

産業用電子機器の信頼性向上を目指した冷却性能診断法

Cooling Performance Diagnosis Method to Improve Reliability of Industrial Electronic Equipment

鈴木 智之

高松 伴直

■SUZUKI Tomoyuki

■TAKAMATSU Tomonao

電子機器を安定して使用するには、搭載部品、特に半導体部品の過熱防止が不可欠である。特に産業用途では、過酷な環境下で長期間にわたって連続運転されることも多く、入念な熱設計が求められる。しかし、運用中に吸気口の目詰まりや放熱用グリースの蒸発などが原因で、本来の冷却性能を発揮できなくなるおそれがある。このような状況が把握できれば対処も可能であるが、温度は様々な要因の影響を受けるため、各半導体部品の温度だけから状況を把握することは困難であった。

東芝は、産業用電子機器を対象に、機器内の温度分布へ各要因が与える影響に注目し、熱輸送現象の知見を基にした解析により、各要因の状態を複数の場所における温度の多変数関数で表す冷却性能診断法を開発し、その有効性を実験で確認した。冷却性能低下の検出だけでなく、その原因を高精度に特定できることから、状況に応じた的確なメンテナンスを行うことが期待できる。

Overheating of heat-generating components inside electronic equipment can lead to shortened lifetime and system failure. Particularly in industrial fields, it is essential to carefully consider the thermal design of electronic equipment so that it is capable of continuous long-term operation under severe conditions. However, it is difficult to forecast the deterioration of cooling performance because the temperature of each semiconductor device inside electronic equipment is affected not only by insufficient cooling caused by clogging of inlet filters, evaporation of thermoconductive grease from heat sinks, etc., but also by various other factors including environmental temperature.

Focusing on factors affecting temperature distribution inside industrial electronic equipment, Toshiba Corporation has developed a cooling performance diagnosis method to infer the conditions of each factor represented by a multivariate function of temperature at multiple locations based on knowledge of heat transport phenomena, and confirmed its effectiveness through experiments. This method facilitates the appropriate timing of maintenance according to the usage conditions by monitoring cooling component conditions in real time and identifying the causes of performance deterioration with high accuracy.

1 まえがき

電子機器の主要な構成部品である半導体部品の性能は高温で著しく低下するため、機器の機能低下や機能停止を招く。特にインフラを支える産業用電子機器では、運転停止が社会や産業へ及ぼす影響は大きく、極力避けることが望ましい。そこで、半導体部品やその周囲で発生した熱を外部へ適切に逃がす仕組みが必要となる。更に、冷却性能の低下が発生した場合、早い段階での検出だけでなく、その原因も特定できる技術が求められている。

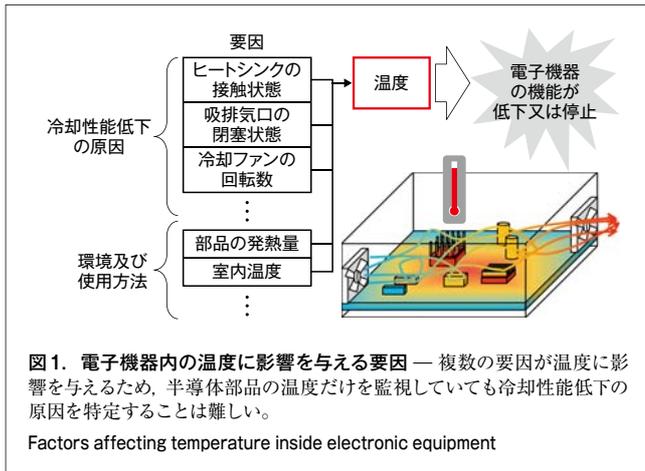
東芝は、産業用電子機器を対象に、冷却性能が低下した原因を高精度に特定できる冷却性能診断法の開発に取り組んでいる⁽¹⁾。この手法で不良箇所を特定できれば、半導体部品の過熱を予防したり過熱による停止時間を最小限にしたり、更に不必要な部品交換などの削減も可能になり、メンテナンス不良のリスク及び人件費の増加を抑えられる。

ここでは、冷却性能診断法の概要と、実証実験の結果について述べる。

2 電子機器の冷却性能低下の原因及び特定する上での課題

電子機器では熱対策として、ヒートシンクを用いて半導体部品から発生する熱を効率良く空気に伝えたり、冷却ファンを用いて機器内部の熱を外部に排出したりする仕組みを搭載している場合がある。しかし、放熱用グリースの蒸発によって半導体部品からヒートシンクに熱が伝わりにくくなったり、ほこりが吸排気口にたまって熱を外部に排出しにくくなったりすることで、冷却性能の低下は起きる。半導体部品の過熱状態は、機器の機能の低下や停止を招くことになる。

そこで、冷却性能低下を早い段階で検出して正常な状態に戻すことが重要になるが、冷却性能低下の原因は様々であり、原因を突き止めて対策を講じるまでに時間やコストが掛かってしまう。迅速に対処するには、冷却性能低下を検出するだけでなく、その原因を特定する技術が求められる。しかし温度は、**図1**に示すように、冷却性能だけでなく室内温度や発熱量などの要因にも影響を受けるため、半導体部品の温度だけから冷却性能低下の原因を特定するのは困難であった。



従来の研究の多くは、冷却性能が低下していない状態で取得した複数の温度センサー信号の確率分布で正常状態を定義し、これを運転中の温度センサー信号と比較することで冷却性能の低下を判定している。しかしこの方法では、冷却性能低下を判定できても原因を特定することはできない。また、環境や使用方法に関する要因の多くをノイズとして扱うため、正常状態と異常状態の分布の一部が重なって判定を誤るリスクがある。

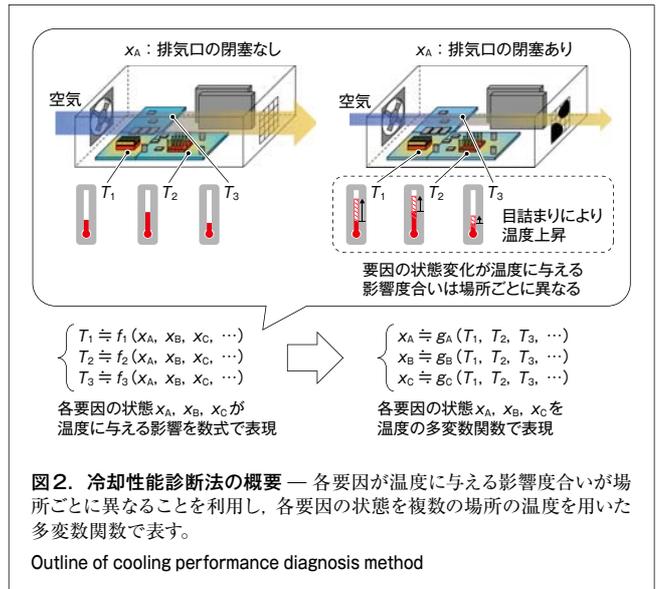
様々なインフラ分野で使用される産業用電子機器ともなると、ユーザーによって環境や使用方法は大きく異なる。前述したように、それらをノイズとして扱うため、冷却性能低下の検出精度が必然的に低くなるという問題がある。また、長期間にわたって連続運転される場合も多く、メンテナンスのための運転停止や、不必要な部品交換などによってメンテナンス不良のリスク及び人件費の増加を招くという問題もあった。

3 冷却性能診断法

当社は、産業用電子機器を対象に2章で述べた課題を解決するため、冷却性能低下の原因を高精度に特定する冷却性能診断法の研究開発に取り組んでいる。

各要因の状態を複数の場所における温度の多変数関数（以下、推測式と呼ぶ）で表すことにより、従来の研究とは異なり、冷却性能が低下する原因や室内温度など運転中の半導体部品の温度に強く影響を与える要因ごとに、その状態を数値的に表現する。この手法では、ユーザーの環境や使用方法も要因として考慮するため、冷却性能の低下はもちろん、その原因を高精度に特定できるようになる。

冷却性能低下の原因の状態や、室内温度や発熱量などの各要因が温度へ与える影響度合いは、機器内の場所ごとに異なる。例えば、半導体部品の近傍における温度は、その部品の発熱の影響を強く受ける一方で、遠方における温度は、発熱の影響をほとんど受けない。この手法では、要因が温度に与える影響の度合いが場所によって異なる性質を利用した。



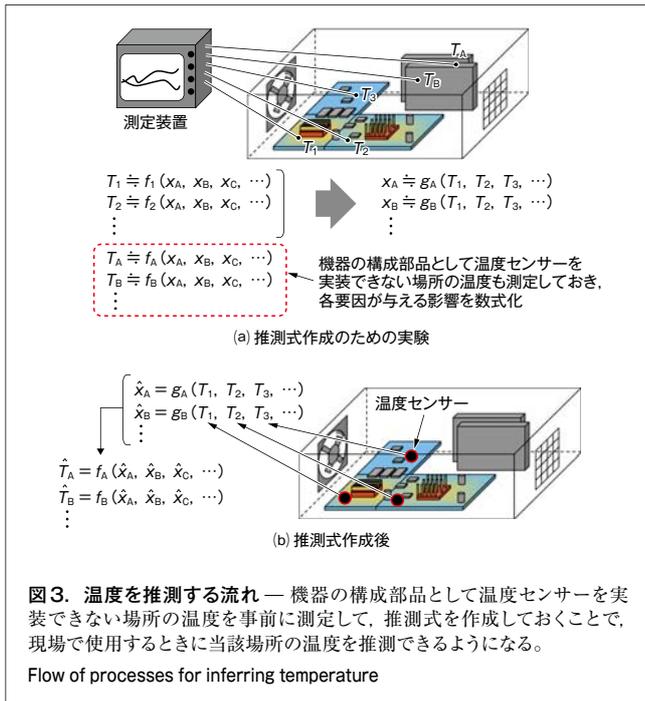
特定の要因の状態を把握する方法について、**図2**を用いて述べる。ここでは、対象となる機器内の温度へ影響を与える主な要因がA, B, Cの三つと仮定する。要因Aは排気口の閉塞状態とし、Aの状態 x_A について把握する場合を考える。**図2**の上段に示すように、温度 T_1 は他の場所の温度 T_2 や T_3 と比べて x_A によって大きく変化するが、他の要因の状態 x_B や x_C によっても変化する。そこでBやCの影響を、他の場所の T_2 や T_3 を用いて取り除く。具体的には、各場所の温度を数式で表現し、それを未知数である要因の数だけ連立して解く。これにより、 x_A を温度の多変数関数である推測式で表現できる。同様に、 x_B や x_C も温度の多変数関数で表現できる。

要因の数が三つ以上の場合を想定した推測式は、式(1)で表される。

$$\begin{cases} \hat{x}_A \\ \hat{x}_B \\ \hat{x}_C \\ \vdots \end{cases} = \begin{bmatrix} \gamma_{1A} & \gamma_{2A} & \gamma_{3A} & \dots \\ \gamma_{1B} & \gamma_{2B} & \gamma_{3B} & \\ \gamma_{1C} & \gamma_{2C} & \gamma_{3C} & \\ \vdots & & & \ddots \end{bmatrix} \begin{cases} T_1 \\ T_2 \\ T_3 \\ \vdots \end{cases} - \begin{cases} \gamma_{0A} \\ \gamma_{0B} \\ \gamma_{0C} \\ \vdots \end{cases} \quad (1)$$

ここで、 x_j は要因 j の状態、 γ_{ij} は係数、 T_i は場所 i の温度である。また、 $\hat{}$ （ハット）記号が付くと推測値であることを示し、 $\hat{}$ 記号が付いていない x_j や T_i は真値であることを示す。

冷却性能診断法は、温度に影響を与える要因のほとんどが事前に予測できるという仮定の下に成り立つ。また、状態を把握したい要因と同数以上の温度センサーを、要因から受ける影響度合いが異なる場所に配置する。例えば、 T_1 は x_A の影響を強く受ける場所に、 T_2 は x_B の影響を強く受ける場所に配置する。従来の研究では、要因の状態を把握するのに大量のデータ取得が前提となっており、その入手方法が課題であった。これに対し、各要因の状態の正解（真値）が分かるデータを実験によって取得すれば、少ないデータ数でも熱輸送現象の知見



を基に解析することで、高精度な推測式を得ることができる。

更にこの手法は、コストや技術的な問題で温度センサーを実装できない場所の温度推測にも応用できる。図3のように、事前に、温度センサーを実装できない場所の温度も測定して、各要因が与える影響から推測式を作成しておく。その後は、温度センサーを実装できない場所の温度を、温度センサーを実装できるほかの場所のデータから推測式により容易に推測できる。これにより、少数の温度センサーのデータから様々な半導体部品の温度を把握することも可能である。

4 実験による実効性検証

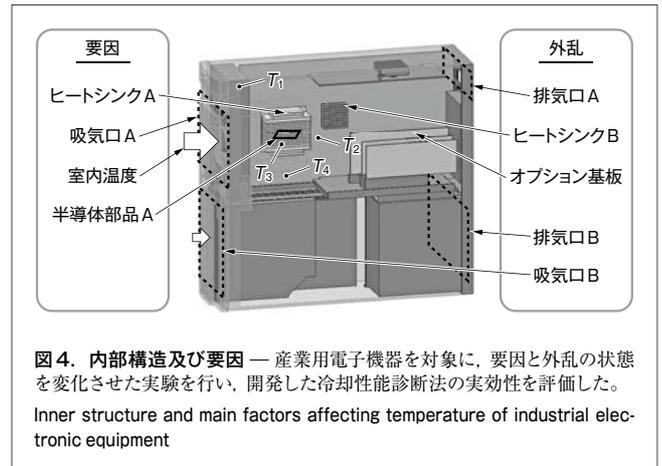
4.1 実験方法

東芝グループで製作した産業用電子機器を対象に、冷却性能診断法の実効性を実験で検証した。機器の内部構造及び要因を図4に示す。四つの要因(吸気口A, 室内温度, 半導体部品A, ヒートシンクA)の状態を、図4の $T_1 \sim T_4$ の場所に設置した4個の温度センサーで測定した温度から推測する。五つの要因(吸気口B, 排気口A及びB, オプション基板, ヒートシンクB)を外乱として与えた。

事前に実験を数十回を行い、得られた推測式を式(2)に示す。

$$\begin{cases} \hat{x}_{IT} \\ \hat{x}_{LA} \\ \hat{x}_{HS_A} \\ \hat{x}_{HGC_A} \end{cases} = \frac{1}{10} \begin{bmatrix} 1.6 & -0.8 & 0.2 & 0.1 \\ -1.4 & 2.1 & 0.0 & -0.6 \\ -0.1 & 0.1 & 0.8 & -0.7 \\ -0.7 & -0.2 & -0.2 & 1.0 \end{bmatrix} \begin{cases} T_1 \\ T_2 \\ T_3 \\ T_4 \end{cases} - \frac{1}{10} \begin{cases} 16.6 \\ 6.2 \\ 2.5 \\ 2.2 \end{cases} \quad (2)$$

添え字のIT, I_A, HS_A, HGC_Aはそれぞれ室内温度,



吸気口A, ヒートシンクA, 半導体部品Aを示す。4個の温度センサーを用いて、冷却性能が低下する二つの原因(吸気口A, ヒートシンクA)と、環境及び使用方法に関連する二つの状態(室内温度, 半導体部品A)を推測する。

式(2)から、係数の対角成分が非対角成分よりも大きくなっているが、これは影響を強く受ける要因が温度センサーごとに異なることを示している。このように温度センサーを配置することは、高精度な推測を行う上で有利になる。

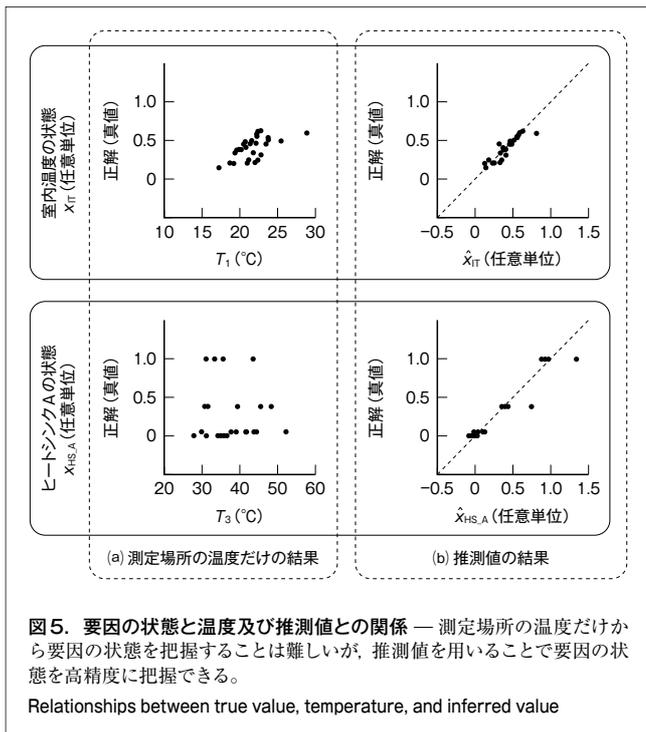
式(2)の精度を検証するために、図4の4要因と5外乱の状態を様々に変化させた温度測定実験を合計で30回実施した。各実験は温度が落ち着いた時点で終了し、終了時の温度を式(2)に代入して各要因の状態(以下、推測値と呼ぶ)を算出した。これら推測値を実験条件として設定した正解(真値)と比べることで、冷却性能診断法の実効性を検証した。

4.2 検証結果

まず、実験で求めた4要因の状態のうち、室内温度とヒートシンクAの状態を推測した結果を図5に示す。図の左側は温度と各要因の状態の関係で、右側は得られた推測値と各要因の状態の関係である。横軸の温度 T_1 と T_3 は、縦軸の各要因の影響を強く受ける場所に実装した温度センサーの測定値である。要因の状態は0~1の範囲で正規化し、値の大きさは温度に与える影響の強さを示す。ヒートシンクAの状態では、0は接触状態が良いことを、1は接触状態が悪いことを表している。

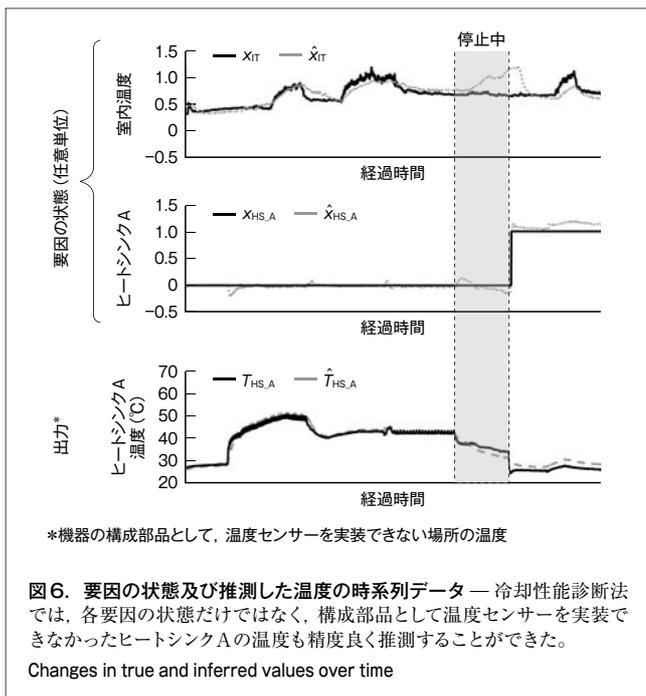
左側の図からは、温度と要因の状態の間に相関がほとんどなく、測定場所の温度だけでは要因の状態を把握することが困難なことが分かる。一方、右側の図からは、推測値と要因の状態の間には強い相関があり、推測値を用いることで要因の状態を精度良く把握できたことが分かる。

環境に関わるデータの一つである室内温度や、冷却性能低下の原因の一つであるヒートシンクAの状態など、実験に使用した機器の状態を詳細かつ高精度に分類することができた。この手法を適用すれば、各要因の状態に合わせた確かなメンテナンスを実施できると期待される。例えば、メンテナンス箇



所に適した専用治工具を現場に着く前に選択することができる。また、推測した室内温度などの履歴データを元にして機器の使い方をコンサルティングするといった、従来とは異なるサービスの提供も可能になる。更に、各要因の推測値を蓄積してユーザーの環境や機器の使用方法を整理することで、産業用電子機器の設計基準そのものを見直すことにもつながる。

次に、機器の構成部品として温度センサーが実装されてい



ない場所の温度を推測する実験を行った。数時間にわたって4要因と5外乱の状態を様々に変化させ、ヒートシンクAの温度 T_{HS_A} の推測精度を検証した。図6の上段に室内温度とヒートシンクAの状態を、図6の下段に T_{HS_A} の推測結果を示す。正解（真値）と推測値の時間変化の様子はよく一致しており、要因の状態と T_{HS_A} がともに精度良く推測できることを確認した。

例えば、ヒートシンクAの状態が0から1.0へ変化すると、半導体部品Aの熱がヒートシンクAにうまく伝わらなくなった結果、 T_{HS_A} が低くなっている。基板上の複数の箇所温度を取得して入力するだけで、様々な場所の温度が推測できるだけでなく、その温度になる原因を特定できることも、この手法の特長の一つである。

5 あとがき

産業用電子機器内部の複数の場所に実装した温度センサー信号を入力とした多変数関数により、温度に影響を与える要因の状態を間接的に把握できる冷却性能診断法を開発した。冷却性能低下の原因を高精度に特定できるだけでなく、室内温度などのユーザーの環境や、機器の使い方の状態も把握できる。これにより、状態に合わせた確かなメンテナンスの実施で半導体部品の温度上昇を低減し、機器の安定した使用に役立てることができる。更に、この手法を応用して、機器の構成部品として温度センサーを実装できない場所の温度も高精度に推測できる。

この手法は、複数の産業用電子機器への搭載に向けた検討を進めており、今後、更に高性能化を図ることで、産業用電子機器の信頼性向上を目指していく。

文献

- (1) Suzuki, T.; Takamatsu, T. Diagnosis of computer cooling performance based on multipoint temperature measurements. Journal of Thermal Science and Technology. 2017, 12, 1, p.JTST0012. <https://www.jstage.jst.go.jp/article/jtst/12/1/12_2017jtst0012/_pdf>. (accessed 2017-10-10).



鈴木 智之 SUZUKI Tomoyuki

研究開発本部 研究開発センター
機械・システムラボラトリー
日本機械学会会員
Mechanical Systems Lab.



高松 伴直 TAKAMATSU Tomonao

研究開発本部 研究開発センター
機械・システムラボラトリー
日本機械学会・日本伝熱学会会員
Mechanical Systems Lab.