

熱設計ソフトウェア「冷えろー<sup>®</sup>」

## Thermal Simulation Software “Hieroh”

木村直樹\*  
Naoki Kimura秀野晃\*  
Akira Hidenno

**概要** ヒートシンクは適用される機器ごとに個別に設計を行なうことが多い。ヒートシンクを組み込んだ機器の開発期間が短くなる傾向があるのに加え、機器の全体設計の初期段階から冷却性能が検討されることが多くなってきているため、熱設計にもハイスピード化が求められるようになっていく。従来は、ごく簡単な手計算か、有限体積法などの汎用の流体解析プログラムが用いられてきたが、いずれも精度の低さ、扱いにくさ、計算時間の長さなどの点で問題があった。

当社では、「設計から製品まで」という“トータル サーマル ソリューション”を追求しており、その一環としてスピーディに使える熱設計ソフトウェア“冷えろー”を開発した。

また、最適化の設計指針として、“スプレッド効率”を提唱するものである。

## 1. はじめに

冷却システムを考えた場合、最終的には空気層に放熱する機会が多く、その場合はヒートシンクが重要な役割を担っている。ヒートシンクは機器ごとに個別設計されるのが一般的で、その設計には、熱性能、サイズ、重量などをバランスよく最適化する必要がある。

## 1.1 従来の熱設計

従来の熱設計では、以下の2つの熱解析の手法が用いられてきた。

## a) 1次元的なアナログ解析

ある種の仮定の下に、フィン計算<sup>1)</sup>などの1次元の簡単な計算が行われ性能の概略は分かる。

例えば、先端が断熱の条件で熱バランスの方程式を解くと

$$T = C_1 \exp(kx) + C_2 \exp(-kx)$$

と解ける。アナログ的な解法は、メッシュの細かさに依存しないため、無限の細かさを持っているという利点はあるものの、得られるのは1次元的な情報だけであり、ベースプレートでの熱拡散のような2次元的な情報は得られない。

## b) 3次元的なデジタル解法

ヒートシンク全体の3次元的な解析には有限要素法、有限体積法<sup>2), 3), 4)</sup>などのプログラムが用いられてきたが、手順(プリプロセッサ, ソルバ, ポストプロセッサ)が複雑であり、メッシュ切りをはじめとして条件設定にいくらかのスキルが必要であった。また、計算機のメモリーが大量に必要となるうえ、計算時間も長く、大規模なものでは数時間かかるのが一般的であった。

従来の設計方法の問題点としては以下のような点が挙げられる。

- ・ 2次元的な情報が得られない。(フィン計算の場合)

- ・ デジタルは任意の形状の計算ができるが、計算に当たってはスキルが必要で、特定のオペレーターにより操作されることが多い。
- ・ 予想温度を表示するだけで、性能向上のための設計指針の表示が無い。
- ・ 重量などはシミュレーションソフトとは別途に計算していたので不便であった。

## 1.2 スピーディに使えるソフトウェアの有用性

ヒートシンクを組み込んだ機器の開発のペースがハイスピード化するにつれ、熱設計もハイスピード化することが望ましい。近年、発熱量が増大するにつれ、以前は設計の後期にヒートシンクを付けておけば済んでいたが開発のごく初期の段階からあらかじめ熱設計をしておく必要性が出てきている。その場合、長期間をかけて、特定のモデルに対して厳密に熱性能を推定することだけが有用なものではなく、ごく短期間(数分程度)に推定値を出すことが有用となってくる。また、熱解析に習熟した人でなくても手軽に熱性能を推定できることが望ましい。

そこで、“誰でも直ぐに使いこなせるソフトウェア”の開発を行った。更に、総合的に判断しやすいように、熱性能以外の圧力損失、重量などの情報も同じソフトウェアで得られるように配慮し、設計指針としてスプレッド効率も表示できるようにした。

## 2. 方針、モデル化、計算の原理

## 2.1 方針

- ・ できるだけアナログ解法で解く。
- ・ やむを得ないところだけデジタル解法を用いる。
- ・ モデル化の工夫により擬似3次元の情報が得られるようにする。

\* 古河スカイ(株) 加工製品部

## 2.2 モデル化

特徴をつかみモデル化を行った。

(正方形の形状の場合を記す)

熱の流れる順に記すと、

- 1) ベース面に熱が広がる
- 2) フィンに熱が広がる
- 3) フィンから空気層に放熱される

となるが、簡単化のため(逆の順になるが)、

- ・ 3) のフィン→空気層への放熱は熱伝達の理論式を用いて計算する。
- ・ 次に、2) のフィンの熱の広がりにはフィン効率で計算するものとした(図1)。

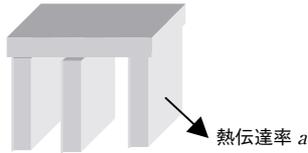


図1 ヒートシンクと熱伝達率  
Coefficient of heat transfer for the heatsink.

フィンはベース面に対して十分に密に設置されているものとして、ベース面の仮想的な熱伝達率を $a'$ とすると $a' = a$  (フィンの熱伝達率) × (ベース面から見た面積倍率) × (フィン効率) として計算される(図2)。また、ベース面と同じ面積の円でベース面を置き換えている(図3)。

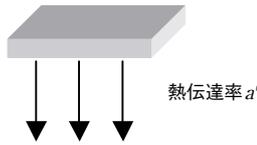


図2 ベースと熱伝達率  
Imaginary coefficient of heat transfer for the base plate.

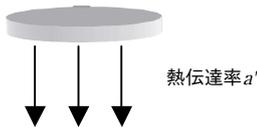


図3 円形に置き換えられたベース  
Equivalent base plate.

## 2.3 計算の原理

まず、2次元の計算から説明する。

### 2.3.1 発熱体より内側の計算

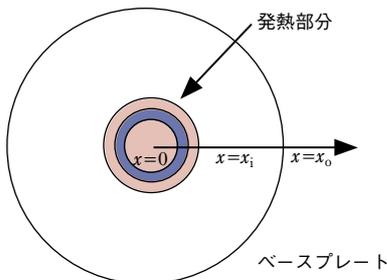


図4 発熱体の内側の計算モデル  
Calculation model for the inside of the device.

方程式を立てて図4に示す内周部の同心円状の微小部分に着目すると、中心からの距離を $x$ 、熱伝導率を $\lambda$ 、厚さを $d$ 、単位体

積当りの発熱量を $q_0$ とすると、温度 $\theta$ は、

$$d \times \left[ -\lambda (2\pi x) \frac{d\theta}{dx} \Big|_x - \left\{ -\lambda (2\pi x) \frac{d\theta}{dx} \Big|_{x+dx} \right\} \right] = -a'(2\pi x)\theta dx (\text{熱伝達の項}) + \pi \{ (x+dx)^2 - x^2 \} dq_0 (\text{発熱の項})$$

を満たす。

右辺の第1項は第2項に比べて著しく小さいので省略すると、

$$\lambda \frac{d}{dx} \left( -x \frac{d\theta}{dx} \right) = xq_0 \text{ が得られる。}$$

ここに $q_0/\lambda = 4k$ とおくと、

$$-x d\theta/dx = 2kx^2 + c' \text{ と書けるが、}$$

$x=0$ の時、温度の傾きが0なので $c'=0$ となる。

よって、 $\theta = -kx^2 + c$ と求められる。

境界において、次項2.3.2の式と、値及び傾きが一致するように解析接続されて、 $C_1$ 、 $C_2$ で表わすことができる。

### 2.3.2 発熱体より外側の計算

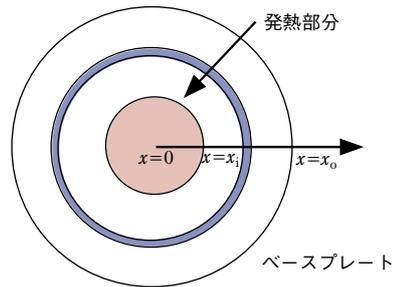


図5 発熱体の外側の計算モデル  
Calculation model for the outside of the device.

図5において、 $x$ 方向で $x \sim x + dx$ の間の熱バランスを考えて微分方程式を立てると、

$$d \times \left[ -\lambda (2\pi x) \frac{d\theta}{dx} \Big|_x - \left\{ -\lambda (2\pi x) \frac{d\theta}{dx} \Big|_{x+dx} \right\} \right] = a'(2\pi x)\theta dx$$

これを整理すると、

$$\frac{d}{dx} \left( x \frac{d\theta}{dx} \right) = \frac{a'}{\lambda d} x\theta$$

となり、

$$m = \sqrt{\frac{a'}{\lambda d}} \text{ とおくと } \theta = \sum A_n \left( \frac{1}{2} mx \right)^n \text{ と置いた級数解法により}$$

$$A_n = \frac{1}{2(n!)} \times A_0 \text{ と求まる。}$$

$A_0 = 1$ と置くと第一種変形ベッセル関数Bessel I(x)に一致する。同様にしてもう一つの解を求め、任意定数を $\gamma$ と置くと第二種変形ベッセル関数Bessel K(x)に一致する。

結局、 $\theta = C_1 \text{Bessel I}(mx) + C_2 \text{Bessel K}(mx)$ の形となること分かる。

$C_1$ 、 $C_2$ を求めるための条件は、

$$\text{端部での断熱条件 } x = x_0 \text{ において } d\theta/dx = 0$$

エネルギーバランス

$$\int_0^{x_0} 2\pi a' x \theta dx = \text{発熱量}$$

で、変数の数:2個、方程式の数:2個なので $C_1$ 、 $C_2$ が決定できる。

Bessel関数はAllenの近似式<sup>5)</sup>、積分計算はSimpsonの式<sup>5)</sup>を用いて計算して解を得る。

### 2.3.3 擬似3次元の計算

発熱体の真下に仮想的に部品を設け(図6)、その部品からの熱の出入りを計算することにより、厚さ方向の温度差を求めた。

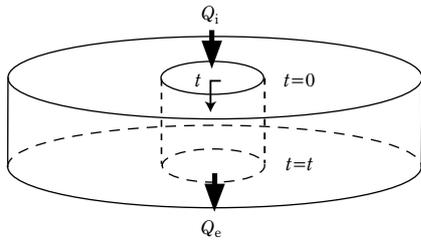


図6 厚さ方向の温度差の計算モデル  
Model for the calculation of temperature difference through the base plate.

熱伝達率一定の条件で方程式を立てると図6のように、厚さ方向の変数を $t$ として、この部品に上から発熱量に相当する熱量 $Q_i$ が入るが、出て行く熱量 $Q_e$ は上記2.3.1、2.3.2の計算により求められる。

横方向から熱を奪われるが、仮想的な熱伝達率 $a$ を用いて、

$$m = \sqrt{\frac{a''C}{\lambda d}} \quad (\text{ただし、外周を } C, \text{ 断面積を } S \text{ とする}) \text{ と置く、}$$

解は $\theta(t) = C_3 \exp(mt) + C_4 \exp(-mt)$ と書ける。

ここで、 $m$ を(ひいては $a$ )をどのようにとるかが問題であるが、見かけ上変数として扱うことにする。(ただし、 $m$ が場所によらずに一定値となることは仮定していることにはなる。)

$$\text{境界条件は、} -\lambda d \theta / dt \text{ (} t=0 \text{)} \times S = Q_i \quad \dots \dots (1)$$

$$-\lambda d \theta / dt \text{ (} t=t \text{)} \times S = Q_e \quad \dots \dots (2)$$

$$\theta(t) = \theta_t \text{ (既知)} \quad \dots \dots (3)$$

の3つで、変数が3個なので原理的に解ける。

$$(1) \text{ で、} \beta = 1 / \{S(-\lambda)m\} \text{ とおくと、} C_4 = C_3 - \beta Q_i$$

$$(2) \text{ より } C_3 = \{[Q_t - Q_i \exp(-mt)] / [\exp(mt) - \exp(-mt)]\} \times \beta$$

(3)に代入すると

$$\beta \{[\exp(mt) + \exp(-mt)] / [\exp(mt) - \exp(-mt)]\} Q_t - 2Q_i / [\exp(mt) - \exp(-mt)] = \theta_t \text{ が得られる。}$$

左辺は $mt$ が十分大きいと、 $\beta$ 即ち $1/m$ の挙動を示す(要するに $y = 1/x$ の形のグラフになる)ので、Newton-Raphson法にとっては“良い性質の関数”であり、容易に解ける。

ここでは $m$ に無理して推定された値を入れずに変数として扱うことにより、self-consistent (自己無矛盾)な解を求められたことになる。精度については、同様の熱伝導の計算を有限要素法と比較した。(冷えるーは、実用的なヒートシンクを対象としてモデル化を行っているため、例えばフィンが1枚しかないような実用的ではないヒートシンクについては対象としていない。)

実用的な幾つかのヒートシンク形状について比較して有限要素法の値を基準にすると、誤差が-2%~+8%の範囲に入っている。

#### 2.4 複雑形状への拡張

発熱体が中央に無い場合は、半径の異なる円形により近似され、風上風下の温度差については、熱伝導率、熱伝達率により計算がなされる。また、発熱体が複数の場合は重ね合わせの原理により計算がなされる<sup>9)</sup>。

#### 2.5 計算量の比較

従来はヒートシンク全体で数百万メッシュとすると、変数としては、3方向の風の流れ、圧力、温度、乱流エネルギー、乱流消滅率など7つの変数があり、数千万個の方程式を解いてい

たため、計算時間が数時間程度かかっていた。

このように、アナログ+デジタルのハイブリッド構成のモデル化をすることにより、数百程度の方程式にまとめることができ、動作を高速化することができた。

### 3. 表形式のプログラム化

2.で述べた、計算方式が確立できたところで、Windows<sup>†</sup>パソコン上で動作する扱いやすい表形式へのプログラミングを行った。

#### 3.1 画面、使い方の特徴:

- ・ 1画面で全て表示されているため、見やすく、入力時の設定ミスが少なくなる(図7)。
- ・ プリ、ソルバ、ポストを意識せずに使えるうえ、メッシュ切りが無いため、“条件から推定値を得るのに本来は不必要な操作”をせずに済む。
- ・ 使い方  
Windowsパソコン上で、冷えるーのロゴをダブルクリックして、表の中にサイズ、発熱量などの数値を入力したうえで、右上のボタンを押せば、コンター図も含めた計算結果が得られる。また、後述するが形状を最適化する機能があり、ボタンを押すだけで自動的に最適化がなされる。

#### 3.2 動作の特徴

- ・ オンオフが簡単  
ロゴをダブルクリックするだけで前回の最後の値が自動的にロードされ、終了時には最後に行った計算が自動的にセーブされる。まるでノートを開いて閉じるような操作感である。
- ・ 短時間で表示  
旧式のパソコンでクロックが500 MHz程度のハードでも1 s以下で計算が終了する(当社試験値)。このように1回の計算が速くできるので、後述する自動化の計算も速くできることになる。
- ・ 重量、圧損などの情報も併せて表示されるので別途計算する必要がない。
- ・ コンター図が表示されるので入力の確認ができる。
- ・ 空気の温度上昇値を計算できる。  
風速が遅い場合には、フィン面積を増大させても熱抵抗を低下させる効果は薄い。
- ・ 時定数の表示  
定常状態の約63%まで温度上昇する時間が表示される。
- ・ グリス部分の温度差の表示  
典型的な接触抵抗により発生する温度差を表示する。
- ・ 圧損のW数表示  
圧損は通常Paなどの圧力の単位で表示されるが、ファンの動力などとの整合性から、ワット数に換算した表示も設けた。
- ・ 輻射の最大値  
輻射率を上げた場合に、輻射で放熱できる最大のW数の推定値を表示する。
- ・ 前回との比較

<sup>†</sup> Windowsは、Microsoft Corporationの商標です。

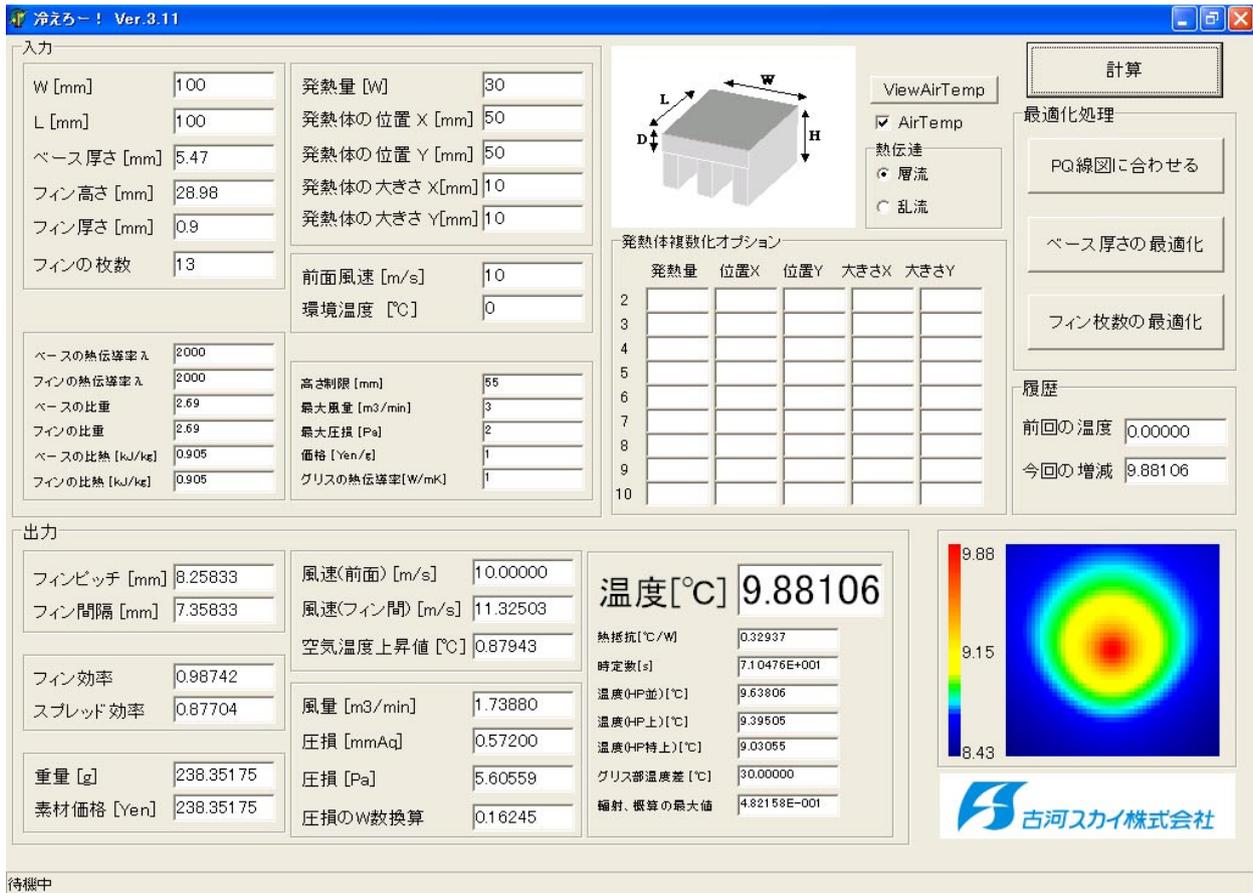


図7 “冷えろー”の操作画面  
A display of “Hieroh”.

1回前の計算値を保持しており、それとの差を表示する機能がある。条件を変更した場合にどのように変化したか把握しやすくなっている。

- ・フィンとベースそれぞれに別々の物性値を設定できるようになっているので、クリンプフィン®にも対応できるようになっている。

### 3.3 自動化

- ・PQ線図へのフィッティング  
ファンのPQ線図を与えると図8のように動作点を求めることができる。

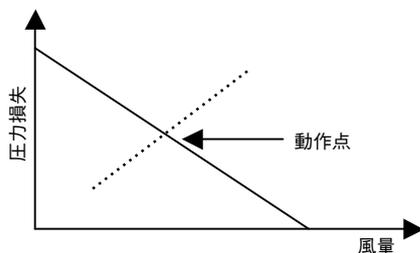


図8 圧力損失と空気流量  
Pressure loss and air flow rate.

- ・フィン枚数の最適化  
ファンを一定条件にしてフィン枚数を変える(図9)。フィン枚数が増えるにつれて表面積は増大するが、風量は減少する傾向があり、熱抵抗が極小になる点が求められる。

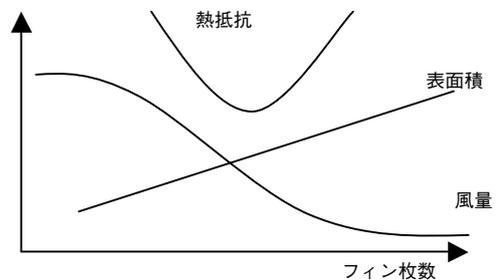


図9 フィン枚数と熱抵抗  
Relationship between the number of fin and the thermal resistance.

ハイブリッド化により計算量を抑えることによって高速化が可能となっている。従来は、半日～1日程度かかった最適化作業が、約30秒で可能となっている(当社試験値)。

## 4. スプレッド効率と最適化

### 4.1 スプレッド効率

スプレッタ(ベース板)で熱が拡散されることはヒートシンクにとって極めて重要であり、ベースで熱がスプレッドされなければ、優れたフィンが配置してあってもその性能を発揮することはできない。

そこで、フィンの熱性能がフィン効率により表わされるのと同様に設計指針としてスプレッド効率を定義した。

フィン効率と比較すると、

$$\text{フィン効率} = \frac{\text{フィン全体 (1次元) の温度の平均}}{\text{フィンの根元の温度}}$$

$$\text{スプレッド効率} = \frac{\text{ベース (2次元) の温度の平均}}{\text{発熱素子の温度}}$$

であり、1次元→2次元の拡張がなされている。

スプレッド効率はフィン効率と同様に0～1の数値をとり、値が大きいかほど熱が隅々まで行き渡っていることを示している。

3次元に拡張するとヒートシンク効率(3次元)は、

$$\text{ヒートシンク効率} = \text{スプレッド効率} \times \text{フィン効率}$$

と表わされ、ヒートシンク全体の熱性能は、

$$\text{フィン面積} \times \text{ヒートシンク効率}$$

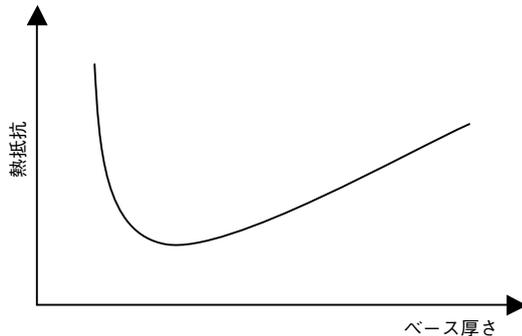
$$= \text{フィン面積} \times \text{スプレッド効率} \times \text{フィン効率}$$

となる。

圧損、重量なども考慮しながらバランスよく、フィン面積×スプレッド効率×フィン効率を高くする必要があるが、冷えろーにおいては1つのソフトウェア上での検討が可能となっている。

#### 4.2 高さ一定の場合の最適化

フィンの高さ方向の寸法が制限されている場合に、ベース厚さを幾らにとるかが難しいところである。模式的に書くと、**図10**のようでありベースを薄くしすぎるとベースでのスプレッドが悪くなり急激に熱抵抗が上がる傾向があるので、注意を要する。



**図10** ベース厚さと熱抵抗の関係  
Relationship between base plate thickness and thermal resistance.

冷えろーでは、全高=フィン高さ+ベース厚さ が一定の条件で、ベース厚さ(当然フィン高さも)をパラメータとして変化させ、熱抵抗の最小値を求めることが可能である。ここでも、ハイブリッド化により高速化がなされている。

#### 4.3 ヒートパイプの効果

ヒートパイプ無しでは十分な熱拡散が得られない場合にはベース面にヒートパイプが併用されることになるが、その場合の効果の概略を見積もることができる。

実験値からの経験的なパラメータも入れたアルゴリズムを採っており、

HP (並) : 1～2本

HP (上) : 数本

HP (特上) : 入れられるだけ多数

となっている。

## 5. まとめ

- ・ アナログ+デジタルのハイブリッド構成を採ることにより、簡単な操作でスピーディな解析が可能となっている。
- ・ スプレッド効率を最適化の設計指針とすることにより最適化がしやすくなっている。
- ・ また、ベースにヒートパイプを入れた場合の推定値の計算も可能となっている。
- ・ “設計から製品まで”というトータルサーマルソリューションの一環として、冷えろーを用いてデザインをスピーディに行い、顧客サービスの向上の一助としていきたい。

## 謝辞

古河電気工業(株)、古河スカイ(株)、古河インフォメーションテクノロジー(株)の関係者に謝意を表します。

## 参考文献

- 1) フィン効率・伝熱工学資料, 日本機械学会, 改訂第3版(1974), 第4版(1986)
- 2) 非圧縮性流体解析, 東京大学出版会, (1995)
- 3) CFDソフト・ハードの性能比較, 自動車技術会, (2001)
- 4) CFD 設計活用の最先端, 自動車技術会, (2003)
- 5) 新版・数値計算ハンドブック, オーム社, (1990), 145, 845.
- 6) 木村: 特開 2003-223470