

事例分析に基づく大規模地下空間の避難のリスクの考案 Survey of Literatures on Escape Behavior from Underground spaces

田中 敦子¹

Atsuko TANAKA

Based on the survey of literatures on 26 of evacuation cases in the underground spaces, the author analyzed and discussed effect of various hazardous factors on the results of escape behavior. The purpose of use of the 26 cases underground facilities involves road tunnel, railway tunnel, mines and construction site. The kind of disaster of the cases are consisted from fires, explosions by car collision, electrical power fails by earthquakes and terror.

The result of the analysis shows that success or failure of evacuation depends on the urgency of the event and required traveling distance to safe shelter or exit, regardless with the purpose of use of underground facilities.

Based on the analysis of urgency of disaster events and traveling time, the author discussed that possibility distance of safety evacuation limit within 400m intervals.

The author also compared the urgency and rescuer access time of the disaster cases. In disaster cases of electrical power fail in underground space, the risk of human life and urgency of immediate escape are small. On the other hand, in some fire cases, the progress of contamination of escape route is far fast than arrival time of rescue. The result of survey shows the importance of measures and designs for self escape support especially in the underground spaces.

Key Words: tunnel, tunnel construction site, railway, mine, escape, hazard

1. はじめに

交通・商業・公益事業・採鉱等を目的とした、トンネル形状及び地下階層構造を組み合わせた大規模な地下空間の利用の歴史は長く、現在も各地で開発が行われている。各種の大規模な地下空間で発生した過去の災害災害を調べると、発生の時期も場所も異なる災害であっても、それぞれの事態の進展には共通点が見られ、しかも一度に多くの死傷者を生じている事例が目立つ。災害発生時に事態の進展を予測できないままに当事者が行動を迫られるのは、災害の発生場所が地上も地下も同様である。しかし、避難環境としての大規模な地下空間の特徴と人間行動の支援に関する網羅的な考察に基づいた安全対策が講じられていれば、地上に比較して激甚な、被害の抑制は可能であったと考えられる事例は少なくない。

大規模な地下空間の避難安全については、従来から防災設備の側面からの総論が多く示されてきた^{1),2),3),4),5)}。しかしながら、地下空間の避難安全性に影響を与えると見なされてきた各種要因の重要度の大小の整理は不明確なままになっている。そのため、大規模な地下空間の避難について現実にそぐわない想定がなされることがある。例えば、トンネル用非常照明の国際規格の検討において、避難の余裕を過大に見積った議論がなされたりする⁷⁾。

このような問題は、地下空間で何らかの異変が起こった時に事態がどのように進展しうするのか、避難についての知見が整理された形で他の技術分野に伝わらないことによって生じるものと考えられ、その解決には、避難に関係すると見なされている各種要因の重要度の大小の整理が不可欠であると思われる。

キーワード：トンネル、トンネル工事、鉄道、鉱山、避難、ハザード

¹ 非会員 (独) 産業技術総合研究所 地圏資源環境研究部門

表-1 分析対象とした地下空間避難事例とその概要

番号	発 生 年	名 称 (災害)	用途	距離 [km] (数値は各出典による)			発災後、救助隊の到着に要した時間		関係者			避難のスタイル	避難妨害	失敗	避難成功要因	備考				
				トンネル総延長	発災場所から通常の出口までの距離 (火災以外では、発災時に避難者がいた場所からの距離)	最短の所要避難距離	救助隊が、被災入口に到着	救助隊が被災者近傍に到着	避難者総数	死者	重傷	軽傷	職員が客を誘導	利用客の判断	煙と避難距離		設備に対する知識欠如	設備に可能な経路の欠如	マニピュレーション不備・欠如	有効な避難安全システム
1	1961	上横炭鉱 (火災)	鉱山			0.443		0.443			91	71		○	○	○				
2	1961	大辻炭鉱 (火災)	鉱山			0.93		0.93			73	23	8	10	○	○	○			
3	1968	平和炭鉱 (火災)	鉱山			-		-			58	31	3		○		○	○		
4	1972	北陸トンネル (火災)	鉄道トンネル	14.0	6.0		3.0	約1時間半			770	29	719		○	○		○		車両火災発生後にトンネル内で列車停止。乗員が消火や車両切離に追われ、乗客の避難誘導開始まで1時間以上かかった。
5	1973	西部炭鉱 (火災)	鉱山			0.735		0.25			529	4	11	5		○		○	○	
6	1977	扇沢トンネル (火災)	トンネル工事	4.49	1.938			0.47			74	0	4		○			○	○	当該工区の延長は2.84km。現場より470m先の切羽に圧入バルブ
7	1979	サンフランシスコ高速鉄道 (BART) (火災)	鉄道トンネル	5.6	推定2.8			0.1			500	1	56		○	○		○	○	サービストンネル連絡口100m外。車両火災。乗員が列車の切り離しに追われ、乗客の避難誘導開始まで30分ほどかかった。
8	1979	大清水トンネル (火災)	トンネル工事	22.2 (坑口間20.3)		5.3	風下側 5.3 (風上側 15)		約6時間		20	14	4		○		○	○		大断面の1本トンネルの完成直後の、全断面掘削機の稼働時作業中の火災。一時待避場所や迂回ルートがなかった。
9	1979	日本坂トンネル (火災)	道路トンネル	2.37	0.43		0.43				208	7	3			○	○			火災発生後もトンネル内に車が進入し、トンネル入口から追突事故現場までの約1.6[km]間に161台208名が滞在。車両が断続的に爆発した。
10	1984	三池有明鉱 (火災)	鉱山		2.3		1.3	約1時間50分			652	83	16		○		○	○	○	通常なら避難可能なルートがたまたま発破で通行不能。
11	1984	世田谷 (火災)	共同溝								4	0	0	0	○					通信ケーブル火災
12	1987	近鉄生駒トンネル (火災)	鉄道トンネル	4.737	1.7		0.5				70	1		48		○				ケーブル火災。停電で電車がトンネル内で停止。指令室が避難誘導指示を出す。乗客の誘導が遅れた。
13	1987	ロンドン キングスクロス駅 (火災)	地下鉄		0.3		0.3				-	31				○	○			火災。木製エスカレータからの炎が改札フロアに吹き出し、逃げ遅れた人々が煙に巻かれた。
14	1988	中国自動車道掘トンネル (火災)	道路トンネル	0.459	0.12		0.12				-	5	5			○	○			追突による車体の変形と、火勢の強さのために逃げ遅れ。
15	1995	神戸市営地下鉄 (阪神大震災)	地下鉄		1.0		1.0		約1時間		500	0	0	0		○			○	停電でトンネル内で電車が停止。いくつかの列車で数百人規模の避難。乗員が電車で徒歩で乗客を迎えに行き、徒歩で駅まで避難した。
16	1996	ユーロトンネル (火災)	鉄道トンネル	49.2	5.0		0.004	14分	推定20分		34	0	0	0		○			○	加圧したサービストンネルへの連絡口375m間隔。火災で停車した列車の客室ドアからサービストンネル入り口まで4m。
17	1999	タウエルトンネル (火災)	道路トンネル	6.4	0.83		0.83				-	12	50			○	○			
18	1999	モンブラン地下トンネル (火災)	道路トンネル	11.6	6.7		0.6				-	39				○	○			シェルター600m間隔
19	2000	キッツスタインホルンマウンテン (火災)	ケーブルカー								171	159				○	○			
20	2001	WTC地下 (テロ)	地下鉄		-		-				-	-	-	-		○	○			2001.9.11 WTC による地上部の崩壊、避難
21	2001	ゴダードトンネル (火災)	道路トンネル	17.6	1.5		0.25				-	11							○	シェルター250m間隔
22	2002	ウクライナ炭鉱 (火災)	鉱山								107	33			○					
23	2003	大邱地下鉄 (火災)	地下鉄		0.3		0.3	7分	推定10分		640	194	146		○	○	○		○	放火された電車が停車した駅舎に、反対路線の電車が進入して停車した。電車のドアが開けられたまま客が放置された。
24	2003	田舎鉱山 (火災)	道路トンネル	5.8	3.7		3.7				9	4			○	○		○		トンネル内の休憩所の衣類乾燥機による火災。一旦は車で山頂に出た坑内員たちが、消火しようとして車を引き返した。
25	2004	新幹線大清水トンネル (中越地震)	鉄道トンネル	22.2	線路0.44上り階段0.6		1.0		約5時間半		410	0				○			○	中越地震。停電で新幹線車両がトンネル内で停止。駅からの避難誘導係が約5時間半後に車両に到着。乗客の避難完了にさらに2時間。
26	2005	ロンドン地下鉄 (テロ)	地下鉄		-		-				-	-	-	-		○	○		○	多発テロ。電車が駅間で停止。乗客が駅まで歩いて避難。

表-1 の引用文献 : No.1, 2, 3 ⁸⁾, No.4 ⁹⁾, No.5 ⁸⁾, No.6 ¹⁰⁾, No.7 ¹¹⁾, 12), 13), 14), No.9 ¹⁵⁾, 16), 17) 18) 19), No.10 ²⁰⁾, No.11 ²¹⁾, No.12 ²²⁾, No.13 ²³⁾, 24), 25), No.14 ²⁶⁾, No.15 ²⁷⁾, No.16 ²⁸⁾, 29), No.17 ³⁰⁾, 31), No.18 ³²⁾, No.19 ³³⁾, No.20 ³⁴⁾, No.21 ³⁵⁾, No.22 ³⁶⁾, 37), No.23 ³⁸⁾, 39), 40), 41), 42), No.24 ⁴³⁾, 44), 45), 46), 47), No.25 ⁴⁸⁾, No.26 ⁴⁹⁾

このような問題意識に基づいて、筆者はトンネル構造を主体とした大規模な地下空間における避難事例を分析し、避難の成否に影響を与える要因について考察を行ったので以下に報告する。

2. 事例調査の対象とその概要

本論文で調査対象としたのは、地下室外の、地下鉄や鉄道・道路用トンネル・鉱山等の大規模な地下空間全般である。大規模な地下空間で発生した避難のうち、事態発生の過程や避難の経過に特徴のある、主に日本の事例を中心に 26 件を取り上げて文献調査を行った（表-1 参照）。

災害の種類は火災・爆発、地震による停電、テロによる停電である。避難の成否に影響を与えた要因を考察するために、調査対象には死者ゼロの事例群も含めている。主たる調査対象は、公表された事故調査報告書、各種の学術的調査報告、裁判の判例等の公式の文献であるが、それらの入手が困難な事例については新聞等の報道資料を参考にした。

表-1 に取り上げた各事例の、発災場所から通常の出口までの距離、最短の避難所要距離、総避難者数を図-1 に示した。図-1 の横軸は発災場所から地表までの距離、縦軸は最短の避難所要距離を表し、また、円の大きさで各事例の総避難者数と死亡者数を表した。図-1 から分かるように、本論文で取り上げたのは、避難距離がキロメートル台に及ぶことがある大規模な地下空間の避難事例である。

避難の成否に影響を及ぼしたと調査対象文献の中で指摘された主要な要因を、以下のように整理して表-1 に記載した。

避難の妨害要因

- ・ 妨害タイプ 1 [煙と避難距離]：長い避難所要距離（～15[km]）。煙や有害ガスが避難経路に充満
- ・ 妨害タイプ 2 [避難可能な経路の欠如]：発災後、一部の領域で退路が失われる、または、退路が風下

避難の失敗要因

- ・ 失敗タイプ 1 [設備に対する知識の欠如]：呼吸保護具や一時待避場所等の避難支援システムの一部若しくはすべてが利用されない
- ・ 失敗タイプ 2 [マニュアルの不備や欠如]：消火・避難誘導、避難開始のタイミングや行動の優先順位等、マニュアルが不明解。鉄道の場合、消火や連絡に長時間（～60 分）費やして、避難や誘導の決断が遅れて乗客の生命に危険が及ぶ。

避難の成功要因

- ・ 成功タイプ 1 [有効な避難安全システム]：避難安全システムと迅速な誘導開始が奏功
- ・ 成功タイプ 2 [近距離の一時待避場所]：煙や危険の少ない一時待避場所や避難経路の利用
- ・ 成功タイプ 3 [避難の許容時間が長い（非火災）]：身体に迫る当面の危険がない

表-1 には救助の時間が明らかな場合はその値も示したが、救助到着が「時間」単位の事例が目立つ。

各事例において、災害発生時に被災者がいた場所から、安全な場所までの避難距離を距離の順に整理して表-2 に示した。表-2 では、安全な場所までの避難距離によって死者の発生が左右される傾向が見える。

さらに表-3 に、事例群の避難・誘導全般の意思決定の主体に着目した誘導・避難の形態を 3 タイプに分類し、また、避難開始と救助遅延の理由及び避難成功に役立ったと指摘された設備・器具を整理して示した。

3. 地下空間避難の成否に影響を与える要因

本節では、既往の実験報告を参考にしながら、表-1 の事例の避難の切迫性を調べる。また、表-1 の事例文献中で、避難の成否に影響を与えたと指摘された各種の要因と事故後の対策から、避難の所要時間に影響を与えると見なされるハザードを分類する。

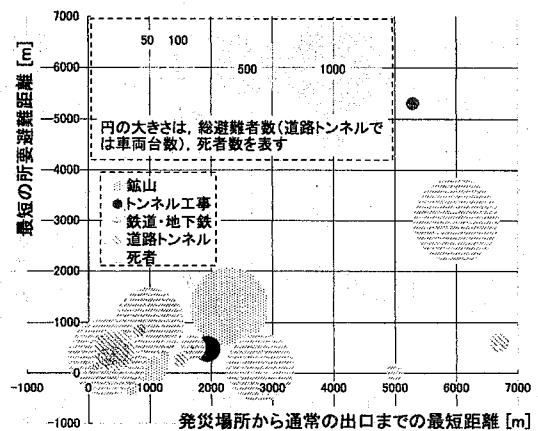


図-1 地表までの距離と最短避難距離、総避難者数

表-2 安全な場所までの避難距離（距離順）

発生年 場所 (死者数)	利用された避難経路と一時待避場所	備考
79 サンフランシスコ高速鉄道(0)	100[m]ごとに線路トンネルからサービストンネルへの連絡通路	
01 ゴタードトンネル(11)	250[m]ごとの一時待避場所	多数が一時待避場所を利用して助かったと報道された
96 ユーロトンネル火災(0)	357[m]ごとに加圧したサービストンネルへの連絡道	客車は、連絡道入り口直近に停止
77 湯沢トンネル工事火災(0)	470[m]先に圧気バルブ	
99 モンブラン地下(39)	600[m]ごとの一時待避場所	改修後は300[m]ごとの一時待避場所と車道下の人道への連絡
04 中越地震大清水トンネル避難(0)	線路づたいに約400[m]歩行、約600[m]の階段上り	全員避難完了まで約2時間

表-3 避難開始と救助遅延の理由、避難に役立った設備・器具

タイプ	Type 1	Type 2	Type 3
概要	限定された職員のための避難	職員が多数の乗客を誘導	利用者が自己判断で避難
類例	鉱山、トンネル工事、通信用トンネル、共同溝	鉄道、地下鉄	道路トンネル
避難開始に遅延が生じた理由	作業場と離れた場所の火災発生を知らない 消火作業 避難命令の遅れ（責任者が非番など）	列車の切離作業 消火作業 指令所の命令待ち（指令のマニュアル）	前方の火災を知らずにトンネル内の渋滞に巻き込まれる
救出に遅延が生じた理由	救護隊の出動までには時間が経過 火勢の拡大、煙の噴出	火勢の拡大、煙の噴出	渋滞で消防車が進めない 火勢の拡大、煙の噴出
避難成功に役立った設備・器具	（加圧空気の）圧気管バルブのある作業場所 煙の流れて来ない奥部の坑道 CO マスク	加圧したサービストンネルへの数百[m]置き連絡坑	数百[m]ごとに設置された一時待避場所

表-4 避難の切迫度（避難許容時間によるランク）

A 瞬時の避難完了が必要	B 数分以内の避難が必要	C 数10分以内の避難が必要	D 1日程度
爆発	近傍の火災（特に風上側で発生した火災）	風下の火災・崩壊	地震等による単純な停電

(1) 事態の切迫性

避難の成否は許容時間内の避難完了の可否に左右されるので、許容時間を決定する切迫性から調べていく。

a) 事例に見られる避難の切迫性

表-1 の事例群の中では、車の衝突による爆発が最も事態の展開が急進的な災害事象である。次に切迫性が高いのは、煙と一酸化炭素等の有害ガスの急速な拡散を伴う火災である。地震等による長時間の停電は、最も生命への危険の少ない事例群である。

避難の切迫度を整理すると表-4 のようになる。避難が間に合うかどうかの考察は、火災において顕著に意味を持つことが明らかである。そこで、火災の切迫性についてもう少し触れることにする。

b) 風速と火災の煙の関係

既往の火災現象に関する実験的な研究を避難行動の視点から調べると、地下のトンネル状空間における風速と煙の関係についての各種の報告を次のように要約することができる。

風速 8), 50), 51), 52), 53),

・ 通気方向を一定に制御する鉱山以外の大規模な地下空間では日変化や季節変動によって通気方向の逆転は頻繁に発生し、風速は±10[m/sec]のオーダーの範囲で変動する。

風速と火災の煙の関係 54), 55), 56), 57), 58), 59), 60),

- ・ 風速 2 [m/sec]未満：煙の波及速度は緩やかであるが、風上にも煙が回る。
- ・ 風速 2 [m/sec]以上：通気方向に速やかに煙の汚染が拡散する。
- ・ 火災の発達過程において、風下では熱膨張によって風速が1.5・2 倍に増大する。

c) 切迫性

前項の風速と煙の関係から、火災における避難の切迫性を推定するために、筆者らの被験者実験⁶⁰⁾で得た上向き・下向きの歩行速度のうち、遅い被験者の速度の風速との大小関係を描くと図-2 のようになる。図-2

からは、大規模な地下空間の $\pm 10\text{m}[\text{m/sec}]$ 台の風速は人の平面の歩行速度よりも大であるために、火災で煙が出た場合は早急な避難の完了が必要になることが分かる。

なお、図-2 の引用の上向き下向き歩行実験は、高低差 42m 、延長 240m のコースを 20～50 歳代の男女被験者に歩行してもらったものである⁶²⁾。上り・下りの歩行速度がほぼ同じであるのは、50 代の被験者のデータを利用したためである。青年に比較して敏捷性が衰えているためか、50 代の被験者の一部には下りで慎重に歩を運ぶ傾向が見られた（表-6 のデータ参照。）

(2) 事態発生から事態の把握と避難開始までの時間を規定する要因

本節では、事態発生から、人間が事態を把握して避難を開始するまでの時間に関係する要因を調べる。

a) 避難・誘導開始の遅延を規定する要因

一般に地下では、周囲から目視で得られる情報が地表よりも限定的である。たとえ 1 本の貫通したトンネルや通路であっても、曲がりがあるともう一方の端まで見通せない。視野の範囲外で発生した異変を把握するには、情報機器の支援が必要であるが、モニター情報は通常は遠隔の監視室に送られ、地下空間内の在館者や通行者には提供されない。一般の在館者や通行者が発生初期の異変に気づくのは、火元に対して風下側（排気側）にいる場合である。火元からの距離と通風の風速とによって異変覚知の時期は変わる。風上側の人々が異変の発生を知るのは比較的に後である。

表-1 の事例群において、異変に直面した人々の行動規範は、「様子見・探索」「事態の軽減のための対応」「速やかな避難」「生命の安全維持のための探索活動」の 4 種類に分類できる。

また、避難や誘導の開始に直接的・間接的に遅延をもたらしたと指摘された行動を整理すると、表-6 が得られる。人々は事態の切迫性を感じることなく、様子を見たり初期消火を行ったりするうちに手遅れになり、被災した傾向が見いだされる。

当事者の対応の迅速性に影響を与えるものとしては、次のような要因が指摘されている。

- ・避難訓練・緊急対応訓練
(実地訓練、図上訓練：想定被害規模、頻度)
- ・災害・異変対応の直接経験
- ・避難経験の伝承

このうち、避難訓練については、表-1 No.20 (9.11 WTC) の事例では、シナリオの想定被害規模が大きく、具体的で、かつ訓練頻度が大であるほど、避難や誘導の開始を促進する傾向があり、また、災害体験のある人や、体験者からの直接の伝承を受けた人は災害対応行動に移るのが早い傾向が指摘されている³⁴⁾。

b) 避難・誘導開始の促進

前項とは逆に、異変の様子を直接自分の目で直視することが、最も情報浸透効果が高く迅速な避難開

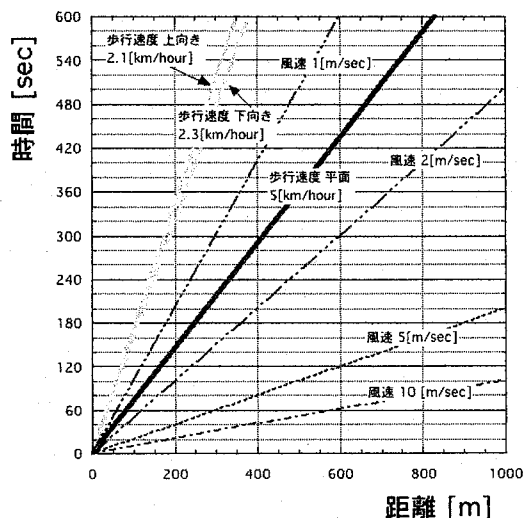


図-2 風速と歩行速度との比較

表-6 遅い被験者の歩行速度(傾斜 20° の水平成分)⁶¹⁾

下向きの普通の速さ		
	[m/sec]	[km/hour]
平均区間速度	0.80	2.9
標準偏差 σ	0.11	0.4
区間最大値	1.1	3.8
区間最小値	0.6	2.3

上向きの普通の速さ		
	[m/sec]	[km/hour]
平均区間速度	0.82	2.9
標準偏差 σ	0.10	0.4
区間最大値	1.0	3.7
区間最小値	0.6	2.1

表-6 避難や誘導の開始に遅延を生じさせた行動

概要	内容
様子見	何もしない、外部に（携帯含む）電話で相談
事態把握のための行動	探索、進入
情報の断絶	第一発見者が事態を伝えない 責任者や担当者に連絡が取れずに時間が経過
直面する事態への対処	消火、列車の切り離し作業など 被害軽減のための一次的対応に手間取る、
監視室・監督者の対応待ち	マニュアルの不在、想定外の事態 判断の権限が事態に直面した当事者に委任されない

始をもたらす傾向が見られた（表-1 No. 10, 20）。

（3）移動所要時間を規定する要因

避難において、移動の所要時間は、距離と速度で決定される。

表-1 の事例は、通常の出口までの距離が数百～数 km に及ぶものである。しかし、表-2 に示したように、出口までの距離が大きくても、一時避難場所や避難用迂回路への距離が短い場合は被災者の犠牲が小さい傾向が認められる。避難距離は重要な要因であると考えられるので、後節での考察のために、調査対象事例群の避難所要距離を表-7 のように分類する。

（4）最適な避難経路や待避場所の選択に要する不定の時間

移動の所要時間以外に避難総所要時間に関係するファクターとして、避難経路の選択の問題がある。

取り上げた事例群の中には、残念なことに発災の時点で既に避難経路が絶たれていた事例もある。しかし、それらを除けば、もし最適な避難経路さえ知らされていて、避難を早期に開始していれば、避難が可能であったと考えられる事例は少なくない。

最適な避難経路の選択の可能性は、照明や非常灯がもたらす通路の明るさと、標識、その他の周囲の要旨で成る視覚情報に影響される。筆者らが、迷路で実施した被験者試験においても、明るいと曲がり角をまっすぐ進む傾向があり、暗いと角を手探りして迷う傾向が観察された^{(63), (64)}。

本論文で分析した事例中に視覚・聴覚情報の提示装置に対する指摘は少なかったが、その中で次の2点が重要な問題を提示している。

- ・避難の際、非常口連絡ドアの標識が煙で見えにくいと指摘された。災害後、標識を改良して、大きな文字を使うとともにコントラストを際立たせた。（表-1 No. 16 ユーロトンネル）

- ・停電のため、避難の際に非常口標識は見えず避難経路となった階段では暗闇で押し合いになり、避難者が倒れて折り重なる状況が発生した。それを受けて、改装後は内照式の誘導標識を増設するとともに壁面に蓄光性標識を多く配置して、停電時の誘導効果を高めた。（表-1 No.23 大邱地下鉄）

これらは、火災が発生した場合の個別の表示の視認性（輝度、サイズ）、設置高（床上、吊）、連続性（標識が途切れない配慮）についての指摘であると要約できる。従って、非常用照明や標識が規格や基準を満足していることは最低必要条件であるが、加えて、大規模な地下空間においては停電時の視認性、そして煙が加わった場合の視認性と誘導効果の確認が不可欠と言える。

（5）安全な一次待避場所や迂回路の欠如

取り上げた地下空間は、図-3 に示したような各種トンネル状空間から、地下街や駅のコンコースのような幅のある大空間が多数の通路で連結された形状のものまでさまざまである。そのため、出口や一時避難場所への移動所要距離は、空間の性格と設計によって大きく異なっている。

取り上げた事例群の中の、自力歩行避難による最大歩行避難距離は、トンネル建設工事火災の約 15[km] である（表-1 No.8）。

この事例は 1 本トンネルの火災であったが、たまたま入気側すなわち風上にいた人々が避難に成功できたものである。煙や有害ガスが立ちこめた条件での避難成功の距離はこれより遙かに短い。

表-2 にも示したが、呼吸保護具を利用しない避難事例を見ると、数 100[m] オーダーが避難成功のボーダーであると思われる。一時待避場所（図-3 B. のタイプ）や迂回路（図-3 C. のタイプ）が存在し、かつ、そこへの到達ルートが確保されていること、そして避難関連システムの有効性が避難の成否を分ける重要な要因となっている。

（6）異変の伝達

地上の建造物ならば外周と上部の開口部から内部の被災状況を推定する手がかりを得られるが、地下

表-7 避難所要距離のランク

A	B	C	D
-50[m]	-500[m]	-1000[m]	-5000[m]



A. 1 本 B. シェルター付 C. 連絡通路付 D. サービストンネル付

図-3 大規模な地下空間の避難経路の構造

空間は地上との接点が出入口や換気用設備の開口部のみであるために、外界から目視で得られる情報は限定的である。そのため、地上に異変を伝える手段のが、地上の対応の速さに重要な役割を果たす。

分析した事例群において異変を伝えるために使われた装置を整理すると表-8 のようになる。表-1 No.16 の事例では、自動監視システムがモニタリング結果に基づき、緊急対応のトリガーを管制室に与えた、良い結果が得られている。しかし、No.23 の事例のように、モニタリング設備があっても、画面を人間が判定するシステムでは、対応がなされないままに事態が悪化している。

(7) 救助到着に要する時間を規定する要因

表-1 に示したとおり、救助到着までの時間は数分から数時間までと広範囲に分布している。異変が地表に伝えられるまでの時間に加えて、出動の判断、装備の用意、安全性の吟味とさらに移動時間とアクセスの確保が必要であるためである。

4. 考察

(1) 移動所要距離と異変の種類による避難の成否

前節では、調査対象文献の中で、避難の成否に影響を与えたと指摘された各種要因及び事故後に取られた対策から、避難の成否に影響を与えたと見なされる各種要因を分類した。避難所要時間の構成という観点から前節で調べた各種要因の関係をまとめると、図-4 のようになる。「事態の発生から、事態の把握と避難開始まで」「移動所要時間」「最適な経路・待避場所の探索の時間」が避難の総所要時間を規定する。救助到着までの時間を規定する救助アクセシビリティは、独立の要素である。

異変が発生した場所から安全な場所までの許容時間内の移動と考えると、避難の成功と失敗は、式(1)で評価できる。

$$R = (\text{事態発生から避難開始までの時間} + \text{経路の選択} + \text{移動所要時間}) - \text{避難許容時間}$$

ここに $R \geq 0$: 避難の成功

$R < 0$: 避難失敗

前節の検討に基づいて「移動所要時間」を試算してみることにする。

安全側に配慮して表-7 に示した遅い 50 代の被験者の区間速度を利用して、移動所要時間を計算すると表-9 が得られる⁶¹⁾。

ここで、筆者の実験結果の中で最も遅い速度を取り上げて示したのは、トンネル状空間で多く見られるような通路幅に制限があり 1 列避難が想定される避難経路で、しかも長距離の避難であれば、移動速度の小さ

表-8 通報 異変を地表に伝える装置・状態

	迅速性 時間	大 数分	中 10 分前後	小 数十分
坑内用誘導無線		○		
電話		○		
携帯電話		○		
モニタリング装置 (映像、煙、熱、臭い等) (センシング可能な閾値に達する必要がある)		判定機能あり ○	判定なし ○	
地表に現れた異変 (煙、炎、有毒ガス)				○

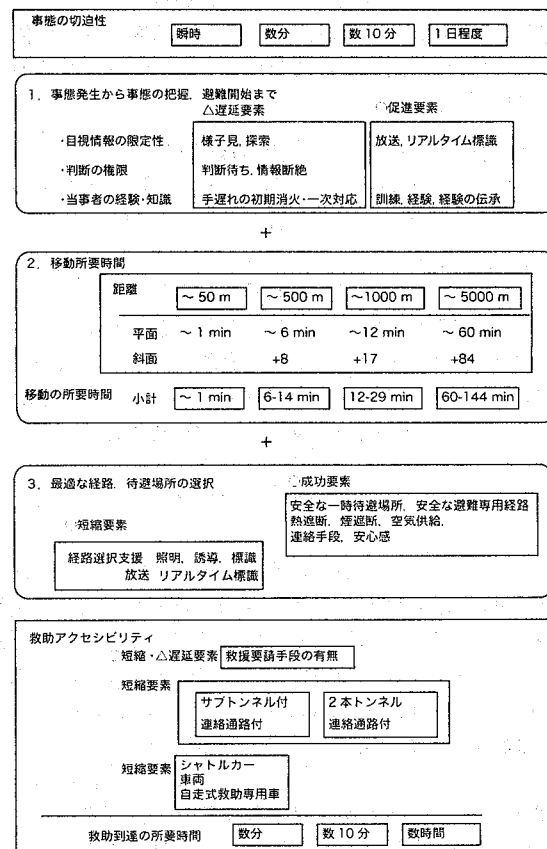


図-4 地下空間の避難所要時間の構成、及び、切迫性と救助

式(1)

い人の速度に全体の移動速度が圧倒的に支配されるからである（参考事例：表-1 No.15, 25, 26）。

体力的な災害弱者も混じる一般市民で成る集団の地下の避難を考えると、上向き・下向きについては表-9より避難速度が遅くなる可能性がある。また、No. 25 の事例のように 600m の上り階段が避難路にあると、休憩時間が必要になる可能性もある。ただし、幅がある避難路で速度の異なる列を維持すれば、先頭の移動速度は大きくなる可能性がある。

表-9 では、避難距離が 50[m] 前後であれば上・下・水平方向いずれも所要時間は 1 分ほどである。しかし 5[km] 以上では、所要時間は数時間のオーダーの計算結果を得た。

避難の成否に関係する「

移動所要時間」は距離と速度で決定される。また、表-4 に示したように、おおよその「避難許容時間」は異変の内容によって変わる。これらの 2 要素の時間の関係を描くと、表-10 に示すように避難成功の現実性が疑われる距離領域が生じることが分かる。

距離に決定される「移動所要時間」と異変の内容に依存する「避難許容時間」以外の、「避難開始までの時間」並びに「経路選択の時間」の大小が問題になるのは、表-10 において「ボーダー」や「避難可」と示した領域であると言える。

(2) 地下空間避難における避難の容易性

ここでは、式(1)及び図-4 に示した、「事態の発生から、事態の把握と避難開始までの時間」「移動所要時間」「最適な経路・待避場所の探索の時間」で構成される避難所要時間、及び「救助のアクセシビリティ」について改めて考察を加える。

「事態の発生から、事態の把握と避難開始までの時間」について言えば、調査対象事例の中には、「事態発生から避難開始」までに 1 時間前後が経過した事例がいくつもある(表-1 No.4, 10, 12, 15, 25)。また、本論文の調査範囲とは異なるが、海外のトンネル状空間における火災において、煙が耐えきれないほどに濃くなるまで、被災者が火元近くで様子見している状態が映されたモニター記録は複数知られている。前節(2)で調べた「避難開始までの時間」の内容も、教育や訓練、情報提示等が意思決定にもたらす心理学的効果に影響されていることを示している。

前節(4)で調べた「避難経路の選択」の内容もまた、地下空間避難における視覚・聴覚情報提示の重要性を示唆している。

「事態の発生から、事態の把握と避難開始までの時間」及び「最適な経路・待避場所の探索の時間」のどちらの時間も、効果的なシステムは所要時間を最短にするが、そうでない場合は不定の時間を費消させるものである。しかし、本論文の対象事例からは、定量的評価に足る情報までは得られなかった。

大規模な地下空間においては、前述の表-10 に示したように、切迫性と避難所要距離と移動の所要時間の関係が、十分に避難の成否にクリティカルな影響を及ぼすので、ここでは式(1)の「事態発生から避難開始までの時間」及び「経路の選択」の項については、これらの項によって費やされる不定の時間の抑制が、火災において重要性が高くなることを言及するに留める。

救助のアクセシビリティは、救助要請や異変の情報が速やかになされるかどうか、そして、安全に救助に向かう手段の確保に要する時間、さらに地表のステーションから地下空間の入り口までの移動の所要時間、入り口から避難者のいる場所までの移動所要時間の組み合わせられた課題である。いずれ救助は到着するが、事態の切迫性と比較すると、到達までの実所要時間はクリティカルな水準の事例が目立つので(表-1「発災後、救助隊の到着に要した時間」欄参照)、安全な自力避難を支援する避難システムの存在の重要性が明らかであると言える。それが、救助アクセスの容易性をも実現する。

なお、不確実性の高い推測であると言えるが、図-1 の中の最短避難距離と死者数の関係、図-2 の通気速度と歩行速度の関係、さらに表-10 の移動所

表-9 移動の所要時間[min] (表-6, 表-7 から算定)

	50[m]	500[m]	1000[m]	5000[m]
上向き	1	14	29	144
水平	1	6	12	60
下向き	1	13	26	131

距離は、実験条件である傾斜 20° の水平速度成分

表-10 移動所要距離と異変の種類によるリスク評価

切迫性	避難許容時間	A			
		数秒以内	数分以内	数10分以内	1日程度
避難	異変	火災	近接の火災	火災・崩壊	(地震等の)単独な停電
	移動所要距離	歩行時間			
1	50m	1min	不可	避難可	避難可
2	500m	6-14min	不可	ボーダー	避難可
3	1000m	12-29min	不可	不可	ボーダー
4	5000m	60-144min	不可	不可	不可

要距離と切迫性の関係から簡易に見積もる限りでは 400[m]近傍に大規模な地下空間における避難安全距離の境が存在する可能性があるように思われる。

しかし、この点は災害事象の個別の確率的な不確実性（例えば火災であれば、発生現場の空間形状と周囲環境・可燃物の状態・煙の方向等の災害シナリオ、避難誘導経路及び設備の内容と利用の確率分布）及び避難集団の移動能力の構成に左右される部分が大きいと考えられる。従って、筆者の避難安全距離の境についての推測は、今後の精緻な統計的考察を必要とする課題であることを改めて強調したい。

5. おわりに

トンネル形状及び地下階層構造を組み合わせた大規模な地下空間の避難事例 26 件の分析に基づき、各種のファクターが地下空間避難の成否に与える影響を考察した。

実際の大規模地下空間においては、用途によって避難安全対策が策定されているが、本章の検討では、用途に関わりなく、事態の切迫性と安全な一時待避場所若しくは出口までの距離に避難成功の可否が左右されることを示した。また、各種災害の事態の切迫性と救助のアクセシビリティとを比較した。

停電のような事態では身に迫る危険が小さいが、大規模地下空間の火災では、事態の発生から救助の到達までに要する時間は、クリティカルな領域に至ることが多い。従って、大規模地下空間においては、速やかな自力避難の支援が避難容易性の実現のためには重要である。この点に関連して、大規模な地下空間の安全な避難を支援する避難距離のあり方について提案を行った。

謝辞： 本論文は、旧通商産業省工業技術院大型プロジェクト及び経常研究等、ならびに産業技術総合研究所交付金研究で実施した、地下空間等の安全利用に関連する調査研究の知見をまとめたものである。

本論文のとりまとめに当たり、懇切なる指導・鞭撻をいただいた総務省消防研究センター所長・神戸大学大学院連携大学院 室崎益輝教授、神戸大学大学院 北後明彦助教授、三谷勲教授、松下敬幸教授に深い感謝を捧げます。

引用文献

- 1) Ogata, Y. et al.: Safety measures for underground space utilization, *Tunnelling & underground space tech.*, Vol.5, No.3, pp.245-256, 1990
- 2) 室崎益輝: 防災空間としての地下利用-防災空間-, 地下空間利用シンポジウム, ISBN: 8032-55105, pp. 121-129, 1988
- 3) 地下利用の現況と災害事例研究: 地下空間にかかわる安全-防災対策に関する調査研究報告書, (社)損保協会, 1991.10
- 4) 地下空間の安全性評価研究: 地下空間にかかわる安全-防災対策に関する調査研究報告書, (社)損保協会, 1991.11
- 5) 加藤義明, 西淳二: 地下空間の行動学, 土木学会, Vol.82, pp.42-44, 1997
- 6) 地下開発利用研究センター: 災害時の地下避難施設に関する調査研究報告書, (財)エン振協, pp.1-102, 1997.3
- 7) CIE: TC 4-43 Emergency lighting in road tunnels Draft 4, 2006.2
- 8) 北海道炭鉱技術会, 九州炭鉱技術連盟 編: 坑内火災事例集, pp.249-256, 295-306, pp.167-171, 1985
- 9) 朝日新聞: 1972.11.6: 夕刊 3 版 p.1,3,10 ~ 1973.1.17: 13 版 p.1,3
- 10) 労働省: トンネル工事等における坑内火災の防止について, 基発第 418 号の 2, 1977.7.25
- 11) *Washington post*: Metro fire posed ad dilemma for rescuers., p.B01, 2000.4.22
- 12) Andersen, T. & Paaske, B. J.: Safety in railway tunnels and selection of tunnel concept, *ESReDA 23rd Seminar*, Delft Univ., Netherlands, 2002.11.18-19
- 13) 朝日新聞: 1979.3.21 13 版 p.22 ~ 1979.3.25 13 版 p.23
- 14) 労働省: 工事中の長大トンネルにおける防火安全対策について, 基発第 523 号の 2, 1979.10.22
- 15) 朝日新聞: 1979.7.12: 13 版 p.23 ~ 1979.7.26: 13 版 p.4
- 16) 東名高速日本坂トンネルの火災事故: 火災, Vol.29, No.5, pp.4-11, 1979
- 17) 森本宏: 日本坂トンネル火災事件 第 1 審判決(民事)の概要とその二, 三の問題点, 近代消防, No.7, pp.32-38, 1990
- 18) 日本坂トンネル火災判決 消防上の問題点, 近代消防, No.7, pp.47-50, 1990
- 19) 建設省: 道路トンネル非常用施設設置基準, 都府発第 14 号, 道企発第 14 号 通達, 1981.4.21
- 20) 三池炭鉱坑内火災事故調査委員会: 三池炭鉱坑内火災事故調査委員会報告書, 1984
- 21) 朝日新聞: 1984.11.16: 夕刊 3 版 p.19 ~ 1984.11.21: 夕刊 3 版 p.17
- 22) 朝日新聞: 1987.9.22: 14 版 p.31, 夕刊 4 版 p.15
- 23) Donald, I. & Canter, D.: Intentionality and fatality during the King's Cross underground fire, *European J. of Social Psychology*, Vol.22, No.3, pp.203-218, 1992
- 24) Donald, I. & Canter, D.: Behavioural aspects of the King's Cross disaster, *Fires & human behaviour* 2nd

- ed., ISBN: 1-85346-105-9, pp.15-30, David Fulton Pub., 1990
- 25) Roberts, A.F.: The King's Cross Fire: A correlation of eyewitness accounts and results of the scientific investigation, *Fire safety J.*, ISBN: 0379-7112, Vol.18, pp.105-121, 1992
- 26) 朝日新聞: 1988.7.16: 14版 p.14, 夕刊4版 p.1, p.11, 1988.7.17: 14版 p.31
- 27) 朝日新聞: 1995.2.28 大阪版夕刊, pp.1
- 28) 1996年11月18日にユーロトンネル内で発生した火災に関する内部調査, 月刊フェスク, Vol.193, No.11, pp.36-41, 1997
- 29) 日暮研二: ユーロトンネル内火災事故調査見聞記, 月刊フェスク, Vol.193, No.11, pp.33-35, 1997
- 30) BBC: Austrian tunnel fire traps drivers, <http://news.bbc.co.uk/2/hi/europe/355821.stm>, 1999.5.29, 他
- 31) Leitner, A.: The fire catastrophe in the Tauern Tunnel: experience and conclusions for the Austrian guidelines, *Tunnelling and Underground Space Technology*, Vol.16, No.3, July 2001, pp.217-223, 2001
- 32) BBC: Tunnel blaze report highlights failings, <http://news.bbc.co.uk/2/hi/europe/388904.stm>, 1999.7.8
- 33) BBC: Austria tunnel fire blamed on heater, <http://news.bbc.co.uk/2/hi/europe/1528917.stm>, 2001.9.6 他
- 34) 田中敦子(2002): 4-3 緊急時の避難者の意志決定の実情調査, NY/WTC ビルの被害拡大過程 被災者に対応に関する日米共同研究 最終調査報告書, pp.4.3 1-16
- 35) BBC: Smoke hinders Swiss tunnel rescue, <http://news.bbc.co.uk/2/hi/1617309.stm>, 2001.10.25
- 36) BBC: Dozens killed in Ukraine mine fire, <http://news.bbc.co.uk/2/hi/europe/2109140.stm>, 2002.7.5
- 37) CNN: Neglect 'caused' Ukraine mine fire, <http://edition.cnn.com/2002/WORLD/europe/07/08/ukraine/>, 2002.7.7,
- 38) 諸辰珠, 崔 崔根, 尹 明悟: 韓国大邱市地下鉄火災の惨状と今後の地下鉄対策(インタビュー), 近代消防, No.10, pp.30-35, 2003
- 39) 松下敬幸: 地下空間における避難と消防活動支援のための煙制御に関する研究, 神戸大学, 2004
- 40) Park Hyun Woo, Jun Gyu Yob & Hong Won Hwa: 大邱地下鉄火災 電動車別 生存者 移動経路分析, 慶北大学建築学科都市防災チーム 第1次調査 報告書, 2003
- 41) 朝鮮日報 japanese.chosun.com: 地下鉄惨事 2003.02.18 18:32, 他 13件
- 42) 東亜日報 japan.donga.com: 鉄道庁公務員の機転が市民救った 大邱放火火災 2003.2.19 22:37, 他
- 43) 新潟日報: 2003.5.4: 青海町鉱山で火災, 他 9件
- 44) asahi.com 社会: 2003.5.4 16:58 セメント鉱山で火災, 3人死亡8人けが, 他 2件
- 45) Sankei Web 社会: 鉱山火災で社員3名死亡 新潟, 2003.5.4, 2003.5.5, 2003.5.5
- 46) asahi.com Mytown 新潟: 「まず自主消火が裏目に 青海の鉱山火災」 2003.5.7
- 47) Goo news 共同通信: 火災でトンネル内に9人 新潟の田海鉱山, 2003.5.4 11:42, 他 3件
- 48) 五十嵐京治, 小泉耕平: 検証新潟県中部地震: トンネルで7時間 立ち往生からの大脱出記, 脱線だけじゃなかった上越新幹線, 週刊朝日, pp. 34-35, 2004.11.26
- 49) BBC: In depth London attacks, http://news.bbc.co.uk/2/hi/in_depth/uk/2005/london_explosions/default.stm, 2006.7.6
- 50) 星純也 他: 自動車トンネルを利用した排出ガス調査 - 一般道トンネルを利用した調査結果 - (III), 東京都環境科学研究所年報, pp.12-19, 2002
- 51) 水野明哲, 大久保智昭, 木谷隆之: 縦流式トンネル換気制御とその評価法, 日本機械学会講演会予稿集, Vol.75, pp.187-188, 1998
- 52) Roberts, A.F.: The king's cross fire: A correlation of eyewitness and accounts and results of the scientific investigation, *Fire Safety Science*, Vol.18, No.1, pp.105-121, 1991
- 53) 神戸市交通局 (2003): 鉄道施設の省エネルギービジョン報告書 資料編, pp.資2-7-9
- 54) 駒井武, 内野健一, 井清武弘: 坑道火災風下の気流温度分布について, 昭和61年度日本鉱業会春季大会講演集, 1989
- 55) 駒井武: 坑道火災の延焼特性と拡大防止に関する研究, 資源環境技術総合研究所報告, No.1, 1992
- 56) 山尾信一郎: 坑内火災実験における相似性とその緩和, 探鉱と保安, Vol.27, No.4, pp.17-25, 1981
- 57) Spalding, D.B.: The art of partial modelling, *Proc. 9th Int. Symp. Combustion*, pp.833-843, 1963
- 58) 日本火災学会編: 火災便覧, 共立出版, pp.500-502, 1984
- 59) 井上雅弘, 内野健一, 駒井武 他: 坑内火災における通気温度と風速変化に関する実験的研究 - 坑内火災時の通気変動に関する研究, 資源・素材学会誌, Vol.106, No.2, pp.65-70, 1990
- 60) Lee, C.K., Chaiken, R.F. & Singer, J.M.: Interaction between duct fire and ventilation flow, *Combustion science and technology*, Vol.20, pp.59-72, 1979
- 61) Tanaka, A., Imaizumi, H., Isei, T.: Travelling speed alternation of human in evacuation from underground opening space to surface, *Proc. ASIAFLAM'95*, pp. 519-524, 1995
- 62) Tanaka, A., Imaizumi, H., Isei, T.: Travelling speed alternation of human in evacuation from underground opening space to surface, *Proc. ASIAFLAM'95*, pp. 519-524, 1995
- 63) 田中敦子, 中村聡, 大澤充, 山口正義: 大深度地下空間が人間の空間把握に及ぼす影響, 土木学会地下空間シンポジウム論文報告集(審査付論文), vol. 3, pp. 43-52, 1998
- 64) Tanaka, A., Imaizumi, H., Isei, T.: Way finding in an underground space, *Proc. Human behaviour in fire*, ISBN: 1 85923 103 9, University of Ulster, vol. 1, pp. 563-572, 1998