熱伝導特性の異なる地盤材料の熱伝導有限要素解析

八戸工業高等専門学校　学生会員　○山内　章寛
八戸工業高等専門学校　正会員　　清原　雄康

1. はじめに

地中熱の利用には様々なメリットがあるが，実際に設備導入するためには，熱交換効率持続性などを事前に知る必要がある。本研究では，地盤とは特性が大きく異なる熱伝導媒体を挿入した際の熱の伝わり方を把握するために，熱伝導有限要素法を用いた予測解析を行う。解析においては，要素数の制約条件や物性値が急に変化する点での不安定挙動などの問題が生じることがあり，時間差分化手法，要素の分割法，時間ステップの細分化に関する特性把握を行う。

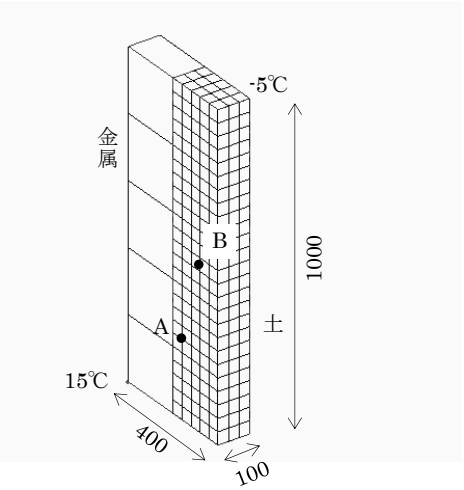
2. 熱伝導解析手法

熱伝導方程式は式(1)に示す。なお，熱流束は考慮しない。

$$\kappa \cdot \nabla^2 T - \rho c \frac{\partial T}{\partial t} = 0 \qquad (1)$$

ここに，T：温度　ρ：密度　t：時間
c：比熱　κ：熱伝導係数　である。

本研究では，ガラーキン法に基づき有限要素法定式化を行った後，時間差分化について，式(2)に示すクランク・ニコルソンの陰解法と，式(3)に示す完全陰解法を用いてそれぞれ解析を行った。



$$\left(\frac{1}{\Delta t}[Cmn]+\frac{1}{2}[Kmn]\right)\{\phi n\}_{t+\Delta t}=\left(\frac{1}{\Delta t}[Cmn]-\frac{1}{2}[Kmn]\right)\{\phi n\}_t \qquad (2)$$

$$\left(\frac{1}{\Delta t}[Cmn]+[Kmn]\right)\{\phi n\}_{t+\Delta t}=\left(\frac{1}{\Delta t}[Cmn]\right)\{\phi n\}_t \qquad (3)$$

ここに，$[Cmn]$:熱容量マトリックス，　$[Kmn]$：熱伝導マトリックス，
$\{\phi n\}_t$:時間 t における節点温度ベクトル，$\{\phi n\}_{t+\Delta t}$:時間 t+⊿t における節点温度ベクトルである。

3. 解析

図 1 に解析に用いたモデルを示す。金属と土の 2 種混合材料の熱伝導挙動を調べる。金属材料は要素サイズ 200×200×100mm，土は要素サイズ 40×40×40mm の直方体要素とし，中間節点も考慮した 1 要素 20 節点モデルとした。表 1 に材料パラメータを示す。

時間刻みは⊿t=4000[s]として，クランク・ニコルソンの陰解法（以下 c.n 法）と完全陰解法(以下 imp 法)との比較を行う。計算の安定性の指標となるクーラン数は，金属部で 200≦⊿t ≦267，土部で 3556≦⊿t≦4740 であった。境界条件（温度規定境界）は，上端面の温度を-5℃，下端面の温度を 15℃と規定した。なお，他の境界は断熱境界とした。また，初期温度は-5℃とした。

表 1　材料パラメータ

材料	熱伝導係数 κ kcal／mm･℃･sec	比熱 c kcal/kg･℃	密度 ρ kg/mm^3	ρ･c kcal／mm^3･℃
金属（銅）	8.89×10^{-5}	0.100	8.90×10^{-6}	8.91×10^{-7}
土	7.29×10^{-8}	0.180	1.80×10^{-6}	3.24×10^{-7}

キーワード　熱伝導，有限要素法，非定常解析
連絡先　　〒028-6927　青森県八戸市大字田面木字上野平 16－1　ＴＥＬ　0178-27-7367

4. 解析結果

4.1 c.n 法と imp 法の A 点での比較

特に不安定な挙動がみられた図 1 中の座標点 A(200,100,100)における温度変化を図 2 に示す。熱源が下端面のみであるため，本実験で使用したモデルの温度変化は本来安定した上昇傾向を見せるはずである。ここで，図 2 を確認すると，c.n 法で振動挙動となっているが，imp 法では振動もなく，不自然な値も発生せずに安定して温度が上昇していることが分かる。

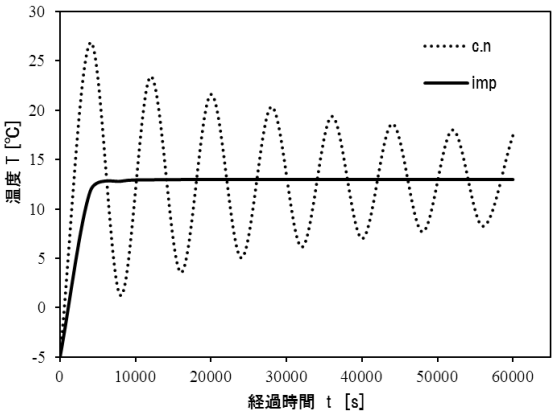


図 2　混合材料における境界部 A 点での温度変化

4.2 imp 法での熱伝導挙動の比較

安定性が高いことが確認された imp 法を用いて，土部分の中間座標点 B(320,0,500)における温度変化を求めた結果を図 3 に示す。温度が定常状態に至るまでの時間は，土のみの場合はおよそ 600000s，対して土と金属の混合材料の場合ではおよそ 2000000s である。土のみの場合に比べ，熱伝導性の高い金属材料を挿入した混合材料の熱伝達は，およそ 3.5 倍程度早いことが分かる。これより，金属材料が土に対して影響を与え，温度上昇を早めていることが確認できた。

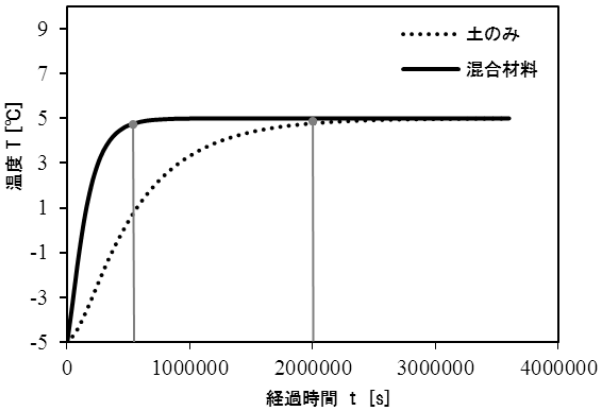
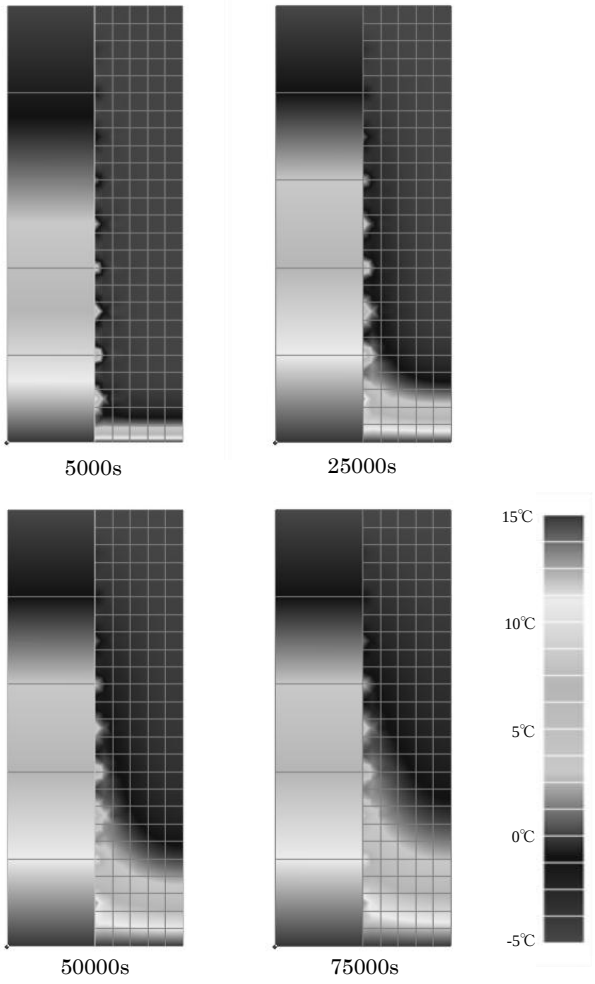


図 3　完全陰解法による B 点での温度の経時変化

4.3 温度分布挙動

解析結果を解析モデルに反映し，可視化を行ったものを図 4 に示す。金属材料は 5000s の時点でほぼ定常状態に至っており，その後は境界部から土に熱が伝わっている様子が分かる。



5. まとめ

熱伝導特性の異なる材料を用いての熱伝導非定常有限要素解析を行うと，時間差分化手法によっては解が不安定になることが分かった。完全陰解法では安定性が確認でき，熱伝導速度の早い金属と遅い土との，熱伝達挙動を可視化できた。地盤中に，ヒートパイプのように熱伝導性の良い金属が挿入された時の，土と金属の熱伝導相互作用を把握できた。

参考文献

1）　矢川元基：流れと熱伝導の有限要素法入門，培風館，1990 年.

2）　小清水拓也：三次元熱伝導有限要素法による地中温度の変化挙動予測，八戸高専卒業研究報告書，2013 年.