

ライニング式高圧気体地下貯蔵における地盤内漏洩ガス流動のモデル化に関する検討

清水建設 技術研究所
同上正会員 ○奥野 哲夫, 正会員 米山 一幸
フェロー会員 石塚 与志雄, 正会員 八田 敏行

1.はじめに 本論文では、圧縮空気や天然ガスなどのライニング式高圧貯蔵施設を対象に、漏洩が発生した場合の地盤内での漏洩ガス流動の適切な評価を目的として、非ダルシー流のモデル化に関する検討を行った結果を報告する。別途検討した漏洩部の流動のモデル化¹⁾に加えて、漏洩箇所付近の地盤内ガス流動は乱流状態にあるものと考えられ、層流状態を仮定したダルシー流によるモデル化では実際の漏洩量を過大に評価する可能性がある。今回は既往の研究に基づき数種類の非ダルシー流のモデル化が可能な多成分多相流解析コードを開発し、これらのモデル化の違いによる地盤内ガス流動への影響を検討した結果を報告する。

2. 非ダルシー流のモデル化と解析方法 非ダルシー流に関する既往の研究では式(1)のForchheimer方程式に基づくモデル化が行われており、そのパラメータ β （非ダルシー流係数）は一般に式(2)の形で表される。また、パラメータ A_1, A_2, A_3, A_4 に関しては石油資源開発分野を中心に表-1に示す研究結果（数値モデル）が報告されている²⁾⁻⁸⁾。

$$-\nabla\Phi = \frac{\mu}{k \cdot k_r} \mathbf{u} + \beta \rho |\mathbf{u}| \mathbf{u} \quad (1) \quad \beta = A_1 \cdot (k \cdot k_r)^{-A_2} \cdot \theta^{-A_3} \cdot \tau^{-A_4} \quad (2)$$

ここで、 Φ は流体相のポテンシャル勾配[Pa・m⁻¹]($\Phi = P - \rho g$, P は圧力[Pa], g は重力加速度[m・s⁻²]), μ : 動粘性係数[Pa・s], k : 絶対浸透率[m²], k_r : 相対浸透率[-], ρ : 流体相密度[kg・m⁻³], $\mathbf{u}$: 相の平均流速ベクトル[m・s⁻¹], θ : 相の体積含有率[-]($\theta = \phi S$, ϕ は間隙率, S は相飽和率), τ : 屈曲率[-]($\tau = L/l$, L は巨視的流動距離, l は間隙内の微視的流動距離)である。式(1)の第2項が非線形項（非ダルシー流）を表し、第1項のみの場合はダルシー流に相当する。今回は式(1), (2)に基づき、表-1の各数値モデルが取り扱い可能な多成分多相流解析コードを開発し、以下の解析を実施した。

図-1にトンネル形状の貯槽を想定した解析モデル(1/2モデル)を、表-2に解析ケースを示す。天然ガス(メタン)が貯蔵圧10MPa(一定圧)で貯蔵されることを想定し、漏洩はトンネル天端の円孔(面積10mm²)からノズル気体流れの理論式に従って発生するものとした¹⁾。なお、貯蔵圧は漏洩発生後も10MPaで一定と仮定した。地盤(岩盤)の絶対浸透率は一律 1×10^{-14} m²(透水係数約 1×10^{-5} cm/s相当)を想定し、相対浸透率および毛管圧は泥岩の測定例を参考に設定した。また、屈曲率は $\tau = \phi^{1/3} S^{10/3}$ (Millington and Quirkモデル)を採用した。以上の条件に加えて、初期条件として地盤内間隙中は大気圧状態(残留水飽和率相当の水分が存在)のケース(Aシリーズ)と、地下水位が地表面に位置するケース(Bシリーズ)を想定した。

3. 解析結果と考察 解析結果として漏洩発生6時間後の圧力分布とガス漏洩状況を図-2, 3に、各解析ケースのガス漏洩量の経時変化を図-4, 5に示す。図-2, 3の分布図は、図-1の漏洩位置においてトンネル軸垂直断面で切断したモデル形状にコンターを表示しており、圧力分布は単相状態ではその相の圧力を、二相状態では気相の圧力を

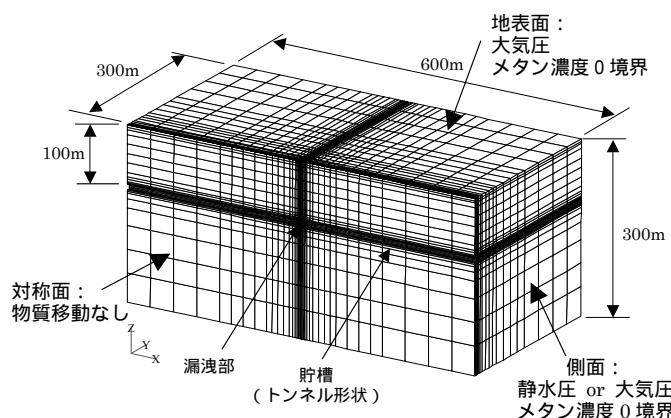


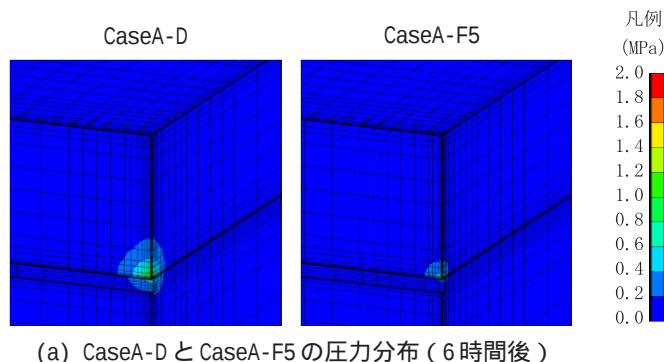
図-1 解析モデル(1/2モデル)

表-2 解析ケース
D: ダルシー流, ND: 非ダルシー流
(非ダルシー流の数値モデルは文献と表-1を参照)

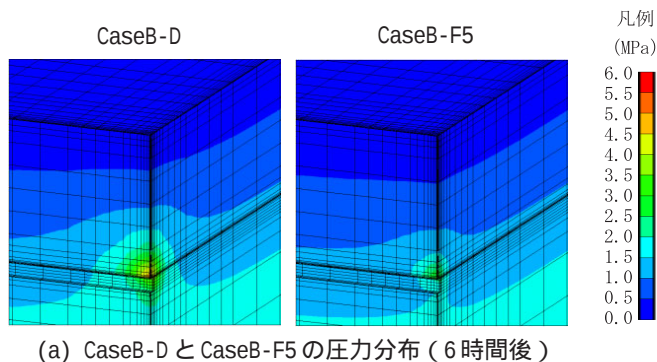
解析ケース	流動のモデル化と参考文献	地盤内初期条件	成分と相(漏洩発生後)
Aシリーズ	CaseA-D: D CaseA-G: ND: 文献2) CaseA-F3: ND: 文献4)の式(3) CaseA-F4: ND: 文献4)の式(4) CaseA-F5: ND: 文献4)の式(5) CaseA-L: ND: 文献5) CaseA-T: ND: 文献6) CaseA-C: ND: 文献7)	大気圧: 空気飽和率0.95 水飽和率0.05 (残留水飽和率)	<成分構成> 空気・メタン・水 <相構成> 気相: 空気・メタン(水蒸気が混合) 液相: 水(空気とメタンが溶解)
Bシリーズ	CaseB-D: D CaseB-G: ND: 文献2) CaseB-F3: ND: 文献4)の式(3) CaseB-F4: ND: 文献4)の式(4) CaseB-F5: ND: 文献4)の式(5) CaseB-L: ND: 文献5) CaseB-T: ND: 文献6) CaseB-C: ND: 文献7)	地下水位: 地表面 (静水圧: 水飽和率1.00)	<成分構成> メタン・水 <相構成> 気相: メタン(水蒸気が混合) 液相: 水(メタンが溶解)

キーワード: 高圧気体貯蔵, 漏洩, 非ダルシー流, 多成分多相流, 数値解析

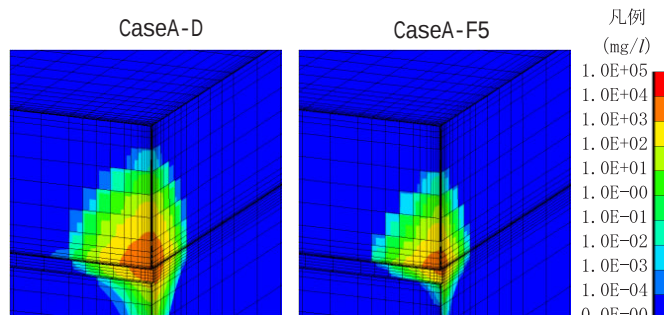
連絡先: 〒135-8530 東京都江東区越中島3-4-17・電話 03-3820-5267・FAX03-3820-5959



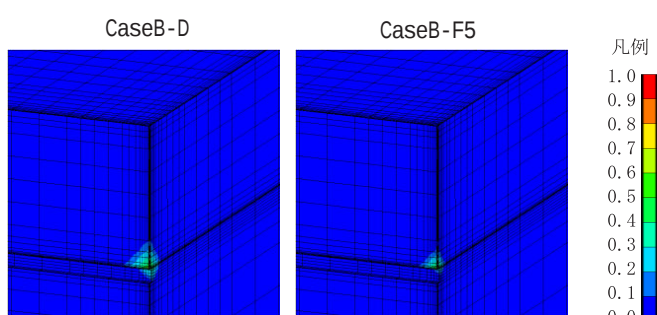
(a) CaseA-D と CaseA-F5 の圧力分布（6時間後）



(a) CaseB-D と CaseB-F5 の圧力分布（6時間後）



(b) CaseA-D と CaseA-F5 の気相中のメタン濃度（6時間後）



(b) CaseB-D と CaseB-F5 の気相（メタン）飽和率（6時間後）

図 - 2 A シリーズの解析結果例

図 - 3 B シリーズの解析結果例

示している。非ダルシー流では漏洩箇所近辺での抵抗が大きいため、圧力分布が広範囲に広がらず、ガス拡散範囲（気相中のメタン濃度および気相飽和率を参照）も狭くなっていることがわかる。また、図 - 4、5 の貯槽からのガス漏洩量の経時変化を見ると、ダルシー流は非ダルシー流に比べて2倍以上の漏洩量を示しており、過大な漏洩量を評価する可能性がある。さらに、モデル化の異なる数種類の非ダルシー流においてもモデル毎に漏洩量は異なり、漏洩箇所周辺での乱流（抵抗則）のモデル化の相違が漏洩量評価に影響することがわかる。一方、地下水の有無による違い（AシリーズとBシリーズの比較）を見ると、地下水位が地表面まであるBシリーズの方がわずかながら漏洩量が少なくなる傾向を示し、地下水による漏洩量低減の効果も窺われる。

4 おわりに 今回は既往の研究に基づき数種類の非ダルシー流のモデル化が可能な多成分多相流解析コードを開発し、これらのモデル化の違いにより地盤内の漏洩ガス流動の評価に大きな違いが生ずる可能性があることを示した。今後は各モデルの適用性についてさらに研究を進める予定である。

謝辞 ノズル気体流れの理論式および非ダルシー流の取り扱いが可能な本解析コードの開発に当たり、Lawrence Berkeley National LaboratoryのStefan Finsterle博士にご協力を賜った。ここに記して謝意を表します。

参考文献 1) 米山ら：ライニング式高圧気体地下貯蔵における漏洩部のモデル化に関する検討，第57回年次学術講演会（本講演），2002。2) Geertsma, J. : Estimating the coefficient of inertial resistance in fluid flow through porous media, SPEJ, pp.445-450, 1974. 3) Evans, E. V., and R. D. Evans : Influence of an immobile or mobile saturation on non-Darcy compressible flow of real gases in popped fractures, JPT J. Pet. Technol., 40(10), pp.1343-1351, 1988. 4) Frederick, D.C., and R. M. Graves : New correlation to predict non-Darcy flow coefficients at immobile and mobile water saturation, Paper SPE 28451, presented at the 1994 SPE Annual Technical Conference and Exhibition, pp. 915-921, 1994. 5) Liu, X., F. Civan, and R. D. Evans : Correlation of the non-Darcy flow coefficient, JCPT, 34(10), pp.50-54, 1995. 6) Thauvin, F., and K.K. Mohanty : Network modeling of non-Darcy flow through porous media, Transport in Porous Media, 31, pp.19-37, 1998. 7) Coles, M. E., and K. J. Hartman : Non-Darcy measurements

in dry core and the effect of immobile liquid, Paper SPE 39977, presented at the 1998 SPE Gas Technology Symposium, pp.193-202, 1998. 8) Kurihara, M., J. Liang, F. Fujimoto, L. Nghiem, and P. Sammon : Development and Application of Underground Gas Storage Simulator, SPE 59438, presented at the 2000 SPE Asia Pacific Conference, pp. 915-921, 2000.

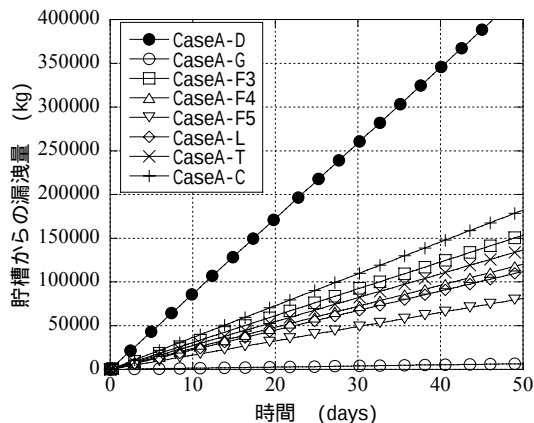


図 - 4 A シリーズのガス漏洩量経時変化

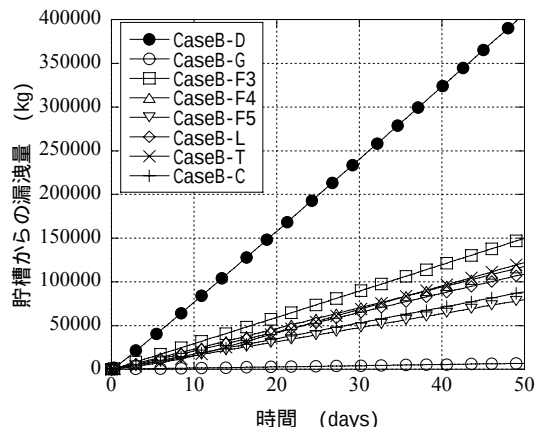


図 - 5 B シリーズのガス漏洩量経時変化