

都市トンネル建設工事に伴う地中ガス調査法

荒瀬義則

Method For Surveying Underground Gas During Urban Tunnel Excavations

Yoshinori ARASE

Abstract

In recent years, much attention has been given to the problem of underground gas in connection with tunnel excavation projects. However, the actual situation at present is that it can hardly be said that adequate investigations for this problem are being conducted.

Underground gas, which includes highly flammable methane gas, may be found in two types of situations: completely dissolved in water, or partially dissolved and partially free. The important thing for pre-investigations to ascertain is what state the gas is in. The reason for this is that there is a big difference in costs required for countermeasures between the two cases.

The investigation described in this paper was conducted at point S, at the site of a projected tunnel in a mountaneous area, where it was feared methane gas was present. The investigation was conducted in three stages: the preliminary stage and A and B stages. Study of the data thus obtained demonstrated the existence of free gas. A proposal for effective countermeasures at each section of the excavation site was made accordingly.

1 まえがき

都市におけるトンネル工事において問題となる地中ガスとしては、メタン (CH_4) などの可燃性ガスの他に、炭酸ガス (CO_2)、硫化水素 (H_2S)、酸欠ガスなどがある。可燃性ガスが坑内に充満した場合、引火により火災を引き起こし、ガス特有の濃度値にある場合には坑内爆発という最悪の事態に陥る危険性がある。一方、硫化水素、酸欠ガスなどは高濃度の場合、吸引した作業員が死亡する恐れがある。

従来、坑内作業で特に問題になっていたのは、炭鉱におけるメタンガスの爆発であったが、昭和50年ごろに山形県の農業用水路トンネルの工事現場で、2度にわたって発生したメタンガスの爆発事故を契機として、土木工事の分野においても爆発事故が起こる可能性のあること

が明らかとなった。

下水道管渠布設工事や地下鉄工事などのような都市トンネルの建設に伴う地盤調査においては、土性ならびに地下水に関する問題の解明は、ほとんどの場合行われている。しかしながら、地中ガスの発生や圧気工法に伴う酸欠現象に関しては、これらが人命に係わる重大事故につながる危険性があるにもかかわらず、十分な事前調査が行われているとは言い難い現状にある。特に、前者の地中ガスの発生については、沖積低地などを中心に数多くの地域にみられるが、調査手法に関しては確立した方法がないのが実情である。

本報文では、地中ガス、特にメタンガスについての調査の手法および調査結果の解釈、ならびにその結果を対策工法へ反映させるための考え方を、S地点の調査例に基づいて紹介し、調査方法の確立に資したいと考えるもの

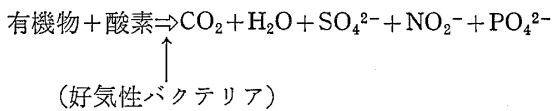
である。

2 メタンガス

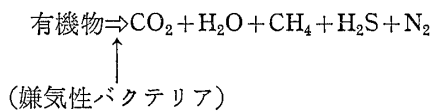
2.1 メタンガスの成因

地中におけるメタンガスの成因は，“還元性地層中で有機物が嫌気性バクテリアによって分解されるときに生成する”といわれており，模式的に次のように説明されている。

(1) 酸素を溶存する雨水が地下に浸透し，地表付近では有機物が好気性バクテリアによって分解される。すなわち，酸化性雰囲気での腐敗分解活動（好気分解）がなされ，このとき，酸素ガスをほとんど溶存しない地下水が生成される。この分解は次の式で示される。



(2) 無酸素水の浸透する深部では，有機物が嫌気性バクテリアによって分解される。すなわち，還元性雰囲気での腐敗分解活動（嫌気分解）がなされ，下記のような反応によってガスが生成する。



以上のような機構で生成するガスの賦存量の多寡は，地層中の有機物量のほかに，それが地下水中に保存される条件によっても左右される。すなわち，水を媒介とした供給，移動および地質構造によって決定されるということが出来る。

一般的に，メタンガスの発生が認められる地域としては，

- ① 石油，天然ガスの賦存する地域
- ② 石炭，亜炭の分布する地域
- ③ 泥沼池，湿地，腐植土，土砂などの中に，植物などの有機物が含まれる地域

などが挙げられる。

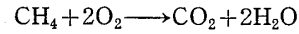
2.2 メタンガスの性質

(1) メタンガス自体は，無味，無色，無臭であるが，成因によっては硫化水素やその他の不純物を含むため，臭気を伴う場合がある。

(2) メタンガスの対空気比重は 0.559 で，炭化水素の

中で最も軽い。したがって，静かな空気中では上部に滞留する。密度は 0.717kg/cm^3 ，沸点は -164°C である。

(3) メタンガスの燃焼は，次の反応式で示される。



メタンガスの濃度が 5% 以下の場合には，火源の回りで青白く燃焼するだけであるが，5～15% の範囲では，その燃焼が他の部分へ急速に伝播する爆発現象を示す。そして，最も激しい爆発は 9.5% の濃度のときであり，燃焼温度は 1963°C であるといわれている。一方，15% 以上の濃度では，5% 以下の場合と同様の燃焼状態を示す。

この 5% および 15% を爆発限界という。

(4) 気体の水への溶解は，その分圧があまり高くない範囲で，“気体の溶解は，その気体の分圧に比例する”というヘンリーの法則に従い，次式で表される。

$$S_1 = \alpha \cdot P \quad (1)$$

ここに， S_1 ：ガスの飽和溶解量 $\text{ml}(0^\circ\text{C}1\text{atm}) / \text{l}(\text{水})$

P ：ガスの分圧 atm

α ：比例定数 $\text{ml}(\text{ガス } 0^\circ\text{C}1\text{atm}) / \text{l}(\text{水}) \cdot \text{atm}$

上式における比例定数 α は，Bunsen の吸収係数として知られているもので，表-1 に示すように，温度の上昇に伴って小さい値となっている。

2.3 メタンガスの法的規制

労働安全衛生規則の第 322 条第 2 項によれば，“可燃性ガスの濃度が爆発下限値の 30% 以上であることを認め

表-1 気体の水に対する溶解度；Bunsen の吸収係数 $\text{cm}^3(\text{ガス } 0^\circ\text{C } 1\text{atm}) / 1000\text{cm}^3(\text{水}) 1\text{atm}$

Table 1: Bunsen's absorption; Coefficient for solubility of gas in water

ガス種 温度℃	空 気		N ₂ 窒 素	O ₂ 酸 素	CO ₂ 炭 素	CH ₄ メタン	
	N ₂	O ₂					
0	28.5	18.2	10.3	23.1	48.9	1713	55.6
10	22.5	14.5	8.0	18.3	38.0	1194	41.8
15	20.3	13.1	7.2	16.6	34.2	1019	36.9
20	18.5	12.0	6.5	15.2	31.0	878	33.1
25	17.0	11.1	5.9	14.1	28.3	759	30.1
30	15.9	10.4	5.5	13.2	26.1	665	27.6
40	14.1	9.2	4.9	11.6	23.1	530	23.7
50	12.9	8.5	4.4	10.7	20.9	436	21.3
60	12.2	8.1	4.1	10.2	19.5	365	19.5
70	11.5	7.7	3.8	9.8	18.3	319	18.3
80	11.3	7.6	3.7	9.6	17.6	-	17.7
90	11.1	7.5	3.6	9.5	17.2	-	17.4
100	11.1	7.5	3.6	9.5	17.0	-	17.0

たときは、直ちに労働者を安全な場所に退避させ、火気その他点火源となる恐れがあるものの使用を停止し、かつ通風、換気等を行うこと”と定められている。

メタンガスの爆発下限値は前記のように5%であるから、 $5 \times 0.3 = 1.5\%$ 未満が法的な安全圏とみなすことができる。

3 メタンガス調査の方法

地層中におけるガスの賦存状態は、水中溶存の場合と水中溶存と併せて遊離ガスが存在する場合とがある。地中に存在する流体のもつ圧力は、その位置の水圧と大気圧の和をもって表し、これを最大圧力としている。すなわち、自然水位と対象深度との水頭差によって最大圧力が決まることになる。したがって、対象深度の水圧と大気圧の和を(1)式における圧力(P)とするとときに、ヘンリーの法則から求められる飽和溶解量(S_1)に対して、ガスの発生量が少い場合は、ガスは地下水に溶解した状態のみ地中に存在し、逆に、ガスの発生量が多い場合には、ガスが溶存状態の他に遊離ガスの状態でも存在していることを示している。逆の見方をすれば、遊離ガスは必ず地下水と接触しており、ヘンリーの法則に従ってガス分圧に比例したガスが溶存しており、一方、溶存ガスのみの場合は、ガスの組成およびその量から決まる分圧の合計値は、その位置の絶対圧(水圧+大気圧)以下であることを意味している。

メタンガスが賦存する可能性のある地域においてトンネル工事を行う場合、事前に予測しておかねばならないことは、作業現場に湧出するメタンガスの量にほかならない。その量が明らかになれば、工事の難易性および対策の検討ができるからである。前述のように、メタンガスが地下水中に溶存状態のみで存在する場合は、その層の地質構造、水理条件などから決めることができる坑内への湧水量とその中に含まれるガスの溶存量を用いて、坑内へ湧出するガスの量を予測することができる。一方、遊離状態のガスについては、ガスの流出、逸散を防ぐ不透水層(未固結の場合はCap layer、固結している場合はCap rockと呼ばれている)の下位に分布する帯水層中に貯留するケースが多い。このような場合、遊離ガスは気体として挙動するため、小さな間隙などからの噴出も考えられ、工事現場への湧出速度等を予測することは困難である。

以上のことから、メタンガス調査の骨子は、ガスが溶存しているのみの状態なのか、遊離ガスとしても存在しているのかを調査することにあると考える。調査の結果、

地中のガスが前者の状態であれば、坑内空気中のメタンガス濃度を1.5%以下にする必要換気量を計算で求め、換気対策で対処可能か否かの判定を行うことができる。一方、後者の状態であれば、ガス湧出状況の予測が困難であるため、防爆装置などを設備して工事を行うべきであると判断しなければならない。換気対策のみで工事可能か、防爆対策も必要であるかの判定は、工事費の面で大きな差が生じるため、極めて重要であると考えられる。

4 S地点におけるメタンガスの調査

4.1 予備調査

メタンガスに関する予備調査は、調査地点が天然ガス分布域に相当するか否かの文献調査から始まり、その地域の地誌、周辺の既往ボーリングデータの収集ならびに周辺家屋のガス利用状況の調査等が中心となる。また地盤調査のために実施されたボーリング孔があるような場合には、その孔において、ガス検知器を用いた簡単な方法によってガスの有無を判定することも必要であろう。

S地点は、天然ガス分布域に該当していることから、一般的な地盤調査の際に地中ガスに関する予備調査を行い、その後本調査へと移行した地点である。この予備調査においては、ボーリング孔を利用してトンネルフォーメーション付近のガスの有無の調査も行った。

予備調査の結果、次のことが明らかとなった。

- ① 調査地点の位置する広大な沖積低地には、歴史時代の始め、数多くの湖沼が存在していた。
- ② 調査地点周辺の既往ボーリングにおける観察事項の中に、孔口からのガス噴出がみられたとの記事がある。
- ③ 調査地点周辺の住民に対する聞き込み調査によれば、数軒の家で地中(深度10m以浅)から採取したガスを家庭用燃料(主として炊事用、風呂用)として現在も利用していることが判明した。
- ④ トンネルフォーメーション付近に、メタンガスの存在が確認された。

4.2 本調査

計画トンネル全線にわたって行われた本調査は、ガスの分布の状況に関する調査(A調査と呼ぶことにする)とガス賦存量を明らかにする調査(B調査)に分けて段階的に行った。

4.2.1 A調査

A調査における調査手順を図一1に示す。このA調査

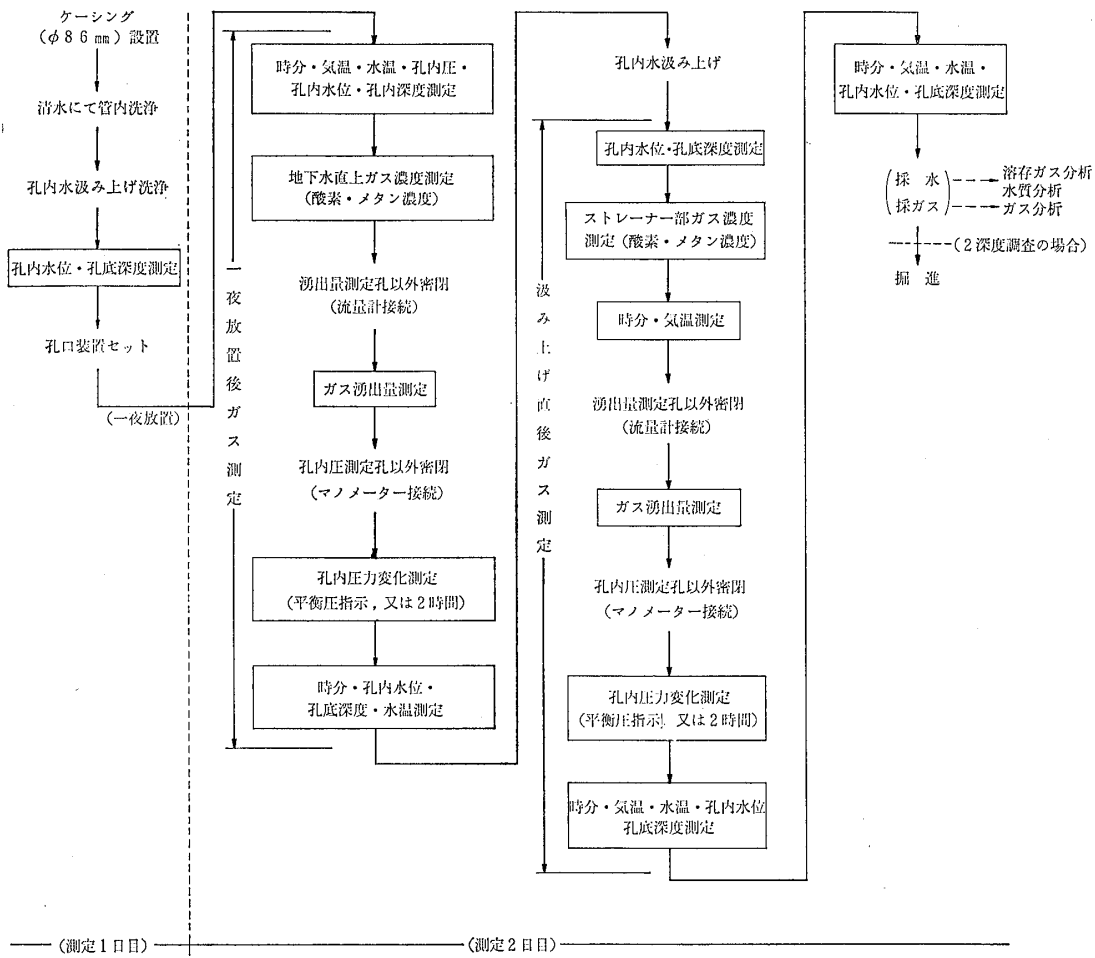


図-1 A調査の手順

Fig. 1: Flow chart of investigation A

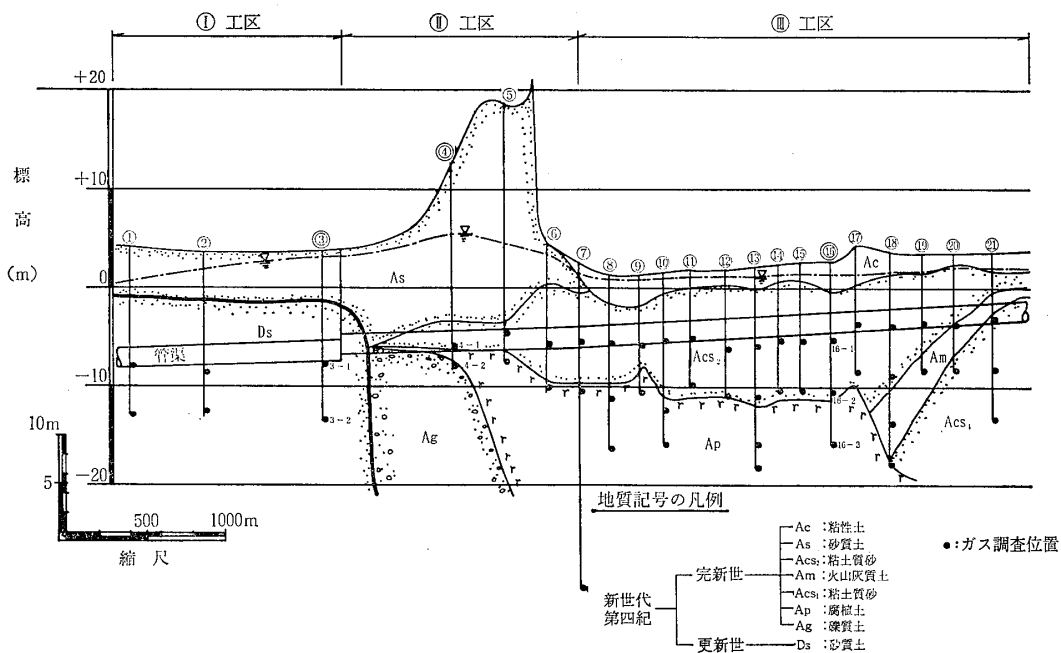


図-2 S地点におけるガス調査位置図

Fig. 2: Location of the investigation at site S

において特に留意しなければならない事項は下記のとおりである。

- ① 調査孔内の洗浄・汲み上げは十分行い、汲み上げ水の電気伝導度等の測定により、孔内水が地下水に置き換ったことを確認する。
- ② 孔口装置や測定パイプからの漏気を完全に防止する。
- ③ 採水、採ガスに際しては、空気の混入がないように注意し、溶存ガス分析用の採水に当っては、減圧に伴って発生したガスをも採取できる方法を採用する。

図一1の手順に従って行ったS地点の調査位置を図一2に示す。深度方向の調査位置については、トンネルフォーメーションとその下位約5mの位置を標準とし、そこに地質構成を考慮して決定したものである。

S地点におけるA調査の結果の1例を図一3に示す。このような調査結果を用いて、次のような検討を行う。

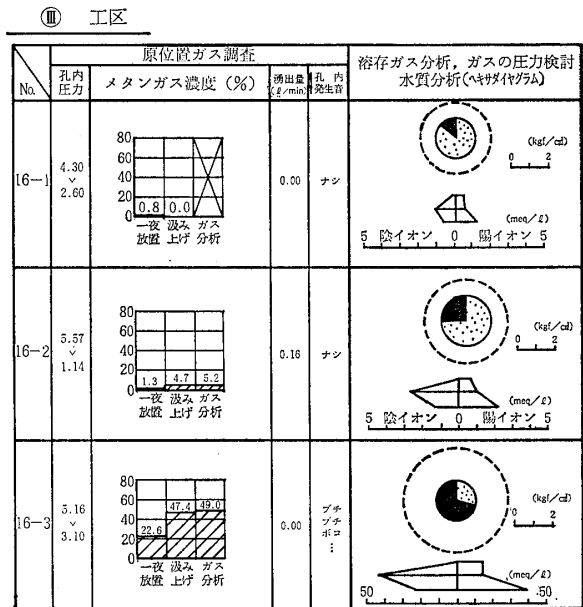
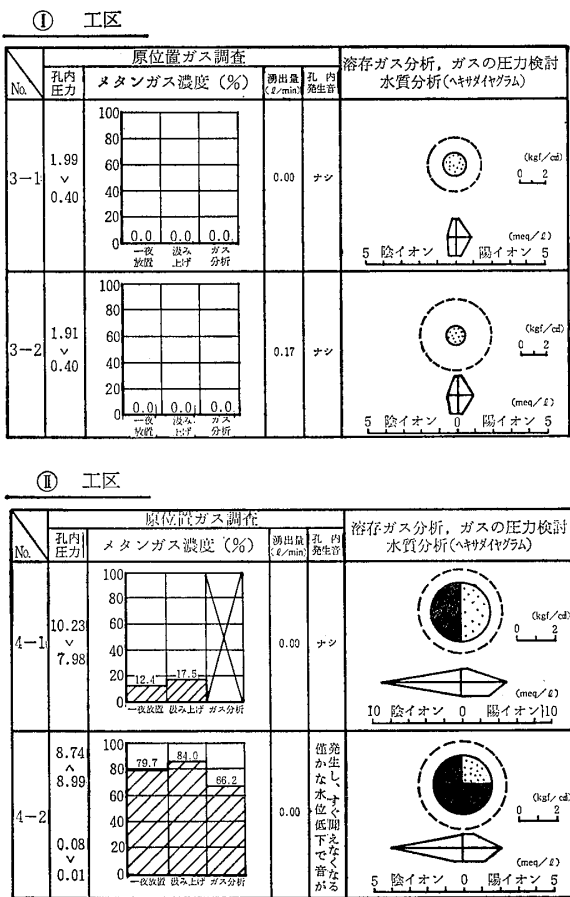
(1) 孔内圧力について

図一4に示すように、汲み上げ直後の孔内水位、孔口装置を全閉として平衡状態に達したときの孔内水位、および調査地点の自然水位をそれぞれ H_1 、 H_2 および H_3 とし、平衡水位(H_2)観測時の孔内圧力を P' とする。このとき、ボイルの法則等により、次の式が成立する。

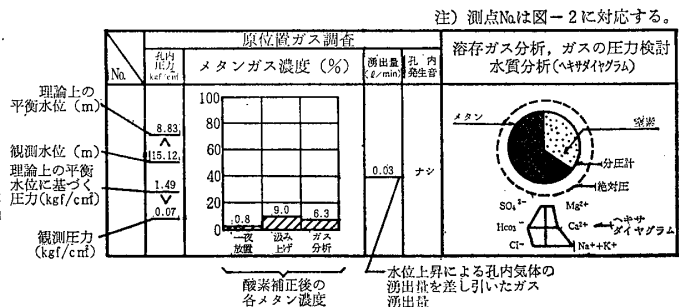
$$P' = (H_1/H_2) - 1 \quad (2)$$

$$P' = (H_2 - H_3)/10 \quad (3)$$

ここに、 H_1 および H_3 が既知であるならば、上記の2式より H_2 を算出し、図一5に示す流れ図に従って、孔内圧力からガス発生があるか否かを判定する。なお、この判定を行うにあたって、特に留意しなければならない点



凡例



図一3 A調査結果の表示例

Fig. 3: Example of investigation results from investigation A

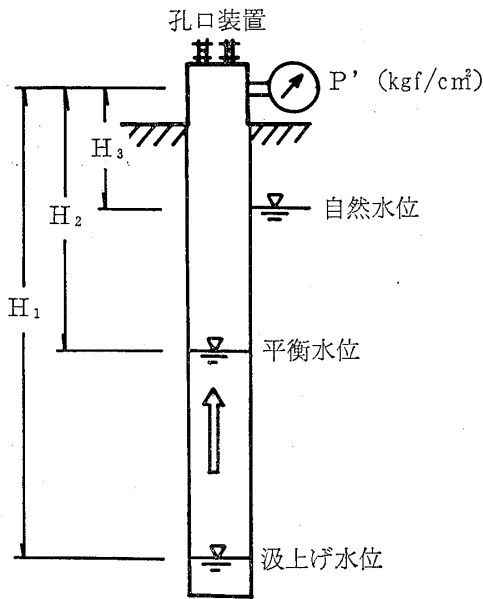


図-4 各段階の水位

Fig. 4: Water levels at each stage of the investigation

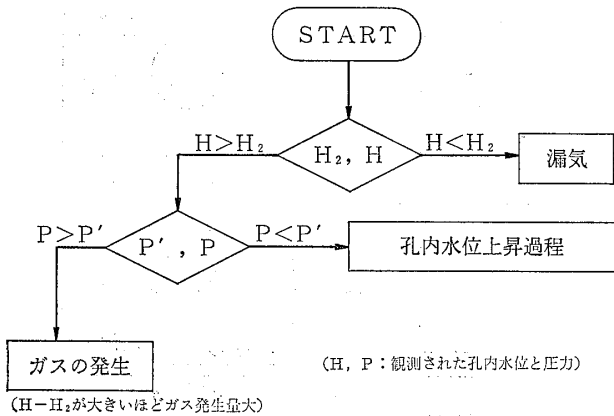


図-5 孔内圧力測定結果の解釈

Fig 5: Interpretation of results by measurement of pressure in borehole

は、次の2点である。

- ① 孔口装置や測定パイプからの漏気がないこと。
- ② 孔内水位が平衡状態に達するまで十分放置すること。

(2) 溶存ガス分析結果に基づくガスの圧力について分析されたガス(メタン、窒素)の分圧は、次式によって求められる。すなわち、メタンの分圧を P_{CH_4} 、窒素の分圧を P_{N_2} とすれば、

$$P_{CH_4} = V \times (C_{CH_4}/100) \times 1/S_{CH_4} \quad (4)$$

$$P_{N_2} = V \times (C_{N_2}/100) \times 1/S_{N_2} \quad (5)$$

ここに、

V: 温度0°Cの地下水1 lから分離するガスの0°C1気圧状態に換算した体積(ml)

C_{CH_4} , C_{N_2} : 地下水1 lから分離するガス中のメタン、窒素の体積百分率(%)

S_{CH_4} , S_{N_2} : メタンおよび窒素ガスの水に対する溶解度(表-1参照)

である。

従って、ガスの分圧計Pは、

$$P = P_{CH_4} + P_{N_2} \quad (6)$$

で表わされる。一方、このときの絶対圧 P_0 は(大気圧)+(間隙水圧)として求められ、Pと P_0 の大小関係によって、ガスの賦存状態を下記のように判定する。

- ① $P < P_0$ の場合: ガスは溶存状態で存在する。
- ② $P \geq P_0$ の場合: ガスは溶存および遊離の両状態で存在する。

4・2・2 B調査

A調査の結果、ガスが遊離状態で存在する可能性の高い箇所において、B調査を実施する。

B調査は、ガス分離器を用いて地下水中のガスを分離させ、単位地下水量当りの各成分ガス量を求め、ガスの存在状態の判定をさらに詳細に行うものである。本調査の概要は図-6に示すとおりである。

図-7は、図-2に示した測点No.4-2におけるB調

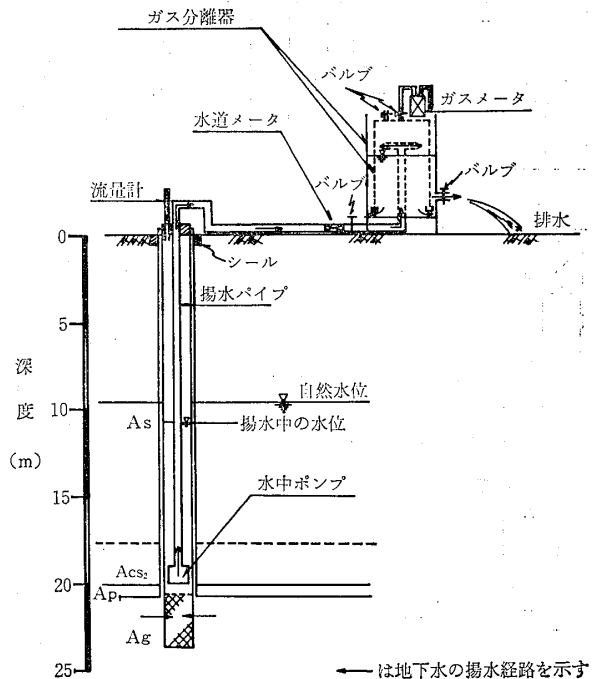
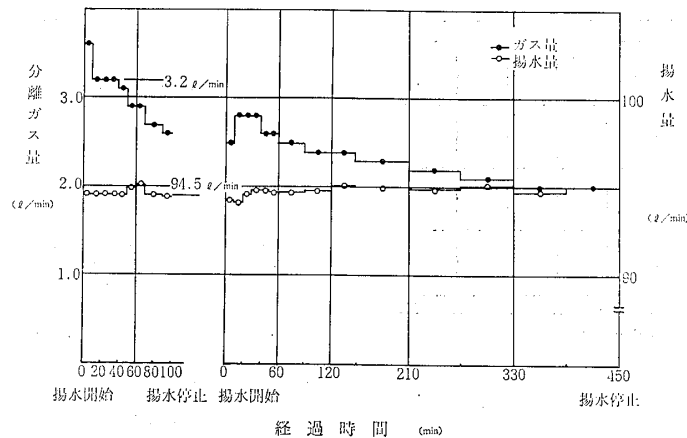


図-6 B調査の概要

Fig. 6: Outline of investigation B



図一7 B調査の結果 (No. 4-2)
Fig. 7: Results from investigation B (measurement point No. 4-2)

査の結果である。このデータの他に、ガス分離器で分離されなかったガス量も考慮し、A調査の(2)に述べた方法に準じて行った圧力検討は、次のとおりである。

① ガスの分圧計 (P)

$$P = P_{CH_4} + P_{N_2} = 1.03 + 1.28 = 2.31 \text{ atm}$$

② 調査深度における絶対圧 (P₀)

$$P_0 = P_a + P_w = 1.00 + 1.25 = 2.25 \text{ atm}$$

(P_a: 大気圧 P_w: 間隙水圧)

③ ガス賦存状態の判定

$$P = 2.31 \text{ atm} > P_0 = 2.25 \text{ atm}$$

上記の結果によって、S地点の(A_g)層に賦存するガスは、溶存状態のみならず、遊離状態でも存在することが結論づけられる。ただし、ガスの分圧計Pと絶対圧P₀との間の圧力差が小さいことから、調査箇所における遊離ガス量はそれほど多くないものと考えられる。このことは、図一7に示すように、揚水が進むに従って湧出ガス量が次第に減少している結果からも容易に判断される。

5 S地点における対策工法について

この地点のトンネル工事は、図一2に示すように、全長を①~⑩の3つの工区に分けて行われた。各工区に対して、メタンガス問題は次のようにまとめることができる。

①工区：この工区において、トンネル掘削の対象となる地層は、更新世の砂質土(D_s)層であり、この層には

メタンガスは全く賦存していない。

②工区：この工区は、更新世の砂質土(D_s)、完新世の砂質土(A_s)、粘土質砂(Acs₂)、腐植土(A_F)、礫質土(A_g)の各層が掘削対象となる区間である。これらの地層のうち、更新世の砂質土(D_s)層と完新世の砂質土(A_s)層にはメタンガスは賦存していない。また、完新世の粘土質砂(Acs₂)層にはメタンガスが賦存しているが、溶存状態にあることが確認された。しかしながら、不透水層である完新世の腐植土(A_F)層がCap layerを形成している礫質土(A_g)層には遊離状態のメタンガスも存在しており、同層上面にはいくつもの小ドームの存在が考えられた。これらの小ドームには、調査で確認された遊離ガスの量よりもさらに多くのガス量が賦存していることが予測される。

③工区：この工区において、掘削対象となる地層は、完新世の粘土質砂(Acs₂)、火山灰質土(A_m)、粘土質砂(Acs₁)の各層である。これらの各層にはメタンガスが賦存しており、いずれの調査箇所においても溶存状態にあることが確認された。また、比較的高濃度のメタンガスが賦存している完新世の腐植土(A_F)層は、トンネルフォーメーションよりも数m下位に分布しているので、トンネル工事に対して、影響を与えることはほとんどないものと考えられる。

以上に述べたような、各工区におけるメタンガスの賦存状態に対して、その対策工として次の工法が提案された。

①工区：対策工を必要としない。

②工区：換気対策、電気機械器具の防爆設備、ガス濃度に関する観測。

③工区：換気対策、ガス濃度に関する観測。

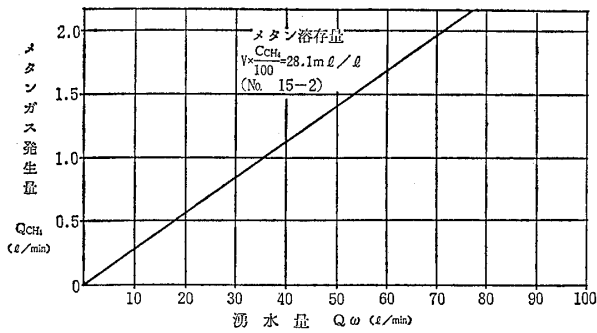


図-8 湧水量～メタンガス発生量関係図
Fig. 8: Relation between amount of water seepage and gas

上記の対策工法のうち、換気対策の基礎データとなる溶存状態のメタンガス発生量 Q_{CH_4} は次式で算定される。

$$Q_{CH_4} = V \times (C_{CH_4} / 100) \times Q_w \quad (7)$$

ここに、 V : 地下水 1 l 中の溶存ガス量 (ml)

C_{CH_4} : 地下水 1 l 中から分離するガス中のメタンの体積百分率 (%)

Q_w : 坑内への湧水量 (l/min)

である。(7)式によって計算した㊸工区におけるメタンガスの発生量は、図-8に示すとおりである。同図は施工時における一種の管理図として使用可能である。

6 あとがき

本報文では、S地点における調査を例に挙げ、都市トンネル建設工事に伴う地中ガス(メタンガス)の調査法について述べた。この調査の目的で特に重要なのは、地中のガスが地下水に溶存する状態でのみ存在するのか、それとも遊離状態としても存在するのかの判定を行うことであり、その結果によって工事費が大きく違ってくるものである。特に遊離状態のガスは、Cap layer下の小ドームに貯留しているケースが多く、このことが上記の判定を困難なものとしている理由の1つである。したがって、単に調査孔における観測からの判定結果に注目するのではなく、広く地質構造等も含めた判定を行うことが必要と考える。また、工事区間全域にわたって、数多くの調査をより安価に行うことができる手法の開発も急務であると考えられる。