

信州大学工学部 正会員 ○大上 俊之  
同 上 正会員 三井 廣司

1. まえがき 近年、石油、LPG、LNG等のエネルギー備蓄に関して、土地の有効利用、安全性、環境保全などの見地から、地上タンクに代る岩盤内地下貯蔵システムの建設が急激に行われている。これらの建設において特にLNG、LPG等の低温液化ガスの貯蔵、およびそれら地下タンクの保守等の安全性に対しては、岩盤空洞周辺の熱伝導、熱応力解析が重要な問題となる。これらに対する数値解析手法としては、有限要素法(FEM)によるのが現状のようである。FEMは複雑な地盤性状、材料非線形性等を容易に取り込めるという点では優れているが、地盤の無限境界条件の表現が完全でなく、また、精度良い解を得ようとする場合には、かなり大きな離散化領域を必要とする。一方、境界要素法(BEM)は無限の境界を効果的に評価できる長所を有しているが、FEMほどの汎用性に乏しい側面がある。以上のことから、与えられた問題の性状、材料特性、境界条件等により両手法の長所を生かす境界/有限要素結合手法は計算効率の高いことが十分期待できる[1-3]。本文は、BEMとFEMとを結合した手法を用いて、2次元非定常熱伝導・熱応力問題の解析を試みたものである。

## 2. 解析手順 非定常熱伝導問題における結合手法

の解析手順の概略は次のようである。まず、Fig. 1に示すFE領域 $\Omega_F$ に対して、FEMによる離散化を行うと式(1)を得る。ここに $\phi$ 、 $Q$ は節点温度、節点熱流束値を表し、 $[K]$ 、 $[C]$ は熱伝導マトリックス、熱容量マトリックスである。なお、 $\Delta t = t_2 - t_1$ とする。一方、BE領域 $\Omega_B$ では $\phi$ と熱流束 $q$ の間には式(2)が成立する。ここに、 $[H]$ 、 $[G]$ は係数マトリックスであり、 $\{b\}$ は $\phi(t_1)$ に依存するベクトルである。 $Q$ と $q$ は分布マトリックス $[M]$ を用いて式(3)のように関係づけられるので、これより式(2)を式(4)のように有限要素方程式として表現することができる。よって、内部境界 $\Gamma_I$ における連続条件式(5)を考慮して、式(1)と式(4)を重ね合わせることによって全体系の方程式が得られるので、以下通常のFEMによる解析手順と同様に計算できることになる。熱応力解析の場合も解析手順は熱伝導解析と同様である。

3. 数値計算例 まず、厳密解のわかっている問題として、Fig. 2に示すような簡単なモデルについて解析を行う。 $t=0$ 時に領域において $\phi = 100^\circ\text{C}$ を初

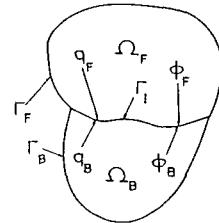


Fig.1 Definition of symbols

$$\left( \frac{1}{2} [K] + \frac{1}{\Delta t} [C] \right) \{ \phi(t_2) \} = \left( -\frac{1}{2} [K] + \frac{1}{\Delta t} [C] \right) \{ \phi(t_1) \} + \{ Q \} \quad (1)$$

$$[H] \{ \phi \}_2 = [G] \{ q \} + \{ b \} \quad (2)$$

$$\{ Q \} = [M] \{ q \} \quad (3)$$

$$[M] [G]^{-1} [H] \{ \phi \}_2 = \{ Q \} + [M] [G]^{-1} \{ b \} \quad (4)$$

$$\phi_{FB} = \phi_{BF} \quad (5)$$

$$Q_{FB} + Q_{BF} = 0$$

期条件として与え、境界条件として矩形板の周囲を  $\phi = 0^{\circ}\text{C}$  に規定した場合を考える。Fig.3 に結合手法による分割を示す。なお、数値積分には、境界積分では Gauss の 4 点積分を、内部 Cell の領域積分には  $2 \times 2$  点積分を用いた。Fig.4 は計算結果で、中央点の温度の時間変化を図示したものである。FEM, BEM, 結合手法とも厳密解 [4] と良く一致していることがわかる。次に、結合手法を用いた実際的な数値計算例として、LPG 地下タンク周辺部の非定常熱伝導問題を考える。Fig.5 は結合手法による分割図で、対称性より半分のみ離散化している。Fig.6 は、境界条件としてタンク内部を  $-42^{\circ}\text{C}$ 、地表面を  $10^{\circ}\text{C}$ 、タンク地下 90 m の地中面の位置で  $5^{\circ}\text{C}$  と与えた場合の計算結果で、各時間ごとの凍結領域の進展状況を図示したものである。 $0^{\circ}\text{C}$  以下の凍結領域は 40 年後で壁面から約 40 m に達している。Fig.7 はタンク底部に Heat Fence を設置した場合の凍結領域の拡がり方を表したものである。Heat Fence を設置しない場合と比べて凍結領域の拡がり方は小さくなっており、Heat Fence の効果がよくわかる。この場合、約 20 年以降の凍結領域の進展はみられなかった。この計算例における計算ディテールを Table 1 に示すが、これより結合手法は FEM に比べて、節点数、要素数、CPU 時間ともそれぞれ約 20%、30%、15% 程度の軽減となり、計算効率の良いことがわかる。

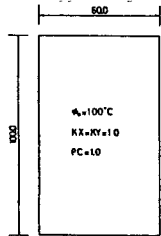


Fig.2 Simple transient heat conduction problem

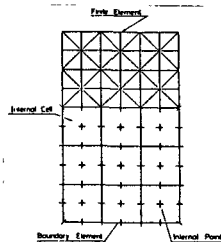


Fig.3 Mesh division in Coupling procedure

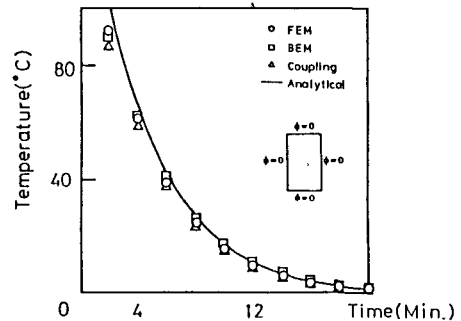


Fig.4 Temperature at central point

Table 1 Computational details (HITAC M-240H)

|              | Node    | Element               | Cell | C P U-T    |
|--------------|---------|-----------------------|------|------------|
| (a) F. E. M  | 249     | 438                   |      | 44.15 Sec. |
| (b) Coupling | 208     | F. E. 234<br>B. E. 47 | 281  | 37.06 Sec. |
| (b) / (a)    | 82.73 % | 66.89 %               |      | 83.92 %    |

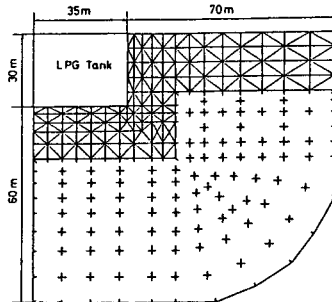


Fig.5 Mesh division for LPG tank

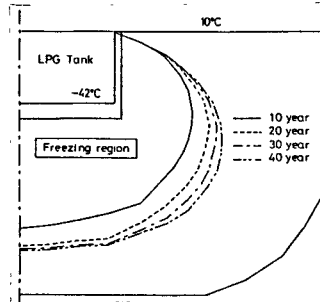


Fig.6 Propagation of freezing front

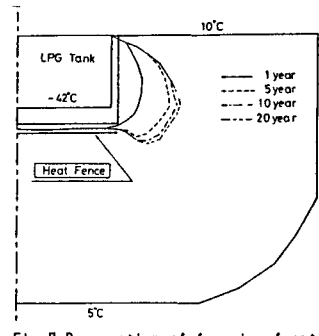


Fig.7 Propagation of freezing front with horizontal heating fence

**参考文献** 1) Mitsu, Y., Y. Ichikawa, U. Obara and T. Kawamoto : A Coupling Scheme for Boundary and Finite Elements Using A Joint Element, Int. Jour. Num. Anal. Meth. Geomechanics, Vol. 9, 161-172 (1985). 2) 青木・大上・三井・草間 : 境界-有限要素結合手法による熱応力解析、第2回境界要素法シンポジウム研究発表論文集、179-184、1985. 3) Ohkami, T., Y. Mitsu and T. Kusama : Coupling Boundary/Finite Element Analysis in Geomechanics Including Body Forces, Int. Jour. for Computers and Geotechnics (to appear). 4) 野邑 : 応用数学、内田老鶴園新社、177-181 (1966).