

偏微分方程式(ラプラス方程式)

山本昌志*

2003年1月27日

1 はじめに

以前、常微分方程式の数値計算の学習を行った。数学の授業で学習したように常微分方程式は、変数が1個である。それに対して、2個以上のものを偏微分方程式と言う。実際、自然現象は常微分方程式よりも、偏微分方程式で記述される場合が多い。常微分方程式が役に立たないと言っているのではなく、より広範囲には偏微分方程式が使われているということである。自然界が、 (x, y, z) の3次元と時間 t を合わせた4次元で成り立っているためである。

ここでは、偏微分方程式、特にラプラス方程式を差分法というテクニックで数値計算する方法を学習する。偏微分方程式は、いろいろなものがあるが、最初に学習する分には、意味がわかりやすいラプラス方程式が良いということで教材に選んだ。例えば、図1の静電磁場や、図2の熱の問題に、この方程式は表れる。

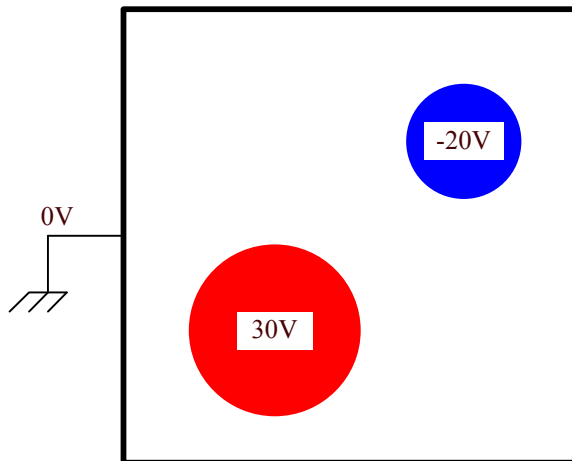


図 1: ポテンシャルを求める問題。

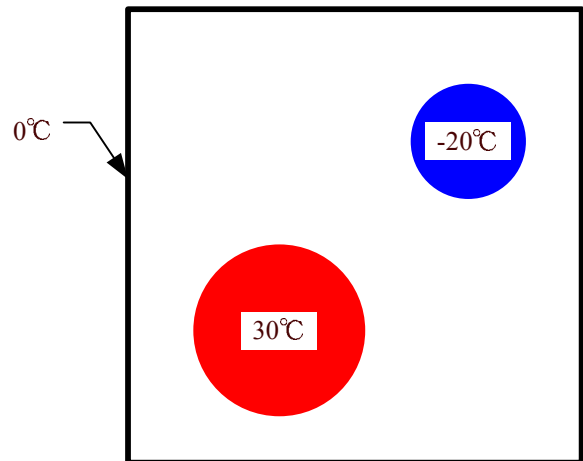


図 2: 温度を求める問題。

図 1 は、紙面と垂直方向に無限に長い正方形の金属筒に、電線が 2 本通っている。正方形の筒は 0V に

*国立秋田工業高等専門学校 電気工学科

アースされており、2本の電線はそれぞれ、30Vと-20Vである。この状態で、筒内部のポテンシャル(電圧)の分布を求めなさいという問題である。

図2は、紙面方向に非常に長い豆腐があり、その周りは0℃の水で満たされている。そして、その豆腐に30℃と-20℃の金属棒が突き刺さっている状況である。豆腐内部の温度分布を求めなさいというのが問題である。

これらは、物理的には異なる問題であるが、ポテンシャルや温度が満たす方程式は同じである。方程式が同じならば、解は同じである。これらが満たすのはラプラス方程式

$$\nabla^2 \phi = 0 \quad (1)$$

と言われるものである。 (x, y, z) の3変数の偏微分方程式である。ここでは、3次元の問題は大変なので、

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2} = 0 \quad (2)$$

の2次元の偏微分方程式を数値計算により求めるものとする。ここでの学習の最後には、図3を求める。

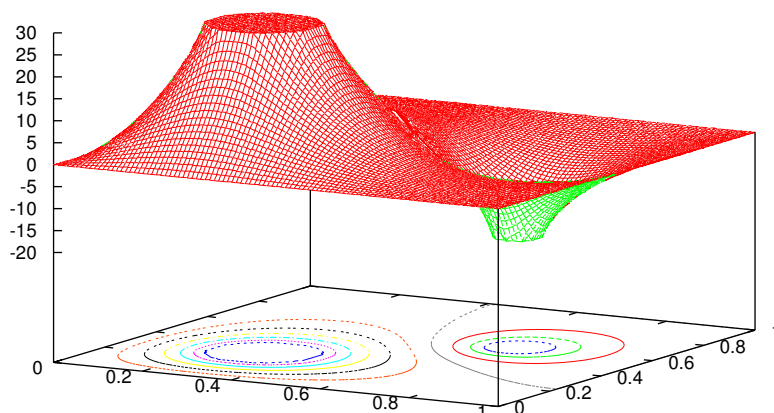


図3: 差分法により計算された、ポテンシャルや温度のグラフ。

2 差分法による偏微分方程式の数値計算

2.1 差分方程式

2次元のラプラス方程式を数値計で解くことを考える。まずは、いつものように、解 $\phi(x, y)$ をテイラー展開する。xおよび、y方向に微小変位 $\pm h$ があった場合、

$$\phi(x+h, y) = \phi(x, y) + \frac{\partial \phi}{\partial x} h + \frac{1}{2!} \frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} h^2 + \frac{1}{3!} \frac{\partial^3 \phi}{\partial x^3} h^3 + \frac{1}{4!} \frac{\partial^4 \phi}{\partial x^4} h^4 + \dots \quad (3)$$

$$\phi(x-h, y) = \phi(x, y) - \frac{\partial \phi}{\partial x} h + \frac{1}{2!} \frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} h^2 - \frac{1}{3!} \frac{\partial^3 \phi}{\partial x^3} h^3 + \frac{1}{4!} \frac{\partial^4 \phi}{\partial x^4} h^4 - \dots \quad (4)$$

となる。これらの式の辺々を足し合わせると、

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} \Big|_{x,y} = \frac{1}{h^2} [\phi(x+h,y) - 2\phi(x,y) + \phi(x-h,y)] - O(h^2) \quad (5)$$

が得られる。このことから、2階の偏導関数の値は微小変位 h の場所の関数の値を用いて、 h^2 の精度で近似計算ができることが分かる。すなわち、式 (5) の右辺の第1項を計算すればよいのである。同じことを y 方向についても行うと

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2} \Big|_{x,y} = \frac{1}{h^2} [\phi(x,y+h) - 2\phi(x,y) + \phi(x,y-h)] - O(h^2) \quad (6)$$

が得られる。

これらの式 (5) と (6) を元の2次元ラプラス方程式 (2) に代入すれば、

$$\phi(x+h,y) + \phi(x-h,y) + \phi(x,y+h) + \phi(x,y-h) - 4\phi(x,y) = 0 \quad (7)$$

となる。これが、2次元ラプラス方程式の差分の式である。この式を眺めると、座標 (x,y) のポテンシャルの値 $\phi(x,y)$ は、周りの値の平均であることがわかる。

実際にこの式を数値計算する場合、例えば図1のポテンシャルを求める時には、図5のように格子状¹に区切り、その交点での値を求めることになる。ここでは、 x および y 方向には等間隔 h で区切り計算を進めるが、等間隔である必要はない。多少、式 (7) は異なるが同じような計算は可能である。これまでの説明が理解できていれば、 x と y 方向の間隔が異なっても、式 (7) に対応する差分の式が作れるはずである。

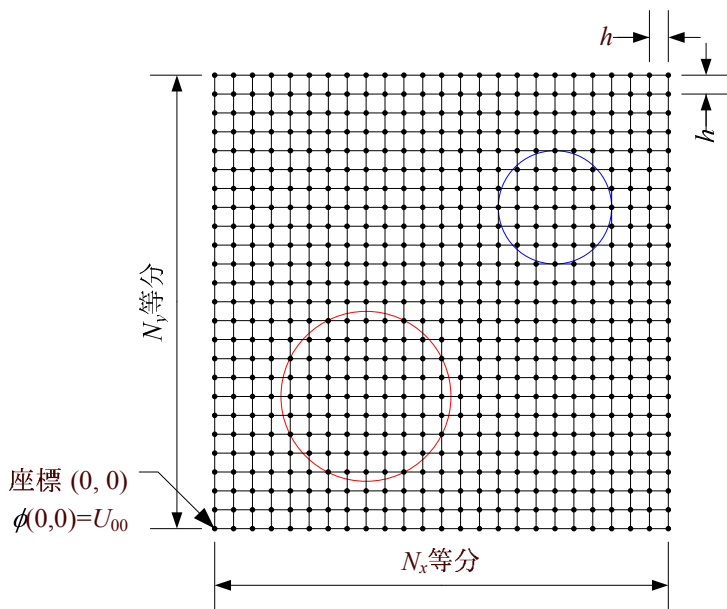


図 4: 解くべき領域を格子に分割

¹この格子のことをメッシュ(mesh)と言う事もある。

数値計算をする場合、 $\phi(x, y)$ や $\phi(x + h, y)$ の形は不便なので、形式を改める。図 5 の左下の座標を $(0, 0)$ として、格子点でのポテンシャルを

$$\begin{aligned}\phi(x, y) &= \phi(ih, jh) \\ &= U_{ij}\end{aligned}\tag{8}$$

とする。このようにすると、式 (7) は

$$U_{i+1j} + U_{i-1j} + U_{ij+1} + U_{ij-1} - 4U_{ij} = 0\tag{9}$$

となり、数値計算し易い形になる。各格子点の様子を図 5 に示す。

次の節で述べる境界条件を考えないとすると、ラプラス方程式は式 (6) の連立方程式を解くだけである。格子に領域を分割することにより、難しげな偏微分方程式が連立方程式に還元されたわけである。

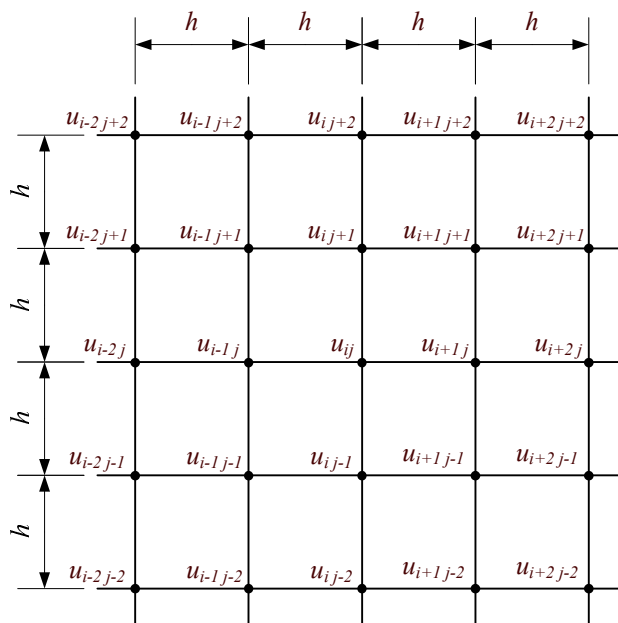


図 5: 差分の格子

2.2 境界条件 (外周)

実際に、連立方程式 (6) を計算する場合、困った問題が生じる。このままだと、式の数と未知数の数が合わないのである。たとえば、図??に示す境界を考える。すると、境界が式 6 の (i, j) になる場合、式が作れないのである。すると、図 5 の中の電極が無い場合、可能な連立方程式の数は、 $(N_x - 1) \times (N_y - 1)$ 個である。未知数の数は、 $(N_x + 1) \times (N_y + 1)$ 個である。未知数の数の方が、 $2(N_x + N_y)$ 個多いのである。そのため、予め、この余分の未知数となっている値を決めなくてはならない。実際これは、偏微分方程式の境界条件を決めることに相当する。

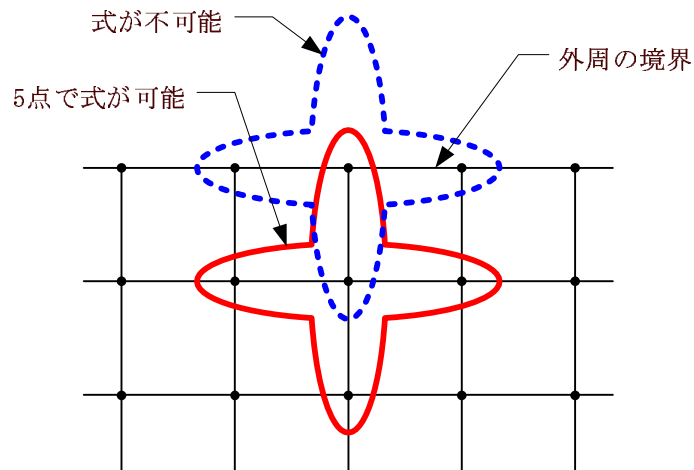


図 6: 境界付近の差分方程式の可能性

そこで、境界上の格子点 $2(N_x + N_y)$ 個の値を予め決める。こうすれば、式の数を減らさずに、未知数の数を減らすことができる。要するに偏微分方程式を解くときの境界条件を決めるのと同じ。

懸命な諸君であれば、予め決める値は外周の境界上の格子点でなくても良いと考えるだろう。しかし、内部の点の値を決めてしまうと、連立方程式が 1 個減ってしまうので、未知数と式の数の差は変わらない。これについては、良い説明が思い浮かばなかったので、そういうものだと思ってください。

2.3 境界条件 (内部の電極)

先ほどの説明通り内部の格子点のポテンシャルを決めてしまうと、その数だけ方程式が減少します。したがって、必要なだけ内部のポテンシャルを決めても、式と未知数の数は同じで、連立方程式は解けることになります。したがって、図 5 の電極内部の格子点のポテンシャル U_{ij} は、問題で与えられたとおり、30V と -20V と固定にすればよい。

3 実際の計算方法

3.1 ガウス・ザイデル法

境界条件、境界でのポテンシャルの値を決めることで、方程式と未知数の数が一致することは前に示したとおりである。したがって、連立方程式を解けば、格子点のポテンシャルは分かることになる。しかし、実際問題この方程式を作るのが大変である。未知数のポテンシャルは、分かりやすくするために U_{ij} と行列で表示したが、実際に連立方程式を解く場合、未知数としてベクトルになる。この式を書くのは大変厄介である。本当に大変かどうかは、諸君が実際に、係数行列と同次項を求めてみれば分かる。

そこで、次のお手軽な方法で連立方程式を解くことにする。この方法は、連立方程式の係数行列や同次項を求める必要がなく、プログラムは非常に簡単になる。

1. 外周の境界上の格子点のポテンシャルの値を U_{ij} に代入する。この値は、これ以降、ずっと一定とする。
2. 電極の内部の格子点のポテンシャルの値を U_{ij} を代入する。この値も、これ以降、ずっと一定とする。
3. 計算すべき内部の格子点のポテンシャルを、

$$U_{ij} = \frac{1}{4} [U_{i+1j} + U_{i-1j} + U_{ij+1} + U_{ij-1}] \quad (10)$$

に従い計算する。

4. U_{ij} が収束するまで、繰り返し、式 10 を計算する。

実際、この方法で無限の回数ループ処理をすれば、真の解に収束するはずである。このように、反復により解に収束させる方法を反復法と言う。とくに、ここで示した方法をガウス・ザイデル法という。

ただこの方法は効率が悪く、実用的ではないがプログラムが簡単なので、ここでは採用する。いろいろな反復法があるので、興味のある人は調べてみるのが良いだろう。