるので、新たに開発した解析ソフトの継承性を確保することができる。さらに、付属のグラフウィザードを起動して、計算結果を直ちに図示することができるだけでなく、主要なパラメータを変更した計算を行う場合も、その結果が図にダイレクトに反映されるので、現象に及ぼすパラメータの影響を視覚的に確認しながら検討することができる。なお、このようにして作成したワークシートにマクロや VBA などを組み込むことにより、さらに実用的かつ効率的な解析が実行できるだけでなく、アイコン化セルの導入により高信頼性かつ効率的な解析ソフトの開発が可能となる。以上の特徴から、Excel は、視覚認識型の解析手法といえる。一方、このような手法にも当然弱点があり、例えば、大空間かつ長時間にわたる解析などには対処できない。しかし、この場合、空間と時間の差分化に不等メッシュを導入することにより、このような困難がある程度まで緩和することも可能である。この他に、空間分割数の変更に対し迅速性に欠

* 原稿受付 2008年10月27日。

*¹ 正員、熊本大学大学院自然科学研究科(☎860-8555 熊本市黒髪2-39-1)。

*² 正員、フェロー、富山県立大学工学部機械システム工学科(☎939-0938 富山県射水郡小杉町黒河5180)。

E-mail: tomi@mech.kumamoto-u.ac.jp

けるなどの弱点もあり、今後、克服すべき検討課題である。

以上のような状況下で、最近、岩井ら⁽¹⁾、森下⁽²⁾、Holman⁽³⁾、伊藤・上江洲ら⁽⁴⁾ などにより数多くの Excel 解析例が示されており、今後、このような解析手法の益々の発展が期待される。

本報告では、日射を受ける筐体の温度分布解析に関し、電子機器の熱解析でよく使用される熱回路網法⁽⁵⁾に、マクロや VBA などを組み込まないで Excel を適用した場合について、数値計算プロセスを可視化した視覚支援型の解析手法を示す。本手法は、これまで紹介されておらず、また BASIC, FORTRAN, C あるいは VBA などの基礎知識を必要としない点に特徴がある。したがって、プログラム言語に慣れていない方々にとって、物理現象の把握に重点を置きたい場合の簡便な数値解析手法の 1 つになるものと考えられる。なお、ここでは Windows XP Professional Version 2002 にインストールされている Excel 2003 を使用した。

主な記号

- a : 筐体外面における日射量の全吸収率 (図 1 参照) [-]
- C_{jk} : 熱コンダクタンス ($j, k = t, s, e, n, w, b, i, \infty$) (図 3, 図 4, 図 5 参照) [W/°C]
- c_p : 空気の定圧比熱 [J/(kg·K)]
- d : 筐体の奥行き (図 1 参照) [m]
- h : 筐体の高さ (図 1 参照) [m]
- Q_i : 筐体内部での消費電力 (図 1, 図 4, 図 5 参照) [W]
- Q_l : 日射による筐体各面への入熱量 ($l = t, s, e, n, w, b$) (図 3, 図 5 参照) [W]
- s : 筐体の東西面に設けられた通風口の開口面積 (図 1 参照) [m²]
- T_∞ : 周囲空気の温度および通風口に流入する空気の温度 (図 1 参照) [°C]
- t : 筐体の厚さ (図 1 参照) [m]
- u_m : 筐体の通風口を流出入する空気の速度 (図 1 参照) [m/s]
- w : 筐体の横幅 (図 1 参照) [m]
- α_i : 筐体内面と内部空気との間の熱伝達率 (図 1 参照) [W/(m²·K)]
- α_o : 筐体外面と周囲空気との間の熱伝達率 (図 1 参照) [W/(m²·K)]
- λ : 筐体構成材料の熱伝導率 (図 1 参照) [W/(m·K)]

ρ : 空気の密度 [kg/m³]

下付き添え字

i : 筐体内部

jk : 筐体の j 面と k 面との間、ただし $k=i$ の場合は j 面と内部、 $k=\infty$ の場合は j 面と周囲空気、 $j=i$ および $k=\infty$ の場合は内部空気と周囲空気の間など

t, s, e, n, w, b : 筐体の上面, 南面, 東面, 北面, 西面, 下面

∞ : 周囲空気

2. 物理モデルと基礎方程式

ここでは、国峰の著書「エレクトロニクスのための熱設計完全入門」⁽⁶⁾に例示されている、日射を受ける筐体の温度分布解析に関する問題を具体例として、Excel 解析を適用してみることにする。

図 1 に示すように、日射を受ける消費電力 Q_i 、横幅 w 、奥行き d 、高さ h 、厚さ t 、東西面に設けられた通風口の開口面積 s 、構成材料の熱伝導率 λ の筐体を考える。ここで、 u_m は通風口を流出入する空気の速度、 T_∞ は周囲空気の温度および通風口に流入する空気の温度、 a は筐体外面における日射量の全吸収率、 α_o は筐体外面と周囲空気との間の熱伝達率、 α_i は筐体内面と内部空気との間の熱伝達率である。なお、ここでは、熱回路網法による解析方法に焦点を絞って検討する

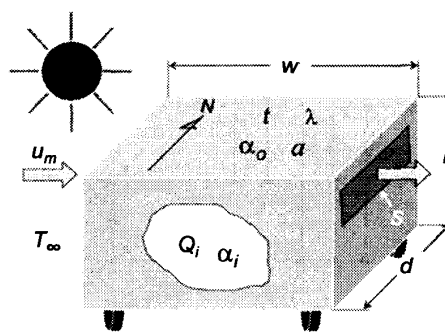


Fig. 1 Physical model of a housing heated by solar radiation

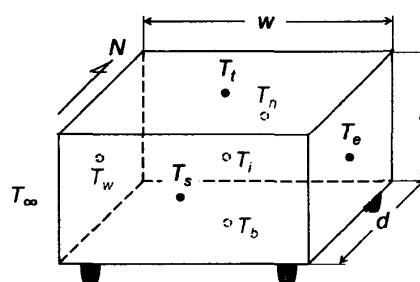


Fig. 2 Nodal points of each temperature of the housing

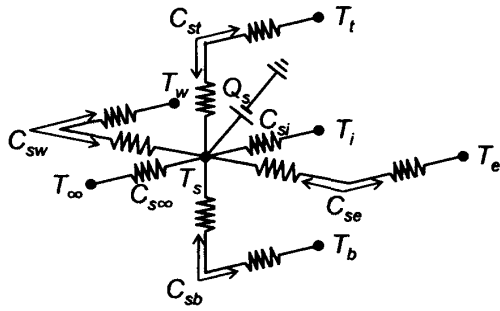


Fig. 3 Thermal network on T_s at the south surface

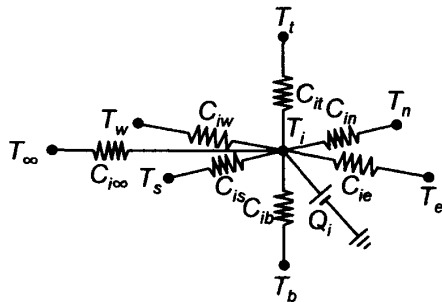


Fig. 4 Thermal network on T_i in the housing

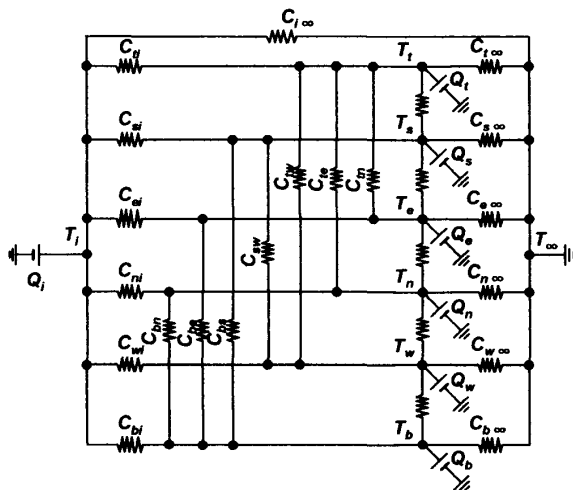


Fig. 5 Whole thermal network of the housing

ために、通風口は当該面での熱伝導に影響を及ぼさないとし、また筐体外面から周囲空間へのふく射伝熱および筐体内面間でのふく射伝熱の影響に関しては、それぞれ、熱伝達率 α_o および α_i の中で考慮することとする。

図2に筐体各面と内部における温度節点を示す。ここでは、簡単のため、筐体の上面、南面、東面、北面、西面および下面の温度は、それぞれ均一であるとし、それらの重心点に、温度節点 T_n, T_s, T_e, T_m, T_w および T_b を配置する。また、筐体内部の空気温度についても同様に均一であるとし、その重心点に温度節点 T_i

を設ける。なお、より詳細に解析するために、解析領域を細かく分割することは、当然、可能である。

図3および図4に、それぞれ、筐体の南面と内部における熱回路網の例を示す。ここで、図3の Q_s は日射による筐体南面への入熱量、 C_{si} は筐体南面と筐体内部の空気との間の熱コンダクタンスすなわち熱抵抗の逆数、 C_{so} は筐体南面と周囲空気との間の熱コンダクタンス、 $C_{sk} (k=t, e, w, b)$ は筐体の s 面と k 面との間の熱コンダクタンスである。また図4の Q_i は筐体内での消費電力、 C_{io} は周囲空気温度 T_∞ で通風口から流入し温度 T_i で通風口から流出する空気との間の熱コンダクタンス、 $C_{ik} (k=t, s, e, n, w, b)$ は筐体内部の空気と筐体の k 面との間の熱コンダクタンスである。

図3 および図4 を参照し、電気回路における Kirchhoff の法則とのアナロジーから、温度節点 T_s および T_i に関して、それぞれ、次式の関係が得られる。

$$C_{st}(T_i - T_s) + C_{sw}(T_w - T_s) + C_{sb}(T_b - T_s) + C_{se}(T_e - T_s) + C_{si}(T_i - T_s) + C_{so}(T_\infty - T_s) + Q_s = 0 \quad (1)$$

$$C_m(T_n - T_i) + C_{iw}(T_w - T_i) + C_{is}(T_s - T_i) + C_{ie}(T_e - T_i) + C_{in}(T_i - T_i) + C_{ib}(T_b - T_i) + C_{io}(T_\infty - T_i) + Q_i = 0 \quad (2)$$

以上から、温度 T_s および T_i は、次式で与えられる。

$$T_s = \frac{C_{st}T_i + C_{sw}T_w + C_{sb}T_b + C_{se}T_e + C_{si}T_i + C_{so}T_\infty + Q_s}{C_{st} + C_{sw} + C_{sb} + C_{se} + C_{si} + C_{so}} \quad (3)$$

$$T_i = \frac{C_{in}T_n + C_{iw}T_w + C_{is}T_s + C_{ie}T_e + C_{it}T_i + C_{ib}T_b + C_{io}T_\infty + Q_i}{C_m + C_{iw} + C_{is} + C_{ie} + C_{it} + C_{ib} + C_{io}} \quad (4)$$

ここで、式(3)および式(4)に含まれる各熱コンダクタンスは、それぞれ、次式で与えられる。

$$C_{st} = C_{sb} = (w \times t) \frac{\lambda}{d/2 + h/2} \quad (5)$$

$$C_{sw} = C_{se} = (h \times t) \frac{\lambda}{w/2 + d/2} \quad (6)$$

$$C_{si} = (w \times h) \alpha_i \quad (7)$$

$$C_{so} = (w \times h) \alpha_o \quad (8)$$

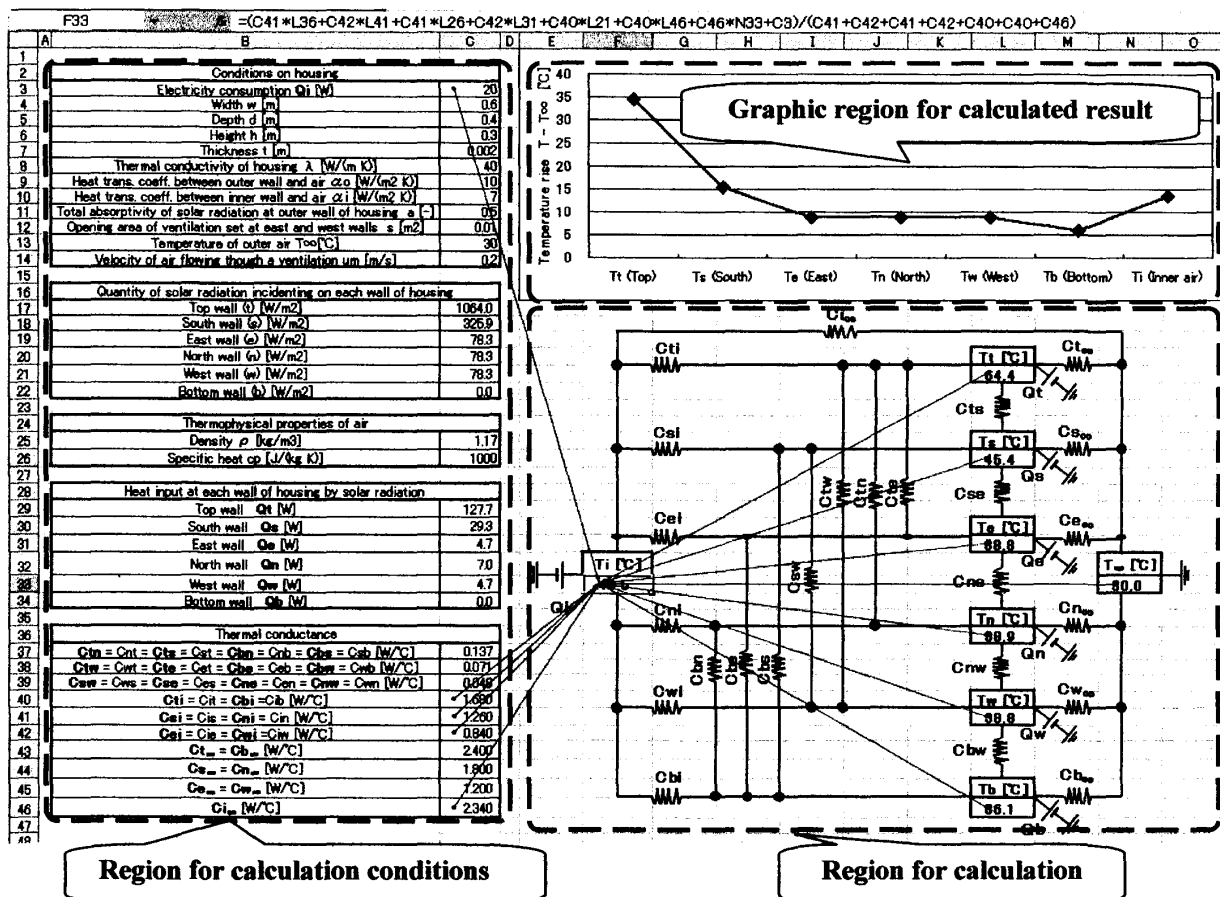


Fig. 6 An example of a spreadsheet to calculate each nodal temperature of the housing by thermal network method

$$C_{in} = C_{is} = (w \times h) \alpha_i \quad (9)$$

$$C_{iw} = C_{ie} = (d \times h) \alpha_i \quad (10)$$

$$C_{in} = C_{ib} = (w \times d) \alpha_i \quad (11)$$

$$C_{io} = (s u_m \rho) c_p \quad (12)$$

上記の例と同様にして、他の温度節点 T_p, T_e, T_m, T_w および T_b に関して熱回路網を描き、それらの結果を統合して平面的に配置し直した熱回路網を図 5 に示す。本報告では、この図を Excel のワークシート上に描き、視覚支援型の数値解析を実行する。

3. Excel による視覚支援型の解析手法

図 6 に、Excel を用いて解析した、ワークシートの例を示す。図中に示したように、ワークシートは「解析条件領域」、「解析領域」、「解析結果の表示領域」の 3 つの領域で構成され、プログラムは全く組み立てない。

まず、「解析条件領域」には、セル範囲 C3~C14, C17~C22 および C25~C26 に、それぞれ、「筐体に

関する共通項目」、「筐体外面に入射する日射量」および「空気の熱物性」に関するパラメータが配置されており、これらの値は任意に変えることができる。なお、本例の各パラメータの値は、国峰の著書⁶⁾に例示されている値と同じである。すなわち、

- 消費電力 $Q_i = 20$ W
 - 筐体の横幅 $w = 0.6$ m
 - 奥行き $d = 0.4$ m
 - 高さ $h = 0.3$ m
 - 厚さ $t = 0.002$ m
 - 筐体構成材料の熱伝導率 $\lambda = 40$ W/(m·K)
 - 筐体外面と周囲空気との間の熱伝達率 $\alpha_o = 10$ W/(m²·K)
 - 筐体内面と内部空気との間の熱伝達率 $\alpha_i = 7$ W/(m²·K)
 - 筐体外面における日射量の全吸収率 $a = 0.5$
 - 東西面に設けられた通風口の開口面積 $s = 0.01$ m²
 - 通風口を流出入する空気の世界速度 $u_m = 0.2$ m/s
- とした。また、筐体外面に入射する日射量に関しては、東京地区の真夏の南中時⁶⁾として

Table 1 List of equations at each nodal point to obtain temperatures $T_i, T_s, T_e, T_n, T_w, T_b$ and T_i

	$T_i = (C_m T_n + C_{nw} T_w + C_{is} T_s + C_{ie} T_e + C_{ii} T_i + C_{ico} T_{\infty} + Q_i) / (C_m + C_{nw} + C_{is} + C_{ie} + C_{ii} + C_{ico})$ (16)
L21	$= (C37*L36 + C38*L41 + C37*L26 + C38*L31 + C40*E31 + C43*O31 + C29) / (C37 + C38 + C37 + C38 + C40 + C43)$ (17)
	$T_s = (C_{st} T_i + C_{sw} T_w + C_{sb} T_b + C_{se} T_e + C_{si} T_i + C_{sco} T_{\infty} + Q_s) / (C_{st} + C_{sw} + C_{sb} + C_{se} + C_{si} + C_{sco})$ (18)
L26	$= (C37*L21 + C39*L41 + C37*L46 + C39*L31 + C41*E31 + C44*O31 + C30) / (C37 + C39 + C37 + C39 + C41 + C44)$ (19)
	$T_e = (C_{et} T_i + C_{es} T_s + C_{eb} T_b + C_{en} T_n + C_{ei} T_i + C_{eco} T_{\infty} + Q_e) / (C_{et} + C_{es} + C_{eb} + C_{en} + C_{ei} + C_{eco})$ (20)
L31	$= (C38*L21 + C39*L26 + C38*L46 + C39*L36 + C42*E31 + C45*O31 + C31) / (C38 + C39 + C38 + C39 + C42 + C45)$ (21)
	$T_n = (C_{nt} T_i + C_{ne} T_e + C_{nb} T_b + C_{nw} T_w + C_{ni} T_i + C_{nco} T_{\infty} + Q_n) / (C_{nt} + C_{ne} + C_{nb} + C_{nw} + C_{ni} + C_{nco})$ (22)
L36	$= (C37*L21 + C39*L31 + C37*L46 + C39*L41 + C41*E31 + C44*O31 + C32) / (C37 + C39 + C37 + C39 + C41 + C44)$ (23)
	$T_w = (C_{wt} T_i + C_{wn} T_n + C_{wb} T_b + C_{ws} T_s + C_{wi} T_i + C_{wco} T_{\infty} + Q_w) / (C_{wt} + C_{wn} + C_{wb} + C_{ws} + C_{wi} + C_{wco})$ (24)
L41	$= (C38*L21 + C39*L36 + C38*L46 + C39*L26 + C42*E31 + C45*O31 + C33) / (C38 + C39 + C38 + C39 + C42 + C45)$ (25)
	$T_b = (C_{bt} T_n + C_{be} T_e + C_{bs} T_s + C_{bw} T_w + C_{bi} T_i + C_{bco} T_{\infty} + Q_b) / (C_{bt} + C_{be} + C_{bs} + C_{bw} + C_{bi} + C_{bco})$ (26)
L46	$= (C37*L36 + C38*L31 + C37*L26 + C38*L41 + C40*E31 + C43*O31 + C34) / (C37 + C38 + C37 + C38 + C40 + C43)$ (27)
	$T_i = (C_{in} T_n + C_{iw} T_w + C_{is} T_s + C_{ie} T_e + C_{ii} T_i + C_{ib} T_b + C_{ico} T_{\infty} + Q_i) / (C_{in} + C_{iw} + C_{is} + C_{ie} + C_{ii} + C_{ib} + C_{ico})$ (28)
F33	$= (C41*L36 + C42*L41 + C41*L26 + C42*L31 + C40*L21 + C40*L46 + C46*N33 + C3) / (C41 + C42 + C41 + C42 + C40 + C40 + C46)$ (29)

上面 (t) $Q_t=1064 \text{ W/m}^2$
 南面 (s) $Q_s=325.9 \text{ W/m}^2$
 東面 (e) $Q_e=78.3 \text{ W/m}^2$
 北面 (n) $Q_n=78.3 \text{ W/m}^2$
 西面 (w) $Q_w=78.3 \text{ W/m}^2$
 下面 (b) $Q_b=0 \text{ W/m}^2$

とした。さらに空気の物性値として
 密度 $\rho=1.17 \text{ kg/m}^3$
 比熱 $c_p=1000 \text{ J/(kg}\cdot\text{K)}$

とした。なお、ここでは、
 周囲空気の温度および通風口に流入する空気の
 温度 $T_{\infty}=30^{\circ}\text{C}$

とした。

一方、セル範囲 C29~C34 および C37~C46 には、それぞれ、「日射による筐体各面への入熱量」および「熱コンダクタンス」が配置されているが、上記のパラメータを用いてそれらの値が自動的に算出されるようになっている。例えば、日射による筐体上面への入熱量 Q_i は、

$Q_i = a(w \times d) \times (\text{筐体上面に入射する日射量})$ (13)
 により算出されるが、該当するセル C29 には、次式が書き込まれている。

$$= C11*(C4*C5)*C17 \quad (14)$$

また、熱コンダクタンスに関しては、例えば C_{st} の場合、式(5)により算出されるので、該当するセル C37 には、次式が書き込まれている。

$$= (C4*C7)*C8 / (C5/2 + C6/2) \quad (15)$$

なお、式(14)および式(15)を該当するセルに書き込む際、例えば C11, C4, C5 などのセル番号はわざわざキーインする必要はなく、それらのセルをマウスで左クリックするだけで自動的に表示される。したがって、自身でキーインするのは "=" , "(" , ")" や演算子 "*" , "/" , "+" などだけである。

Tt (Top)	Ts (South)	Te (East)	Tn (North)	Tw (West)	Tb (Bottom)	Ti (Inner air)
34.4	15.4	8.8	8.9	8.8	6.1	13.5

Fig. 7 Data for graphic display of calculated result

次に、「解析領域」には、図5に示された熱回路網がそのまま描かれている。そして、その中に、未知数である7つの温度 T_t , T_s , T_e , T_n , T_w , T_b および T_i を求めるための式が、それぞれ、セル L21, L26, L31, L36, L41, L46 および F33 に書き込まれている。なお、セル N33 に表示されている周囲空気の温度および通風口に流入する空気の温度 T_a は、セル C13 を相対参照する形で表示しており、このセルには、式 “=C13” が書き込まれている。

表1に、温度 T_t , T_s , T_e , T_n , T_w , T_b および T_i を求めるための式およびそれらに対応し、セル L21, L26, L31, L36, L41, L46 および F33 に書き込まれている式を整理して示す。これらの式を、順次、各セルに書き込んでいくと計算が次々と自動的に実行され、最後の式を書き込んだ段階で最終的な解が求まり、セル L21, L26, L31, L36, L41, L46 および F33 に、温度 T_t , T_s , T_e , T_n , T_w , T_b および T_i の数値が表示される。なお、セルに書き込む式の順番には何ら制約はない。また、この場合も、当然、セル番号はキーインする必要はなく、それらのセルをマウスで左クリックするだけで自動的に表示されるので、一見煩雑に見える式も、簡単に入力することができる。

ここで、各セルに、表1に示された各式を書き込む前に必ず行っておかなければならないことがある⁽¹⁾。すなわち、Excel では、多元連立方程式の解が、反復計算により求められている。そこで、メニューバーの [ツール] メニューから [オプション] (あるいは [初期設定]) ダイアログボックスを選択し、その中の [計算方法] パネルを開き、[反復計算] の項目にチェックマークを付ける。Excel の初期設定では、ここにチェックマークが付けられていない。したがって、Excel を開いて、反復計算を必要とする式をそのまま書き込むと、循環参照すなわち反復計算の実行に関するエラーが表示され、計算の続行が不可能となる。なお、[計算方法] パネルにおいて、[最大反復回数] と [変化の最大値] は任意に変えることができる。なお、本解析例では、[最大反復回数] および [変化の最大値] は、初期設定のまま、それぞれ、100 および 0.001 とした。

図6の矢印群は、「解析領域」を作成する際に便利なツールの1つである、ワークシート分析の利用例で

ある。ここでは、例として、セル F33 に書き込まれた、温度 T_i を求めるための式が、どのセルを参照して算出されているかが矢印群により示してあるが、その判断が視覚的に瞬時に可能であり、バグの発見を容易に行うことができる。このワークシート分析を利用⁽¹⁾するためには、メニューバーの [表示] から [ツールバー] と進み、その中から [ワークシート分析] をチェックすると、[ワークシート分析] ツールバーが表示される。あるいは、[ツール] から [ワークシート分析] と進み、その中の [ワークシート分析ツールバーの表示] をチェックしても同じツールバーが表示される。図の矢印群は、セル F33 を左クリックして選択し、続いてツールバーの [参照元のトレース] ボタンを左クリックして表示したものであるが、矢印群を削除するためには、[参照元トレース矢印の削除] ないし [すべてのトレース矢印を削除] ボタンを左クリックする。ツールバーの中には、この他に、[参照先のトレース]、[エラーのトレース]、[数式の検証] などのボタンが用意されており、様々なチェックを視覚的に行うことができる。

最後に、図6の「解析結果の表示領域」には、付属のグラフウィザードを用いて解析結果を表示した例を示した。この例では、グラフの裏側に隠されているが、セル範囲 G14~M15 に、図7に示すグラフ表示用のデータが書き込まれている。例えば、セル G14 には文字群「Tt(Top)」が、また対応するセル G15 には、周囲空気の温度および通風口に流入する空気の温度 T_a からの上昇値 “=L21 - N33” が書き込まれている。なお、本解析結果は、当然のことではあるが、VBA を使用して作成された約 110 行のプログラムに基づき、マクロを実行して得られた結果⁽⁶⁾と良好に一致している。

以上から、表示された結果から使用した式の妥当性を判断したり、また解析条件の値を変えると、その条件に応じた結果が直ちにグラフ上に表示されるので、解析結果に及ぼす主要因子の感度の影響などをその場で検討したりすることができる。

4. 結 語

日射を受ける筐体の温度分布の解析に関する問題を具体例として、熱回路網法を適用した場合のビジュ

アルな Excel 解析法を提案するとともに、解析用ワークシートの作成例を示した。なお、本解析法は熱流体工学の分野だけでなく、応力解析、振動解析など、物理現象を取り扱う幅広い分野で適用可能であり、今後、そのような分野での応用が期待される。

文 献

- (1) Iwai, Y., Oomura, T., Kobayashi, K., Tomimura, T., Haneda, M., Hirasawa, S. and Yoshida, H., *Thermo and Fluid Dynamics Simulation by Excel and a Mouse* (in Japanese), (2005), Maruzen Co., Ltd.
- (2) Morishita, E., *Studying Fluid Dynamics by Excel* (in Japanese), (2001), Maruzen Co., Ltd.
- (3) Holman, J. P., *Heat Transfer (Ninth Edition)*, (2002), McGraw-Hill Higher Education, New York.
- (4) Ito, A., Uezu, K., Ohshima, T. and Takanashi, N., *Kagaku Kogaku* Vol. 68, No. 7 (2004) – Vol. 69, No. 7 (2005), (in Japanese).
- (5) Ishizuka, M., *Thermal Management of Electronic Equipment, Basic and Practice* (in Japanese), (2003), Maruzen Co., Ltd.
- (6) Kunimine, N., *Complete Introduction to Thermal Management for Electronics* (in Japanese), (2000), The Nikkan Kogyo Shimbun Ltd.