

BATシステムによる土中ガスの採取・分析方法の開発

柳浦 良行*

1. まえがき

近年の基礎工事、圧気工事、シールド・山岳トンネルは、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、酸素欠乏空気による酸素欠事故、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、その多くは土中ガスの定性的評価に留まっている。有害ガスの定量的評価を困難とする原因の一つが、調査ボーリングなどによるガス採取作業時にガスの一部が土中から放出されてしまうことである。

より経済的かつ安全な対策工を設計施工するためには、この問題を解決した精度の高い土中ガス採取・分析方法の研究開発が必要である。

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。本論文では、このシステムを土中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概略の土中ガスの存在状態を判定している。

本研究で開発された土中ガス調査法は、従来の方法に比較してより実際に近い定量的調査法であるとともに、一本のボーリング孔で多深度の調査、透水性の悪い粘性土での調査等も可能である特徴を有している。

2. 土中ガスの性質、発生要因および地盤内での存在状態^{2), 3)}

(1) 土中ガスの一般的性質

本論文で対象とする土中ガスは、平野部の建設現場において地山から発生する可燃性、酸素欠、悪臭ガスであり、その種類と基礎物性値を表-1に示す。

(2) 土中ガスの地盤内での存在状態

図-1に示すように土中有害ガスは有機質土層の中か、不透水層に覆われた砂層の中の地下水（液相）に溶解ガスとして存在することが多く、地下水が土中ガスの飽和濃度を越えた場合には土壤ガスとして土中

* 基礎地盤コンサルタンツ㈱

表-1 土中ガスの種類と基礎物性値

ガスの名称		メタン CH ₄	酸素 O ₂	二酸化炭素 CO ₂	硫化水素 H ₂ S
危険の種類		爆発	酸欠	中毒	爆発・中毒
比重		0.55	1.11	1.53	1.2
爆発限界 vol%	上限	5			4
	下限	15			45
許容限界濃度 (%)		1.5	18	0.5	10(ppm)
性質		可燃性,無毒,無色,無味,無臭,無刺激. 酸素と結合して爆発の危険あり.	不燃性,無毒,無色,無味,無臭 各ガスと混合して爆発を生じる.	不燃性,無色,無臭,酸味があり,水に溶けやすい.	可燃性,有毒,無色,腐卵臭,刺激性あり,
症状		呼吸困難,眠気,酸素欠乏の症状を呈す.	16~12%:脈拍,呼吸数の増加.精神集中の困難.頭痛等. 14~9%:判断力がにぶる.めいてい状態.記憶が薄れる.体温上昇. 10~6%:意識不明,中枢神経障害.けいれん.チアノーゼ. 6以下:昏睡,呼吸停止,6~8分で心臓停止.	0.05~2%:呼吸が深くかつ速くなる. 2~5%:呼吸が速くなり,頭痛,めまい,動揺を訴える.血圧が上昇する. 5~7%:息切れがし,顔がほてり,冷汗がでる.興奮状態となる.10分位で意識不明となる. 10以上:1~2分で意識不明となる.	1~2ppm:臭気が判る. 3:著明な臭い. 100~150:数時間で軽い症状. 200~300:重い障害を残さず1時間位耐えうる. 500~700:30分~1時間で危険. 1000~3000:急速に死亡.

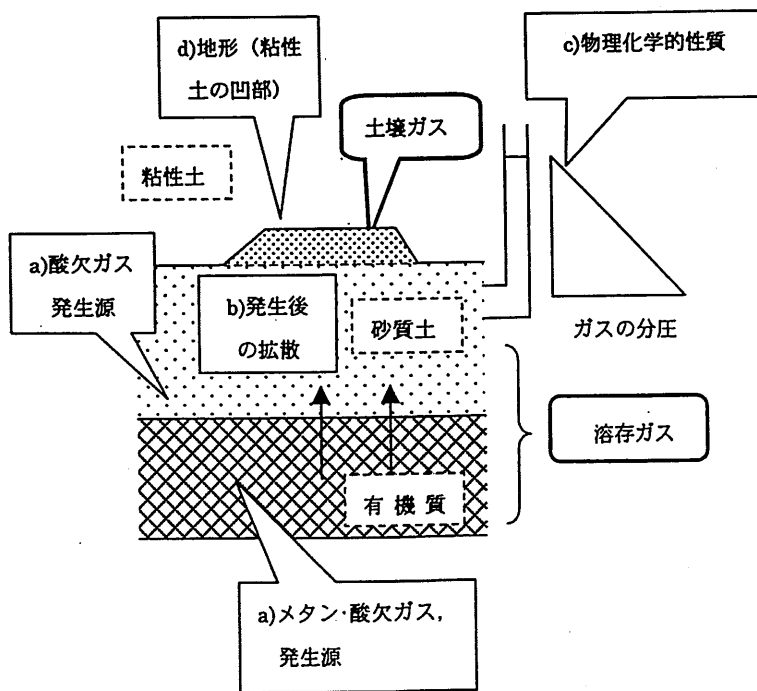


図-1 土中ガスの生成と存在環境

(文献2) 図-1 に加筆)

の空隙（気相）に存在すると考えられている⁴⁾。

なお、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：溶存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。

3. 従来の調査法の問題点の整理^{2), 3)}

従来の土中ガス調査法としては、表-2に示すように揚水後の孔内ガス濃度測定法、孔内水採取法および気液分離法などがあり、問題点は以下の通りである。

(1) 共通の問題点

- ・観測孔は一般にボーリングにより設置されるため採取深度をボーリングする時に、また観測孔設置後に孔内を水洗いする（泥水を清水に入替える）時に、ガスの一部（特に土壌ガス）が土中から放出してしまい採取地点の自然状態が変化する可能性がある。
- ・孔内ガス濃度測定法以外は一本の観測孔で一深度の観測しかできず、不経済である。
- ・上述の観測孔水洗い時に多量の泥水を廃棄物処理しなければならず、環境への負荷が増大するため、環境問題に対する配慮が足りない調査方法である。

(2) 揚水後の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発生し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、土中ガス調査の中で最も簡単かつ安価な方法である。

問題点として、空気より比重の軽いメタンガスでは、孔口を開放した場合、図-2⁵⁾に示すように、孔内のガス濃度は孔内水面から孔口に向かって減少する傾向にあり、孔口では一番濃度の薄いガスを測定していることになる。従って、孔口である基準以上のガス濃度があれば設計施工に反映することは可能であるが、基準以上の濃度が無い場合、特に最近の大深度地下工事に関連する調査では孔口までメタンガスが上昇するのに時間がかかり、かつ濃度が薄まるため判断に悩むことが多い。

観測孔の孔口を密閉して放置した後、孔口の濃度を測定する方法も用いられている。しかし、この方法も孔口と孔内水位上面との間で、濃度分布は複雑に変化することが考えられ、測定された濃度が、現場でどのような条件の場合に発生するのか、判断するのが困難である。

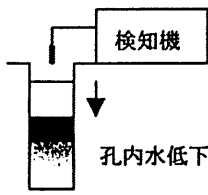
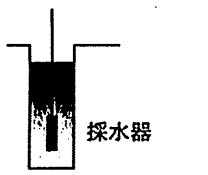
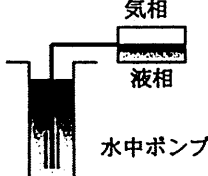
また、比重の重いCO₂等については、孔口まで拡散により上昇するかどうか疑問である。

(3) 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。

問題点としては、多くの採水器が採水地点の圧力を維持できない構造であり、地上に回収した時、採水器内の圧力が低下し、大気圧に相当する土中有害ガスしか採取した地下水に溶存できなくなり、溶存できないガスは大気中に放出してしまい、実際より溶存ガス濃度を小さく測定する可能性があることである。

表-2 従来の代表的土中ガス調査法³⁾

調査法	概要図	測定法の概要	採取・評価の限界		
			定性的 ガスの 有無の 判定	定量的	
				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

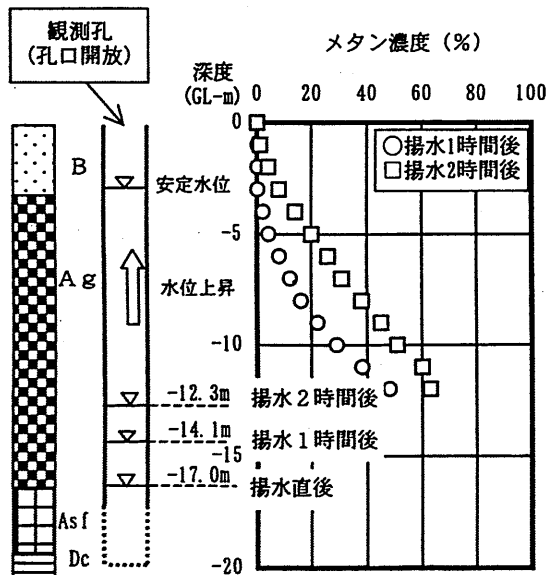


図-2 測定管内のメタンガスの濃度分布⁵⁾

(4) 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。

一見、液相と気相のガス濃度が分かるため良いように思われるが、以下のような問題点がある。①水中ポンプを使用するため地下水に圧力変化を与えてしまうので、どのような圧力条件下でのガス濃度が明らかでないこと、②実際の地下工事に応用するためには、単位当たりの地下水から圧力・温度変化でどの程度のガスが発生するかを知る必要があるのに対し、流動する液相上に溜まった気相内のガスが何 m^3 の液相から発生したのか明らかでないこと。

4. B A Tシステムによる土中ガスの採取方法の検討^{2), 3)}

著者は、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地下水採取法の一方法と考えられていたB A Tシステムを土中ガス採取に応用することを考案した。このB A T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) B A Tシステムによる土中ガス採取の原理

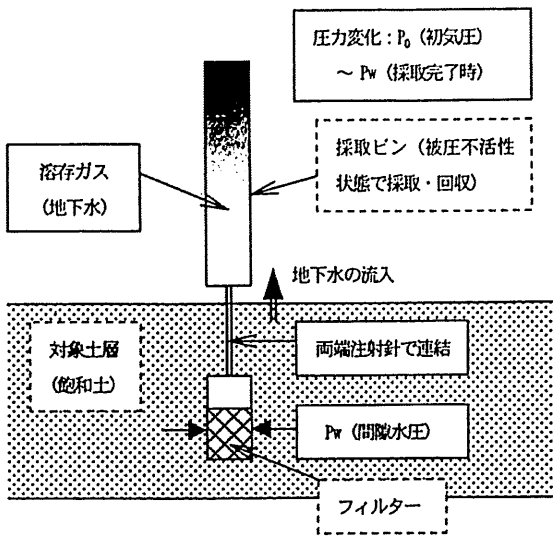
ガス採取の原理としては図-3(a), (b)に示すように土中ガスは土中に設置されたフィルターを通して、地下水とともに採取ビン内に、採取ビン内圧力 P_0 と地盤中の間隙水圧 P_w との圧力差により大気と接すること無く採取され、最終的には P_0 は P_w と等しくなり原位置の圧力状態を保持したまま密閉状態で地上に回収され（被圧不活性状態）、試験室で分析される。図-3(a), (b)に示すように、採取時には、飽和土では溶存ガスが溶解した地下水が、不飽和土では、この地下水とともに土中空隙中の土壌ガスが採取される。採取～分析までのビン内の圧力、採取ガスのモル数変化の概念を図-4に示す。採取後のガスの「分析」は採取時の圧力(P_w)と異なり大気圧(P_a)条件下で一般に行われるが、同図から判るように、B A T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。

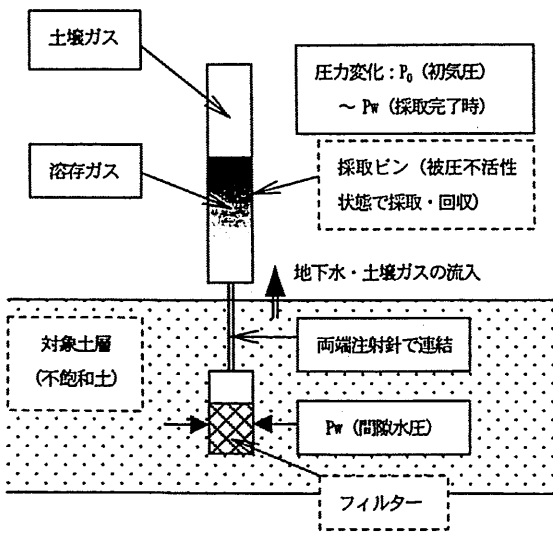
従来の調査法は同図の「分析」の段階において、以下のように位置づけられよう。

- ・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。

また、B A Tシステムにおいてはフィルターを用いているため、その目詰まりが問題になる。この目詰まりにより単純に採取時間が長くなるだけなのか、あるいは採取されるメタンガスに何らかの影響を与え

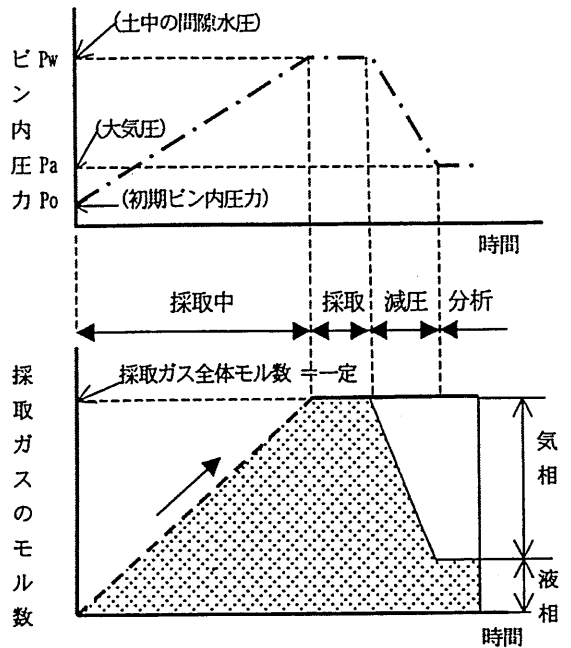


(a) 飽和土の場合

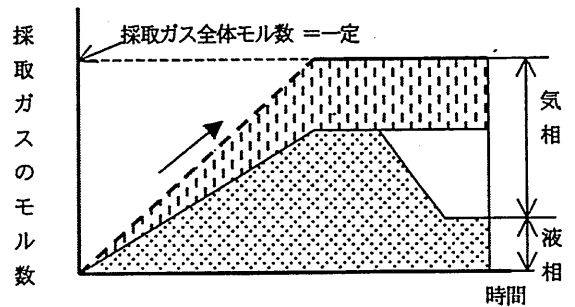


(b) 不飽和土の場合

図-3 土中ガス採取の原理³⁾



(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-4 採取～分析におけるピン内の土中ガスのモル数の変化³⁾

るのか、今のところ良く判らない。実測値としては、後述する図-11(b)に示すように、自然状態で採取を続ける限り、メタンガス濃度に大きな影響を与えていないため、現状では採取時間が長くなるだけと考えている。長時間のモニタリングにおいて、目詰まりが著しい場合には、採取ビンの中に水を入れ圧力をかけて、フィルターチップに水を圧入し、洗浄を行うことも可能である。

土中ガスの測定精度を向上するには、第1に土中ガスを空气中に漏らさないようにサンプリングを行うこと、第2に分析を適切に行なうことが重要と考えられる。

BATシステムにおいて、前者の問題点に対しては、前述のように地盤中の間隙水圧を低下させない自然状態で採取が可能であり、採取されたガスを空气中に漏らすことなく（モル数を変化させない）分析装置まで運搬している。後者の問題については、適用法律（例えば労働安全衛生規則など）および採取されたガスの濃度に応じて、適切なガスのキャリブレーションを行ったガスクロマトグラフで分析を実施している。

(2) 採取機器

図-5に示すBATシステムの採取装置の主な機器の概要は以下の通りである。

a) フィルターチップ

フィルターチップは、採取装置の先端にあり、フィルターを通して地下水と共にガスを採取する部分であり、採取に先立ちガイド管と共に採取位置に設置される。上部にはラバーディスクで蓋がしてあるため、ガイド管内に地下水およびメタンガスが流入することは無い。

b) ガイド管

ケーシングパイプやガス管が用いられ、ケーシングパイプの場合にはパイプ内に水が漏水しないように接合部にはOリングが装着する場合もある。

c) 採取器

先端に上下に動く両端針があり、その上部には両口にラバーディスクを装着した採取ビンがある。この採取器を圧力計と共に所定深度に設置された「フィルターチップ+ガイド管」の中に挿入し、先端部に達したら採取器の自重で両端針がフィルターチップと採取ビンのラバーディスクを貫通し、フィルターチップと採取ビンは連結されビン内 (P_0) と土中 (P_w) の圧力差で採取される。採取後は採取器を上げることにより、両端注射針はフィルターチップと採取ビンから離れ、採取ビン内に採取された地下水、土中ガスは採取地点の圧力を維持しながら、密閉状態で地上に回収される。

d) 圧力計

圧力計は採取ビンと注射針を会して連結し、採取ビン内の圧力を測定することにより、土中ガスの採取状況のモニタリングを行うことができる。

(3) 採取・分析手順および評価

この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-6に示す。

a) フィルターチップの設置

調査ボーリングと併用して「フィルターチップ+ガイド管」を図-7に示すように孔内水位が土中の間隙水圧より低くならないように注意しながらボーリング孔底から採取深度まで押し込んで設置する。このことにより、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孔内の水位低下を行う必要が無いため、土中ガスの採取中のガス放出は最小限にできる。

土中ガスは、通常土中の間隙水圧と平衡を保っているため、上述のように土中の圧力を低下させない限り採取中にガス放出が生じることは少ないと考えられる。

b) 採取ビンの準備

採取前に分析精度を上げるため、採取ビン内の空気を単一成分のHeに置換し、設定されたビン内圧力 P_0 より、その量を把握する。採取後に分析に必要な50~100ml程度の気相部が確保できるように、ビン内圧力は採取地点の間隙水圧から設定する。置換ガスとしてHeを選定したのは以下の理由からである。

- ・ 空气中、水中にほとんど存在しない。
- ・ ガスクロ等の分析におけるキャリアガスと同一であること。
- ・ 純粋ガスとして市場で得やすいこと。
- ・ 水への溶解度がひくいこと。

c) 土中ガスの採取、回収

「採取ビン+圧力計」をガイド管内を降下させ、両端注射針を用いてフィルターチップと採取ビンとを連結させて採取した後、採取ビンを地上へ回収する。前述したように、採取ビン内は外気に触れることなく土中の間隙と接続でき、ガス採取完了時には、採取ビン内は土中の間隙水圧 P_w と等しい圧力となることから、「土中での地下水と土中ガスの気液平衡状態と等しい条件で採取ビン内も気液平衡状態を保持できる」ため、被圧不活性状態で採取、回収される。

d) テドラバックによる減圧

採取ビン内は大気圧より高い圧力となることが多いため、大気圧下で分析を行うガスクロマトグラフで図-4に示す採取ガス全体のモル数を変化させない条件を満足させるためには、図-8に示すような「テドラバック」を採取ビンに連結してガスの一部を移動させ、採取ビンおよびテドラバック内の圧力を大気圧まで減圧させる必要がある。この減圧時に多くの場合、図-8のようにもともと液相中に溶存していた溶存ガスの一部は、気相中に分離するが、外気とは接触しないため、土中ガスの絶対量は変化しない。

e) ガスクロマトグラフで気相、液相のガス分析

図-8に示す採取ビン内の圧力（テドラバック使用前）を圧力計で測定したのち、試験室内にて液相、気相の種類、濃度をガスクロマトグラフ法（通常1気圧条件）にて分析する。

これらの測定・分析より求まるパラメータは以下のとおりである。

- ・ 採取ビン内の圧力測定；気相中の土中ガス分圧 p_1
- ・ 液相中のガスクロマトグラフ分析； p_1 に対する液相中の溶存ガス量 V_{LG} (ml)
- ・ 気相中のガスクロマトグラフ分析； p_1 に対する気相中の「土壌+発生ガス量 V_{GC} (ml)，全気相量 V_G (ml)

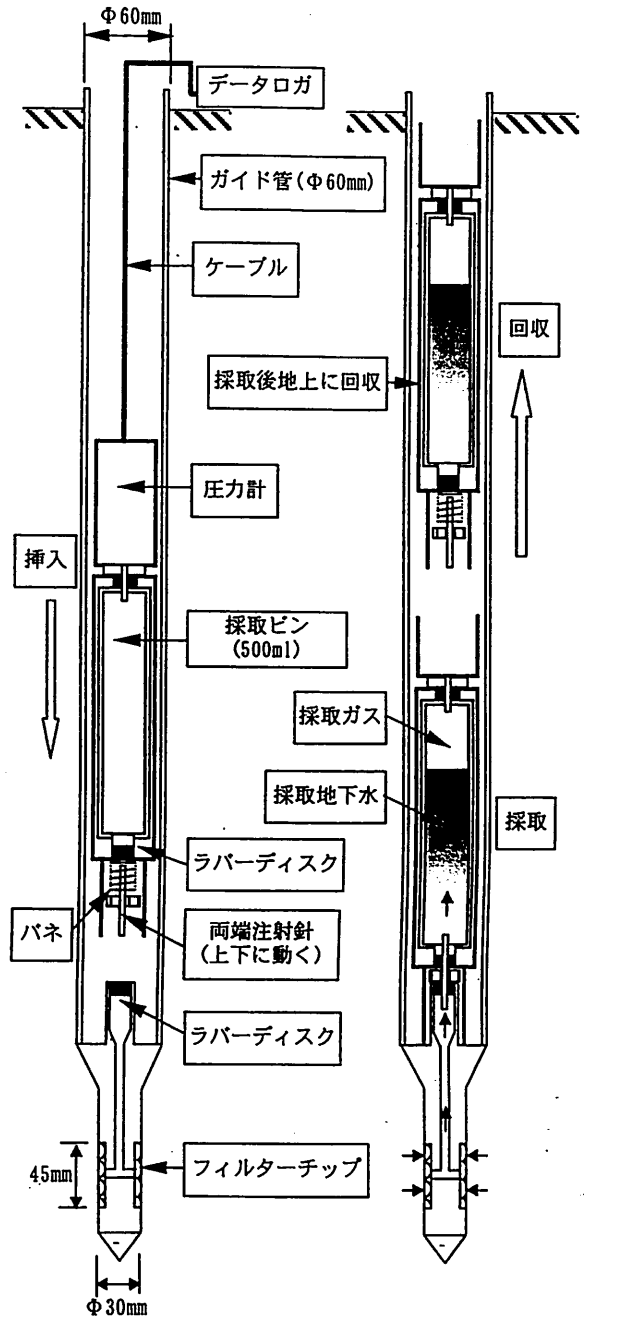
f) 土中温度の測定

土中温度の測定は、温度検層を原則とするが、測定深度が浅い場合には経験的に $T_a=15\sim 20^\circ\text{C}$ 程度で推定しても実用的には問題ない。

g) 採取ガスを単独ガスとした場合の簡易な評価方法

液相への単独ガスの溶存ガス量は、式(1)のようにヘンリーの法則⁶⁾に従い、気相の圧力、温度により変化する。したがって、単独ガスとしてメタンガスを例にとると、採取深度の圧力、温度でメタンガスの地下水（液相中）への飽和濃度 X_1 が決まり、気液相内に存在するメタンガス全体のモル分率 M_1 （式(2)参照）と比較し、 $M_1 > X_1$ の場合には図-9に示すように溶存できないガスは土壌ガスとして土中の空隙（気相）に存在すると考えた。この「発生ガス+土壌ガス」の気相中での濃度 m_1 (vol%)は式(3)で示される。

$$p_1 = H \times X_1 \quad (1)$$



(a) 採取前

(b) 採取および回収

図-5 主な採取機器および手順²⁾

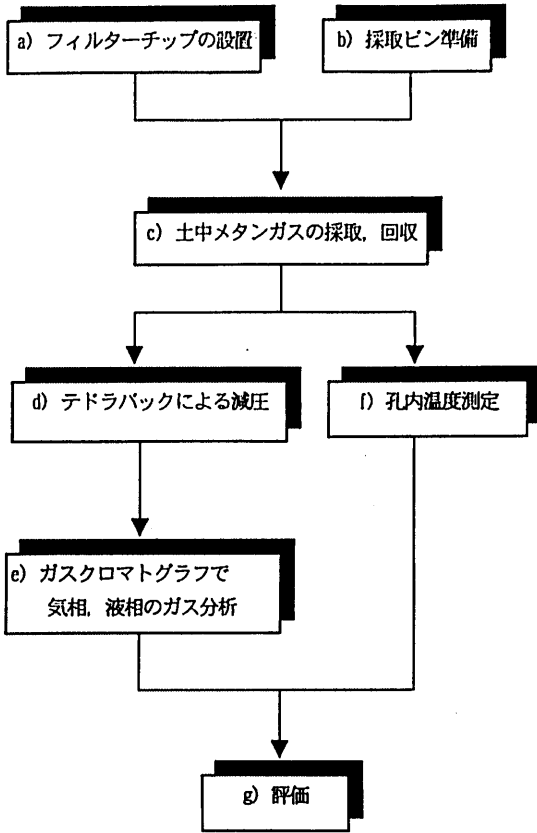


図-6 土中ガスの採取、分析および評価手順²⁾

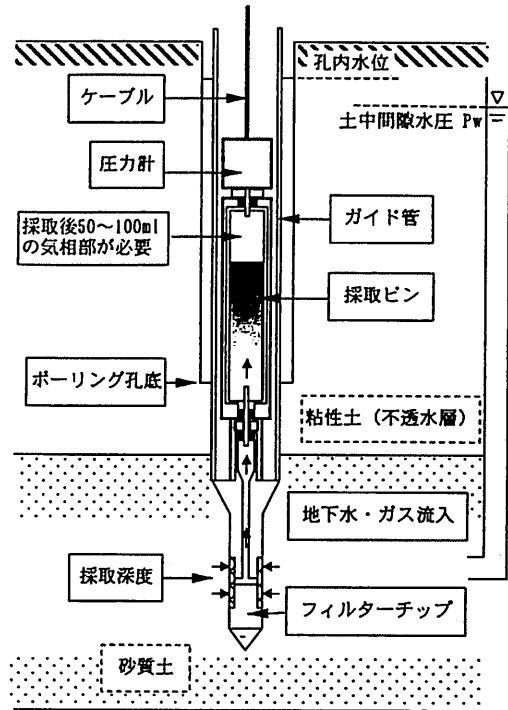


図-7 BAT システムによる地盤中での採取状況²⁾

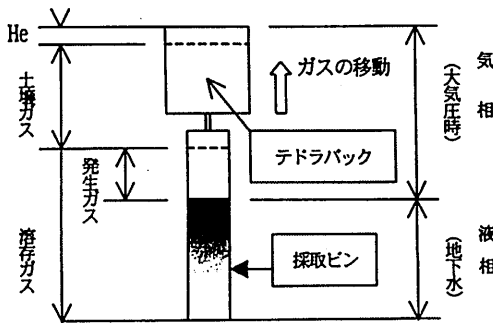


図-8 テドラバックを用いた採取ピン内の減圧後²⁾

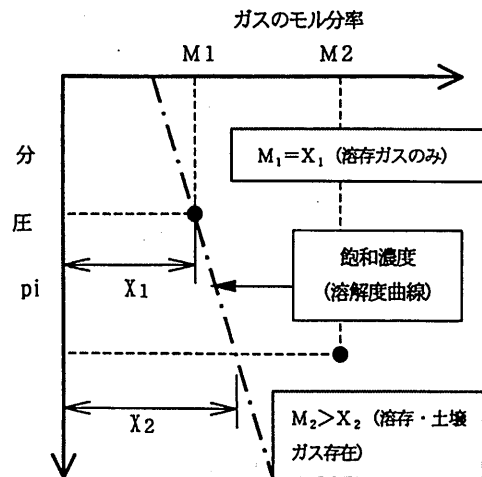


図-9 単独ガスの存在状態の簡易判定²⁾

$$M_i = \frac{(V_{GG} + V_{LG}) / 22400}{(\rho_w \times V_L / 18) + (V_{LG}) / 22400} \approx \frac{(V_{GG} + V_{LG}) / 22400}{(\rho_w \times V_L / 18)} \quad (2)$$

$$m_i (\text{vol}\%) = V_{GG} \times 100 / (V_G - V_{He}) \quad (3)$$

ここで、 X_i : 飽和濃度 (モル分率), H : ヘンリー一定数 (atm/mol), p_i : 気相中でのメタンガスの分圧 (atm), M_i : 気液相内のメタンガス全体の濃度 (モル分率), m_i : 気相中のメタンガス体積濃度 (vol%), V_{GG} : p_i に対する気相中のメタンガス量 (ml), $V_{GG}=0$: 溶存ガスのみ存在, $V_{GG}>0$: 溶存ガス+土壌ガスが存在, V_G : p_i に対する全気相量 (ml), V_{LG} : p_i に対する液相中の溶存メタンガス量 (ml), V_L : 全液相量 (ml), ρ_w : 水の密度 (g/ml), V_{He} : p_i に対する採取ビン中に残留している He ガス量 (ml), 22400 : 1 気圧でガス 1 モル当たり容量 (ml), 18 : 水 1 モル当たりの質量 (g)

5 現地での採取・分析例

(1) 現地計測例 1

現地計測例 1⁷⁾は、滋賀県の湖西地域でのシールド工事に先立って実施された調査である。調査地周辺には、図-10 に示すように、スクモ層 (Ap 層) と呼ばれるメタンの発生源となる有機質粘性土が広く分布しており、地下工事を行う場合にメタンガス対策が設計・施工上大きな問題となる地域である。シールドはメタンが地下水に溶存ガスとして存在する可能性のある Dsg 層内を通過するため、同層内のガスの有無およびその量が問題であった。溶存ガスがある場合にはシールド通過および立坑施工に伴う地下水低下によりガスが発生するため、工事前に揚水試験を行い、ガスの発生状況を調査した。揚水に伴い発生するメタンガスの濃度、溶存量の経時変化を B A T システムと他の採取法 (孔内ガス濃度測定法、孔内水採取法) と比較した結果を図-11 に示す。なお、図-10 に示すように孔内ガス濃度測定、孔内水採取は揚水孔から、B A T システムは別孔から採取・分析した。

図-11(a) は 孔内ガス濃度測定法と B A T システムでの気相内のメタン濃度の変化を示すが、地下水位の低下と共にメタン濃度は上昇するが、B A T システムの方が値は大きい。これは前述したように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るのに対し、B A T システムでは地下水から圧力の減少に伴って発生する発生ガスを精度良く捕獲できるためと考えられる。

図-11(b) は 孔内水採取法と B A T システムの採取直後の圧力における溶存ガス濃度の変化を示すが、飽和濃度 X_i は地下水の低下とともに低下する。水位の低下にも関わらず、B A T システムではメタンガス全体のモル分率 M_i は変化せず、 X_i に近い値を示し、現地の地下水にはほぼ飽和濃度のガスが溶けこんでいることが判る。孔内水採取法では、採水深度の圧力が地上で維持できず、地上に回収した時点でガスが大気中に放出してしまうため、測定溶存ガス量が少ないと考えられる。

実際の工事においては、この調査結果に基づき排気設備を準備し、防爆仕様でシールドマシン等を設計・施工したため、工事は支障なく終了した。排気設備を設けたため、工事中に坑内でメタンは、ほとんど測定されなかった。しかし、従来のガス調査を行いメタン発生の予測ができなかった近傍の他工区では、工事中にメタンが発生し、事故にはいたらなかったが、その対策に工期と費用を要した。

この例から判るようにメタンがある場合、工事中には排気設備を設けることが多く、調査時のメタンガ

ス濃度と直接比較することは一般に困難である。しかし、調査時にガス噴出の無かった（経験的に土壤ガスは少ない）当現場において、地下水の飽和濃度に近いメタンガスを採取できたことは、BATシステムが採取中のガス放出の少ないより実際に近い定量的評価法であることを示している。

(2) 現場計測例2

現場計測例2⁷⁾は、大阪湾岸でのケーソン工事に先立って実施された調査である。調査地周辺には図-12に示すように若干の有機質分を含有するAc層が存在し、このAc層内をケーソンが通過するため、メタンの存在が考えられるAs、Asc、およびDsgのみならず、Ac層内でのメタン発生も問題となった。孔内ガス濃度測定法以外の従来の方法では各測定深度毎に観測孔を設ける必要があり、不経済になる。また、孔内ガス濃度測定法では、Ac層の透水性が悪く現場透水試験ができないと同じように、実務上は測定不可能である。

BATシステムは一本のボーリング孔を用いて多深度のメタンガスの測定が可能であり、その測定結果を図-13に示す。測定結果に加え、飽和濃度Xiのラインも同時に示したが、GL-7m付近の砂層では、メタンの量がXiを超えているため、砂層に土壤ガスが存在することを示唆しており、実際調査ボーリング時点でも、水位低下に伴う若干のガスの吹き上げがあった。この例から判るようにBATシステムは、他の方法のように採取深度毎に観測孔を設ける必要がないため、早く（2時間～3日/1深度）かつ経済的に土中ガスの調査が可能であることが判る。この工事においても、十分な排気設備と防爆対策を施工したため、工事中のケーソン内でメタンガスはほとんど測定されなかった。

(3) 現場計測例3

現場計測例3⁸⁾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（シールド工事編）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⁹⁾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、安全衛生管理上問題があると考えられる。

6 まとめ^{2), 3)}

本研究は、BATシステムを応用して土中ガスの有効な採取分析方法を開発し、実際の地盤への適用性

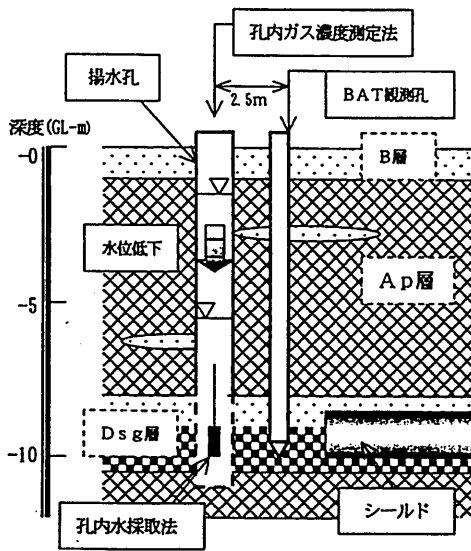


図-10 シールド工事に伴うメタンガスの測定例²⁾

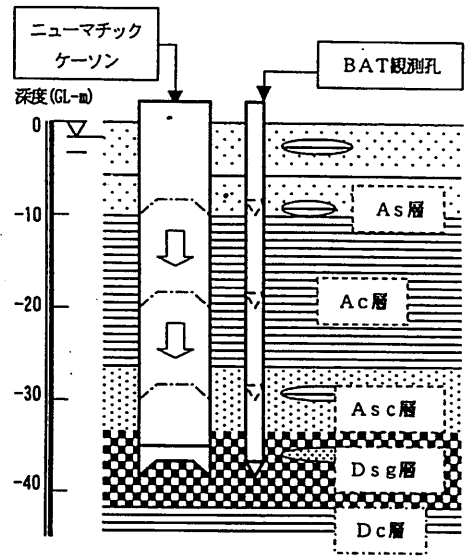
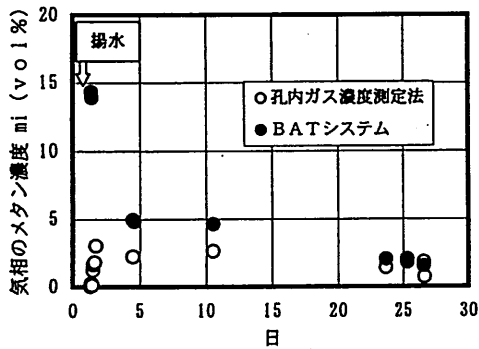
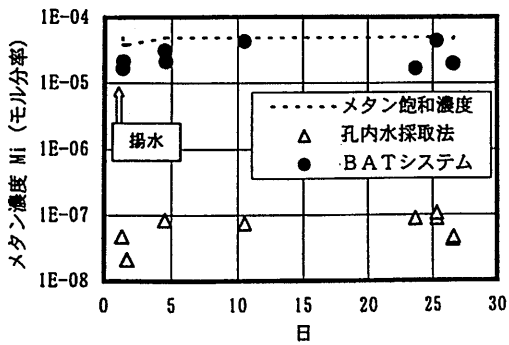


図-12 ケーソン工事に伴うメタンガス測定例²⁾



(a) 気相中のメタンガス濃度の経時変化



(b) 採取直後の土中メタンガス濃度の経時変化

図-11 地下水低下に伴うメタンガス発生量の経時変化²⁾

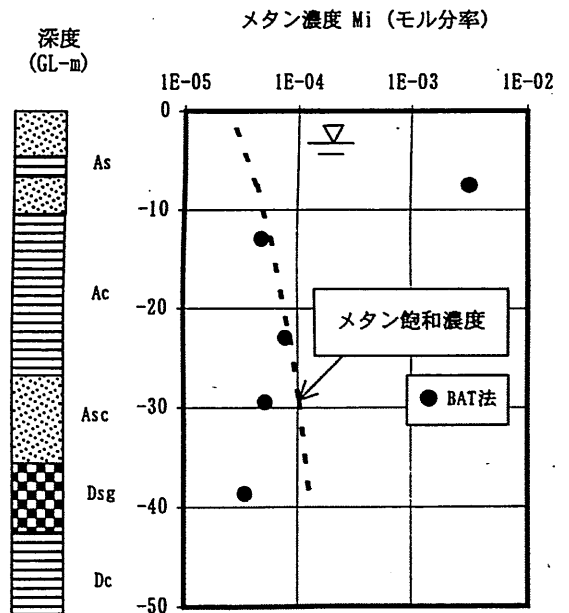
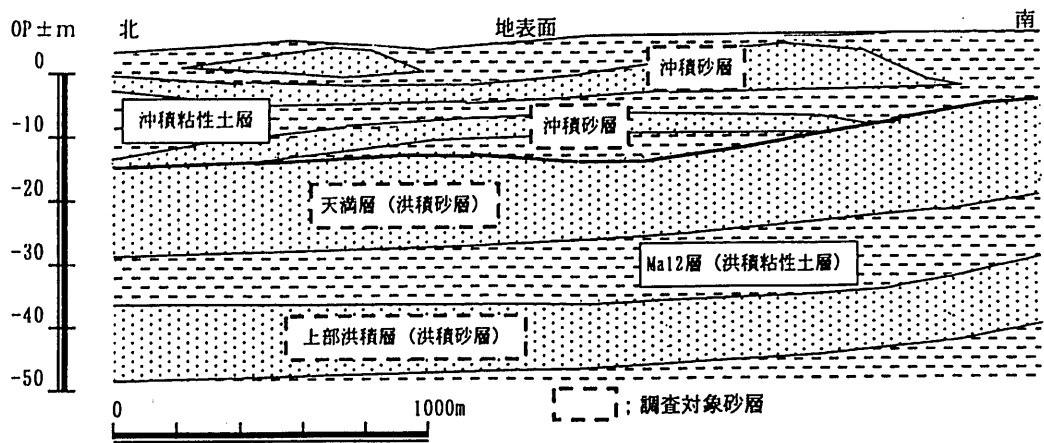
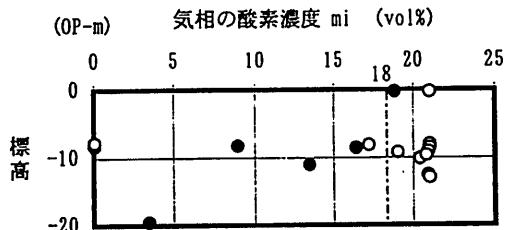
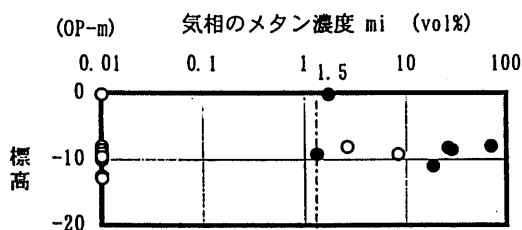


図-13 1本のボーリング孔で多深度のメタンガスを調査した例²⁾

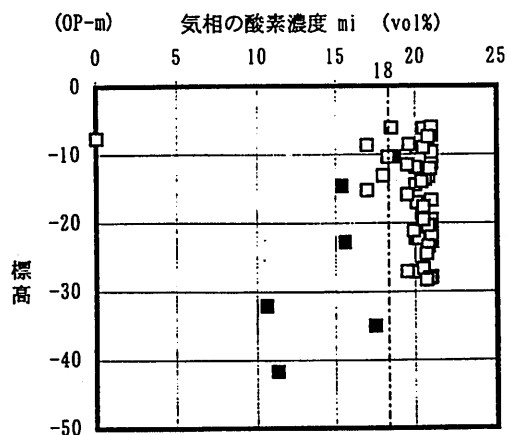
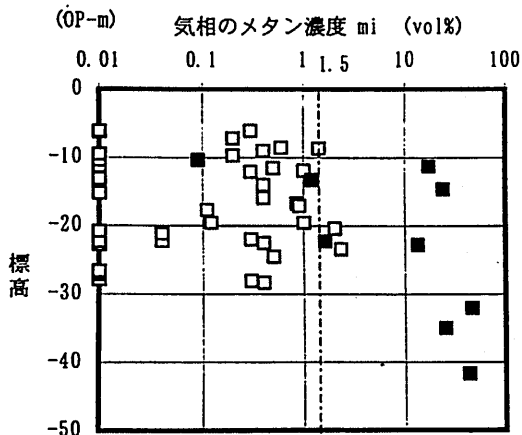


(a) 調査位置付近概略地層断面図



● : 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³⁾

について考察を行ったものである。開発された土中ガスの採取、分析および簡易評価方法は以下のような特徴等を有している。

- (1) 所定深度までボーリングを行わずフィルターチップを押込んで設置し、かつ従来のようにボーリング孔内の洗浄を行う必要がないため、採取時に土中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。
- (2) 採取ピンは外気に触れることなく土中の間隙と接続し、原位置状態を保持しながら（被圧不活性状態）地下水、土中ガスの採取、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有害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。
- (3) 採取前後の土中および採取ピン内の圧力を直接測定できるため、採取された土中ガスの評価の精度を高めることができる。
- (4) 一本のボーリング孔を用いて多深度での土中ガス調査が可能である。
- (5) 透水性の悪い粘性土でも土中ガス調査が可能である。
- (6) 「フィルターチップ+ガイド管」を土中に設置しておけば何度でも採取でき、地盤環境のモニタリングが可能である。
- (7) 採取ガスを単独ガスとしてヘンリーの法則を用いて評価することにより、土中空隙中の土壌ガスの有無を概略判定することができる。

この方法を用いて数多くの土中有害ガスの調査を実施したが、従来の孔内ガス濃度測定法、孔内水採取法、気液分離法に比較し、高い土中ガス濃度を検出し（特に気相部の濃度）、その工事の安全対策に対し有効性が実証されている。

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: B A T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) 柳浦 良行, 友清 悟: 土中ガスの調査・評価法の開発, 土木学会論文集, NO.638/III-49, pp.193-205, 1999.
- 4) 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, 地盤と調査(2月号), 土木春秋社, pp14-21, 1995.
- 5) 橋本 正, 坂本 稔, 高見 邦幸, 長屋 淳一: 帯水層中のメタンガス濃度の調査法について, 第27回土質工学研究発表会, pp.213-214, 1992.
- 6) 中西浩一郎: 溶解度の理論と計算, 講談社サイエンス p.22, 1982.
- 7) 柳浦良行, 森田悠紀雄, 坪田邦治, 酒巻 章: B A Tシステムを利用した地下水溶存ガスの分析例, 第23回土質工学研究発表会, pp.137-138, 1988.
- 8) 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.
- 9) 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.