

# 溶存メタンセンサーによる原位置メタン量測定

## In-Situ Measurement of Dissolved Methane by Methane Sensor

山本 陽一 YOICHI YAMAMOTO  
高橋 直樹 NAOKI TAKAHASHI  
黒川 幸彦 YUKIHIKO KUROKAWA

地下水中に高濃度に溶解しているメタンガス測定が可能なセンサーを開発し、原位置メタン量測定に対する適用性について検討を進めた。開発したセンサーの室内性能試験を行い、応答性や測定精度に関する基本性能のほか、供給水量依存特性、メタンガス以外のガス混入による影響を明らかにした。また、幌延町において孔内原位置測定試験を実施し、精度の高い孔内地下水のメタンプロファイルを取得できた。

**キーワード**：メタンセンサー、溶存ガス、原位置試験、孔内試験、幌延

The sensor that can measure high concentrations of methane dissolved in underwater was developed and its applicability for in-situ measurement was investigated. Laboratory tests have been performed on the methane sensor and various capabilities such as responsiveness or accuracy of the sensor were cleared. Results of the in-situ borehole measurement tests, which were conducted in Horonobe, Hokkaido, high accuracy in acquiring methane profile of the underwater in the borehole was obtained.

**Key Words**: Methane Sensor, Dissolution Gas, In-Situ Test, Borehole Test, Horonobe

### 1. はじめに

一般に、堆積岩地域はメタンガスを包蔵していることが多い。特に、天然ガス田が分布している地域の地下利用においては、爆発災害を未然に防止する目的で、事前調査段階において地層中のメタン量を定量的に把握することが重要である。

地層内においてガスは地下水に溶解した状態で存在する。このため、ガス量やガス組成を正確に求めるためには、ガスの溶解が圧力と温度に依存することから、圧力を保持した状態で採取した試料に対して分析を行う必要がある。しかしながら、この方法では分析にいくつかの工程を経て時間を要することや、採水器の昇降過程で孔内水の乱れを生じさせるおそれがあり、連続的な測定には限界がある。したがって、地下水中に溶存しているガスを原位置で直接測定することが望ましいが、これに必要なセンサー開発は十分には進んでおらず、特に、深度数百メートル以上の高水圧下で高濃度に溶存しているメタンガスを対象とした場合には、測定可能なセンサーは存在しないのが実情である。

そこで、本研究は深度 1,000m に及ぶ水中に高濃度に溶存するメタンガス測定が可能なセンサー（溶存メタ

ンセンサー）を開発し、地下水中のメタンプロファイルの取得を目的とした調査やメタンガスの監視・モニタリング機器としての利用を想定した溶存メタンセンサーの適用性確認と原位置測定手法の確立を目指した研究開発を進めた。

本論文では、開発した溶存メタンセンサーの概要を示し、室内性能試験から明らかになったセンサーの諸性能について考察する。また、北海道幌延町において実施した孔内原位置試験結果を示し、ボーリング孔を利用した検層型の原位置測定に対するセンサー適用性について、取得した孔内メタンプロファイルとあわせて報告する。

### 2. 溶存メタンセンサーの概要

溶存メタンセンサーは、水中に溶存しているメタンガスを測定・検出することを目的に、CT&T社により開発されたセンサーである。本研究では、既存型の溶存メタンセンサーをベースにした試作品からはじめ各種試験を通して問題点<sup>1),2)</sup>を明らかにし、構造の見直し等センサーの改良と開発を進めた。その概観を写真-1に示し、構造概略図を図-1に示す。



写真-1 溶存メタンセンサー概観

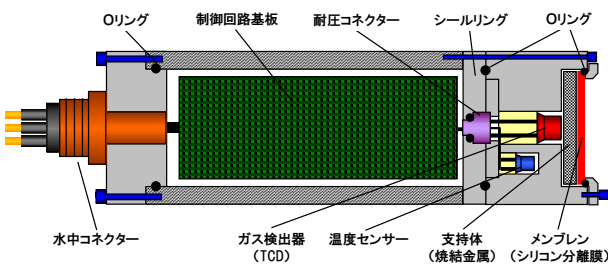


図-1 センサーの構造概略

その測定原理は、メンブレン（分離膜）を介して水中の溶存メタンガスを気化分離させ、分離したメタンガスをセンサー内のガス検出器で測定するものである。ただし、メンブレンには特殊シリコン製の高分子膜を使用しており、気体であればその種別によらず透過させる。ガス検出器には熱伝導率型の検出器（TCD）を用いている。また、深度 1,000m において飽和濃度相当の溶存メタンガスの測定を可能とするよう、測定レンジは 2mmol/l ~150mmol/l に設定した。

### 3. 溶存メタンセンサーの諸性能

#### (1) 試験装置

図-2 に試験装置の系統図を示す。この試験装置は、溶媒としての水に所定の圧力下でガスを溶解させる溶解槽、定流量ポンプ（max 99ml/min）、溶存メタンセンサーを設置する圧力容器を基本構成とし、径路中にはガス分析のための試料採取管、圧力容器内には温度圧力測定のための温度センサー、圧力センサー（max 10MPa）が配置されている。溶解槽には、ガスの溶解を効率的に行うためモータ制御の攪拌翼を取り付けている。一次圧はガスボンベから供給される。

径路中には油圧ポンプとアキュムレータから成る昇圧装置を備えており、ガスボンベからの供給によらない圧力容器内の昇圧を可能としている。各種センサー

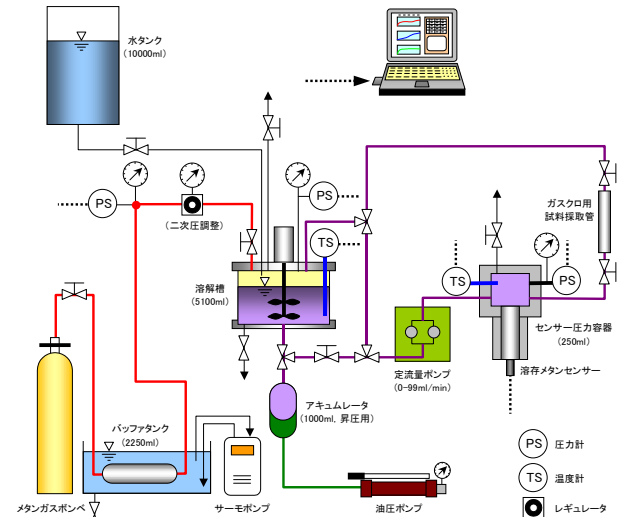


図-2 試験装置系統図

の出力はデータロガーを介してパソコンに自動収録される。圧力容器内への溶液の供給およびポンプ循環は、圧力容器内のノズル先端から溶存メタンセンサー検出部上面中央に向けて噴射する形で行われる。ノズル先端（内径 1.755mm）からセンサーメンブレンまでの高さは 15mm に設定している。

#### (2) センサー校正

図-3 に、センサー出力電圧とメタンガス圧力との関係を示す。試験はセンサーを圧力容器内に設置した状態で、容器内のメタンガス圧力を段階的に変化させて行った。校正は使用するガス検出器に対するものとなることから、センサーにメンブレンは取り付けず圧力容器にはドライ状態でガスを直接流入させて試験を行った。図から、ガス圧力が高くなるほどセンサー電圧は低下する傾向を示すことが分かる。したがって、使用している TCD 型のガス検出器はメタンガス圧力を測定することができる。

理想気体の法則にほぼ従う範囲で気体が液体にわずかに溶解する時、気体の液体への溶解はヘンリーの法則に従うことが知られている。一般に、ヘンリーの法則は溶液中の気体成分 A の濃度を  $c_A$ 、気相での気体成分 A の分圧を  $p_A$  とすると次式のように表される。

$$p_A = Hc_A \quad (1)$$

または、

$$c_A = \frac{1}{H} p_A \quad (2)$$

$H$  : 2 相関の分配平衡定数（ヘンリー定数）

このことから、溶液中に溶解している気体の濃度もしくは物質量は気体の分圧に比例することが分かる。したがって、使用する検出器はセンサー内部に透過したメタンガス分圧を測定しているとすれば、気体の濃度と分圧は比例関係にあるので、センサー電圧  $U_V$  とメタン分圧  $p_M$  の関係に比例定数  $K$  をかけることにより、溶液中に溶存するメタン濃度  $c_M$  を表示することが可能になる。

$$c_M = Kp_M \quad (3)$$

まず、図-3 のメタン分圧とセンサー電圧に関する試験結果を回帰して次式を得た。

$$p_M = 365 \exp\left(-\frac{U_V}{0.654}\right) - 1.30 \quad (4)$$

$p_M$ : メタン分圧[atm],  $U_V$ : センサー電圧[V]

気体の液体への溶解度は温度により変化するが、メタンガスの水への溶解度は既往の試験から表-1<sup>3)</sup>のように与えられている。 $\alpha$  は気体の液体への溶解度を表す Bunsen 吸収係数で、気体の分圧が 1atm の時の温度  $t$  [°C] の溶媒 1ml に溶解する気体の体積[ml] を標準状態 (0°C, 1atm) に換算した値で表される。この関係について、図-4 に示すように次式で表される回帰式を得た。

$$\alpha = 1 / (4.769 \times 10^{-7} t^4 - 1.157 \times 10^{-4} t^3 + 5.500 \times 10^{-3} t^2 + 5.367 \times 10^{-1} t + 18.058) \quad (5)$$

溶存メタン濃度  $c_M$  の単位をモル濃度[mmol/l] で表すとした場合には、式 (3) は次のように書き直される。

$$c_M = \alpha \frac{1000}{22.4} p_M \quad (6)$$

$c_M$ : 溶存メタン濃度[mmol/l],  $\alpha$ : 溶解度係数[ml],  $p_M$ : メタン分圧[atm]

式 (4) の検出器の電圧から求められるメタン分圧  $p_M$  [atm] と式 (5) の溶解度係数  $\alpha$  から、メタンセンサーの校正値を与えることができる。なお、センサー電圧とメタン分圧の関係は検出器固有の値であり、式 (4) は本試験で使用したメタンセンサーの特性値を与えるものである。

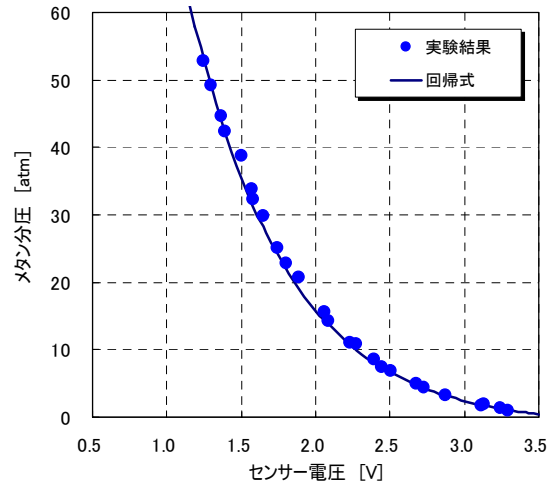


図-3 メタン分圧とセンサー電圧の関係

表-1 メタンガスの水に対する溶解度 (Bunsen 吸収係数)<sup>3)</sup>

$t$ [°C]	0	10	15	20	25	30	40	50	60	70	80	90	100
$\alpha \times 10^2$	5.56	4.18	3.69	3.31	3.01	2.76	2.37	2.13	1.95	1.83	1.77	1.74	1.70

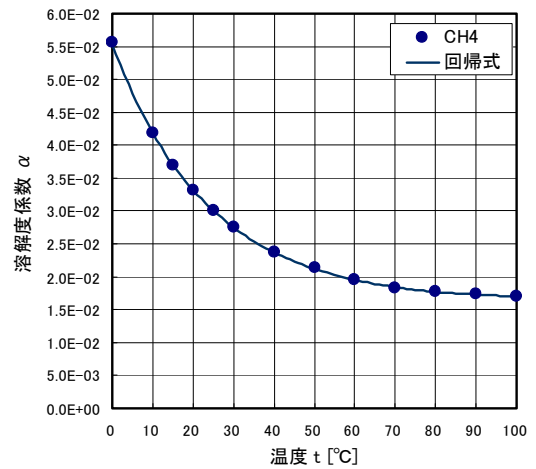


図-4 メタンガスの水に対する溶解度係数と温度の関係

### (3) 応答特性

溶存メタンセンサーに対する典型的な試験結果を、図-5 に示す。試験は、あらかじめ溶解槽において所定の圧力条件で飽和状態までメタンガスを溶解させた溶液を、ポンプ水量 90ml/min の条件で循環させて行った。図-5 の例では、圧力容器内の圧力は試験開始から約 1.9MPa を維持しているが、測定開始時点の溶存メタンセンサー検知部のセンサーヘッド内圧力は大気圧状態にある。測定開始から徐々にセンサー内部にガスが透過されてセンサー内のガス分圧が高まりセンサーで計測される溶存メタン濃度は上昇していくことに

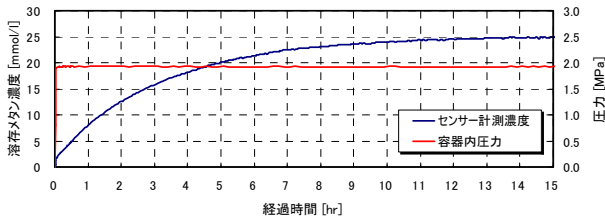


図-5 溶存メタンセンサーに対する典型的な試験結果

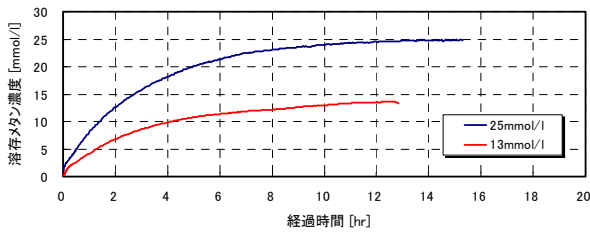


図-6 計測濃度と時間の関係

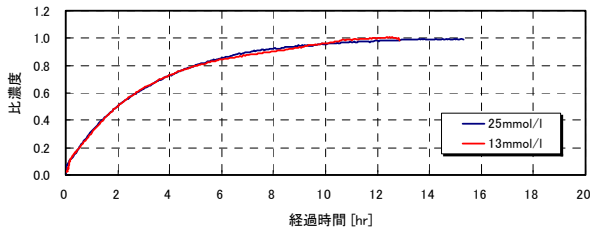


図-7 比濃度と時間の関係

なる。測定原理から、分離膜を境にしてセンサーの内と外の溶存メタン濃度が等しくなった時点で平衡状態となり定常な挙動を示すことになるが、図に示す結果からは、平衡状態つまり試験に供した溶液中の溶存ガス濃度の絶対量を示すまでには、13hr程度の時間を要していることが分かる。

図-6は、異なる溶存メタン濃度で実施した試験結果について計測濃度と時間の関係を示している。また、同図の計測濃度を平衡状態に至った時の濃度で正規化して比濃度に対して比較したものを、図-7に示す。比濃度に対する比較から、試験に供した溶液中の溶存メタン濃度に係らず、比濃度と測定時間の間には一義的な関係が存在していることが明らかである。このことは、センサーで計測される濃度変化がガス濃度またはガス分圧に比例していることを表している。

このような現象は分離膜の気体透過性と密接に関係しており、高分子膜の気体の透過が濃度勾配を駆動力として行われ、その移動速度は物質の拡散に関するフィックの法則に従い濃度勾配と比例関係にあるとして説明<sup>4)</sup>されることから理解することができる。

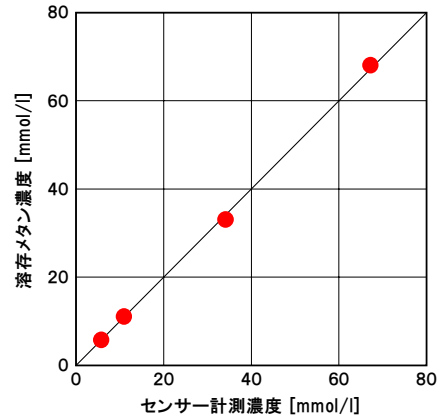


図-8 センサー計測濃度とサンプルガス分析結果の比較

#### (4) 測定精度

図-8に、平衡状態に至った時のセンサー計測濃度と試験時のサンプリング試料のガス分析結果より求めた溶存メタン濃度を比較して示した。両者の関係は1:1の良好な対応関係を示しており、センサーの測定値は溶存メタン濃度測定において高い測定精度を有していることが分かる。

#### (5) 水流の影響

図-9に、メタンガス飽和溶存状態の水を所定のポンプ水量で循環させ溶存メタンセンサーに対する水流の影響を調べた結果を示す。図から明らかなように、供給水流量が増加するほど測定時間は短くなる傾向を示す。

溶液中の希薄な成分が膜を透過する場合、液層側の膜表面近傍に存在する境界物質移動抵抗と呼ばれる抵抗が無視できなくなり、実際の透過速度は膜本来の透過速度より小さくなることが知られている。田中ら<sup>5)</sup>は同種の高分子膜に対して行った水中に溶存しているメタンガスの透過性に関する試験から、溶存メタンに対する透過係数は供給水流量の増加とともに増加し、流量の少ない範囲では比例的であることを明らかにしている。したがって、溶存メタンセンサーによる測定を効率的に行うためには膜表面に水流を供給する必要があることが理解される。

水流の影響を定量的に表すために、図-9の結果に対してポンプ供給水流量 90ml/min を標準 (1.0倍) として、それぞれの流量における試験結果の測定時間を縮小してこれに一致する時間倍率を、図-10のように求めた。図中の凡例がフィッティングした時間縮尺の倍率を示している。水流を供給しない場合の結果はその他の流量の結果と完全に一致させることができず、応答性状の違いが認められる。

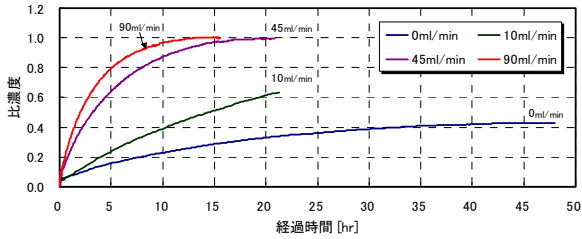


図-9 溶存メタンセンサーの応答に及ぼす水流の影響

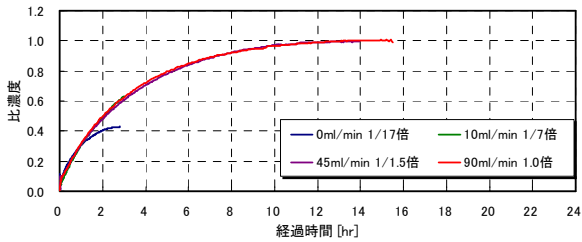


図-10 水流影響定量化のためのフィッティング結果

図-11 は、図-10 のフィッティングで得られた時間倍率を基に、水流 0ml/min の時間倍率を 1.0 としてそれぞれの水流における時間倍率を算定した結果とポンプ供給水流量の関係を示している。さらに、図-12 にノズル先端の断面積でポンプ供給水流量を除いた供給水流速と時間倍率の関係を示した。ここで示したポンプ供給水流量と流速はノズル先端での値であり、センサーメンブレン表面における実際の流量・流速を表すものではないことに注意する必要がある。フィッティングで得られた時間倍率は流量および流速とは正比例の関係にはないが、流量 90ml/min では水流を与えない場合に比べて測定時間は 1/17 倍と大幅に短縮されていることが分かる。

#### (6) メタン以外のガス混入による影響

溶存メタンセンサーに使用している分離膜は、溶液中の気体であればその種類を問わずにセンサー内に透過させる。本研究の溶存メタンセンサーにはメタン検出用に調整した TCD 型の検出器を用いているが、その原理上、メタン以外のガスが混入している場合にセンサー出力に及ぼす影響が懸念される。そこで、メタン、二酸化炭素、窒素の 3 種類のガスについて、ガス圧を変化させて検出器の出力変化を調べた。試験は、センサー校正方法と同様に、メンブレンを外したセンサーを圧力容器内に設置した状態でガスを直接流入させて行った。

図-13 は、これら 3 種類のガスそれぞれ 100% におけるガス圧（ガス分圧）と先の校正値から与えられるセンサーの出力濃度との関係を示している。ここで、溶

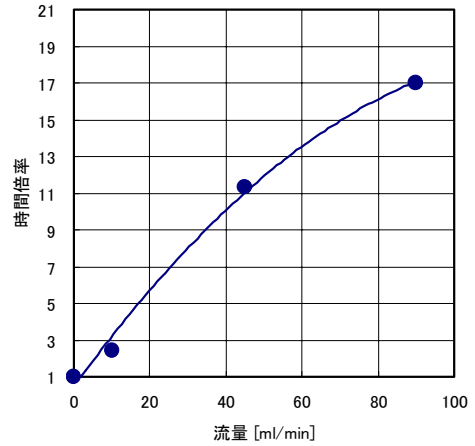


図-11 供給水流量と測定時間倍率の関係

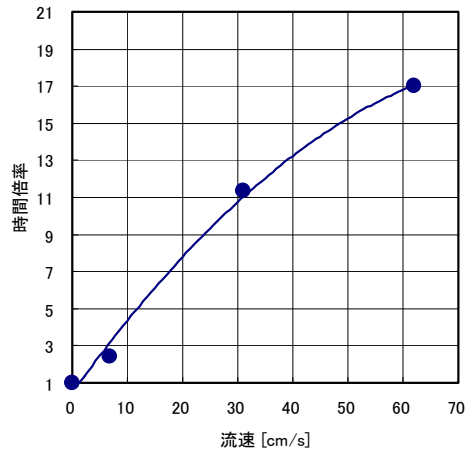


図-12 供給水流速と測定時間倍率の関係

存ガス濃度は、メタンガス 20℃での溶解を仮定している。メタンについては、式 (6) で表されるようにガス分圧と濃度には正の比例関係が成立している。これに対して、二酸化炭素と窒素ではガス分圧 20atm 程度まではセンサー出力の変化はほとんどなく、これ以上の分圧でセンサーへの影響が生じる結果となっている。同じ分圧において、二酸化炭素の方が窒素よりも影響の割合は大きい、いずれもメタンに比べると小さな出力に止まっている。ただし、メタン以外のガスについて出力された濃度は実際の濃度を表すものではないことに注意する。このように、メタンセンサーに使用している TCD 型の検出器は、測定の対象としているメタンガスに特化してその分圧を正確に測定できることが理解できる。

図-14 は、メタンと二酸化炭素が混合している状態での二酸化炭素分圧とセンサー出力濃度の関係を示している。試験は、圧力容器内をまずメタン 100%、10.8atm の状態にして、その後所定の混合率になるよう二酸化



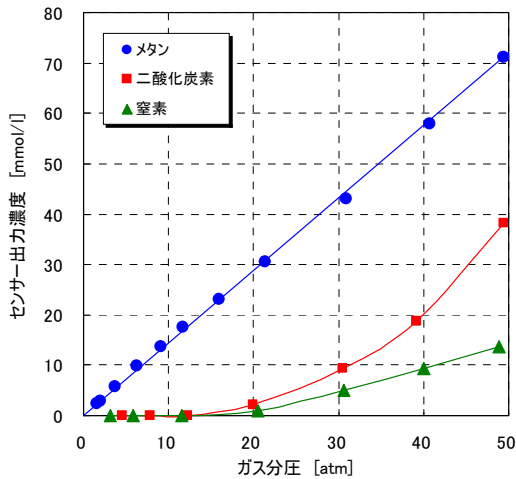


図-13 センサーの出力濃度に及ぼすガス種の影響

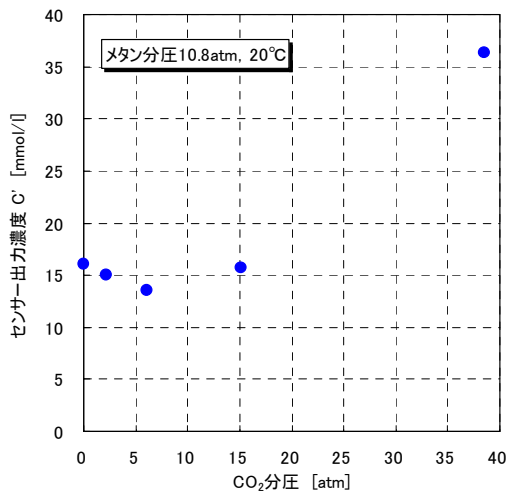


図-14 二酸化炭素混入によるセンサー出力濃度の変化

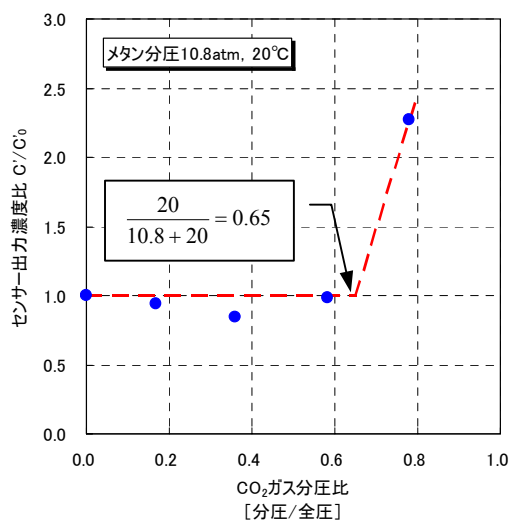


図-15 センサー出力濃度比と二酸化炭素分圧比の関係  
( $C'_0$ :メタン分圧 10.8atm の時のセンサー出力濃度,  
 $C'$ :CO<sub>2</sub>混入時のセンサー出力濃度)

炭素の圧力を徐々に上げて混入量を増加させるように行った。図-15 は初期のメタン 100%, 10.8atm の時の (二酸化炭素の分圧 0atm) 濃度  $C'_0$  で正規化したセンサー出力  $C'$  に対する濃度比  $C'/C'_0$  と二酸化炭素の分圧比の関係に整理して示している。

センサーの出力濃度は二酸化炭素の分圧比が 0.6 まではほとんど変化しておらず、二酸化炭素混入による影響は生じていないと考えることができる。本試験条件において二酸化炭素の分圧が 20atm の時の二酸化炭素分圧比は 0.65 となるので、図-13 に明らかであったように、これ以下の二酸化炭素分圧比においては二酸化炭素混入による影響が生じない範囲になる。逆に、二酸化炭素分圧比が 0.65 を超えて二酸化炭素分圧比 0.78 の時のセンサー出力濃度比は、本来のメタン濃度の約 2.3 倍と二酸化炭素混入による大きな影響を認めることができる。ちなみに、二酸化炭素分圧比が 0.78 の時の二酸化炭素分圧は 38.5atm であり、この時のセンサー出力濃度 (図-14) はメタン、二酸化炭素それぞれの分圧に対して出力された濃度 (図-13) の単純和となっていることに気付く。

これらのことから、地下水中にメタン以外のガスが混入している場合でも、メタンが主体である場合には、メタン以外のガス混入による影響は少ないと考えられる。例えば、メタンガス 70%, 二酸化炭素が 30% の場合には、深度 700m までは二酸化炭素の分圧は最大でも  $70\text{atm} \times 0.3 = 21\text{atm}$  となるので、図-13 の結果から数パーセントの誤差内に入るものと考えられる。

#### 4. 孔内原位置試験

##### (1) 調査地の概要

試験は北海道幌延町の日本原子力研究開発機構 (以下、機構) が所有する試験孔 (HDB-5) において実施した。ここでは、機構により高レベル放射性廃棄物の地層処分技術に関する研究・開発の一環として、深地層科学に関する各種調査・研究のほか、図-16 に示すような地下 500m に及ぶ立坑と水平坑道から成る地下研究施設の建設が計画・実施されている<sup>6)</sup>。

また、これまでに実施された試験孔調査からメタンを主成分とするガスを胚胎する堆積岩の存在が明らかとなっている<sup>7)</sup>。このため、地下施設建設の安全管理や地下掘削に伴う周辺環境の変化、さらには地下水・物質移行特性等の深地層研究に対してメタンガスの存在による影響が懸念されており、地下水中のメタンガスを正確に測定してこれらの懸念に反映させることが求められていた。

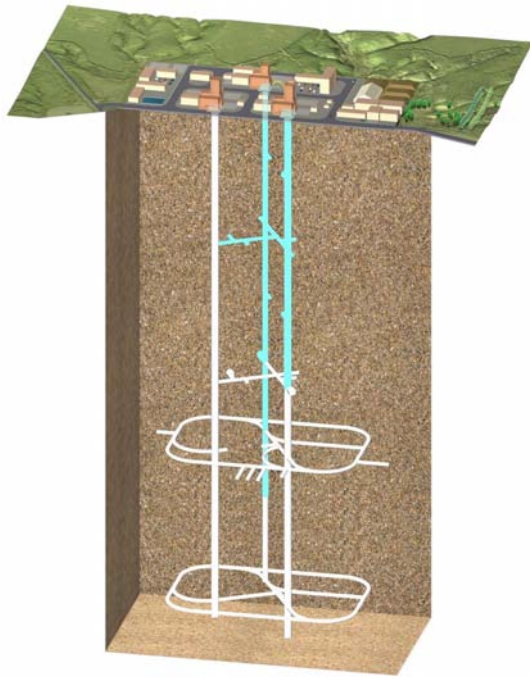


図-16 地下施設のイメージ<sup>6)</sup>

(2) 試験内容

試錐孔のケーシングプログラムを図-17に示す。試錐孔の最大深度はGL-520mである。表層からGL-68.5mまでが声間層と考えられる珪藻質泥岩で、それ以深は次第に硬質化し典型的な稚内層と考えられる硬質頁岩へ変化している。

試験時の測定状況を写真-2に示す。溶存メタンセンサーによる測定は、GL-88m、-208m、-283m、-372m、-441m、-490mの6深度で行った。また、試錐孔内のメタン濃度分布を把握し、溶存メタンセンサー測定値と比較する目的で、試錐孔内の採水もあわせて実施した。ガスの水への溶解は圧力に依存することから、採水は原位置の圧力を保持した状態でサンプリング可能な採水器を用いて行った。図-18に、封圧採水器<sup>8)</sup>の構造概要を示す。

先に示した溶存メタンセンサーに対する室内試験から、センサー応答に供給水流量依存性があり、流量90ml/minと水流を与えない場合の測定時間は17倍程度の違いが生じていることが明らかであった。このため、原位置測定の効率を高めるためにはセンサーへの水流の供給を可能とする装置が不可欠と考え、孔内用水流発生装置を製作して、これと溶存メタンセンサーを組み合わせたプローブを孔内に投入して測定を行った。図-19に、製作した水流装置の構成図を示す。水流は駆動部に連結されたインペラーを回転させて発生させる。インペラーを回転させることにより、下向きの方に水流を発生させてセンサー検知部の透過膜に水

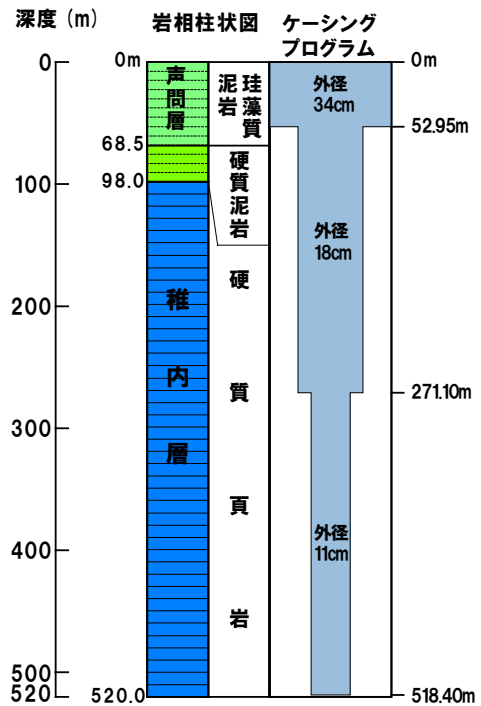


図-17 ケーシングプログラム (HDB-5)



写真-2 孔内原位置測定試験状況

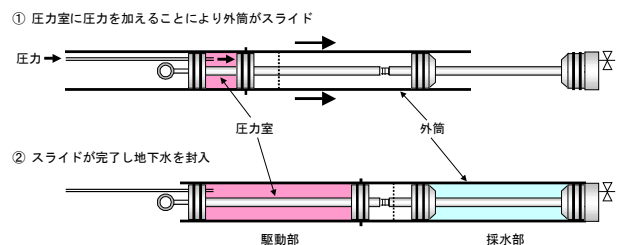


図-18 封圧採水器の構造概要<sup>8)</sup>

流を供給する。下向き水流を発生させることにより、ノズル上端周辺の液体をノズル内に吸い込むことができる。ノズル上端位置のジャケットに設けたスリット

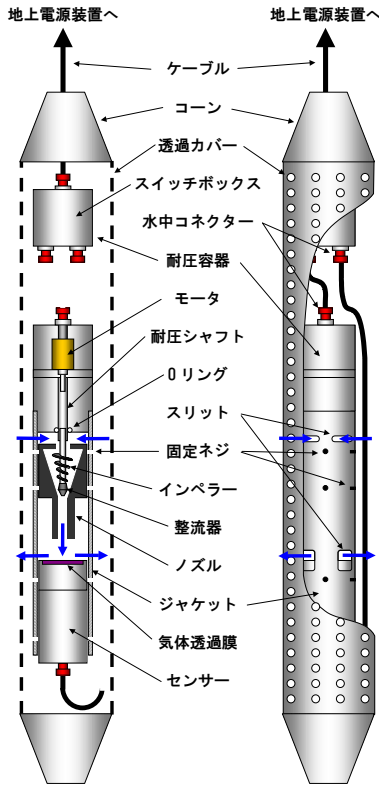


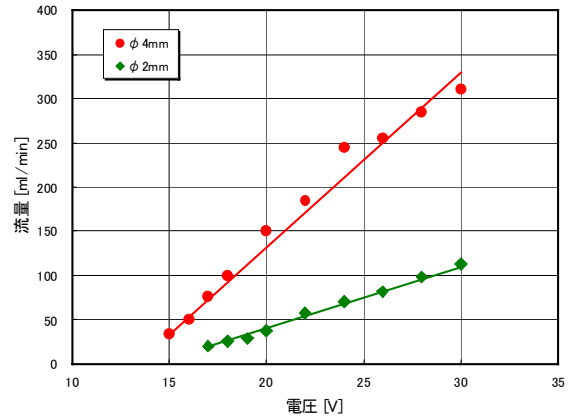
図-19 水流装置の構成概要

は液体吸入用で、排出用のスリットはセンサー上端位置に設けている。これにより、センサー検知部に測定深度の地下水を常時供給することができる。図-20 に検定結果を示す。ノズル先端から噴射される供給水の流量は、モーターに供給される電圧を変化させることにより調整可能である。

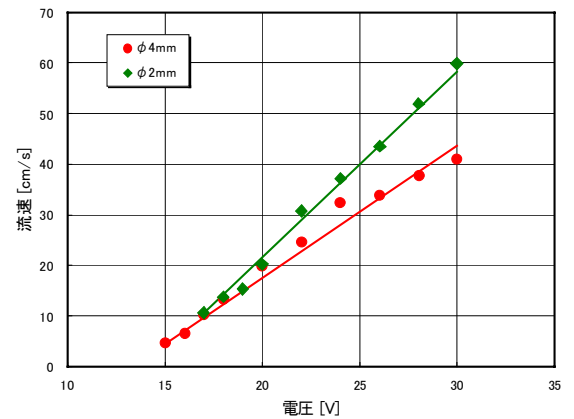
(3) 測定結果

a) 水流装置供給水設定条件の検討

深度 GL-88m において行った水流装置の供給水量とノズル先端の口径の異なる場合のセンサー応答の比較を、溶存メタン濃度と測定経過時間の関係として図-21 に示す。図中の凡例は、ノズル先端部の口径と水流装置の検定結果 (図-20) から求めたノズル先端部における供給水流量および供給水流速を示している。ノズル口径  $\phi 4\text{mm}$ ,  $0\text{ml}/\text{min}$  と  $110\text{ml}/\text{min}$  の測定結果は測定時間内に平衡状態に至っておらず両者の応答は同程度である。このことからノズル口径  $\phi 4\text{mm}$  からの供給水流量が  $110\text{ml}/\text{min}$  (供給水流速  $15\text{cm/s}$ ) 程度の条件では、ノズル先端からセンサー分離膜表面に到達する過程で水流は減衰し、センサーに対して効果的な水流が供給されていないと考えられる。ノズル口径  $\phi 4\text{mm}$  供給水流量  $300\text{ml}/\text{min}$  (供給水流速  $40\text{cm/s}$ ) とノズル口径  $\phi 2\text{mm}$  供給水流量  $113\text{ml}/\text{min}$  (供給水流速  $60\text{cm/s}$ )



(a) 供給水流量とモーター電圧の関係



(b) 供給水流速とモーター電圧の関係

図-20 水流装置の検定結果

の測定結果は測定時間中に平衡状態に達しており、この深度の溶存メタン濃度が  $16\text{mmol/l}$  であることを示している。

図-22 は平衡状態に達したノズル口径  $\phi 4\text{mm}$  供給水流量  $300\text{ml}/\text{min}$  (供給水流速  $40\text{cm/s}$ ) とノズル口径  $\phi 2\text{mm}$  供給水流量  $113\text{ml}/\text{min}$  (供給水流速  $60\text{cm/s}$ ) の測定結果を、比濃度に対して室内試験結果ポンプ供給水流量  $90\text{ml}/\text{min}$  (供給水流速  $62\text{cm/min}$ ) の測定結果と比較したものである。平衡状態に達した測定時間は、孔内測定  $\phi 4\text{mm}$  で約  $10\text{hr}$ ,  $\phi 2\text{mm}$  で約  $12\text{hr}$ , 室内試験約  $13\text{hr}$  となっている。供給水流速は室内試験の場合が  $62\text{cm/s}$  と最も速いが、応答時間は流量の多い場合のほうが速くなっている。このことから、本試験で採用したセンサーへの水流の供給方法として、メンブレンの表面積に対してノズル口径が小さいことによる影響が生じている。また、同図においてノズル口径  $\phi 4\text{mm}$  供給水流量  $300\text{ml}/\text{min}$  の応答が最も高いが、図-20 に示したようにモーターへの供給電圧もノズル口径  $\phi 2\text{mm}$  供給水流量  $113\text{ml}/\text{min}$  に比べて小さいことから、測定装置の設定として効果的であることが分かる。



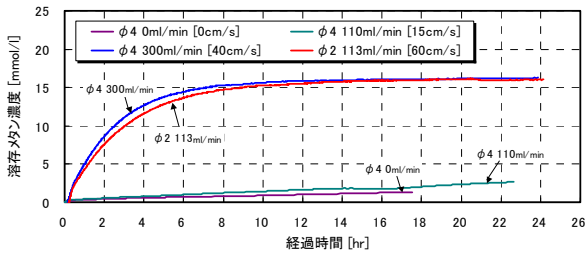


図-21 溶存メタン濃度測定結果の比較 (GL-88m)

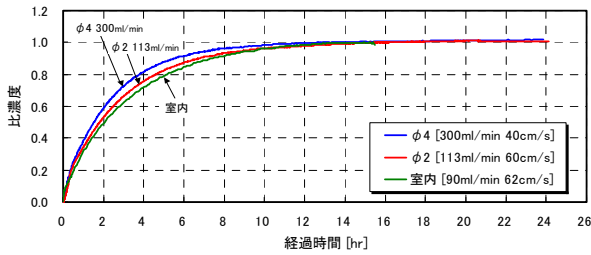


図-22 比濃度に対するセンサー応答の比較

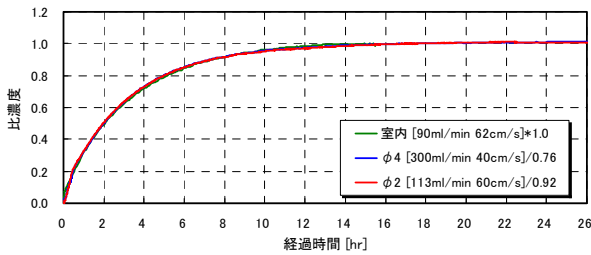
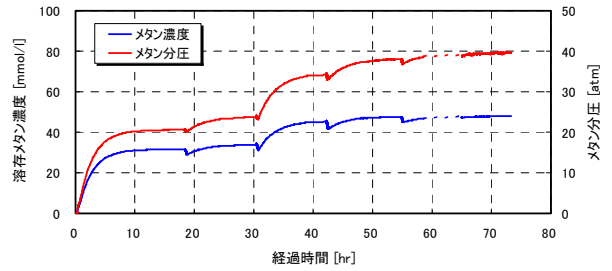


図-23 孔内測定結果と室内試験結果のフィッティング

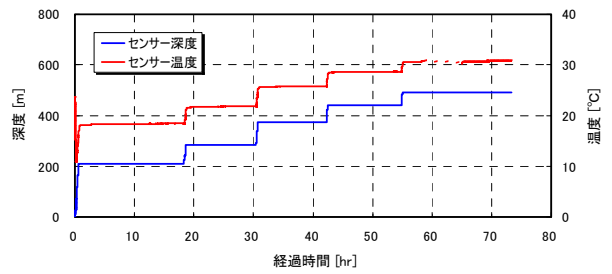
図-23 は、図-22 に示した GL-88 m における測定結果を室内試験結果に一致させるよう孔内測定結果の測定時間の倍率を変化させて行ったフィッティングの結果を示している。ノズル口径  $\phi 4\text{mm}$  の結果を 1/0.76 倍 (1.315 倍)、 $\phi 2\text{mm}$  の結果を 1/0.96 倍 (1.052 倍) に時間軸を引き伸ばした場合に室内試験結果と一致した。孔内測定結果は室内試験結果に対してその応答性状は相似形でよく一致している。したがって、製作した水流装置による水流の供給は安定して行われていることが理解できる。

b) メタン濃度孔内深度分布測定

図-24 に溶存メタン濃度出力、メタン分圧出力、センサー温度、センサー深度の経時変化を示し、図-25 に溶存メタン濃度出力とセンサー温度の深度分布を示した。測定は GL-208m、-283m、-372m、-441m、-490m の 5 深度で連続して行った。途中の測定時間 59 時間から 65 時間にかけての図-24 中の破線部は、停電によりセンサーの測定が停止した区間である。水流装置はノズル口径  $\phi 4\text{mm}$  供給水流量 300m<sup>3</sup>/min (供給水流速 40cm/s)



(a) 溶存メタン濃度とメタン分圧



(b) センサー温度と深度

図-24 検層式孔内測定結果の経時変化

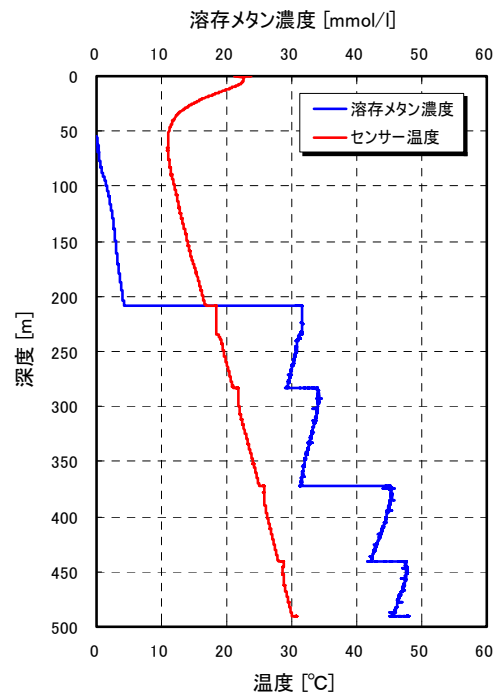


図-25 検層式孔内測定結果の深度分布

に設定して実施した。

図-24 の経時変化から、センサーで測定される溶存メタン濃度とメタン分圧は、それぞれの測定深度において約 10hr で平衡状態に達していることが分かる。

図-25 の深度分布から、所定の深度で一旦平衡に達した後、センサー移動降下過程においてメタン濃度が一時的に減少するセンサーの応答変化が認められる。所定の深度に到達・静置後は上昇に転じていることから、

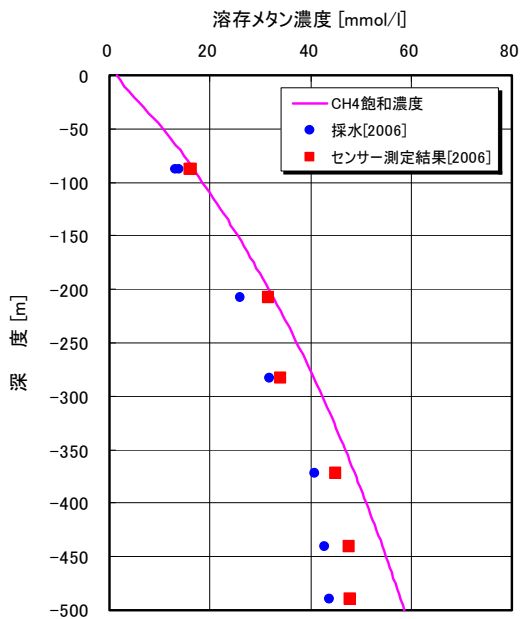


図-26 溶存メタン濃度深度分布の比較

センサー降下過程（6.0m/min）でセンサー分離膜表面上向きの水流が発生して、平衡状態にあったセンサー内からガスの放出が行われたものと考えられる。センサーで測定された溶存メタン濃度は深度方向に増加の傾向を示している。

センサー温度は所定の深度降下停止後に若干の増加が認められ、周辺の孔内水の温度とセンサー内部の温度が一致するまでのタイムラグが発生している。

c) 採水分析結果との比較

図-26 は、センサーで測定した溶存メタン濃度と採水分析結果との比較を示している。図中には、原位置の圧力と温度から求めた溶存メタン濃度の理論上の飽和曲線を併せて示した。センサーで測定された溶存メタン濃度は採水分析結果と分布性状を同一として、全体的にやや高め値を示している。また、孔内の地下水中の溶存メタン濃度は、飽和に近い状態であることが分かる。センサーに対する室内性能試験等から測定精度に関する性能は確保されていることが明らかになっているので、図に示した測定結果は原位置で直接得られたものであり、その信頼性は高いものと考えられる。

5. まとめ

地下水中に高濃度に溶解しているメタンガス測定が可能なセンサーの開発と原位置メタン量測定に対する適用性について検討を進めた。開発したセンサーに対する室内性能試験では、センサーの応答性や測定精度に関する基本性能のほか、供給水量依存特性、メタン

ガス以外のガス混入による影響が明らかにされた。また、幌延試験錐孔における孔内原位置試験では、採水試験料のガス分析とセンサー測定結果から、孔内地下水中の溶存メタン濃度はほぼ飽和状態であることが判明し、両者の整合性からセンサー測定結果の信頼性が確認された。

現在、引き続き同試験錐孔内において溶存メタンセンサーによる長期モニタリングを実施・継続しており、センサーを含めた測定機器のモニタリング機器としての適用性について検証中である。

謝辞：本研究は（独）日本原子力研究開発機構の先行基礎工学研究（研究代表者 山口大学 兵動正幸 教授）として実施したものである。関係各位に心より感謝申し上げます。

参考文献

- 1) 兵動正幸, 大賀光太郎, 國丸貴紀, 佐々木勝司, 山本陽一: 溶存メタンセンサーによる原位置メタン量測定法に関する研究—センサー基本性能確認のための室内試験—, 日本応用地質学会平成 17 年度研究発表会講演論文集, pp.405-406, 2005.
- 2) 兵動正幸, 大賀光太郎, 國丸貴紀, 山本陽一, 佐々木勝司, Michel Masson: 地層内溶存メタン測定のためのセンサー開発とその諸特性について, 第 41 回地盤工学研究発表会講演集, pp.59-60, 2006.
- 3) 例えば, 日本機械学会: 技術資料 流体の熱物性値集, 丸善, p.508, 1983.
- 4) 仲川勤: 膜のはたらき—気体透過膜を中心に—, 共立出版, 1985.
- 5) 田中一宏, 岡本健一, 藤本不二男, 深澤強, 森田幹: 水中溶存メタン濃度のモニタリングに用いる分離膜のメタン透過性, 資源素材学会秋季大会講演概要集, pp.263-264, 2003.
- 6) 核燃料サイクル開発機構: 幌延深地層研究計画—坑道掘削（地下施設建設）時の調査研究段階（第 2 段階）計画, 核燃料サイクル開発機構技術資料, JNC TN5400 2005-002, 2005.
- 7) 浴信博, 山崎眞一: 核燃料サイクル開発機構が進める深地層の科学的研究の現状（その 2）, 物理探査, Vol.57, No.4, pp.373-382, 2004.
- 8) 國丸貴紀, 平田洋一, 小川賢: 原位置地下水の物理化学パラメータモニタリング装置および封圧採水の結果について, 日本地下水学会 2005 年秋季講演会講演要旨, pp.118-121, 2005.