

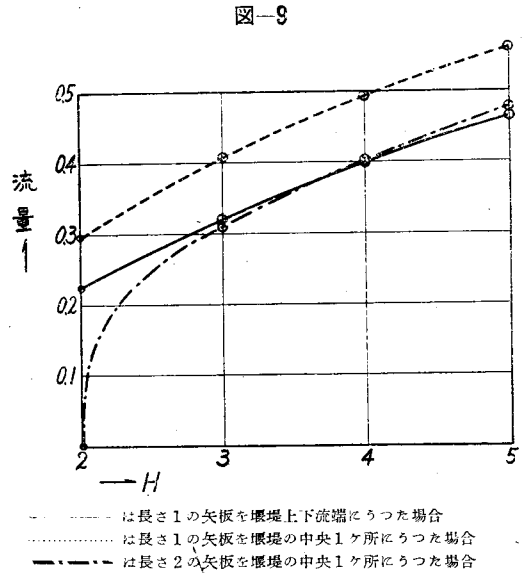
これを堰堤の中央1ヶ所に矢板をうった場合のそれと比較して図示すると 図-9のごとくである。

また矢板の長さを2倍にして堰堤中央1ヶ所にうった場合の流量は $H=3\sim 5$ の範囲内では表-3の結果にほとんど等しく, H の増すに従つてこれより大となる傾向にある。

註

- 1) 例えば, 藤本武助: 応用流体力学 p.150 参照。
- 2) 近似多項式定理によれば, この多項式の項数を増してゆけば, いかほどでも $f(X)$ の真の値に近づけることができるはずである。
- 3) このことは Schwarz-Christoffel の定理からただちに推論される。特別な場合として, 曲線 AB に対して A 点において引いた切線が例えば x 軸に平行であるような場合は少し変つてくる。
- 4) 例えば, Muskat: The Flow of Homogeneous Fluids through Porous Media 参照。
- 5) B (あるいは B') で数学的に厳密な尖点にしようとするれば $d[x]_{r=0}/dX$ の値も, そこで $|X-a|$ と同じ order で零になるように ($[y]_{r=0}$ については, そうなっている) しなければならないが, 実際問題として, それはあまり重要とは思われないので考慮しなかつた。
- 6) この近似写像函数を作つたのと類似の方法を用いれば, 第1種, 第2種, 第3種の各楕円積分の近似函数を求めることが可能であろう。
- 7) 矢板1ヶ所の場合の値は前掲 Muskat の著書より引用した。

(昭.27.9.19)



隧道

UDC 624.191.9:628.538

トンネル内における機関車煤煙の衛生学的考察

正員 工学博士 村山 朔郎*

INVESTIGATION OF THE LOCOMOTIVE SMOKE IN THE TUNNEL FROM SANITARY SCIENCE STANDPOINT

(Trans. of JSCE April 1953)

Dr. Eng., Sakurō Murayama, C.E. Member

Synopsis Investigating the effects of the locomotive smoke in the tunnel upon the human body, relations between the density of smoke, time and its symptoms are solved analytically in order to apply them to the ventilation engineering.

要旨 トンネル内における機関車煤煙の生体に及ぼす影響を衛生学的に考察し, 煤煙濃度, 吸煙時間と人体障害との関係を数式的に導いて, 煤煙に関する衛生問題の工学上への適用をはかつたものである。

1. 煤煙

1) 煤煙中の有害成分 坑内空気の不良化は主に機関車用炭の燃焼による空中酸素の減耗と煤煙中の有害成分による。表-1 は国鉄中特に煤煙のはなはだしい坑内の各成分実績^{1,2)}をまとめたものである。一方数時間吸入して酸素欠乏症のあらわれる O_2 量は16~12%といわれる。また CO_2 ガスは外気中にも 0.3% 前後含まれる。

* 京都大学教授, 工学部土木工学教室

表—1 坑内空気中のガスその他含有量実測値

文 献	採気場所 ガス その他	濃度 単位	坑内(列車通過直後)		機関車キャブ内		常時 坑内
			中央頂部	呼吸帯	本務機	補機	
文 献 1)	O ₂	cc%	—	約 19	—	約 18	約 20
	CO ₂	"	6.11~9.98 (小仏, 15.7)	5.51~8.61 (", 10.21)	2.04~3.68 (", 6.23)	3.71~6.85 (", 9.65)	0.5~0.73
	CO	"	1.06~1.13	0.83~1.35	0.66~0.75	0.95~1.03	
	SO ₂	"	0.02~0.03	0.01~0.03	0.02	0.04	
	H ₂ SO ₄	mg/l	0.10~0.11	0.09~0.13	0.07~0.16	0.15~0.24	
	煤塵	mg/m ³	620	600~1420	—	—	80~95
文 献 2)	CO	cc%	0.6~1.20 (加太 2.10)		0.81~1.34 (加太 1.40)		
	SO ₂	"	0.01~0.08 (第2板谷 0.21)		0.01~0.09 (第2板谷 0.21)		
	H ₂ SO ₄	mg/l	0.06~0.23 (第2板谷 0.23)		0.10~0.27 (第2板谷 0.38)		

註: カッコ内の数字は最大濃度とそのトンネル名を示す

成人安静時の肺胞内 CO₂ 張力は 40 mm—Hg くらい(乾燥気中の濃度 50~60%)とされ、この程度の濃度がガス交換の限度と思われるが、Lehmann は 10~25% 中で数年間労働しても特に悪影響を認めず、20~30% では数時間軽微の障碍にて耐えられ、40~60% では1時間以内は重い障碍なく耐えられ、これ以上では危険としている。COガスは水にはほとんど不溶性で、坑内では拡散、通風によつて排出されねば減少しにくい。その上無味、無臭のため無意識に吸入し、吸入程度によつては急激に症状を発生し、たちまち危険状態をきたすことがある。投炭の時期、方法を工夫して坑内での CO 発生量を多少減ずることはできても、現在の機関車缶の構造では発生不可避な危険なガスである。SO₂ ガスは血液には直接作用しないとされるが、0.003~0.005% で気道粘膜を刺戟して感知され、0.008~0.012% では咽頭を、0.02% では眼を刺戟する。0.025~0.04% では6時間吸入して障碍なく、0.05~0.1% では短時間耐えられ、0.4~0.5% に到れば短時間で中毒するとされている。坑内用炭に硫黄の少ない良質炭を用いれば発生量を減じうる。SO₂ は刺戟臭のため微量でも感知警戒され、水溶性を利用して濡れタオルのマスクをしても相当防止に効く。H₂SO₄ は SO₂ が酸化してでき、水に溶けやすいので吸気中より早く除かれ、急性障害の対象よりはむしろ工作物を腐蝕させる。煤塵は炭素、タール、灰分及び硫黄等より成り、呼吸器、粘膜には不良であるが急性障害をおこすほどのものではない。タールは附着性があるから、煤塵、撒砂等を工作物表面に固着させ、H₂SO₄、H₂SO₃ 等工作物腐蝕溶液の保存層を作る。故に表—1 に列挙の各物質中 CO 以外は急性障害の対象にはほとんどならない。SO₂ は刺戟性のため苦痛を助勢する程度と思われる。しかし坑内作業者は濃度の消長があつても長時間有害環境にある慢性障害をおこす場合があるようである。

2) 濃度分布 表—1 の基礎に用いた各実測値^{1),2)}(掲載省略)の濃度を見ると大体 CO₂, CO の濃度は坑内キャブ内はほぼ等しいかまたは多少キャブ内が少ない。これは CO が不溶性であり、また CO₂ はやや水溶性であつても常時 CO₂ ガスが坑内に遊離するくらいで、溶液が飽和に近く可容量が少ないから濃度が持続されるためであろう。一方 SO₂, H₂SO₄ は逆で多い順序は補機、本務機、坑内の順である。補機に多いのは本務機で汚染された空気に補機自体の煙を加えるためで、坑内よりキャブ内の多いのは Bunsen の吸収係数(表—2)に示すごとく SO₂, SO₃ が水溶性の強いためである。すなわちこれらのガスは列車による気流の攪乱のため水中に速かに溶けこんで、ガスの流下とともに急速に空中より減じてしまう。故に煤煙濃度はその構成物質ごとに濃度の変化の模様は異なるが、煤煙を流体的に考えてその濃度を追求する場合には CO, CO₂ の濃度をもつて煤煙濃度の分布が代表されると考えられる。

表—2 ガスの比重と Bunsen 吸収係数

ガス種類	空気に対する比重	Bunsen 吸収係数	
		5°C の時	20°C の時
空 気	1.	0.026	0.019
CO ₂	1.529	1.424	0.873
CO	0.967	0.032	0.023
SO ₂	2.264	67.485	39.374

註: Bunsen 吸収係数とはガス分圧が 1 atm の時、単位体積の水が吸収する気体の標準状態における体積をいう。

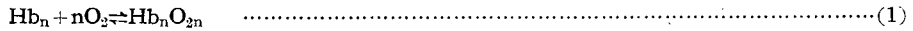
2. CO ガスの血液に対する作用

1) CO ガス障害 吸気の肺胞内ガス分圧は肺胞内血液中の溶解ガス分圧より高いから、吸気中の各ガスはそれぞれの分圧差に応じて物理的に血液中に溶解し、溶解した O₂ 及び CO は血色素 (haemoglobin; 今後 Hb と記す) に対するそれぞれの親和力に応じて Hb と化学的に結合する。この時 CO の Hb に対する親和力は、O₂

の Hb に対する親和力に比して200倍あまりも強いことが認められている。しかし実際は Hb と O₂ の結合が CO のそれよりも 10 倍も速かに行われるが、これとともに HbO₂ の解離もまた HbCO のそれよりも容易なため CO が見掛上このような強い親和力を呈するものと説明されている²⁾。この強親和力によつて CO は容易に還元 Hb (reduced haemoglobin) とまたは酸化 Hb の O₂ を追い出して Hb と結合し、HbCO をつくり動脈血中の O₂ 含有量を低下させる。

一方組織部では O₂ が消費され、O₂ 分圧が血液中より低いからそれらの O₂ 分圧差により O₂ が細胞へ移行して酸素の供給を行う。しかし HbCO 含有血液は正常血液よりも O₂ 含有量 (O₂ 分圧) 低く、その上 O₂ の解離が困難になるので組織部に要するだけの O₂ 量の移行ができず、組織には酸素が欠乏し CO 障害がおこる。

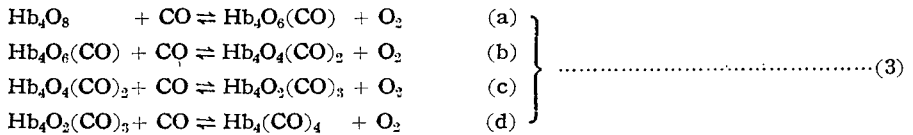
2) Hb とガスとの反応 Hb は O₂, CO ガス数分子と結合する重合分子とされ、Hb_nO_{2n}, Hb_n(CO)_n 等の形で示されている。哺乳動物の血液では n の値は Adair の滲透圧の研究、Svedberg の分子量の研究から n=4 が求められている。Hb_n とガスとの反応はを O₂ にとれば Hill は次式で示した。



(1) 式の右へ移行する反応速度 v は反応のごく初期の間では、 k, k' をそれぞれ反応速度恒数、 $[\text{Hb}_n], [\text{O}_2]$ をそれぞれ Hb_n, O₂ の濃度とすれば、

$$v = k'[\text{Hb}_n][\text{O}_2]^n - k[\text{Hb}_n\text{O}_{2n}] \doteq k'[\text{Hb}_n][\text{O}_2]^n \quad \dots\dots\dots(2)$$

故に v は $[\text{O}_2]^n$ に比例するはずであるが、 v の実測によれば v は Hill の仮定のように $[\text{O}_2]^n$ に比例せず、むしろ $n=1\sim 2$ とした方がよく合う。Roughton³⁾ は $n=1$ のときが実測の反応速度とよく合致することを確かめし、この矛盾を Adair の仮説に基づく次の 1 分子反応式により説明している。すなわち $n=4$ の時の Hb₄O₈ に対する CO の反応式は



反応諸物質の各瞬間における反応速度及び平衡値は質量作用の法則によつて決定されるから、(3) 式の右方向の反応速度は各物質の濃度を $[\]$ で示し、 $m_1 \dots m_4, m_1' \dots m_4'$ を反応速度恒数とすれば

$$\left. \begin{aligned} d[\text{Hb}_4\text{O}_6\text{CO}]/dt &= m_1'[\text{CO}][\text{Hb}_4\text{O}_8] - m_1[\text{O}_2][\text{Hb}_4\text{O}_6(\text{CO})] & (a) \\ d[\text{Hb}_4\text{O}_4(\text{CO})_2]/dt &= m_2'[\text{CO}][\text{Hb}_4\text{O}_6(\text{CO})] - m_2[\text{O}_2][\text{Hb}_4\text{O}_4(\text{CO})_2] & (b) \\ d[\text{Hb}_4\text{O}_2(\text{CO})_3]/dt &= m_3'[\text{CO}][\text{Hb}_4\text{O}_4(\text{CO})_2] - m_3[\text{O}_2][\text{Hb}_4\text{O}_2(\text{CO})_3] & (c) \\ d[\text{Hb}_4(\text{CO})_4]/dt &= m_4'[\text{CO}][\text{Hb}_4\text{O}_2(\text{CO})_3] - m_4[\text{O}_2][\text{Hb}_4(\text{CO})_4] & (d) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots(4)$$

また $M_1 = m_1'/m_1, M_2 = m_2'/m_2, M_3 = m_3'/m_3, M_4 = m_4'/m_4 \quad \dots\dots\dots(5)$

ここに M は平衡恒数、反応が平衡すなわち $d[\]/dt = 0$ の時には $[\text{CO}] = \alpha, [\text{O}_2] = \beta$ とすれば (4) 式より、

$$\left. \begin{aligned} [\text{Hb}_4\text{O}_6(\text{CO})] &= M_1(\alpha/\beta) [\text{Hb}_4\text{O}_8] & (a) \\ [\text{Hb}_4\text{O}_4(\text{CO})_2] &= M_2(\alpha/\beta) [\text{Hb}_4\text{O}_6(\text{CO})] & (b) \\ [\text{Hb}_4\text{O}_2(\text{CO})_3] &= M_3(\alpha/\beta) [\text{Hb}_4\text{O}_4(\text{CO})_2] & (c) \\ [\text{Hb}_4(\text{CO})_4] &= M_4(\alpha/\beta) [\text{Hb}_4\text{O}_2(\text{CO})_3] & (d) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots(6)$$

反応の際、充分の量の O₂ 及び CO ガスが吸収されれば肺胞内の O₂, CO の濃度はこの反応によつて大した変化を受けないと考えられるから、 $[\text{CO}] = \alpha, [\text{O}_2] = \beta$ は常数と近似できる。反応平衡時には (6) 式両辺の 5 種の Hb 結合物質は共存し、それぞれの濃度比は (6) 式から

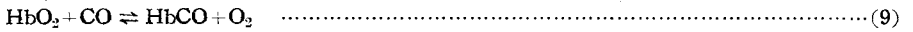
$$\begin{aligned} [\text{Hb}_4\text{O}_8] : [\text{Hb}_4\text{O}_6(\text{CO})] : [\text{Hb}_4\text{O}_4(\text{CO})_2] : [\text{Hb}_4\text{O}_2(\text{CO})_3] : [\text{Hb}_4(\text{CO})_4] \\ = 1 : M_1(\alpha/\beta) : M_1M_2(\alpha/\beta)^2 : M_1M_2M_3(\alpha/\beta)^3 : M_1M_2M_3M_4(\alpha/\beta)^4 \quad \dots\dots\dots(7) \end{aligned}$$

反応が平衡に達しても Hb₄ 重合分子中には CO と結合していない分子が含まれているから、全分子が皆 CO と結合したと仮定した場合よりも CO 飽和度は低い。(6) 式のごとき飽和状態と全分子飽和したと仮定した時との HbCO の比を血液の CO 飽和率といい、 p_m で示す。

$$p_m = \frac{M_1(\alpha/\beta) + 2M_1M_2(\alpha/\beta)^2 + 3M_1M_2M_3(\alpha/\beta)^3 + 4M_1M_2M_3M_4(\alpha/\beta)^4}{4\{1 + M_1(\alpha/\beta) + M_1M_2(\alpha/\beta)^2 + M_1M_2M_3(\alpha/\beta)^3 + M_1M_2M_3M_4(\alpha/\beta)^4\}} \quad \dots\dots\dots(8)$$

故に p_m は α の函数で示される。

3) p_m の考察 従来 Hb と CO との反応は



として示し、その平衡恒数 N , CO 飽和率 p_m を (6), (8) 式のごとくしてつぎのごとく求めている。

$$\left. \begin{aligned} [\text{HbCO}] &= N(\alpha/\beta) [\text{HbO}_2] \\ p_m &= N(\alpha/\beta) / \{1 + N(\alpha/\beta)\} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots(10)$$

$M(M_1 \dots M_4)$, N はまた親和力 (relative affinity) ともいわれ、血液の pH, 塩類濃度にはほとんど無関係でただ紫外線の照射, 温度の上昇によつて減少する常数で²⁾, 人により多少差がある。 N の値は gasometer または spectroscope 等で測られ $N=210 \sim 299$ くらいの範囲があるが, 通常

$$N \approx 280 \dots\dots\dots(11)$$

くらいが用いられている。しかし N は (9) 式の反応をもとにしたもので, (3) 式の反応の時と異なり, 種々の CO 濃度において p_n と p_m とを一致させることはできない。一方 p_m の算出に必要な $M_1 \dots M_4$ の諸恒数の値も充分測られてないので, まず α, β 及び N を用いて p_n を求め, 次に

$$p_m = \eta_m \cdot p_n \dots\dots\dots(12)$$

として, 実測値から補正係 η_m の性質を求めてみる。

空気は通常 $[\text{N}_2]=79.04\%$, $[\text{O}_2]=20.93\%$, $[\text{CO}_2]=0.03\%$ くらいであるが, 肺胞内では呼吸が混じ, $[\text{N}_2]=80.37\%$, $[\text{O}_2]=14.08\%$, $[\text{CO}_2]=5.55\%$ くらいになつて平衡している。CO 混合空気の場合, CO は通常微量であるから, 肺胞空気の成分比率は不変とし, また CO は体内で代謝されないから肺胞内 CO 濃度は外気濃度 α に等しいと仮定する。故に $[\text{O}_2]=\beta=14\%$ [張力 106 mm-Hg], $N=280$ とすれば (10), (12) 式より

$$p_m = \eta_m(280\alpha) / (280\alpha + 14) \dots\dots\dots(13)$$

一方正常状態の呼吸時, 肺胞通過直後の動脈血中の O_2 分圧は 80~100 mm-Hg で肺胞内の O_2 分圧 (106mm-Hg 前後) に比して 75~95% くらい (通常 95% くらい) しか飽和していない。この不飽和の原因は O_2 の拡散速度が遅いから血液が充分 O_2 を吸収しない間に肺胞を去ること, 及び肺胞の一部にガス交換をしない部分のことが挙げられる⁵⁾。一方 CO の拡散速度 w_c と O_2 のそれ w_0 との比は Graham の法則により分子量の平方根に逆比例するから $w_c : w_0 = \sqrt{32} : \sqrt{28} = \sqrt{8} : \sqrt{7}$ となり両者は大差がない。故に CO 混合空気を吸入する場合にも上記不飽和の原因はほぼ同様に存在するから, O_2 または CO と結合しない Hb は正常時とはほぼ同一の割合 (約95%) にあると見られる。故に全 Hb に対する一酸化炭素 Hb の飽和率 p は $0.95 p_m$ となるから, $\eta_s = 0.95$ とすれば

$$p = \eta_s p_m = \eta_s \cdot \eta_m(280\alpha) / (280\alpha + 14) \dots\dots\dots(14)$$

Sayer 及び Yant は成人安静時において $[\text{CO}]=\alpha$ の混合空気による CO 飽和率 (p) 及び飽和に達するまでの経過時間 (T) を実測した (表-3, (a) (b) (c) 欄)。本表の α, p の値を (14) 式に代入し, 逆に η_s を算出すれば同

表-3 Sayer 及び Yant 測定値並びに η_m 算出値

Sayer 及び Yant 測定値*			算 出 値	
(a)	(b)	(c)	(d)	(e)
α (%)	p (%)	T (hr)	$0.95 \times \frac{280\alpha}{280\alpha + 14}$	$\eta_m = \frac{(b)}{(d)}$
0.02	23	6.	27.170	0.8465
0.03	30	5.	35.625	0.8421
0.04	36	5.	42.180	0.8553
0.06	44	4.	51.775	0.8498
0.07	47	4.	55.385	0.8486
0.10	53	3.	63.365	0.8364
0.11	55	3.	65.360	0.8415
0.15	60	1.5	71.250	0.8421
0.16	61	1.5	72.390	0.8427
0.20	64	1.~0.75	76.000	0.8421
0.30	68	0.5	81.415	0.8352
0.50	73	0.33~0.25	86.355	0.8453
1.00	76	0.03	90.440	0.8403

註: * 参考文献 2) p.36 より引用,

η_m 平均値 = 0.8425

表(e)欄のごとくなり、偶然ながら η_s は α に無関係にほぼ一定値を示す。いま η_s の平均値を求めると、

$$\eta_s = 0.8435 \dots\dots\dots (15)$$

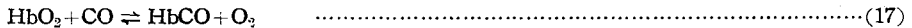
$$\begin{aligned} \therefore p &= 0.8435 \times 0.95 \times (280\alpha) / (280\alpha + 14) \\ &\doteq 0.8 \cdot 280\alpha / (280\alpha + 14) \dots\dots\dots (16) \end{aligned}$$

η_s の性質は1実験のみについて調べただけであるからなお一般性については不明であるが、本例では常数となり、従つて p は(16)式のごとき簡単な補正項を用いて近似計算することができる。

3. 一酸化炭素 Hb の生成速度

Hb と CO との反応は(3)式のごとき酸化 Hb と CO との反応だけでなく還元 Hb と CO との反応もあるはずであるが、吸気中には必ず O_2 があるため2(1)でのべたごとく Hb は O_2 に対する速い反応速度のため CO より先に一酸化 Hb になるから、Hb と CO 混合空気との反応は(3)式で代表されると考えられる。

(3)式は Hb_4 の1分子反応式である。いま Hb_4 の重合を解いて Hb 1個づつに分け、その1分子の Hb と CO との反応を式示したとすれば次式で示される。



ただし(17)式の反応速度は(4)式の代りに

$$d[HbCO]/dt = m'_i \alpha [HbO_2] - m_i \beta [HbCO] \dots\dots\dots (18)$$

m_i, m'_i は $i=1, 2, 3, 4$ で(4)式中の恒数と等しい4組が存在する。しかし(3)式の反応が系全体として進む速度は(4)式 a, b, c, d 各式中最も速度のおそい式の数になるはずで、その式の m_i, m'_i をいま m, m' とする。

また $[HbCO], [HbO_2]$ はそれぞれ重合を解いた HbCO, HbCO₂ の分子の一定液量中にある分子数と考えられるから、同一血液量中にある Hb 分子の総数を a 個となし、血液の CO 飽和率を x, O_2 飽和率を y とすれば

$$x = [HbCO] / \eta_s a, \quad y = [HbO_2] / \eta_s a \dots\dots\dots (19)$$

故に系全体の反応速度は(18)式に上記事項を入れて

$$dx/dt = m' \alpha y - m \beta x \dots\dots\dots (20)$$

一方 $x + y = \eta_s \dots\dots\dots (21)$

また平衡時には $x = p$ であるから(20)式から

$$\begin{aligned} 0 &= m' \alpha (\eta_s - p) - m \beta p \\ \therefore dx/dt &= (m' \alpha + m \beta) (p - x) \dots\dots\dots (22) \end{aligned}$$

上式は一度に反応が進む時の反応速度であるが、生体内では血液は肺胞通過の際 CO 混合空気に曝され多少 CO を結合するが、反応速度に比して曝気時間が短いため未飽和のまま肺胞を去り、組織を一循して再び肺胞に帰り反応を行つて濃度を高める。血液が肺胞で曝気される時間を Δt , 血液が組織を一循する平均時間を t_c とすれば、生体内で $(\Delta t + t_c)$ 時間に生成される HbCO の飽和速度は(22)式の Δt 時間の生成量(積分量)に等しい。すなわち生体内の CO 飽和率の増加速度は(22)式の時間目盛 t の代りに $T = \{(\Delta t + t_c) / \Delta t\} t$ あるいは $dT = \{(\Delta t + t_c) / \Delta t\} dt$ とすればよいから、

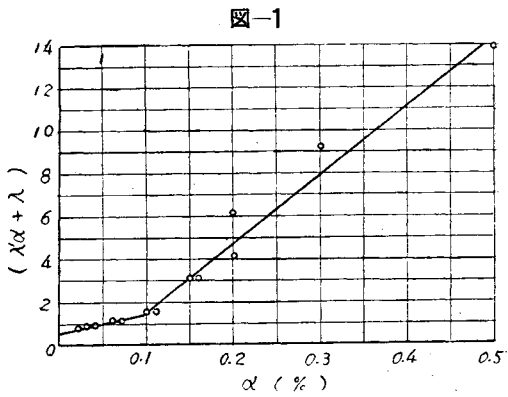
$$dx/dT = (\lambda' \alpha + \lambda) (p - x) \dots\dots\dots (23)$$

ただし $\lambda' = m' \Delta t / (\Delta t + t_c), \lambda = m \beta \Delta t / (\Delta t + t_c)$ }
 λ, λ' は実測から決める係数である。また α は曝気(呼吸)ごとに新たな CO 混合空気が吸入されるから外気の CO ガス濃度に近似して差支えない。

CO 混合空気を吸入し始める時を $T=0$ とし、この時以前からすでに残留している HbCO 飽和率を e とすれば(23)式において、 $T=0$ にて $x=e$ とすれば

$$x = p - (p - e) \exp\{-(\lambda' \alpha + \lambda) T\} \dots\dots\dots (24)$$

つぎに(24)式の $e=0$ の場合と表-3(a)(b)(c)欄の Sayer 及び Yant の値とを用いて、成人安静時の λ, λ' を求める。ただし(24)式は曲線の性質上 $x=p$ とおけばそれに対する T は $T = \infty$ となつて T の有限値が求められないので、測定の精度に合う程度に $x \doteq p$ とおくこととした。ここでは $x/p = 0.99$ と仮定し、これより $(\lambda' \alpha + \lambda) T = 4.60$ を得、さらに表値の T を代入して $(\lambda' \alpha + \lambda)$ と α との関係を求めると図-1となる。この



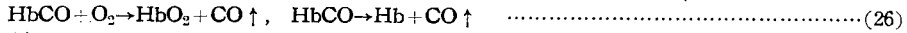
関係を図のごとく2直線で表わすことにすれば、

$$\left. \begin{aligned} \alpha \leq 0.095 \quad & \text{に対しては} \quad \lambda' = 9.0 \quad \lambda = 0.59 \\ \alpha \geq 0.095 \quad & \quad \quad \quad \lambda' = 31.9 \quad \lambda = -1.57 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (25)$$

この係数を用いて Killick の行つた実験⁵⁾を驗したが、ほとんど一致する結果が得られた。

4. 一酸化炭素 Hb の解離速度

CO ガス障害者が清浄な空気を呼吸する時には



となつて、HbCO は解離して CO を外気に放出する。なお HbCO の解離速度は次項によつて促進される。体操、入浴等により呼吸量、血行の増進、体温の上昇をすること、紫外線の照射をうけること、酸素吸入等にて O₂ 分圧を高めること、なお血液中に溶けている CO₂ は呼吸中枢を刺激して呼吸作用を促進するから酸素吸入に多少 CO₂ ガスを混じるとさらに有効といわれる⁶⁾。

(26) 式の CO は外気に放散され、反応は右にのみ進む。この反応の生体内の解離速度は前記と同様に次の形で示される。

$$dx/dT = -\mu x \dots\dots\dots (27)$$

μ は m_i ($i=1 \dots 4$) に相当する係数で、さらに温度、光線、O₂ 分圧、CO₂ の存在で異なり実験から求める係数。

$T=0$ にて $x=b$ とすれば

$$x = b \cdot \exp(-\mu T) \dots\dots\dots (28)$$

図-2 は $b=30\%$ に相当する成人安静時に対する Killick の実測値⁶⁾である。解離時の飽和率は測定点が相当散つている。本図の数値を用いて (28) 式より μ の値を求めると

$$\mu = 0.102 \text{ (上限)}, 0.621 \text{ (下限)} \dots\dots (29)$$

μ の上下限を用いて解離曲線を描くと図中の実線のごとくなる。なお μ の下限値は(25)式の λ にほぼ等しい。

5. CO ガス障害の症状

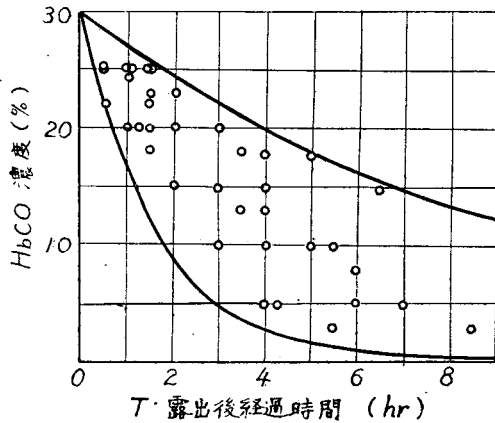
1) 急性症状 CO ガス障害の急性症状はほぼ血液中の HbCO 飽和率に比例して増し、Killick、または Sayer 及び Yant 等はこの関係を表-4のごとくに示した⁵⁾。また Henderson 及び Haggard⁷⁾ は CO 濃度 ($\alpha\%$) 及びその吸入時間 (T hr) と症状の関係を求め、($T \times \alpha$) の値が 0.03 以下は無症状、0.06 の時まさに感知し、0.09 の時頭痛、吐気を催し、0.15 の時危険とした。

表-4 血液の CO 飽和率と症状との関係

CO 飽和率 (%)	CO ガス 障 碍 の 症 状
0~10	無 症 状
10~20	{ 安静時：無症状 労働時：前頭重圧感、軽度の頭痛
20~30	{ 安静時：時に前頭頭痛 労働時：眩暈、心悸亢進、呼吸促進
30~40	{ 安静時：前後頭痛、脈搏増加、呼吸促進、心悸亢進、嘔気 労働時：眩暈、視力減退、脈搏・呼吸の異常増加、時に虚脱
40~50	{ 症状さらに顯著、視聽力弱減、意識障碍、運動に対する筋肉障碍、虚脱失神、嘔気、嘔吐
50~60	卒倒、呼吸・脈搏さらに増加、昏睡
60~70	心臓活動及び呼吸作用弱少となり、昏睡を続け時として死
70~80	脈搏・呼吸微弱、致死

CO ガスは無味無臭で無意識の中に吸入されるが、急性症状(酸素欠乏症)は中枢神経系統が最も鋭敏に感じ、この時は HbCO が約 20% に達する時とされている。しかし人は一般にある程度 CO ガスに対する順応性(acclimatization)を有し、順応した者は順応しないものより同一濃度の CO ガスを吸入しても HbCO 飽和率が低い⁸⁾。実際のトンネル内煤煙事故をみても、若い新人ほど病状の激しいのはこの一面を示すものであろう。

図-2



2) 慢性症状 CO ガスの慢性障害に対する関係についてはあまり詳細な研究がないようであるが、一般に長期 CO ガスに曝されていると慢性症状(頭痛, 眩暈, 居睡, 食欲不振, 呼吸促進, 心悸亢進, 運動障碍等)を生ずるようであるといっている³⁾。国鉄の調査⁴⁾によると保線系坑内勤務者は勤務年限の増加にともない主観的な自覚症状を訴える者が増加しているが、その中には粘膜の慢性加答児性の者もあつて、CO ガスの他 SO₂ によると考えられる慢性障害も含まれているとのべている。

3) 労働と急性症状との関係 筋肉労働に際しその労働のみに消費される熱量 Q_a (kcal/hr) と当人の絶対安静時所要熱量(基礎代謝熱量) Q_0 (kcal/hr) との比 $K=Q_a/Q_0$ をその労働の代謝率と称し、 K は個人差なく労働強度のみに関係する一定値を示す。また消費熱量 5 kcal/hr は酸素消費量約 1000 cc に相当するから、労働時には基礎代謝時の $(1+K)$ 倍の酸素消費量となる。この酸素消費量の増大は労働により組織内 O₂ 分圧従つて静脈血の O₂ 分圧が低下し、肺胞内の吸気と静脈血の O₂ 分圧差の増大すること、多量の CO₂ の発生のため中樞が刺激されて呼吸量及び血液循環が増進されること等による Hb の酸素運搬量の増大によつて補われる。このような労働時に CO 混合空気を呼吸すれば、呼吸、血行の増進により Hb 及び CO の接触量が増大しているからそれだけ HbCO の生成速度が増加する。故にこの速度増加の割合は代謝率の函数と考えられ、いま $\alpha\%$ の CO 中で K の代謝率の労働中の HbCO 生成速度を $(dx/dT)_K$ 、基礎代謝時の生成速度を $(dx/dT)_0$ とすれば、抽象的に

$$(dx/dT)_K = (\text{函数 } K) \cdot (dx/dT)_0 \dots\dots\dots (30)$$

(函数 K) の形としては未だ充分な研究はないようであるが、(函数 K) を $(1+K)$ 、または労働時の呼気倍率とした例⁵⁾がある。本例の実験値から呼気倍率 (n) と K との関係の求めると近似的には $n=1+0.65K$ であるから(函数 K) の形を仮に n とすれば(30)式は

$$(dx/dT)_K = (1+0.65K)(dx/dT)_0 \dots\dots\dots (31)$$

労働時は HbCO 生成速度が増進して O₂ の供給を阻む一方体内の酸素要求度も増すから、酸素欠乏度は労働強度の上昇と共に激しくなると考えられる。

6. 安全作業可能時間

CO ガスの急性障害は吸気中の CO ガス濃度 (α) 吸入時間 (T) 及び労働強度 (K) の条件により支配される。人体では HbCO 飽和率が 20% 以下ならばほとんど無症状であるから、この飽和率をもつて安全の最高限度とすれば $\alpha=20\%$ になるまでの吸入時間 T_0 は(16)式の p を用い(24)式より T を求めればよい。すなわち安静時 ($K=K_1=0.3$) の安全作業可能時間 T_1 は $\alpha=0, \alpha=20\%$ とすれば(24)式より

$$T_1 = \{1/(\lambda'\alpha + \lambda)\} \log\{p/(p-\alpha)\} \dots\dots\dots (32)$$

K の代謝率の労働時の安全作業可能時間 T_K は

$$T_K = T_1 \{ \text{函数 } K_0 \} / \{ \text{函数 } K \} \dots\dots\dots (33)$$

いま $\alpha=20\%$ として(32)式より T_1 を求め図示すれば図-3 となる。この結果から見れば 5. (1) にのべた Henderson 及び Haggard の実験式は $\alpha=0.04 \sim 0.10\%$ の間のみにはしか成立しないことが認められる。

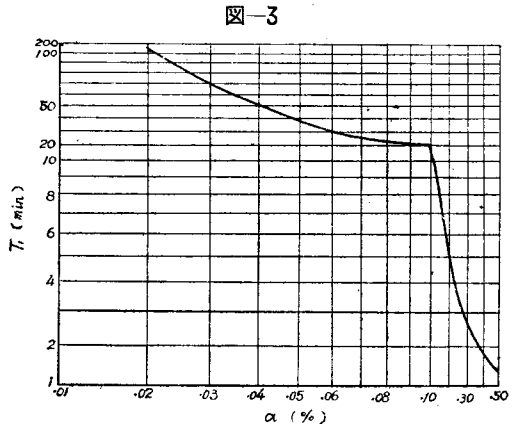


図-3

7. 結 語

本文は鉄道トンネル、自動車トンネル等の換気設計上対象となる CO ガスについて衛生学的に考察し、その工学上の対策への適用をはかる 目的で行つたものである。そのため特に HbCO 飽和率 (p_m)、HbCO 生成速度、安全作業可能時間等について新たな考察を行つた。しかし実験値としては古くから用いられている Sayer 及び Yant の測定値を主に用いたものであり、その上筆者は衛生学の智識に乏しく正鵠を脱した点も少なくないと思う。この点御教示を賜われれば幸である。なお拙文を快よく御高閲賜つた京都府立医科大学衛生学教室吉村寿人教授に対して衷心より御礼を申す次第である。

参 考 文 献

1) 加藤 恭; ^{ウツワ}中央線善知鳥, 小仏隧道内及び同通過中の機関キャブ内空気試験, 鉄道省業務研究資料, Vol. 15, No. 4, 昭. 2-4
 滝山 与; 鉄道隧道の開通後における換気, 土木学会誌, Vol. 13, No. 6, 昭. 2-12
 河合純三; 欽明路隧道内窒息患者発生事故に関する調査報告, 日本鉄道医協会雑誌, Vol. 25, No. 9 昭 14-9

- 2) 山川浩その他; 鉄道大臣官房保健課衛生試験所報告, Vol. 1, No. 1, 昭. 15-7. p. 4, 36
 3) E.M. Killick; Carbon Monoxide Anoxemia, Physiological Reviews, Vol. 20, No. 3, 1940-7 p. 313~344
 4) F.J.W. Roughton; The Kinetics of Haemoglobin, Proc. of the Royal Society of London Vol. 115-B, 1934-8 p. 451
 5) 正路倫之助; 医用生理学 上巻
 6) E.M. Killick; Journal of Physiology, No. 87, 1936
 7) 前掲 3) p. 322 より引用 (原著: Journal of Industrial Hygiene No. 3, 1921, p. 137)
 8) 正木利正; 隧道内保線作業員の健康状態に関する研究, 鉄道労務科学研究, Vol. 3, No. 2, 昭. 17-11. p. 72
 9) R.R. Sayer & W.R. Yant; U.S. Public Health Service, Carbonmonoxide Literature, 1952 (昭. 27. 9. 19)

整理
 土性及土質工学

UDC 627. 821. 2. 04: 624. 131. 52

堤体 2 次元 圧密 の 研究

—堤体基礎の閾隙圧分布—

准 員 赤 井 浩 一*

STUDY ON THE TWO DIMENSIONAL CONSOLIDATION OF EMBANKMENT

(Trans. of JSCE April 1953)

Kōichi Akai, C.E. Assoc. Member

Synopsis In this paper, the distribution of the pore water pressure in the foundation of earth dam is treated as the two dimensional problem. Starting from the fundamental theoretical equation of the two dimensional consolidation, the research is performed for the foundation which has infinite depth or under which a perfectly rigid and smooth rock base exists at any depth. First, applying Neuber's theory of elasticity, the stress distribution just after loading is obtained, and using it as the initial condition, the solution of the consolidation equation is represented in the form of Fourier's integral or Fourier's series with regard to each boundary condition. Next, performing the numerical calculation for the case of uniformly distributed load, the pore water pressure is computed as to the sudden loading and also as to the gradual loading on the semi-infinite foundation within the allowable error. Comparing these calculations with each other, the change of the distribution of the pore water pressure in respect of station and time has become clear at each loading condition.

要旨 アースダムまたは普通の堤状構造物のごとく 1 方向に相当長く延長した荷重によつて上載された軟弱基礎地盤の安定解析に当つて、2 次元圧密の現象が支配的な要因であるということに着目し、堤体基礎に生ずる閾隙圧の分布を明らかにするために、種々の境界条件に対する理論式を展開し、若干の数値計算を実施した結果を述べたものである。とり上げた境界条件は地盤が半無限体であると仮定した場合の地表面瞬時載荷と漸増載荷の両者について、及びある深さの所に岩盤を有する地盤の場合についてである。

1. まえがき

最近、水力発電、洪水調節または灌漑などの目的のために高いアースダムが建設されるようになってきた。しかしこれらのアースダムは普通のコンクリートダムを造ることができないような貧弱な地盤を基礎としているものが多いため、その安定解析に当つて軟弱地盤の圧密沈下に対する考察をゆるがせにはならない。事実過去におけるアースダムの破壊の多くは建設中、あるいは完成直後に生じた基礎地盤内の剪断応力の増加に原因しており、その対策として施工時地盤内の過剰水圧を実測し、これが極端に大きくならないように盛土の施工をコントロールする方法を採っている²⁾。

* 京都大学講師, 工学部土木教室