

5. ガス滞溜地層の地質学的特性等に関する研究

前 郁 夫*
花 安 繁 郎*
鈴 木 芳 美*
堀 井 宣 幸*

A study on the geological characteristics of stratum containing natural gas in tunnelling work

by I. Mae,*
S. Hanayasu*
Y. Suzuki,*
N. Horii*

Since the increment of construction of tunnels, the necessity of excavation of tunnels where the stratum contains natural gas, is increasing.

And in the last few years, there were grave accidents caused by the explosion of gushing natural gas.

At the sites of tunnelling works, there are many factors concerning phenomena of gushing natural gas, and it is difficult to explain or estimate these phenomena sufficiently.

Therefore in order to establish preventive countermeasures against the accidents caused by gushing natural gas, it is necessary to investigate the actual condition of tunnelling works.

In this study, firstly we investigated by means of field investigations about the actual condition of many tunnelling works in which the risk of gushing natural gas existed.

And secondly we discussed mainly about the geological characteristics of stratum containing natural gas and finally the usefulness of the pilot-boring as one of the methods of detection of gushing natural gas was discussed.

The results of this investigation are as follows;

i) There are two kinds of natural gas with which the tunnelling work has a possibility to encounter; the first is the natural gas dissolved in water and the second is the oil field gas.

ii) According to the consideration about the geologic condition, we can specify, to a certain extent, the stratum which may cause the gushing of natural gas.

iii) In the sites of tunnelling work, there are three principal countermeasures against the gushing of natural gas; the efficient management of fire, the previous detection of natural gas and the sufficient

ventilation of the site. And the execution of pilot-boring is thought to be very useful for previous detecting of natural gas.

iv) The method of the execution of pilot-boring should be determined by taking into considerations ; the situation of working site, the condition of the geology and so on.

5.1 まえがき

昨今のトンネル建設工事のなかには、環境保全や用地確保などの問題から路線選定等の制約も多く、メタン等の可燃性天然ガスを保有する地層を掘進する工事が増大している。これに伴って、これらのガスの湧出によるガス爆発災害の発生あるいはその危険性を有するトンネル工事は数量ともに増加し、現在施工中のそのようなトンネルは全国で30工区以上になる。(昭和54年7月現在)

これらのガス湧出現象は、実際の施工現場にあっては、地質等の自然条件の要因もあって予測や推定が困難な現象である。しかし、有効かつ能率的なガス爆発等の防止対策・安全対策を講じるためには、ガス滞留地層の補捉・確認及び湧出ガス量の事前の把握等が不可欠と考えられる。

本研究は、そのような立場から、ガス滞留地層の地質学的特性及び事前補捉の手段・方式について、資料収集・現地調査を中心として行なった調査研究である。現地調査は現実にガス湧出現象があるかあるいはその恐れのあるトンネル建設作業所(全国各地の山岳トンネルを中心に11トンネル20工区を選定)に赴き、当該作業所での施工全般について実情を調査し、特にガス湧出地層の地質特性・湧出状況と地質状況の関連・先進ボーリング施工の実態などについての分析を行なった。本報告は、これら現地調査結果の概略を紹介すると共に、ガス湧出地層の地質特性・先進ボーリング等について加えた考察・検討の結果を報告するものである。

5.2 ガス湧出トンネルの施工状況調査結果

施工中のガス湧出トンネル20工区を選定し、各々について工事状況等に関連する幾つかの項目についての調査を昭和53・54年の両年度にわたって実施した。調査項目は、トンネルの仕様(掘削方式・延長・断面・掘進速度他)・ガス湧出に関連する事項(ガス湧出量の推定値・その算定根拠・湧出実績値他)・換気方式及び換気設備・防爆設備あるいは機器の使用状況・地質に関連する諸要素(地層・地質構造・ガス湧出地点の地質状況他)・先進ボーリングの施工状況等である。

また上記20工区以外に資料・文献・その他の情報等を通してさらに17工区の施工中のトンネルについても

調査を行なった。

それらをまとめたのがTable 5.1である。各現場の個々の特殊な条件や諸資料の不整備もあり必ずしも十分なものではなく、また調査時点と状況が変化している場合もある。表中のトンネル番号①～⑳は筆者等が直接現地調査を実施したトンネル、また㉕～㉘、㉙～㉚はシールドトンネルで他はいわゆる山岳トンネルである。

5.2.1 各施工現場での湧出ガスに対する基本的な考え方と対策

施工状況調査の結果から、湧出ガスに対する基本的な対策としては「換気」、「ガス検知」及び「火気管理」であることが確認された。すなわち各現場とも湧出ガスに対しては基本的には共通の考え方で対処しており、定常的なガス浸出に対しては湧出ガスの稀釈による濃度低減化及び「換気」によるこれらの排出、また突発的で大量のガス湧出に対しては「検知」によるそれらの把握及びそれに基づく電源遮断や作業員避難等の措置、の二重の考え方をとっている。

5.2.2 換気方式

今回調査を行った各現場の換気方式には、基本的分類では、排気式・送気式・送排気併用式の3種類が見られた。しかし、それらの集中式・連続直列式の別あるいは換気システムの補助手段としての部分換気・局部換気の状態・複数の掘削場所への送風系統(別系統独立あるいは分岐などの別)等を含めて考慮すると様々の差異があり、風管の延伸や中継送風機の設置等のシステムの増強・変更・通気立坑の有無などの各現場の諸条件に基づく差異も多様である。

5.2.3 検知・警報体制

すべての工区で、ガス専従作業員による携帯式検知器を用いた作業現場のガス測定を、定置式ガス検知・警報装置の使用と併用して行なっている。

作業員による検知作業は、定時・定位置・特別な作業(発破作業・火気を用いる作業等)の前後・特別な場所(切羽等)などで行なっている。

一方定置式検知・警報装置はその感知部を切羽付近や坑道途中に設置するケースが多いが、感知部あるいは警報部の設置数・設置場所は各現場で多少異なる。また測定装置部の設置場所も様々(坑内や坑外)で、測

Table 5.1 List of investigated tunnels
調査トンネルの状況一覧

番号	種類	場所(県)	断面(m ²)	主な掘削方式	掘進地層	湧出ガス種類	湧出ガス濃度の状況(実績)	基本的な換気方式	定検設備の有無 設置・警式報	防備機器の有無	水平先進ボーリング		
											削孔長(m)	本数	残孔長(m)
1	道路	静岡	108	側壁導坑上半	新第三紀中新世	油田系ガス	~ 30%(削孔中)	送排気併用	有	無	22~102	2	3~5
2	道路	"	108	側壁導坑上半	"	"	~ 10%(削孔中)	送排気併用	"	"	60~100	3	3~5
3	鉄道	長野	62	上半先進	"	"	~ 10%(削孔中)	送気, 坑道排気	"	未	15~ 20	1	5
4	鉄道	"	6 67	底設導坑上半	"	"	~5%以上(亀裂中)	排気, 坑道入気	"	無	5~ 10	1	1
5	鉄道	"	67	底設導坑上半	"	"	3.8%(削孔中)	送気, 坑道排気	"	"	30	2	5
6	道路	新潟	137	側壁導坑上半	新第三紀 鮮新世・中新世	"	未検出	排気, 坑道入気	"	"	50	1	5
7	道路	"	137	側壁導坑上半	"	"	未検出	排気, 坑道入気	"	"	50	1	5
8	道路	"	137	側壁導坑上半	新第三紀中新世	"	~ 1.5%(気流中)	送気, 坑道排気	"	"	20~ 50	1	5
9	道路	"	137	側壁導坑上半	"	"	~ 1.5%(気流中)	送気, 坑道排気	"	"	15~ 50	1	5
10	鉄道	"	77	上半先進	"	"	~ 2.6%(気流中)	送気, 坑道排気	"	一部	3	5	2
11	鉄道	"	77	中央導坑	"	"	~ 0.8%(気流中)	送気, 坑道排気	"	"	3		2
12	水路	山形	7	全断面	"	"	~ 4.8%(削孔中)	送気, 坑道排気	"	"	50~ 60	2	5
13	水路	"	14	全断面	"	"	~ 100%(削孔中)	送気, 坑道排気	"	"	10~ 20	2	5
14	水路	"	11	全断面	"	"	~ 100%(削孔中)	送気, 坑道排気	"	全域	10~ 40	2	5
15	下水道	滋賀	12	泥水シールド	沖積世・洪積世	水溶性ガス	~ 68%(調査孔中)	排気, 坑道入気	"	一部	調査ボーリング	7	-
16	下水道	"	14	圧気シールド	"	"	~17.6%(観測孔中)	送排気併用	"	無	"	15	-
17	下水道	"	16	泥水シールド	"	"	~ 0.2%(天盤)	送気, 坑道排気	"	"	"	10	-
18	下水道	"	0.8	推進	"	"	未検出	送気, 坑道排気	無	"	"	5	-
19	水路	北海道	6	全断面	新第三紀 鮮新世・中新世	油田系ガス	0.2%(気流中)	排気, 坑道入気	"	"	12~ 38	1	5
20	上水道	長野	7	全断面	新第三紀中新世	"	~ 2.0%(削孔中)	送気, 坑道排気	有	全域	40	1	4~6
21	上水道	"	5	全断面	"	"	0.3%(削孔中)	送気, 坑道排気	"	"	50~ 60	1	5~10
22	鉄道	新潟	87	側壁導坑上半	洪積世 新第三紀鮮新世	"	無検出, 燃焼事故有り	排気, 坑道入気	"	無	120	1	
23	水路	"	6	全断面	新第三紀鮮新世	"	~ 0.9%(気流中)	排気, 坑道入気	無	"			
24	道路	"	83	側壁導坑上半	新第三紀 鮮新世・中新世	"	~ 3.6%(削孔中)	送気, 坑道入気	"	一部	30	1	5
25	水路	愛媛	6	全断面	古生代	他	0.3%(天盤)	排気, 坑道入気	有	無			
26	鉄道	北海道	81	側壁導坑上半	新第三紀中新世	油田系ガス	~ 0.4%(気流中)	送気, 坑道入気	"	一部			
27	鉄道	"	91	側壁導坑上半	"	"	~ 60%(削孔中)	排気, 坑道入気	"	無	70	3	
28	鉄道	新潟	33	上半先進	"	"	~ 5%(削孔中)	送気, 坑道排気	"	一部			
29	下水道	東京	112	シールド	沖積世・洪積世	水溶性ガス	~ 0.2%(気流中)	送気, 坑道排気	"	無	無	-	-
30	下水道	"	17	圧気シールド	"	"	~ 25%(観測孔中)	送気(圧気用)	"	"	調査ボーリング	-	-
31	下水道	奈良	4	推進	"	"	~ 23%(観測孔中)	送気, 坑道排気	"	一部	水平調査ボーリング (30)	1	-
32	下水道	"	8	推進	"	"	~ 5%(観測孔中)	排気, 坑道入気	"	無	無	-	-
33	下水道	兵庫	7	泥水シールド	"	"	~ 5%(観測孔中)	排気, 坑道入気	"	一部	調査ボーリング	20	-
34	上水道	大阪	10	圧気シールド	"	"	~ 30%(削孔中)	送排気併用	"	全域	調査ボーリング 及び全断面薬注 削孔利用	22	-
35	上水道	"	9	圧気シールド	"	"	~ 25%(削孔中)	送排気併用	"	全域	調査ボーリング 及び全断面薬注 削孔利用	19	-
36	下水道	滋賀	16	圧気シールド	"	"	~ 50%(観測孔中)	排気(無圧気区間) 送排気併用	"	一部	調査ボーリング	31	-
37	下水道	"	12	シールド	"	"	~ 6.5%(観測孔中)	送排気併用	"	一部	調査ボーリング	11	-

定値を集中管理・計測する方式をとる場合でも測定値を信号として送る方式や測定位置のガスを吸引送気して測定する方式などの差が見られる。

また警報を発するガス濃度の設定値は現場により異なり（メタン濃度で0.5%～1.5%）、したがってそれに基づく電源遮断・避難等の警報後の処置にも現場により差異が見られる。

5.2.4 防爆機器・設備の使用状況

トンネル坑内で使用される電気機器・機械・設備には各種のものがあるが、各現場とも、機器・設備の防爆の必要性についてはトンネル内の各々の場所について考慮する考え方を採用している。トンネル内全域について防爆とした作業所は、既に爆発災害を経験した作業所など数箇所を数えた。また一部区域について防爆とした各工区は、ほとんどが切羽から後方の限られた区間を防爆区間とする考え方をとっている。

5.2.5 トンネル建設計画時のガス調査

一般的にトンネル工事にあたっては路線選定などの必要もあって事前の地質調査が行なわれるが、ガス湧出の恐れのある地域での事前調査にはさらにガスの滞留状況等に関する調査が必要であるにもかかわらず、現状は概してそれが充分であるとは言えず、したがって各現場における先進ボーリング孔等を用いるガス検知の比重は大きい。

5.2.6 ガス湧出状況

Table. 5.1に示されるとおり調査したトンネルのほとんどでガス湧出が認められている。表中の湧出状況はメタン濃度実測値の最大値を記したものである。実際の現場では十分な換気が実施されており気流中でのガス濃度が爆発限界に至るような湧出例はないものの、先進削孔の孔中・シールドトンネルの観測孔中・坑内天盤矢板裏などで表中に見られるような高濃度のメタンが多く、トンネルで測定されていることは留意すべきである。

5.3 湧出ガスの種類と分布

5.3.1 湧出ガスの種類

トンネル建設工事におけるガスに関する問題は、発

破後ガス・内燃機関の排気ガスなどの坑内有害ガス等としてこれまでも考慮が払われてきている。¹⁾しかしメタン等の炭化水素を主成分とした可燃性天然ガスの湧出現象については、以前からその危険性については指摘されながらも特に強い関心が払われてきたわけではない。これらの可燃性天然ガスは一部のものを除き、堆積物中の有機物等が続成作用^{*1}あるいはその後の過程で分解・変化しかつそれらが移動・集積したものである。その性質・組成・存在形態・生成原因等から種々のものに分類できるが、一般的には以下のような種類のものを掲げることができる。^{2)~4)}

5.3.1.1 油田ガス

油田ガスは、石油あるいは含油地層に密接に関連したもので石油系ガスとも呼ばれるものである。これらは、原油に伴なって産出する油溶型ガスと、含油地質系から産出する遊離型ガスとに大別される。後者は油溶型ガスとは異なり、液状の石油を全くあるいはわずしか伴わずに岩石中に存在しているもので、後述する水溶性天然ガスに対して構造的天然ガスと呼ぶ場合もある。^{2)~3),5)}

5.3.1.2 炭田ガス

炭田ガスは、通常炭田地域から産出するガスの総称であり、石炭層そのものまたはその直上・直下の堆積層（夾炭層）等から産出する石炭層ガスと、炭礦あるいはその付近より産出する炭礦ガスとを含んだ呼称である。前者には、炭層・夾炭層や付近の岩石の亀裂・割れ目等に遊離ガスとして存在するものと石炭組織中に吸着されているものがある。炭礦におけるこれらのガスの湧出現象には、坑内に常時流出する滲出・噴出と、炭層等の大規模な破碎を伴う突出とが知られている。^{2)~3)}

5.3.1.3 水溶性ガス

水溶性ガスと呼ばれるものは、石油・石炭等を伴わず、地下水と共に産出するものである。このガスはほとんどが地下では水に溶解した状態で存在しているところから水溶性の呼称があるが、最近では、これらの水溶性ガスと呼ばれるものに、地下水に溶解しているもの以外の遊離ガスを共に伴って産出するものの存在も確認されており、広義には共水性ガスの呼称を提案するむきもある。ここではそれらを一括して水溶

* 1 堆積物が定着してから地史的な時間を経て、固結し地層となるまでの地理的・化学的变化を含む一連の過程。

性ガスと呼ぶことにする。^{2)~6)}

5.3.1.4 その他の可燃性天然ガス

前述までの3種以外に、古第三紀層以前の古い地層中に存在する古期岩中の天然ガス、海底・湖底などの現世層中の天然ガス、火山活動に関連して発生する火山ガス、温泉に伴なって産出する温泉ガス、などの存在が知られている。

5.3.2 ガス滞留地層

以上のような可燃性天然ガスの存在は、ガスの生成・移動・集積あるいは貯留の3条件を可能とする地質条件の所に限られる。この地質条件は、地質年代・岩相・地質構造の3点に集約して考えることができる。それらの地質条件は、ガスの種類によって各々特徴的な地層や地質構造を示している。我国にも広く分布し、したがってトンネル工事等で遭遇する機会の多いものは、油田ガス・水溶性ガスの2種である。その他のものは特殊な地域や地質条件の下に存在するため分布する地域などが限られていると言つてよい。

5.3.2.1 油田ガス滞留層

i) 油田ガス層の地質年代(油田ガス母層)

油田ガスは、石油と同様に抽出性有機物を多量に含み還元環境下で堆積した海成層あるいはそれらに接した堆積層中で生成される。暗灰色の頁岩・泥岩等がこれに相当する。石油を考える際にはこれらの岩石・地層を石油根源岩・母層などと呼ぶが、油田ガスに関しても同様にこれらを油田ガス層と呼ぶことにする。

我国の油田ガス母層は石油母層と同一で、東北日本内帯を中心に広く分布する新第三紀中新世の海成層の中に、これらを見ることができる。これらのガス母層はそのまま貯ガス層としてガスを保有する地層にもなる。

Fig. 5.1には他種のガスと共に油田ガスの産出地層の地質時代を示した。²⁾

ii) 油田ガス層の岩相(油田ガス保有層)

油田ガス母層及びその周囲の地層中に何らかの空隙が存在するとそこへ生成されたガスが移動・集積してガス保有層となる。したがって岩石中の空隙の多少やその状況が油田ガスの保有能力の最大の因子であり、以下のような岩相を有するものが油田ガス保有層とな

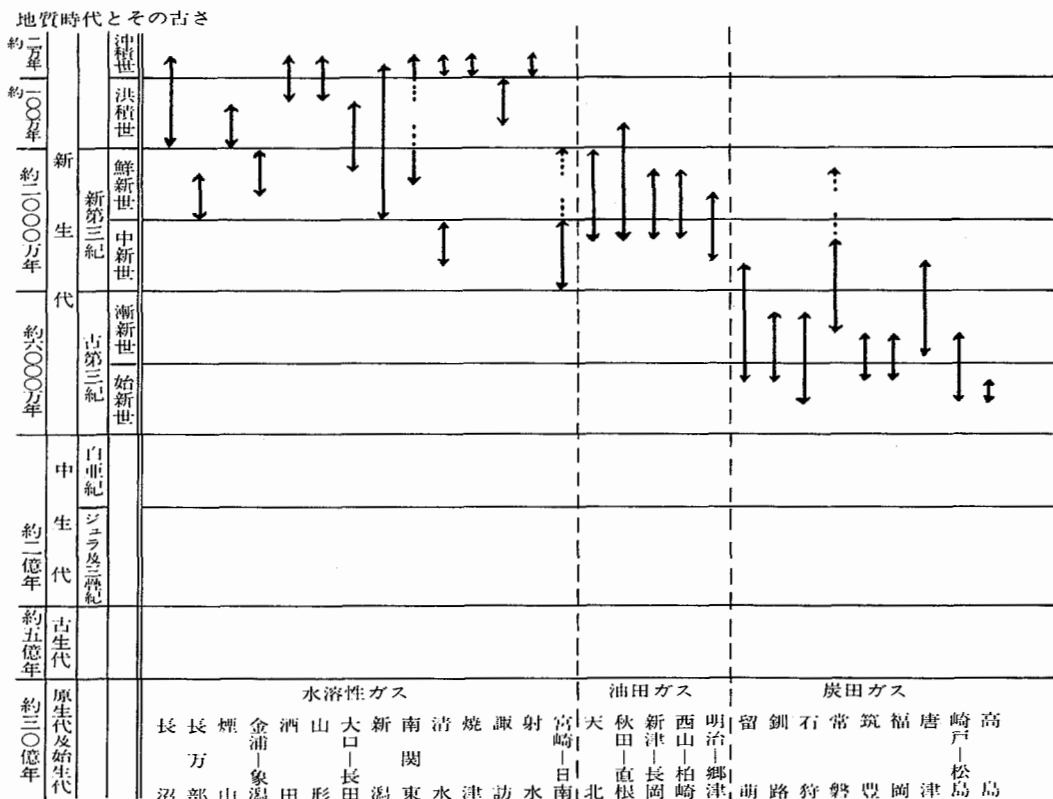


Fig.5.1 Geological time of natural gas strata in Japan⁽²⁾

我国における各種天然ガスの産出地層の地質時代(金原²⁾による)

る。

- a) 岩粒間隙の大きなもの
- b) 乾燥亀裂*2・マイアロ状穴*3・熔岩気泡等の孔隙を有するもの
- c) 節理・亀裂・割れ目等の顕著なもの
- d) 層理・層面剥離等の顕著なもの
- e) 破碎間隙（断層・破碎帯近辺など）の顕著なもの
- f) 岩石の収縮空隙*4, 溶解空隙*5を有するもの
- g) 風化等による空隙（不整合面直下など）を有するもの

以上のうちa), b)は岩石の生成と同時に存在する一次的空隙, c)~g)は岩石がその後の地殻変動・続成作用等の影響を受けて内部に生成される二次的空隙を各々有しているものである。

我国で主要な油田ガス保有層は、母層と同じく新第三紀中新世の海成層の中に見られるが、それらは上記のa) タイプ：砂岩・凝灰岩・礫岩等から成る地層, c) 及びd) タイプ：頁岩及び泥岩層, e) タイプ：断層・褶曲付近の多空層層が大部分を占める。

これらのガス保有層はその上下に非常に緻密な不透過性の地層（粘土層・亀裂の少ない頁岩層など）を伴うとガス保有層としての性格がより大きくなる。不透過層の地層の存在が、ガスの生成後の拡散消失を妨げ、ガスの移動、集積に方向性を与えるためである。

iii) 油田ガス層の地質構造

ガス母層・ガス保有層がさらに適当な地質構造の下に置かれる場合は、石油の場合の油田構造と呼ばれるものと同様に、ガス保有能力が一段と大きくなる。それらはFig. 5.2に示すように、背斜構造及びガス保有層の上部が何らかの要因で封鎖状態にある単斜構造とが考えられる。

iv) 油田ガス層の分布

前述までの3条件を具備した油田ガス層の分布する地域は、Fig. 5.3に示すように、ガス母層である新第三紀中新世の海成層の分布をそのまま反映して、北海道の天北・石狩、秋田、山形、新潟の各県をはじめとする東北日本内帯地域に集中している。他には静岡県の大井～御前崎周辺に見られる。東北日本内帯の平野部周辺の丘陵地帯や背梁山脈周辺では地表あるいは地表近くに、油田ガス保有層の層序が現われるため、この地域での山岳トンネル工事では、油田ガス湧出に遭遇する例が多い。

i.3.2.2 水溶性ガス滞留層

i) 水溶性ガス層の地質条件

前述のように水溶性ガスは堆積物中の有機物が地下水の存在する状態で還元的状況で生物化学的反應を受け分解生成されたものが地下水に高圧下で溶解しているものである。したがって地質条件としては、ガスを生成・供給し得る堆積物・堆積環境と共にガスが地下水中に保存される条件も必要とされる。これらは、地表水の多量の浸透がなく、緻密な不透水・不透ガス層を随所に挟み、ガスの散逸を十分補えるだけのガス発生能力を有する比較的新しい堆積層が厚く堆積する、浅海性堆積盆の地層に見られる。

これらは地質構造上の特徴としては、ガス向斜と呼ばれる比較的新しい時代の向斜、盆状の構造の低部、これらの翼部にあたる単斜構造を有するもの、などを挙げることができる。

このような地質条件の下で、水溶性ガスは地下水に溶解する形で移動・貯留されるものである。周囲の地層が有するガスの補給・発生能力の相違あるいは地下水のガス溶解能力（圧力・温度・塩分濃度等）の相違等により、不飽和の水溶性ガスあるいは遊離ガスを伴う水溶性ガスの区別やあるいはガス組成等に若干の差異がある。

その組成は主としてメタンより成り、エタン以上の高級炭化水素含有量は、構造的ガスと比較すると、1/10～1/1000程度と非常に少ないとされている。⁵⁾

概してこれらの水溶性ガスは、地下水の有する圧力（深度に対応した静水圧）に応じて地下水に溶解していると考えてよく、これらの地下水が地表近くの減圧状態に置かれた際などにガスが分離し、ガス湧出の現象を来すことになる。

ii) 水溶性ガス層の分布

水溶性ガスを滞留する浅海性堆積盆の例は、新第三紀鮮新世～第四紀層（一部には新第三紀中新世の地層を含む例もある）が厚く堆積する平野部に見られ、南関東・新潟平野・木曾川下流・諏訪湖周辺・琵琶湖周辺・大阪平野・宮崎県南部など前述のFig. 5.3に示される地域を挙げることができる。また各地域の水溶性

* 2 未固結の泥質堆積物が乾燥・収縮する際にできる多角形・亀甲型の割れ目が、そのまま残されたもの。

* 3 深成岩の組織中に見られる角ばった小隙で時に2～3 cm径のものもある。

* 4 苦灰岩など。

* 5 石灰岩など。

* 6 参考文献2), 3), 7), 8)を参考に、筆者等が編集・作成した。

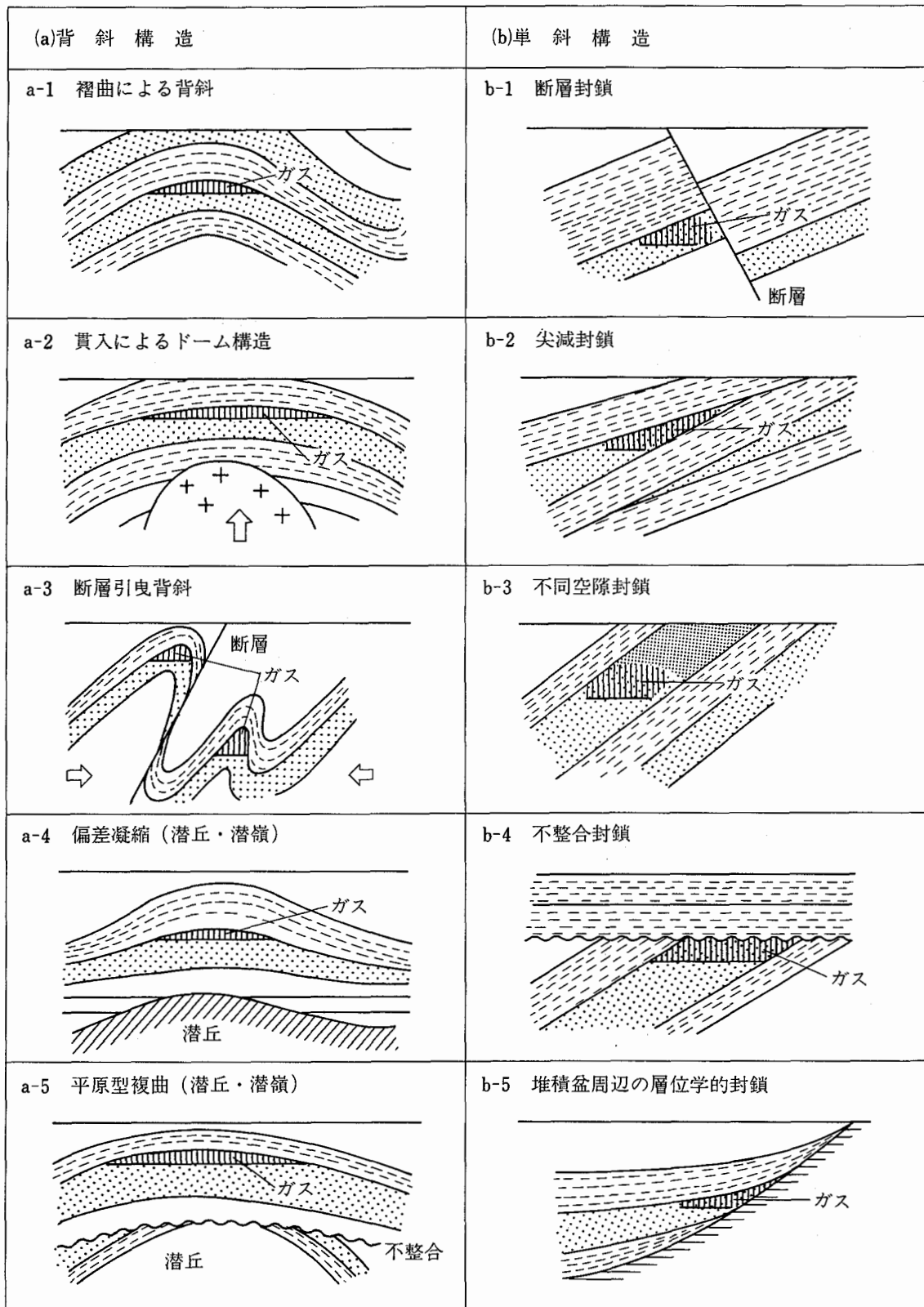


Fig.5.2 Notional sketch of geological structure of oil field gas
 油田ガス地質構造概念図

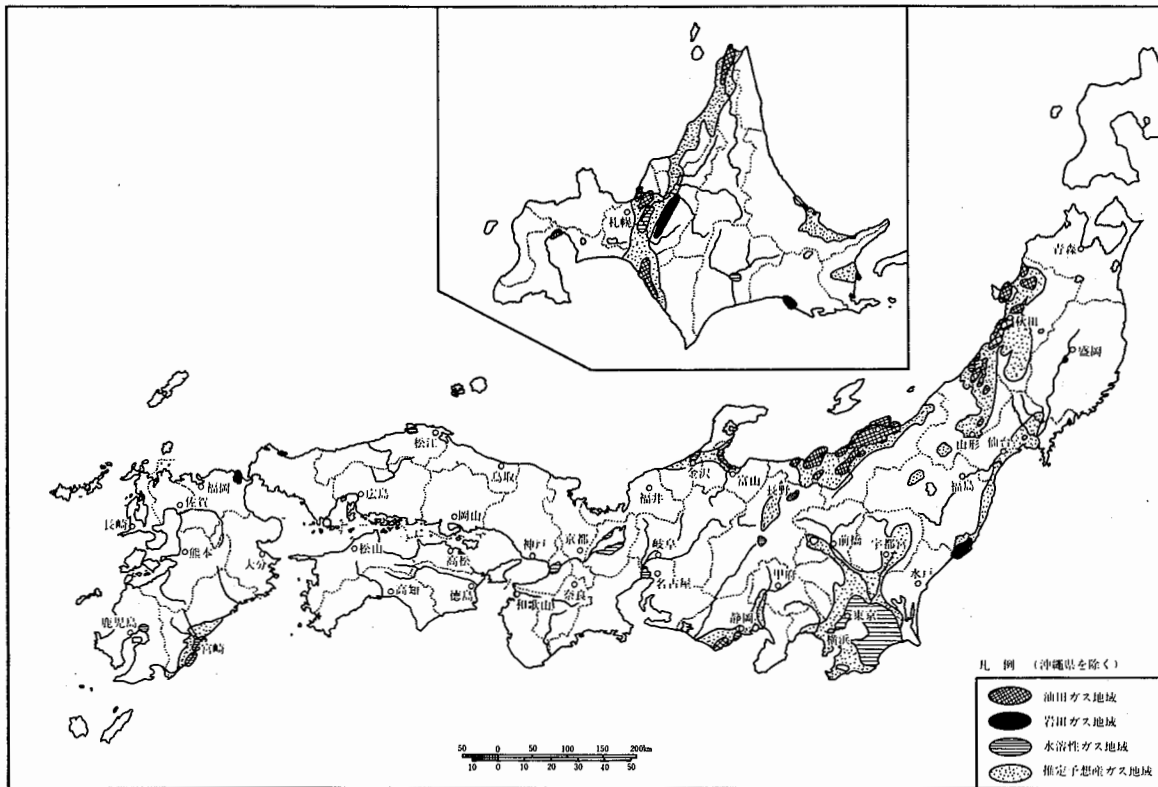


Fig.5.3 Distribution of natural gas in Japan
 我国の可燃性天然ガスの分布

ガスの産出地層の地質年代はやはり前述の Fig. 5.1 のとおりである。これらは各地域により差異はあるが、概して地表から数十m以上（200m 以上になる場合もある）の深度に位置する場合が多いので、いわゆるガス田のような大量で長期的なガス湧出をもたらす地層にトンネル工事が遭遇することは稀である。しかし平野部や盆地で施工されるシールドトンネル等では、ある程度の量の水溶性ガスを保有する地層に遭遇する例が多い。

5.3.2.3 炭田ガス滞留層の地質特性

炭田ガスは、石炭及び石炭層と密接に関連するガスでありその源泉は、陸生植物の埋設及び細菌・地熱・地圧等の関与など地史的な時間と条件下で、それらの植物質が石炭化する過程で生成されたものである。また油田ガスと比較すると高級炭化水素の含有量が小さいという組成上の特徴がある。

しかしこのような炭田ガスの存在する地質条件は、石炭層に直接・間接に関連する点以外は、油田ガスの場合と本質的な差異はなくほぼ同様の条件が必要である。すなわち炭田ガスを保有するのは、断層、破碎帯

等の破碎空隙を有する地層、周辺に炭層を有する亀裂の多い頁岩・多孔質の砂岩・礫岩などの地層、頁岩等の緻密な岩石層に挟まれた炭層、炭層とその上下の多孔質岩層などが挙げられる。

これらは地質年代で見ると、我国の石炭産出層である古第三紀始新世～漸新世、亜炭等を産出する新第三紀の地層に限られる。その分布は前述の Fig. 5.3^{*7} のとおりで、筑豊（北九州）、平・泉・勿来（常盤）、釧路・夕張・空知（北海道）などの付近に見られる。また Fig. 5.1 には各地域の炭田ガス産出層の地質年代も示してある。概してこれらは地表からかなりの深度に位置する場合が多くトンネル工事で炭田ガス保有層に遭遇した事例は知られていない。

5.3.2.4 古期岩中の可燃性天然ガス

前述までの3種の可燃性天然ガスに比較すると極めて稀であるが、古第三紀層以前の古い地層中に可燃性ガスの存在する例もある。具体的な事例としては、結晶片岩から成る変成岩中のキースラーガー鉱床^{*8}の近

*7 この図では、いわゆる炭鉱ガスは考慮していない。

*8 静岡県久根鉱山、愛媛県別子鉱山など。

辺などの例や紀州大和川沿岸の古生層中の例などが知られている。²⁾

これら結晶片岩中のガスは岩石中の有機物の地圧力的化学過程による生成物と考えられている。また古生層の有機質粘板岩より発生すると考えられる例もある。その組成はメタン・窒素を主成分とするものが多い。他には、他の地下深部より発生したガスの移動により浅部の古期岩中に集積する場合もある。

5.4 地質状況等とガス湧出現象との関連

前述したガス種類別に、トンネル工事現場におけるガス湧出現象を特に地質状況との関連で分類・検討すると以下のとおりである。

5.4.1 油田ガス湧出と地質状況

5.4.1.1 油田ガス湧出地層

Fig. 5.4 は前述の油田ガス分布地域のうち代表的な地域の標準層序を示しさらに各層準についてガス母層

・ガス保有層の有無を明示したものである。⁹⁾また併せて当該地域内に今回の調査対象トンネルがある場合はその掘進地層の範囲とガス湧出の有無とを調査結果をもとに対応させて記号で示した。図に示されるように、工事中に発生したガス湧出はガス母層・ガス保有層を含む層準に限られている。

5.4.1.2 油田ガス湧出状況

Fig. 5.4 の中に示されたトンネルの中から3例を取りあげ具体例としてそのガス湧出状況を Fig. 5.5～Fig. 5.7 に示した。

i) Fig. 5.5 の例は大きな背斜構造を有する厚い泥岩層中を掘進するトンネル工事での事例で、大量のガス湧出があり爆発災害を経験した工区である。地質断面に示されるようにガス湧出地点の地層は油田ガス母層及び保有層と考えられる新第三紀中新世の泥岩層で、珪質泥岩の間に石灰質団塊や泥岩・凝灰岩の薄互層などをはさみ100 m 以上にわたる層厚を有しているものである。当初爆発災害の発生があった地点は想定された地質断面図からは背斜軸よりかなり手前の地点

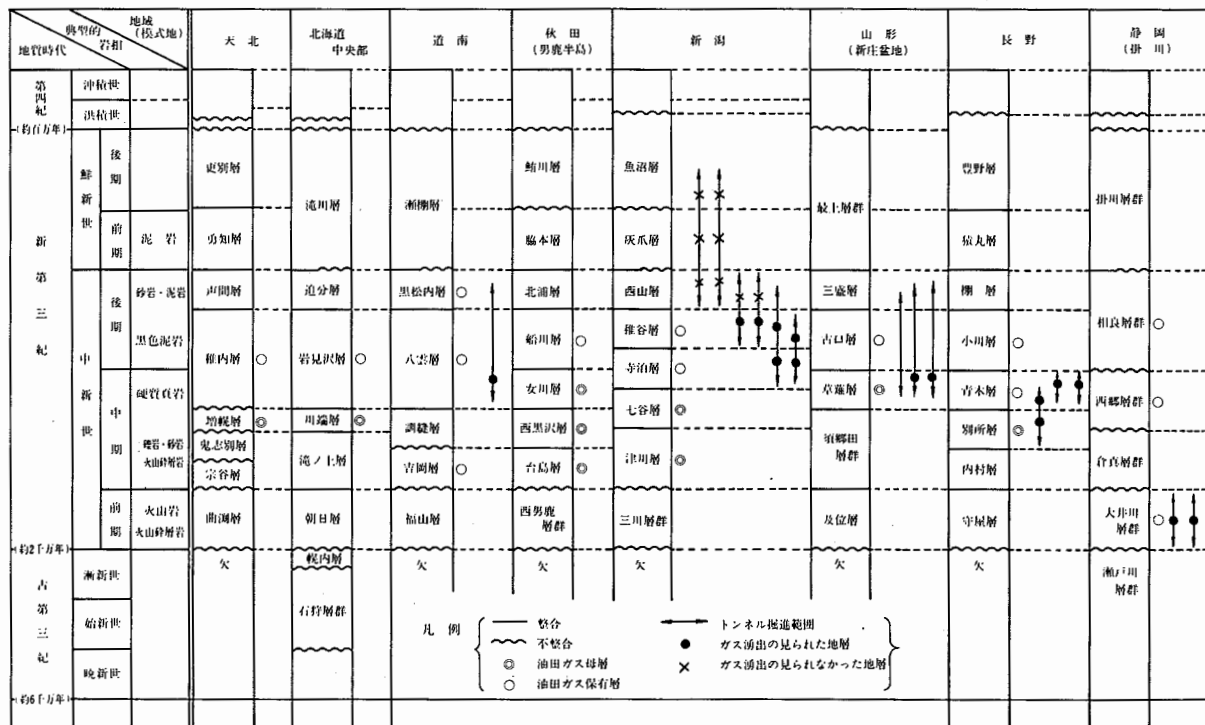


Fig.5.4 Stratigraphic correlation table of oil gas field and the condition of the gushing in tunnelling work

油田ガスの地層対比とガス湧出状況

* 9 参考文献3), 8) を参考に筆者等が編集・作成した。

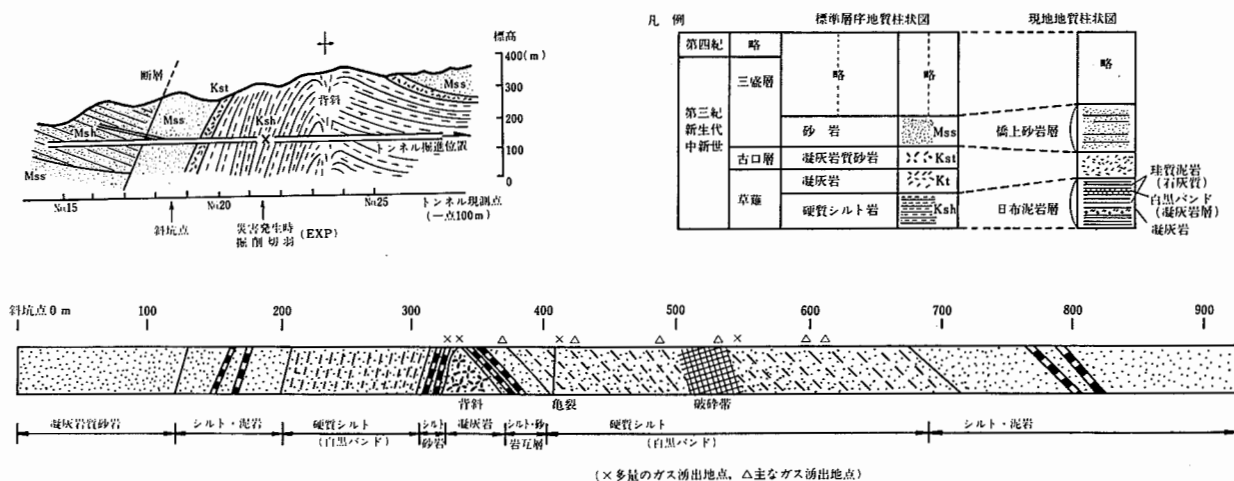


Fig.5.5 Example of natural gas gushing in tunnelling work (No.1, Tunnel-M in Yamagata pref.)

ガス湧出状況例 (その1, 山形県Mトンネル)

と考えられたが、その後のトンネル掘進と共に作成された断面図からはほぼ背斜軸付近での大量湧出現象であったことが想定される。

ii) Fig. 5.6 は別の工事例で、図は導坑切羽の掘進と共に実施された精密地質調査の結果判明したトンネル掘進位置における地質状況とガス湧出状況との関係を図示したものである。図にはトンネル掘進位置の地質平面図及び縦断面図、岩盤強度分類^{*10}による分類記号を示し、地質縦断面図中には顕著なガス湧出地点をプロットしその地点の地質状況を付記した。さらにガス湧出口でのガス濃度及び現場気流中のガス濃度の変化を併せて表示した。

気流中のガス濃度は、風管の延伸・換気システムの変換^{*11}のため同一条件下における測定値ではないが、全体として顕著な湧出口があると濃度が大きくなる傾向が掴める。これらの湧出口は、図中に示したように亀裂・小断層・層理・節理などであり、また団塊のはさみ等の成層状況に変化のある個所でのガス湧出も認められる。図中では湧出口でのガス濃度測定値を棒グラフで示したが、湧出量が特に大きく作業中断や換気システムの増強を要した地点のものは太線で示した。

iii) Fig. 5.7 の例は、顕著なガス湧出をほとんど見なかったトンネル工事の事例で、この工区でのガス湧出現象は図中の3地点のみである。しかし湧出現象は断層・岩脈等で被われた部分に切羽が突入した時点で発生している。

5.4.1.3 油田ガス湧出パターン

以上のような湧出事例からも判明するように施工現場におけるガス湧出現象はトンネル周辺の地質状況に大きく作用され、ガス湧出の状況にも幾つかの様相の差異が見られる。これらは大きくは以下の3種のパターンに大別され、各々に地質の特徴を有している。

a) 比較的微量で定常的なガス湧出

このパターンは、周囲に断層・破碎帯・褶曲等の大きな地質構造上の変化のない地域でかつ岩相変化も少ない箇所での湧出パターンである。砂岩・頁岩の互層、凝灰岩層・礫岩層等の岩種で掘削面全面からガスがわずかつ浸出するような状況を程する場合であって、切羽面あるいは切羽後方の未覆工部にも見られる。

b) ある程度の量の短期的・突発的なガス湧出

このパターンは比較的明瞭なガス湧出口(岩盤の亀裂、層理、節理など)を有することが多いが特定の湧出口のない場合もある。岩相や成層状況に変化の見られる地点(泥岩中に砂岩団塊を含む箇所、泥岩・砂岩の顕著な互層、節理・亀裂の増加、泥岩・砂岩の層境、スランプ^{*12}など)あるいは岩脈・断層・破碎帯等を縦横断する地点などで切羽面で多く遭遇する。

先進ボーリングが施工されている場合は切羽面に顕著な地質の特徴が見出されない場合でも、ボーリング

*10 トンネル工学の分野でよく用いられるもので、弾性波速度・岩質・亀裂・湧水状況などを考慮して、岩盤強度を定性的に分類したものである。
 *11 この現場では状況に応じた換気システムの変更や増強を度々行っている。
 *12 一時的に累積した未凝固・半凝固の堆積物が水底の斜面をすべり下る現象をスランピングと言い、そのような痕跡を残した地層、箇所を指す。

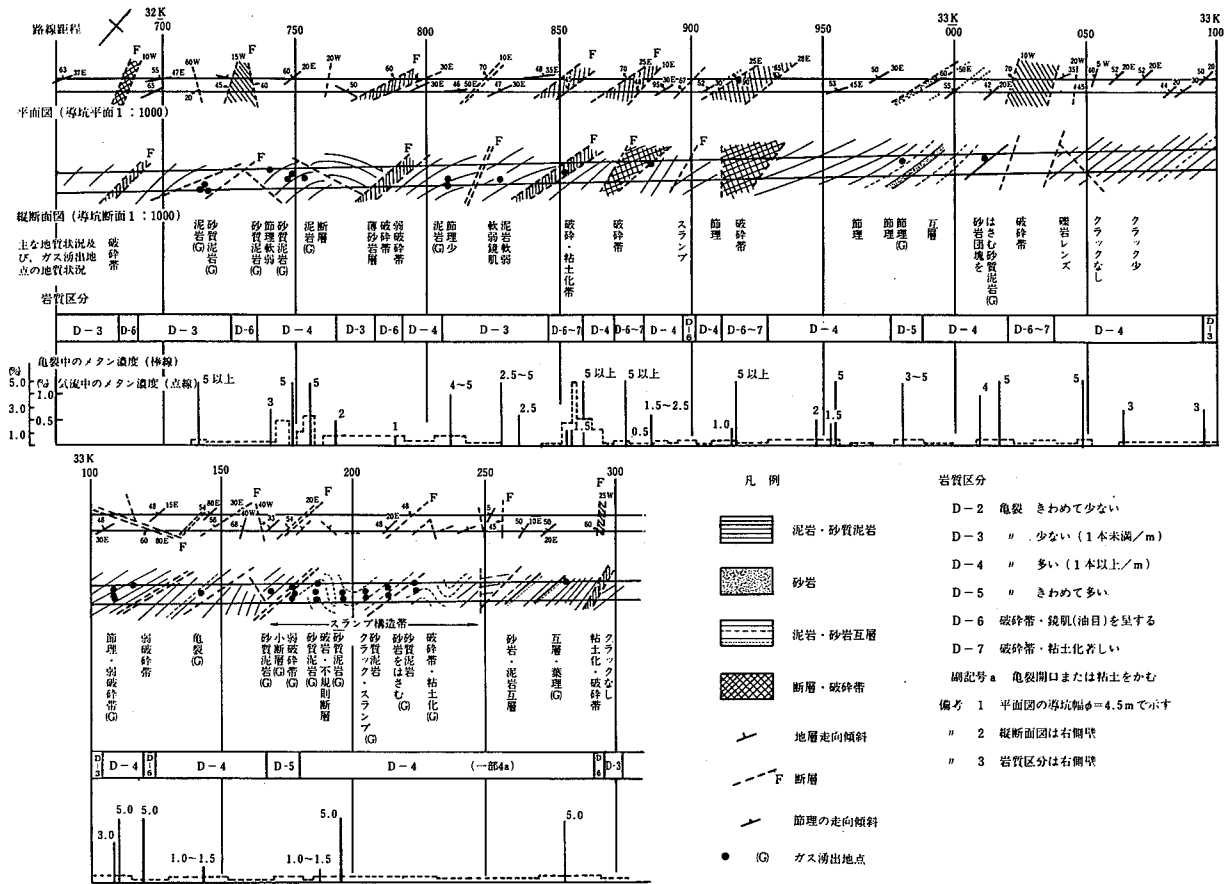
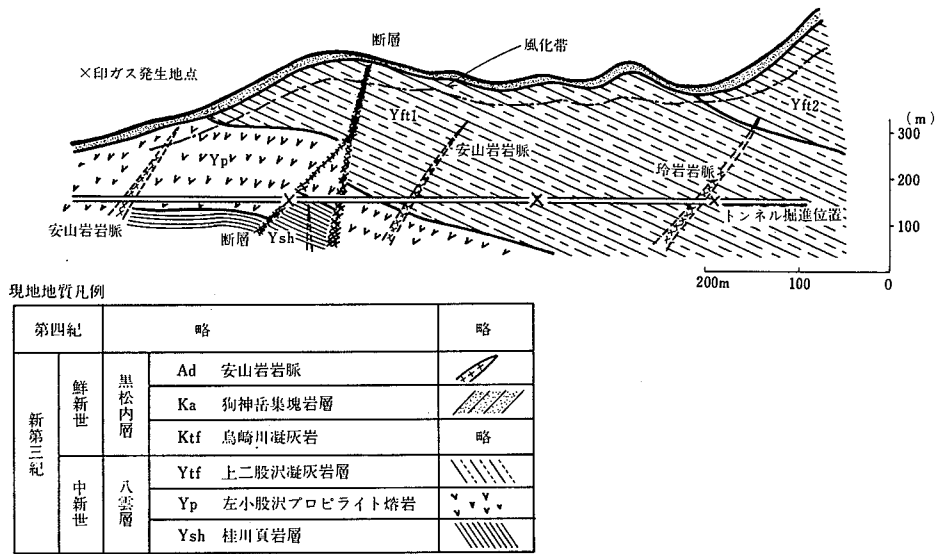


Fig.5.6 Example of natural gas gushing in tunnelling work (No.2, Tunnel-S in Nagano pref.)

ガス湧出状況例 (その2, 長野県Sトンネル)



現地地質凡例

第四紀	略	略
新第三紀	鮮新世	Ad 安山岩岩脈
		Ka 狗神岳集塊岩層
		Ktf 鳥崎川凝灰岩
	中新世	Ytf 上二股沢凝灰岩層
		Yp 左小股沢プロピライト塔岩
	Ysh 桂川頁岩層	

Fig.5.7 Example of natural gas gushing in tunnelling work (No.3, Tunnel-K in Hokkaido pref.)

ガス湧出状況例 (その3, 北海道Kトンネル)

孔が湧出口の機能を果して事前にこの種のパターンの湧出を見せる場合がある。

c) 大量かつ長期的あるいはかなりの圧力を有するガス湧出

このパターンは前述のb)タイプにさらに地質構造上の因子が加味されている地点で見られる。特に大きな背斜構造と層厚の大きなガス母層とを有する箇所では大量かつ長期的なガス湧出の可能性が大きい。

5.4.1.4 油田ガス湧出の可能性についての考え方

以上から油田ガスの湧出の可能性については、第一段階としてトンネルの場所《地域》と位置《層準》を、第二段階としては当該地点の《地質構造・岩相・成層状況》を検討する必要がある。^{*13} 実際の施工において安全上問題となる上記のb), c)の湧出パターンを示す可能性が予想されるような場合は、より詳細な地質状況の調査等の措置を含めた検討が成されねばならない。

5.4.2 水溶性ガス湧出と地質状況

水溶性ガスで湧出を見るのは、いわゆる水溶性ガスの他に、上部に滞留する地下水に再溶解したもの、上部の地層空隙中に集積した遊離ガスなどであるが、各々深度に対応した圧力で溶解・存在している。したがってこれらは掘削等による被圧力の解放により、地下水からのガスの分離があつて湧出する場合が多く、これらの湧出状況は地下水の水量・流れ・源泉などの地

下水文地理学的条件が直接反映されている。また腐蝕土層（水溶性ガス母層の一種）や地下水の乏しい砂層等（水溶性ガス保有層）の存在も大きな影響を有する。しかし浸透性の良い砂層では地表よりの浸透水の影響のためガス湧出の顕著な傾向は見られない。

いずれにせよ地下水の存在がガス湧出の鍵であり、例えばディープウェルの施工による地下水位低化を計り現場でのガス湧出量を低下させた事例⁹⁾などが知られている。

5.4.3 大気圧の変動に伴うガス湧出

前述までのようにガス湧出には地質的な諸条件が大きな要素を占めるが、今回の調査事例の中には大気圧の変動と密接に関連したガス湧出例が見られた。Fig. 5.8はある作業所において連続的に測定された大気圧及び坑内メタン濃度とを経時変化として表したものである。

この種の現象については、現在までに「酸欠空気」に関連した若干の報告があるが、それによると地中空気圧と大気圧との間の微妙なバランスの差（地層条件によっては 10^{-1} mbオーダーの差）によって湧出現象がもたらされるとされている。¹⁰⁾

メタン等の可燃性天然ガスの場合には酸欠空気とは異なり、大地の呼吸作用等のあまり関与しない地中空気圧を有すると考えられるもののその湧出については、

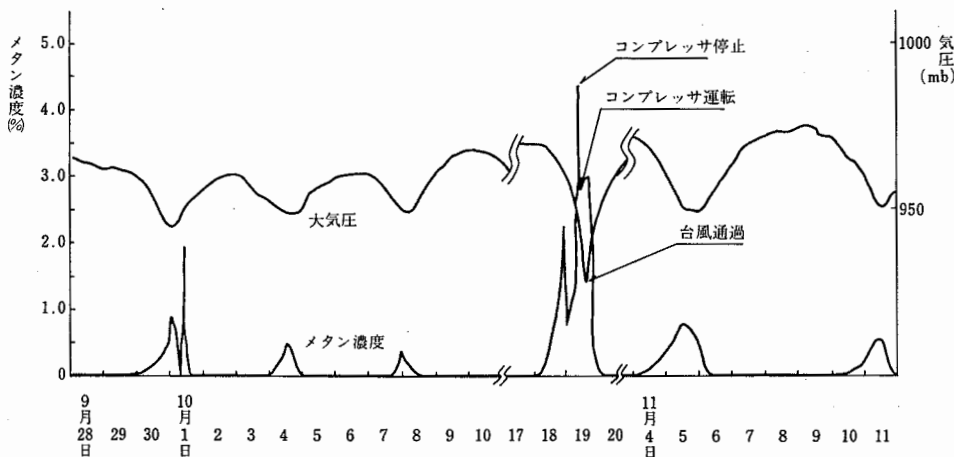


Fig.5.8 Daily variations of atmospheric pressure and methane concentration in gallery (Tunnel-Y in Nagano pref.)
大気圧及び坑内メタン濃度の約時変化（長野県Yトンネル）

*13本報告に示したFig.5.3, 5.4等がその際に有効。

酸欠空気の場合と同様で大気圧のわずかな変動によっても湧出量が大きく変化する可能性が考えられる。

5.5 湧出ガス量の算定方法と問題点

トンネル工事における通気（換気）量の設定には湧出ガス量が大きなウェイトを占め、事前にトンネル掘進地域の湧出ガス量を推定する必要がある。ここでは今回の調査で判明した各作業所で採用している湧出ガス量の算定方法を中心にそれらの方法と問題点について述べる。

5.5.1 ガス湧出量の算定

5.5.1.1 調査ボーリングによる算定と問題点

トンネル工事の計画段階で地質調査を目的として実施される調査ボーリングは、直接的なガス調査としても有効に利用し得るものである。例えば、採取コアによるガス抽出試験、削孔時の循環泥水のガス分析、ボーリング孔を利用したガス吸引試験、ボーリング孔の密閉あるいは開放による孔内ガス圧及びガス濃度の経時変化測定などの試験を行なってガス湧出量を推定している例は数多い。

しかしこれらの試験（具体的な湧出量推定法の詳細については他にゆずる）によって得られるガス湧出量は必ずしもトンネル掘進区間全域を代表し得る値ではない点は留意すべきである。

ガス調査を含めて地質調査の結果は、常にその調査精度を念頭に置いて適用を検討されねばならない。また広範囲にわたるトンネル掘進区間の全域にわたって

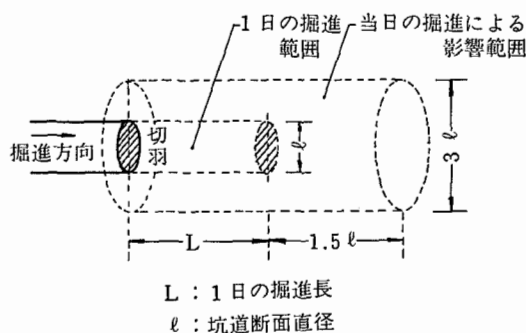


Fig.5.9 One method of assumption about area undergoing effect by excavating
掘削影響範囲の考え方の一例

湧出ガス量を正確に把握することは、かなり綿密な事前調査が成されたとしても難しい問題である。したがって後述する先進ボーリングの必要性等も生じてくる。

5.5.1.2 その他の方法による湧出量の算定

調査ボーリング以外のガス湧出量の算定法には、主に水溶性ガス分布地域で採られる方法として、水中のガス溶解度を基準とする方法（水に溶存するメタン量を静水圧・温度などの因子を考慮して算出し、溶存メタン量と湧水量とから湧出メタン量を想定）や隣接工事のガス湧出実績を引用する方法、坑壁・切羽等の掘削面での直接ガス捕集（吸出）測定を行ない湧出量算定を行なう方法などがある。

5.5.2 掘削影響範囲の考慮

ガス湧出現象の推定には、前項までの言わばその地点でのガス湧出能を示す算定値と共に、掘削による影響を受ける領域（ガス湧出をもたらす空間の範囲）を考慮しなければならない。

トンネルの掘削の進展に伴ない坑内に湧出するガスは、断層・亀裂等の特殊な地質状況が存在する場合を除くと、掘削面表面からのガス浸出と岩石等の掘削に伴う破碎による保有ガスの放出とが考えられる。したがって掘削される部分及び掘削により地山内部にゆるみが生ずる領域とを基本的にはガス湧出源として考慮せねばならない。実際にはゆるみ領域等の決定などは難しい問題で近似的・簡易的な方法として例えばFig. 5.9に示すような区域を掘削影響範囲として採用している例がある。⁹⁾この掘削影響範囲とさらに岩石・土砂の空隙率・ガス圧などの仮定あるいは前項のような湧出量調査とから全湧出量を決定する。しかしこれらはいわば定常的なガス湧出に対する考え方であり地質条件によっては可能性が十分に考えられる突発的なガス湧出を考慮したものではないことは忘れてはならない。

5.5.3 坑内ガス濃度の想定

今回の調査例の中には必要通気量の算定にあたって湧出ガス量を直接算定することなく、切羽周辺のトンネル内零囲気のガス濃度が増加してゆく状況を想定して逆にそれを想定時間内に基準以下のガス濃度に下げするのに必要な通気量を算出している例がある。

いずれにせよ湧出ガス量・換気量等に関しては多くの仮定により計算が成されていることを留意しなければならない。

5.6 先進ボーリングとその問題点

前章で述べたように、湧出ガス量の予測・算定には事前調査ボーリング等を用いた各種試験の結果が利用される。したがってこれらの推定ガス湧出量の値は施工区域全域に対して適用するには問題のある場合があり、また推定内容が定常的ガス湧出を対象としたもので突発的ガス湧出を念頭に置いたものではないことが多い。

このようにトンネル掘削に伴うガス湧出現象の推定には未だ十分な信頼性を置けるとはいえず、ガス湧出現象のより確実な把握と突発的なガス湧出に対する事前捕捉・検知及び避難対策の有効性を高める意味で、先進ボーリングの役割が重要である。

5.6.1 先進ボーリングの現状

前述の Table 5.1 に一部示したとおり、各作業所における先進ボーリングの施工内容を俯瞰すると、現状の先進ボーリング像としては以下のようなものが浮びあがる。すなわち、削孔長：数十m、本数：1～2本、残孔長：数m、口径：50～86mm、施工場所：導坑切羽、方向：水平（導坑掘進方向）、ノンコア、削孔数m毎の削孔口でのガス検知と言ったボーリングである。実際には各作業所毎に、削孔長・削孔方向・コア採取の有無・口径、削孔時あるいは削孔内のガス測定の手段や方式などの点で様々な差異がある。

これは各作業所での施工方式・工事の進捗度・地質状況などの差異に基づくものである。例えばサイロット工法を採用している作業所では、導坑・上半等切羽数が多く、ひとつの切羽での掘削作業の停止が全体の施工計画の中ではさほど大きな影響を及ぼさない場合が多く、日程的に削孔長の長大な先進ボーリングの施工が可能である。このように先進ボーリングの施工は全体の工程とも密接に関連するため、後述する先進ボーリングに要求される内容によっては採用される工法に応じて検討されなければならない。

5.6.2 先進ボーリングの種類と役割

ガス対策としての先進ボーリングには予知措置及び予防措置の二種類の性格が考えられる。

前者の場合は、あくまでも施工途中の状態（工事中）における事前調査（計画段階での調査結果のより高精

度化の為の調査）との認識が必要である。したがってそれまでの事前調査等で得られている地質状況等に関する情報・現場の諸条件等により、この種の先進ボーリングに求められる内容あるいはその実施方法などは多様なものが考えられる。ここではそれを大きくチェックボーリングとパイロットボーリングの2種に分類して考えるがいずれも調査手段としてのボーリングである。

一方後者はガス抜きボーリングに代表される対策手段としてのボーリングである。

5.6.2.1 チェックボーリング

現在多くの作業所で実施されている先進ボーリングのほとんどはこのチェックボーリングの範ちゅうに属するものと考えられる。これは切羽の前進に先立っての長孔削孔であるが、孔口でのガス濃度測定以外には特別の測定や試験には使用されないものである。したがってチェックボーリングの施工だけでは、どの地点からどの程度のガス湧出があるかと言った定量的なガス湧出の推定は困難であると言える。すなわちチェックボーリングは、事前調査の段階で予想された湧出状況の確認・突発的な異常湧出の徴候の有無の検知と言った定性的な役割を果す機能を有するものでそれ以上の多大な効果を期待すべきものではない。

5.6.2.2. パイロットボーリング

これは切羽の前進に先立つ長孔削孔としてはチェックボーリングと同様であるが、ボーリング孔を利用して各種の試験あるいは測定を行なってより有効なガス湧出に関するデータを取得できるように措置を講じたものでチェックボーリングと区別してパイロットボーリングと呼ぶ。今回の調査でもこの種の先進ボーリングを実施している作業所は幾つか数えられた。例えば、孔内の随意の地点でのガス採取、封口条件の下で孔内のガス圧あるいはガス濃度の変化測定、削孔と同時のコア採取あるいはガス採取などの実施によりかなり定量的なガス湧出状況の推定が可能である。

しかしこのような施工内容を持つパイロットボーリングが切羽面に施工される場合は、時間的に切羽の進行をある程度停止させる必要性が生ずる場合もある。したがってパイロットボーリングはその必要性、試験内容、施工場所^{*14}などを総合的に判断して効果的・能率的な実施法を充分検討して施工する必要がある。

*14切羽面を避けた側型からの斜前方の方向への先進ボーリング施工例がある。

5.6.2.3 ガス抜きボーリング

ガス抜きボーリングは炭鉱等で広範に実施されているが、炭鉱における高濃度のガス抜きの場合においても、ガス抜き効果については幾つかの問題点（例えば、ガス抜き時間、ガス抜き量、ガス抜き孔の本数・口径及びそれらの影響範囲など）も残っておりトンネル工事におけるガス抜きボーリングに多大な効果を期待するには未解決の点も多く、また精度の高い地質調査の裏付けも必要と考えられる。

5.7 あとがき

今まで述べてきたことを要約すると

- i) 現在施工中の可燃性天然ガスの湧出の恐れのあるトンネル工事は全国で30工区以上に達する。
- ii) 各施工現場での湧出ガスに対する基本的な対策としては「換気」、「ガス検知」、「火気管理」であり共通している。
- iii) 各施工現場における換気システム・検知警報システム・防爆機器設備の使用状況等の細部については現場の諸条件による差異のため必ずしも共通ではない。
- iv) トンネル建設工事で遭遇する機会の多い可燃性天然ガスは油田ガス・水溶性ガスである。
- v) それらのガス滞溜層は、地質年代・岩相・地質構造などからある程度特定できる。
- vi) 油田ガスはその母層・保有層を含む新第三紀中新世海成層の分布を反映して東北日本内帯地域を中心に分布が見られる。
- vii) 水溶性ガスは新第三紀鮮新世～第四紀層の厚く堆積する浅海性堆積盆の地域に地下水に溶存する形で分布が見られる。
- viii) 油田ガスの湧出が見られるのは油田ガスの母層・保有層を含む層準に限られる。
- ix) 油田ガスの湧出パターンは、微量で定常的なもの、突発的・短期的なもの、多量で長期的なもの、の3種に大別される。
- x) それらの湧出パターンの差は、地質構造・岩相等の地質条件の差異が反映したものである。
- xi) 水溶性ガスは地下水文地理学的な諸条件を反映した湧出状況を示す。
- xii) 以上から油田ガスをはじめとするガス湧出の可能性の検討の際には、第一段階として「地域」「層準」、第二段階として「地質構造・岩相・成層状況」に留意

すべきである。本報告書のFig.5.3・Fig.5.4などを大いに活用されたい。

さらに状況によってはより詳細な地質状況調査等によるガス湧出の可能性の検討が成されねばならない。

xiii) ガス湧出実例の中には大気圧の変動をそのまま反映する例があり気圧変動にも留意すべきである。

xiv) ガス湧出現象の推定には、湧出量の算定・掘削影響範囲を考慮しなければならない。湧出量の算定には各種の方法があるが、その結果の適用には調査精度等に留意しなければならない。

xv) したがってガス湧出現象の確実な把握及び突発的ガス湧出に対する事前把握その他には先進ボーリングの役割が大きい。

xvi) 先進ボーリングはその内容と性格から、チェックボーリング・パイロットボーリング・ガス抜きボーリングの3種が考えられる。これらの先進ボーリングの内容と役割は、現場の諸条件・地質状況等により決定され実施されるべきである。

以上、ガス湧出の恐れのあるトンネル建設工事では、事前の広範囲の地質条件（層準・地質構造・岩相等）の詳細な把握とそれを補完する意味での先進ボーリングによる調査とが重要な役割を有することを述べた。

今までのトンネル工事における通常的地質調査は岩盤・地盤の力学的性状に主眼を置いたものが多く、特に油田ガス滞溜層である新第三紀中新世の地層は地すべり・膨張性地圧等の特殊な挙動を示す地層の代表的なものであることもあって、湧出ガスに対しては関係者の認識が必ずしも充分なものであったとは言い難い側面もあった。諸方面に於けるトンネル建設の需要の動向を考慮するとガス湧出の恐れのあるトンネル工事は今後も増加すると考えられ、この種のガス対策及び安全への一層の配慮が望まれる。

末尾ながら、本研究にあたって、山崎純夫教授（早大・理工）、原雄氏（千葉県公害研究所）、蔭山哲夫氏（合同資源産業K.K.）から貴重な御助言を戴いた。また、多くのトンネル建設現場の現場調査及び炭鉱業所の調査見学にあたって現場の方々をはじめとする関係者の方々に多大の御協力を戴いた。また現場調査にあたっては、当所研究員佐藤吉信・小川勝教両氏の協力を得た。以上の関係者の方々に衷心より感謝申し上げる次第である。

参考文献

- 1) 土木学会, トンネル標準示方書。
 - 2) 例えば金原他, 天然ガス (朝倉書店), 昭33。
 - 3) 地学辞典 (平凡社)。
 - 4) 福田, 共水性ガスとその鉱床, 地質ニュース, Vol. 294, 1979.2。
 - 5) 平塚, 石油の生成及び進化の地化学的考察, 石油技術協会誌, Vol. 41, No.6, 昭51。
 - 6) 杉崎他, 南関東ガス田の地球化学的考察, 地質学雑誌, Vol. 69, pp67~81, 1963。
 - 7) 地質調査所, 日本油田・ガス田分布図。
 - 8) 日本地質学界編, 地層名辞典 I ~ V。
 - 9) 角川他, メタンガス湧出地層におけるシールドの施工, 土木施工, Vol. 18, No.13, 1974。
 - 10) 地下酸欠研究会, 地下酸素欠乏現象の広域化とその対策, 1972。
 - 11) 労働省産業安全研究所, トンネル建設工事におけるガス爆発等に対する総合安全対策にかかわる特別研究—中間報告—, 昭54.5。
 - 12) 高木, 掘進坑道・トンネル工事等における通気 (I) ~ (V), 採鉱と保安, Vol. 24, No.4~No.8。
- 注) 以上の外, 現場調査にあたった各作業所における施工計画書・ガス対策計画書・地質調査報告書を参考にしたことを付記します。