

言 葉

土木學會誌 第十三卷第六號 昭和二年十二月

鐵道隧道の開通後に於ける換氣

(昭和二年十一月五日工學會大會土木部會講演會に於て)

會員 工學士 瀧 山 與

Ventilation of Railway Tunnels.

By Hitoshi Takiyama, C. E., Member.

内 容 梗 概

蒸氣機關車の煤烟瓦斯は隧道内の軌道材料及墨築工を侵蝕するのみならず坑内從業者の健康を脅威す、故に隧道の換氣問題は頗る重要なるも甚だ複雑なるため解決困難なり、本講演は我邦に於ける數隧道に就て從業者の保健を目標として換氣量の決定を試みんとするものなり。

Synopsis

The combustion gases of steam locomotives not only corrode the track-materials and disintegrate concrete-lining in long railway tunnels, but threaten the health of tunnel-laborers. For that reason, ventilation of a long railway tunnel is one of serious, but difficult problem presented to engineers. In this paper the writer records his attempt made to determine the quantities of fresh air necessary for providing some Japanese railway tunnels in order to safeguard the tunnel-laborers from poisonous effects of the gases.

目 次

緒 言	2
第一章 煤烟瓦斯の成分及悪瓦斯含有量	4
第二章 同上の隧道内物件に及ぼす悪影響	5
第三章 同上の隧道内従業者に及ぼす害毒及悪瓦斯許容限度	6
第四章 有害瓦斯に對抗する方策	7
第五章 隧道内空氣更新の設備	9
第六章 換氣量決定に關する諸説及慣習	10
第七章 既設隧道換氣設備	13
第八章 我邦隧道に於ける換氣量考察	13
第九章 電化後に於ける換氣	16
第十章 道路川隧道の換氣	16
附 録	
(I) Long Railway Tunnels	16
(II) Noted Railway Tunnels	17
(III) 我邦國有鐵道上の大隧道表	17

緒 言

本問題は今を去る 33 年前 (1894 年) 伊太利國有鐵道に於て重大視せられたれば 同國政府は調査委員會を組織し隧道内空氣試驗並に換氣に關する事項を研究せしめたり、當時同國の技師者 Marco Saccardo は自家創案に係る 施設の採用を乞ひしかば、之を試に Pracclia Tunnel に實施したるに其の成績良好なりしかば 委員會は Saccardo 式の有效なることを承認したり。1899 年 St. Gotthard Tunnel に換氣問題起りしが當事者は調査の末伊太利式を採擇したり。又 1907 年 埴地利政府は本問題に關する調査委員會を設けて研究を遂げたる後これも亦伊太利式を採用することに決したり。英吉利にありては 1897 年 商務局は倫敦地下鐵道内の空氣状態を改善すべき計畫を樹立するため委員會を組織したり。又北米合衆國にては 1901 年以降十數箇所に Saccardo 式に近似する設備を實施したり。

我邦に於ても鐵道省當局者は本問題研究の急務なることを認め、技師張忠一氏 (化學者) 及同加藤恭氏 (藥學者) をして化學及衛生の兩方面より三、四の隧道に就て精査せしめつゝあり、又東山隧道にては近く換氣機の運轉を見んとす。

本問題は元來土木、化學及衛生 3 學者の協同研究を遂ぐべき性質のものなり。張及加藤兩技師は既に各専門的見地より調査を進めつゝあることなれば土木技術者も亦之に賛同し協力

せられんことを希ふて止まず。講演者（以下單に演者と記す）は本問題に關し淺薄なる知識を有するに過ぎざれども若し諸賢の感興を惹きて研究を煩はすことを得ば斯學のため欣幸なるを思ひて講演題目に撰擇したり。本講演をなすに當り下記文献を参照したり、又下叙の通りの略字を用ひたり。

文 献

- (1) Simms, Practical Tunneling, 1896.
- (2) Lucas, Der Tunnel, 1920.
- (3) Handbuch der Ingenieur-wissenschaften I Bd., V Abt., 1902.
- (4) Schubert, Lüftung in Tunnel-bau, 1912.
- (5) Weyl's Handbuch der Hygiene VII, 1914.
- (6) Treasure Department U.S. Public Health Service, Carbon-monoxide Literature, 1925.
- (7) Bulletin of International Railway Congress, 1899—" Ventilation of Tunnel on Saccardo's System".
- (8) " " " " " " 1910—" On Question of long Railway Tunnels".
- (9) Handbuch für Eisenbeton-bau VII Bd., 1912.
- (10) Engineering News-Record, June 21, 1917. " Railway-tunnel Concrete Softened by Locomotive Gases".
- (11) Minute of Proceeding of Institution of Civil Engineers Vol. CC., 1915.
- (12) " " " " " " Vol. XLIX, 1876.
- (13) " " " " " " Vol. C XXXVI, 1899.
- (14) 鐵道省業務研究資料 14 卷 3 號技師張忠一「逢坂山隧道内コンクリート、モルタル及軌條に就て」
- (15) " " 15 卷 4 號技師加藤恭「善知鳥、小佛隧道内空氣試験」
- (16) 同省工務局第二回保線講話會記錄技手安藤眞齋夫「逢坂山隧道内軌道保修」
- (17) 同省業務研究資料 14 卷 6 號技師加藤恭「自家考案の空氣マスクに就て」
- (18) Journal of the American Society of Heating & Ventilating Engineers, Vol. 32, 1926.

人名略字

Lehmann	Prof. Dr. K. Lehmann
Sayers	R. R. Sayers
Yaut	W. R. Yaut
Fox	Francis Fox

其 他

cbm.	立方米	kg.	斤	min.	分
Cu ft.	立方呎	km.	吉米	m.	米
ft.	呎	Ltr.	立	qm.	平方米
gal.	米ガロン	lb. lbs.	封度	sec.	秒
hr.	時間	mg.	ミリ瓦	T.	隧道
H.P.	馬力	mi.	哩	yd. yds.	碼

第一章 煤烟瓦斯の成分及悪瓦斯含有量

蒸氣機關車の使用する燃料は石炭、骸炭及鑛油の 3 種なれども一般的に使用せらるゝは石炭なり、而して機關車の運轉に當り其の燃焼する石炭は空氣中より O₂ を奪ひて CO₂、CO 及 SO₂ を生成す、又機關及煙筒より排泄する水蒸氣は氣温並に氣濕を高む、かくて隧道内を運轉する機關車は雰圍氣狀態と化學的並に物理的に悪化する。

煤烟瓦斯中に存する悪瓦斯の含有量は石炭の品質並に燃焼の完全或は不完全によりて相異なること勿論のことなれば之を文献に徴するも區々なり。

文 献	石炭 1 kg. の燃焼瓦斯中に含まるゝ悪瓦斯容積 cbm.		
	CO ₂	CO	SO ₂
Fox (13)	1.811		
Simms (1)	1.573		0.009
Lucas (2)	1.665		

Lucas (2) に據るに「重量 1 kg. の C は其の燃焼に際し殆んど不變的に CO₂ 及 CO 1.85 cbm. を生成す」我邦の石炭は重量に於て C の 75% を含むものと考へ得るが故にその 1 kg. の燃焼に當り CO₂ 及 CO 1.85×0.75=1.4 cbm. を發生すと見做すことを得。

燃焼瓦斯中の悪瓦斯 CO₂、CO 及 SO₂ は相互に一定の比率を保つものなり (3) と雖も CO₂ は容易に隧道内湧水に溶解し又 SO₂ は不安定のものなれば SO₃ を組成し疊築コンクリート及セメント工に凝着するが故に上記比率は不變的のものにあらず、各所に於て調査せし容積比率を一表に收むれば次の如し。

調 査 箇 所	CO / CO ₂ %	SO ₂ / CO ₂ %	文 献
Paris-Lyon-Mediterranean Ry.	9.7	—	(3)
Pracchia T.	19.8	—	
Mont Cenis T.	2.9	—	
Metropolitan District Ry.	77.0	2.3	(4)
Arlberg T.	11.2	—	
East Rys, France	200.0	—	(8)

上表中 SO₂ は煙突内に於ては CO₂ の 4.3% に相當するも其の 内約半数は過熱蒸氣に觸れて H₂SO₄ を組成す、故に瓦斯体として殘留するものは 2.3% に過ぎずと言ふ。

演者は今年 5 月東山隧道内山科口より延長約 1/3 奥の地點に於て貨物列車通過の直前と直後とに地上 4 ft 呼吸帶の空氣 7 Ltr. を採集し之を分析したる結果より推すに $\frac{CO}{CO_2} = 140\%$ 又 $\frac{SO_2}{CO_2} = 9\%$ なり、此の比率問題は 今後幾度の 實驗を重ねて 正確を期すべきも今假りに之を是認して石炭 1 kg. の燃焼に依りて生成せらるゝ悪瓦斯の容積を推定するに次の如くなる。

	CO ₂	$1.4 \div \left(1 + \frac{140}{1000}\right) =$	1.23 cbm.
	CO	$1.23 \times 0.014 =$	0.17 "
	計		1.40 "
外に	SO ₂	$1.23 \times 0.009 =$	0.01 "

第二章 煤烟瓦斯の隧道内物件に及ぼす悪影響

(I) 軌條及附屬品

煤烟瓦斯中に含まるゝ SO₂ は SO₃ を組成し水に會するときは更に H₂SO₄ を生成す、湧水に富む隧道にありては H₂SO₄ の道床及枕木を濕潤する結果軌條及附屬品は著しく侵蝕せらるゝものなり、猶軌頭に附着する濕脂は軌頭と働輪間の摩擦を減殺するが故に上り勾配線にありては機關車より屢々撒砂を行ふ必要あり、かくて軌頭上の砂粒は車輪の通過に際し軌頭を研磨す、又下り勾配線に於ては車輪の制動機に阻まれて回轉を止め軌頭上を滑走する場合あり、此の際も亦同じく軌頭を磨滅す。かくの如くにして隧道内軌條は化學的及物理的兩方面の作用を受け其の保存期限を短縮するものなり、我邦隧道の内敷設軌條の短命なるものを求むるに下記 3 隧道を以てその最とす。

隧道名	最初の敷設期	更換回数	軌條重量 lb./yd	平均壽命
小 佛	明治 33-10	4	2 回 60	年 5月 6-0
			2 回 75	
善知鳥	" 39-5	3	1 回 60	7-1
			2 回 75	
逢坂山	大正 10-8	2	2 回 75	2-10
			現在 100	

逢坂山 T. 上り線軌條大正 13 年 9 月更換品の磨滅及腐蝕状態は下表 (16) の如く枕木上は枕木中間に比し其の程度大なり。

敷設箇所	山 科 寄		大 津 寄	
	枕木中間	枕木上	枕木中間	枕木上
軌條断面測定位置				
軌頭磨滅	21.4 %	26.9 %	24.8 %	27.2 %
軌底腐蝕	11.8	44.1	7.3	20.6
磨滅及腐蝕の全面積に對する割合	18.4	30.6	13.6	23.9
通過荷重噸數	24 593 000			

又同 T. 内軌條附屬品の 1 箇年間 1 mi. 當り平均使用高は次表 (16) の通り隧道外に比し遙かに多數なり。

品 名	隧道内	隧道外
繼 目 板	112 枚	15
同上用ホールド	148 個	65
ロック・ナット・ワッシャ	634 "	241

(II) 鑿築コンクリート及モルタル工

ポルトランド・セメントは CO_2 を含む水に遇ふときは炭酸カルシウム CaCO_3 を形成す若し CO_2 の量過剰なるときは炭酸水素カルシウム $\text{CaH}_2(\text{CO}_3)_2$ を生ず、前者は水中に沈澱するも後者は水に溶解す。

又 SO_2 のセメントに作用するときは硫酸カルシウム CaSO_4 を形成す、此の化合物は水に溶解す。Cascade T. (10) は 1899 年竣工せしも其の後上記の通り CO_2 及 SO_2 の作用を受け 1915 年には修理の必要に迫られたり、我逢坂山 T. (14) にても現に此の作用を受け毀損せられつゝあり。

第三章 煤烟瓦斯の隧道内従業者に及ぼす害毒及悪瓦斯許容限度

(I) 害毒

CO_2 、 CO 及 SO_2 の人體に及ぼす害毒は體驗者の當該瓦斯に其の體軀を曝露する時間の長短並に其の間に於ける實驗者の動作に依り多寡の差違あり、假令機關車乗務員の如く短時間にして悪瓦斯より逃れ得る者が耐へ得る程度の含有率と雖も長時間に亘りて勞働する保線従業者には頗る有害なることあり、故に許容限度に關しては乗務員と保線員とを別個に考へて之を決定するの必要あり。但し乗務員は機關車キャブ内にありて高温に惱まざるゝが故に高温の悪瓦斯害毒を促進する點 (6) をも顧慮せざるべからず。

(a) CO_2 は無色無臭にして比重 1.529、能く水に溶解す、其の害毒は下記兩瓦斯ほど劇甚ならず、從來 CO_2 の空氣中に於ける含有率 7% に達すれば其の空氣の既に汚染したるが如く喘へらるゝ所以は CO_2 自身の有毒なるを言ふにあらずして O_2 の缺乏又は他悪瓦斯の伴隨すること多きに依る。

(b) CO は無色無臭にして其の比重は空氣と略同じく 0.967、水には溶解せず。此の瓦斯の頗る危險視せらるゝは血球ヘモグロビンとの親和力の O_2 に比して遙かに強くヘモグロビンの酸化を阻止するに依る。此の瓦斯の含有率 1.6~2.4% の空氣中に 1/2~1 hr. 間滯留するときは即死するか又は事後死亡す (5) と言ふ。

(c) SO_2 は水氣を含まざるとき無色にして刺激性臭氣を有す、比重 2.260 含有率低き場合と雖も呼吸器官及粘膜を毀損す、空氣中含有率僅かに 0.5~0.6% の時と雖も即死又は事後死亡を惹起す (5)。

(II) 許容限度

Lehmann は悪瓦斯の曝露時間と許容限度との關係に就て詳細なる調査 (5) をなし、又 Sayers 及 Yant は CO 含有率と中毒症狀に關して精査を遂げて 1923 年之を發表 (6) したり。今演者は乗務員に對しては 1 hr. 間又保線員に對しては 6 hrs. 間當該瓦斯中にて従業

するも何等中毒症を惹起すことなきことを要約とし、前記醫家の報告を根據とし猶之に安全を加味して許容限度を下表の通り決定せんと欲す。

瓦斯名	乗務員	保線員	根據
CO ₂	30 %	10 %	(5)
CO	0.3	0.2	(6)
SO ₂	0.06	0.02	(5)

鐵道技師加藤恭氏は大正 4 年 10 月小佛 T. 及善知鳥 T. に就て空氣試驗を行へり(15)。檢體の採集は補助機關車を備ふる貨物列車の通過時を撰び本務及補助機關車のキヤブ内並に該列車通過直後路面上 13 ft. の中央高所と呼吸帶との 2 箇所に於て之を行へり。演者は本年 6 月東山 T. 内呼吸帶に於て列車通過直後空氣採集をなして之を分析したり、之を加藤氏報告と合せて一表に收め上記許容限度と對照するに次の如し。但し加藤氏の分は小佛 6 回、善知鳥 3 回の平均數を掲ぐ。(單位 %)

隧道名	機關車キヤブ						坑内列車通過直後					
	本務			補助			上部			呼吸帶		
	CO ₂	CO	SO ₂	C ₂ O	CO	SO ₂	CO ₂	CO	SO ₂	CO ₂	CO	SO ₂
小佛	3.68	(0.660)	<u>0.023</u>	6.58	(0.952)	<u>0.039</u>	9.98	(1.068)	<u>0.032</u>	8.61	(1.347)	(0.067)
善知鳥	3.27	(0.745)	<u>0.023</u>	5.85	(1.031)	<u>0.037</u>	8.62	(1.125)	0.016	7.68	(0.829)	0.014
東山	列車第 416 號										2.232	(0.718)
	" 555 號										4.120	(0.740)

備考 () を付するは保線員には元より乗務員にも有害なり、然れども即死又は事後死亡に値するものは絶無なり、又數字下に — を添ふるものは乗務員には無害なれども保線員には有害のものなり。

列車の隧道通過中又は直後に採集する空氣中には當該列車牽引機關車の排出する惡瓦斯の外に通過前既に蓄積せるものをも含有するが故に上表の如く高率を示すなり。演者が列車通過前換言すれば常時に於ける空氣状態を知らんと欲し東山 T. 内より採集したる空氣の分析表は次の如し(單位 %)。

採集の日時	採集地點	CO ₂	CO	SO ₂	O ₂	備考
昭和 2-5-23 後 2 時	山科口より延長約 1/3 處	1.136	<u>0.068</u>	<u>0.022</u>	202.9	大氣中に含まるゝ O ₂ -209.5
" " 6-21 後 1 時		0.430	0.012	0.012	202.9	CO ₂ - 0.3 ⁽⁴⁾

備考 數字下に — を添ふるは保線員に有害なり、

之を要するに最後に掲記する 2 表は換氣施設の急需なることを雄辯に物語るものなり。

第四章 有害瓦斯に對抗する方策

(I) 軌條及附屬品

鐵道技師張忠一氏 (14) は下記 3 箇條の對策を提議したり。

- (a) 毎日 1~2 回極微量アルカリ (2% 位) の水を列車中のタンクより流下して軌條を潤すこと
- (b) 機關車の火床の手入に注意し隧道内に於ける飛塵の量を少なからしむること
- (c) 軌條と枕木との間に亜鉛板のタイプレートを敷くこと

東山 T. には此の提言を容れ大正 15 年 9 月以降、清水 150 gal. に曹達灰 75 lbs. の割合を以て混淆したる液體を毎日 2 回機關車より軌條頭に注下しつゝあり。次に坑内にては火床の塵灰を落下せず又 8 in. 角にして厚さ 1 mm., 1½ mm. 及 3 mm. なる 3 種の亜鉛板をタイプレートとして實驗中なり。猶大正 15 年 1 月以來撒砂式ブレーキの代りに水を軌頭に滴下するウォーター・ブレーキを採用す、演者は上記以外に下記 1 項を追加す。

兩頭軌條を敷設して軌底と道床との間隔を大にしチェアーに亜鉛板をウエルドし亜鉛板の浸蝕し盡さるゝ以前に新品と更換すること、但しタイプレートとして使用せず、何となればチェアー下に敷くときは之れが取換不便なればなり。

獨逸鐵道工事示方書中には「延長の大なる隧道内に敷設する軌條には豫めコールタールを塗抹すべし」と記載す。

(II) コンクリート及モルタル工

張鐵道技師は下記 3 項を案出したたり (14)。

- (a) 水の浸潤する處ありて煉瓦を用ふる場合は表面 1 枚丈け水の浸透性なきものを用ふること
- (b) メヂは總て表面より少なくとも 1 in. はアスファルト・モルタルを用ふること
- (c) コンクリート・ブロックを用ふる時は前以てアスファルト等にて處理し防水性を與ふること (未研究)

演者は下記 1 項を追加す。

コンクリート・ブロックの表面に表はるゝ一面に豫めオイル・ペイントを塗布すること

(III) 機關車乗務員

往年奧地利國道鐵道 (2) に於て機關車内にターボ・ブローワーを据付け之に接続する吸入管を機關車床板を貫きて低く垂下せしめ其の下端に濾過器を取付く、而して同器内は石灰水を以て浸潤せる纖維素を包容す、又ブローワーに連結する放出管をキャブ屋根裏に達せしめ其の上端を喇叭形となす、かくて機關車汽籠より導ける蒸氣を以てブローワーを回轉すれば隧道底部の空氣は吸入管先端より吸込まれ濾過器通過中煤塵及 CO₂ を失ひて淨化せられ上方よりキャブ内に流出することゝなしたり、其の空氣量は 20~40 cbm./min. にして此の施設は乗務員の苦難を救ふに適當なりき。

加藤鐵道技師は大正 13 年乗務員を救濟する目的を以て空氣マスクを案出したたり、其の綱領

は機關車の常備する壓搾空氣を利用し其の壓力を低下する外、濾過器を經由せしめて淨化したる空氣を乗務員の顔面に假裝するマスク内に注入して従業者をして清涼の感を抱かしむると共に清氣を供給するにあり。此の考案の骨子は往年壞地利に於て實施せられたるものと偶然同一の概念より發露したるも乗務員各自に清氣を供給する點に於て彼よりは進歩し且優良のものなり。マスクはアルミニウム製楕圓形にして前面をプリズム形とし其の上部に板子眼鏡板を挿入す、ゴム製帶を以て後頭部に締付くるときは顔面に接觸する箇所にゴム管パッキングを附着するが故にエア・タイトとなる、而してマスク上部には空氣の進入口又下部には排出口を備ふ、又一方機關車のエア・リシーバーより銅管を以て壓氣を第二リシーバー、次で濾過器を経てキャブ後部の天井裏に取付けられたる小リシーバーに導く、壓氣は此の道程中共の壓力を失ひ且淨化せらるゝなり、小リシーバーには數個の活栓を備へ之とマスクの空氣注入口とをゴム管を以て連結す、此のゴム管は相當長きが故にキャブ内にて動作する機關助手を拘束することなし。

(IV) 保線従業者

酸素呼吸器を各人に背負はしむる方法あれども經費の點に於て實用的ならず、次章に於て述ぶる大規模の換氣施設を實施する迄は有害瓦斯除マスクを使用する以外に良策なし。

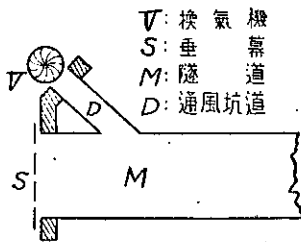
第五章 隧道内空氣更新の設備

換氣施設の諸様式を列擧すれば次の如し。

(a) 堅坑を穿ちて坑内の自然通風を促す法

此の法は堅坑の頂上と坑底との氣壓差及び溫度差を利用して通風を促進せんことを期するも不確實のものなり、又交通頻繁なる隧道にありては自然通氣のみにては不充分なり、猶唯通氣の目的を以て長き堅坑を開掘するには多額の建設費を要す。Sewern Tunnel 及 Mersey Tunnel にては最初此の方法を採用せしも不成績なりしかば堅坑の下部に換氣機を据付けて坑内空氣を吸出すことに改めたり。

第一圖



(b) 可動性垂幕法

隧道片口に接して通風坑道 D を穿ち其の坑口に換氣機 V を据付く、本隧道 M の坑門口には垂幕 S を吊下して坑口を閉塞し V を運轉して大氣を D を經て本隧道内に吸込むか或は逆に隧道内汚氣を D を通じて坑外に吸出す方法なり。Simplon T. 及 Loetschberg T. には此の設備を有す。

(c) サツカドー式

伊太利の Marco Saccardo の考案に係る大體の原理は次の如し。

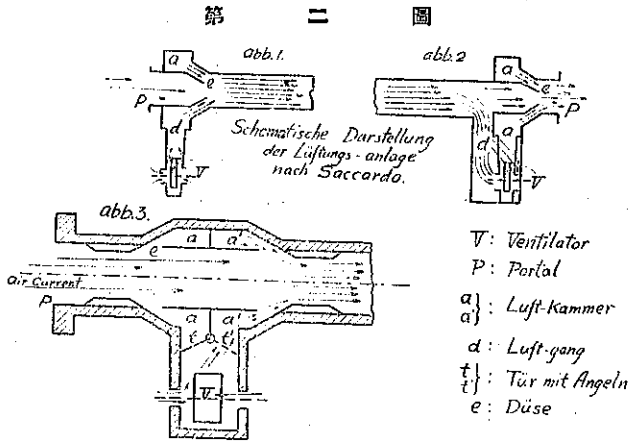


Abb. 1 は吹込法 (Plenum Method) を示す、即ち大氣は V より d を經て a に入りこれより e を過ぎて隧道内に注入す。

Abb. 2 は吸出法 (Vacuum Method) を示す、即ち隧道内汚氣は d より V に至り次に a に入り更に e を通して隧道に進入し終に坑外に押出さるゝなり。Abb. 3 は蝶番を備ふる門扉を t 又は t' の

位置に變換することにより、或時は吹込法、他の時には吸出法となる。即ち吹込及吹出兩法を兼備する施設なり。

第六章 換氣量決定に關する諸説及慣習

(a) Fox 説 (12)

「石炭 1 lb. の燃焼瓦斯中に存する悪瓦斯容量は 29 Cu. ft. (1 kg. に付き 1.811 cbm.) なり。而して悪瓦斯の許容限度を 2/10 000 と見做すべし、然るときは石炭 1 lb. より發生する悪瓦斯を人體に無害なる程度まで緩和するに必要な空氣量は $29 \div \frac{2}{10\,000} = 14\,500$ Cu. ft. なり、茲に延長 1 mi. の複線型隧道あり、機關車の此の區間を走行中消費する石炭量を 32 lbs (9.0 kg./km.)、又 5 mins. 間に上下各 1 回の列車の通過するものと假定するときは所要換氣量は $\frac{32 \times 14\,500}{2.5} = 185\,600$ Cu. ft./min. となる」

Severn T. 及 Mercey T. は此の計算法に依り空氣量を定めたり。

(b) 伊太利國有鐵道の隧道換氣施設調査委員會 (7)

委員會は 1894 年 Pracchia T. に就て調査したる結果下記の如き意見を發表したり。
「空氣中に存在する炭酸瓦斯の含有率を以て空氣状態良否を定むる規準となすときは 4%—良好, 7%—中位, 11%—汚濁と 3 種に別つことを得、而して旅客列車に對しては 3%, 鐵道従事員のみ乗車する貨物列車に對しては 6% 以下となすことを目標として換氣量を決定すべきなり」演者曰く此の當時は列車内旅客の苦惱輕減を目的となしたり。

(c) Simms 説 (1)

「機關車 1 mi. 運轉に當り消費する石炭量は 35 lbs. (9.9 kg./km.) なり、而して之が燃焼により發生する瓦斯の成分は次の如し。

瓦斯名	常氣壓 62°F 時に於ける容積 Cu. ft.
CO ₂	25.2
H ₂ O (瓦斯状態)	9.5
SO ₂	0.15
N ₂	115.29
	150.14 之を 150 と見做す

之を以て見るに隧道内 1 mi. 走行に當り放出する 燃燒瓦斯は容積に於て 150 × 35 = 5 250 Cu. ft. にして隧道延長 1 ft. 當り約 1 Cu. ft. に該當す。複線型隧道の断面は 473 sq. ft. なれば延長 1 ft. の空氣容積は 473 Cu.ft. なり。

次に機關車より排泄する水蒸氣は石炭 1 lb. に付き 224 Cu. ft. なり、此の水蒸氣の空氣又は他瓦斯中に傳播することなく且凝固することなしと假定すれば隧道延長 1 mi. 間に蓄積する容積は 35 × 224 = 7 840 Cu. ft. にして延長 1 ft. 當り 1.5 Cu. ft. なり。

上記條件の下に隧道内に 1 列車の運轉し通風の絶無なる場合を考ふるに坑内空氣に混合する瓦斯量は次の如し。

隧道内瓦斯名	容 積 Cu. ft.	
	每 呎	每 哩
空 氣	473	2 497 440
燃 燒 瓦 斯	約 1	5 250
水 蒸 氣	約 1.5	7 840
	2.5	13 090

かくて燃燒瓦斯と水蒸氣とを合せ隧道延長 1 ft. 當り 2.5 Cu. ft. となり、隧道内空氣量の 0.5% に相當す。而して 1 hr. 間に運轉する列車回数に應じて燃燒瓦斯及水蒸氣の蓄積する状態は次表の如し。

1 hr. 間列車回数	隧道 1 mi. の 空 氣 量 cu. ft.	隧道 1 mi. 内に 1 min. 間に蓄積せらるゝ 燃 燒 瓦 斯 及 水 蒸 氣	
		常氣壓 62°F 時容積 $\frac{13\ 090 \times 2}{60} = 438$	隧道内空氣量に對する比率
2	約 2 500 000		1/5 708
4	"	876	1/2 854
8	"	1 752	1/1 427
16	"	3 504	1/713
32	"	7 008	1/356

CO₂ の許容限度を $\frac{15}{10\ 000}$ と定む、然るに大氣中には常時 CO₂ の平均 $\frac{3.5}{10\ 000}$ を含む

又 CO₂ は燃燒瓦斯の 1/6 を占むるが故に燃燒瓦斯全體に對する許容限度は $\frac{11.5 \times 6}{10\ 000} =$

$\frac{69}{10\ 000} \div \frac{70}{10\ 000}$ となる、猶水蒸氣を考慮の中に入るゝときは $\frac{2.5 \times 70}{10\ 000} = \frac{175}{10\ 000} = \frac{1}{57}$

は限度なり。

上記より隧道内空気の更新を必要とする時間其の他を求むるに次表の如し。

1 時間内列車回数	隧道内汚氣の更新を要する時間 min.	換氣の風速	
		ft./min.	mi./hr.
2	$\frac{1}{57} \div \frac{1}{5708} = 100$	52.8	0.6
4	50	105.6	1.2
8	25	211.2	2.4
16	12.5	422.4	4.8
32	6.25	844.8	9.6

(d) Lucas 説 (2)

「良質の石炭は其の成分中に C-90% を含有す、而して C 1 kg. の燃焼に當りて殆んど不變的に CO₂ 及 CO 1.85 cbm. を組成するが故に石炭 1 kg. の燃焼瓦斯中に存在する CO₂ 及 CO の容量は 1.85 × .9 = 1.665 cbm. なり。

- 今 K : 機關車 1 m 走行中に燃盡する石炭量 kg.
 S : 隧道の斷面積 qm.
 V : 列車速度 m./sec.
 N : 自然と人爲的とを問はず隧道内氣流の速度 m./sec.
 ψ : 隧道内空氣中 CO₂ 及 CO 含有率

とするに

$$\text{氣流と列車と方向の同一なるとき} \quad \psi = \frac{1.665 KV}{S(V-N)}$$

$$\text{同 上の反對なるとき} \quad \psi = \frac{1.665 KV}{S(V+N)}$$

$$N=0 \text{ 即ち氣流なき場合} \quad \psi = \frac{1.665 K}{S}$$

而して ψ を人體に無害の程度迄低下するに足る空氣量を隧道外より坑内に供給すべきなり。

(e) 慣 習

歐羅巴にては坑内氣流の自然或は人爲的たるを論ぜず速度 3 m./sec. 以上の氣流あるときは坑内空氣状態は良好なりとせらる。若し人爲的氣流と方向を異にする自然通風ある場合には之を驅逐して所期の風速を得る必要あれば最近建設せられたる Plenum method に依る施設は坑内風速を 5 m./sec. とし換氣量を算出す、墺地利の Revoltotte T. 及 Düssen T. は此の實例なり。

北米合衆國にありては前記 Fox と同様の見地より續行列車間の最小時分内に坑内空氣を一新することを目標として換氣量を決定す。

第七章 既設隧道換氣設備

(I) 歐羅巴 (2)

隧道名	延長 m.	隧道型	換氣方式	換氣量 cbm./min.	氣流速度 m./sec.	動力 IP
Simplon (瑞)	19 804	單線型	垂幕吹込又は吸出	3 000	3	200
Pracchia (伊)	2 727		Saccardo 吹込	6 900~9 800	3~4	140
Piteccio (〃)	1 778		〃 吸出	5 000	3.5	170
Sella (〃)	1 080		〃 吹込	6 000	3	100
Mercey (英)	3 420	〃	堅坑吸出	22 000	0.5~1.0	150~200
Severn (〃)	7 000		〃	11 000	2.0~2.5	90~120
St. Gotthard (瑞)	14 984	複線型	Saccardo 吹込	19 000~23 000	3~5.5	450~800
Cochem (獨)	4 203		〃	7 000~13 000	2.5~3.5	180~520
Azweiler (〃)	2 623		〃	5 000~8 000	2~3.5	100~150
Tauern (奥)	8 551		〃	14 000	5	960
Ronco (伊)	8 300		〃 吹込又は吸出	13 000	4	350

(II) 北米合衆國 (11)

隧道名	延長 ft.	隧道型	斷面積 sq. ft.	換氣量 Cu. ft./min.	氣流速度 ft./min.	坑内空氣の一新する時間 min.
Elkhorn	3 000	單線型	235	400 000	1 700	1.8
Allegany	5 148		369	590 000	1 600	3.2
Mullan	3 899		283	550 000	1 940	2.0
Horse Shoe	3 291		300	540 000	1 800	1.8
Stampede	9 844		310	〃	1 740	5.7
Weehawken	4 335	複線型	469	512 000	1 090	4.0
Baltimore & Potomac	4 963		432	500 000	1 154	4.3

備考 (II) に於ける氣流速度は一般に (I) のそれよりも大なり、Mullan T. の如きは 9.7 m./sec. に達す。

第八章 我邦隧道に於ける換氣量考察

(1) 悪瓦斯中 CO 最も有害なり。

燃焼瓦斯中に存在する悪瓦斯の含有率と許容限度との關係より緩和用空氣量は何瓦斯を目標として決定すべきやの問題は次表より容易に解決せらるべし。

瓦斯名	石炭 1 kg. の燃焼 瓦斯中に含まるゝ 容積 cbm.	保線員に對す る許容限度 (%)	大氣中に含ま るゝ含有率 (%)	緩和用空氣 量計算式	緩和用 空氣量 cbm.	空氣量比率
CO ₂	1.23	10.0	0.3	$\frac{1.23 \times 1000}{10 - 0.3}$	127	約 1/7
CO	0.17	0.2	0	$\frac{0.17 \times 1000}{0.2}$	850	1
SO ₂	0.01	0.02	0	$\frac{0.01 \times 1000}{0.02}$	500	1/1.7

上表の通り CO 緩和用空氣最も多量なれば以下 CO のみを問題とすべし。

(2) 公式

茲に下記符號を用ふ。

K : 機關車消費量 kg./m.

C : 石炭 1 kg. の燃焼瓦斯中に含まるゝ CO 容積 cbm.

S : 隧道斷面積 gm.

V : 列車速度 m./sec.

N : 隧道内換氣速度 m./sec.

θ : 隧道内空氣中に含まるゝ CO 含有率

α : CO 許容限度

M : 換氣量 cbm./sec.

とするときは

$$\theta = \frac{CKV}{S(V \pm N)} \quad \begin{array}{l} \text{但し} \quad \text{通風と列車と同一方向の時} + \\ \text{同} \quad \quad \text{上反對方向の時} - \end{array}$$

上式の N が - 符號を有する場合は空氣状態不良にして極端の場合即ち $V=N$ のときは $\theta = \infty$ となる、換氣設備を施さんとする以上は列車と同方向の通風を許すべきにあらず、故に公式としては + 符號のみを採り次の如くす。

$$\theta = \frac{CKV}{S(V+N)} \quad \text{但し} \quad N=0 \quad \text{即ち無風時は} \quad \theta' = \frac{CK}{S}$$

M を隧道内に注入するときは M は SV と合同して θ' を α 迄低下す。

$$\alpha(M+SV) = \theta'SV$$

$$\text{故に} \quad M = SV \left(\frac{\theta'}{\alpha} - 1 \right)$$

$$= V \left(\frac{CK}{\alpha} - S \right)$$

$$\text{又} \quad N = V \left(\frac{\theta}{\alpha} - 1 \right)$$

今例を逢坂山 T. ($S=24 \text{ qm}$, 勾配 $\frac{1}{100}$) に取り M を求めんとするに V 及 K は次表の如き値を有す。

列車種別	$V \text{ m./sec.}$	$K \text{ kg./m. (2)}$
地方旅客	7.4	.027
特急 "	8.4	.040
地方貨物	5.2	.053

又 $C=0.17 \text{ cbm.}$ 及 $\alpha=0.2\%$ (前項) として M を計算するに次表の如くなる。

列車種別	$M \text{ cbm./sec.}$	備考
地方旅客	0	換氣の必要なし
特急 "	3.78	
地方貨物	4.68	

多くの場合に於て地方貨物列車のみを問題とすれば可なり。

(3) 勾配 1/100 及 1/40 勾配中にある隧道に於ける K, S 及び V の値

(a) K

機關車の石炭消費量 kg./m. は次の如し。

勾配	區間	區間中に介在する隧道	機關車形式			2 臺連結の貨物列車に於ける計
			18 900	9 600	2 120	
$\frac{1}{40}$	八王子—猿橋	小佛	—	.045	.034	.079
		善知鳥	—	.043	.033	.076
$\frac{1}{100}$	大津—京都	逢坂山	.040			之を .080 と見做す

(b) S

隧道名	$S \text{ qm. (バラスト上面以上)}$	備考
小佛及善知鳥其他中央線一般の隧道 (大正 4 年 4 月逢坂山)	18.2	之を 18.0 と見做す
東山	23.6	" 24.0 "
逢坂山	24.3	

(c) V (貨物列車)

隧道名	$V \text{ m./sec.}$	備考
小佛, 善知鳥	5.0	逢坂山は勾配 1/100 又東山は 1/150 なれども同様に見做せり
逢坂山, 東山	5.2	

(4) 換氣量

線名	θ'	$M \text{ cbm./sec.}$	$N \text{ m./sec.}$	備考
中央本線	0.75/1 000	248.0	13.8	θ' を第三章 (II) と對照し θ' の方小なるは彼は先行列車の悪瓦斯の蓄積するためなり
東海道本線	0.28/1 000	50.0	2.1	

(5) 東山隧道換氣設備

東山 T. は 1/150 勾配中にありて山科口高く京都口低し、上り線隧道は本來なれば公式の $V+N$ を大にする必要上山科口に設備を施し同坑口より京都に向ひ吹き下ぐべき管なれども京都口坑門上部並にアプローチ切取上は住宅地域なれば同坑口より煤煙を噴出せしむることを得ず、止むなく京都口より山科方面へ吹上ぐることをなしたれば列車通過の直前に送風を中止し列車の坑内通過後再び換氣機を運轉することを要す、而して假りに $N=3$ m./sec. とすれば同隧道内空氣は 622 sec. (1 866 m. ÷ 3) 即ち 1 min.-32 sec. 毎に一新せらるゝこととなる。

第九章 電化後に於ける換氣

電氣機關車を運轉する隧道と雖も延長の犬にして湧水に富むものは換氣の必要あり、何となればかゝる隧道内空氣は氣濕高く水氣を以て殆んど飽和せらる、而してかゝる不良なる雰圍氣中に長時間勞働する保線員の保健上より比較的濕度の低き清氣を坑内に注入して彼等を心持よく作業せしむれば勞働能率の點よりするも有效なればなり。Loetschberg T. は開通最初より電氣運轉をなすも猶 2 m./sec. の氣流を人為的に作りつつあり、我邦の隧道は坑内氣温一般に高からざるが故に換氣速度 1.5 m./sec. 程度にて充分なるべし。

第十章 道路用隧道の換氣

紐育市とニュー・ジャセー市とを連絡するハドソン河底 Vehicular T. 延長 8 463 ft. の換氣問題に關する調査委員會は最近其の研究を終へて報告書を公表 (18) したり。之に依るに「自動車の運轉に當りガソリン 1 gal. の消費毎に發生する CO の容積は 62.2 Cu ft. なり、而して平坦道路を 10 mi./hr. の速度を以て走行する場合はガソリンの消費量 0.0233 gal./min. なり、故に自動車の上記速力を以て運轉するとき CO の放散容量は 1.5 Cu ft./min. なり、次に隧道内通過時間 10 min. 程度なれば CO の許容限度を 0.4% まで高めたり。(終)

附 録

(I) Long Railway Tunnels.

Name	Country	Single or Double track	Length miles	Constructed	Line
Simplon 1st 2nd	Suisse	2-S	12.26 12.32	1895-1906 1913-1918	Brig-Genoa
Isoverde	Italy	S	12.08	1907-1911	Genoa-Milano
Montepiano	"	S	11.58	1906-1912	Florence-Bologna
St. Gotthard	Suisse	D	9.14	1872-1882	Luzern-Milano
Lötschberg	"	D	9.08	1907-1913	Bern-Brig
Mont Cenis	France	D	7.98	1857-1811	Turin-Lyon
New Cascade	U.S.A.	D	7.79	1923—	Great Northern
Arlberg	Austria	D	6.36	1880-1885	Buchs-Innsbruck

Name	Country	Single or Double track	Length miles	Constructed	Line
Moffatt	U.S.A.	D	6.09	1923—	
Shimizu	Japan	S	6.00	1922—	Takasaki-Nagaoka
Ricken	Suisse	S	5.34	1904-1908	Uznach-Wattwil
Grenchenberg	"	S	5.30	1911-1915	Munster-Grenchen
Tauern	Austria	D	5.29	1901-1908	Salzburg-Klagenfurt
Ronco	Italy	D	5.16	1882-1889	Genoa-Milano
Hauenstein-basis	Austria	D	5.05	1912-1916	Tecknan-Olten
Colde-Tende	Italy	D	5.03	1890-1899	Cumo-Ventimiglia
Connaught (Rogers Pass)	Canada	D	4.91	1913-1915	Canadian Pacific

(II) Noted Railway Tunnels.

Country	Name	Single or Double track	Length miles	Constructed	Line
Austria	Karawanken	D	4.91	1902-1906	Klagenfurt-Triest
	Wochein	D	3.90	1901-1905	"
	Bosruck	S	2.96	1902-1906	Klaus-Selzthal
France	Somport	S	4.86		
	Mont d'Or	D	3.75	-1915	Paris-Lausanne
Germany	Cochern	D	2.60	1874-1878	Kolenz-Trier
Great Britain	Severn	D	4.12	1873-1886	Great Western
	Totley	D	3.18	1888-1892	Midland
Italy	Turchins	D	4.00	1889-1894	Genoa-Asti
Russia	Suram	D	2.47		Traus-Caucasus
Canada	Mont Royal	D	3.21	-1914	Canadian Northern
U.S.A.	Hoosac	D	4.70	1855-1876	Boston & Maine
Norway	Gravehals	S	3.29	1895-1902	Voss-Taugewand
Suisse	Albula	S	3.54	1898-1903	Chur-St. Moritz
	Eigerwand	S	3.06		Jungfrau-bahn

(III) 我邦國有鐵道上の大隧道表

隧道名	線名	區間	延長 ft.	備考
笹子	中央本	笹子—初鹿野	15 275	全部單線型にして延長 1 mi. 以上なり。
*冠着	篠井	麻績—姥捨	8 714	*印を付するは殊に坑内に煤烟多し。
*小佛	中央本	淺川—興瀬	8 350	
泉越	熱海	湯河原—熱海	8 060	
*逢坂山	東海道本	大津—山科	7 620	
*矢岳	鹿兒島本	矢岳—眞幸	6 877	
*第二白坂	篠井	明科—西條	6 837	
*平瀬	磐越西	日出谷—鹿瀬	6 581	
*桃觀	山陰本	磐—久谷	6 535	

隧道名	線名	區間	延長 ft.	備考
*斗賀野	高知	吾桑—斗賀野	6 406	
田代	山口	仁保—篠目	6 224	
*東山	東海道本	山科—京都	6 118	
芦谷	山陰本	城崎—竹野	6 099	
稻穂	函館本	小澤—銀山	5 828	
鳥居山	中央本	奈良井—藪原	5 488	
金	常盤	龍田—富岡	5 430	
*善知鳥	中央本	小野—鹽尻	5 422	
*第二板谷	奥羽本	板谷—峠	5 343	