土木学会論文集 No. 638／III-49, 193-205, 1999. 12

土中ガスの調査・評価方法の開発

柳浦　良行[1]・友清　悟[2]

[1]正会員　工修　基礎地盤コンサルタンツ㈱（株）関西支社（〒550-0011 大阪府大坂市西区阿波座1-11-4）
[2]基礎地盤コンサルタンツ（株）関西支社（〒550-0011 大阪府大坂市西区阿波座1-11-4）

地盤より工事中に発生する土中ガスは，多くの場合，単独ガスではなく混合ガスとして発生するにも関わらずその採取・評価方法は確立されていない．本研究は，土中ガスの採取にＢＡＴシステム（スウェーデンのB. A. Torstenssonが開発したシステム）が有効であることを提案し，採取された非反応性土中ガスは相平衡および実測値より，その状態変化を各構成ガスに分けて簡易に定量評価できることを明らかにした．さらに，この状態変化は各ガス毎にモル分率が一定な条件の元の温度—圧力関係の平面上で表現できることも見出し，地下工事に伴って発生する土中ガスを地盤の飽和・不飽和に関係なく従来より精度良く予測することが可能になった．

Key Words *: oxygen deficient air, dissolved gas, soil gas, phase equilibrium, underground work, environmental geotechnics*

1．はじめに

近年の地下工事は，多様化する種々の需要に答えるべく大規模化し，かつ大深度に及ぶことが多くなってきている．これらの地下工事の際に懸念される問題として，①可燃性ガス（主としてメタン），②酸素欠乏空気，③毒性ガス（硫化水素，二酸化炭素）等の土中ガスがある．土中ガスによる事故は毎年発生しており，可燃性ガスによる爆発事故，酸欠空気による酸欠事故，毒性ガスによる中毒事故，これらの事故は一度発生すると，人命をも奪ってしまう大変危険な事故になる可能性が高い．

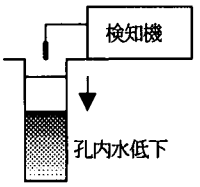
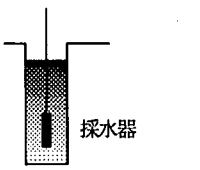
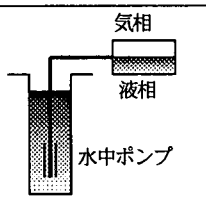
このような土中ガスによる事故を未然に防ぐには，工事中の監視・注意とともに，工事に先立つ事前土質調査において，土中ガスの有無，その種類，工事を実施した場合の湧出状況（位置，湧出量等）を的確に把握し，必要な安全対策工を講じることも重要である．

この土中ガスの事前調査は主にボーリング孔を利用して行われており，孔内水低下時の孔内ガス濃度測定法，孔内水採取法および気液分離法等の多種多様な方法が用いられており，採取ガス毎に法的許容値をあてはめて評価している．しかし，実際に採取されるガスは単独ガスではなく，数種類のガスを含んだ混合ガスとして採取されることが多く，測定時は良いとしても工事中のように状態が変化した場合，単純に溶解度の異なる個々のガスを独立した単独ガスとして取扱い評価することは問題があると考えられる．飽和土での土中ガスは地下水中に溶存ガスとして，不飽和土での土中ガスは地下水中の溶存ガスとともに空隙中に土壌ガスとして存在しているが，これらのガスの存在状態を含め，土中ガスを総合的に評価する方法は明らかにされていない．また，従来の調査方法では，調査ボーリングなどによるガス採取作業時に土壌ガスの一部が土中から放出されてしまい，精度的にも問題がある．

土中ガス採取に関する問題点を解決する方法として，B. A. Torstenssonの開発したＢＡＴシステム[1]が有効であると考えられる．ＢＡＴシステムは，地下水モニタリングシステムとして，地下水採取，間隙水圧測定および透水試験を目的として開発されたものであり，B. A. Torstenssonはガス採取の可能性も示唆している．柳浦[2]らはこのシステムをメタンガス採取に具体的に応用し，精度良く採取・分析できることを示し，ヘンリーの法則を用いてメタンガスの存在状態を判定している．しかし，柳浦らの提案する方法は，土中ガスとしてメタンガスを単独ガスとして取り扱っていること，地盤の飽和，不飽和の区分が明確でないことなどの問題点がある．

本論文では，第一にＢＡＴシステムをメタンガス以外の土中ガス採取に拡張して飽和土，不飽和土の土中ガスが採取分析できることを示した．第二に熱力学の相平衡と希薄溶液論を用いて飽和土，不飽和土中の非反応性の

表-1 従来の代表的土中ガス調査法

調査法	概要図	測定法の概要	採取・評価の限界		
			定性的	定量的	
			ガスの有無の判定	地下水中の溶存ガスの確認	空隙中の土壌・発生ガスの確認
孔内ガス濃度測定法		観測孔内の水位を降下させた後，孔口で地下水から圧力低下に伴い生じた発生ガスの濃度をガス検知機を用いて測定する方法であり，土中ガス調査でもっとも簡単かつ安価な方法である.	可能	不可能	測定できるが精度に問題あり
孔内水採取法		観測孔内の地下水を採取し，地下水の溶存ガス濃度を試験室内でガスクロマトグラフを用いて分析する方法である.	可能	測定できるが精度に問題あり	不可能
気液分離法		観測孔内に水中ポンプを設置し，地下水を揚水し地上でタンクに一時的に液相（地下水）と気相を溜めて採取し，それぞれガスクロマトグラフで分析する方法である.	可能	測定できるが精度に問題あり	測定できるが精度に問題あり

土中ガスを評価する方法を考案し，実測値との比較を行いながら実際問題への応用方法を提案した．その結果，土中ガスを構成する各ガスの溶解度は異なるにも関わらず，ある圧力・温度を超えると全てのガスが同時に地下水に溶解することを見出し，２相多成分系で一見複雑な土中ガスの状態変化を各ガス毎に２相２成分系に分けて簡易に評価できることを明らかにした．また，これらの土中ガスの状態変化は，各ガス毎にモル分率が一定な条件の元の温度―圧力関係の平面上で表現できることも見出し，溶存ガス，土壌ガスの状態変化メカニズムを明らかにすることにより，ＢＡＴシステムを用いて工事中に土中から発生するガスの量・濃度を従来より精度良く求めることが可能となった.

２．従来の調査法の問題点の整理

従来の土中ガス調査法の概要および採取・評価の限界を整理したものを表-1に示す.

(1) 採取における問題点

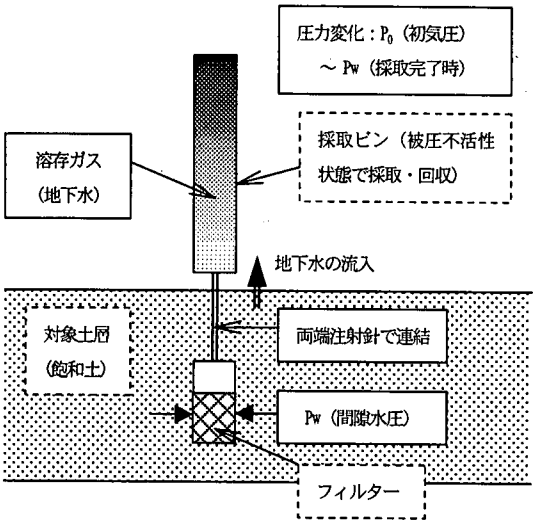
土中ガス採取における従来の調査法の問題点は柳浦ら[2]のメタンガス採取で示した問題点とほぼ同じである.

(2) 評価における問題点

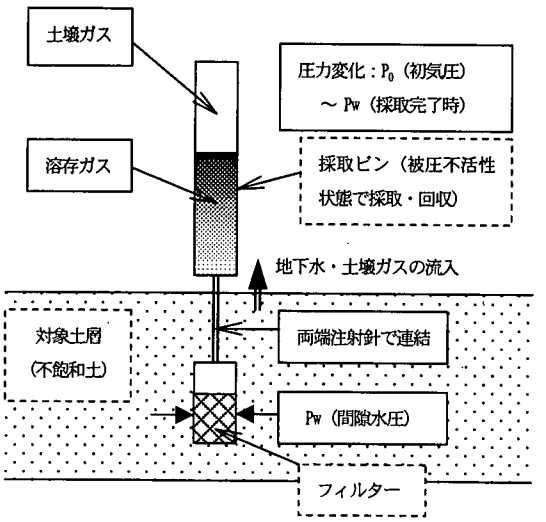
土中ガス評価における従来の調査法は柳浦ら[2]のメタンガスの土中での存在状態評価を含め以下のような問題点がある.

第一に従来は溶解度の異なる個々のガスを独立した単独ガスとして取り扱い，それぞれに法的許容値を当てはめて評価している．しかし，混合ガスとして採取される土中ガスの工事に伴う状態変化を単純に単独ガスとして評価して良い根拠がない.

第二に飽和土では土中ガスは地下水中に溶存ガスとして，不飽和土では地下水中の溶存ガスに加えて空隙中に土壌ガスとして存在しているが，これらの存在状態を考慮して土中ガスを総合的に評価する方法がない.

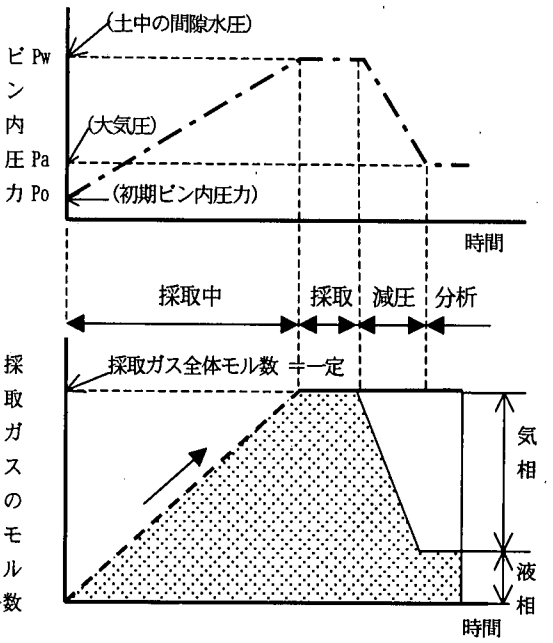


(a) 飽和土の場合

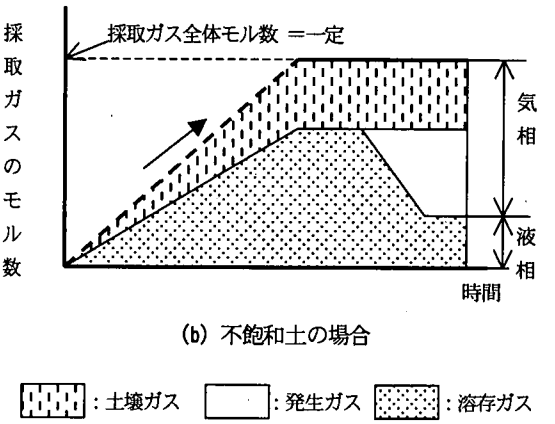


(b) 不飽和土の場合

図-1 土中ガス採取の原理
（文献2）図-3に加筆）



(a) 飽和土の場合



(b) 不飽和土の場合

：土壌ガス　：発生ガス　：溶存ガス

図-2 採取～分析におけるビン内の混合ガスのモル数の変化

3．土中ガス採取へのＢＡＴシステムの適用

著者らは，土中ガス採取時のガス放出を最小限にするには，従来のように採取深度までのボーリングおよび孔内洗浄による周辺地盤の水位低下を行うことなく，採取装置を直接採取深度まで押し込むことが必要と考え，土中メタンガス採取で従来の方法と比較して採取中のガス放出を最小限にできる柳浦ら[2]のＢＡＴシステムを土中ガス採取に拡張することを考案した．このＢＡＴシステムでは観測孔を設ける必要がなく，一般調査と平行して実施でき，１本のボーリング孔で多深度の調査が可能である．

(1) ＢＡＴシステムによる土中ガス採取の原理

ガス採取の原理としては図-1に示すように土中ガスは土中に設置されたフィルターを通して，地下水とともに採取ビン内に，採取ビン内圧力Poと地盤中の間隙水圧Pw

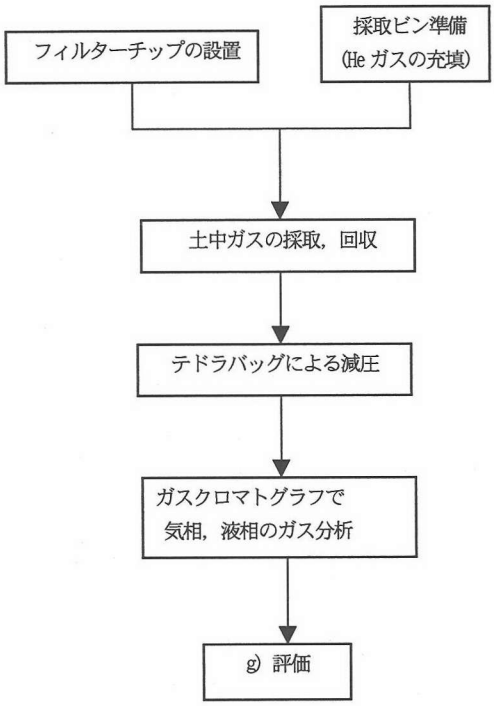


図-3　土中ガスの採取，分析および評価手順
（文献2）図-6に加筆）

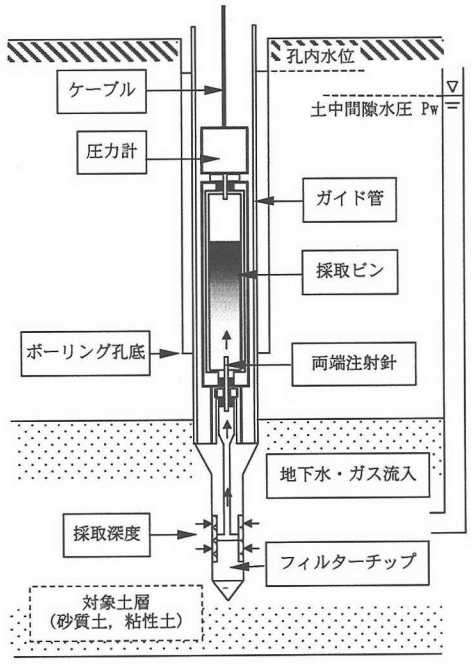


図-4 ＢＡＴシステムによる地盤中でのガス採取状況
（文献2）図-7に加筆）

との圧力差により大気と接すること無く採取され，最終的にはPoはPwと等しくなり原位置の圧力状態を保持したまま密閉状態で地上に回収され（被圧不活性状態），試験室で分析される．図-1(a)，(b)に示すように，採取時には，飽和土では溶存ガスが溶解した地下水か，不飽和土では，この地下水とともに土中空隙中の土壌ガスが採取される．

採取～分析までのビン内の圧力，採取ガスのモル数変化の概念を図-2に示す．採取後のガスの「分析」は採取時の圧力(Pw)と異なり大気圧(Pa)条件下で一般に行われるが，同図から判るように，ＢＡＴシステムでは採取ガス全体のモル数は変化しないが，ビン内の圧力の変化に応じて液相中の溶存ガス量，気相中の発生ガス量，土壌ガス量の割合が変化することが判る．

図中「採取中」においては，飽和土では地下水に含まれた溶存ガスが，不飽和土では，この地下水とともに土中空隙中の土壌ガスが採取ビン内に流入するが，その経時変化は明らかでない．しかし，土中の間隙水圧と平衡した「採取」の段階では，採取ビンと地盤が連続した状態で，採取ビン内は地下水あるいは土壌ガスで充満し，土中と採取ビン内の圧力・温度条件は同じであるため，土中と採取ビン内の溶存・土壌ガスの存在状態はほぼ等しいと考えられる．

ここで，溶存ガス，発生ガスおよび土壌ガスは以下のように定義する．

・溶存ガス：自然状態で地下水（液相）に溶存しているガス．
・発生ガス：上記のガスが建設工事等により人工的な圧力低下，温度上昇に伴い地下水（液相）から発生したガス．
・土壌ガス：自然状態で土中の空隙（気相部）に存在するガス．

従来の調査法は同図の「分析」の段階において，以下のように位置づけられよう．

・孔内ガス濃度測定法： 発生ガスが測定孔の孔口で薄まった濃度を測定していることに相当する．
・孔内水採取法：大気圧に相当する溶存ガス濃度を測定していることに相当する．
・気液分離法：採取圧力が不明であるため，飽和土で「溶存ガス＋発生ガス」，不飽和土で「溶存ガス＋土

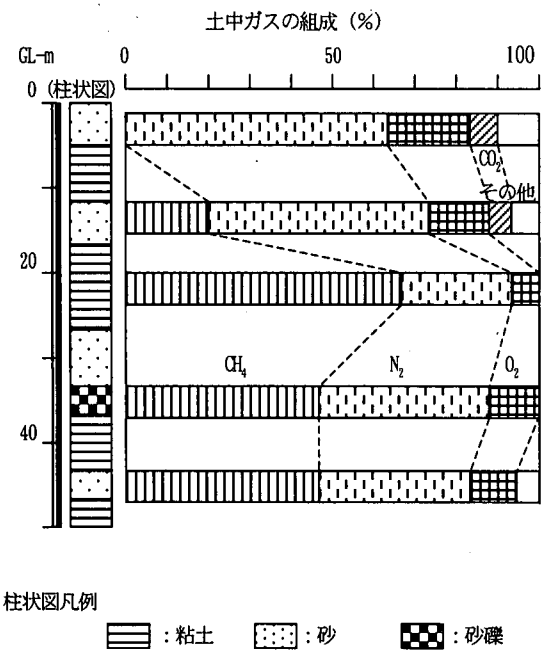


図-5 土中ガスの組成状況の測定例

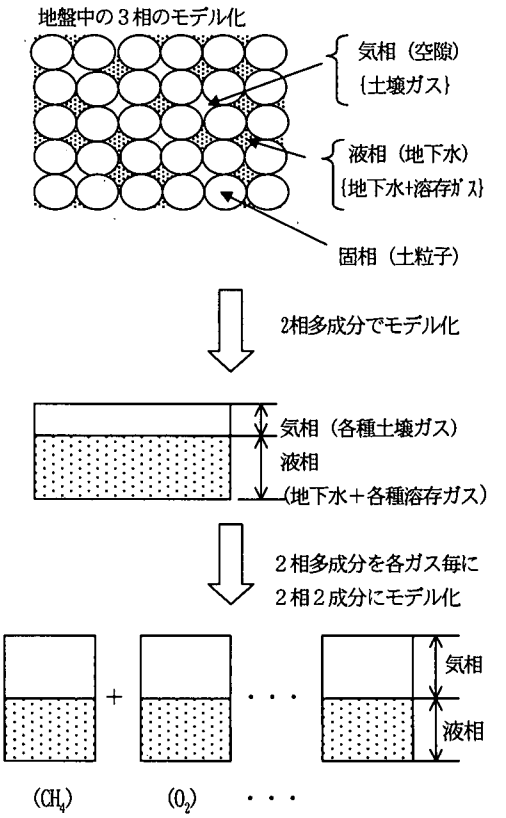


図-6 土中ガスのモデル化

壌ガス＋発生ガス」の概略濃度を測定していることに相当する.

(2) 採取・分析手順および評価

ＢＡＴシステムによる土中ガスの採取・分析および評価の流れを図-3に示す. 同図におけるガスの採取状況を図-4に示す. すなわち,「フィルターチップ+ガイド管」をボーリング孔底から採取深度まで押込んだ後, 採取ビンをガイド管内に降し, 両端注射針でフィルターと連結して, 土中ガスを採取し, 被圧不活性状態で地上に採取ビンが回収される. この時のフィルタは, 水で飽和され空気が流入しないようにして採取深度に設置した後, ガス採取前に採取ビンを用いて予めこのフィルタ内の水を回収した後, ガス採取を開始する.

柳浦らは[2], このＢＡＴシステムを用いて, 採取時にメタンガスの土中からボーリング孔内, 地表への漏出を最小限にできることを示した. ＢＡＴシステムを用いることにより, メタンガスと同時に採取される他の土中ガスについても同様な原理および後述する実測値の比較より, 採取時の漏出は最小限にできると考えられる. したがって, 土中ガスの採取～分析については柳浦[2]らの提案する方法と同様な方法で行うことができる.

この土中ガス採取の方法は, 基本的にR A Torstenssonの提案する地下水採取法と同じである. 柳浦らが, ガス採取において改良した主な点は以下の通りである[2].

第一に分析精度を向上させるため, 採取ビンの準備段階で採取ビン内の空気を単一成分のHeに置換し, 設定されたビン内の圧力Poよりその量を把握する. Heガスは空気中, 土中にほとんど存在せず, 水への溶解度が低い特徴を有する.

第二に被圧した状態で採取されるビン内圧力をガスクロ分析が可能な大気圧に減圧する時にガスの絶対量の変化をなくすため, テドラバッグを用いて減圧した.

しかし, 採取されたガスの評価において, 柳浦らはメタンガスを単独ガスとして評価している. 実際の調査では混合ガスとして採取されることが多いため, これらを総合的に評価する方法が必要となる.

(3) ＢＡＴシステムによる土中ガス採取例

図-5はＢＡＴシステムによる土中ガスの東大阪市内での採取・分析例である. 各地層毎で土中ガスが単独で存在するのではなく, 混合した状態で存在していることが判る. 図中のガスは, 全て有害ガスではないが, 有害ガス以外のガスも後述するように評価する上で重要となる.

対象地盤は発生源（例えば有機物）の分解が進んだ自然堆積地盤であるため, 採取時と工事中の間でガスの地盤中での濃度変化は, ほとんど無いと考えられる.

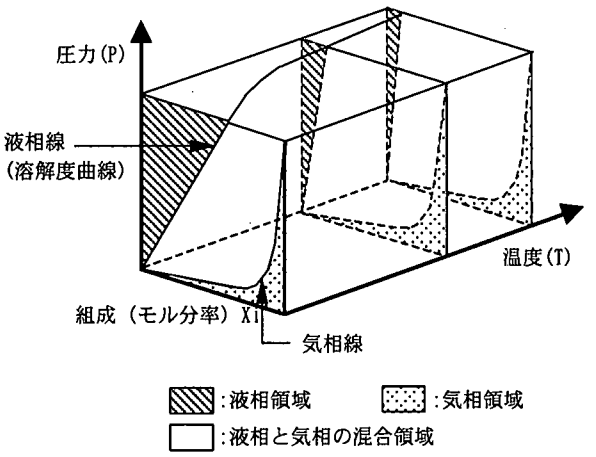


図-7　2相2成分系の気液平衡図

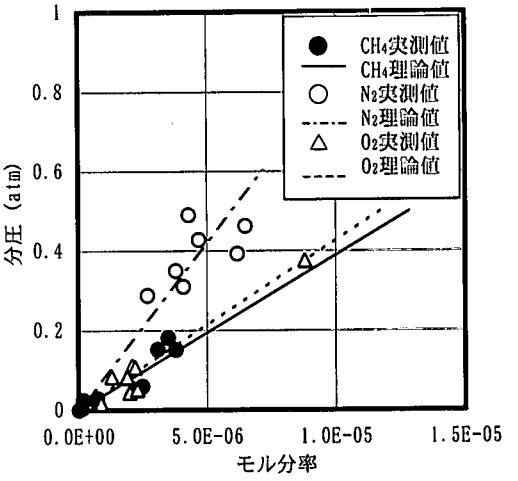


図-8 各ガスの分圧とモル分率の関係

4．熱力学の土中ガス評価への適用

(1) 土中ガスと相平衡

地盤は固相（土粒子），液相（地下水）および気相（空隙）の3相からなり，土中ガスは図-6に示すように基本的に土中の液相（地下水）に溶存ガスとして溶解していることが多く，地下水が土中ガスの溶解能力を越えた場合には気相（空隙）に土壌ガスとして存在するため，これらは2相多成分系でのモデル化が可能である．ただし，固相（土粒子）は，それ自体に透水・透気性が無いと考えその内部にガスの存在は無いものとした．

不飽和土では上述のように地下水中に溶存ガス，空隙中に土壌ガスが存在するが，飽和土では間隙が水で満たされ空隙がないため，地下水中の溶存ガスのみ存在する．

相平衡の詳細は熱力学の専門書に譲るが[3]，2相2成分系の気液平衡図は図-7にようになる．溶質（土中ガス）と溶媒（地下水）の蒸気圧に圧倒的な差（約10000倍）があり，溶媒は事実上液相のみに存在し，溶質は液相にきわめて微量存在するにすぎず，気体の溶解した飽和溶液は必然的に希薄溶液である[4]．したがって，土中ガスの気液平衡図における液相線を求めることは，気体（溶質）の地下水（溶媒）への溶解度曲線を得ることを意味している．

現在広く用いられる気体の溶解度を表現する方法には，Henry定数H_{12}を用いる方法があり，定義は以下の通りである．なお，成分を表す添字は1を溶質（気体），2を溶媒（地下水）とする．

Henry定数：H_{12}(atm/モル分率)

モル分率X_1が小さい時，気体分圧P_1(atm)に比例することを表すHenryの法則は

$$P_1 = H_{12} X_1 \qquad (1)$$

と与えられる．ここで，H_{12}はHenry定数と呼び，溶解度が大きいほど小さい値となる．溶質（気体）の溶媒（地下水）への溶解は，熱力学により温度，圧力の影響を受けることが知られている．

Henryの法則は非反応性のガス（例えばCH_4, O_2, N_2など）について成り立つため，反応性ガス（例えばCO_2, H_2Sなど）の適用にあたっては十分な注意が必要である[5]．したがって，本論文では図-5に示すように経験的に土中に存在する可能性高いCH_4, O_2, N_2などの非反応性ガスに限って議論する．

図-8にＢＡＴシステムを用いた実際の土中ガスの測定における各ガスの気相中での分圧と液相中での溶存ガスのモル分率の関係を溶解度曲線とあわせて示す．同図より，混合ガスであったとしても地下水への各ガスの溶解度は小さいため，各ガスの評価にはHenryの法則が適用可能であることが判る．

(2) 気液平衡図の土中ガスへの応用

土中ガスは前述したように2相多成分系であり，このままでは取り扱いが困難であるため，図-6に示すように各ガス毎に2相2成分の相平衡が扱えるなら便利が良い．そこで，飽和土で溶媒を水とした場合（温度一定条件）において，図-9に示すように各ガス毎（i=1～n）の気液平衡図を描き，式(2)のような仮定を置くと，式(3)を用いて式(4)のような関係が成り立つ．図-9において，液相線より上位の「液相領域」に土中ガスの圧力がある場合には，地盤は地下水中に溶存ガスのみ存在する飽和土

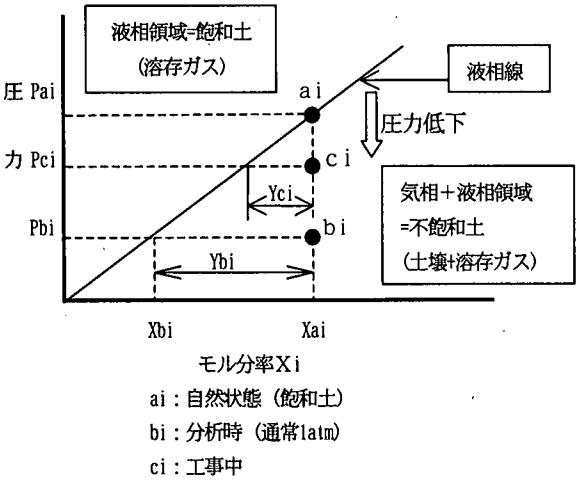


図-9 飽和土における2相2成分におけるガスi（i=1～n）の相平衡

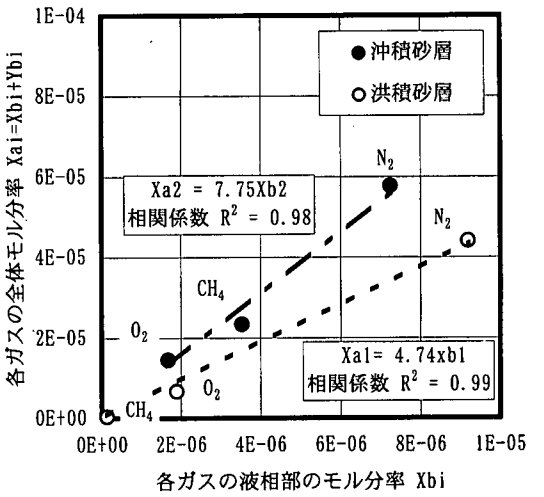


図-10 各ガスの分析時における(Xbi+Ybi)/Xbiの関係

である．一方，液相線より下位の「気相＋液相領域」に土中ガスの圧力がある場合には，地盤は土中の空隙に土壌ガスが，地下水中には溶存ガスが存在する不飽和土である．

式(4)の関係を実測値で整理したものを図-10に示すが，相関係数R^2=0.98と良い相関を示し，実務的には式(2)の仮定は問題無いと考えられる．不飽和土は，飽和土の圧力が低下した状態であり，式（2）の仮定は同様に成り立つと考えられる．

$$Pa1/Pb1=\cdot\cdot=Pan/Pbn=Pa/Pb \quad (2)$$

$$\left.\begin{array}{l} Pa1/Pb1=Xa1/Xb1=(Xb1+Yb1)/Xb1 \\ \cdot \\ \cdot \\ Pan/Pbn=Xan/Xbn=(Xbn+Ybn)/Xbn \end{array}\right\} \quad (3)$$

$$(Xb1+Yb1)/Xb1=\cdot\cdot=(Xbn+Ybn)/Xbn \quad (4)$$

$$Pa1+\cdot\cdot\cdot+Pan=Pa \quad (5)$$

$$Pb1+\cdot\cdot\cdot+Pbn=Pb \quad (6)$$

$$\left.\begin{array}{l} mc1=Yc1\times100/(Yc1+\cdot\cdot\cdot+Ycn) \\ \cdot \\ \cdot \\ mcn=Ycn\times100/(Yc1+\cdot\cdot\cdot+Ycn) \end{array}\right\} \quad (7)$$

ここで，Pa1，・・，Pan：各ガスの気相部が存在できなくなる限界圧力，Pa：混合ガス全体が気相部で存在できなくなる限界圧力，Pb1，・・，Pbn：各ガスの分析時の分圧，Pb:混合ガスの分析時の全圧力（通常1atm=Pb1+…Pbn），Pc1，・・，Pcn：各ガスの工事中の分圧，Xa1，・・，Xan：各ガス全体モル分率，Xb1，・・，Xbn：各ガスの分析時の液相部のモル分率，Yb1，・・，Ybn：各ガスの分析時の気相部のモル分率，Yc1，・・，Ycn：各ガスの工事中の気相部のモル分率，mc1，・・，mcn：各ガスの工事中の気相部のvol%．

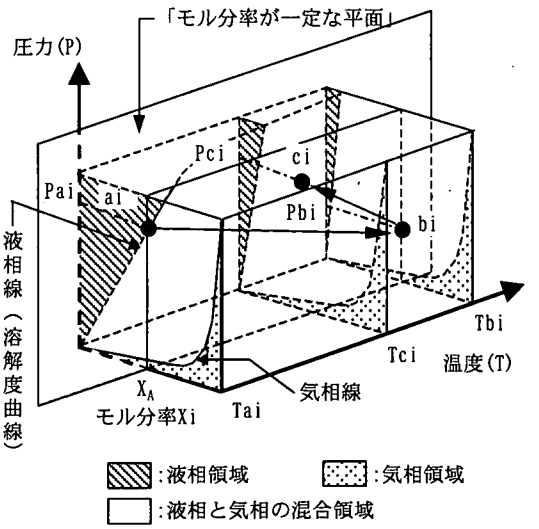
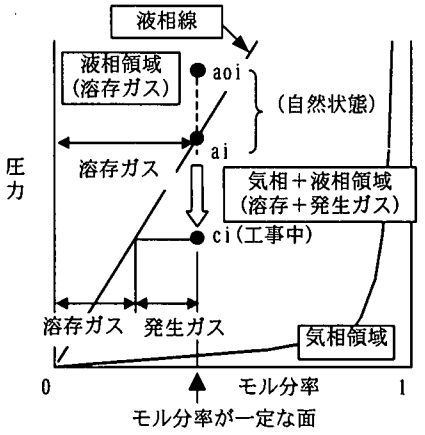
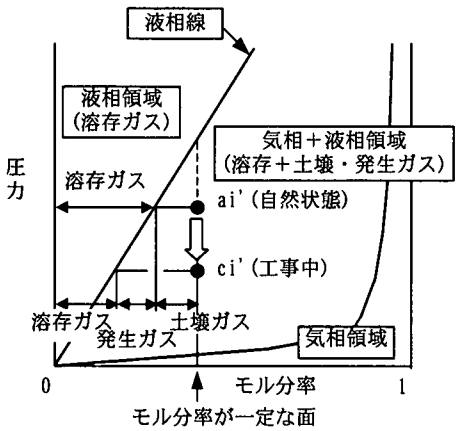


図-11 2相2成分系の気液平衡図を用いた「モル分率Xiが一定な平面上」における土中ガスiの状態変化の説明図



(a) 飽和土の場合



(b)不飽和土の場合

図-12 Ta=Tb=Tcと仮定した時の気液平衡概念図

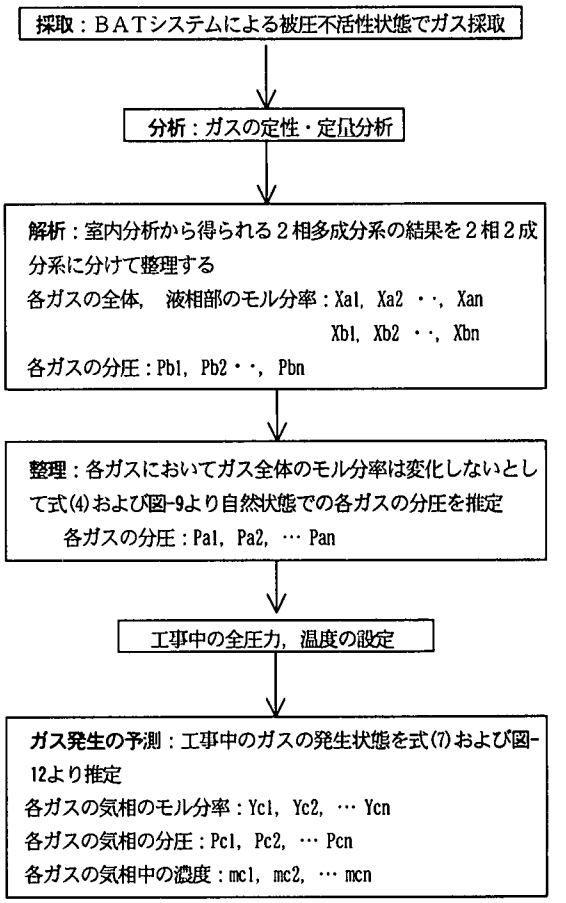


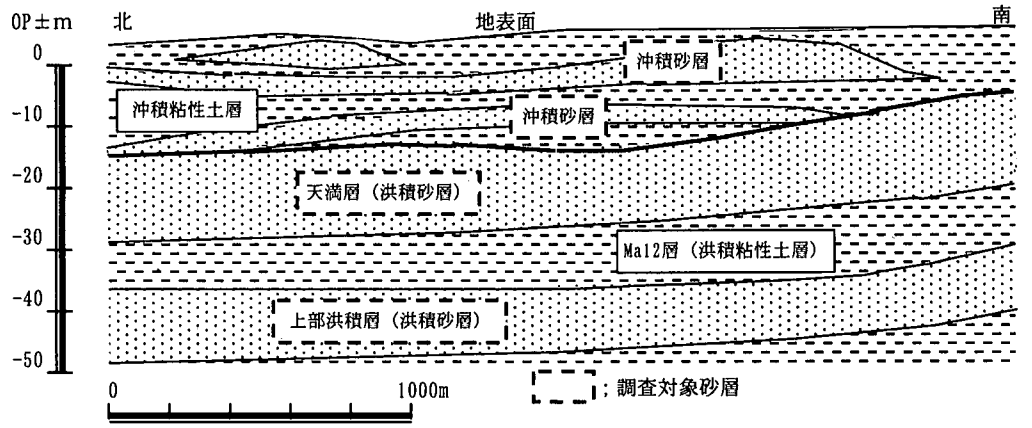
図-13 土中ガスの工事中における量・濃度を求めるフロー

すなわち，気相中の土中ガスはある圧力Paで同時に全て液相中に溶解し，このPaを境にして圧力の低下が生じた場合，「Pai／Pbiの割合」は各成分で等しいことを示している．このことは2相多成分系で一見複雑に見える土中ガスの評価を各成分に分けて2相2成分系でモデル化して評価することが可能であることを示している．

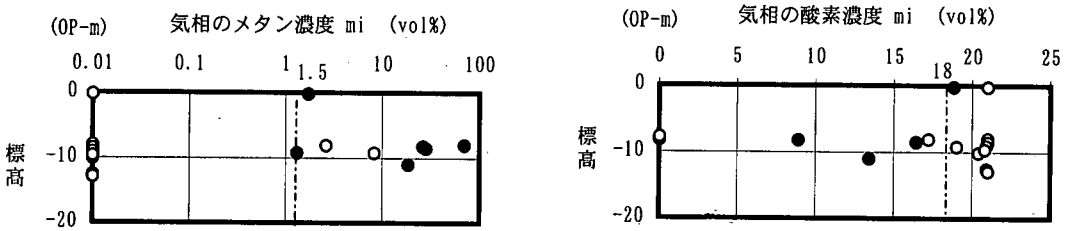
この2相2成分の熱力学的平衡関係を3次元的に考察すると図-11のように整理できる．同図において液相線は前述したように気体（土中ガス）の地下水への溶解度曲線を意味し，希薄溶液のため通常Henryの法則で理論的に求めることが出来る．気相線は「相平衡のてこの規則」[9]を応用して実測データより設定するのが現状では実用的である．

図-11より土中において圧力，温度の変化に応じて土中の気相・液相に存在する土中ガスの割合も変化する．ここで，前述したように採取・分析時～工事中で地盤中（地下水と空隙）に含まれる土中ガスの絶対量は変わらないと考えると，各状態において気相・液相に含まれる全土中ガス量は変化しないため，モル分率Xiは一定となる．すなわち，各状態の変化は図-11における「モル分率が一定な平面(Xi=XA)」上における変化となり，土中ガスの自然状態→採取・分析→工事中における状態変化は，図-11のａｉ→ｂｉ→ｃｉで表すことができる．

この考えに基づき採取分析時の圧力Pbiと温度Tbi（図中bi）より，気液平衡図を利用して，自然状態（Pai，Tai，図中ai）および工事中（Pci，Tci，図中ci）における気相・液相中の土中ガスの状態を推定することが可能であることが判る．

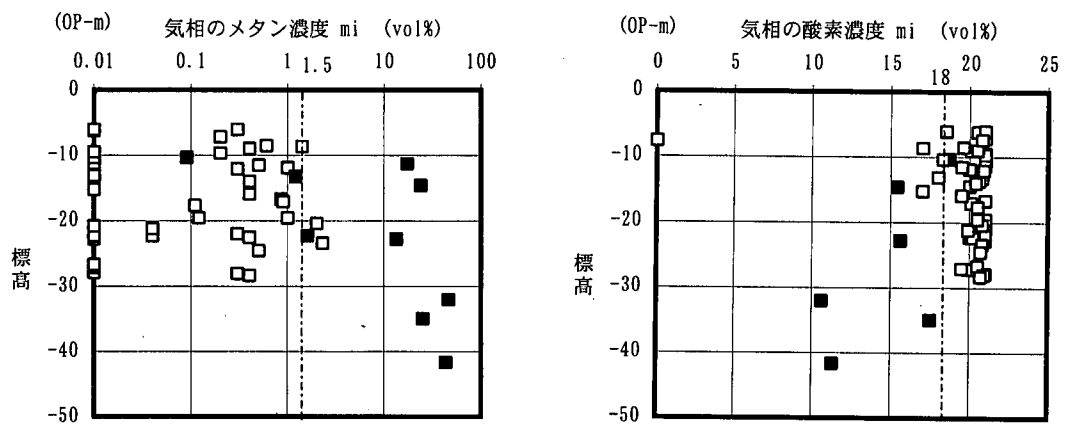


(a) 調査位置付近概略地層断面図



●：BATシステム ○：孔内ガス濃度測定法

(b) 沖積砂層の場合



■：BATシステム □：孔内ガス濃度測定法

(c) 洪積砂層の場合

図-14 ＢＡＴシステムと孔内ガス濃度測定法の測定例

例えば，工事現場において温度が一定条件において，飽和土の場合には，図-12(a)に示すように自然状態では溶存可能ガス量が溶解した「飽和濃度状態（ai点）」で存在している．aoi点では，ai点まで圧力が低下しない限り，発生ガスは生じない．工事中には，一般的に自然状態より圧力が低下する場合が多く，圧力状態はai点からｃi点に移動する．これに伴い地下水中の溶存ガス量は減少し，発生ガスが生じる．

不飽和土の場合には，図-12(b)に示すように地下水中の溶存ガスは，飽和濃度状態であり，土中空隙には土壌ガスが存在している．工事中にはai'からci'点に移動する．これに伴い地下水中の溶存ガス量は減少し，発生ガスが生じる．この地盤の空隙中の土壌ガスは地盤の形成上[7]，あるいは建設工事に伴う地盤環境の変化に伴い[9]，地下水面下でもその存在が確認されている．

このように２相多成分系を，各ガス毎に２相２成分系に分けて考察することにより，状態変化に応じた各ガスの発生をシミュレートでき，その手順を図-13に示す．

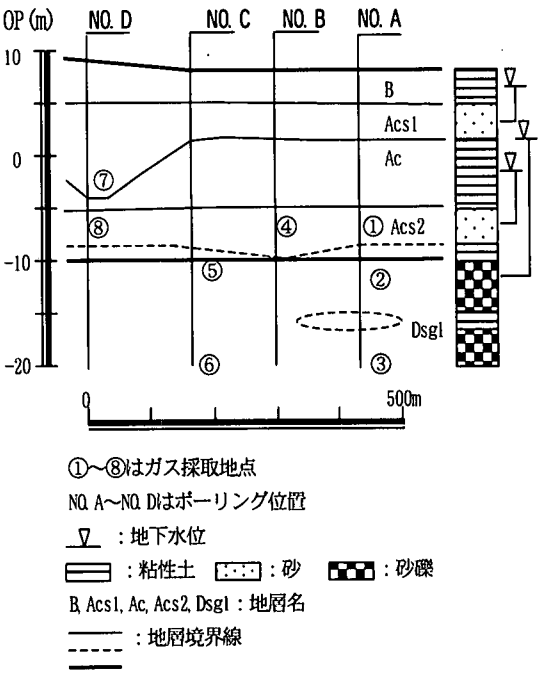


図-15　地層縦断面図

5．現場での調査・評価の一例

(1) 土中ガスの調査・評価例１

土中ガスの調査・評価例１は，河内平野内で実施された地下工事に先立つ土中ガス調査例であり，ＢＡＴシステムと従来の孔内ガス濃度測定法と比較を行ったものである．対象ガスはメタンと酸素であり，調査結果を沖積砂層，洪積砂層に分けて図-14に示す．

メタンではＢＡＴシステムに比較し，従来の孔内ガス濃度測定法は濃度が低く測定されていることが判る．これは，孔内ガス濃度測定法では，孔口のガス濃度を測定するため，孔内の拡散現象により薄まって測定されたのに対し，ＢＡＴシステムでは地下水から圧力の減少に伴って生じる発生ガスを精度良く捕獲できるためと考えられる．

一方，酸素では逆にＢＡＴシステムに比較し，従来の孔内ガス濃度測定法は濃度が高く，その値は通常空気に含まれている値(約21%)と等しい．これは，孔内ガス濃度測定法ではメタンと同様に孔口で発生ガスの濃度が低下し，空気中の酸素の濃度を測定してしまっているためと考えられる．

メタン，酸素の許容値としてトンネル標準示方書（シールド工事偏）[9]に従いメタンで「1.5%」を，酸素で「18%」を適用した場合，ＢＡＴシステムではほとんどが1.5%を上回り，かつ18%を下回るため，換気設備，防爆対策などのガス対策が必要と判断される．しかし，孔内ガス濃度測定法ではメタンで1.5%を下回り，酸素で18%を上回るため，過去工事中に土中ガスの発生が報告[10]されている河内平野においてこのまま設計・施工を行うことは，安全管理上問題があると考えられる．

(2) 土中ガスの調査・評価例２

a) 現場状況

調査現場は，Ｎ値＝０の鋭敏粘土の分布する東大阪市周辺である．図-15は調査地付近の地層断面図を示したもので，採取対象土層はAcs1，Acs2，Dsg1層であり，土中ガスの発生源である有機質土層がそれらの下部にあるいは挟在している[11]．特にNO. A, BのAcs2, Dsg1層はボーリング調査時において掘進中および孔内水位を低下させた時に，土中ガスがボーリング孔を通って地上に吹出す現象が生じた層であり，地盤が不飽和状態で土壌ガスがあることが推測された．また，ガスの吹出しが収まった後，ケーシング法で被圧水頭を測定したが，同図に示すように周辺地盤より若干低い値が測定された．

b) 採取現場の土質特性

図-16は採取した試料の土質試験結果を示したものである．Ac層のコンシステンシー特性において，自然含水比Wnが液性限界WLとほぼ等しいのはＮ値＝０の東大阪の鋭敏粘土の特徴である．有害ガスの発生源と考えられるAcs2層の粘性土の土粒子の密度ρ_sがρ_s=1.9g/cm^{3}と低い理由は，有機質分の混入が原因と考えられる．

また，Acs2層の砂質土をサンドサンプラーで採取し，飽和度Srを測定したところはSr=90%と低く，土中に空隙があり，そこに土壌ガスが溜まっているためと考えられ

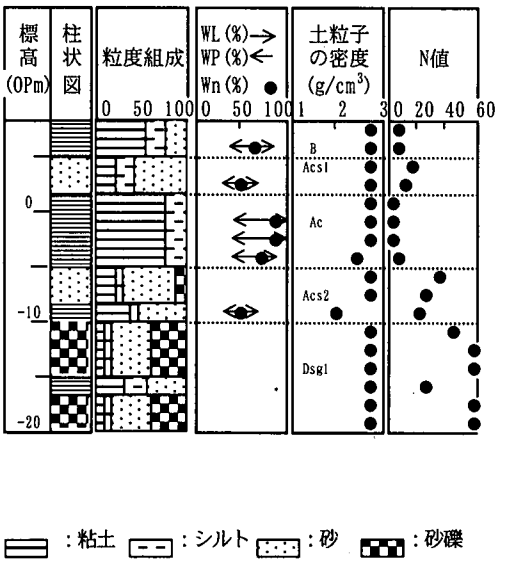


図-16　調査地点の土性図（ボーリングNO.A地点）

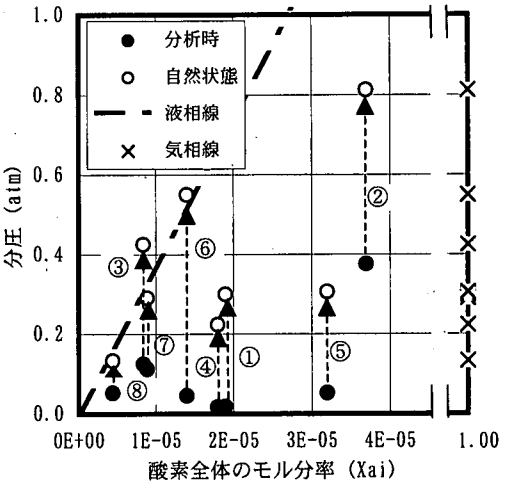


図-18　O_2-H_2O系の気液平衡実測例

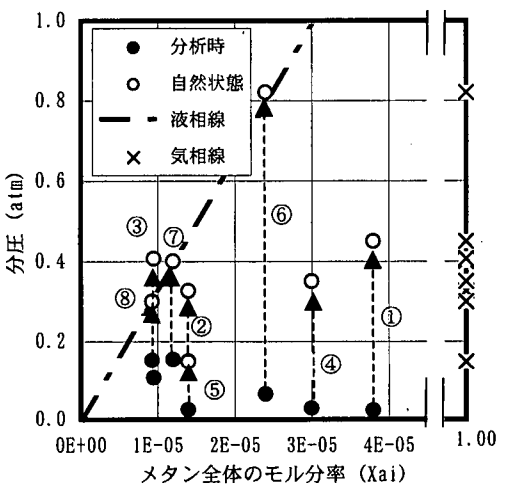


図-17　CH_4-H_2O系の気液平衡実測例

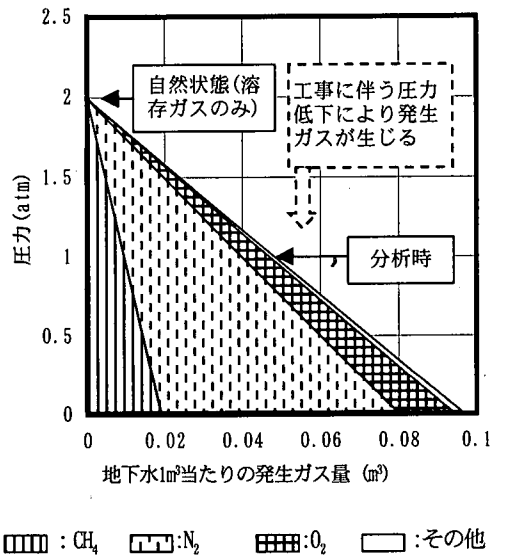


図-19 圧力変化（温度は15℃）に応じたガスの発生量の予測例

る.

c) 分析・解析結果

土中ガスの評価例として,CH_4-H_2O系, O_2- H_2O系の気液平衡関係を式(4)および**図-9**を用いて求め, **図-17, 18**に示す. 「●印」が分析時, 「○印」が自然状態でのモル分率を示す. 「○印」に着目するとメタン, 酸素とも採取地点③はまだガスの溶存に余裕がある「溶存ガス状態」, 採取地点⑥, ⑦, ⑧は各ガスの分圧に対し溶存可能量までガスが溶存している「飽和濃度状態」, 採取地点①, ②, ④, ⑤はガスの３０～７０％は気相部（土中の空隙）に土壌ガスとして存在している「飽和濃度＋土壌ガス状

態」であることが判る．言い換えれば，採取地点③，⑥，⑦，⑧は地下水溶存ガスのみ存在する飽和土，①，②，④，⑤は地下水中の溶存ガスと空隙中の土壌ガスが存在する不飽和土である．これは前述の調査時の記録，室内土質試験結果ともほぼ一致する．

d) 発生ガス量の予測

採取地点⑦について，地下水1m³当たりの圧力変化に応じた各ガスの発生量を式(7)および図-12を用いて求め，図-19に示す．同図より自然状態では溶存ガスのみであるが，圧力の低下に応じて発生ガス量が多くなることが判る．地盤中では，当初飽和土であったものが圧力変化に伴う発生ガスにより不飽和状態になると考えられる．地下水量は土砂掘削量から間隙比等を用いて求めることができるため，同図を利用して工事中の圧力状態の変化と1日当たりの土砂掘削量が判れば，発生するガスの量，種類を予測することが可能である．

これらの評価方法は工事現場条件が密閉系（ニューマチックケーソン，シールドの切羽等）での発生ガスの予測方法であり，開放系（オープンケーソン，シールド立坑等）では，発生ガスが空気と触れて拡散し，濃度は薄まることも考えられる．しかし，開放系でも凹地には空気中に拡散せず密閉系と同様なガスが溜まる可能性もあるので，対策工を設計・施工するに当たってはガスの発生量を密閉系で考慮するのが安全かつ適切と考える．

6．結　論

本研究は，飽和土，不飽和土の土中ガス採取にＢＡＴシステムを適用し，被圧不活性状態で採取された非反応性土中ガスの定量的評価方法について熱力学の相平衡，希薄溶液論および実測値より考察したものである．開発された評価方法は以下のような特徴を有している．

(1) ＢＡＴシステムでは，外気に触れること無く土中間隙と接続し，原位置状態（被圧不活性状態）を保持しながら地下水，土中ガスを採取，回収および運搬が可能である．分析時には採取された土中ガス全体のモル数を変化させない状態での分析が可能である．

(2) 採取されたガスの分析結果より，土中ガスは一般的に単独ガスではなく，複数のガスが混合した状態で土中に存在している．

(3) 土中ガスはある圧力・温度を越えると全ガスが同時に気相から液相中に溶解し，溶存ガスのみ存在する状態になる．

(4) このことより，自然状態で2相多成分系の土中ガスを個々のガス毎に2相2成分系に分けて考察することが可能である．

(5) 土中ガスは，各ガスの地下水への溶解量が小さいため，各ガス毎にHenryの法則を適用できる．

(6) 土中ガスは，土中の圧力・温度条件に応じて飽和土では「溶存ガス状態」および「飽和濃度状態」，不飽和土では「飽和濃度＋土壌ガス状態」の3状態で存在する．

(7) この状態変化は圧力―温度―組成（モル分率）の2相2成分系の気液平衡図において，「モル分率が一定な条件の元の温度―圧力関係の平面」上で表現できる．

これらの評価方法を実際の業務に適用することにより，従来より精度の高い土中ガスの定量的評価が可能になり，工事の安全対策に対し有効と考えられる．

今後は，揮発性有機塩素系汚染などの土壌汚染問題にも適用できるように採取・評価方法の改良を行う予定である．

参考文献

1) Torstensson, B-A:A New System for Ground Water Monitoring, Ground Water Monitoring Review, Columbus, Ohio, vol. 4, no. 4, pp. 131-138, 1984.
2) 柳浦 良行，豊岡 義則，友清 悟：ＢＡＴシステムによる土中メタンガスの定量的調査法の開発，土木学会論文集，NO. 609/VI-41, pp. 111-121, 1998.
3) 例えば，吉岡甲子郎：相律と状態図，共立出版，1993
4) 中西浩一郎：溶解度の理論と計算，講談社サイエンティフィック，pp. 19-32, 1982.
5) 化学工業協会編：改訂五版化学工学便覧，丸善（株），pp. 58-62, 1988.
6) 吉岡甲子郎：相律と状態図，共立出版，pp. 26-29, 1993.
7) 金子 利輔，佐藤 正治，原田 行夫：東京低地におけるメタンガス湧出事例とその調査事例について，地質と調査（2月号），土木春秋社，pp. 14-21，1995.
8) 浦島 幸昌：酸素欠乏空気の調査，地質と調査（2月号），土木春秋社，pp. 29-36，1995.
9) 土木学会：トンネル標準示方書（シールド工法編）・同解説，p. 229, 1996.
10) 土質工学会関西支部，関西地質調査業協会：新編大阪地盤図，コロナ社，pp. 25-26, 1987.
11) 柳浦 良行，三野 誠司：ＢＡＴシステムを応用した土中有害ガスの調査方法の開発，第31回地盤工学研究発表会，pp. 505-506，1996.

(1999. 1. 4受付)

DEVELOPMENT OF METHOD AND EVALUATION FOR UNDERGROUND GAS

Yoshiyuki YAGIURA and Satoru TOMOKIYO

The method of sampling and analysis for underground gas is not yet establiished, in spite of that the gases encountered at underground work are not in single-component but multi-components in many cases. In this study, we propose 1)BAT System developed by B.A.Torstenssen, Sweden, is effeffecttive for underground gas sampling and 2)quick quantitative evaluation of all components in respective phases can be achieved through monitoring on the basis of phase equilibrium theory of non-reactive underground gas sampled. Furthermore, we found each component in respective phase can be represented in temperature-pressure relation assuming mole fraction of gas component is same. Consequently, concentration of underground gas became able to be predicted precisely regardless if the ground is saturated or not.