

**FlowDesigner を用いた
熱設計・熱対策における逆解析技術**

株式会社アドバンスドナレッジ研究所
取締役 技術フェロー 工学博士
桃瀬 一成

株式会社技術情報協会
電子機器の放熱・冷却技術と部材の開発

第8節 FlowDesigner を用いた熱設計・熱対策における逆解析技術

(株)アドバンスドナレッジ研究所 桃瀬 一成

はじめに

熱設計や熱対策において、適切なサーマルマネジメントは生産性向上やエネルギーの効率的活用を図るうえで重要なテーマとなっている。従来このような検討段階におけるサーマルマネジメントには試作実験をベースとした検討が主として行われてきたが、実験・測定を行うための準備には大きな手間とコストがかかる。また、限られた測定点でのデータから熱的課題に対する主要な設計要因を特定し、適切なサーマルマネジメントを行うことは容易ではない。

近年のコンピュータハードウェアならびに数値シミュレーション技術の進歩により、熱対流場の数値予測が可能となり、既に多くの汎用熱流体解析システムが市販され、設計ツールとして利用されている。数値シミュレーションでは場の詳細な情報が得られるが、その一般的な利用方法は、設計者が与えた設計パラメータ（幾何学的条件、初期・境界条件および各種生成条件）に対する解（特殊解）を求めることであり、結果の分析およびこれに基づく設計パラメータの修正は試作実験同様の作業となり、これには専門的な知識や熟練が必要とされ、熟練者といえども試行錯誤を繰り返すことになる。

一方、数値シミュレーション（以後通常の数値シミュレーションを順解析と呼ぶ）と最適化法を組み合わせた逆問題的アプローチが近年注目されており、さまざまな最適化が試みられている。このような最適化法としては、差分情報を用いた勾配型最適化法¹⁾と応答曲面²⁾や遺伝的アルゴリズム³⁾を用いた大域的最適化法に大別されるが、いずれも設計パラメータ数の増加に伴い必要な順解析の回数は急激に増大し、設計変数の数が大きな場合、または設計変数が無限自由度（形状や分布量）である場合、現実的な時間での最適化は困難である。また、これらの順解析に基づく最適化法では、設計パラメータを事前に決定しておく必要がある（これを本稿ではパラメトリック最適化と呼ぶことにする）、現実的時間内で最適解を得るためには少数の設計パラメータに絞り込む必要がある、大域的な最適化法でもその大域性は損なわれる。

これに対し、随伴変数法と呼ばれるノンパラメトリックな最適化法がある。この方法は、元々航空宇宙分野における形状最適化法として発展してきたものであり、無限自由度を有する形状に対しても高々1回の随伴解析で物体全表面（例えば、翼表面全体）の形状感度（形状変化に対する設計目標の変化）を得ることができる^{4,6)}。

弊社(株)アドバンスドナレッジ研究所の汎用熱流体解析ソフトであるFlowDesignerでは、この随伴変数法をさらに一般的な変分問題として定式化し、形状変化のみならず、すべての境界条件や生成項の変化に対する設計目標の変化（感度）が、事前に設計パラメータを設定することなく全解析領域で得られ、この感度解析結果をもとに修正すべき設計パラメータの決定、さらには自動最適化が可能である⁷⁻¹⁰⁾。本方法では後述するように設計目標からのずれが随伴問題の入力（駆動力）となり、現状の設計案近傍で因果律を反転したシミュレーションに相当することから本稿ではノンパラメトリック逆解析と呼ぶことにする。

なお、本手法は(株)アドバンスドナレッジ研究所と大阪大学の共同研究として開発され、現在日本、アメリカおよびヨーロッパで特許を取得している。

1. FlowDesigner におけるノンパラメトリック逆解析の原理

ここでは紙面の都合上、数学的背景は省略し、前述した因果律を反転したシミュレーションという切り口で、ノンパラメトリック逆解析の原理またはイメージを説明する。数学的な詳細に興味のある方は文献9,10)を参照されたい。

まず、単純な最適化問題として、図1に示すような2次元キャビティ内自然対流場におけるターゲット温度（キャビティ中心温度）の最大化を考える。本問題は、数学的には境界値問題であり、よって因果律としては境界条件が中心温度に反映される。ここで因果律を反転し、設計目標を境界条件に反映させることを考える。これを実現するため、本来の因果律を決定する流れの方向や重力の方向を反転し、さらにターゲットとなる中心部に設計目標との差（この

場合は大きな正の値)を駆動力(発熱)として設定する(図2)。その結果、図3のような因果律を反転した対流場が得られ、設計目標を最も強く反映している底辺左側を加熱することが、中心部の温度上昇に最も効果的であることがわかる。

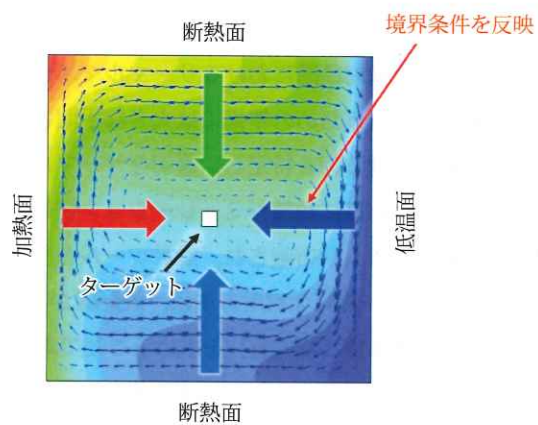


図1 ターゲット温度の最大化

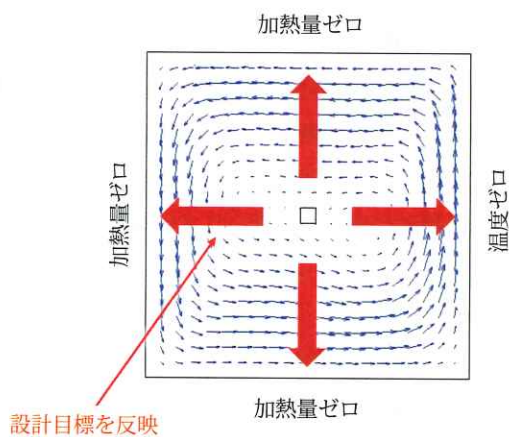


図2 因果律の反転

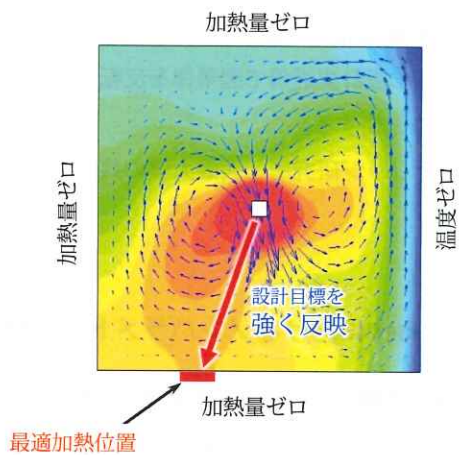


図3 因果律を反転した対流場

次の例は、図4に示すように、ある有限の領域（図中のターゲット領域）の温度を均一化する問題で、この場合も設計目標との差が逆解析の駆動力となる。つまり、ターゲット領域内で設計目標（この場合はターゲット領域平均温度）より温度の低い部分には正の駆動力を、高い部分には負の駆動力を与える（図5）。その結果、与えられた境界条件および生成項に対するすべての感度がノンパラメトリックに得られる。例えば、温度を与えた高温面には温度変化に対する感度が、速度を与えた境界（壁面上では速度ゼロを与えている）には速度変化に対する感度が、それぞれ図6、図7に示すような感度分布として得られる。

逆解析に基づく感度解析の特徴を順解析ベースと比較して表1に、またFlowDesignerで得られる感度一覧を表2に示す。

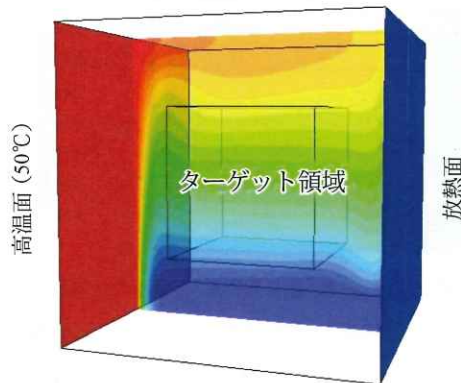


図4 ターゲット領域内温度の均一化

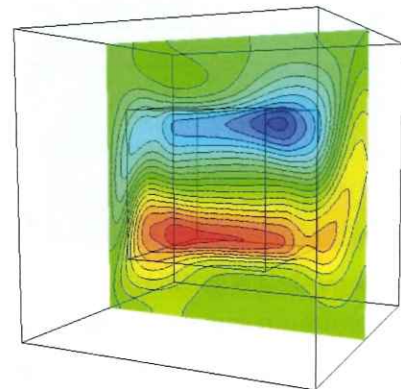


図5 因果律を反転した温度場

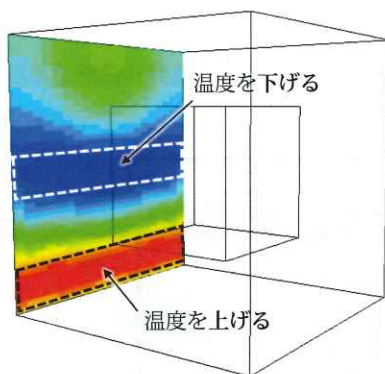


図6 高温面温度に対する感度

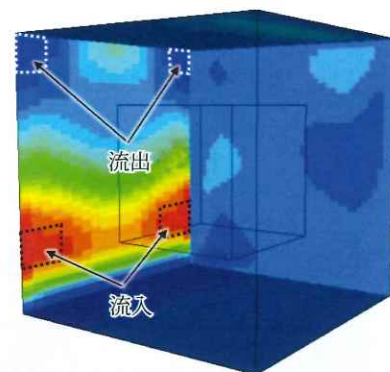


図7 壁面流速に対する感度

表1 逆解析に基づく感度解析の特徴

	逆解析に基づく感度解析	順解析に基づく感度解析
解析方法	設計目標を入力とし因果律を反転したシミュレーション	パラメータスタディ
設計パラメータの決定時期	感度解析後	感度解析前
感度解析に要する解析数	2回（順解析＋逆解析）	設計パラメータの数 （制御量の数×制御点の数）
得られる感度	全空間内および全境界上の全制御可能量に対する感度	設計パラメータ定義位置の定義制御量に対する感度
設計パラメータ依存性	非依存 （ノンパラメトリック）	依存 （パラメトリック）

表2 1回の逆解析で得られる感度

感 度	感度の得られる場所
形 状	全固体表面
位 置	全オブジェクト
流速3成分	速度規定境界（固体壁を含む）
温 度	温度規定境界（吹出口を含む）
熱流束	熱流束規定境界（断熱壁を含む）
熱通過率	熱通過率規定境界
開口率	開口率規定境界
体積力	全流体領域
体積発熱	全解析領域（固体、流体を含む）
熱伝導率	全固体領域

2. 逆解析に基づく自動最適化

FlowDesigner には前項で示したノンパラメトリック逆解析を用いた自動最適化機能があり、その流れを図8に示す。まず、通常の熱流体解析と同様に解析モデルを作成し初期設計案で順解析を実行する。次に、解析結果に基づき設計目標を設定し逆解析を実行する。その結果、前項表2に示したように全設計空間内および全設計境界上の感度が得られ、この感度に基づき設計パラメータを決定する。設計パラメータが決まれば、ここからはパラメトリックな最適化法が適用できる。本逆解析で得られる感度は設計変数の微小変化に対する設計目標の変化、つまり勾配（数学的には汎関数微分値）であるため、容易に勾配型最適化法が適用可能であり、FlowDesigner では最急降下法により自動最適化を行っている。

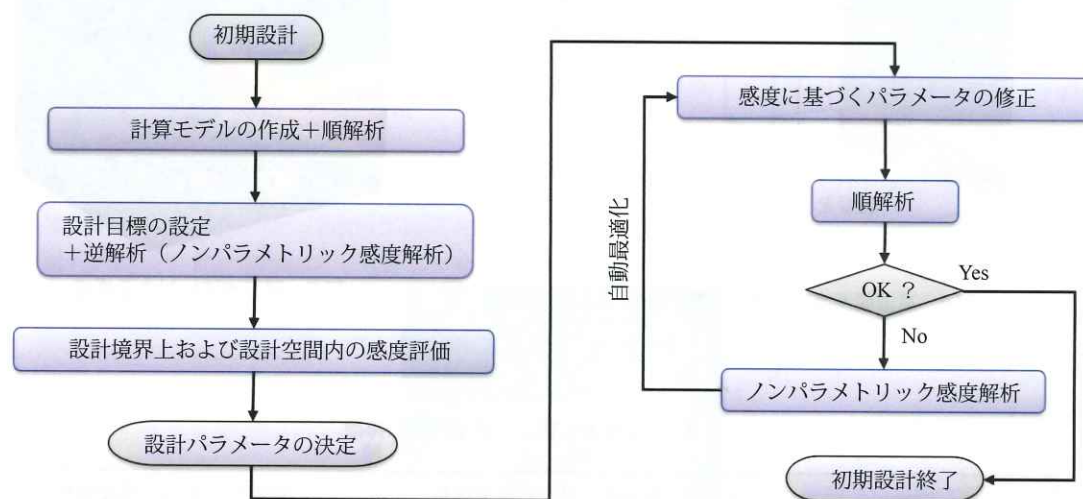


図8 FlowDesigner における最適化の流れ

例えば、前項のターゲット内温度均一化の例で設計パラメータとして上下に10分割した高温面温度を採用し、FlowDesignerの自動最適化機能で最適化した結果を初期温度分布とともに図9に示す。図9より、初期設計案に対してターゲット領域内の温度偏差は半分以下に減少しており、最適化の効果が確認できる。また、流れの様子から初期設計案ではターゲット領域付近の流れは弱く主に熱伝導による温度成層が形成されているのに対し、最適化後は加熱面下部の高温部に発生した上昇流と中央部の低温部付近に発生した下降流が衝突し、ジェット状の流れとなってター

ゲット領域を攪拌することにより、均一性を高めていることが確認できる。初期設計案に対する順解析結果のみから、このような最適解を見つけることはもちろん、設計パラメータを決定することさえ困難であるものと思われる。なお、順解析ベースの最適化（例えば応答局面法）における計算負荷が設計パラメータの数に大きく依存するのに対し、逆解析ベースでは設計パラメータの数に依存せず、例えば上記例では設計パラメータである高温面の分割数をさらに大きくしても、または上下方向だけでなく格子状に分割しても計算負荷は変わらない。

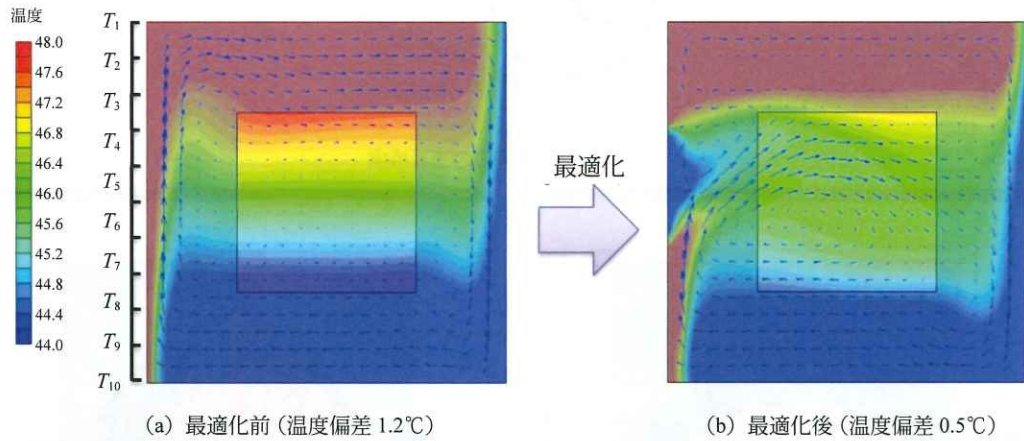


図9 高温面温度の最適化結果

3. 熱設計問題への適用例

本項では簡単な熱設計問題への適用例として図10のような発熱素子温度の最小化問題を考え、いくつかの感度を用いた最適化例を示す。

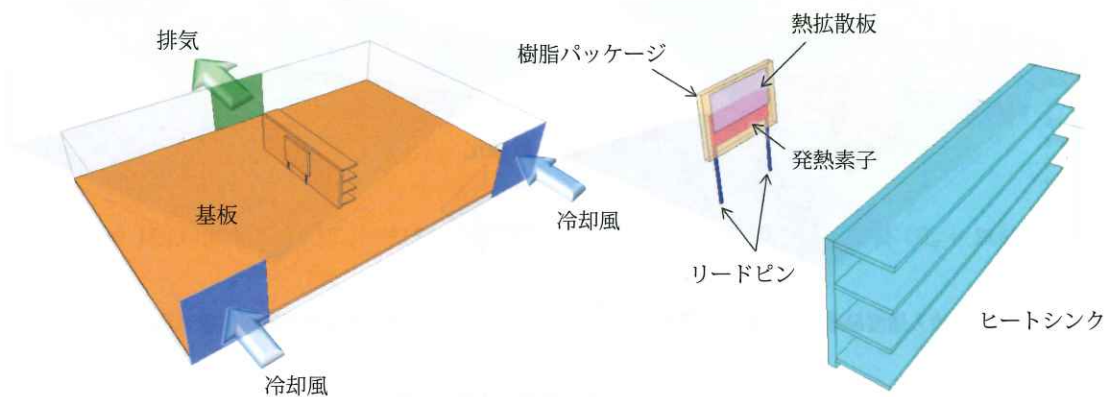


図10 発熱素子温度の最小化

まず、冷却風の流量および流入方向を最適化するために用いた流速感度の一例を図11に示す。そして、自動最適化後の流速等値面および温度分布をそれぞれ初期分布とともに図12および図13に示す。この例では、ヒートシンクフィン側の流量を増加し、さらに方向を最適化することにより冷却風が効率よくヒートシンクのフィンに絡み、素子温度 (T_{avg}) が初期状態に対して20°C以上低下している。

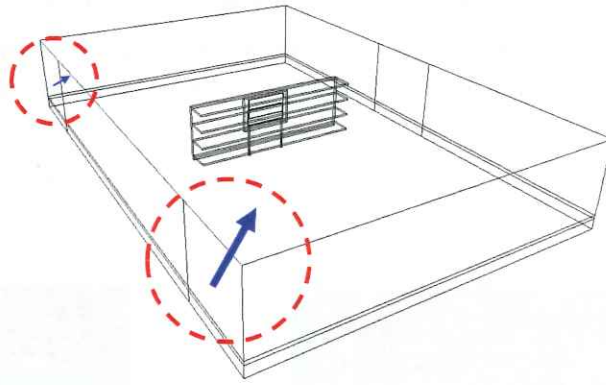


図 11 流入口の流速感度

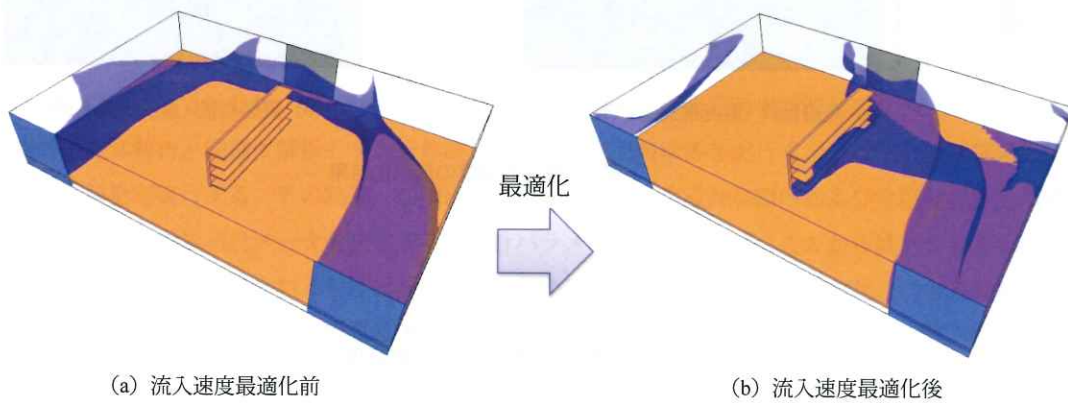


図 12 流入流速の最適化結果（流速等値面）

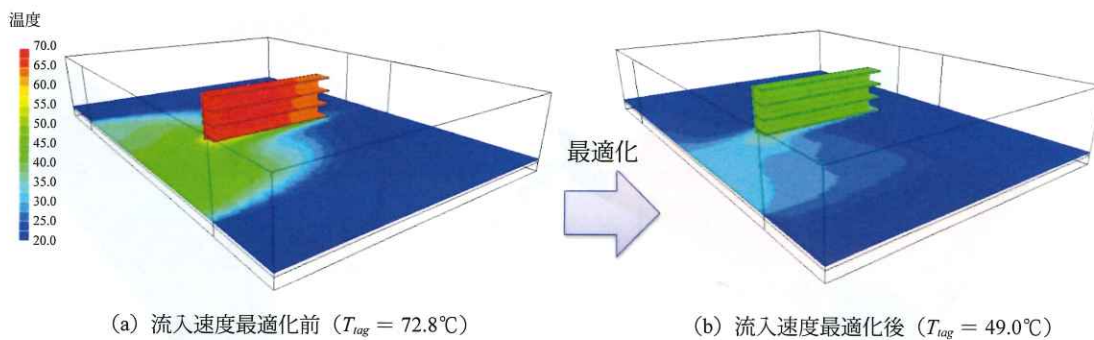


図 13 流入流速の最適化結果（温度分布）

次に、流入流出口の位置の感度を図 14 に示す。ここでは排気口の位置感度に注目し、感度に従って排気口を左（フィンの逆側）に移動したときの流速分布および温度分布をそれぞれ初期分布とともに図 15 および図 16 に示す。排気口を左に移動したことにより、流入流速を最適化した場合と同様、効率よく冷却風がフィンに届き、能動的な制御を行わなくても 10℃以上素子温度が低下している。

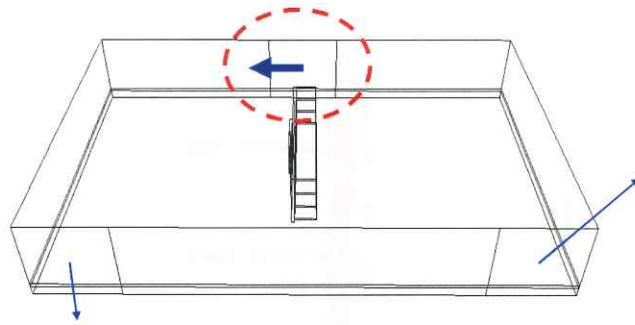


図 14 排気口の位置感度

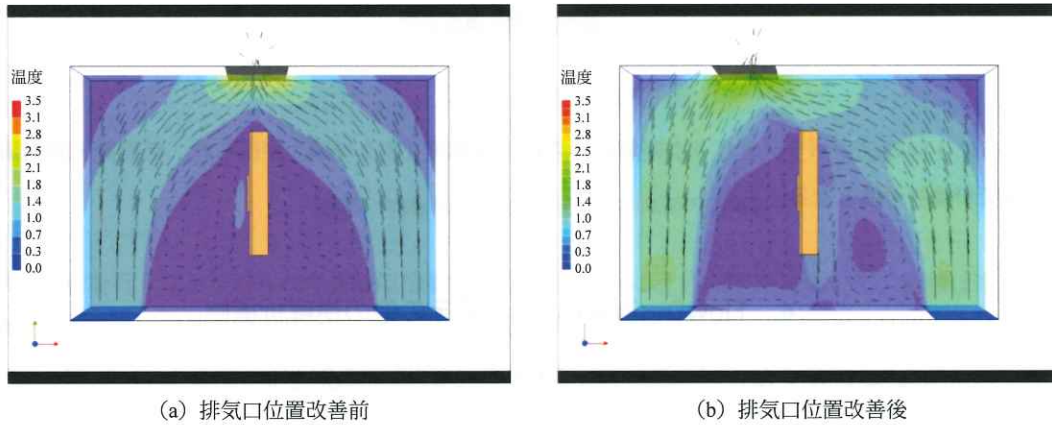


図 15 排気口位置の改善結果（流速分布）

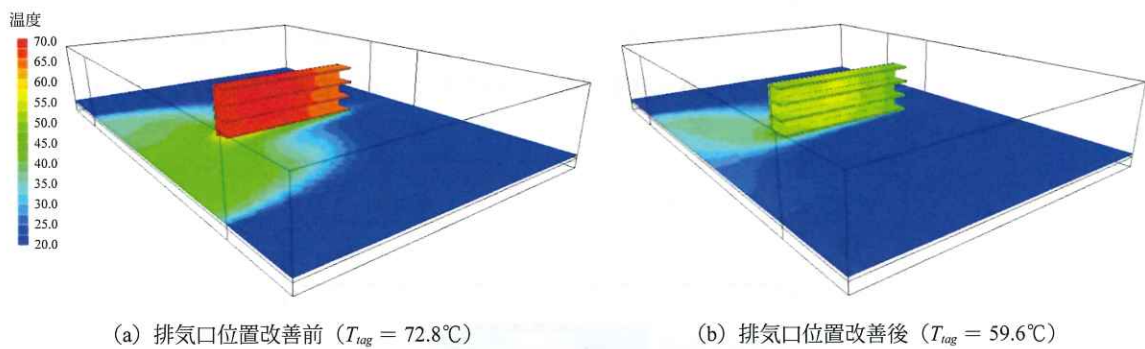


図 16 排気口位置の改善結果（温度分布）

最後に物性値に対する感度として、熱伝導率感度の分布を図 17 に示す。図 17 より、フィン根本に対してフィン先端の熱伝導率感度は非常に小さく、このことはフィン根本を太く、先端を細くすることが有効であることを示しており、これは従来のフィン理論と一致している。また、冷却に余裕があれば、先端部分を短くしてコスト削減が可能であることも示唆している。

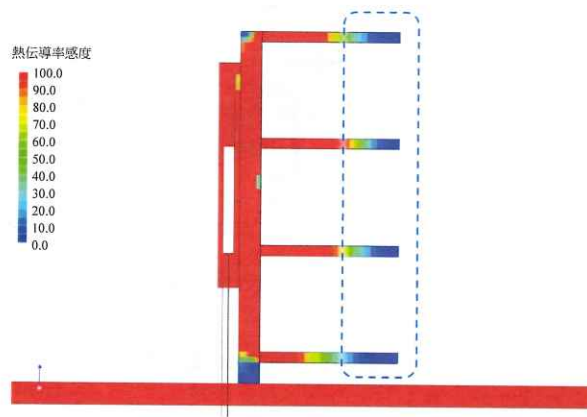


図 17 熱伝導率感度

以上のように 1 回のノンパラメトリック逆解析から様々な感度 (表 2 参照) が得られ、熱設計・熱対策をする上で多くの改善策が検討可能となる。

4. FlowDesigner におけるその他の逆解析機能

本項では FlowDesigner に近年 (2019 年以降) 追加された新たな逆解析機能を 2 つ紹介する。

4.1 非定常逆解析機能

定常問題に対する逆解析では速度場、重力場および因果律を反転したが、非定常問題ではこれらに加えて時間も反転する。例えば図 18 において、時刻 A の状態から制御パラメータを変更せず時刻 B に到達し、時刻 B における制御目標値と差があったとすると、この差を駆動力として負の時間方向に時刻 A まで逆解析を実行する。つまり、古典的制御が過去および現在の情報をフィードバックするのに対して、非定常逆解析では未来の情報をフィードバックすることになる。これにより、時刻 A から時刻 B までに行うべき制御に対する非定常感度がノンパラメトリックに得られる。

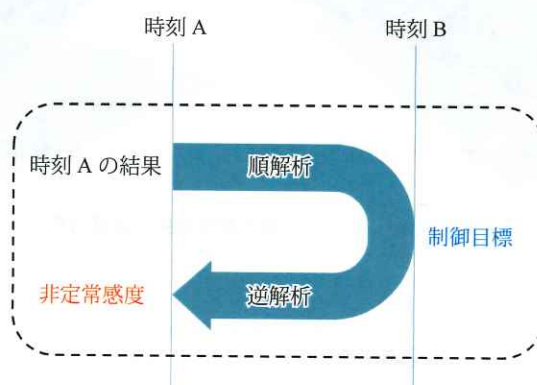


図 18 非定常逆解析のイメージ

ここでは非定常逆解析の応用例として、図 19 に示すような金型の冷却問題を考える。図 19 において、A 部は樹脂、B 部は金型、C 部は冷却管を模擬した冷却部であり、簡単のため疑似冷却部は直方体形状とする。また、樹脂の材質としてはアクリル樹脂の一般的な物性値を、金型と冷却管の材質は銅の物性値を与えた。樹脂の初期温度を 240℃ とし、30 秒後における樹脂温度を 90℃ にするためのサーマルマネジメントを考える。金型部と冷却部の初期温度は共

に 65℃と仮定し、30 秒間で樹脂温度を 240℃から 90℃に冷却するためには、6 本の疑似冷却管をどのように熱的にコントロールするのが良いのかを検討する。

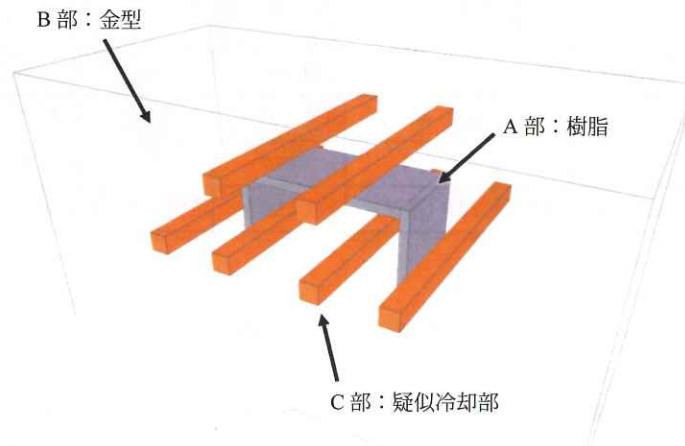


図 19 樹脂冷却問題への非定常逆解析の適用例

非定常逆解析を行うことで得られた各疑似冷却部の感度を図 20 に示す。図 20 において、横軸は冷却開始からの時間、縦軸は冷却管の非定常冷却感度を示しており、感度のマイナス値が大きいほど樹脂を効率よく冷却できることを示している。図 20 から、この場合の樹脂冷却に対しては内側左右の冷却部が最も冷却効果が高く、外側左右の冷却部が最も低いことがわかる。また 30 秒間の冷却時間中においても、冷却開始直後から 20 秒後までの間は冷却効率が高いが、残りの 10 秒については冷却の効果が急激に小さくなることを示している。

得られた感度をもとに以下に示す 4 つの冷却方法を試み、その効果を調べる。Case1: すべての冷却管の冷却量を 30 秒間同一として冷却, Case2: すべての冷却管を冷却効率の高い 20 秒間だけ冷却, Case3: もっとも感度の大きい (冷却効率の高い) 内側冷却管だけを 20 秒間冷却, Case4: すべての冷却管を感度に比例した冷却量で 20 秒間冷却。

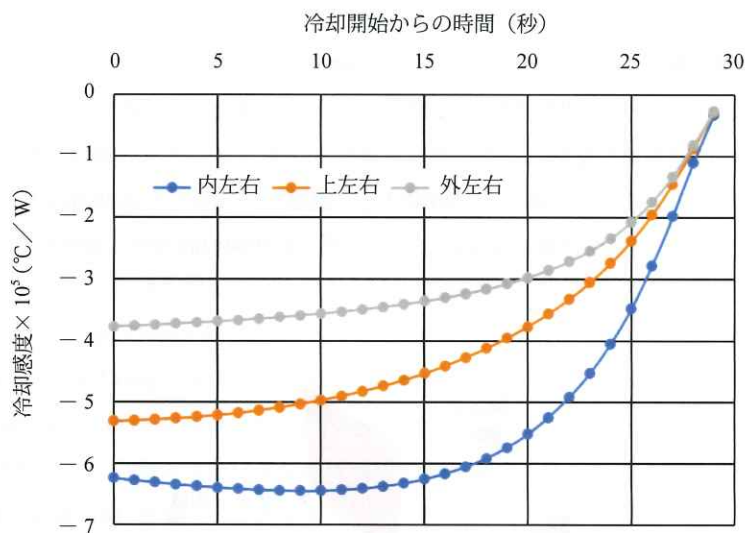


図 20 樹脂冷却問題における冷却管の非定常冷却感度

表 3 に冷却感度から得られた冷却条件と冷却結果を示す。表 3 において、Q は冷却感度から計算した樹脂部を 30 秒後に 90℃にするのに必要な総エネルギー量、 T_A は検証用の順解析から得られた 30 秒後の樹脂平均温度、そして省エネ率は Case1 を基準とした省エネルギー率である。表 3 より、いずれのケースも非定常逆解析から得られた冷却量で

30 秒後に目標の 90℃がほぼ達成できていることがわかる。また、省エネルギーの観点からは Case3、つまり冷却感度の大きな時間帯に冷却効率の高い冷却管を使うケースが最も優れていると言える。

表 3 非定常逆解析に基づく冷却量の決定と冷却方法の比較

	Case 1	Case 2	Case 3	Case 4
Q (kJ)	- 400.8	- 337.3	- 262.4	- 320.2
T _A (°C)	89.4	89.7	89.8	89.7
省エネ率 (%)	0.0 (基準)	15.8	34.5	20.1

4.2 音響逆解析機能

熱対策と同時に考慮すべき問題として騒音対策があり、FlowDesigner では熱流体解析に用いたモデルに対して音響解析も実行できる。音響解析としては音線法や鏡像法に代表される幾何学的方法と波動方程式や Helmholtz 方程式に基づく波動論的方法に大別されるが、FlowDesigner では Helmholtz 方程式に基づく方法を採用しており（現在、音線法も開発中）、音響解析に対してもノンパラメトリック逆解析が実行可能である。音響逆解析で得られる感度一覧を表 4 に示す。

表 4 1 回の音響逆解析で得られる感度

感 度	感度の得られる場所
音源音圧	音圧または音響パワー指定境界
音源振動速度	振動速度指定境界
壁面吸音率	吸音率指定境界
密度（等価厚さ）	固体内

ここでは一例として音響逆解析を用いたアクティブ消音の例を紹介する。図 21 に示すようなパーティションで部分的に仕切られた空間があり、片方の空間で発生した騒音を消音用音源を用いて遮断することを考える。音響逆解析でも熱流体の逆解析と同様に因果律を反転し、ターゲットとなる位置（ターゲット領域）から情報を発信し、消音用音源位置における感度を求める。消音用音源がオフの場合と、感度から計算した消音用音源の強さを適用した場合を比較して図 22 に示す。図 22 より、消音用音源の付与によりターゲット空間の静音性が保たれていることが確認できる。

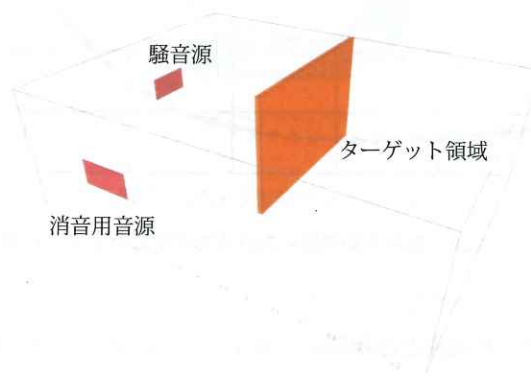


図 21 アクティブ消音モデル

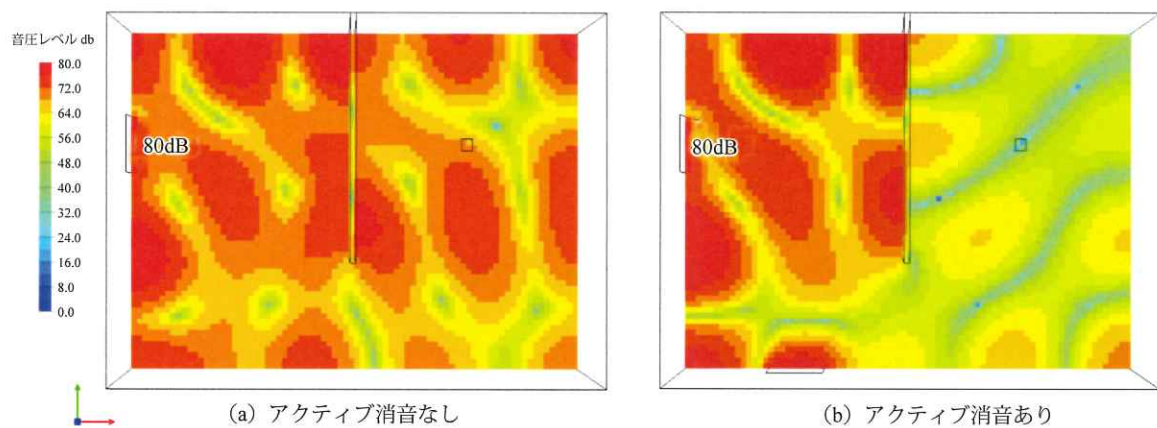


図 22 音響逆解析を用いたアクティブ消音

なお、本逆解析例では消音用の音源の強さを最適化したが、表 4 に示すように要求される静音性を実現するための吸音材の性能や遮蔽板の厚み等を設計パラメータとすることも可能である。

おわりに

従来、熱流体解析は大学や研究所または専門の解析チームの仕事であったが、近年のユーザーインターフェース技術を含むコンピュータ環境の充実に伴い、一般の設計者にも身近な設計ツールとなりつつある。FlowDesigner はオフィス系ソフトウェアと同等の直感的なユーザーインターフェースで「思いついたアイデアをすぐに何度でも試せる」をモットーに開発した純国産のソフトウェアであり、目に見えない熱や風の流れを可視化・アニメーション化できるだけでなく、ノンパラメトリック逆解析により感度分布という形で改善策を「見える化」でき、設計のフロントローディングに大いに貢献できるものと考えている。

なお、本稿では熱設計・熱対策に焦点をあて割愛したが、汚染物質等の拡散物質に対してもノンパラメトリック逆解析が可能であり、クリーンルームの設計等にも利用されていることを付記する。

文 献

- 1) 例えば、矢部 博，最適化とその応用，数理工学社 (2006)
- 2) JMP® 11 実験計画 (DOE)，SAS Institute Inc. (2014)
- 3) 例えば、坂和正敏・田中雅博，遺伝的アルゴリズム，朝倉書店 (1995)
- 4) O.Pironneau, Optimal Shape Design for Elliptic Systems, Springer Series in Computational Physics (1984)
- 5) A.Jameson, Aerodynamic Design via Control Theory, Journal of Scientific Computing, Vol.3, pp.233-260 (1988)
- 6) A.Jameson, Aerodynamic Shape Optimization Using the Adjoint Method, Lecture Note at the Von Karman Institute (2003)
- 7) 桃瀬一成，木本日出夫，自然対流熱伝達問題に対する熱的境界条件の影響（摂動随伴作用素表現に基づく数値解析），日本機械学会論文集 (B 編)，63 巻 614 号，pp.3347-3352 (1997)
- 8) 桃瀬一成，植田誠，木本日出夫，対流熱伝達特性に対する熱および流れの境界摂動の影響（随伴作用素表現に基づく数値解析），日本機械学会論文集 (B 編)，66 巻 646 号，pp.1473-1479 (2000)
- 9) 桃瀬一成，池島薫，感度解析に基づく熱対流場設計支援システムの開発（変分法に基づく感度解析），空気調和・衛生工学講演会論文集，pp.403-406 (2006)
- 10) K.Momose and K.Ikejima, Optimization of Convective Heat and Mass Transfer Using Nonparametric Sensitivity Analysis, The 20th Int. Symposium on Transport Phenomena (2009)