

### 3. トンネル建設工事におけるガス湧出に対する警報システムの開発に関する研究

林 年 宏\*  
松 井 英 憲\*  
内 藤 道 夫\*

## Gas Alarm Systems for Tunnel Works

— Response Characteristics of Gas Alarm System and Optimum Installation of Methane Detectors —

by T.Hayashi\*  
H.Matsui\*  
M.Naito\*

Explosions of methane are the most serious disasters encountered in tunnel works carried out in such strata containing natural gases. One of the effective methods to avoid such explosion hazard is air ventilation through a tunnel under construction. Although there have been used several types of air ventilating system, none of them is said to be satisfactory from the viewpoint of preventing methane accumulation. A suitable gas alarm system, therefore, should be introduced into every tunnel works in order that methane concentration in air flow is monitored continuously and that warning alarms are given, if methane concentration in the tunnel exceeds a certain threshold, so that any adequate precautions are to be taken successively. The gas alarm system for such temporary works as tunnelling should be not only that to ensure safety, but also be economical. This report describes the method of constituting a gas alarm system for practical use in tunnel works.

In the first part of the report, response characteristics of several commercial gas alarm systems are studied to obtain informations on the effect of structural components of the methane detector on response time of the system. Experiments are made using a rectangular test chamber in which a known mixture of methane and air is prepared, and into which a methane detector of catalytic combustion-type (Fig. 3.1) is thrown vertically. Output voltages from an amplifier have been calibrated by known mixtures. Two kinds of response time are used as indices of response characteristics (Fig. 3.2): one is the time for the detected concentration to attain a certain absolute value (e.g. 1.5% methane), and the other is the time to attain a certain relative value (e.g. 90% of the methane concentration of the mixture in the test chamber). The former response times increase with methane concentration detected, but the latter ones are, in so far as relative concentrations are less than 60%, independent of methane mixtures in the test chamber (Fig. 3.3). This fact means that the response time might be largely increased if the concentration for alarm is set up inadequately (Fig. 3.4). Thus, in determining the alarm level of concentration, response characteristics of the gas alarm system in use should be

\* 化学研究部 Chemical Engineering Research Division

taken into account. Other experiments are made to know effects of such structural components of a detector as flame arrestor, protective guard and waterproof cover on response time (Fig. 3.5). Flame arrestor, made of sintered metal, and waterproof cover are shown to have ill effect on response time. Some structural improvements of commercial detectors are suggested.

Even when an adequate gas alarm system is introduced into the tunnel, it is of no use if the system could not detect the existence of gushed out methane. Here, the most important factor is how to install methane detectors in the tunnel.

The second part of this report describes the experiments carried out, using a simulative tunnel of nearly full-scale (Fig. 3.6), for the purpose of obtaining informations on optimum installation of detectors. Methane of constant rates, up to  $0.2 \text{ m}^3/\text{min.}$ , is flown into the tunnel through either of three openings on the terminal plate which is simulating a face of tunnel, the other end of the tunnel being opened to the atmosphere. Distributions of methane in the tunnel are measured by the use of the commercial gas alarm system composed of 17 units of gas alarm and detector. Types of air ventilation are as follows: air blowing by either of main duct or sub-duct, air suction by main duct, suction by main duct combined with air blowing by sub-duct, and with no ventilation. In each experiment about 10 minutes are to be passed until a nearly steady state of ventilation is attained, even though there exist some fluctuations of methane concentration. The maximum value recorded in this period is used as an index of methane concentration for each point of measurement in the tunnel. Parameters of experiments are type of ventilation, flow rate of ventilating air ( $Q_{AB}$  or  $Q_{AS}$ ), flow rate of methane ( $Q_M$ ), position of the opening for methane inlet, and initial velocity of methane flown-in ( $V_M$ ). From those experiments, distributions of methane layers are drawn as "contour maps of concentration" for vertical and horizontal directions. In most of those maps boundary lines for 1.5% methane are drawn for reference by thick line, because such a concentration (i.e. 30% of the lower explosion limit of methane in air) have been considered as a marginal value for the prevention of explosions. Figures 3.8 ~ 3.15 and Tables 3.2 ~ 3.4 are results for air blowing ventilation by main duct. Figures 3.16 ~ 3.18 are drawn from results of experiment for air suction ventilation by main duct. In Table 3.5, effects of air suction ventilation combined with eccentric air blowing by sub-duct are compared with those of air blowing ventilation by sub-duct only. With no ventilation in the tunnel, results shown in Figures 3.21 ~ 3.25 are obtained, including an interesting discussion on the stretching velocity of methane layer. Because of its lower density than air, methane tends to accumulate near the roof of tunnel, and, therefore, the qualitative behaviors of methane in the tunnel are understood rather easily. However, the thickness and the length (i.e. vertical and horizontal gradient of methane concentration) are largely affected by the type of air ventilation as same as by flow rate of air and methane and other factors. It is concluded, then, that the systematic installations of detectors could not be unified quantitatively over every tunnel works, but should be determined for individual tunnel, taking into account such factors as type and efficiency of air ventilation, total number of available detectors, number of spots at where methane gushes out constantly, and alarm level of methane concentration for each detector.

Discussions are also made on the application of results of our experiments in the simulative tunnel to other scaled-up tunnels, methods of constituting an adequate gas alarm system, precautions for the use and maintenance of the system, and on merits or demerits of each type of air ventilating system.

### 3.1 緒言

トンネル建設工事におけるガスの湧出に起因する災害を防止するには、まず第一にガスの湧出を避ける対策が必要であるが、トンネルにおけるガスの湧出は化学工場等における装置の不備や作業者の過失によるガスの漏出とは性質を異にし、ガス滞留地層の予測や掘削方法により湧出量を減ずることはできてもガスの湧出自体を阻止することは困難であり、トンネル内の通風換気により湧出ガスを希釈・排出する方法を基本的対策とせざるを得ない。しかし、通風量は一般に湧出ガス量を仮定して設計され、又、通風換気の方法如何によっては換気が充分に行われなかったり、希釈された湧出ガスがトンネル内を流動することもあるため、湧出ガス量が増加した場合に危険な状態を生ずるおそれがある。このような事態を避けるにはトンネル内のガス濃度を常時監視し、危険な濃度に達したときには速かに適切な措置をとり得るようなガス警報システムの設置が不可欠である。トンネル建設工事において湧出するガスの大部分はメタンであり、その他の可燃性あるいは毒性ガスの湧出もあるが、重大災害へ発展するという可能性からみれば湧出メタンとトンネル内の空気との混合ガスの爆発が最も危険であると考えられるので、本研究では湧出ガスとしてメタンを考えるこ

ととする。Table 3.1 にメタンの物性及び爆発危険性を示す。

可燃性ガスの存在を検出し、ある濃度レベルを越えたときに警報を発するというガス警報器あるいはガス警報システムについては、化学工場や炭鉱において既に相当の実績を有し、かつ専門メーカーにより研究・改良が続けられているのが現状であり、ここで新たに警報システム全体の開発を論ずる必要はなく、この研究で目的とするところは、メタンの検出方法、検出器の構造及び設置位置、緊急時における措置・対策を含めた警報システムの考え方等についてトンネル建設工事の実態をふまえて検討し、これらをどのようにするのが適切であるかを示唆することにあると考える。

本報告は二年間にわたる調査研究の結果であるが、初年度はガス警報器の応答性を中心にして、警報器の性能・構造、トンネル工事への適応性などについて調査・実験を行い、二年目は模擬トンネルを用いて湧出したメタンの流動拡散について実験し、その結果からトンネル内におけるガス警報器検知部の適正配置について論じた。

トンネル建設工事は炭鉱と異なり工事完了までの比較的短かい期日の間が対象となるため、警報システム等の安全対策に十分な費用をかけ難い場合もあるので、警報システムはできるだけ効果的に構成されなければならない。又、過去の事例によれば警報システムが導

Table 3.1 Physical and combustion properties of methane

メタンの物性及び爆発危険性

|  |                     |
|--|---------------------|
| Molecular Weight                                 | 16.0                |
| Vapor density (air=1.0)                          | 0.554               |
| Color, oder                                      | Colorless, odorless |
| Stoichiometric concentration (vol. % in air)     | 9.47                |
| Heat of combustion (Kcal/g)                      | 11.93               |
| Explosive range (vol. % in air)                  | 5.0~15.0            |
| Auto-ignition temperature (°C)                   | 632                 |
| Minimum ignition energy (mj)                     | 0.33                |
| Maximum burnig velocity (cm/sec.)                | 37                  |
| Adiabatic flame temperature (°C)                 | 1963                |
| Maximum explosion pressure (Kg/cm <sup>2</sup> ) | 7.2                 |

入されている炭鉱やトンネル工事においても爆発災害が生じており、単に警報システムが設置されているだけでは無意味である。本報では、検知部の設置位置と警報濃度レベルの関係、通風換気の方法とその効果、トンネルの大きさや濃度分布などについても考察し、警報システムの効果的活用により有益な結果を得た。

### 3.2 ガス警報器の応答性及びトンネル建設工事への適応性

#### 3.2.1 実態調査の結果及び問題点

メタン湧出下において工事中のトンネルの現地調査、文献・資料の調査等に基づいて警報システムの基本的考え方や実験方法について検討したが、その要点は次のとおりである。

1) 工事現場では何らかのガス警報システムを採用しているが、ガス警報器と称するものは検知部（検出センサ部分）、警報器本体（増幅部、指示・警報部、電源部等を含む）及び信号伝送ラインからなり、多くの場合には検知部を防爆構造としてトンネル内に設置し、本体は現場事務所等に置いている。警報システム（ハードウェア）としてはこの他に、外部警報、警報信号による他の装置の駆動・停止、非常用電源等の機構が含まれる。これら構成要素については、長期間の使用に際しての信頼性その他が必ずしも完全とはいえず、保守・点検等のバックアップが必要ではあるが、当面対象とするトンネル建設工事用警報システムの構成に際しては現在の技術で充分目的を達しうると考えられる。なお、従来ガス濃度の自動記録が全く導入されていないことは今後の問題となろう。

2) メタン濃度の連続的監視には濃度を電気信号に変換する必要があるが、このためには検出原理が接触燃焼式又は半導体式のものが多く使われ、検知部へのガスの導入は自然拡散によるもの（拡散式）が多い。検知部は定置式であるが、切羽の前進に伴って移動させるという使い方もなされている。

3) 警報システム全体の応答性を律速すると思われるガスの検知おくれについては実験的に確認し、応答性の改善を検討する必要がある。

4) 警報システムの実践的活用という観点からは、警報濃度の設定、警報発生時の対策等を含めたソフトウェアについて、個々のトンネルに応じた適切な構成方

法を検討する余地がある。

5) トンネルの環境因子が炭鉱と著しく異なるとは考えられない。温度及び湿度に関しては、トンネル内のこれらの変動範囲での使用に耐える警報器は入手できるであろう。発破による飛散物、じん埃、漏水等に対しては、検知部そのものをこれらに耐える構造とすることは応答性との関係で好ましくないため、必要に応じて検出部を保護できるしゃ閉板を付加するなど、使用方法の面に対策を考えるべきであろう。

6) トンネル内のメタンの存在については切羽付近が主たる湧出源とみられているが、掘削後速やかにコンクリート巻立てが行われないうちは湧出箇所を限定することは危険であり、全体検知と局所検知の併用によりメタンを検出せねばならない。現状では一般に検知部の設置数は少なく、その位置の決定が明確な根拠によっているとは考えにくい。

7) 通風換気の方法としては、風管の設置や局所換気設備の入手しやすさなどとの関連で押し込み方式が多いが、その他の方式も再検討の余地があり、特にメタンの流動や濃度分布との関係において、検知部の配置の適正化については実験的に確認する必要がある。

8) 警報器及びその検出部の重要性について現場での認識が不足のようである。これらの取扱い、保守、点検（特に警報濃度の設定と定期的な機能チェック）については警報器メーカーの協力を得た具体的な対策が必要であろう。

#### 3.2.2 ガス警報器の応答性に関する実験

##### 3.2.2.1 ガス警報器

実験に用いたガス警報器は市販の接触燃焼式のものの三種類で、検知部はいずれも拡散式で本体との間をケーブルで接続するタイプのものである。検知部の構造及び回路構成をFig. 3.1に示す。検出素子（発火源となりうるため焼結金属フレーム・アレスタで囲まれている）はふつう白金線に触媒をコーティングしたもので通電加熱された素子に可燃性ガスが触れると燃焼反応が生じ発熱により白金線の抵抗が変化する。検出素子をホイートストン・ブリッジの一辺としておきガス濃度による抵抗値の変化をブリッジの不均衡出力として取出せば、予め与えられた出力-濃度曲線から濃度が求まる。フレーム・アレスタは外傷保護のためのガードを備えており、屋外で使用されるものには更に防水カバーが付加されている。以下、警報器あるいはその

検知部の種類はA,B,Cの記号で示す。

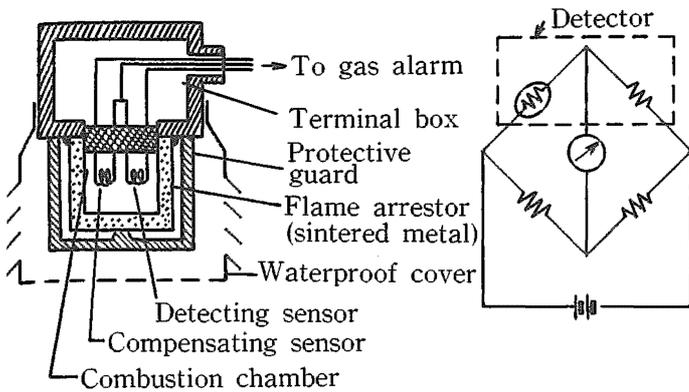


Fig. 3.1 Typical structure and electrical circuit of catalytic combustion-type methane detector

接触燃焼式ガス警報器の検知部(拡散式)

3.2.2.2 応答性の尺度

ガス警報器の応答性(応答速度)は警報濃度の設定とも関連する重要な特性であり、ふつう「警報おくれ時間」あるいは「応答時間」で示される。これらは検知部にガスが接触してから警報を発するまでの遅れ時間の意であるが、実際的には「既知濃度の混合ガスに検知部が触れてからその濃度のX%の値を指示するまでの時間」で示すことができ、Xの値としては60%のほか50%、90%などの値がとられている。こうした相対的な%応答時間のほかに、「検知部が既知濃度の混合ガスに触れてからある濃度(絶対値)を指示するまでに要する時間」も応答時間として用いることがある。

3.2.2.3 実験装置及び実験方法

実験にはタテ、ヨコ40cm、高さ30cmの試験槽を用いた。濃度既知の混合ガスを得る目的にはスタンダード・テクノロジー社の標準ガス発生機を用いた。試験槽内に所望の濃度の混合ガスを満し、なおも混合ガスを供給し続けながら槽上部の小蓋をとりはずし、検知部を上から垂直に槽内に投入し、警報器本体からの出力の時間的変化を記録した。小蓋の部分には光源とホト・トランジスタからなる検出装置を設け、これを用いて検知部が混合ガスに触れ始める時間の信号を出力させた。混合ガス用のメタンは市販 Pure grade のものを、空気はコンプレッサーからのものをシリカゲルで除湿して用い、必要に応じてガスクロマトグラフにより組成を確認した。

試験槽に検知部を投入したときのメタン濃度指示値

の時間的変化を Fig.3.2 に示す。図は混合ガス中のメタン濃度が2%の場合であるが、このときの「メタン濃度1%指示の応答時間は $t_1$ 」であり、最終到達濃度の「90%応答時間は $t_2$ 」であると定義する。

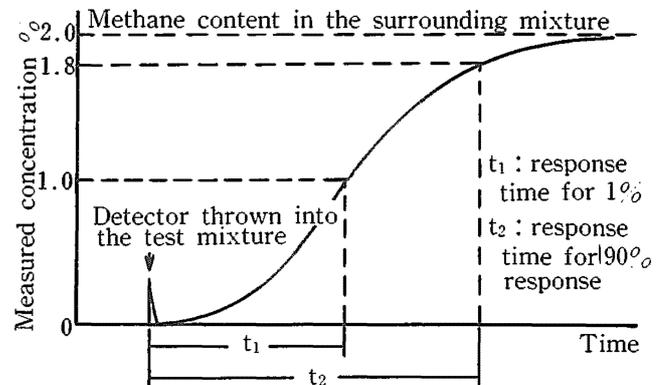


Fig. 3.2 Definition of response times

メタン濃度の時間変化と応答時間の定義

3.2.2.4 実験結果及び考察

3.2.2.4.1 メタン濃度と応答速度の関係

Fig.3.3 には槽内のメタン濃度の25、60及び90%の濃度を指示するまでの応答時間をメタン濃度に対して示した。90%応答時間は濃度とともに減るが、応答率60%以下については応答時間は濃度によらず一定となった(警報器A及びBについても同じ傾向が見られた)。%応答時間がメタン濃度によらないということは警報器があるメタン濃度(絶対値)を指示するまでに要する時間がメタン濃度の小さいほど長くなることを意味する。これを実際の場合にあてはめて考えるために、仮りにメタン濃度1%を指示したときに警報を発するように設定したとして、その警報器の%応答時間

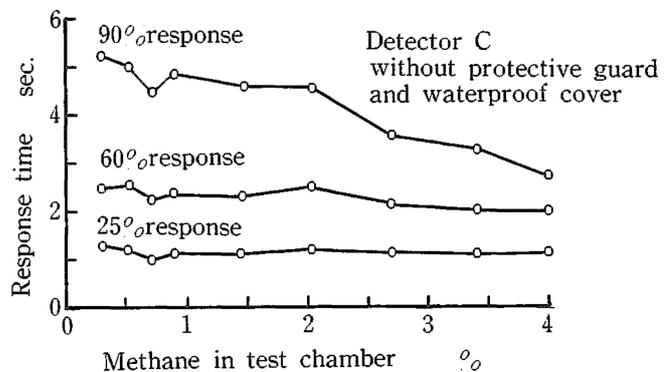


Fig. 3.3 Relation between methane concentration and response time

メタン濃度と%応答時間の関係

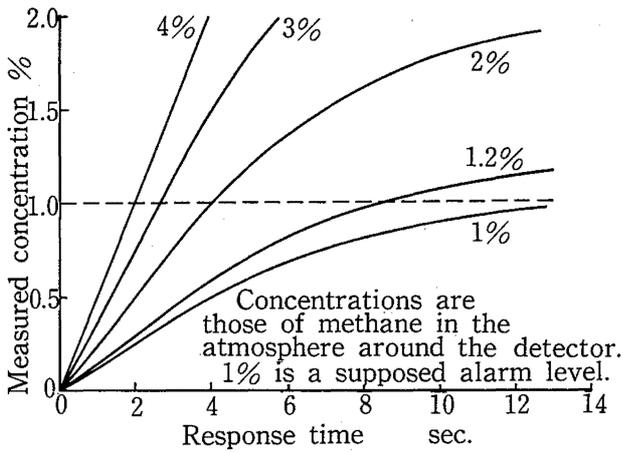


Fig. 3.4 A model showing the relation between methane concentration in the atmosphere, response time and measured concentration  
測定されるメタン濃度が応答時間により異なることを示すモデル

が25, 50, 60及び90%応答に対し各々2, 4, 5及び10秒であったとすれば, 検知部周辺のメタン濃度によって指示濃度と応答時間の関係は Fig. 3.4のように変化する。図から明らかなように周辺濃度の小さいほど警報遅れ時間は長くなるので, 警報濃度の設定に際してはその警報器の応答特性を考慮せねばならないことがわかる。

3.2.2.4.2 検知部の構造と応答速度

主な結果を列挙すれば次のとおりである。

1) 試験槽内のメタン濃度が4%以下の場合について, 検出素子をフレーム・アレスタで囲んだだけの検知部を用いて90%応答時間をしらべたところ, 焼結金属の孔径が小さく厚さの大なるほど, 又, 材質についてはブロンズよりステンレス鋼の方が応答時間が大なることを示す次のような結果が得られた。なお( )は焼結金属の材質, 孔径(ミクロン), 厚さ(mm)の順である: 検知部A(ステンレス, 120, 2)20秒以下, 同B(ブロンズ, 50, 2.5)12秒以下, 同C(ブロンズ, 50, 先端部3側面2)7秒以下。なお, 検知部の向きの影響は著しくはなかった。

2) フレーム・アレスタを金網としたときの効果をしらべるため, 検知部Cの焼結金属の代りに側面を円筒状金網とし先端部を盲にしたキャップを検出素子にかぶせて実験したところ, 60又は80メッシュの金網1枚でも応答速度は焼結金属アレスタの場合と同じであった。このことから, 検知部Cの焼結金属アレスタの仕

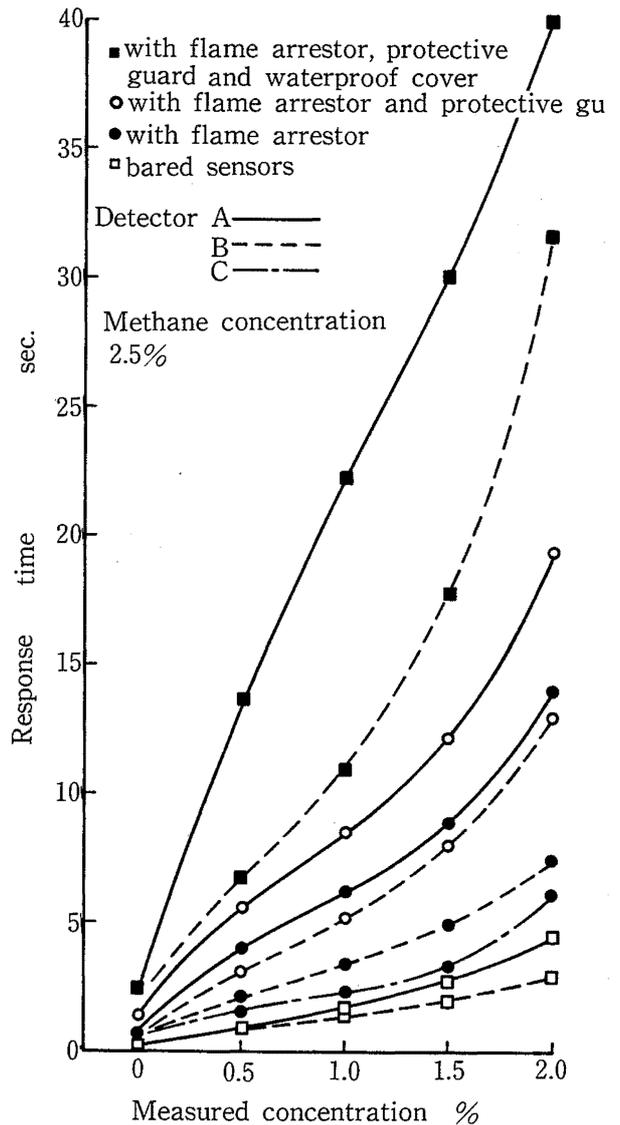


Fig. 3.5 Effect of structural component on response time  
警報器検知部の構造上の要素が応答時間及びばす影響

様は応答速度の限界付近を示すものであり, (フレーム・アレスタが応答速度を決める唯一の因子ではなかったとしても) これ以上目の粗い焼結金属を用いても答性の著しい向上は期待できないようである。

3) 吸湿剤を想定した小石の層をフレーム・アレスタの周囲に設けた実験では, 4~6mmの小石ではそ大きな影響は少いが, 厚さ10mmの層を20メッシュ網で保持した状態では, 60%応答時間はフレーム・アレスタのみの場合の約6倍に達した。検知部に吸湿などの障害物を組込むときは個々の応答性をしらべおくことが特に重要となる。

4)検出素子が裸で露出した場合から防水カバーを取付けた屋外用完成品までについて、検出素子まわりの障害物が応答時間に及ぼす影響を Fig. 3.5 に示す。

単に応答性という観点からは検出素子が露出することが望ましいが、周囲条件の直接的影響を避け、あるいは防爆構造とするための必要上、最低限度の部品で囲まれることはやむを得ない。検出素子を囲む部品が応答時間に寄与する割合を定量的に表現することは困難であるが、三種類の検知部の部品を相互に交換した実験の結果などから検知部の構造と応答性の関係について次のように言える。

1)フレーム・アレスタの材質、汙過径及び厚さは応答性に影響する。防爆構造上要求される仕様の最低限度を満す設計とすれば応答性は向上する。別の実験によれば、メタン-空気炎の消炎にはブロンズ製、汙過径100ミクロン、厚さ2mmの焼結金属を用いれば充分であり、又、金網については80メッシュのもの1枚でも消炎できたが、金網の使用については更に検討が必要であることを付記しておく。

2)保護ガードの構造は実験に用いた以外の市販の検知部についてもほぼ同じであり、特に改良の余地はない。又、保護ガードが応答性に及ぼす影響は小さい。

3)防水カバーには種々の構造があるが、ガスの通過を妨げやすいと思われる構造のものほど応答時間を長くする。又、防水カバーは応答性を著しく悪くする主要素である。トンネル内で用いる検知部は、特別な場合を除き天盤からの漏水に対する「屋根」を備える程度で充分であり、屋外用としての全閉構造は不要であろう。なお、防水カバーが必要な場合にはそれが外傷保護の目的を果すように設計し、保護ガードは省略すべきである。

### 3.2.3 結言

トンネル建設工事におけるガス警報システムの利用の現状と問題点を調査し、特にガス警報器の性能・構造とトンネル工事への適性を検討したほか、実験結果に基づき警報器検知部の構造上の改良点を指摘した。

しかしながら、警報システムの応答性がいくら向上してもメタンが検知部に触れない限りは機能を発揮できない。その意味では検知部の配置が適切か否かということが実用上重要になってくる。適切な応答性のガス警報器をトンネル内に適切に配置し、警報濃度を適切に設定し、機能維持のための適切な保守・点検を実

施することが警報システムの有効な活用のための第一条件である。これらの問題については以下に論ずる。

## 3.3 ガス警報器検知部の適正配置に関する実験

### 3.3.1 目的

メタンの湧出するトンネル工事現場には何らかのガス警報システムが導入されており、これらは所期の目的を果し得る能力を有すると考えられるが、その能力を十分に発揮できる使い方がなされているか否かには疑問が残る。特に重要な点は、ガス警報器の性能維持と警報器検知部の配置（警報濃度の設定を含む）の適否である。前者については警報器メーカーの協力と指導にまつところが多いが、後者についても具体的な根拠が殆んど見当たらないのが現状である。長距離にわたるトンネル内において、限られた数の検知部をいかに配置するかは警報システムの効果的活用のための最も重要な要素であり、警報システムの構成が例え完全であってもメタンの存在が検知できなければ何の意味もないことに留意せねばならない。

この研究では、トンネル内に湧出したメタンがどのように流動し、通風換気の方法や通風量によってトンネル内のメタンの濃度分布がどのようになるかを知るため、実規模に近い模擬トンネル内にメタンを流出させる実験を行い、その結果から警報器検知部の設置位置をどのようにするのが適切であるかを論じた。又、検知部の配置と密接に関連する警報濃度の設定についても言及したほか、この実験結果をもとにしてスケール・アップされたトンネル内におけるメタンの湧出による危険性を予測する方法についても検討した。

### 3.3.2 実験装置及び実験方法

#### 3.3.2.1 記号

以下において用いる記号の意味は次のとおりとし、記述の簡便のため特に必要のない限り説明又は単位を省略することがある。

$x$ : horizontal distance from the face of the simulative tunnel (m)

(模擬トンネル内の切羽からの距離)

$y$ : vertical distance from the top of roof of the simulative tunnel (m)

(模擬トンネル内の天盤からの距離)

- $z$  : horizontal distance from the vertical section along the axis of the simulative tunnel (m)  
(模擬トンネルの中心垂直断面からの距離)
- $Q_M$  : flow rate of methane ( $m^3/min.$ )  
(メタン吐出量)
- $Q_{AB}$  : flow rate of ventilating air for air-blowing ventilation ( $m^3/min.$ )  
(押し込み通風換気の場合の通風量)
- $Q_{AS}$  : flow rate of ventilating air for air-suction ventilation ( $m^3/min.$ )  
(吸出し通風換気の場合の通風量)
- $C$  : concentration of methane at measuring points in the tunnel (vol. % in air)  
(トンネル内各点のメタン濃度)
- $C_{AV}$  : average concentration of methane, calculated (vol. % in air)  
 $C_{AV} = 100Q_M / (Q_{AB} + Q_M)$   
(メタンの平均濃度)
- $[C]$  : relative value to average concentration  
 $[C] = C / C_{AV}$  (平均濃度に対する対比)
- $V_M$  : initial velocity of methane flow-in, which depends on  $Q_M$  (m/sec.)  
(メタンの吐出速度)

The following marks are used in figures to show the position of the opening for methane flow-in,

and also to distinguish high or low initial velocity as followings;

-   $V_M = 20 \sim 40 m/sec.$
-   $V_M = 0.016 \sim 0.32 m/sec.$

3.3.2.2 模擬トンネル

Fig. 3.6 に示す模擬トンネル（以下、特に誤解のない限り単にトンネルという）は水力径 2 m、長さ 18 m の鋼板製で、一端は閉鎖して切羽面に擬し、他端はビニルシートの曲管部を経て大気に開放されている。切羽面には三箇所メタン吐出口が設けられている。トンネル内部には主及び補助風管が固定されており、各々プロペラファンに接続されている。

3.3.2.3 実験ガス

実験に用いたガスはメタン含量 98% の天然ガスである。ポンベからのメタンは流量計を経て切羽面の吐出口のいずれかからトンネル内に流出させる。吐出口の径は、吐出量が  $Q_M \leq 0.05 (m^3/min)$  では 7.5 mm,  $Q_M \geq 0.1$  では 10 mm である。メタンの吐出速度は吐出口径が同じであれば吐出量の増すほど大となる。又、約半数の実験では吐出口をスポンジ塊で覆った状態でメタンを流出させた。吐出口に障害物のない場合は切羽からのメタンの噴出を模したもので、吐出口径が 7.5 mm で  $Q_M = 0.05$  のときと口径が 10 mm で  $Q_M = 0.1$  のときのメタン吐出速度はいずれも約 20 m/sec である。吐出口をスポンジ塊で覆ったときの吐出速度は  $Q_M = 0.05$  で

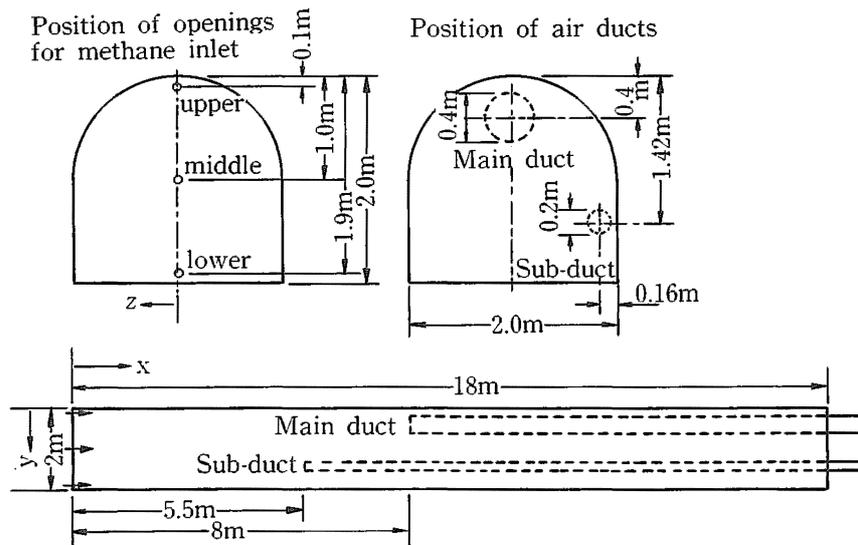


Fig. 3.6 Schematic showing of simulative tunnel for experiments

模擬トンネルの外形寸法とメタン吐出口及び風管の位置

0.08m/sec,  $Q_M=0.1$ では0.16m/sec.であり、無障害の場合の速度に比して充分小さく、このような状態をメタンの滲出と称することがある\*1。なお、 $Q_M$ の最大は0.2m<sup>3</sup>/minとした。

### 3.3.2.4 通風換気の方法

通風換気の方法は、主風管又は補助風管を用いた押込み、主風管による吸出し、主風管による吸出しと補助風管による押込みの併用の四種類とし、このほか通風換気の無い場合についても実験した。プロペラファンの回転方向により風管中の気流の方向を変えることができ、ファンのダンパの開閉により任意の通風量を得ることができる。通風量は、JIS A1431に定める方法により風管管端付近における平均風速の測定に基いて算出した。風速の測定には(株)創合電子製MV-01-BLR型無指向性サーミスタ風速計を用いた。この実験では風管径は一定であるので風管管端における風速は通風量によって変化する。なお、風管の途中にはナイロン網とアルミ製 honey 管を挿入して気流を整流した。

### 3.3.2.5 ガス濃度の測定

メタン濃度の測定には理研計器(株)製RY-4000型ガス警報器を用いた。検出原理は接触燃焼式で、拡散式の検知部は耐圧防爆構造のものであるが、トンネル内に取付ける都合上保護ガードと防水カバーをはずして使用した\*2。ガス濃度の指示精度はメタン0~5%に対し±5%F.S.である。指示警報ユニット及び検知部は17台を使用し、ユニットからの出力を多チャンネルmV計に同時記録させた。メタン濃度と出力の関係は直線関係にあると仮定し、前述の標準ガス発生機を用いてメタン2%において較正した。

検知部の取付位置は大部分の実験においてはトンネルの中心垂直断面上であるが、実験の目的に応じて位置を変えた。測定点の天盤からの距離  $y$  は大部分0.08~1mとし、切羽からの距離は  $x=1\sim4$ mについて重点的に測定した。\*3

### 3.3.2.6 実験の方法及び測定値の取扱いかい

毎回の実験においては、所定の通風換気が定常状態に達したのちに切羽面の吐出口のいずれかからメタンを吐出させた。実験は通風換気の方法、通風量、メタン吐出の量・位置・速度を変えて行い、それぞれ各測定点のメタン濃度の時間的変化を記録した。メタン濃度は測定位置によって差があるが、吐出後ある時間を経て上昇し始め、一般に不規則な振巾で脈動を繰り返

つつ全体としては増加を続け、6~8分を経過すると濃度の変動はあるがその変動巾\*4は一定し、全体として定常なる状態に達する。各測定点について、こうした定常状態に達するまでの間に記録された濃度のうちの最大値を読みとり、この値をその実験条件下におけるその測定点のメタン濃度として用いた。これらの測定結果をもとに、トンネル内の垂直方向、水平方向、トンネル軸方向などについて距離とメタン濃度(特に断わらない限り、図表中に用いる濃度は上述の最大値である)の関係を求めた。\*5 なお、メタン濃度の相対的表現として、吐出メタンが通風換気により混合・希釈された割合を示すために無次元数[C]を用いることがある。又、メタン濃度の危険限界値として爆発下限濃度(5%)の30パーセントを採るという考え方があるので、実験結果の一部の図中ではメタン濃度1.5%の境界線を特に太線で示すことがある。

## 3.3.3 実験結果

### 3.3.3.1 主風管による押込み通風換気の場合

#### 3.3.3.1.1 メタン吐出速度 $V_M$ の影響

$V_M$ が大きい場合(噴出)と小さい場合(滲出)におけるメタン濃度分布の例を Fig. 3.7 に示す。(このような  $x, y$  両軸についての図は、トンネル中心垂直断面上、すなわち  $z=0$  における濃度分布を示すものとし、 $x=0$  は切羽面を、 $y=0$  は天盤をそれぞれ意味する。図中の曲線群は各々付記されたメタン濃度になる境界線である。又、 $y$  軸についてはメタン吐出位置より下の部分、 $x$  軸については  $x>4$  の部分はそれぞれ省略してある。なお、図中の曲線のうち破線で示した部分は推定値である。)

- \*1 この実験においては、切羽面からトンネル内にメタンを流出させるときの速度の大小により「噴出」及び「滲出」という表現を用いることがあり、両者を併せて「吐出」と呼ぶこととする。しかし、3.3.4以降において、実際のトンネルを念頭においた論議をすすめる際には「メタンの湧出」と表現する。
- \*2 この状態における応答性は、メタン濃度2.5%のときに2%を指示するまでの応答時間は約14秒であるが、後述するようにこの実験では定常状態におけるメタン濃度を対象とするので、応答性は無視している。
- \*3  $x<1$ では測定器の測定限界を越える高濃度となることが多く、 $y$ については天盤に近い方の濃度測定に重点を置いたので一部の実験で  $y=1.7$ としたほかは  $x<1, y>1$ の範囲には測定点を設けなかった。なお、 $x$ の最大は17mである。
- \*4 このような濃度の変動巾は押込み通風換気の場合に大きく、吸出し通風換気、通風換気なしの順に小さくなる。又、切羽から、あるいは風管出口から離れた測定点における変動巾は小さい。
- \*5 同一平面上の二測定点の中間の点の濃度を求めるために、これら二測定点間のメタンの濃度勾配を直線で近似した場合がある。

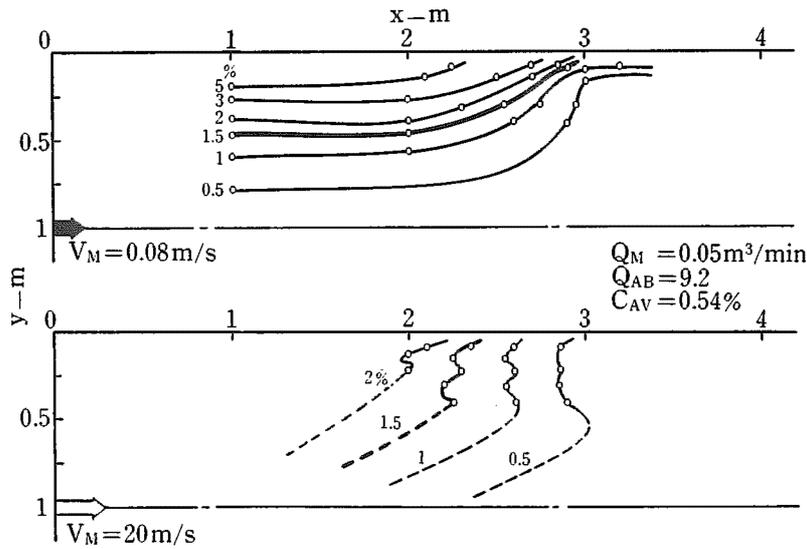


Fig. 3.7 Effect of  $V_M$  on distribution of methane concentration

メタンの濃度分布に及ぼす  $V_M$  の影響

図から明らかなように、 $V_M$ が小さい場合には天盤付近のメタン濃度は高く垂直方向の濃度勾配も大きい\*6が、水平方向については、風管からの風の影響が小さい位置（上方の図で  $x = 1 \sim 2$  m）では濃度差は小さく、典型的なメタンレイヤ（層）が形成されている。この状態で更に通風量が増せば、濃度境界線群は全体的に切羽方向へ移行し、同じ位置におけるメタン濃度は減少し、垂直方向の濃度勾配も小さくなると予測される。しかし、滲出したメタンはそのまま上昇して蓄積されるため、 $x < 1$  mの範囲では高濃度のメタンが存在するものとみられる。

一方、 $V_M$ が大きい場合には、噴出したメタンと空気との接触面積が増大し、メタンが  $x$  軸方向へ移動する過程で空気との混合が促進される。この結果、同じ位置におけるメタン濃度は、 $V_M$ が小さい場合よりも小さくなり、垂直方向の濃度勾配も小さくなるとみられ、この傾向は  $x$  が増す（風管出口に近い）ほど著しくなる。下方の図で  $x < 2$  mの範囲は、噴出したメタンが上昇しながら空気と混合する領域であるため、濃度分布は複雑となり、明確な濃度分布曲線を描くことは困難であった。しかし、この範囲には高濃度のメタンが存在するはずであるから、爆発危険のある空間と考えておくべきである。（ただし、 $V_M$ が大きい場合には、切羽上方、すなわち  $x$  及び  $y$  がゼロに近い領域ではメタン濃度が小さくなると考えられるので、警報器検知

Table 3.2 Effect of  $V_M$  on  $Q_{AB}$  required to limit the methane concentration below certain levels, at  $x = 1$  and  $y = 0.08$   
 $x = 1, y = 0.08$ の位置におけるメタン濃度をある値以下に抑えるに要する  $Q_{AB}$  に及ぼす  $V_M$  の影響

| $Q_M$<br>[m <sup>3</sup> /min] | $V_M$<br>[m/sec] | $Q_{AB}$ [m <sup>3</sup> /min.] |             |             |             |
|--------------------------------|------------------|---------------------------------|-------------|-------------|-------------|
|                                |                  | below<br>0.5%                   | below<br>1% | below<br>2% | below<br>5% |
| 0.05                           | 0.08             | 39                              | 34          | 23.5        | 12          |
|                                | 20               | 18                              | 13.5        | 9.5         | ~5          |
| 0.10                           | 0.16             | >60                             | 52          | 40.5        | 23          |
|                                | 20               | 31                              | 16          | 13          | ~10         |

(position of methane inlet : middle)

部の設置に際しては留意する必要がある。なお、この図の条件下では、爆発危険のある空間の容積という観点からすれば、 $x > 3$  mにおいては、十分な通風換気がなされているとみてよいが、 $x < 3$  mの範囲は危険な空間と考えるべきである。）

このように、基本的にはメタン濃度は切羽に近く

\*6  $y$  の微小変化に対して濃度が大きく変わるときに、垂直方向の濃度勾配が大きいという。Fig.3.7のような図では、濃度曲線群の間隔が小さいほど濃度勾配は大きいことになる。

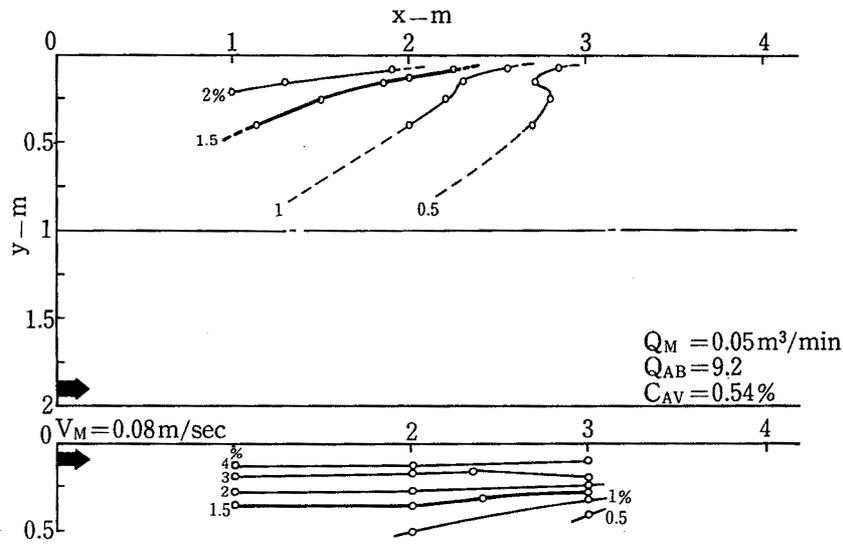


Fig. 3.8 Effect of the position of methane inlet on distribution of methane concentration  
メタンの濃度分布に及ぼす吐出位置の影響

天盤に近いほど高いという分布を示すが、メタンの吐出の仕方も無視することができず、他の条件が同じであれば、 $V_M$ の小さいほどメタンの混合希釈に要する通風量は大きくなると考えるべきである。Table 3.2には、ある点におけるメタン濃度を一定値以下に抑えるために必要な通風量が $V_M$ によって著しく異なる例を示す。

3.3.3.1.2 メタンの吐出位置の影響

メタンの空気に対する密度は0.55であるため、空気中においては浮力によって上昇しようとする性質がある。それ故、メタンの吐出位置（高さ）によって切羽付近のメタン濃度分布が影響を受けることが予測される。Fig. 3.8には、メタン吐出位置を切羽の上部及び下部としたときの代表的な結果を示す。メタンの吐出位置の影響については、一般に次のように述べることができる。

- 1) ある点におけるメタン濃度は吐出位置によって異なるが、吐出口（切羽）に近いほど、又天盤に近いほどメタン濃度が高くなるという一般的傾向は、吐出位置には影響されない。
- 2) 吐出位置が切羽の上端に近いほど天盤付近におけるメタンの滞留は著しい。すなわち、メタン濃度の最大値は大きく、垂直方向の濃度勾配も大となる。通風量又はメタンの吐出速度が増せば、この傾向は次第に緩和される。
- 3) メタンの吐出位置が下方になれば、メタンが浮力

Table 3.3 Effect of the position of methane inlet on  $Q_{AB}$  required to limit the methane concentration below certain levels, at  $x=1$  and  $y=0.08$   
 $x=1, y=0.08$ の位置におけるメタン濃度をある値以下に抑えるに要する $Q_{AB}$ に及ぼすメタン吐出位置の影響

| position of methane inlet | $V_M$ [m/sec] | $Q_{AB}$ [m <sup>3</sup> /min.] |          |          |          |
|---------------------------|---------------|---------------------------------|----------|----------|----------|
|                           |               | below 0.5%                      | below 1% | below 2% | below 5% |
| Upper                     | 0.08          | >60                             | >60      | 44       | 30       |
|                           | 20            | >60                             | 50       | 33       | 16       |
| Middle                    | 0.08          | 39                              | 34       | 23.5     | 12       |
|                           | 20            | 18                              | 13.5     | 9.5      | ~ 5      |
| Lower                     | 0.08          | 16                              | 15       | 13       | ~10      |
|                           | 20            | 12                              | ~10      | ~5       | ~ 5      |

( $Q_M=0.05\text{m}^3/\text{min.}$ )

によって上昇する過程において空気との接触の機会が増すため、通風量又は吐出速度の増大した場合と同様に、空気との混合希釈が促進され、高濃度メタンの領域は減少する。

Table 3.3 に示すように、ある点のメタン濃度を一定値以下に抑えるために必要な通風量は、吐出位置が

下方になるにつれて大きく減少する。

3.3.3.1.3 メタンの吐出量  $Q_M$  の影響

$Q_M$  の増加につれてトンネル内各点のメタン濃度が增大することは予測されるとおりである。又、天盤あるいは吐出口に近いほどメタン濃度が高くなるという濃度分布の一般的傾向は、 $Q_M$  の大小には無関係に成立することが確認された。Fig. 3.9 には、二種類の通風量について、 $Q_M$  を変化させたときのメタン濃度が 1.5% となる境界線を示す。メタンの危険限界濃度を

どのように考えるかは論議のあるところであるが、これらの曲線群の相対的な関係は、メタン濃度には無関係であるとみなせることから、 $Q_M$  の増すにつれてメタンの高濃度領域が拡がり、爆発の危険のある空間の容積が増すことは明らかである。一方、通風量を変えたときにメタン濃度が 1.5% となる境界線を二種類の  $Q_M$  について比較したのが Fig. 3.10 であるが、同じ通風量に対しては  $Q_M$  の大なるほどメタンの高濃度領域は拡がり、危険空間の容積が増大することがわかる。

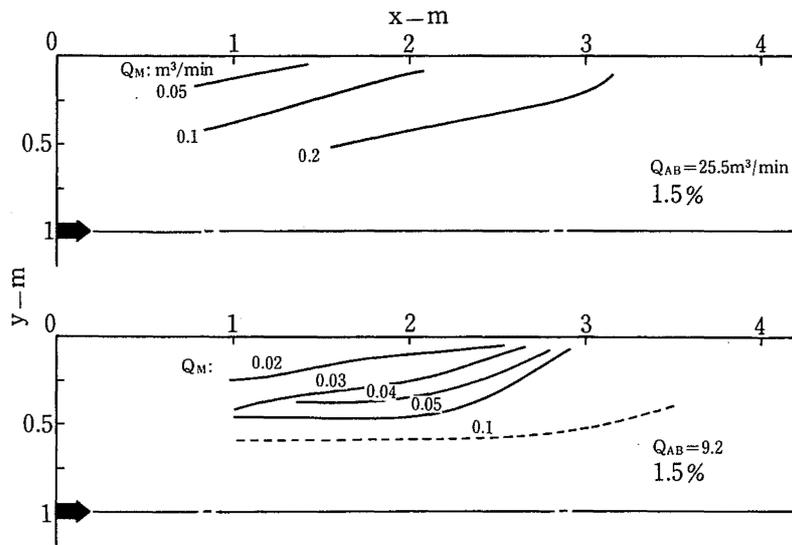


Fig. 3.9 Effect of  $Q_M$  on boundary lines for 1.5% methane, with variations of  $Q_{AB}$   
メタン濃度が 1.5% となる境界線と  $Q_M$  との関係

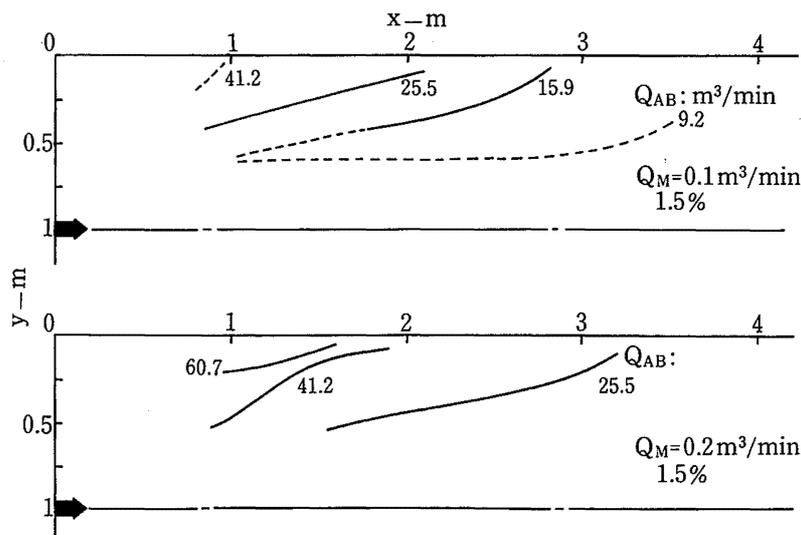


Fig. 3.10 Effect of  $Q_{AB}$  on boundary lines for 1.5% methane, with variations of  $Q_M$   
メタン濃度が 1.5% となる境界線と  $Q_{AB}$  との関係

**Table 3.4** Relative values to average methane concentration, [C], for various points of measurement

種々の測定点におけるメタン濃度の平均濃度に対する相対比

| x [m] \ y [m] | 0.08 | 0.15 | 0.225 | 0.30 | 0.40 | 0.60 |
|---------------|------|------|-------|------|------|------|
| 1             | 17.0 | 11.6 | 8.5   | 5.2  | 4.0  | 2.6  |
| 2             | 11.7 | 7.5  | 5.5   | 4.4  | 3.0  |      |
| 3             | 0.7  | 0.65 | 0.8   | 0.7  | 0.75 |      |
| 17            | 0.8  |      |       |      |      |      |

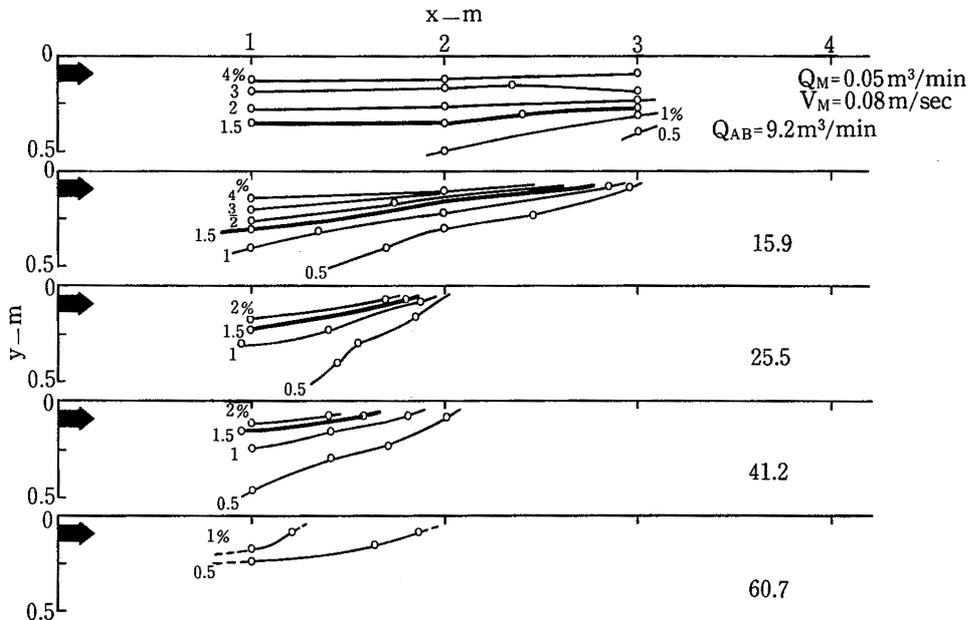
( $Q_M=0.01\sim 0.05\text{m}^3/\text{min.}$ ,  $V_M=0.016\sim 0.08\text{m/sec.}$ , position of methane inlet: middle,  $Q_{AB}=9.2\text{m}^3/\text{min.}$ )

次に、トンネル内各点のメタン濃度が $Q_M$ の増加によりどのように変化するかを考察する。既に定義した相対濃度 $[C]=C/C_{AV}$ は、ある点の濃度と平均濃度との比であるから、 $[C]=1$ は、メタンが空気と十分に混合した状態を意味する。又、 $[C]>1$ は、その点付近に高濃度領域が存在すること、すなわち空気とメタンが十分に混合するような通風換気のなされていないことを意味し、この場合には、物質のバランスから考

えて $[C]<1$ となる領域が必ず存在するはずである。いま、 $V_M$ が小さく、 $Q_{AB}$ が一定( $=9.2\text{m}^3/\text{min.}$ )の場合について、切羽の中心からのメタン吐出量を $Q_M=0.01\sim 0.05\text{m}^3/\text{min.}$ の範囲で変化させ、各点における $[C]$ を求めたところ、 $[C]$ は $Q_M$ によらないほぼ一定値を示した。これらの結果 (Table 3.4に示した)は、この表の実験の範囲内では、トンネル内の各点の濃度は $Q_M$ にほぼ直線的に比例して増加することを意味している。又、この表によれば、天盤あるいは切羽に近い点のメタン濃度が、平均濃度に比して著しく高いことが明らかである。 $x=3\text{m}$ において $[C]<1$ となるのは、風管出口からの風を直接に受けてメタンが十分に希釈されていることを示している。なお、 $Q_M>0.05\text{m}^3/\text{min}$ の場合には、各点におけるメタン濃度は $Q_M$ に対して直線的に比例しなくなり、 $[C]$ はそれぞれ $Q_M<0.05\text{m}^3/\text{min.}$ のときの値より少しずつ1に近づく値を示した。

3.3.3.1.4 通風量 $Q_{AB}$ の影響

一般に $Q_{AB}$ の大きいほどメタンを混合希釈する効果が大きいと予測されるが、 $Q_{AB}$ によりメタンの濃度分布がどのようになるかは警報器検知部の配置を考える際に重要である。メタンの吐出速度が小さく、吐出位置が切羽上端に近いほど、メタンの混合希釈に要する



**Fig. 3.11** Effect of  $Q_{AB}$  on distribution of methane concentration for smaller  $Q_M$

$Q_M$ が小さい場合のメタン濃度分布に及ぼす $Q_{AB}$ の影響

\*7 図にはトンネル上部1/4の範囲を示した。

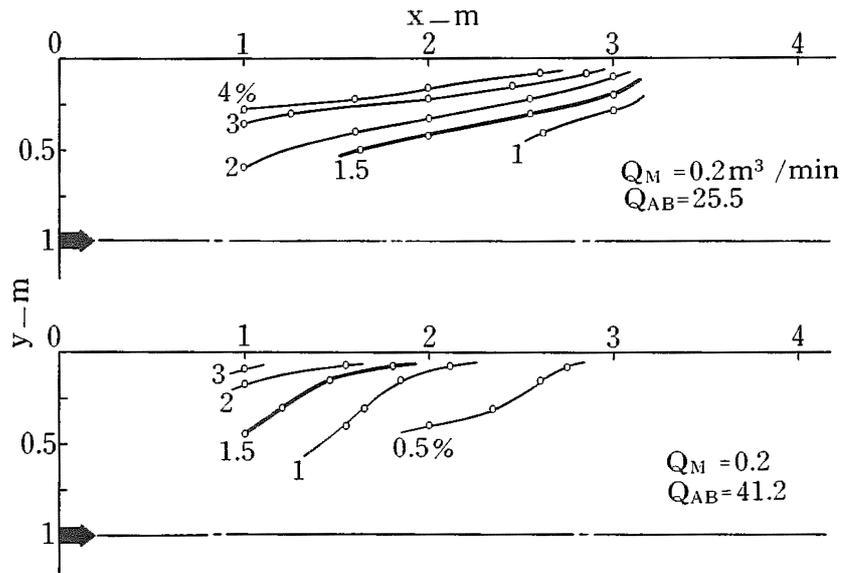


Fig. 3.12 Effect of  $Q_{AB}$  on distribution of methane concentration for larger  $Q_M$

$Q_M$ が大きい場合のメタン濃度分布に及ぼす  $Q_{AB}$ の影響

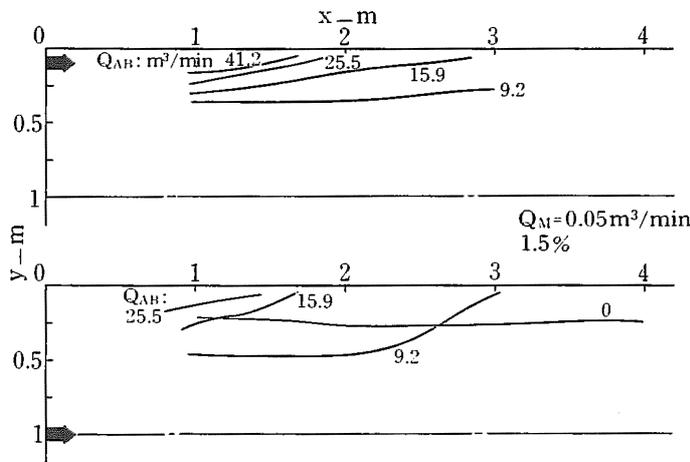


Fig. 3.13 Effect of  $Q_{AB}$  on boundary lines for 1.5% methane, with variations of the position of methane inlet

メタン濃度が1.5%となる境界線と  $Q_{AB}$ との関係

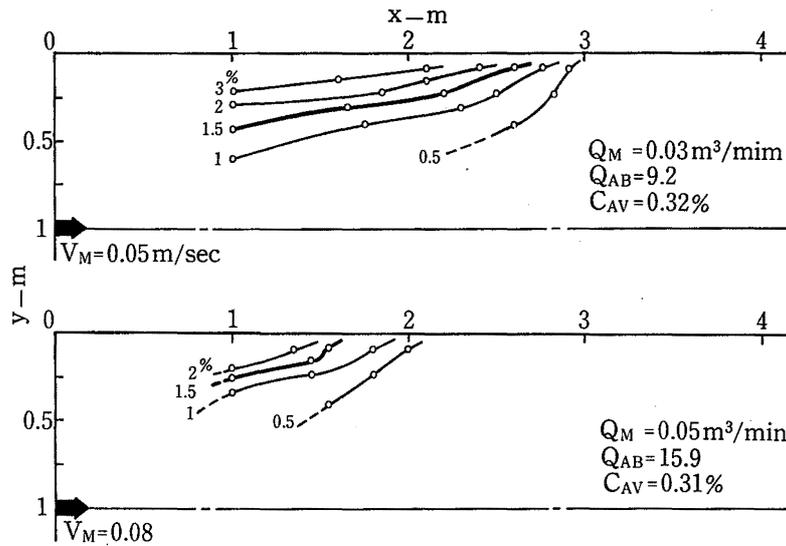
通風量が大となるべきことは既に述べたが、Fig. 3.11はこのような条件下において  $Q_{AB}$  を変化させたときの濃度分布図\*7である。又、Fig. 3.12は  $Q_M$  が大きい場合における  $Q_{AB}$  の効果を示すものである。これらの図から明らかのように、  $Q_{AB}$  を増すことによってメタンの高濃度領域を減少させ、爆発危険のある空間の容積を小さくすることはできるが、吐出メタンを正面か

ら押し込むような形の通風換気となる場合には、吐出口付近にある程度の容積の爆発危険のある空間の生ずることは避け難いと考えらるべきである。

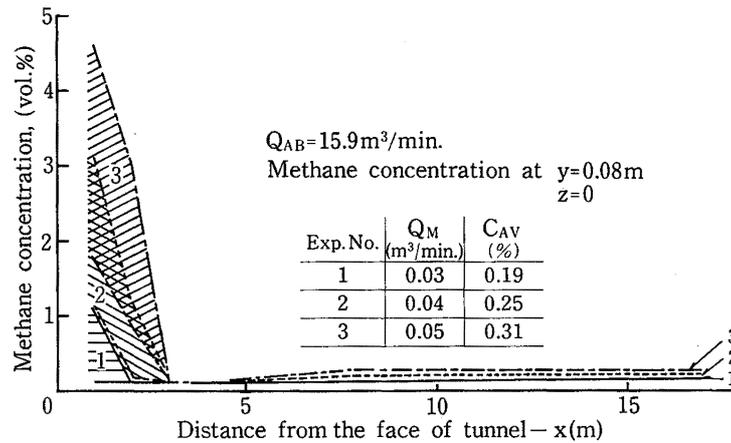
Fig. 3.13には、  $Q_M$  を一定とし、吐出位置を変えた場合について、メタン濃度が1.5%となる境界線が  $Q_{AB}$  によってどう変化するかを示した。この図によれば、1.5%を越える領域が  $Q_{AB}$  の増加につれて狭くなることが明らかではあるが、警報器検知部を設置する位置と警報濃度の設定値が  $Q_{AB}$  によって大きく影響されることを示唆している点にも留意せねばならない。

### 3.3.3.1.5 メタン吐出量 $Q_M$ と通風量 $Q_{AB}$ の相互の影響

$Q_M$  あるいは  $Q_{AB}$  の個々の影響については既に述べたが、これらが同時に変化する場合の挙動について検討するため、  $Q_M$  及び  $Q_{AB}$  の絶対量は変化するが、計算上の平均濃度  $C_{AV}$  は同じである場合について実験を行った。Fig. 3.14は結果の一例である。一般に  $C_{AV}$  が小さいほどトンネル内各点間の垂直方向の濃度勾配は小さく、  $C_{AV}$  が大きくなると濃度勾配も大きくなり、爆発危険のある空間の容積も広がるが、  $C_{AV}$  が等しくなる通風換気条件下では、  $Q_{AB}$  の大きいほどメタンを希釈する効果は大きい。Fig. 3.14においては、濃度境界線群の傾きが大きくなると濃度勾配も大きくなり、爆発危険のある空間の容積も広がるが、  $C_{AV}$  が等しくなる通風換気



**Fig. 3.14** Overlapped effects of  $Q_M$  and  $Q_{AB}$  on distribution of methane concentration, for the same average concentration ( $C_{AV}$ ) of methane  
 平均濃度が同じ場合のメタンの濃度分布に及ぼす  $Q_M$  と  $Q_{AB}$  の影響



**Fig. 3.15** Variations of methane concentration near the top of roof with the distance from the face of tunnel  
 天盤付近のメタン濃度の切羽からの距離による変化

と間隔に大差はないが、等しい濃度の境界線についてみれば、 $Q_{AB}$ の大きい方が、その境界線で囲まれる空間が切羽側に寄って狭くなっており、この境界線が左方へ寄る割合は  $Q_{AB}$  に依存する。これは、 $Q_{AB}$  が大きいほど風管出口から切羽に向う風速が大となり、切羽付近まで到達した気流が吐出メタンを混合希釈せしめるためである。このような結果からは、 $Q_{AB}$  が等しい場合には、切羽に向う風速の大きい方が（換言すれば

風管径の小さい方が）切羽付近のメタンに対する混合希釈効果は大きくなることが示唆される。しかし、実際のトンネルにおいては、風管径を小さくして通風量を増すことには困難を伴うので、風管出口と切羽との距離が大きい場合には、切羽付近まで通風換気が及ばない場合が考えられ、風速の大小によって切羽付近の危険空間の容積が定まることになる。

3.3.3.1.6 風管背後のメタン濃度分布について

風管背後（この実験では  $x > 8 \text{ m}$ ）の空間においては、通風量が充分であれば、メタンは空気と混合されて  $C = C_{AV}$  となるはずである。一方、通風量が不足であれば、天盤付近のメタン濃度は  $C_{AV}$  より大となり、床面付近では  $C_{AV}$  より小となることが予測される。風管背後のメタン濃度が位置によらず一定となる限界の通風量を知ることは実用上重要な問題であるが、ここでは、 $x = 9, 12.5$  及び  $16 \text{ m}$  の地点において、 $Q_M = 0.05 \sim 0.2 \text{ m}^3/\text{min}$ . について  $Q_{AB}$  を変化させ、天盤からの距離  $y$  及び水平方向  $z$  についてメタン濃度を測定した。この結果、 $Q_{AB} > 15.9 \text{ m}^3/\text{min}$ . では、メタン濃度は  $C = 0.8C_{AV} \sim 1.05C_{AV}$  の範囲で一定となり、位置による濃度の差は認められなかった。又、 $Q_{AB}$  を  $9.2 \text{ m}^3/\text{min}$ . に減じた場合には、垂直方向の各点の濃度は  $C = 0.5C_{AV} \sim 1.3C_{AV}$  となり、水平方向についての濃度差はほとんどなかったが、垂直方向についてはかなりの濃度勾配がみられ、メタンと空気との混合がまだ充分ではないことが示された。従って、実験の範囲内では、メタンが充分に混合されるに要する限界の通風量は  $Q_{AB} = 10 \sim 15 \text{ m}^3/\text{min}$ . とみなすことができる。

Fig. 3.15 は、天盤真下におけるメタン濃度を、 $Q_{AB} = 15.9 \text{ m}^3/\text{min}$ .,  $Q_M = 0.03 \sim 0.05 \text{ m}^3/\text{min}$ . の場合について、トンネル全長にわたって測定した結果である。図には各実験において定常とみなせる状態に達したときの濃度の変動幅も示したが、図から明らかなように  $x < 3 \text{ m}$  の範囲では濃度の変動は著しく、 $Q_M = 0.05$

$\text{m}^3/\text{min}$ . においても爆発下限界近くの濃度に達することがある。 $x = 3 \sim 4 \text{ m}$  では、風管からの風を直接に受けるため、メタン濃度は極めて低くなり、風管背後（ $x > 8 \text{ m}$ ）では、メタン濃度はそれぞれの  $Q_M$  に対して一定となり、その値は  $C_{AV}$  にほぼ等しくなることがわかる。

### 3.3.3.2 主風管による吸出し通風換気の場合

本報の実験はすべてメタンの吐出位置を切羽面に限定して行ったため、主風管による吸出し通風換気の場合には、風管背後から風管吸出し口へ向う気流中にはメタンは存在しないことになる。しかし、実際のトンネルにおいては、こうした気流中にも湧出メタンが含まれる場合があるので、警報器検知部の配置を考える際には、この点に特に注意を要する。

なお、本項における実験の吸出し通風量はすべて  $Q_{AS} = 60 \text{ m}^3/\text{min}$ . とした。

#### 3.3.3.2.1 メタン吐出速度 $V_M$ の影響

Fig. 3.16 には  $V_M = 20$  及び  $0.16 \text{ m/sec}$ . の場合のトンネル内のメタン濃度分布を示した。上下両図の比較から明らかなように、 $V_M$  により濃度分布は全く異なったものとなる。 $V_M$  が小さい場合には、切羽から風管吸出し口までの間において、天盤近くが高濃度となるメタンレイヤが形成され、垂直方向の濃度勾配も大きい。これらの傾向は、押込通風換気の場合と同様であるが、吸出し通風換気の場合には、風管吸出し口までのメタンレイヤは  $x$  によってほとんど変化しないのが特徴で

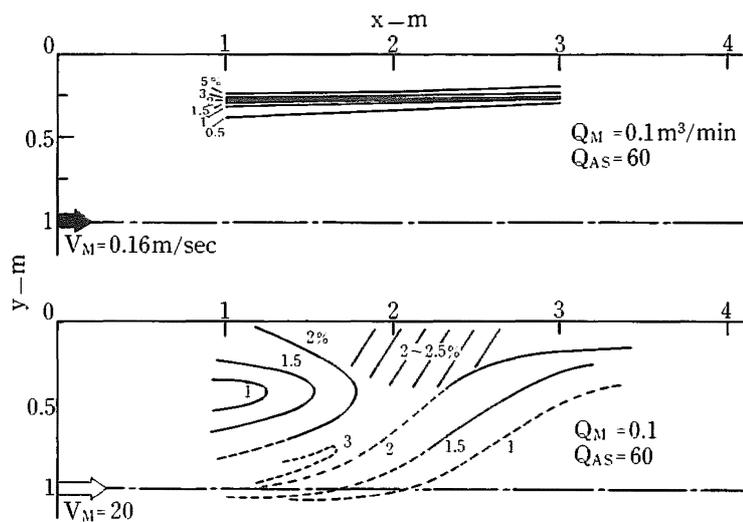


Fig. 3.16 Effect of  $V_M$  on distribution of methane concentration

メタンの濃度分布に及ぼす  $V_M$  の影響

ある。(押し込み通風換気の場合には、風の影響によって、メタンレイヤの厚さが急激に変化する  $x$  がある。Fig. 3.7参照)

一方、 $V_M$  が大きい場合には、押し込み通風換気の場合と同様に、空気との接触面積の増大によってメタンと空気との混合が促進される。このため、切羽に近いところではメタンレイヤが形成されにくい。切羽から離れるにつれてメタンレイヤが形成されるが、天盤に近い層のメタン濃度は  $V_M$  の小さい場合に比して低く、垂直方向の濃度勾配も  $V_M$  の増すにつれて小さくなる。 $x < 2$  m の範囲の濃度分布は押し込み通風換気の場合と同様に単純な形とはならず、図の濃度境界線群が正確か否かに疑問はあるが、噴出したメタンの流線が推力と浮力の作用によって右上方に向かい、その周辺のメタン濃度が距離と共に減ずるといふ濃度分布を示すと考えられる。

3.3.3.2.2. メタンの吐出位置の影響

他の条件がすべて同じで、メタンの吐出位置のみを変えたときの濃度分布を Fig. 3.17 に示す。高濃度メタン領域の厚さ及び垂直方向の濃度勾配の大きさに及ぼす吐出位置の影響は、押し込み通風換気の場合に考察したとおりであり、このような挙動を示す理由もまた既に述べたとおりである。

3.3.3.2.3. メタン吐出量  $Q_M$  の影響

Fig. 3.18 は、 $Q_M$  を変化させたときに、メタン濃度が 3% 及び 0.5% となる境界線を示すものである。

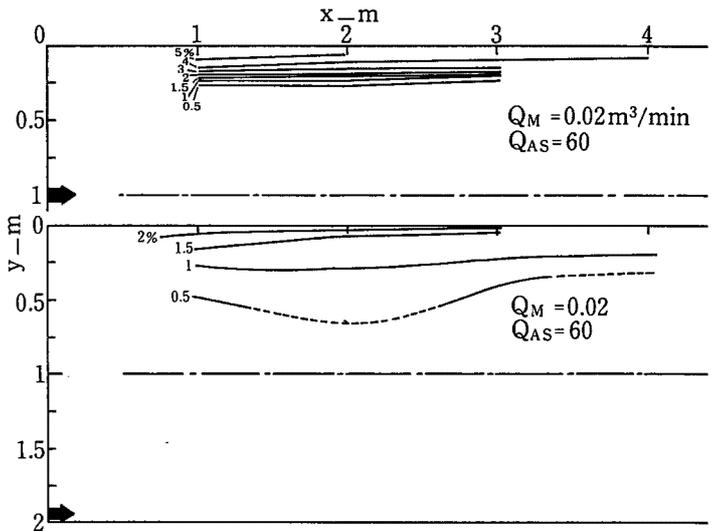


Fig. 3.17 Effect of the position of methane inlet on distribution of methane concentration  
メタンの濃度分布に及ぼす吐出位置の影響

Fig. 3.18 は、ある濃度のメタンレイヤの厚さは  $Q_M$  の増すにつれて増大することを示しているが、同じ  $Q_M$  について 3% 及び 0.5% となる境界線を比較すれば、レイヤの垂直方向の濃度勾配が極めて大きいこともわかる。又、例えば 0.5% となる境界線についてみれば、 $Q_M$  の増加によりメタンレイヤの厚さは増加しているが、 $Q_M$  が  $0.01$  から  $0.1 \text{ m}^3/\text{min}$  と 10 倍になってもレイヤの厚さは 2 倍以下にすぎない。このことは、 $Q_M$  が増

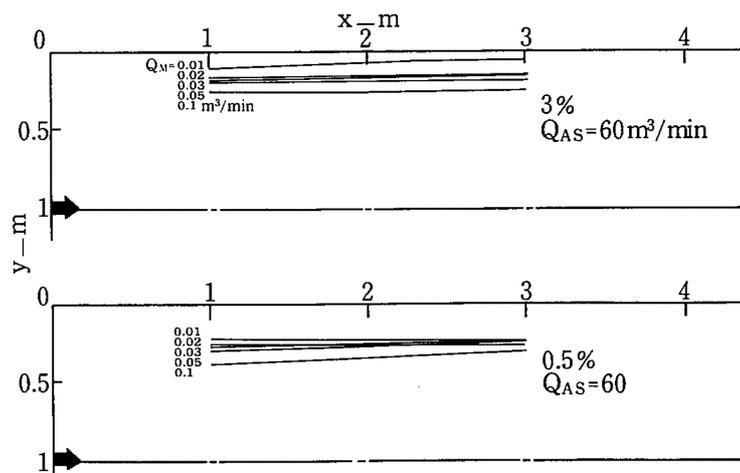


Fig. 3.18 Effect of  $Q_M$  on the thickness of methane layers: boundary lines are drawn for 3% and 0.5% respectively

メタンレイヤの厚さと  $Q_M$  の関係 (メタン濃度が 3% と 0.5% に対する境界線)

大してもレイヤの厚さは極端には増加せず、吐出したメタンは一定厚さのレイヤを形成し、その状態を維持しながら次々と風管吸出し口の方へ流動することを意味している。

これらの結果を通風換気のない場合と比較してみると (Fig. 3.24参照), その挙動には殆んど差が認められず、吸出し通風換気は、風管吸出口に達したメタンのみを排出するのであって、吐出したメタンや風管吸出し口から切羽に寄った領域に形成された層状メタンの混合希釈には殆んど寄与しないと考えるべきである。(但し、実際のトンネルにおいては、通風換気のない場合にはメタンの吐出が続く限りメタンレイヤはトンネル全体の天盤付近を次第に拡がってゆくが、吸出し通風換気を行ってれば、風管吸出口背後へメタンレイヤが拡がることを阻止することは可能であるから、トンネル全体の安全という観点からは通風換気を行う方がより好ましいことは勿論である。吸出し通風換気が効果的であるか否かは、メタン吐出位置と風管吸出し口との距離に大きく依存する。)

3.3.3.3 併用通風換気及び補助風管による押込み通風換気の場合

吸出し通風換気のみでは切羽付近のメタンの混合希釈を効果的に行い難いことが確認された。本項では、主風管による吸出しと補助風管による押込みを併用した通風換気の場合と、これとの比較のために、補助風管による押込み通風換気の場合についてメタン濃

度の分布を調べた。なお、併用通風換気は押込みによって空気を吹きつけて切羽付近のメタンを混合希釈し、希釈された混合ガスを吸出しによって排出するものであるが、この実験では、押込み空気は切羽正面に吹きつけるよりも、切羽面をぬぐい去るようにする方が効果的であろうとの考えに基づいて、Fig. 3.6に示した風管位置として、吸出し通風量は  $Q_{AS}=60\text{m}^3/\text{min}$  の一定値として、常に  $Q_{AS}>Q_{AB}$  を満足する条件下で通風量、メタン吐出量、メタン吐出位置などを変化させた

前項までの実験においては、風管及び吐出口の位置はトンネルの中心垂直断面上にあるので、濃度分布はこの断面に関して対称であるとみなし、濃度測定はすべて中心垂直断面上で行った。本項においては補助風管の位置からみて、濃度分布が中心垂直断面に関して対称となるとは考えられない。本実験の目的は、警報器検知部の適正配置について情報を得ることにあるので、こうした非対称的な気流のある場合の濃度分布を知るためには、少なくとも最大及び最小濃度を与える位置を把握する必要がある、この点に留意して濃度測定点を定めた。なお、本項の実験結果は濃度分布図として描くことができず、測定点の位置と濃度との関係を論ずることになるので、測定位置 (検知部の配置) を Fig. 3.19に示しておく。図からわかるように、検知部の配置は、パターンA及びBの二種類とした。

Table 3.5に  $Q_M=0.1\text{m}^3/\text{min}$  の場合の一連の結果を示す。表には、補助風管による通風量  $Q_{AB}$  と通風換

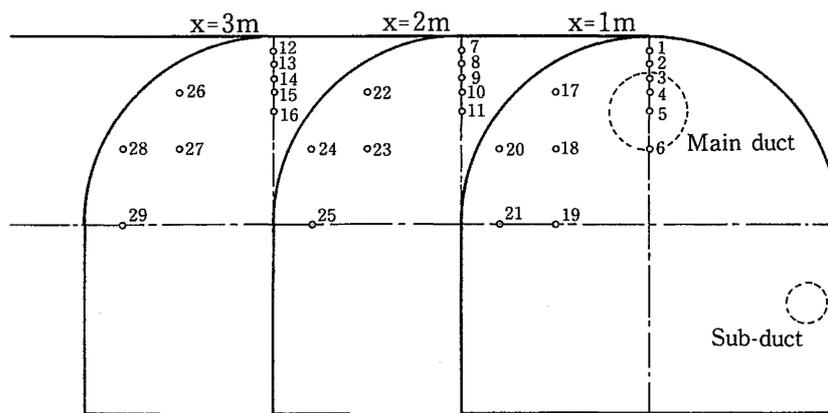


Fig. 3.19 Arrangement of methane detectors for experiments: Pattern A (detectors No.1 ~16) is for air blow or air suction by main duct and Pattern B (detectors No. 4, 10, 15 and 17~29) is for experiments by sub-duct.

濃度測定用検知部の配置図

**Table 3.5** Effect of the type of air ventilation on methane concentration with variation of  $Q_{AB}$ ,  $V_M$  and the position of methane inlet  
 補助風管による押込みの場合と、主風管による吸出しを併用した場合の種々の条件下におけるメタン濃度

( $Q_{AS}=60\text{m}^3/\text{min.}$ ,  $Q_M=0.1\text{m}^3/\text{min.}$ )

|     | Arrangement of detectors | $V_M$     | Position of methane inlet | Q <sub>AB</sub> by sub-duct       | 25m <sup>3</sup> /min |               | 15m <sup>3</sup> /min |                | 5.4m <sup>3</sup> /min |                       |
|-----|--------------------------|-----------|---------------------------|-----------------------------------|-----------------------|---------------|-----------------------|----------------|------------------------|-----------------------|
|     |                          |           |                           | Type of air ventilation           | S+B                   | B             | S+B                   | B              | S+B                    | B                     |
| (a) | pattern A                | 0.16m/sec | middle                    | C <sub>max.</sub> detector No.    | 0.42<br>⑮             | 0.49<br>⑧, ⑮  |                       | 0.77<br>⑮      |                        | 1.55<br>⑫             |
|     |                          |           |                           | C <sub>min.</sub> detector No.    | 0.30<br>①             | 0.36<br>①     |                       | 0.56<br>①      |                        | 0.52<br>①             |
|     |                          |           |                           | $\bar{C}$<br>s<br>C <sub>AV</sub> | 0.37<br>0.029         | 0.44<br>0.033 |                       | 0.68<br>0.048  |                        | 0.93<br>0.272<br>1.85 |
| (b) | pattern B                | 0.16m/sec | middle                    | C <sub>max.</sub> detector No.    | 0.77<br>⑳             | 0.84<br>⑳     | 0.16<br>⑳             | 1.29<br>⑳      | 2.41<br>⑳              | 2.59<br>⑳             |
|     |                          |           |                           | C <sub>min.</sub> detector No.    | 0.31<br>④             | 0.34<br>④     | 0.45<br>④             | 0.53<br>④      | 0.40<br>④              | 0.64<br>④             |
|     |                          |           |                           | $\bar{C}$<br>s<br>C <sub>AV</sub> | 0.45<br>0.110         | 0.50<br>0.118 | 0.66<br>0.184         | 0.76<br>0.188  | 1.02<br>0.525          | 1.26<br>0.508<br>1.85 |
| (c) | pattern B                | 20m/sec   | middle                    | C <sub>max.</sub> detector No.    | 0.83<br>⑳             | 0.87<br>⑳     | 1.12<br>⑳             | 1.18<br>⑳      | 2.45<br>⑱              | 2.38<br>⑱             |
|     |                          |           |                           | C <sub>min.</sub> detector No.    | 0.33<br>④             | 0.38<br>④     | 0.56<br>㉓             | 0.62<br>④      | 0.43<br>⑳              | 0.83<br>⑳             |
|     |                          |           |                           | $\bar{C}$<br>s<br>C <sub>AV</sub> | 0.47<br>0.123         | 0.51<br>0.122 | 0.725<br>0.150        | 0.80<br>0.152  | 1.22<br>0.488          | 1.56<br>0.454<br>1.85 |
| (d) | pattern B                | 0.16m/sec | lower                     | C <sub>max.</sub> detector No.    |                       |               | 0.68<br>㉑             | 0.76<br>㉑      | 1.96<br>㉑              | 2.11<br>㉑             |
|     |                          |           |                           | C <sub>min.</sub> detector No.    |                       |               | 0.45<br>㉒             | 0.50<br>㉒      | 0.49<br>㉑              | 0.73<br>㉑             |
|     |                          |           |                           | $\bar{C}$<br>s<br>C <sub>AV</sub> |                       |               | 0.53<br>0.062         | 0.595<br>0.069 | 0.83<br>0.379          | 1.09<br>0.363<br>1.85 |
| (e) | pattern B                | 0.16m/sec | upper                     | C <sub>max.</sub> detector No.    |                       |               | 1.12<br>⑩             | 1.21<br>⑩, ㉒   | 3.23<br>㉒              | 4.54<br>㉒             |
|     |                          |           |                           | C <sub>min.</sub> detector No.    |                       |               | 0.37<br>㉓             | 0.45<br>㉓      | 0.14<br>㉑              | 0.38<br>㉑             |
|     |                          |           |                           | $\bar{C}$<br>s<br>C <sub>AV</sub> |                       |               | 0.70<br>0.250         | 0.80<br>0.256  | 1.42<br>1.018          | 2.06<br>1.432<br>1.85 |

C<sub>max.</sub> : maximum concentration of methane (% by volume)  
 C<sub>min.</sub> : minimum concentration of methane (% by volume)  
 $\bar{C}$  : average value of methane concentrations measured by 16 detectors (% by volume)  
 s : standard deviation of methane concentrations (% by volume)  
 C<sub>AV</sub> : average concentration of methane, calculated ( $=100 \times Q_M / (Q_{AB} + Q_M)$ ) % by volume)  
 S+B : air suction ventilation by main duct combined with air blowing ventilation by sub-duct  
 B : air blowing ventilation by sub-duct only

気の方法を変えた場合について、各々の検知部配置パターンにおいて測定されたメタンの最大及び最小濃度のみを、これらの濃度が測定された位置（検知部の番号）と共に記した。又、毎回の実験ではA、Bいずれかのパターンにより同時に16箇所の濃度を測定したが、表にはこれら16個の測定値の平均値及びその標準偏差も示した。測定値の平均値を $C_{AV}$ と比較すれば、メタンの混合希釈される程度を推定でき、又、標準偏差は各測定点の平均値からの偏り具合を示すものであるから、やはり混合希釈の度合を示す目安となる。

### 3.3.3.3.1 メタン濃度が最大となる位置について

Table 3.5のうち、検知部の配置がパターンAの場合（吐出口は切羽の中心である）の結果によれば、トンネルの中心垂直断面上においては、補助風管による通風量が $Q_{AB} > 15\text{m}^3/\text{min.}$ であれば、吸出し通風換気の有無には関係なく最大濃度と最小濃度の差は小さいことがわかる。又、16個の測定値間の差も小さく、これらの平均値が $C_{AV}$ に近いことから、吐出メタンは比較的よく混合されていることがわかる。メタン濃度が最大となるのは、切羽から3mのところ、垂直方向については（ $Q_{AB}$ によって幾らか変化するが）いずれも天盤に近いところである。メタン濃度が最小となる位置は常に同じであった。

$Q_{AB}$ が $10\text{m}^3/\text{min.}$ 以下に減ると、最大・最小の濃度差は大きくなり、16個の測定値の平均値が $C_{AV}$ より著しく小さくなり、かつ標準偏差も大きくなるので、パターンAにより配置された検知部の位置以外のところに更に高濃度のメタン領域が存在するものと推定された。検知部の配置をパターンBに変えてz軸方向及び壁面付近の濃度分布を調べたところ、濃度が最大となるのは $x = 1\text{m}$ で、切羽に平行な断面上で考えればトンネルの中心に対して補助風管の出口と対称な位置（検知部No.20）で、この位置は $Q_{AB}$ によって変らなかった。なお、 $x = 2$ 及び3mにおいても、これに相当する位置（検知部No.24及び28）において高濃度が記録された。このことからみて、補助風管からの気流は、主として切羽の中心付近を掃気しつつ、切羽に面して右上方へ向い、更に壁面に沿って切羽から遠ざかると考えられ、切羽中心から吐出したメタンの大部分はこの気流に乗り、主風管により吸出されるか、あるいはそのままトンネル出口へ向って運ばれるものであろう。このことは、メタン濃度が最小となる位置が（ $Q_M$ が大きく $Q_{AB}$ の小さい場合を除けば）常に $x = 1$

mの中心垂直断面上で天盤に近いところ（検知部No.4）であることからもうなずける。つまり、切羽中心からのメタンは気流に乗って奪い去られるため、吐出口の真上には上昇しないとみられる。

### 3.3.3.3.2 併用通風換気と補助風管による押込み通風換気単独の場合の比較

Table 3.5において、通風換気の方法を変えたときの最大・最小濃度と測定値の平均値を比較すれば、トンネル内各点のメタン濃度は、併用通風換気の場合の方が低いことがわかるが、その差はわずかであり、特に押込み通風量が大きい場合（ $Q_{AB} = 25\text{m}^3/\text{min.}$ ）には両者の差は約1割である。このことは、補助風管による押込み通風の効果が大きく、逆に言えば主風管による吸出しは吐出したメタンの混合希釈にあまり寄与しないという前項の論議を裏づけるものである。補助風管による押込みの効果が大きい最大の理由は、風管の出口がトンネルの側低部にあることによると思われ、この位置関係において切羽面を最も掃気しやすい気流が生ずるためである。主風管による押込みの場合の最大濃度を与える位置が、この実験では低い濃度を示すこともこの推論の論拠となろう。又、気流が切羽からのメタンを正面から押込みよりも、切羽面を掃気するように流れる方が、切羽付近のメタンの蓄積を阻止する上で有効である。

なお、補助風管と主風管の位置関係のほかに、補助風管の出口が主風管の吸出し口よりも切羽側にあり、かつ切羽に接近していること、及び、補助風管の管径が小さいので、通風量が同じでも風管出口の風速が大きくなることも、この実験で補助風管の効果が大きいという結果をもたらした理由と考えられる。従って、単に併用換気を行えば効果があるというのではなく、これらの因子を適切に選択する必要があることに留意せねばならない。

### 3.3.3.3.3 メタン吐出速度 $V_M$ の影響

Table 3.5には $V_M$ も示してあるが、他の条件が同じ場合について $V_M$ の影響を比較すると（Table 3.5の(b)と(c)を参照）、 $Q_{AB}$ が大きい（ $25\text{m}^3/\text{min.}$ ）場合には、最大・最小濃度と、その濃度を示す位置及び測定値の平均値がほぼ同じであることから、トンネル内のメタン濃度分布は $V_M$ に影響されないものと思われる。一方、 $Q_{AB}$ が $5.4\text{m}^3/\text{min.}$ と小さい場合には、 $V_M$ によって濃度分布が変化し、最大あるいは最小濃度を与える位置も異なってくる。これは、 $Q_{AB}$ が小さいほど風

管出口風速も小となり、吐出メタンを掃気しにくくなるため、 $V_M$ が大きければメタンの吐出力が優勢となって、最大濃度の位置は吐出口のあるトンネル中心線上に近づくものであろう。この実験における $V_M$ とトンネル内のメタン濃度の分布の関係は $Q_{AB}$ によって影響されるので単純に論ずることはできないが、例えば測定値の平均値からの標準偏差を見れば、 $V_M$ の大きい方がメタンが混合されやすいことが推論され、この傾向は、主風管による押込み又は吸出し通風換気の場合の結果と同じである。

### 3.3.3.3.4 メタンの吐出位置の影響

メタンの吐出位置と濃度分布の関係は、Table 3.5の(b), (d), (e)の結果を比較することによって知ることができる。いま仮りに最大濃度を与える位置を調べると、吐出口が切羽下方の場合には、 $Q_{AB}=15\text{m}^3/\text{min.}$ においては、 $x=3$ 、 $y=1\text{m}$ の壁面近く(検知部 No. 29)であった。<sup>\*8</sup> (この位置は、同条件で吐出口が切羽中心の場合よりも下方で、かつ切羽から離れた位置である。)  $x=2\text{m}$ においてもこれに相当する位置で高濃度が測定された。 $Q_{AB}=5.4\text{m}^3/\text{min.}$ では、最大濃度の位置は、相対的には同じであるが $x=1\text{m}$ のところとなった(検知部 No. 21)。吐出口が下方の場合には、 $Q_{AB}$ によって吐出メタンが希釈される度合が異なるため、最大濃度を与える位置の高さは同じでも、 $x$ は $Q_{AB}$ によって変化することになる。メタンが切羽上方から吐出したときに最大濃度が測定される位置は $Q_{AB}$ によって少し異なるが、 $x=2\text{m}$ で天盤に近いところ(検知部 No. 10 又は 22)であった。

このように、最大濃度を示す位置はメタンの吐出位置によっても変わってくるが、大まかに言えば次のようになる。切羽面に平行な断面を考えれば、切羽の中心に対して補助風管出口の位置と対称になるあたりが中心吐出の場合の最大濃度位置であり、メタン吐出口が上方又は下方へ移動すれば、最大濃度を与える位置もそれにつれて上下する。しかしながら、これらの位置は、トンネル断面を中心線で四分した場合に、補助風管のある部分と中心に対して対称の部分に存在することになり、 $x$ 方向については限定できないにしても、警報器検知部の配置を考える際に有益な結果といえよう。なお、各測定点の濃度から求めた標準偏差は吐出口の位置が上、中、下となるにつれて小さくなっており、吐出口が上方にあるほどトンネル内のメタン濃度は一定になり難しく、高濃度のメタンの偏在するおそれ

があると考えられる。

### 3.3.3.3.5 メタン吐出量 $Q_M$ の影響

種々の条件下において、 $Q_M=0.1$ 及び $0.2\text{m}^3/\text{min.}$ について濃度の最大・最小、測定値の平均値及び標準偏差を求めたところ、 $Q_M=0.2$ の場合の値はいずれも $Q_M=0.1$ の場合のほぼ2倍となった。このことから、本項に述べた二つの通風換気の方法の場合においてもトンネル内各点のメタン濃度は $Q_M$ に比例することが推定される。

### 3.3.3.4 通風換気のない場合

メタンの湧出するおそれのあるトンネルにおいては連続的に十分な通風換気が行われるべきであるが、停電や送風機の故障等の原因で通風が停止することもありうる。このような事態は特に危険であって、警報器検知部の配置を決定する際には通風のない場合のメタン濃度分布も考慮しておかなければならない。本項では、通風換気のない状態でメタン吐出の条件を変えて実験した。なお、濃度測定点はすべてトンネル中心垂直断面上である。

#### 3.3.3.4.1 メタン濃度の時間的变化

通風のないときに切羽面から吐出したメタンは浮力により上昇し、メタンレイヤを形成する。このレイヤは、渦動拡散及び分子拡散によって高濃度側から低濃度側へ移動する。この際の挙動は通風のある場合の結果から予測されるとおりであるが、通風のない場合に

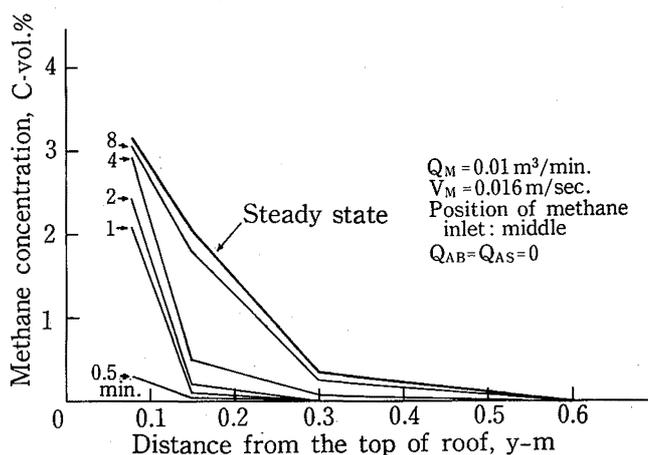


Fig. 3.20 Time lapse of vertical gradient of methane concentration, at  $x=2\text{m}$  and  $z=0$

垂直方向の濃度勾配の時間的变化

\* 8  $y > 1\text{m}$ については測定していないが、メタンの性状からみて  $y > 1$ の範囲がより高濃度になるとは考えにくい。

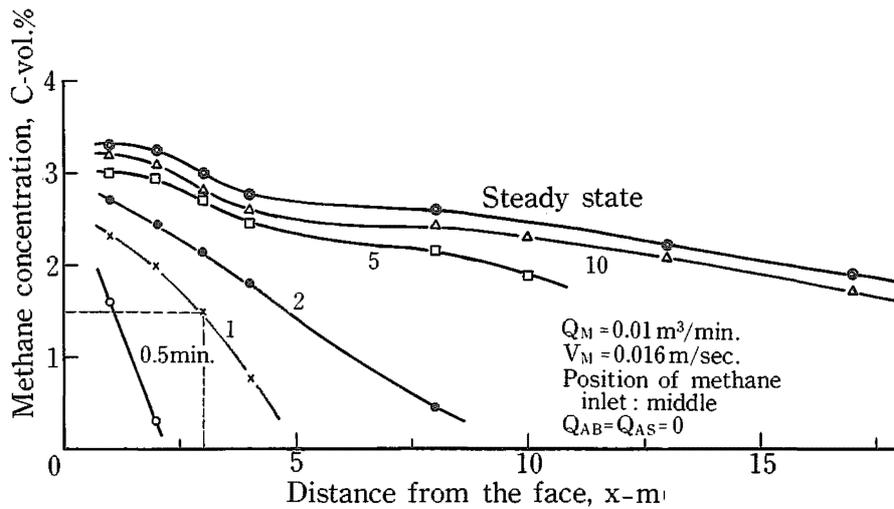


Fig. 3.21 Time lapse of horizontal gradient of methane concentration, at  $y=0.08\text{m}$  and  $z=0$   
 水平方向の濃度勾配の時間的变化

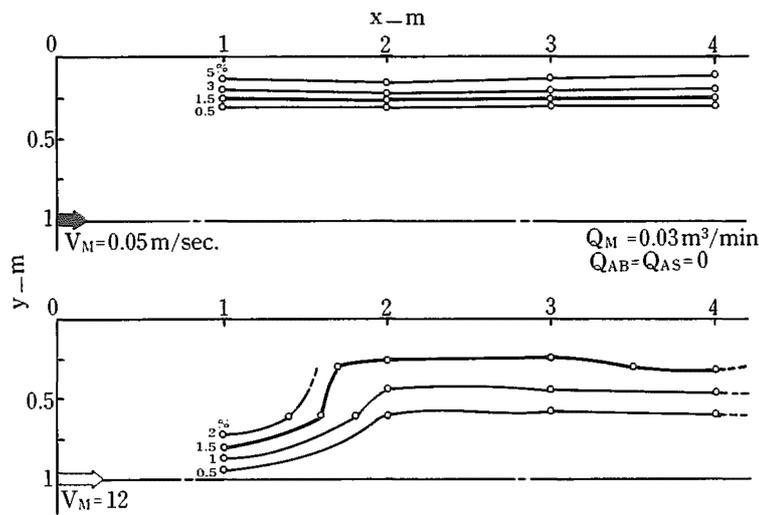


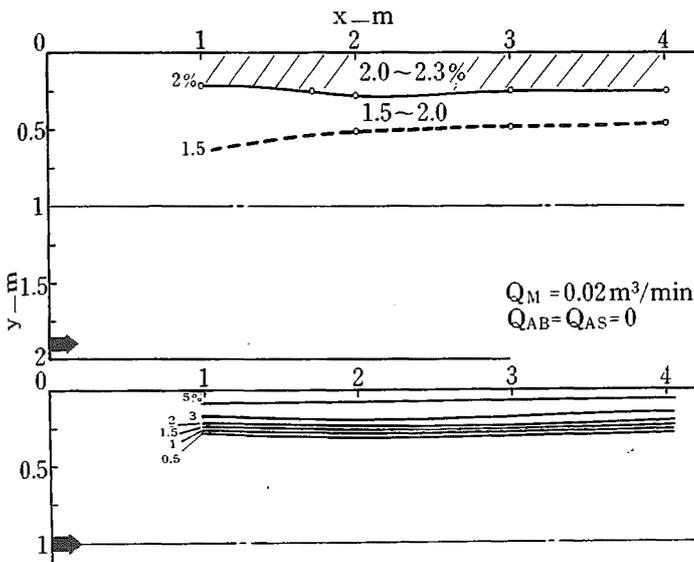
Fig. 3.22 Effect of  $V_M$  on distribution of methane concentration  
 メタンの濃度分布に及ぼす  $V_M$  の影響

は定常なメタンレイヤが形成されるまでの時間的变化は重要である。Fig. 3.20 及び 3.21 にその例を示す。図はそれぞれ  $x$  あるいは  $y$  の値を一定としたときの、 $y$  あるいは  $x$  方向の距離に対する濃度の時間的变化を示しているが、これらの場合には、メタンの吐出後約 8~10 分を経過すると、定常状態に近づくことがわかる。Fig. 3.20 によれば、この実験条件下では、天盤から 30cm 以上さがったところではメタンが存在しないことがわかる。又、Fig. 3.21 によれば、天盤から 8 cm のところで、メタンの吐出後 1 分以内に 1.5% のレベ

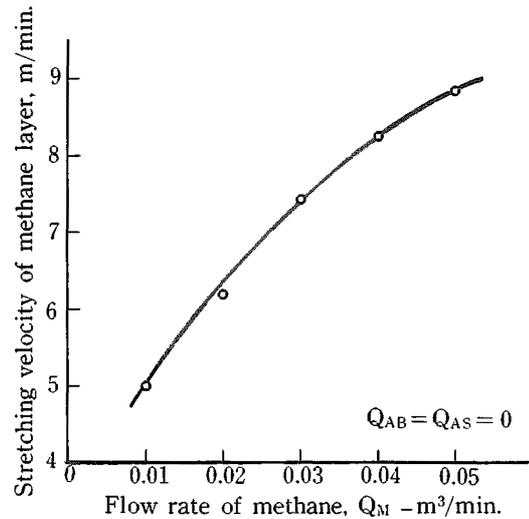
ルでメタンを検知するためには、検知部の位置はメタンの吐出面から 3 m 以内とせねばならないことがわかる。このような関係は、トンネルの大きさやメタン吐出量によって変動するので、それぞれのトンネルに応じた配慮が必要である。

3.3.3.4.2 メタンの吐出速度  $V_M$  の影響

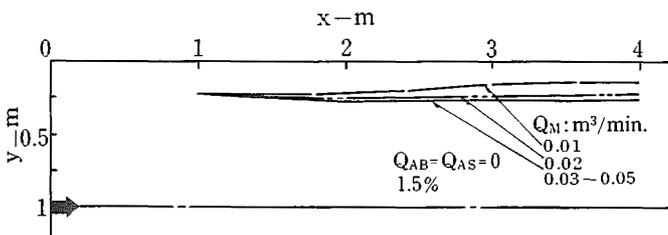
Fig. 3.22 は  $V_M$  の影響を示す例であるが、 $V_M$  が小さければ垂直方向に濃度勾配の大きいメタンレイヤが形成され、 $V_M$  が大きければレイヤの形成までに空気と混合されてレイヤの垂直方向の濃度勾配は小さくな



**Fig. 3.23** Effect of the position of methane inlet on distribution of methane concentration  
メタンの濃度分布に及ぼす吐出位置の影響



**Fig. 3.25** Relation between  $Q_M$  and stretching velocity of methane layer near the top of roof  
天盤付近におけるメタンレイヤの移動速度



**Fig. 3.24** Effect of  $Q_M$  on boundary lines for 1.5% methane  
メタン濃度が1.5%となる境界線と  $Q_M$  の関係

る。このような挙動は、通風量の少ない通風換気の場合の結果から容易に理解されよう。

### 3.3.3.4.3 メタンの吐出位置及び吐出量の影響

Fig. 3.23は、メタンの吐出位置の影響を示す例である。吐出位置によってメタンレイヤの濃度、あるいは垂直方向の濃度分布がどのように変化するかは、前項までに述べたことから明らかであろう。Fig. 3.24は吐出量  $Q_M$  の影響を示す例であって、曲線群はメタン濃度が1.5%となる境界線であるが、メタンレイヤの厚さと  $Q_M$  の関係は通風換気のある場合と同じ傾向を示している。

### 3.3.3.4.4 メタンの移動速度について

通風のない状態において、切羽から吐出したメタン

が移動する速度がどの程度かを知ることは興味がある問題であろう。切羽中心から滲出したメタンが天盤に沿って移動する速度を吐出量に対して示したのがFig. 3.25である。ここでいう移動速度とは、天盤から8cmの距離に  $x = 1 \sim 16m$  の範囲にわたって設置した検知部の出力の立上り時間をもとにして求めたものである。なお、測定した区間においては移動速度は  $x$  によらずほぼ一定であった。

図から明らかなように、移動速度は  $Q_M$  とともに増大する。 $Q_M$  が増すほど吐出口から天盤へ向けて上昇する間に希釈される度合は少ないので、高濃度のメタンが浮力により上昇し、天盤に押えられているために水平方向の力が加わり、メタンは  $x$  方向へ移動する。この力は水平方向の濃度勾配の大きいほど大きくなるので図のような結果となる。

### 3.3.4 考察

本節においては、ガス警報器検知部の適正配置についてある程度具体的に示すために、前節の実験結果のうちからメタンの挙動と通風換気の効果について概括し、これに基づいて検知部の配置と警報設定濃度をいかにすべきかを論ずる。更に、この研究の結果を利用してスケール・アップされたトンネルにおけるメタン湧出による危険性を予測するひとつの方法としての相

似則について簡単に述べる。

### 3.3.4.1 トンネル内におけるメタンの挙動と通風換気の効果

メタンは空気よりも軽いので空気中において常に上昇しようとし、トンネル内の天盤付近に蓄積してメタンレイヤを形成する性質がある。メタンレイヤの厚さはある程度は湧出メタン量に比例するが、湧出量が増してもレイヤの厚さには限度がある。従って、通風の無い場合には、形成されたメタンレイヤはある厚さを維持したままトンネル内全体に広がって行き、このときのメタン濃度は天盤に近いほど大きく、下方にさがるにつれて濃度が減ると同時に低濃度領域の厚さが増加するという傾向を示す。又、湧出したメタンは上昇する過程において空気と混合するので、湧出位置が天盤に近いほど、又、湧出速度の小さいほどメタンレイヤ中の高濃度領域は増加する。メタンの湧出速度が極めて大きい場合には湧出位置の上方のメタン濃度が小さくなると考えられるが、一般には（メタン湧出の位置・量・速度に関係なく）湧出位置に近いほど、又、天盤に近いほどメタン濃度は大きいとみてよい。

押込み通風換気の効果は風管出口からの空気がメタンと混合する割合によって決まり、これを支配する因子は風管出口の風速と気流の方向である。風量が同じであれば風速の大きい方が混合効果は大きい。風量・風速が同じならば、湧出したメタンを抑えこむような気流よりはメタンを掃き出すような気流の方が効果的である。又、他の条件が同じであればメタンの湧出位置の近くに風管出口がある方が好ましいことは明らかである。なお、押込み通風換気の場合には湧出メタンを単に空気と混合するだけでは充分でなく、混合された気流中のメタン濃度が爆発のおそれのない低い値に保持されるだけの通風量が必要である。特に注意を要するのは風管がトンネルの中心垂直断面上にある場合であって、通風量を増すと切羽付近のメタンレイヤを切羽の方へ押込める形となり、空気と接触する部分ではメタンは混合希釈されるが、風の届かない範囲には高濃度のメタンが閉じこめられることになる。

吸出し通風換気の欠点は風管吸出し口と切羽との間に気流を生ぜしめないことであり、この換気法単独で用いることは危険である。

併用法は実用的な換気方法であるが、押込みと吸出しの通風量のバランスには留意せねばならない。

通風換気が行われていてもメタンの挙動は変わらない

が、特に押込み通風がなされているときの空気とメタンの混合の生ずる領域においては濃度分布は複雑となる。この場合であっても、直接に風を受ける部分を除けば、やはり湧出源あるいは天盤に近いほどメタン濃度は大となると考えてよい。一般に、ある場所において垂直方向の濃度勾配がなければ、その場所におけるメタンと空気の混合は良好になされているとみてよい。トンネル内の気流が偏心している場所を除けば、切羽面に平行な面上における水平方向の濃度差は小さいと考えられる。一旦空気と混合したメタンは再び分離することがないから、トンネル全長にわたって垂直方向に濃度差がなく、かつメタン濃度を充分低く抑えることができれば、通風換気の目的は達せられたことになる。

### 3.3.4.2 検知部の配置と警報設定濃度

#### 3.3.4.2.1 検知部の配置についての基本的考え方

ガス警報器の機能はある濃度レベルにおいて警報を発することであると考えられているが、警報機能は付随的なものであつて本来はガス濃度の測定装置であるから、これを適切に配置することによってトンネル内のメタンの湧出量や湧出位置について連続的に情報を得ることもできるのである。実際には警報機能のみが重視されて、警報が発せられるまでは安全だというような考え方や使い方がなされているように思えるが、こうした利用法は改められるべきであろう。

トンネル内のメタンの湧出状態や濃度分布を正確に把握するにはばう大な数の警報器検知部を必要とするが、現実には検知部の使用には限度があるので、これら有限個の検知部の配置はトンネル全体の状況を知り得るように効果的に設計されなければならない。このためには基本的に局所検知と全体検知の考え方が採用されることになろう。局所検知は、現にメタンが湧出しているかあるいは湧出のおそれのある比較的狭い空間を重点的に監視するのがねらいである。全体検知は、トンネル内の比較的広範囲の部分をも1台の検知部によって監視し、その平均濃度から対象となる空間内のメタンの湧出状況を推測するものである。<sup>\*9</sup> 従って、全体検知の目的で用いる検知部の守備範囲は通常メタン

\*9 全体検知の「全体」はここではトンネル全体のことでなく、トンネル全長のうち局所検知の必要のないメタン湧出量の少ない部分を幾つかに区分したそれぞれの空間全体をいう。勿論、トンネル全体のメタン湧出量を測定することは必要かもしれぬが、メタンの湧出場所を知るためには、トンネル全体を幾つかに区分して、それぞれの空間のメタン濃度を監視するほうが効果的である。

の湧出量が少く、かつ湧出メタンは通風換気によって空気と十分に混合されているという条件を満足する空間でなければならない。これらについての具体的な考え方及び検知部の設置場所については、通風換気の方法との関連において次に述べる。

#### 3.3.4.2.2 トンネルの長さ方向に対する検知部の配置

通風換気の方法に関係なく検知部を配置すべき場所、すなわち局所検知の対象となる場所としては例えば次のようなところが考えられる。

##### 1) 切羽付近

なお、切羽付近については、検知部の位置から切羽までの間の空間は常に爆発の可能性があるメタン濃度に達しているという前提に立つならば、検知部を切羽からある程度離して設置することができよう。しかし、押し込み通風を行う場合で風管からの風を直接受ける位置においては、メタンの湧出量がいかに多くてもメタンは検出されないおそれがあるので注意を要する。

##### 2) 常時メタンの湧出している場所

3) 退避所などの閉空間であって、メタンの湧出するおそれがあるが通風換気効果が及ばない場所

次に、通風換気の方法との関係を考慮して全体検知の対象とすべき場所の例を挙げれば次のとおりである。

1) 単純な押し込み通風換気にあつては、トンネル内を通過して戻ってきた気流が大気中に放出される地点（トンネル出口。以下、坑口という）で、大気の影響を受けない場所

2) 単純な吸出し通風換気にあつては、トンネル内を通過してきた気流が風管に吸込まれる直前の場所（風管管端より坑口側）及び風管内\*10

3) 押し込みと吸出しを併用する通風換気にあつては、両方の換気を風管により行いかつ押し込み用風管管端の方が切羽に近い場合には、吸出し用風管管端と坑口間の気流が坑口に向うとき\*11は上記1)の場所とし、気流が風管管端に向うときは上記2)の場所に設置する。

なお、立坑を用いて吸出しを行う場合には、立坑内\*10に1台設置するほか、立坑と坑口との間の気流の方向に応じて坑口付近又は立坑の手前（坑口側）にも1台設置する。この場合の検知部は切羽と立坑の間及び立坑と坑口間のメタン濃度を監視するのがねらいであるから、坑口から立坑へ気流が向うときには立坑内に設置せず立坑付近の切羽側と坑口側

に1台ずつ設置してもよい。しかし、気流が坑口へ向うときには1台は坑口に設置するものとし、もう1台の検知部を立坑内と立坑付近切羽側のいずれの場所に設置するかは切羽付近に設置された局所検知用の検知部の位置を考慮して定めればよい。

以上に挙げた場所には常に検知部が設置されるべきであるが、予想できなかった場所でのメタンの湧出や、個々のトンネルの構造等による特殊性を考慮すれば、次のような場所にも検知部を配置することが奨められる。

- 1) トンネルに分岐などがある場合、分岐した先のそれぞれのトンネル内の濃度が監視できる場所
- 2) メタンが爆発する濃度に達したときに発火源となるおそれが大きい電気機器や機械装置を常時使用している場所
- 3) 天盤や側壁にくぼみその他、通風換気効果の及ぶにくい部分がある場所
- 4) 常時湧出していないが、間欠的にメタンが湧出する場所及び以前に湧出したことのある場所
- 5) 掘削終了後コンクリートの巻立てが行われていない場所

#### 3.3.4.2.3 天盤と検知部の距離及び警報設定濃度

トンネルの長さ方向に関しての配置が決まれば、次はその場所の（切羽面に平行な）平面上のどこに検知部を設置するかを検討することになる\*12。この際には警報設定濃度も併せて考慮すべきであるが、その他にも、その検知部の目的が全体検知か局所検知かの区別、その場所における垂直方向の濃度分布、気流の偏心の度合なども勘案せねばならない。

本報の実験は通気条件とメタン吐出条件を種々に変えて行ったが、実際のトンネルにおいては通気条件は実測できるにしても、メタンの湧出に関する条件はすべて未知である。しかし、既に前節で詳細に考察した結果によれば、気流に偏心がなければトンネル内のいずれの場所においてもメタンの湧出源に近く、かつ天盤に近いほどメタン濃度は高いと考えてよい。このような前提に立てば、検知部の位置と警報設定濃度\*13

\*10 風管排出口が坑口その他のメタンの存在しない場所にあるという理由でファンを防爆構造としない場合、高濃度メタンがファンに触れないようにするためにも吸出し風管内の検知部は有用である。

\*11 このような設計は一般的でないと思われる。

\*12 場合によっては、この平面上の位置を決定した上で、トンネルの長さ方向に関する設置場所を検討することもあろう。

\*13 ここではメタンの濃度分布という観点から述べるが、警報濃度の設定には警報発生時にどのような措置を講ずるかも考慮する必要がある。

について次のように述べる事ができる。

1) 全体検知を目的とする検知部は、トンネル垂直断面上で天盤に最も近い位置に設置する。この検知部が検出するメタン濃度は通常ゼロに近いはずである。もし常時高濃度が測定されるようであれば、その場所の垂直方向に濃度差がなければ通風量の不足であり、天盤付近が高濃度の場合は通風換気自体が不良かあるいは検知部周辺に（局所検知の対象として考えるべき）湧出源が存在することを意味するので、何らかの改善が必要である。

全体検知のための検知部には、低濃度のメタンに対しても安定した出力が得られる特性のものを用い、警報濃度は局所検知の場合より十分に低い値とせねばならない。警報設定濃度はその検知部の守備範囲、正常な通風換気における平均的濃度、その検知部の周辺の他の検知部の配置などから決定することになる。

2) 局所検知を目的とする検知部も、トンネル中心垂直断面上で天盤に最も近い位置に設置する。検知部の対象とする場所において常時メタンが湧出するのであれば、警報設定濃度は全体検知の場合より高くなるであろう。しかしその場合には、その検知部周辺には高濃度のメタンが偏在しうるので常に危険な状態にあると考えて作業を行うほか、そうした危険な空間が極く狭い範囲であることを確実にする方策が必要である。

（例えば、その検知部の場所から少し離れば通風換気により充分混合希釈されるようにするなど。）一般に局所検知の対象となる場所では垂直方向の濃度勾配が大きく、天盤からの距離がわずかに変化しても検出されるメタン濃度は大きく変わるので留意すること。

3) 全体検知の対象となる場所においては気流の偏心は考え難いが、例えば3.3.3.3で述べた実験の場合のように押し込み用風管の位置が偏っているときには、切羽から戻ってくる気流も偏心している。このような場合には気流の方向性を考慮した配置とせねばならない。

#### 3.4.4.3 相似則の利用

一般にモデル実験の結果をスケール・アップされた場合に適用するに際しては相似則を用いる。相似則そのものの吟味及びトンネル内のメタン濃度分布について相似則を適用できるであろうという論議は、本報告書中の別の報告において説明されているので、ここでは、前節に述べた実験結果をスケール・アップされたトンネルに適用する場合の大まかな考え方について述べる。

相似則によれば、実トンネルと模擬トンネルとの大きさの比（今の場合はトンネルの水力径の比）が $k$ であれば、幾何学的に両トンネルが相似であって、かつ各種流量 $Q$ 、各種速度 $V$ が次の条件を満足する場合には両トンネル内のメタンの濃度分布は相似形になる。

（式中、接尾字 $0$ を付した値は模擬トンネル、付さない値は実トンネルの場合を示す。）

$$V = \sqrt{k} V_0$$

$$Q = k^{5/2} Q_0$$

本実験に用いた模擬トンネルの水力径は2mであるので、ある実トンネルの水力径が8mであったとすれば $k = 4$ となり、メタンの吐出位置や風管の寸法・位置などが相似であって、メタンの吐出速度が実験の場合の2倍、メタンの吐出量や通風量が実験の32倍であれば、両トンネル内のメタンの濃度分布は大体同じだということになる。なお、この場合メタンレイヤの厚さは4倍となるほか、模擬トンネル内の $x = x_0$ 、 $y = y_0$ の点と同じになる実トンネル内の点の位置は

$x = 4x_0$ 、 $y = 4y_0$ である。また、時間については $t = \sqrt{k} t_0$ が成立つので、模擬トンネルにおいて10分間で濃度分布が定常になったとすれば、実トンネルではこの時間は20分となる。

相似則は種々の因子が同時に相似の条件を満足した場合について考えるものであるから、例えば、トンネルの寸法は大きくなったが通風量はそのままである場合の濃度分布を知るためには役立たない。しかし、本報の実験においては通風量やメタン吐出量を広範囲に変化させており、かつ、これらの量の増減が濃度分布に及ぼす影響についても考察しているので、これらの結果と相似則とを併せて考えればスケール・アップされたトンネル内の濃度分布をある程度予測できると思われ、そうした予測の結果は検知部の配置を検討する場合のほか、通風換気の設計にも利用できるであろう。

相似則の適用できるような実トンネルにおける検知部の配置は、相対的に同じ位置になるようにすればよいわけであるが、次の点には留意が必要である。いま仮りに、模擬実験において天盤から30cmのところに設置した検知部に関するデータを実トンネルに適用しようとしたが、天盤からの距離を同じ30cmのままでよいと考えたとすれば、実トンネルの検知部で測定される濃度は（実トンネルの方が大きい水力径だとすれば）模擬トンネルでの測定値よりも大きくなるであろう。なお、この一例からも明らかなように、どのよう

なトンネルにおいても天盤から検知部までの距離は同じ値でよいと考えることは（但し、警報設定濃度も一定値とする場合であるが）適切ではない。

### 3.3.5 結言

トンネル建設工事のガス警報システムの構成に際して實際上最も重要な要素のひとつは、警報器検知部をトンネル内にどのように配置するかである。この点に関しては従来明確な根拠が示されていないので、実規模に近い模擬トンネルを用いてメタンを流出させる実験を行い、通風換気条件及びメタン吐出条件を種々に変化させてトンネル内のメタン濃度の分布をしらべた。これらの実験結果に基づき検知部の配置をどのようにするのが適切かを論じたが、メタンの濃度は種々の因子の影響を受けるため、あらゆるトンネルについて一律に検知部の配置を定量的に定めることは困難であることが示された。しかしながら、基本的には局所検知と全体検知が必要であるとの考えに基づき、通風換気の方法との関係において検知部の配置についてある程度具体的に示した。なお、この実験で得られたデータは、相似則の適用によりスケール・アップされたトンネルにおける通風換気的设计などにも利用できるであろう。

#### (謝辞)

本研究を行うに際し理研計器株式会社の協力を得た。ここに付記して謝意を表します。

#### (付録)

##### 1. ガス警報システムの考え方

ガス警報システムの主体は、ガス濃度を検出して警報を発するまでと、警報信号を利用して必要な対策を行わせる過程のふたつに大別されるが、これらの全体について相互に一貫性のある構成が必要である。ガス警報器及びその検知部はトンネル環境に適した仕様のもを適切な位置に設置し、かつ警報設定濃度を適切に定めなければならないことは本文で述べたとおりである。警報を発する限界値としては一般にメタン濃度そのものを用いる。濃度の変化率やある濃度が持続する時間を考慮に入れる方法もあり、又、警報濃度を二段階以上に分けて設定してそれぞれの濃度に応じた措置を講ずることも行われているが、いずれの方法を採用にせよ単に警報濃度を云々するだけでは無意味なのであって、警報を発するときはトンネル内部のメタン濃度分布がどうなっているのかを予測した上での論議

でなければならない。このようにして設定された警報システムが警報を発した場合には、予め定められた手順に従って確実に必要な措置がとられなければならない。警報システムの構成に関し、本文中で述べなかった留意点を以下に列挙する。

1) トンネル内のメタン濃度に応じて通風量を調節し得る通風換気システムと連動されている場合は別であるが、一般に通風換気の異常（ファンの停止、通風量の減少など）はメタン濃度が警報設定値を越えたときと同様の入力信号としてガス警報システムに組み込まれるべきである。

2) 警報発生時の措置は、作業者の避難を最優先するものとすべきである。電気機器の電源をしゃ断する場合にも必要最少限度の照明器具は（これらを防爆構造としておいて）残すことが奨められる。通風換気装置は、通風換気の方法によってはトンネル内のメタン高濃度領域を拡大するおそれがあるので、この点を考慮して停止するか否かをシステムに組みこむ。（作業者が直ちに呼吸器具を入手できるならば、吸出し通風換気<sup>\*10</sup>以外の通風換気は停止した方がよいと思われる。）又、外部との連絡装置等、避難時に必要な電気機器はすべて防爆構造としておくべきである。

3) 携帯式あるいは移動式のガス検知器など、警報システムと接続されていない機器や作業者の感覚によるメタン濃度の異常等の情報も、警報システムへの入力源として扱えるような構成が望ましい。

4) 構成された警報システムのチェック及び修正は必要であるが、例えば警報設定濃度などシステムの一部を安易に変更することは許されてはならない。

5) 停電時及び停電終了時の警報システムの作動あるいは復旧については、非常用電源の有無など警報システムの機能との関連で明確な手段を定めておくこと。

6) 警報システムに直接関係はしないが、通風換気装置の稼動状況及びメタン濃度の変動を連続的に自動記録しておくことが望ましい。

##### 2. ガス警報器の使用・保守・点検等の留意点

1) メタンを検出する方法や検知部の構造によって、検出濃度範囲、温湿度等の環境因子の影響、出力の経時変化、共存ガスの影響など、警報システムの主たる情報源であるメタン濃度の指示に影響を及ぼす因子は多いので、それぞれの警報器の特性を理解した上で目的に合うものを選択・使用すること。

2) 警報器の機能チェックは単に検知部にメタンを吹

きつけて警報の発信を確認するだけでは充分とはいえ、濃度既知の混合ガスに必要な時間接触させて相応する指示・警報が得られるか否かをチェックすること。このような点検はメーカーの推奨する期間ごとに行うのは当然であるが、検知部などが外傷を受けたり冠水したおそれのある場合にも行うべきである。なお、これらの点検時に毎回警報システムが最終段階まで駆動されることは好ましくないであろうから、必要なテスト回路を組みこむことになるが、この場合には点検後にリセットされて ready の状態にあることが容易に判別できるようにせねばならない。

- 3) 市販の警報器の多くは、警報設定濃度を容易に変更でき、又、警報も停止させうる構造となっているが、これらの管理については、警報システムの死活を制するという重要性を考慮した対策が必要であるとともに、警報器メーカーにおける構造上の改良に期待したい。なお、警報設定濃度は常時メタン濃度記録紙上に記録されるようにすることもひとつの方法であろう。
- 4) 停電などの一時的な電源しゃ断のあとの警報システム（特にガス警報器）の機能回復は重要であるから、必要な措置について誤操作のないようにすること。

### 3. 通風換気の方法とその得失

通風換気の目的は\*14 湧出メタンを直接に排出あるいは空気により混合希釈後に排出することにあるから、メタンの湧出する場所との関連性が大きい。一般に、掘削後のトンネル壁面から新たに多量のメタンが湧出することは稀であると考えられ、特にコンクリート巻立て後はメタンの湧出も少く通風換気も行われやすいので、コンクリート巻立ては可及的速に行うべきである。このようにすればメタンの湧出箇所は比較的限定され、警報器検知部の配置も効果的に行えることになる。

多くのトンネル工事では切羽付近の湧出メタンを対象とする通風換気を行っているが、その得失は既略次のとおりである。(Fig. 3.26参照)

#### 3.1 押し込み通風換気

メタン湧出源に風管からの空気を吹きつけて混合希釈する方法で、メタンを含む気流はトンネル内を通過し、各所で湧出するメタンを集積しながら坑口に向う。坑口付近での全体検知によりトンネル内全体のメタンの湧出状態を監視できるが、高濃度のメタンがトンネル内に充満するおそれがある。この方式では風管出口とメタン湧出源の距離が重要であって、少くとも気流

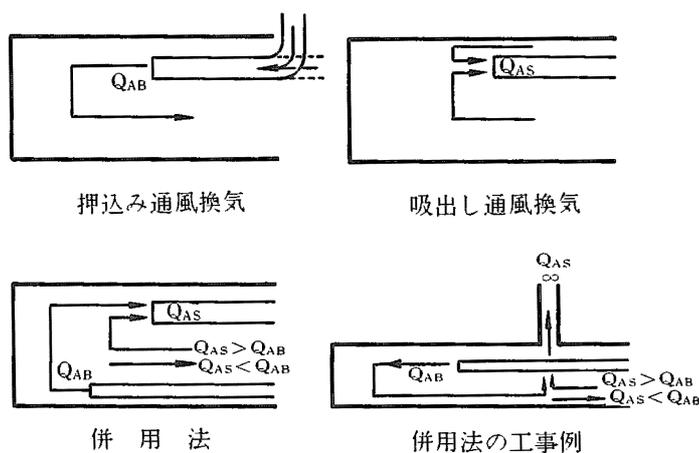


Fig. 3.26 通風換気の方法

の動きが知覚されないほど風管出口から離れればメタンの混合希釈は期待できず、それより以遠の空間は危険な状態にあるとみるべきである。効果的な風管の位置等については本文中で述べたとおりである。

#### 3.2 吸出し通風換気

切羽からの湧出メタンの直接排出が主な目的であるが、風管吹出し口が切羽に近くなければ効果がないことは実験的に確認された。一般には空気は坑口から入り、この気流は各所に湧出するメタンを混合希釈しながら風管吸出し口に達し、切羽からの湧出メタンと共に風管内を通過して排出される。ファンを坑口に設けるときは減圧に耐える風管を必要とするなどの難点もあるので、この方法単独では余り用いられていないが、切羽付近に防爆構造のファンを設け、メタンを含む空気を風管内へ押し込む方法にも検討の余地がある。吸出し通風換気単独では、坑口から風管吹出し口までの間に対する換気の実効性は果せるかもしれぬが、いくら通風量を増しても切羽付近の空間は危険な状態にあると考えざるを得ない。

#### 3.3 併用法

上記二方法はそれぞれ設備上あるいは安全上問題が残るので、実際にはこれらの利点を組合せた併用法を採用することが多い。しかし、併用法においても次に述べるように通風量のバランスには留意せねばならない。

いま押し込み通風量を  $Q_{AB}$ 、吸出し通風量を  $Q_{AS}$  とし、双方の通気を風管によって行う場合を考えると、もし  $Q_{AB} = Q_{AS}$  であれば吸出し風管口と坑口の間

\*14 作業者の呼吸のための通風換気はここでは考えない。

空気は動かないとみられ、切羽からの湧出メタンがトンネル全体に拡がることはないが、途中の各所からの湧出メタンはそのまま放置されることになる。 $Q_{AB} > Q_{AS}$ であれば、切羽から湧出するメタンを含む空気の一部は坑口に向かって流れ、逆に $Q_{AB} < Q_{AS}$ であれば気流は坑口から切羽に向い、いずれの場合にせよトンネルの途中で湧出するメタンの希釈は $Q_{AB}$ と $Q_{AS}$ の差に依存することになる。従って一般に、坑口と吸出し風管口の間メタンの湧出量が少なければ $Q_{AB} < Q_{AS}$ とし、切羽からのメタンがトンネル内を通過せぬようにする方が望ましいと思われる。

実際のトンネル工事において見られる併用法では、風管を二本用いることを避け、押込み用風管の出口よりも坑口側に立坑を設けてこれを吸出し用風管として用いているが、この場合にも坑口と立坑の間の気流の向きは $Q_{AB}$ と $Q_{AS}$ の量的バランスによって変化する。押込み用風管の出口は切羽に近いほど効果的であることなど風管の位置関係については既に述べたが、風管の代りに防爆形の局所ファンを切羽付近に設置する場合には、吸出し風管口よりも切羽側であるとその周辺の空気を循環攪拌するだけに終ることも考えられるので、やはり $Q_{AB}$ と $Q_{AS}$ のバランスには留意せねばならない。

通風換気の方法には基本的に上述の得失があり、実際にはそれぞれのトンネルに応じて修正された方法を採用することになるだろうが、いずれの方法においても風管が長距離にわたるときには管内摩擦抵抗や風管接続部での漏風などがあるため、ファンの定格容量どおりの設計は成立たないと考えるべきで、 $Q_{AB}$ や $Q_{AS}$ の値は実測により求めなければならない。又、通風換気が効果的に行われているか否かの目安は、トンネル内の任意の地点における垂直方向の濃度勾配の有無で判定できる。すなわち、メタン濃度が天盤に近いほど大きければ、それは主として風速の不足により混合希釈が不十分なことを示し、濃度差はないが濃度自体が大きければ風量の不足を意味している。従って、既に決定・設置された通風換気システムに対しても（例え警報は発しないにしても）事後のチェックを行ない、必要に応じて修正を加えることを怠ってはならない。

(昭和55年5月 日受理)