四国電力，四国総合研究所
研究期報110（2019年6月）
12－24

土壌の透気係数および拡散係数の計測手法に関する研究

㈱四国総合研究所 電子技術部　荻田　将一
㈱四国総合研究所 電子技術部　市川　祐嗣
㈱四国総合研究所 電子技術部　杉本　幸代
㈱四国総合研究所 電子技術部　朝日　一平

キーワード：　透気係数
拡散係数
移流移動
拡散移動
アスファルト混合物

Key Words：　Air permeability coefficient
Diffusion coefficient
Advection movement
Diffusion movement
Asphalt mixture

Research on measurement method of air permeability coefficient and diffusion coefficient of soil

Shikoku Research Institute, Inc., Electronics Technology Department
Masakazu Ogita, Yuji Ichikawa, Sachiyo Sugimoto, Ippei Asahi

Abstract

Flammable gases such as hydrogen are expected to be next-generation energy sources, yet there is still much to be considered in regard to safety in the maintenance and detection of buried gas conduits and the like. The behavior of the gas in the ground is largely different depending on the type and condition of the soil, and it is difficult to determine uniformly at the actual site. If the behavior of gas leakage and diffusion can be predicted in advance in the case of recovery operation when there is a minor damage to the conduit, it will be possible to prevent the spread of damage in advance and greatly contribute to ensuring the safety of workers.

This report aims to contribute to the development of technical standards for gas workpieces. We report on the development of a measurement method that determines the air permeability coefficient and diffusion coefficient, which are the basic soil parameters necessary to accurately simulate gas diffusion behavior in the ground under asphalt pavement within the realization site, as accurately as possible, in addition to the details of the measurement results.

1. はじめに

水素，メタン等の可燃性ガスは，次世代のエネルギ源として期待されているものの，埋設ガス導管の保守管理，漏えいガスの検知における安全性等に未だ検討すべき余地がある。土中のガスの挙動は実現場の土壌種，状態が様々に異なることから，一様に定めるのは困難である。導管に軽微な損傷が生じた際の復旧作業において，ガス漏えい・拡散の挙動を前もって予測することができれば，被害の拡大を未然に防ぎ，作業従事者の安全性の確保に大きく貢献することが可能になるとともに，埋設ガス導管等の技術基準の整備に資することにもつながる。地中におけるガス漏えい・拡散の挙動を予測するためには，土壌中のガス挙動に関する基本的なパラメータである透気係数と拡散係数を正確に求める必要がある。

本研究では，通常のアスファルト舗装下の地中におけるガス拡散挙動の予測を可能とするため，舗装を構成する各層（真砂土層，砕石層，アスファルト層）の透気係数・拡散係数計測を行った。本報告では，その計測手法の開発および計測結果の詳細について報告する。

2. 透気係数および拡散係数の計測の意義

土壌内に含まれる成分ガスの濃度は，大気を構成する成分ガスとは大きく異なっている。

酸素は土壌中で 2～21%，二酸化炭素に関しては 0.1%～10%と，大気中のガス濃度組成（酸素：21%，二酸化炭素：0.03%）と比較すると大きく異なっている。このガス濃度組成の違いにより，大気と土壌との間で常にガス交換が生じている。

土壌中のガスは，土壌中をひとまとまりで移動して大気とのガス交換を行う移流移動と，それを構成する成分が拡散によって移動する拡散移動を常に行っている。マスフローとも呼ばれる移流移動は気圧変化や温度変化等に起因して，高圧から低圧へと圧力勾配により土壌成分ガスが流れる。これはダルシーの法則によって表される [1)]。一方，拡散移動はガスの濃度差によるものであり，フィックの法則で表される [2) 3)]。

移流移動と拡散移動はそれぞれ透気係数（通気係数），拡散係数という指標で示され，ガス移動に起因する土中のガスの挙動を知る上で，透気係数と拡散係数を求めることは非常に重要である [4)]。

2.1 透気係数の決定法

透気係数（固有透気係数）K は，以下の定義付された計算式により与えられる [5)]。

$$K = \frac{L}{A} \cdot \frac{\mu Q}{P_i - P_o} \quad (2.1)$$

Q：流量
μ：ガス粘性係数
A：試料断面積
L：試料長
Pi：試料透過前のガス圧力（入口圧）
Po：試料透過後のガス圧力（出口圧）

ガス粘性係数μは気体の種類温度によって定まる定数である。よって，透気係数 Kを求めるには，試料断面積 A，試料長 L，流量 Qおよび圧力差 $P_i - P_0$を得る必要がある。これらの値を測定し，式(2.1)に代入し，透気係数を求める。

2.2 拡散係数の決定法

拡散法により拡散量Nは式(2.2)で与えられる [6)]。

$$N = -D_e \frac{dC}{dZ} \quad (2.2)$$

D_e：自由大気中の拡散係数 [7)]
C：ガス濃度
Z：任意深度

土壌試料を充填した長さL_Sの容器に，窒素を充填した長さL_Aの拡散容器を接続した，ガスの貯蓄を考慮しない条件の場合，土壌試料の上端における酸素濃度が常に大気中に等しく，また拡散容器内ではガスは速やかに混合し濃度差が生じないと仮定すると，土壌試料の拡散係数D_eを含む式(2.3)が近似的に成り立つ。

$$\frac{C(t) - C_i}{C_0 - C_i} = \frac{2\theta_a}{L_A} \cdot \frac{exp\left(-D_e \alpha_1^2 \cdot \frac{t}{\theta_\alpha}\right)}{L_S\left\{\alpha_1^2 + \left(\frac{\theta_\alpha}{L_A}\right)^2\right\} + \frac{\theta_\alpha}{L_A}} \quad (2.3)$$

C：酸素濃度
C_0：初期時間における拡散容器内の酸素濃度
$C(t)$：時刻t における拡散容器内の酸素濃度
C_i：大気中の酸素濃度
L_S：試料容器の長さ
L_A：拡散容器の長さ
θ_a：土壌試料の気相率（空隙率）
α_1：計算定数

α_1は式(2.4)を満たすα_nの 1 番目の正の根である[6) 8)]。

$$\alpha_1 \tan(\alpha_1 \cdot L_S) = \frac{\theta_a}{L_A} \quad (2.4)$$

式(2.3)は，両辺に自然対数を取ることで以下のように変換される。

$$\ln\frac{C(t)-C_i}{C_0-C_i} = \frac{D_e\alpha_1^2}{\theta_a}t + \ln\left[\frac{2\theta_\alpha}{L_A}\cdot\frac{1}{L_S\left\{\alpha_1^2+\left(\frac{\theta_\alpha}{L_A}\right)^2\right\}+\frac{\theta_\alpha}{L_A}}\right] \quad (2.5)$$

式(2.5)の右辺第 2 項は時間変化しない定数項であるため，式(2.5)の左辺と時刻tの間には勾配$-D_e\alpha_1^2/\theta_a$の直線関係が成立する。この勾配は任意の時刻t_1～t_2 $(t_1 < t_2)$間の時間差と，それぞれの時刻における式(2.5)の左辺値の差から以下のように求められる。

$$-\frac{D_e\alpha_1^2}{\theta_a} = \frac{\ln\left(C_i - C(t_2)\right) - \ln\left(C_i - C(t_1)\right)}{t_2 - t_1} \quad (2.6)$$

t_1，t_2：任意時間 $(t_1 < t_2)$

式(2.6)をD_eについて整理し，各パラメータに計測値を代入すれば，土壌試料の拡散係数が求められる。具体的な導出の手順は実験結果にそって後述する。

D_eは温度や気圧，対象とするガスの種類などによって異なるため，試料中の拡散しやすさを表す指標としては，一般に同じ温度・気圧条件下での自由大気中の拡散係数D_aに対する比である相対拡散係数D_e/D_aで示すことが多い。これを求めるためD_aを式(2.7)で求める。

$$D_a = D_0 \cdot \frac{1013}{P} \cdot \left[\frac{T}{273.15}\right]^n \quad (2.7)$$

D_0：標準状態における自由大気中の拡散係数
P ：計測時の気圧
T ：計測時の温度

3. 土壌試料の選定

3.1 道路構造の調査

本研究では，土壌試料として一般的な埋設土および一般的な道路舗装等に使用される舗装材を用いて，実運用時に近い条件下でのガス拡散挙動における基礎的なパラメータを得るために，透気係数および，拡散係数の計測を行う。図 1 に舗装の基本構造を示す[9)]。

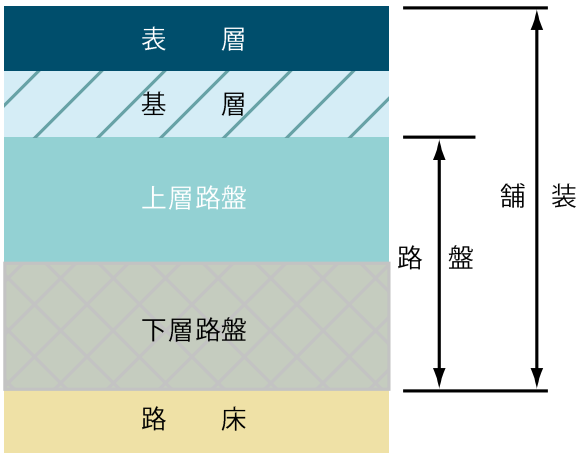

図 1　舗装の基本構造

舗装は，図 1 に示すとおり，大別すると下層路盤，上層路盤，基層，表層の 4 層により構成され，真砂土や山砂等の路床の上に敷設される[10)]。

路床上に敷設されている路盤は，路面の交通荷重を広く分散し路床にかかる応力を減少させており，通常，下層路盤と上層路盤に分けられる。下層路盤は比較的支持力の小さい安価な材料である現地材料が用いられる場合が多く，上層路盤は支持力の大きい良質な材料が使用される。基層には，路面に掛かる交通荷重を均一に支持分散させる役割があり，通常，加熱アスファルト混合物が用いられる。表層は最上部の層であり，交通荷重を下層に分散させ，一般的には雨水の浸透を防止する。ここにも加熱アスファルト混合物が用いられる。

一般的な舗装はこのような基本構造を基に敷設されるが，交通量や目的等により層の構成，各層の厚さ，用いる材料は様々である。構成物として，砕石には主に JIS で定められた骨材粒度分布を満たす，単粒度砕石，クラッシャーラン，粒度調整砕石の 3 種が用いられる。骨材としては，砕石，砂利，砂，砕砂等，これに類似する材料があり，舗装用骨材には，2.36mm ふるいに止まる粗骨材，2.36mm ふるいを通過し 75μm ふるいに止まる細骨材，フィラー（石粉）と呼ばれる 75μm ふるいを通過する鉱物質粉末がある。単粒度砕石は粒度分布範囲が狭く，粒度の揃った骨材により構成される。クラッシャーランは単粒度砕石より粒度分布範囲が広く，粒度調整砕石は更に粒度範囲が広い [11) 12)]。

前述のとおり，基層および表層には，加熱アスファルト混合物が用いられる。加熱アスファルト混合物は，結合剤であるアスファルトに骨材やフィラーを組み合せて適切な配合とし，これを所定の温度条件で加熱混合して製造されるものである。アスファルト混合物は交通量，目的に加え，舗装する場所の気象条件等により，配合設計される。

アスファルト混合物の内，粗粒度や開粒度アスファルト混合物は粗骨材が多く配合されており，密粒度，細粒度の順に細骨材やフィラーの配合量が多くなる。アスファルト混合物はこれらの粒度分布を持つ骨材に 3～8%（混合物全量に対する質量百分率）のアスファルトを混合して製造される。

また，アスファルト混合物を敷設する際，路盤上に瀝青材料を薄く散布した後，敷設する。これはプライムコートと呼ばれており，路盤とその上に敷設するアスファルト混合物の付着を良くする等の役割がある。一般的には，粘度が比較的低く，路盤の中によく浸透するアスファルト乳剤 PK-3（カチオン乳剤）が用いられる。プライムコートの散布量は一般には 1.0～2.0L/m^2 と定められている。また，アスファルト舗装の基層と表層の間にも薄く瀝青材料を散布する。これは，タックコートと呼ばれ，基層と表層のアスファルト混合物の付着性を高める目的がある。タックコート用瀝青材料には，通常，アスファルト乳剤 PK-4（カチオン乳剤）が用いられる。タックコートの散布量は一般には 0.3～0.6L/m^2 である [13)]。

3.2 試料の選定

本報告においては，一般的な道路構造部へ使用される舗装として，図 2 に示す，「車道舗装 50 型」に基づき土壌試料を選定した。「車道舗装 50 型」は東京都中央区における呼称であり，地域により「車道アスコン 50 型」等別名称の場合がある。

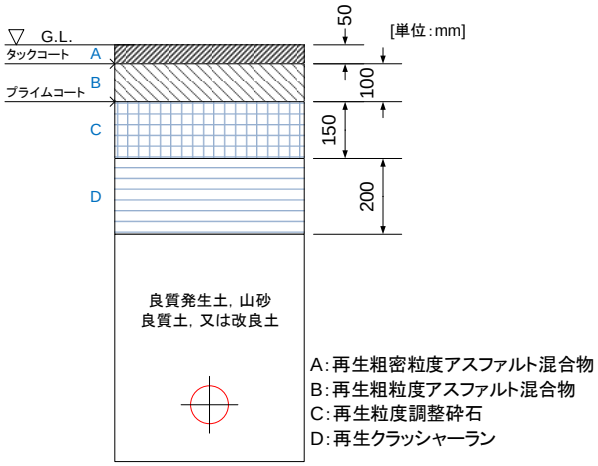

図 2　「車道舗装 50 型」の構造

図 2 に示したとおり，「車道舗装 50 型」舗装は路床上に再生砕石である再生クラッシャーランを用いた 200mm の下層路盤，その上に再生粒度調整砕石を用いた 150mm の上層路盤，路盤上に再生粗粒度アスファルト混合物を用いた 100mm の基層と，再生密粒度アスファルト混合物を用いた 50mm の表層により構成される。

本報告においては，それぞれの土壌の基本的なパラメータを確認するために，代表的な土壌試料として，路床は一般的な埋設土である真砂土を，砕石層は JIS 規格で定められた骨材粒度分布を満たす再生粒度調整砕石（RM-30:Recycled Mechanically Stabilized Crushed Stone）を，アスファルト層は表層の舗装に一般的に用いられる密粒度アスファルト混合物（13）を，それぞれ試料として用いて，特性を評価した。

また，土壌の転圧状態，即ち締固め度は，現場における土の乾燥密度を突固め試験から得られた最大乾燥密度で除して得られる数値により評価されるため，本報告における転圧状態は乾燥密度の値により議論する。

透気係数および拡散係数の導出に用いる乾燥密度，含水比などの基本物性は，表 1 に示す JIS 規格に定められた各種試験により特定した。試験

項目(b)により得られる含水比（または含水率）と，試験項目(e)により得られる密度のうちの湿潤密度は，土壌に含まれる水分量に依存するパラメータであるため時間経過により変化する。

本報告における透気係数および拡散係数の計測試験は比較的短時間の計測ではあるが，これらの時間変化の実験結果への影響を考慮する必要がある。ここでは，比較的含水比の低い真砂土を用いることにより，実験中における土壌の状態変化を抑える[14)]。

表 1　土壌の基本物性計測の試験項目

試験項目	試験方法
(a)土粒子の密度試験	JIS A 1202
(b)土の含水比試験	JIS A 1203
(c)土の粒度試験	JIS A 1204
(d)土の突固め試験	JIS A 1210
(e)現場密度試験	JIS A 1214

3.3 土壌試料の製作

本報告では，実現場の土壌を現地で計測するのではなく，試料として土壌を採取し，実験室内に構築した透気係数・拡散係数計測装置によって計測を行っている。計測にあたっては，まず，透気・係数拡散係数計測手法の妥当性を評価するための比較対象として，含水比や密度等の条件変化がほぼ無視できる理想状態の土壌の模擬試料としてガラスビーズを用いて基礎試験を行った後，地盤各層の試料の計測を行った。特に，真砂土層に関しては，水分量や転圧状態の変化が計測結果に大きな影響を与えるため，本研究では，各計測試験において，同じ含水比，密度になるように調整して計測容器に充填した。

ガラスビーズは中心粒径φ1200μm（ユニチカ社製 UB-2022LN），φ512μm（不二製作所社製 FGB-35）の 2 種の粒径のものを用いた。ガラスビーズの比重は 2 種共 2.5（メーカ公表値：実験により検証済）である。

アスファルト混合物に関しては，アスファルト舗装の有無とその厚みがガス拡散挙動に及ぼす影響を明らかにするため，施工後φ100mm の円筒形にコア抜きした後，厚さ 10，25，50，100，150mm にカットし，試料とした。用いたアスファルトコアの外観を図 3 に示す。

図 3　アスファルトコアの外観
（左から，厚さ 10，25，50，100mm）

土壌試料を充填する容器として，真砂土および砕石に関しては高さ 200mm，内径φ100mm のアクリル容器を用い，定めたパラメータで充填した。

アスファルトコアは内径φ120mm のアクリル製円筒形容器に固定し，厚み違いのアスファルトコアを固定するため，各アスファルトコアと同じ厚さの容器をそれぞれ用いた。アスファルトコアに関してはコア採取の施工誤差を考慮し，10mm のクリアランスをとった容器を用いているが，アスファルトコア側面と容器の間から回り込んだ水素，および酸素が，実験に影響を与えることを考慮し，コア側面をブチルゴム系テープにて気密処理した後，変性シリコンコーキング剤および，バックアップ材により隙間を充填することでガスの回り込みを阻止し，固定した。

また，これらは，透気係数および拡散係数の計測装置それぞれと接続が可能であり，土壌試料おとアスファルトの状態を変化させることなく透気係数および拡散係数を計測することが可能である。固定後の土壌試料の外観を図 4 に示す。

図 4　アクリル容器固定後の土壌試料
（厚さ　左：10，右：25，上：100mm）

4 透気係数計測手法の開発

4.1 透気係数計測装置の開発

開発した透気係数計測装置の構成を図 5 に，外観を図 6 に示す。

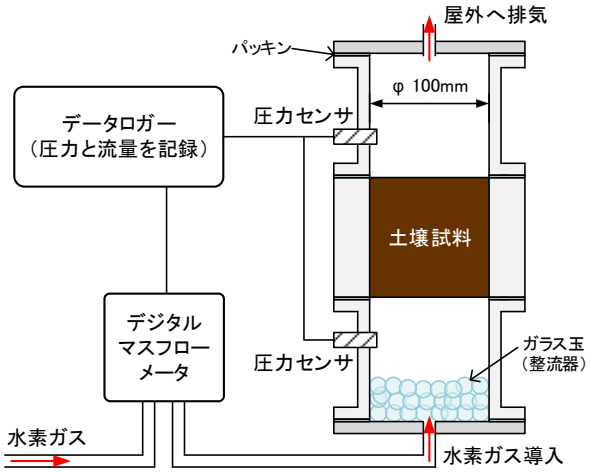

図 5　透気係数計測装置の構成

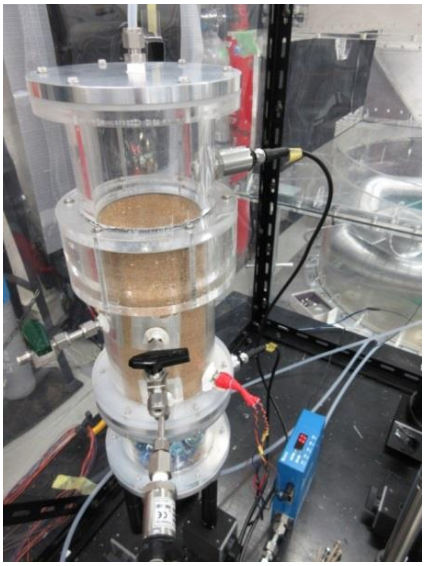

図 6　透気係数計測装置の外観（真砂土計測時）

透気係数計測装置は，3.3 節で製作した土壌試料を，2 つの円筒形アクリル容器で上下から挟み込む構造となっている。容器の接続部は，真空グリスを塗布したパッキンで気密し，下方のガス導入側の容器には，ガスの流れを分散させる整流器としてガラス玉（ビー玉）を充填した。試料が真砂土の場合には，試料下面にパンチングメッシュを取り付けて保持した。

開発段階では，試料下面に直接ガスを導入する構成の装置を製作し，計測を行ったが，ガスが土壌試料内を拡散し試料断面全体に広がるまでに一定の距離を必要とするため，本来試料の長さによらない透気係数が試料長に依存する結果となった。そのため，試料の上下に空間を設けることで，試料断面全体にガスを導入できる構成とした[15]。

計測の際には，デジタルマスフローメータ（KOFLOCK 社製 /8500MM-0-2-1/20SLM）で導入ガスの流量を，上下の容器に取り付けた圧力センサ（長野計器社製/KP-15-17G）によって入口圧（下部容器内の圧力）と出口圧（上部容器内の圧力）を測定する。計測したデータは，データロガー（GRAPHTEC 社製/ Midi LOGGER GL820）で記録し，PC 上で解析を行った。

4.2 透気係数計測手順

本研究では，水素ガスを対象として，土壌試料の透気係数計測実験を行った。実験は，安全性を考慮し，ドラフト装置の下で換気しながら行った。計測では，ガスの供給圧力を 3 段階程度変化させ，ガス流量，入口圧，出口圧の測定を行う。真砂土を試料とした場合の透気係数計測データの事例を図 7 に示す。

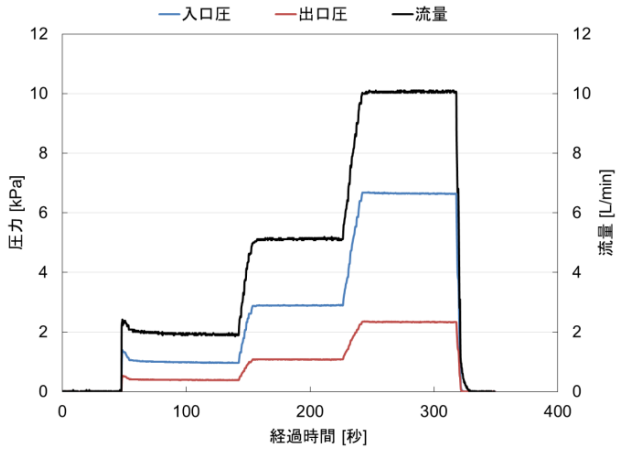

図 7　透気係数計測の計測結果事例

図 7 の計測例では，ガスの流量が 2, 5, 10 L/min となるようにガス供給圧を調整し，透気係数の計測を行っている。一定時間経過して流量が安定した時点での差圧（入口圧－出口圧）およびガス流量を測定値とし，式(2.1)に従って透気係数を計算する。最後に各流量における透気係数を平均し，その試料の透気係数とした。

4.3 計測方法の妥当性評価

透気係数は，土壌の物性によって定まる係数であり，同一の試料かつ同一の状態であれば，試料長や試料径によらず一定の値となるはずである。真砂土および砕石を試料とした場合には，含水比や転圧状態の変化により透気係数が大きく変化するため，計測装置自体の測定精度を評価するのが難しい。そのため，本装置による透気係数計測の妥当性評価を目的として，状態変化の影響のないガラスビーズ（φ1200μm）を使って基礎試験を実施した。結果を図 8 に示す。

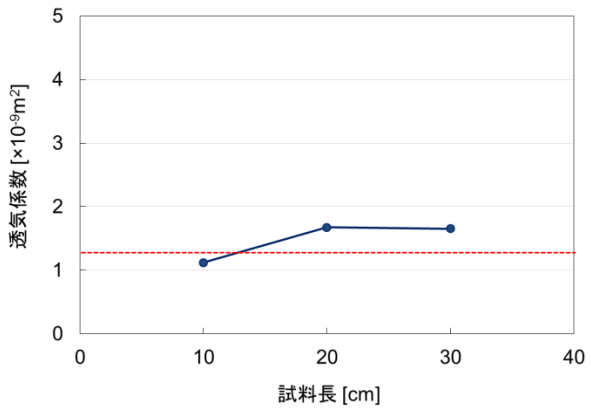

図 8　透気係数計測結果（ビーズφ1200μm）

図 8 の赤点線は，理論式[16]を基に計算したガラスビーズ（φ1200μm）の透気係数の理論値（1.282 $\times 10^{-9}$m^2）である。計測結果は，約 1～2$\times 10^{-9}$m^2 付近に分布しており，オーダーとしては理論値に近い計測結果が得られている。一般に，透気係数は試料によって指数関数的に増減する値であるため，理論値近傍の計測値が得られたことをもって，本装置による透気係数計測方法は妥当であると判断した。結果に若干の測定誤差がみられるのは，真砂土やアスファルトを試料とすることを想定して装置を製作したため，差圧の小さくなるガラスビーズの計測においては，計測機器の分解能が十分でないことが原因であると考えられる。また，測定結果に試料長に対する依存性は見られず，複数回測定を行っても概ね 1～2$\times 10^{-9}$m^2 程度の範囲に計測値が収まることを確認した。

5 拡散係数計測手法の開発

本節では，土壌試料の拡散係数の計測について述べる。計測装置および拡散係数の算出方法については，遅沢省子氏「土壌中のガスの拡散測定法とその土壌診断やガス動態解析への応用」[17]，川本健氏　他「Gas Transport Parameters in the Vadose Zone : Gas Diffusivity in Field and Lysimeter Soil Profiles」[18]他[19][20][21]を参考に実施した。

5.1 拡散係数計測装置の開発

装置は遅沢式拡散係数計測装置を参考にして開発し，前述のとおり，透気係数および拡散係数を土壌試料の状態を変化させることなく計測することが可能である。拡散係数計測装置の構成を図 9 に，外観を図 10 に示す。

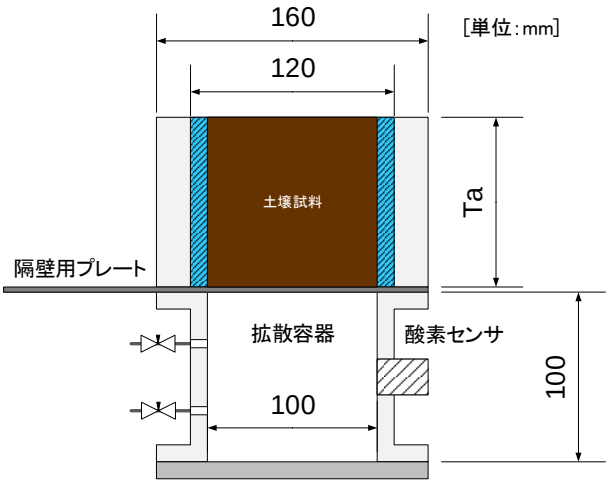

図 9　拡散係数計測装置の構成

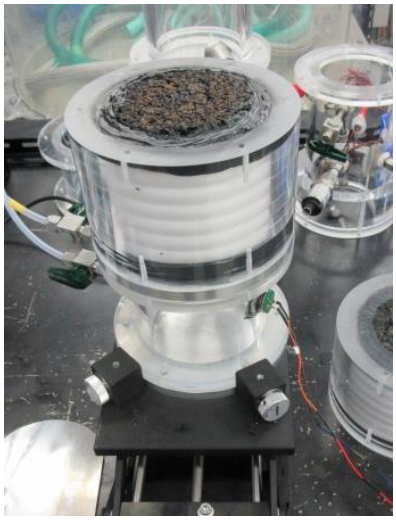

図 10　拡散係数計測装置の外観

装置は窒素で置換した拡散容器と試料容器を接続し，拡散容器内にて，試料を透過し拡散する酸素濃度を計測する構造とした。アクリル製の試料容器部，拡散容器部，およびそれぞれの容器を遮断する隔壁用プレートからなり，隔壁用プレートを引き抜くことにより遮断されている試料容器と拡散容器内の空間を一体化させる。各試料容器は 3.3 節で述べた仕様である。底部には土壌試料の落下防止のパンチングメッシュを敷設し，リング状のステンレス金具によって固定した。拡散容器の内径はアスファルトコアと同径のφ100mm であり，気密性を高めるための真空グリスを接触面に塗布後，試料容器および拡散容器の間に隔壁用プレートを挟み，それぞれの容器内の空間を隔絶した状態でボルトにより固定した。

拡散容器には酸素ガスセンサと窒素置換用パージラインを設置した。窒素流出側にはバルブの操作時間を確保し，拡散容器への大気からの酸素の逆流を遅延させるため約 5m の配管を接続した。酸素濃度センサには光明理化学工業製 OC-6B（φ2.0×2.08cm）を用いた。この計器はガルバニ電池式の酸素ガスセンサであり，計測範囲 0～100%，90%応答が 10 秒以内である。計測したデータは，データロガー（GRAPHTEC 社製/ Midi LOGGER GL820）にて記録した。

拡散係数の決定において，拡散係数は装置の試料長や，容器径，容器の形状に依存しないが，装置の気密性が低い場合，土壌試料以外の場所から生じる恐れがある。これによる気流の発生により，酸素センサの濃度の読みにばらつきが生じ，流入による酸素濃度の上昇値も併せて計測され，正しい濃度の上昇値を得られないため，装置の気密性には十分留意する必要がある。

また隔壁用プレートの引抜き時に空気の流入が考えられる。本装置は大気との相互拡散を計測するものであり，酸素濃度の変化量は最大で 21%である。拡散容器の体積に対し，引抜き時の酸素の流入量が多いと，拡散容器内の酸素の濃度変化範囲が減ってしまい，十分な点数のデータを得る前に濃度変化が落ち着いてしまう恐れがあるため，隔壁用プレートの引抜き操作にも十分留意する必要がある。

5.2 拡散係数の計測手順

拡散係数の計測手順を以下に示す。

① 試料を試料容器に充填する。
② 真空グリスを塗布した試料容器と拡散容器を，隔壁用プレートを容器間に挿入した状態で接続し，それぞれの容器を離隔する。
③ 拡散容器内に窒素ガスを気流が立たない程度に流入させ，酸素ガス濃度が 0%になるまで緩やかに置換する。
④ 酸素ガス濃度が 0%となったことを確認後，拡散容器内圧と大気圧との間に差圧が発生することを防ぐため，流出側を大気解放した状態に，窒素流入側のパージラインを閉じ，その後，流出側の順にパージラインのバルブを閉じる。
⑤ 置換後，酸素濃度の指示値のぶれが落ち着くまで待つ。
⑥ 容器内の気流が落ち着いた後，隔壁用プレートを引抜き，試料を通過して拡散する酸素を拡散容器に接続したセンサで計測する。
⑦ 酸素センサの濃度値が大気中の酸素濃度まで到達した時点，若しくは，解析に十分な点数のデータが取得できた時点で計測を終了する。

5.3 計測方法の妥当性評価

本計測手法の妥当性を評価するために，中心粒径φ1200 μm，φ512 μm のガラスビーズを土壌試料として拡散係数の計測を行った。大気中の酸素を計測して，2.2 節で述べた手法により水素の拡散係数を得る。試料容器長は 150mm，試料の空隙率は 0.39 とし，複数回同じ条件の計測を行うことで，実験装置の再現性を確認した。図 11 にφ1200 μm のガラスビーズを試料とし同試料に対し 4 回計測した拡散係数計測における酸素濃度の経時変化事例を示す。また，図 12 に図 11 にて得られたφ1200 μm③のデータを用いて実施した酸素濃度変化量の直線回帰事例を，表 2，表 3 に拡散係数計測結果をそれぞれ示す。

図 11 に示すとおり，拡散係数の計測では，土壌試料と拡散容器が接続された瞬間から，拡散容器における酸素濃度の経時変化データが得られるが，計測開始最初期は隔壁用プレートの引き抜きによる拡散容器内への空気の流入が起こるため，正確

な酸素濃度の上昇値を得ることが難しい。そのため，計測開始最初期のデータは除外して酸素濃度の上昇を評価する。また，拡散容器中の酸素濃度が大気中の酸素濃度まで到達した場合は，到達直前以降のデータも併せて除外する。

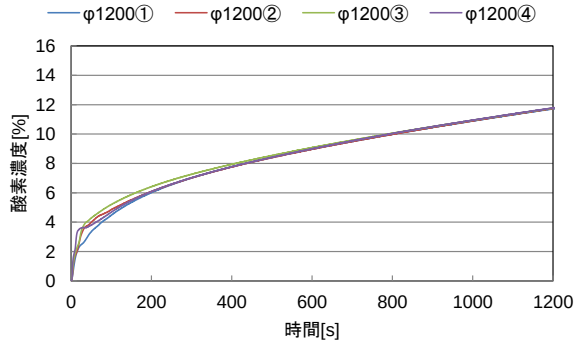

図 11　酸素濃度の経時変化事例
（ビーズ中心粒径 φ 1200μm，試行回数 4 回）

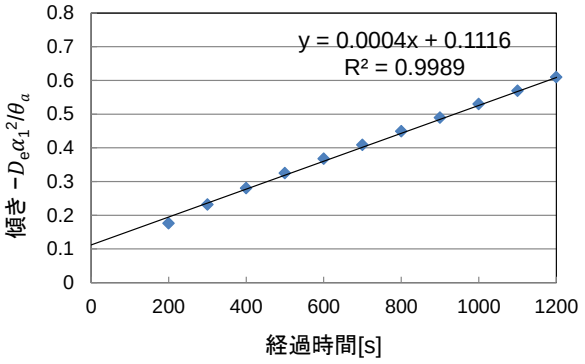

図 12　酸素濃度変化量の直線回帰事例
（ビーズ中心粒径 φ 1200μm, 試料容器長 150mm）

次に，図 12 に示すとおり，得られた酸素濃度のデータから，ある 2 点の時間における酸素濃度の変化量をプロットし直線回帰を行い，その直線の勾配を求める。勾配を求めるに当たり，前述の除外するデータ範囲を除いた状態で近似曲線を求める。直線回帰により求めた勾配と，試料容器の長さL_S，拡散容器の長さL_A，試料の空隙率θ_aから，式(5.3)を用いて計算定数α_1を算出する。酸素の拡散係数$D_e(O_2)$は，得られた計算定数α_1と式(5.5)を用いて求めることが可能となる。算出した酸素の拡散係数と標準状態における自由大気中の酸素の拡散係数$D_0(O_2)$から試料の相互拡散係数D_e/D_0を算出し，相互拡散係数と自由大気中の水素の拡散係数$D_0(H_2)$より，対象の試料における水素の拡散係数$D_e(H_2)$を導出する。計算定数α_1は，陽解的に求めることができないため，収束計算を行って導出する。

表 2 に示すとおり，中心粒径 φ 1200μm のガラスビーズを用いた複数回の計測結果について良好な再現性が得られている。変動係数は 0.0168 であった。

表 2　拡散係数計測の再現性確認試験結果
（ビーズ中心粒径 φ 1200μm, 試料容器長 150mm）

試行回数	D_e/D_0	$D_e(H_2)$ [m^2/s]
1	0.3986	2.8304E-05
2	0.3853	2.7354E-05
3	0.3924	2.7860E-05
4	0.3996	2.8373E-05

表 3　拡散係数計測の再現性確認試験結果
（ビーズ中心粒径 φ 512μm，試料容器長 150mm）

試行回数	D_e/D_0	$D_e(H_2)$ [m^2/s]
1	0.3607	2.5610E-05
2	0.3401	2.4145E-05
3	0.3540	2.5135E-05
4	0.3491	2.4785E-05

表 3 に示すとおり，中心粒径 φ 512μm のガラスビーズを用いた複数回の計測結果について良好な再現性が得られている。変動係数は 0.0247 であった。拡散係数は理論的には土壌試料の空隙率にのみ依存する値であり，ガラスビーズの中心粒径が変化しても空隙率が等しい場合同じ値を示すため，中心粒径 φ 1200μm および φ 512μm の計測結果は概ね一致している。

次に，中心粒径 φ 1200μm のガラスビーズを用いて，拡散係数の試料容器長依存性を確認した。試料容器長は 50，100，150，300mm とし，試料容器内の空隙率は 0.39 とした。実験結果を表 4 に示す。

実験結果から計測方法の妥当性を考える上で，まず，土壌中の気体の拡散に係る研究において，これまでに提案されている主な実験式・半理論式の事例を表 5，表 6 に，気相率による拡散係数モデルの推移を図 13 に示す。ここでDは拡散係数，D/D_0は相互拡散係数，V_aは気相率（空隙率）を示す。土壌試料としてガラスビーズを用いているため，ここでは含水比，土壌状態は考慮していない。

表 4　拡散係数計測の試料長依存性確認試験結果（ビーズ中心粒径 φ 1200μm）

試料長 [mm]	D_e/D_0	$D_e(H_2)$ [m²/s]
50	0.3939	2.7966E-05
100	0.3829	2.7182E-05
150	0.3986	2.8304E-05
300	0.4012	2.8482E-05

表 5　拡散係数の実験式・半理論式の事例 [22)]

文献筆頭著者	発表年	相関関係
Penman	1940	Linear
Van Bavel	1952	Linear
Wesseling	1962	Linear
Buckingham	1904	Nonlinear
Marshall	1959	Nonlinear
Millington and Qurik (MQ)	1960	Nonlinear

表 6　半理論式による気相率 0.39 時の拡散係数計算結果事例 [23)]

拡散係数モデル	関係式	D/D_0
Penman	$D/D_0 = 0.66V_a$	0.257
Van Bavel	$D/D_0 = 0.61V_a$	0.238
Wesseling	$D/D_0 = 0.9V_a - 0.1$	0.251
Buckingham	$D/D_0 = V_a^2$	0.152
Marshall	$D/D_0 = V_a^{\frac{3}{2}}$	0.244
MQ	$D/D_0 = V_a^{\frac{4}{3}}$	0.285

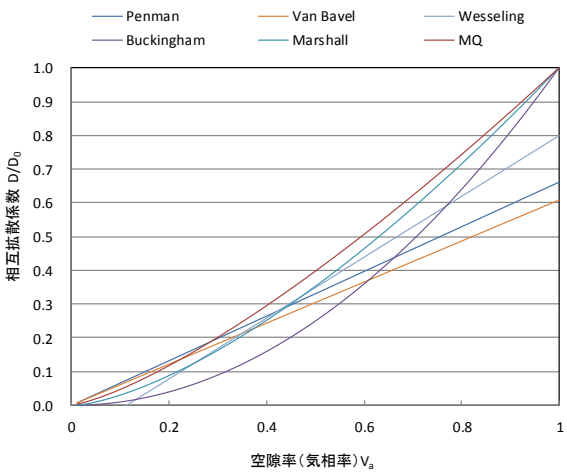

図 13　気相率による拡散係数モデルの推移

表 6 に示したとおり，拡散係数Dは気相率（空隙率）のみを変数とする関数として整理されている。実際の土壌では，液相（水分）の影響や気相孔隙の形状・分布など気相率以外の量的・質的なパラメータを考慮する必要性が指摘されているものの，様々な土壌について気体拡散計測例を蓄積するような研究は少ないのが現状である。仮に理想的な条件として，ガラスビーズ層を想定（粒径：一定値，液相なし，気相率（空隙率：0.39）して相互拡散係数を試算すると，最大値が 0.285，最小値が 0.152 となり，実験式・半理論式による相互拡散係数の推定結果は比較的広範囲に分布する。

土壌試料としてガラスビーズを用いて，拡散係数の解析モデルを用いた推算値と実験結果を比較した結果を図 14 に示す。ここでは，中心粒径 φ 512μm のガラスビーズを用いて実験を行い，空隙率は 0.39 とした。メーカ公表のガラスビーズの比重を用いて，実験においても正確に空隙率を再現した。

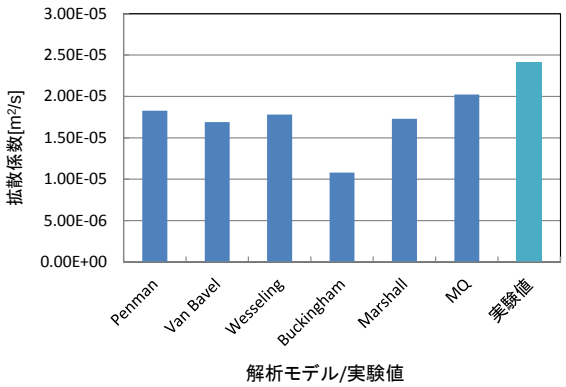

図 14　拡散係数の解析モデルを用いた推算値と実験結果の比較

図 14 に示したとおり，実験結果はいずれの推算値よりもやや大きい値（2.41×10^{-5}m²/s）を示した。また，再現性評価試験により確認した拡散係数計測装置の計測結果のばらつきは±7%であり，これらを加味し，それぞれの推算値同士のばらつきと比較しても，実験結果は推算値との大幅な差異はないと言える（最大+20%程度）。

従って，いずれの拡散係数の解析モデルと比較するかにもよるが，本手法による実測値を用いることにより大幅な拡散挙動の違いは生じないものと考えられる。

6 計測結果と考察

6.1 透気係数計測結果および考察

真砂土の透気係数は，試料の締固め具合によって大きく変化する。締固め易さは，土壌の水分量（含水比＝水分量/乾燥質量 で表す）により変化するため，含水比を変化させた真砂土を計測容器に転圧しながら充填することにより，密度の異なる土壌試料を用意し，透気係数を計測して比較を行った。計測結果を表 7 に示す。

表 7　真砂土の透気係数

含水比[%]	乾燥密度 [g/cm^3]	透気係数 [×10^{-12}m^2]
3.1	1.74	58.3
6.2	1.79	52.9
10.0	1.91	9.84
12.4	1.92	0.667

表 7 中の乾燥密度は，土壌の水分を除く単位体積あたりの質量で定義され，土の締固め具合の指標として一般的に用いられる量である [24]。

更に，空隙率（土壌のうち固相を除く気相と液相の割合）で結果を整理する。乾燥密度をρ_b，土粒子密度（土の粒子自体の密度）をρ_sとおくと，空隙率φは，式(6.1)で表される。

$$\varphi = 1 - \frac{\rho_b}{\rho_s} \quad (6.1)$$

表 1 に示した JIS 試験によって求めた真砂土の土粒子密度は，2.657 g/cm^3 であった。これと表 7 の乾燥密度をもとに計算した空隙率を横軸とし，縦軸に真砂土の透気係数を対数表示で整理したグラフを図 15 に示す。

一般に，透気係数Kと空隙率φには，α，βを定数として，式(6.2)の関係が成り立つとされる [25]。

$$\log K = \alpha \cdot \varphi + \beta \quad (6.2)$$

この関係は片対数グラフにおいて直線となる関係であるが，φのある点においてα，βの値が変わり，折れ線となることが知られている。図 15 を見ると，空隙率φが 0.3 付近を変曲点として，2 本の直線上にのる結果となっており，定説に近い。

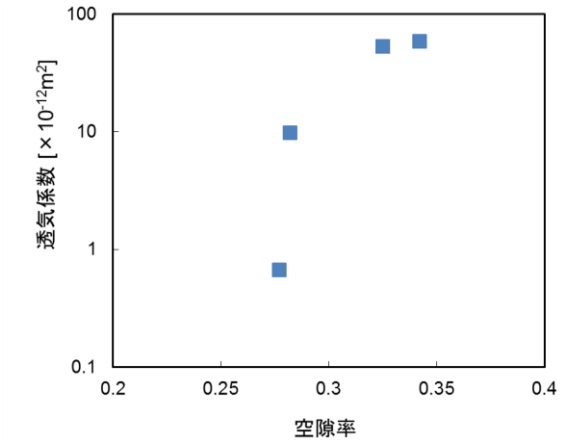

図 15　真砂土の透気係数（空隙率整理）

次に，一般的な道路構造において使用されている砕石層の透気係数計測を行った。砕石は 3.2 節で述べた粒度調整再生砕石 RM-30 を用いた。

計測の結果，砕石層の透気係数は，2.58×10^{-11}m^2 となった。土質試験により得られた砕石層の空隙率は 23.2%であり，これを真砂土の透気係数計測結果と比較して表示すると，図 16 のようになる。

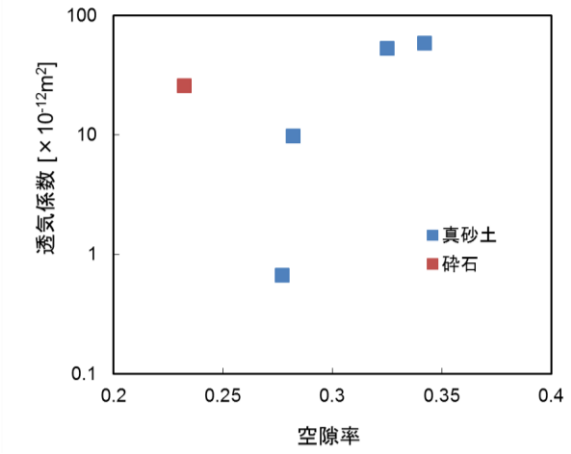

図 16　砕石層の透気係数（真砂土との比較）

真砂土と比較すると，砕石層は，空隙率が低いにも関わらず，透気係数が高い結果となった。これは，砕石層には真砂土と比較して大径の粒子が多く含まれているためであり，同じ空隙率であっても粒子間に空間ができやすく，ガスが透過しやすい構造になりやすいことを考えれば，妥当な計測結果であると考えられる。

続いて，アスファルトを試料として，透気係数計測試験を行った結果を図 17 に示す。

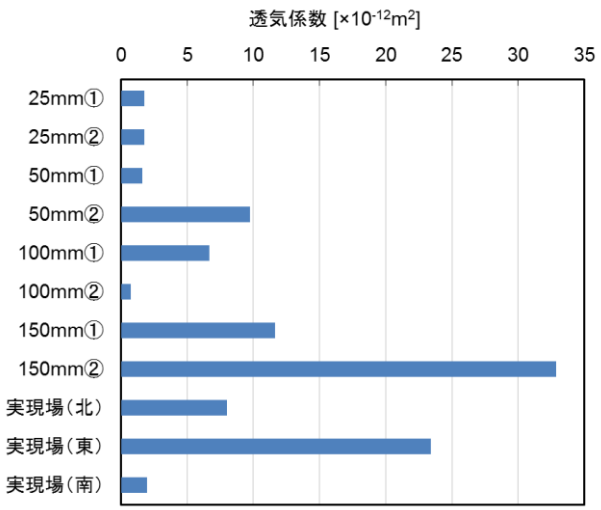

図 17　アスファルト透気係数計測結果

厚さ 25，50，100，150 mm のアスファルトは，3.4 節で示した方法で各厚さにつき 2 個製作し計測した。試料名が実現場（北），（東），（南）の試料は，大規模水素漏えい試験装置（直径 7m の円筒形）の表面に施工した厚さ 150mm のアスファルト層からコア抜きして製作した試料である。

図 17 から分かるとおり，アスファルトの透気係数は大きくばらつく結果となった。アスファルトを試験体とした場合には，ガスを透過させるためにガラスビーズや真砂土の場合と比較して高い供給圧が必要となるため，計測容器の気密性がより重要となる。容器の気密が十分ではなく，計測時に水素ガスが容器接続部等から漏えいした場合には，実際よりも透気係数が大きく算出される。そのため，計測容器の気密性を確認する作業を行ったが，リークが確認されなかった場合においても，試験体の違いによる透気係数の個体差はかなり大きかった。これは，アスファルト施工時の転圧が完全に均一ではないことや，アスファルト内部の空隙の配置によっては，ガスの流路ができてガスが流れやすくなる場合があること等が原因と考えられる。このように，アスファルトを試料とした場合には透気係数の個体差が大きいため，計測方法に工夫が必要になると考えられる。現場のアスファルト層全体としての透気係数をより正確に求めるためには，多数のサンプルを取って平均する方法や，現場に計測装置を設置して計測する（原位置透気係数計測）[25] などの方法が考えられる。

6.2　拡散係数計測結果および考察

図 10 に示した拡散係数計測装置を用い，大気中酸素の拡散係数を計測することにより，土壌試料の相互拡散係数および，水素の拡散係数を計測した。計測結果を表 8 に示す。ここで AS はアスファルト混合物を表し，括弧内の数値は試料の厚さを示す。

表 8　拡散係数計測結果

土壌試料	空隙率[%]	D_e/D_0	$D_e(H_2)$ [m^2/s]
真砂土 (200mm)	23.64	0.2250	1.5978E-05
砕石(200mm)	23.22	0.1336	9.4884E-06
AS(25mm)	6.90	0.0086	6.1304E-07
AS(100mm)	6.90	0.0080	5.6919E-07
AS(150mm)	6.90	0.0109	7.7537E-07

土壌の拡散挙動についてそれぞれの土壌試料の相互拡散係数にて考察すると，真砂土，砕石，アスファルトの順に値が小さい結果となった。真砂土と砕石の相互拡散係数はアスファルトに比べて 10 倍以上あり，アスファルト中のガスの濃度上昇勾配が真砂土・砕石と比較すると緩やかであるという結果となった。

アスファルトの厚みで比較をした場合，相互拡散係数はほぼ同じ値を示しており，表 6 に示したとおり試料長には依存しない空隙率のみを変数とする関数であるということが確認できた。

7.　まとめ

地中におけるガス漏えい・拡散の挙動を予測するために必要である透気係数と拡散係数の計測装置および計測手法を開発し，一般的なアスファルト舗装の構成要素である真砂土，砕石，アスファルトの透気係数と拡散係数の計測を行い，各土壌試料のガス透気・拡散特性を確認した。

本成果が広く有効活用され，ガス導管の保守管理，検知等における安全性の向上に資することができれば幸いである。

[謝辞]

本研究開発は，経済産業省平成 28-30 年度水素導管供給システムの安全性評価事業の一環として行われたものであり，関係各位に感謝致します。

［参考文献］

1) 中山顕：“多孔質伝熱のモデリングの進展”，日本機械学会熱工学コンファレンス(2005)
2) 宮崎毅，西村拓：「土壌物理実験法」，東京大学出版会，pp.168-176 (2011)
3) 岡本英樹他：“地中での漏えいガスの拡散挙動に関する実証研究　数値シミュレーションモデルを用いた適用性検証”，安全工学，pp.38-46,(2009).
4) Kaviany, M., Principles of Heat Transfer in Porous Media, Springer (1991).
5) 濱本昌一郎，川本健　他：「境界条件が原位置通気係数の算出に用いられる形状係数に及ぼす影響」, 土木学会論文集 C, Vol.65, No.2, pp.579-586, (2009)
6) 濱田洋平 他：「遅沢式拡散係数測定装置を用いた草地土壌のガス拡散係数の測定」，筑波大学陸域環境研究センター報告，No.7，pp.71-86 (2006)
7) 日本化学会：「化学便覧　基礎編Ⅱ」，丸善
8) 海野将孝他：“土壌保水特性に基づくガス拡散係数の予測モデルの提案と検証”, 第 48 回土壌物理学会シンポジウム(2006)
9) 小谷昇他：「図解 土木講座 アスファルト混合物の知識」（改訂 3 版），技報堂出版株式会社 (2010)
10) (社)日本道路協会：「舗装設計施工指針（平成 18 年版）」
11) (社)日本道路協会：「舗装施工便覧（平成 18 年版）」
12) (社)日本道路協会：「舗装再生便覧（平成 16 年版）」
13) (社)日本アスファルト乳剤協会：「アスファルト乳剤の基礎と応用技術」平成 18 年版
14) 新家憲司：“土壌層に流体を圧送したとき発生する圧力（第 1 報）－水分を含む土壌に気体を流した場合－, 農業機械学会誌, Vol.41, No.4，pp.542-552 (2011)
15) 日比義彦他：“土壌の通気帯におけるガス成分の分散現象に関する室内実験”，土木学会論文集 G，Vol.63，No.1，pp.30-39(2007).
16) Kaviany, M.：“Principles of Heat Transfer in Porous Media”, Springer (1991)
17) 遅沢省子：「土壌中のガスの拡散測定法とその土壌診断やガス動態解析への応用」農環研報，15，pp.1-66 (1998)
18) K. Kawamoto, P. Moldrup, P. Schjonning, B. V. Iversen, D. E. Rolston, and T. Komatsu：“Gas Transport Parameters in the Vadose Zone：Gas Diffusivity in Field and Lysimeter Soil Profiles”, Published in Vadose Zone Journal, No.5, pp.1194-1204 (2006)
19) 赤木寛一 他：「ガスの土中での移動特性」，第 45 回地盤工学研究発表会，D-02，pp.867-868(2010)
20) MHK-工房　http://www.mhk-koubou.com/
21) Muhammad Naveed,et.al.,：”Gas Dispersion in Granular Porous Media under Air-Dry and Wet Conditions”, Soil Si.Am.J.Vol 76, pp.845-652 (2011)
22) 濱本昌一郎，西村　拓：“古典を読む R.J.Millington and J.P.Quirk 著「多孔質媒体中の物質移動」”，土壌の物理，No.128，PP.39-46(2014)
23) 大江修造：「物性推算法」，データブック出版社(2002)
24) Jury William A.他：「土壌物理学―土中の水・熱・ガス・化学物質移動の基礎と応用」
25) 長田昇：「土壌の通気性に関する実験的研究（Ⅰ）」, 農業土木学会研究別冊, 第 7 号(1963)