

数値解析手法の効率化システムの検討とLED照明装置の放熱効果問題への適用

仲 沢 武 志 奈 良 勉
岡 本 太 郎 *1

概 要

有限要素法などの数値計算は、単純な境界条件だけでなく複雑な形状にも対応できる便利な手法であることはよく知られている。しかしながら、複雑な形状の計算対象では、データ作成作業に労力がかかることも事実である。この問題に対して、最近では、コンピュータのハード面だけではなくソフト面も著しく発展していて、3次元の形状作成ツールや自動メッシュ分割機能を備えたソフトも幾つか開発されていて、複雑な形状に対するデータ作成も比較的手軽に行えるようになってきている。

本文では、有限要素法でのメッシュ作成作業にメッシュジェネレータのような特殊なソフトウェアを使わず、比較的操作の簡単なアプリの組み合わせで計算対象の形状データを作成できる手法を検討した。さらに、連立1次方程式の計算を GP-GPU によって並列化して、計算時間の短縮による効率化についても検討している。また、これらの適用性を、複雑な形状をしている LED 照明の放熱装置の計算で示している。

An efficient method for numerical analysis and its application to heat radiation from LED lighting

Abstract

Numerical analysis such as Finite Element method can be applied to objects having a complicated shape. However a lot of effort is required for data preparation in the case of these complex objects. Recently, advances in personal computer hardware and software enable us to make three dimensional shape data and programs to calculate mesh.

In this study, we discuss a simple and easy method to generate numerical data such as finite element mesh without using a mesh generator. In addition, an efficient calculation process is achieved by using parallel computation. The applicability of these methods is shown for the problem of heat radiation from LED lighting.

キーワード： 数値解析、有限要素法、並列化
LED、放熱

*1 高環境エンジニアリング

§1. はじめに

有限要素法などの数値解析では、物性値をはじめとした種々のデータが必要となる。なかでも有限要素メッシュに関しては、計算対象の性能を向上する工夫が進むにつれて形状が複雑になり、例えば「メッシュジェネレータ」と言われる専用ソフトを使ったとしても、その作成に手間や労力を費やす場合が多くなっている。これは、有限要素法を実施する際、懸念事項の1つになっている。これに対して、最近 Netgen や Gmsh などの自動メッシュ分割機能を持つプログラムが開発されることで、メッシュ分割はユーザーが意識して作業する必要がなくなる環境を比較的手軽に整備して使用することが可能となってきている。

そこで、本文では Netgen を使用した形状データ作成作業の流れを解析業務の効率化に対する1つの例として示す。具体的な手順は、SketchUp でモデリングした形状を STL データでエクスポートして Netgen にインポートする。インポートされた STL データに基づいて Netgen は 3 次元 4 面体要素によるメッシュ分割を行う。このメッシュ分割データをテキストファイルで出力してソルバーに入力することで解析が可能となる。以上が例示する作業時間の効率化のステップとなる。

なお、この手順を、高出力な LED 照明の放熱装置の効用に適用してみる。LED 照明は発熱量が一般に大きい、高出力となるとその影響は特に顕著となり、放熱機構が問題となる。そこで、放熱機能に工夫が必要となるが、今回対象としている放熱装置が比較的複雑な形状であるため、ここで示すデータ作成手順の適用を試みた。

また、放熱効果の計算を、放射を伴う熱伝導解析で実施しているが、連立1次方程式の計算には共役勾配法を採用したCUDAによる並列化を施している。

§2. 解析データ作成手順

解析データの作成手順を図1に示す。最初に外形形状を SketchUp でモデル化する。次いで、そのデータを STL データでエクスポートして Netgen に読み込ませる。Netgen では、読み込んだデータに基づき 3 次元 4 面体要素で領域を有限要素分割して、分割されたデータをテキストで書き出す。

なお、計算結果を表示するアプリは計算結果のデータの書式を考慮する必要はあるが、任意に選択できる。ここでは、MicroAVS や ParaView を前提として考える。

以下に LED 放熱装置の解析を例題として具体的にデータ作成過程を記述する。

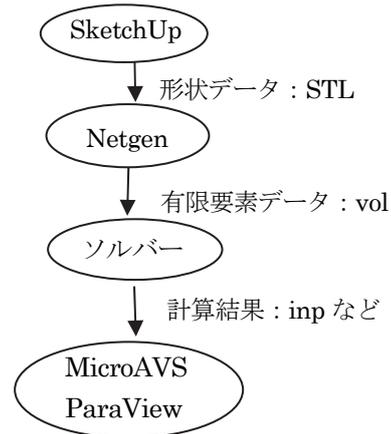


図 1 作業フロー



写真 1 LED 放熱装置

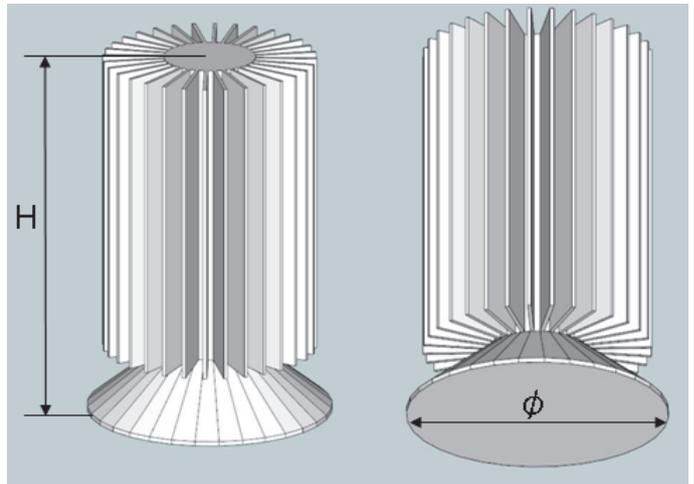


図 2 LED 放熱装置モデル図

2.1 SketchUp によるモデリング

対象とする放熱装置を写真 1 に示す。この外形形状を SketchUP でモデリングする。形状データを作成する手順は作成者によって種々のプロセスがあると思われる。

図 2 のようにモデル図が描けた後の過程を以下に示す。

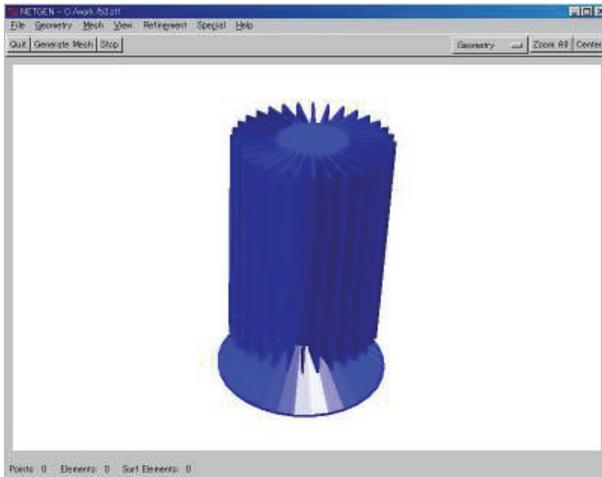


図 3 LED 放熱装置モデル図 (Netgen)

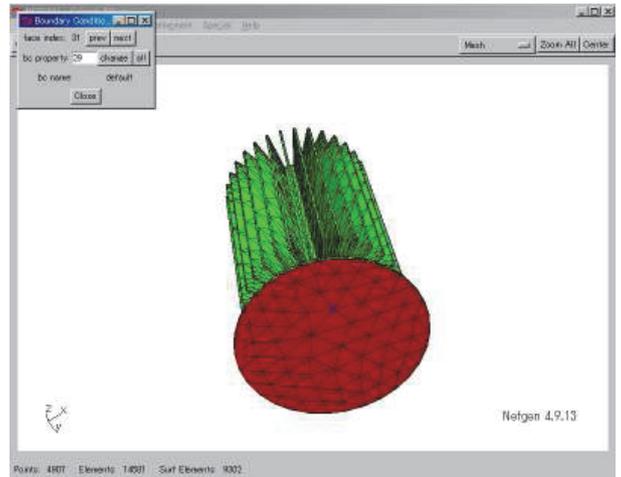


図 6(a) 境界条件の設定

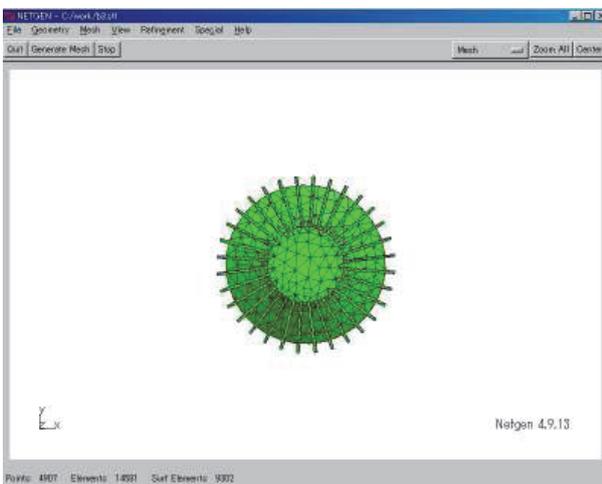


図 4 LED 放熱装置メッシュ分割図 (初期段階)

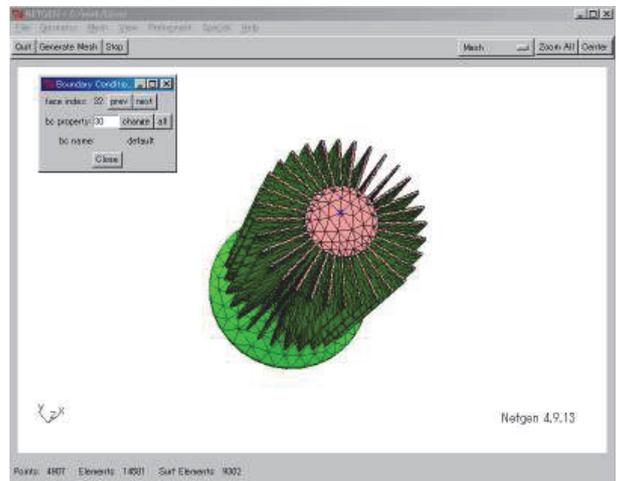


図 6(b) 境界条件の設定

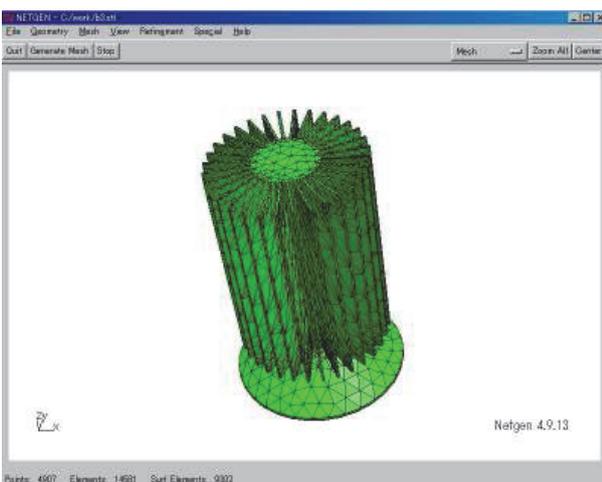


図 5 LED 放熱装置メッシュ分割図 (完成段階)

図 2 のように描かれたモデル図のデータを STL フォーマットでエクスポートして、要素分割を実施するために Netgen に読み込ませる。

2.2 Netgen によるメッシュ分割

SketchUP からのデータを Netgen に読み込ませた段階の画面が図 3 である。この状態から、メッシュ作成コマンド (Generate Mesh) を実行すると画面表示は図 4 のようになり、対象物は 3次元4面体要素でメッシュ分割される。メッシュ分割が完了した後は、図 5 に示すようにマウスを移動することによって視点を変えて状況を把握することができる。また、境界条件の設定は Mesh-Boundary Condition を指定して面に対しても指定することができる。これらの作業によって Netgen からは拡張子 vol というテキストファイルで有限要素メッシュデータが出力される。このファイルをソルバーに入力することになる。

2.3 ソルバーへの受け渡し

上記の手順で作成されたvolファイルを使って放熱効果を把握する。なお、計算は放射を伴う熱伝導解析で実施する。

§ 3. 放射を伴う熱伝導解析

3.1 基礎的な支配方程式

放射を伴う熱伝導解析には、通常の熱伝導解析に放射の影響を組み込んだ形の支配方程式を使う。放射は、いわば湧き出し項あるいは生成項 Γ と言われるもので考慮できる。通常の熱伝導方程式は次式で得られている。

$$\frac{\partial T}{\partial t} = D_{ij} \frac{\partial^2 T}{\partial x_i \partial x_j} + \Gamma \quad (1)$$

ここに、 T : 温度、 t : 時間、 D_{ij} : 熱伝導テンソル、 x_i : 座標を表す。熱を伝える物質が等方性を持つ場合、熱伝導テンソルは、

$$D_{ij} = D \delta_{ij} \quad (2)$$

となる。ここに、 δ_{ij} はクロネッカーのデルタである。

式(1)にガラーキン法を適用し、弱形式表示したものが次式である。

$$\begin{aligned} \{ [\int_V N^{(i)} N^{(j)} dV] \{ T^{(j)} \} \} &= \{ [\int_S N^{(i)} n_i D_{ij} \frac{\partial N^{(j)}}{\partial x_j} dS] \{ T^{(j)} \} \} \\ &- \{ [\int_V \frac{\partial N^{(i)}}{\partial x} D_{ij} \frac{\partial N^{(j)}}{\partial x} dV] \{ T^{(j)} \} \} + \Gamma \quad (3) \end{aligned}$$

ここに、 V : 体積、 S : 表面積、 $N^{(i)}$: 形状関数を表している。

本文では、写真1に示した LED 放熱装置の放熱挙動を、定常状態で検討する。これは、LED からの熱を解放する条件に対して最も厳しい条件が定常状態であって、この状態を検討しておけば、初期の非定常状態においては、すくなくとも放熱機能は満足できることから設定した条件である。これより、式(3)の時間項は考慮する必要がなくなり、結局次式を計算すればよいこととなる。

$$\{ [\int_S N^{(i)} n_i D_{ij} \frac{\partial N^{(j)}}{\partial x_j} dS] \{ T^{(j)} \} \} = \{ [\int_V \frac{\partial N^{(i)}}{\partial x} D_{ij} \frac{\partial N^{(j)}}{\partial x} dV] \{ T^{(j)} \} \} + \Gamma \quad (4)$$

3.2 放熱機構

写真 1 に示した放熱装置は内部が空洞であって、外郭領域が外気と接することで放熱されると同時に内部も放熱機能を有している。その模式図を図 7 に示す。

内部には液体を注入させていて、いわゆるヒートパイプとして機能し、放熱効果に寄与している。

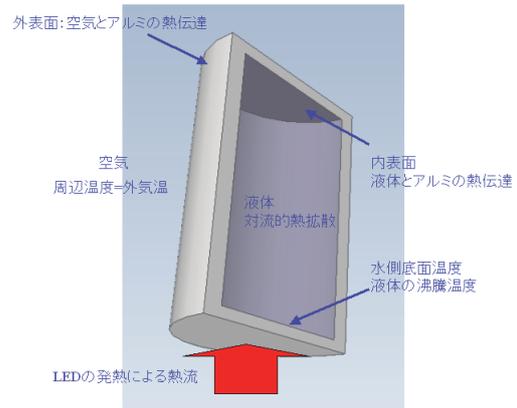


図 7 放熱機能

3.3 放熱項の導入

放熱は、熱を伝える物体の表面で生じる現象であるため、式(4)の左辺のような表面積分で組み込む形となる。

ここでは、次式のように熱伝導物体と熱伝達することで放熱効果を考慮する。

$$\Gamma = \left[\int_S N^{(i)} \alpha N^{(j)} dS \right] \{ T^{(j)} - T_{out} \} \quad (5)$$

ここに、 α : 熱伝導領域の外界との熱伝達率

以上から、実際計算する支配方程式は結果として次式となる。

$$\begin{aligned} &\{ [\int_S N^{(i)} n_i D_{ij} \frac{\partial N^{(j)}}{\partial x_j} dS] \{ T^{(j)} \} \} + \{ [\int_S N^{(i)} \alpha N^{(j)} dS] \{ T - T_{out} \} \} \\ &= \{ [\int_V \frac{\partial N^{(i)}}{\partial x} D_{ij} \frac{\partial N^{(j)}}{\partial x} dV] \{ T^{(j)} \} \} \quad (6) \end{aligned}$$

式(6)において、左辺第1項が LED の発光による発熱流入熱量であり、第 2 項が外気および内部と放熱装置との熱移動となる。

§4. 解析

§2. で作成した形状データを使って、§ 3. に示した計算を実施する。以下にその手順を記す。

4.1 計算条件

計算時には、放熱装置自体の物性値つまりアルミの熱伝導率とアルミと空気の熱伝達率、および外気の温度とヒートパイプ内部の温度、さらに、LED からの流入熱流束を設定する必要がある。これらの計算条件を表1に示す。その上で、フィンの数や長さあるいはコア部の径や高さなど、放熱装置

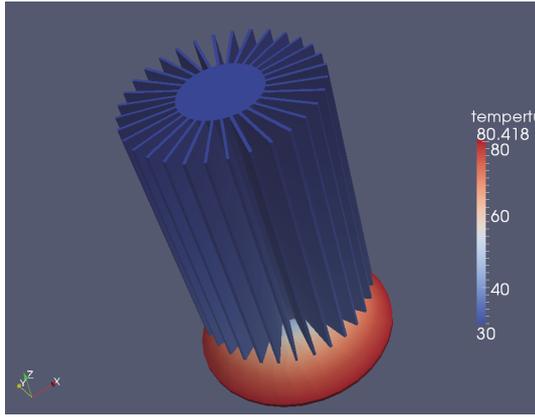


図 8(a) 計算結果(温度分布)

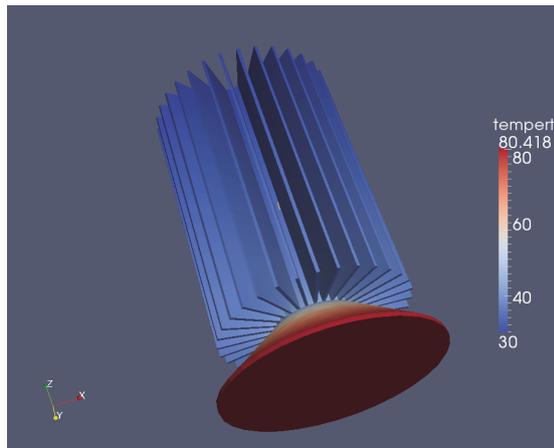


図 8(b) 計算結果(温度分布)

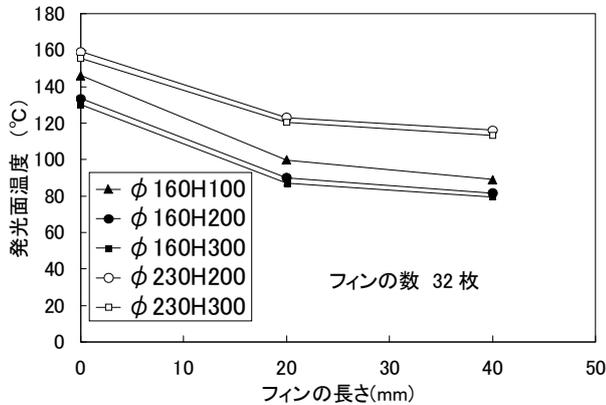


図 9 発光面温度

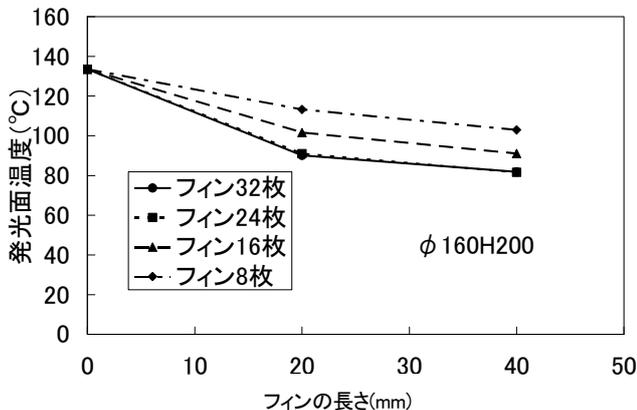


図 10 発光面温度

表1 計算設定条件

アルミの熱伝導率[W/(cm・K)]	2.4
アルミと空気の熱伝達率[W/(cm・K)]	0.005
外気温度(°C)	30
ヒートパイプ内温度(°C)	80
発光面からの熱流速[W/cm ²]	0.375

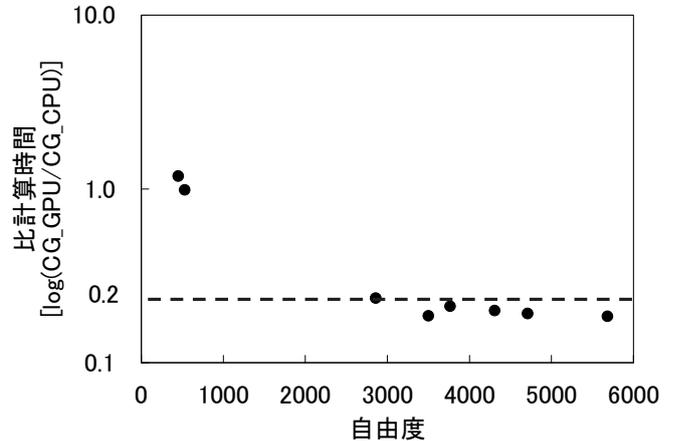


図 11 計算時間の比較(並列演算の効果)

の形状スペックを幾つか変化させることで、その効果を検討する。

4.2 解析結果

①冷却効果

解析結果として、放熱装置の温度分布の一例を図 8 に示す。また、フィン数を固定してフィンの長さの影響を示したものが図 9 である。そこでは、発光面の径 ϕ と高さ H をパラメータとしている(図 1)。径や高さによって温度は異なるが、フィンの長さが 20mm でどのケースも発光面温度がほぼ収束しているものと思われる。また、 $\phi 230$ の場合には高さの効果はほぼないが、 $\phi 160$ の場合には高さが 20cm くらいで冷却効果は収束しているように思われる。図 9 は放熱装置の発光面積と高さ固定してフィンの長さの影響を示したものである。この図においてはフィン数をパラメータとしている。このケースにおいてもフィンの長さが 20mm で冷却効果はほぼ収束しているように思われる。また、フィンの数は 24 枚と 32 枚でほぼ同程度の冷却効果が見られる。

②計算時間

本文では、データの作成における効率化だけでなく計算時間についても効率化を実施している。計算時間の効率化は、GP-GPU の一種である Nvidia の CUDA を使い、連立 1 次方程式の計算部分に並列化演算を適用したことで

実施した。なお、並列演算アルゴリズムには共役勾配法を使用している。

並列化の有無によって生じる演算時間の違いを示したものが図 11 である。自由度が小さいと演算時間の短縮にそれほど効果はないが、2000 自由度くらいから並列化の効果が発現し、ほぼ 20%の時間で計算が完了することになる。この結果は、物質移行拡散解析その他を実施した文献 2)と同様な結果を示している。

§5. おわりに

本文では、数値解析で主な労力が発生する形状データを、適切なソフトの組み合わせで効率化できる手法を記述した。数値解析に特有な「メッシュジェネレータ」を使用せずに、比較的使いやすく汎用性の高いモデリングソフトと自動メッシュ分割プログラムを使用することで、作業性を向上することができた。また、CUDA による並列化で計算時間も 20%に短縮することが可能となった。

これらを LED 放熱装置の機能性評価に適用し、その効果に及ぼす形状の下限値を示すことができた。このことは、今後の経済性を考慮した製品開発にも寄与できるものと考えている。

参考文献

- 1) 石川光祥ほか:大出力・高効率な LED 照明装置の開発、フジタ技術研究報告、No.48、2012
- 2) 仲沢武志: CUDA を用いた並列数値解析手法の一考察、フジタ技術研究報告、No.48、2012

ひとこと



仲沢 武志

有限要素法の計算用データ作成には、メッシュジェネレータのような専用アプリが使われることが普通である。それでも複雑な形状ではデータ作成の労力が問題となっていた。最近は、良いソフトもできて便利になってきた。