

肺結核患者における低酸素血症に関する研究

——とくに換気血流比の肺内分布と解剖学的短絡の影響——

昭和42年1月16日 受付

(特別掲載)

信州大学医学部星子外科教室

(主任: 星子直行教授)

結核予防会結核研究所附属療養所

(副所長: 塩沢正俊博士)

矢 嶋 嶺

Studies on Anoxemia in Pulmonary Tuberculosis with Special Reference to Distribution of Ventilation-Perfusion Ratio and Anatomical Shunt in the Lung

Takane Yajima

Department of Surgery, Faculty of Medicine,
Shinshu University

(Director: Prof. N. Hoshiko)

Surgical Department of Tuberculosis Institute, Tokyo

緒 言

呼吸機能の最終目的は静脈血の動脈化にあり、各種肺疾患におけるその機能不全は低酸素血症をもたらす。従来、拘束性変化が主体と考えられてきた肺結核症においても、最近では閉塞性変化の併存を示す例にしばしば遭遇し^①、酸素飽和度の低下をみるものが決して稀ではない。このため換気障害をともなう肺結核患者において低酸素血症の要因を探ることは、疾患の生理学的な特殊性を把握する点でとくに重要と思われる。

低酸素血症の原因として、1) 肺胞低換気、2) 肺拡散障害、3) 肺内解剖学的短絡、4) 換気血流分布の不均一性などが指摘されてきた。このうち換気血流比の不均一性が大気吸入時にみられる低酸素血症の最も重要な原因とされている^②が、その詳細な分析は方法の困難さのゆえに一般にはあまり試みられていない。しかし最近になって、肺機能検査の進歩が局所的な肺胞換気量、肺毛細管血流量の解明に大きな発展をもたらしたため、換気血流比の肺内分布に関する知見は一段と精密さを増すに至った。

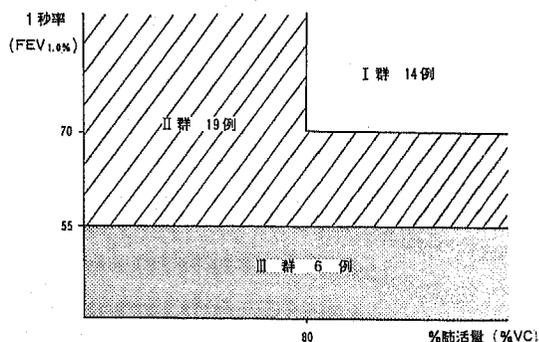
著者はこのような立場から肺結核における換気血流比の肺内分布を数量的に分析し、その不均等化が動脈血酸素飽和度に与える影響を検討して、低酸素血症に主役を演ずる上述の因子を追究した。あわせて一側肺全切除術の前後における測定を行ない、換気血流比の

肺内不均一性の変動を追跡することにより、低酸素血症のもつ生理学的意義を別な面から考察した。

検査対象

一側肺全切除例6例を含む45例の肺結核患者と9例の健康者、計54例を対象とした。年齢は健康例が22~38才、肺結核例が18~82才で、性別は健康例の男6例、女3例に対し、肺結核例では男35例、女10例である。肺結核患者の非手術例は、スパイロメトリーの所見によつて3群に分け、%肺活量80以上で1秒率70%以上のものをI群、肺活量のいかににかかわらず1秒率55%以下のものをII群、%肺活量79以下で1秒率が56~70%のものをIII群とした(図1)。

図1 研究対象(非手術結核患者例)



この分類で、I群はほぼ正常の換気機能を有するもの、II群は著明な閉塞性所見を有するもの、III群は両者の間でさまざまな程度の拘束性もしくは閉塞性変化を有するものと考えられる。

一側肺全切除術例は術前いずれも一側の荒蕪肺を有し、18~55才までの男4例、女2例である。対側の結核病変はさまざまであるが、いずれも広汎な陰影を示さず空洞もない。測定は術前2週間以内と術後3ヵ月以後の2回に行なつた。

検査方法

1) 換気諸量の測定

%肺活量(%VC)および1秒率(FEV_{1.0}%)の測定には、被検者を坐位としBenedict型13.9ℓのスパイロメーターを使用した。

肺胞換気量は、Rahnのend-tidal samplerにより採集した終末呼気をPulmo-Analysor(Godart社製)に導き、O₂およびCO₂濃度の測定を行ない、分時換気量と呼吸商とから型のごとくalveolar equationにより算出した。

不均等換気の実験は、Briscoe and Cournand^⑧の原理にしたがうて行なつた。すなわち開放回路のO₂吸入によるN₂洗出し曲線をNitrograph(Godart

社製)で記録し、各時間のN₂濃度を片対数表に転記して、換気良好部と換気不良部における単位肺胞換気量当りの肺胞換気量(\dot{V}_A/L)を、それぞれ分離して求めた。またFowler^⑨にならつてN₂洗出し遅延率(clearance delay)を算出し、これを肺胞換気不均等化の指標とした。図2は健康例におけるN₂洗出し曲線の記録と \dot{V}_A/L 分離測定のための転記を示す。最上段の曲線は直線A、Bの合成によつて描かれるものとみれば、A、Bの傾斜からそれぞれ換気良好部および不良部の \dot{V}_A/L が、また各直線がY軸を切る点からおのおの部における肺胞換気量の率(\dot{V}_A/\dot{V}_{AT})が求められる。

2) 換気血流比の肺内分布の測定

Finley^⑩にならい、100% O₂吸入によるN₂洗出し過程で動脈血N₂分圧を肺胞N₂分圧と比較する方法を用いた。計算式はつぎのごとくである。

$$\frac{\dot{V}_{A_2}}{\dot{V}_{AT}} + \frac{\dot{Q}_2}{\dot{Q}_T} = \frac{\Delta PaN_2}{\Delta PaN_2} \dots\dots\dots(1)$$

- \dot{V}_{A_2} : 換気不良部の換気量 (ℓ/min)
- \dot{V}_{AT} : 全肺胞換気量 (ℓ/min)
- \dot{Q}_2 : 換気不良部へ向う肺血流量 (ℓ/min)
- \dot{Q}_T : 全肺毛細管血流量 (ℓ/min)
- ΔPaN_2 : 洗出しの十分行なわれた2時点間における肺胞N₂分圧の差 (mmHg)
- ΔPaN_2 : 洗出しの十分行なわれた2時点間における動脈血N₂分圧の差 (mmHg)

まずバルーンボックスを用い、開放回路で100% O₂を吸入して肺胞N₂洗出しを行ない、換気良好部の洗出しが終了したと思われる時点を図2のごとき記録から読みとる。つぎにあらかじめ上腕動脈に噴置しておいた動脈針から、図2に示す3時点(洗出し開始後t₁, t₂, t₃秒)で採血し、えられた動脈血のそれぞれにつきILメーターにより直ちにO₂分圧の測定を行なつた。

これらをPaO_{2t1}, PaO_{2t2}, PaO_{2t3}, 各血液のCO₂分圧をそれぞれPaCO_{2t1}, PaCO_{2t2}, PaCO_{2t3}とすると、定義により

$$\begin{aligned} \Delta PaN_2 &= PaN_{2t1} - PaN_{2t2} \\ &= \{ (PB - 47) - PaO_{2t1} - PaCO_{2t1} \} \\ &\quad - \{ (PB - 47) - PaO_{2t2} - PaCO_{2t2} \} \end{aligned}$$

となる。このときFinleyの実証にしたがうて

$$PaCO_{2t1} = PaCO_{2t2}$$

と仮定すれば、

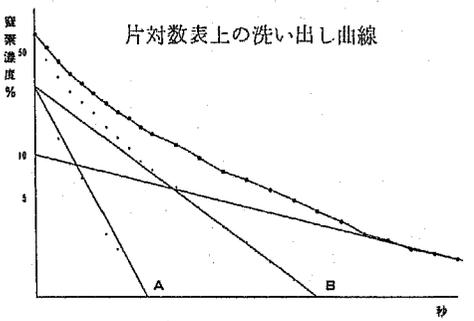
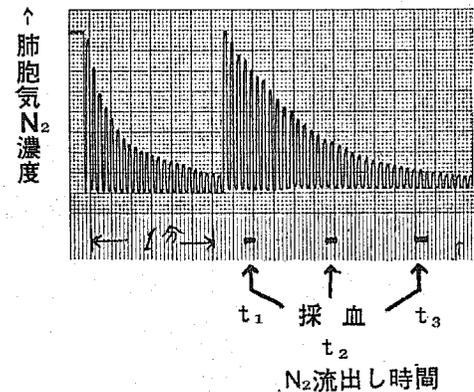
$$\Delta PaN_2 = PaO_{2t2} - PaO_{2t1}$$

$$\text{一般に } \Delta PaN_2 = PaO_{2tn} - PaO_{2tm} \dots\dots\dots(2)$$

(t_n, t_m は異なる2つの時点)

である。

図2 窒素洗出し曲線



他方、片対数表上に転記した N_2 洗出し曲線の終末部の減衰は直線を形成するが、この部分で図2の採血時点における肺胞 N_2 濃度をそれぞれ FAN_{2t_1} , FAN_{2t_2} , FAN_{2t_3} , 肺胞 N_2 分圧を PAN_{2t_1} , PAN_{2t_2} , PAN_{2t_3} とすると、定義により

$$\begin{aligned} \Delta PAN_2 &= PAN_{2t_1} - PAN_{2t_2} \\ &= (PB - 47)(FAN_{2t_1} - FAN_{2t_2}) \end{aligned}$$

一般に $\Delta PAN_2 = PAN_{2tm} - PAN_{2tn}$

$$= (PB - 47)(FAN_{2tm} - FAN_{2tn}) \dots\dots\dots(3)$$

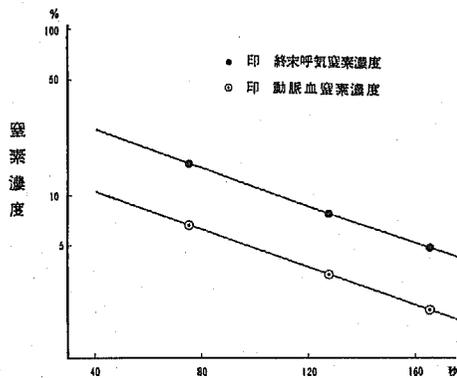
である。

$\dot{V}A_2/\dot{V}AT$ および \dot{Q}_2/\dot{Q}_T はいずれも N_2 洗出し過程中、不変でなければならぬから、式(1)の左辺は式(2), (3)より

$$\begin{aligned} \frac{\Delta PAN_2}{\Delta PaN_2} &= \frac{(PB - 47)(FAN_{2t_1} - FAN_{2t_2})}{PaO_{2t_2} - PaO_{2t_1}} \\ &= \frac{(PB - 47)(FAN_{2t_2} - FAN_{2t_3})}{PaO_{2t_3} - PaO_{2t_2}} \\ &= \frac{(PB - 47)(FAN_{2t_1} - FAN_{2t_3})}{PaO_{2t_3} - PaO_{2t_1}} \\ &= \frac{(PB - 47)(FAN_{2tm} - FAN_{2tn})}{PaO_{2tm} - PaO_{2tn}} \dots\dots (4) \end{aligned}$$

となる。

図3 窒素濃度と時間的变化



計算式: $(\dot{V}A_2/\dot{V}AT)/(\dot{Q}_2/\dot{Q}_T)$
 $= \Delta PAN_2 / \Delta PaN_2$

- $\dot{V}A_2$: 換気不良部の肺胞換気量
- $\dot{V}AT$: 全肺胞換気量
- \dot{Q}_2 : 換気不良部への血流量
- \dot{Q}_T : 全血流量
- PAN_2 : 換気不良部の肺胞窒素分圧
- PaN_2 : 換気不良部へ向う動脈血窒素分圧

図3はこの関係を説明するもので、Finley にした例えば、換気不良部の洗出し過程において、肺胞 N_2

濃度のみならず動脈血 N_2 分圧 (したがって動脈血 N_2 濃度) も、時間に対して対数的減衰を示す。故に両者は片対数表上で平行する2直線となるから、この直線部分で少なくとも2組の対応する FAN_2 と PaN_2 (もしくは PaO_2) とを知れば、 $\Delta PAN_2 / \Delta PaN_2$ は計算により求められる。

著者は測定誤差の可能性にも留意し、3時点で3組の対応する PAN_2 と PaN_2 とをとり、式(4)により2つの $\Delta PAN_2 / \Delta PaN_2$ の値を算出し両者の平均を検査成績とした。2つの算定値が著しく異なる場合には、測定時の N_2 が対数的に減衰するという条件を満たさないものとし成績から除外した。

式(1)は

$$\frac{\dot{Q}_2}{\dot{Q}_T} = \frac{\dot{V}A_2}{\dot{V}AT} + \frac{\Delta PAN_2}{\Delta PaN_2}$$

のごとく書き直されるから、 $\dot{V}A_2/\dot{V}AT$ は既述の Briscoe^③らの方法で求め、上記の $\Delta PAN_2 / \Delta PaN_2$ をもとにして換気不良部への血流量 \dot{Q}_2/\dot{Q}_T をまず算出した。さらに、

$$\frac{\dot{Q}_1}{\dot{Q}_T} = 1 - \frac{\dot{Q}_2}{\dot{Q}_T} - \frac{\dot{Q}_3}{\dot{Q}_T}$$

- \dot{Q}_1/\dot{Q}_T : 換気良好部への血流量
- \dot{Q}_3/\dot{Q}_T : 解剖学的短絡率

の関係から \dot{Q}_1/\dot{Q}_T を求めた。 \dot{Q}_3/\dot{Q}_T は次項に述べるごとく算出した。

換気不良部および換気良好部における換気血流比の算定はつぎのごとき計算によつた。

式(1)を

$$\frac{\dot{V}A_2}{\dot{Q}_2} = \frac{\Delta PAN_2}{\Delta PaN_2} \times \frac{\dot{V}AT}{\dot{Q}_T} \dots\dots\dots(5)$$

と書き直し、 $\dot{V}AT$ は既述のごとく alveolar equation (Bohr の式) を用いて算出し、 \dot{Q}_T は色素希釈法により実測した。ただし色素法を施行しなかつた例については、Briscoe らにならつて \dot{Q}_T を一律に $5.0 \ell/\text{min}$ と仮定した。さらに、

$$\frac{\dot{V}A_1}{\dot{V}AT} = 1 - \frac{\dot{V}A_2}{\dot{V}AT}$$

$$\frac{\dot{Q}_1}{\dot{Q}_T} = 1 - \frac{\dot{Q}_2}{\dot{Q}_T} - \frac{\dot{Q}_3}{\dot{Q}_T}$$

であるから、

$$\frac{\dot{V}A_1}{\dot{Q}_T} = \frac{1 - \frac{\dot{V}A_2}{\dot{V}AT}}{1 - \frac{\dot{Q}_2}{\dot{Q}_T} - \frac{\dot{Q}_3}{\dot{Q}_T}} \times \frac{\dot{V}AT}{\dot{Q}_T} \dots\dots\dots(6)$$

とした。

表 1 健康例の検査成績

No.		1	2	3	4	5	6	7	8	9	平
氏名		野 ○	布 ○	矢 ○	浜 ○	鈴 ○	竹 ○	○ 見	木 ○	田 ○	均
年齢・性別		22 ♀	26 ♀	33 ♂	24 ♂	35 ♂	38 ♂	34 ♂	27 ♂	25 ♀	
換 氣 諸 量 お よ び 肺 内 ガ ス 分 布	%VC	95	101	127	102	102	116	85	95	96	102
	FEV1.0%	95	90	90	86	85	80	81	92	95	88
	FRCcc	2508	2500	3301	2624	3010	3650	2521	2370	2410	2766
	RV%	32	16	17	19	15	20	24	28	30	22.3
	CD%	0	0	22	19	17	8	36	24	18	16.0
	L ₁ /L _T %	100	100	16	44	47	24	63	28	35	50
	L ₂ /L _T %	0	0	84	56	53	76	37	72	65	50
	$\dot{V}_{A1}/\dot{V}_{AT}\%$	100	100	40	65	74	35	77	54	55	67
	$\dot{V}_{A2}/\dot{V}_{AT}\%$	0	0	60	35	26	65	23	46	45	33
	\dot{V}_{A1}/L_1	5.8	3.6	4.7	2.3	3.4	1.7	2.8	3.8	3.8	3.5
	\dot{V}_{A2}/L_2			1.3	1.0	1.6	1.4	1.2	1.2	1.3	1.3
PaO ₂ mmHg	112.7	114.0	111.0	109.7	108.0	116.9	11.40	109.5	112.0	112.0	
血 液 ガ ス	PaO ₂ mmHg	94.5	96.5	91.0	103.0	87.0	98.0	90.3	97.3	96.7	94.9
	PH	7.47	7.47	7.43	7.45	7.44	—	7.46	7.43	7.43	7.45
	SaO ₂ %	97.1	96.0	96.6	97.3	96.5	96.2	96.8	96.1	96.2	96.5
	PaCO ₂ mmHg	35.5	32.3	32.5	31.9	33.9	—	35.7	34.6	36.2	34.3
	AaDo ₂ mmHg	18.2	17.5	20.0	6.7	21.0	18.9	23.7	12.2	15.3	17.1
短 絡 血 流 お よ び 分 布	Q _S %	2.2	3.8	3.2	3.4	1.9	2.4	2.6	2.8	2.2	2.7
	Q ₁ %	97.8	96.2	84.5	49.7	73.5	75.1	64.8	63.5	62.8	74.2
	Q ₂ %	0	0	12.3	46.9	24.6	22.5	32.6	33.7	35.0	23.1
換 流 氣 比 血	\dot{V}_{A1}/\dot{Q}_1	1.03	1.38	1.66	1.62	1.32	1.43	2.15	1.50	1.32	1.49
	\dot{V}_{A2}/\dot{Q}_2			0.73	0.92	0.79	0.82	0.74	0.94	0.85	0.83

%VC : %肺活量 (%)
 FEV1.0% : 1秒率 (%)
 FRC : 機残量 (cc)
 RV : 残気率 (%)
 CD : Clearance delay N₂ 洗出し遅延率 (%)
 L₁/L_T : 換気良好部肺気量
 全肺気量比 (%)
 L₂/L_T : 換気不良部肺気量
 全肺気量比 (%)
 $\dot{V}_{A1}/\dot{V}_{AT}$: 換気良好部換気量
 全換気量比 (%)
 $\dot{V}_{A2}/\dot{V}_{AT}$: 換気不良部換気量
 全換気量比 (%)
 \dot{V}_{A1}/L_1 : 換気不良部換気量
 // 肺気量比

\dot{V}_{A2}/L_2 : 換気不良部換気量
 // 肺気量比
 PaO₂ : 肺胞気O₂分圧 (mmHg)
 PaO₂ : 動脈血O₂分圧 (mmHg)
 PH : 動脈血PH
 SaO₂ : 動脈血O₂飽和度 (%)
 PaCO₂ : 動脈血CO₂分圧 (mmHg)
 AaDo₂ : 肺胞動脈血間O₂較差 (mmHg)
 Q_S : 解剖学短絡率 (%)
 Q₁ : 換気良好部血流率 (%)
 Q₂ : 換気不良部血流率 (%)
 \dot{V}_{A1}/\dot{Q}_1 : 換気良好部動脈
 血流比
 \dot{V}_{A2}/\dot{Q}_2 : 換気不良部動脈
 血流比

3) 解剖学的短絡率の測定

Piiper[®]の方法にならつて、肺胞 O₂ 分圧が十分高いときの肺胞動脈血間 O₂ 較差はすべて解剖学的短絡によるものとし、次式により求めた。

$$\frac{\dot{Q}_S}{Q_T} = \frac{C_c O_2 - C_a O_2}{C_c O_2 - C_v O_2} \times 100 = \frac{\alpha \cdot A_a D O_2}{C_c O_2 - C_v O_2} \times 100$$

- $\frac{\dot{Q}_S}{Q_T}$: 解剖学的短絡率 (%)
- CcO₂ : 終末肺毛細管血 O₂ 含量 (Vol %)
- CvO₂ : 混合静脈血 O₂ 含量 (Vol %)
- α : 血液の O₂ 溶解係数 (=0.0031)
- A_a DO₂ : 肺胞動脈間 O₂ 較差 (mmHg)

CcO₂-CvO₂ は Piiper[®]らにならつて 7.0Vol % と仮定した。

A_a DO₂ は肺胞 N₂ 洗出しが終了する極限の時点で (n=∞) で PA_{O₂t}∞ - Pa_{O₂t}∞ から求めた。すなわ

ち図3における直線を外挿法により延長し、FAN_{at}∞ = 0 となるとき PaN_{at}∞ から PaO₂t∞ を算出した。この計算はつぎのごとく行なつた。式(4)で m = ∞ とするとき、

$$\frac{\Delta P_{AN_2}}{\Delta P_{AN_2}} = \frac{P_{AN_{2tn}} - P_{AN_{2t\infty}}}{P_{aO_{2t\infty}} - P_{aO_{2tn}}}$$

ここで

$$P_{AN_{2t\infty}} = 0$$

であるから

$$P_{aO_{2t\infty}} = P_{AN_{2tn}} \cdot \frac{1}{\frac{\Delta P_{AN_2}}{\Delta P_{AN_2}}} + P_{aO_{2tn}}$$

となる。したがつて

$$A_a D O_2 = \{(P_B - 47) - P_{ACO_2}\}$$

$$- \{ P_{AN_{2tn}} \cdot \frac{1}{\frac{\Delta P_{AN_2}}{\Delta P_{AN_2}}} + P_{aO_{2tn}} \} \dots \dots \dots (7)$$

となる。

表 2

I 群 の 検 査 成 績

No.	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	
氏 名	小 ○	馬 ○	稲 ○	早 ○	二 ○	内 ○	角 ○	手 ○	中 ○	高 ○	
年令・性別	39 ♂	28 ♀	44 ♂	34 ♂	25 ♂	23 ♂	52 ♂	29 ♂	23 ♂	43 ♂	
換気諸量および肺内ガス分布	%VC	112	99	101	99	105	95	85	103	92	81
	FEV _{1.0} %	78	78	77	78	95	72	96	92	83	70
	FRCcc	3608	2113	2478	2004	2238	2663	1723	2820	3944	2064
	RV%	20	23	31	21	24	26	39	31	44	27
	CD%	6	21	31	34	21	25	22	51	40	26
	L ₁ /L %	24	69	26	42	31	27	35	34	46	25
	L ₂ /L _T %	76	31	74	58	69	73	65	66	54	75
	$\dot{V}_{A1}/\dot{V}_{AT}$ %	35	86	58	70	56	53	60	69	75	54
ガス分布	$\dot{V}_{A2}/\dot{V}_{AT}$ %	65	14	42	30	44	47	40	31	25	46
	\dot{V}_{A1}/L_1	1.9	1.9	10.5	2.6	3.0	3.9	4.5	3.4	2.6	4.1
	\dot{V}_{A2}/L_2	1.3	0.7	2.8	0.8	1.1	1.2	1.6	0.8	0.7	1.2
	PA _{O₂} mmHg	115.3	106.9	125.0	113.5	119.6	118.4	124.0	115.2	114.0	109.0
血液ガス	PaO ₂ mmHg	101.9	86.7	107.0	70.8	98.9	78.4	65.9	73.7	87.9	68.9
	PH	7.43	7.46	7.49	7.44	7.45	7.43	7.48	7.45	7.42	7.44
	SaO ₂ %	96.9	96.8	97.4	94.1	96.9	95.1	93.6	94.7	96.3	94.3
	PaCO ₂ mmHg	31.1	40.0	29.4	38.0	36.7	29.7	28.9	34.9	36.4	35.5
	AaDo ₂ mmHg	13.4	20.2	18.0	42.7	20.7	40.0	58.1	41.5	26.1	40.1
短絡血流分	Q _S %	2.4	3.9	2.3	5.4	2.3	3.0	4.8	4.0	3.8	1.9
	Q ₁ %	76.5	72.0	58.5	50.7	64.8	82.9	50.8	53.8	60.1	59.6
	Q ₂ %	21.1	24.1	39.2	43.9	32.9	14.1	44.4	42.2	36.1	38.5
換流気血	\dot{V}_{A1}/\dot{Q}_1	1.56	1.17	1.08	2.00	1.09	1.50	1.53	1.57	1.59	1.06
	\dot{V}_{A2}/\dot{Q}_2	0.81	0.67	1.00	1.02	0.70	0.95	1.17	0.75	0.88	0.78

検査成績

I 健康例および結核非手術例

健康例ならびに結核非手術例についての検査成績は表1~4に一括して示した。

1) 換気量および肺内ガス分布

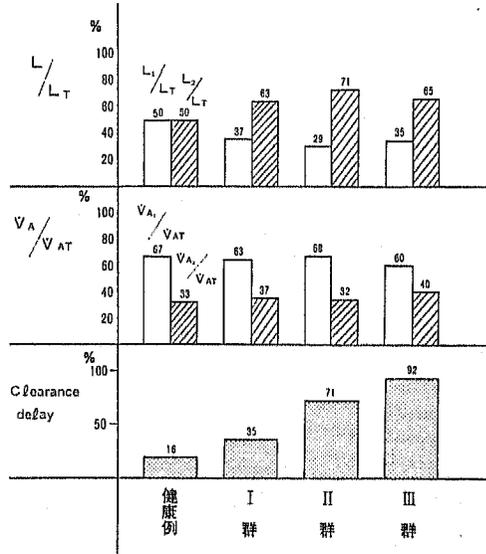
a) スパイロメトリー

健康例の%VCは85~127(平均102), 1秒率(FEV1.0%)は80~95(平均88)であつた。したがつて健康例のすべては, スパイロメトリー所見による前述の分類でI群に属した。II群, III群の%VCはそれぞれ34~111および38~76を示し平均71および55であつた。FEV1.0%はそれぞれ56~96(平均75)および45~54(平均49)であつた。この成績から, 各群における%VC, FEV1.0%の値はそれぞれほぼ同等の分布を示すものとみられる。機残量(FRC)の平均は健康例で2766ccを示し, I群で2451cc, II群で

20	21	22	23	平
○ 沢	武 ○	森 ○	鶴 ○	均
46 ♂	27 ♂	28 ♂	27 ♂	
86	135	104	84	99
74	88	77	87	82
2509	2624	1846	1685	2451
30	16	25	13	26
82	90	15	20	35
49	4	45	66	37
51	96	55	34	63
83	28	65	84	63
17	72	35	16	37
2.6	2.0	3.4	2.5	3.5
0.5	2.3	1.5	1.0	1.3
115.5	121.7	118.2	111.8	116.2
64.0	98.7	84.5	76.6	86.9
7.43	7.41	7.45	7.42	7.44
91.7	96.9	96.2	94.8	95.7
32.7	39.1	31.5	37.0	34.4
51.5	23.0	31.7	35.2	29.3
4.9	2.3	3.6	4.8	3.5
62.0	82.4	74.2	61.2	65.0
33.1	15.3	22.2	34.0	31.5
1.68	1.23	1.58	1.77	1.46
0.64	1.02	0.88	0.61	0.85

2014cc. III群で1982ccとなり各群間に大差をみないが, 残気率(RV%)では健康例の22%に対して, I群より順次26%, 29%, 40%と上昇を示した。

図4 肺内ガス分圧



b) 肺内ガス分布 (図4)

健康例においても, N₂ 洗出し遅延率 (clearance-delay) は0~36%(平均16%)を示し, 換気不良部(いわゆる slow space)の存在を認めたが, 肺結核患者ではI群よりIII群へ移るにしたがつて35%, 71%, 92%と高くなり, 閉塞性換気障害群で不均等化の増大がみられた。機残量に対する換気良好部の肺気量比(L₁/L_T)および換気不良部の肺気量比(L₂/L_T)についても, I群の37%および63%は健康例の50%および50%と大差がないが, III群では7%および93%を示す極端な例が出現し, 換気不良部の比較的増大が見られた。

全肺換気量に対する各部の肺換気量の比($\dot{V}_{A1}/\dot{V}_{AT}$, $\dot{V}_{A2}/\dot{V}_{AT}$)は健康例の67%および33%に対してI群では63%および37%, II群では68%および32%, III群では60%および40%となり, 平均値では大差をみとめないが, III群においては81~52%および19~48%(症例45, 47)と換気不良部の肺換気量の低下傾向を示すものの存在が注目された。また各部の単位肺気量当りの肺換気量の比(\dot{V}_{A1}/L_1 , \dot{V}_{A2}/L_2)は健康例の平均3.5および1.3に対して, I群では3.5および1.3, II群では4.3および1.8, III群では5.3および1.1となり, I群よりIII群に向つて次第に不均等化の増大を示した。

表 3

I 群 の 検 査 成 績

No.		24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36
氏 名		斉 ○	白 ○	星	杉 ○	吉 ○	小 ○	山 ○	出 ○	富 ○	岡 ○	須 ○	○池	中 ○
年 令・性 別		22 ♂	30 ♂	36 ♂	35 ♀	46 ♀	29 ♂	38 ♂	44 ♂	70 ♂	48 ♂	29 ♂	29 ♀	29 ♀
換気諸量および肺内ガス分布	%VC	108	72	59	66	72	79	54	76	67	77	73	45	40
	FEV1.0%	65	56	71	75	89	78	69	77	75	84	86	77	61
	FRCC	3222	2343	1743	1325	1517	2487	827	1998	1021	2427	1832	655	1152
	RV%	25	24	26	25	32	30	26	27	18	33	27	27	38
	CD%	80	77	74	20	49	14	69	29	48	27	62	245	173
	L1/LT%	20	10	23	3	23	35	16	35	55	32	48	31	13
	L2/LT	80	90	77	97	77	65	84	65	45	68	52	69	87
	$\dot{V}_{A1}/\dot{V}_{AT}\%$	78	51	70	69	59	53	57	61	83	59	81	92	70
	$\dot{V}_{A2}/\dot{V}_{AT}\%$	22	49	30	31	41	47	43	39	17	41	19	8	30
	\dot{V}_{A1}/L_1	4.0	5.2	4.7	8.4	5.2	1.7	4.9	2.8	2.6	1.5	1.0	1.3	13.2
\dot{V}_{A2}/L_2	1.7	2.5	2.8	8.9	1.0	0.8	2.4	0.9	0.6	0.5	0.8	0.9	3.6	
PaO ₂ mmHg	114.5	110.9	107.4	112.7	114.4	107.2	113.8	118.3	118.3	107.5	114.8	118.9	111.0	114.0
血液ガス	PaO ₂ mmHg	71.5	86.2	87.9	88.2	80.9	87.2	74.4	84.7	60.3	87.2	95.5	77.7	87.9
	PH	7.47	7.44	7.42	7.44	7.40	7.46	7.45	7.42	7.44	7.48	7.47	7.46	74.2
	SaO ₂ %	97.6	96.2	96.1	96.3	95.1	96.4	94.8	95.7	90.5	96.5	97.3	94.9	96.2
	PaCO ₂ mmHg	40.0	37.5	39.5	38.6	33.3	37.6	35.5	33.5	38.0	34.3	33.8	39.4	36.4
	AaDO ₂ mmHg	43.0	24.7	19.5	24.5	33.5	20.0	39.4	33.6	47.2	27.6	23.4	33.3	26.1
短絡血流分布	Q _S %	6.2	3.3	3.5	4.2	5.0	3.7	2.2	3.1	8.6	2.8	2.6	4.6	1.7
	Q ₁ %	44.9	76.0	74.4	51.0	6.3	35.0	75.7	47.6	69.5	48.7	74.0	68.8	86.4
	Q ₂ %	48.9	20.7	22.1	44.8	88.7	61.3	22.1	49.3	21.9	48.5	23.4	26.6	11.9
換気比血	\dot{V}_{A1}/\dot{Q}_1	1.81	1.15	1.18	1.61	1.37	1.53	1.25	1.19	1.26	1.25	1.62	1.34	1.69
	\dot{V}_{A2}/\dot{Q}_2	0.63	0.92	0.72	0.94	0.68	0.96	0.75	0.79	0.78	0.87	0.92	0.76	1.54

2) 血液ガス分析 (図5)

動脈血 O₂ 分圧 (PaO₂) は健康例の平均 94.9mmHg に対して、I 群では 86.9mmHg, II 群では 81.9mmHg, III 群では 75.8mmHg となり、とくに III 群における低 O₂ 分圧が注目をひいた。動脈血 PH は健康例で 7.45, I 群で 7.44, II 群で 7.44, III 群で 7.45 といずれも正常範囲にあつた。したがって解離曲線から推測されるように、動脈血 O₂ 飽和度 (S_a O₂) は健康例で 96.5%, I 群で 95.7%, II 群で 95.3%, III 群で 94.8% と順次下降を示し、とくに III 群では軽度とはいえ明らかな低下がみられた。

動脈血 CO₂ 分圧 (PaCO₂) は健康例で 34.3mmHg, I 群で 34.4mmHg, II 群で 36.6mmHg, III 群で 36.3mmHg を示し、肺結核例とくに III 群でも CO₂ 蓄積の傾向は認められなかつた。

3) 換気血流比の肺内分布 (図6)

健康例の換気良好部における換気血流比 (\dot{V}_{A1}/\dot{Q}_1), 換気不良部における換気血流比 (\dot{V}_{A2}/\dot{Q}_2) の平均はそれぞれ 1.49, 0.83 を示し、換気不良部の \dot{V}_A/\dot{Q} も換気良好部における \dot{V}_A/\dot{Q} の 1/2 以下には落ちない。肺結核例も I 群で 1.46 および 0.85, II 群で 1.33 および 0.85, III 群で 1.79 および 0.87 を示し、健康例との間に大差を認めなかつた。III 群においても \dot{V}_{A2}/\dot{Q}_2 の低下をみない点かとくに注目された。

4) 肺内血流分布 (図7)

換気不良部への肺血流率 (\dot{Q}_2/\dot{Q}_T) は健康例の 23.1% に対して、I 群, II 群, III 群ではそれぞれ 31.5%, 40.4% および 32.2% を示し、換気良好部への肺血流率 (\dot{Q}_1/\dot{Q}_T) は健康例で 74.2%, I 群, II 群, III 群で 65.0%, 55.6%, および 63.7% となつた。すなわち、III 群では換気不良部への血流が抑えられ、この分は換気良好部へ向けられる傾向を示唆した。

37	38	39	40	41	42	平
石	玉	安	孫	○	岡	均
○	○	○	孫	村	○	
34	30	27	31	39	82	
♂	♂	♂	♂	♂	♂	
34	92	111	82	73	72	71
96	58	59	83	91	78	75
1272	3615	3116	2307	3340	2070	2014
41	28	30	29	39	34	29
93	28	43	135	27	55	71
7	50	55	42	46	16	29
93	50	45	58	54	84	71
59	75	75	85	70	53	68
41	25	25	15	30	47	32
9.0	2.1	2.2	5.0	1.9	4.6	4.3
3.2	0.7	0.6	0.6	0.7	0.8	1.8
103.2	116.0	114.2	118.2	118.2	105.5	112.7
82.0	76.5	89.3	94.3	82.0	62.0	81.9
7.43	7.44	7.44	7.46	7.44	7.41	7.44
95.5	95.0	96.4	9.71	95.6	91.4	95.3
38.4	36.9	34.4	31.8	36.5	40.0	36.6
21.2	39.5	24.9	23.9	36.2	43.5	30.8
4.5	4.0	3.9	1.2	5.1	7.0	4.0
66.6	80.9	65.6	23.5	52.5	9.3	55.6
28.9	15.1	30.8	75.3	42.4	83.7	40.4
1.08	1.16	0.97	1.57	1.38	1.09	1.33
0.76	1.54	0.82	0.80	0.52	0.82	0.85

5) 解剖学的短絡率 (\dot{Q}_S / \dot{Q}_T) (図8)

\dot{Q}_S / \dot{Q}_T は健康例の1.9~3.8% (平均2.7%) に比べ、I群、II群、III群ではそれぞれ1.9~5.4% (平均3.5%), 1.2~8.6% (平均4.0%) および2.8~5.9% (平均4.1%) となり、各群いずれも増大を示した。

6) 肺胞動脈血間 O_2 較差 (図9)

肺胞動脈血 O_2 較差は健康例の平均 17.1mmHg に対して、I群では 29.3mmHg、II群では 30.8mmHg、III群では 36.4mmHg となり、結核例で明らかな増大が見られた。

II 一側肺全切除例

手術例における術前ならびに術後の検査成績は表5に一括して示した。

1) 換気諸量および肺内ガス分布

%VCの平均値は術前の57から術後の41に低下したが、FEV1.0%の平均値は術前71%で術後にも著し

図5 動脈血ガス分布

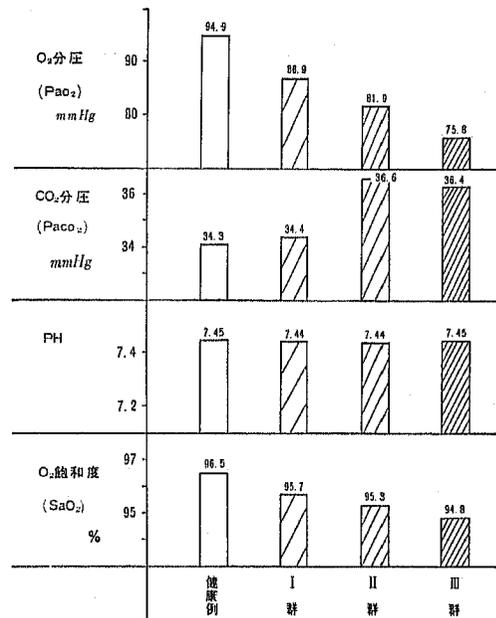
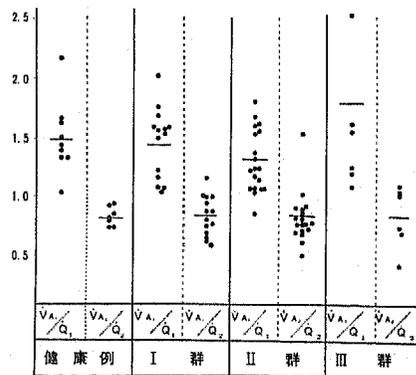


図6 換気血流比 (\dot{V}_A / \dot{Q}) の肺内分布



\dot{V}_{A1} / \dot{Q}_1 換気良好部の換気血流比

\dot{V}_{A2} / \dot{Q}_2 換気不良部の換気血流比

図7 肺内血流分布 (\dot{Q}_1 / \dot{Q}_T), (\dot{Q}_2 / \dot{Q}_T)

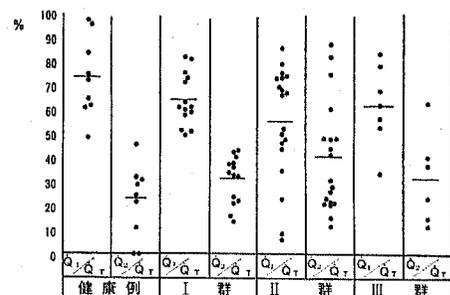
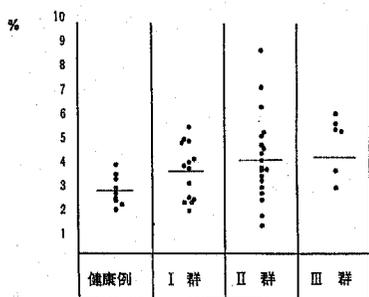


表 4 III 群 の 検 査 成 績

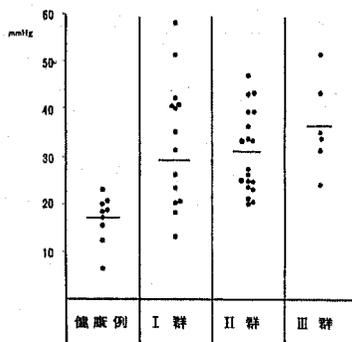
No.		43	44	45	46	47	48	平
氏 名		松 ○	小 ○	亀 ○	青 ○	西 ○	三 ○	均
年 令・性 別		32 ♀	63 ♂	62 ♂	45 ♀	29 ♀	36 ♂	
換 気 諸 量 お よ び 肺 内 ガ ス 分 布	%VC	60	38	76	56	47	50	55
	FEV1.0%	45	50	48	50	48	54	49
	FRCcc	1190	2045	2188	1628	3124	1714	1982
	RV%	25	51	27	44	54	38	40
	CD%	51	131	162	102	73	35	92
	L ₁ /L _T %	13	11	29	7	39	42	35
	L ₂ /L _T %	87	89	71	93	61	58	65
	$\dot{V}_{A1}/\dot{V}_{AT}\%$	52	64	81	60	77	70	60
	$\dot{V}_{A2}/\dot{V}_{AT}\%$	48	36	19	40	23	30	40
	\dot{V}_{A1}/L_1	4.9	9.4	3.0	6.3	5.2	2.6	5.3
\dot{V}_{A2}/L_2	2.5	2.0	0.3	1.5	0.9	0.8	1.1	
PaO ₂ mmHg	111.6	112.7	118.8	106.9	114.7	109.0	112.2	
血 流 ガ ス	PaO ₂ mmHg	76.5	88.7	67.8	63.5	80.6	77.7	75.8
	PH	7.47	7.43	7.44	7.53	7.45	7.40	7.45
	SaO ₂ %	95.2	96.2	93.4	93.9	95.1	94.7	94.8
	PaCO ₂ mmHg	38.0	38.2	37.5	28.0	39.0	37.3	36.3
短 び 血 流 分 布	AaDo ₂ mmHg	35.1	24.0	51.0	43.4	34.1	31.3	36.4
	Q _S %	3.5	2.8	5.9	5.2	5.5	5.2	4.1
	Q ₁ %	84.5	34.2	69.5	79.5	53.8	57.0	63.7
換 気 比 血	Q ₂ %	12.0	63.0	24.6	15.3	40.7	37.8	32.2
	\dot{V}_{A1}/Q_1	1.21	1.55	1.26	1.10	1.63	2.52	1.79
	\dot{V}_{A2}/Q_2	1.10	0.75	0.43	1.06	1.03	0.72	0.87

図 8 解剖学的短絡率 (\dot{Q}_S/\dot{Q}_T)



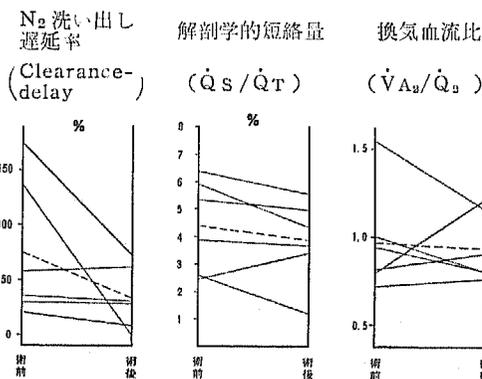
い変動を示さなかつた。機残量も術前の1599ccに対して術後は1612cc示をしほとんど不変であつたが、残気率は術前の34%から術後の39%へとわずかな増加を示した。機残量に対する換気良好部の肺気量比(L₁/L_T)は術前の25%から術後の36%へと増大し、した

図 9 肺胞動脈血間 O₂ 較差 (A-aDo₂)



がつて換気不良部の肺気量比(L₂/L_T)は術前の75%から術後64%へと減少した。全肺胞換気量に対する換気良好部の肺胞換気量比($\dot{V}_{A1}/\dot{V}_{AT}$)は、術前の55%から術後の58%へとわずかながら上昇をみせ、逆

図10 一側肺全切除術 (術前・術後) 成績

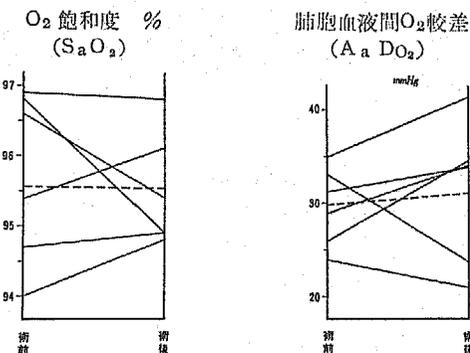


に換気不良部の肺胞換気量比 ($\dot{V}_{A_2}/\dot{V}_{AT}$) は術前の45%から術後の42%へと低下した。換気良好部における単位肺気量当りの肺胞換気量 (\dot{V}_{A_1}/L_1) は、術前の6.3から術後の5.8へと低下したが、換気良好部におけるそれ (\dot{V}_{A_2}/L_2) は術前の1.6から術後の1.5と著変を示さなかつた。すなわち、全体的にみて換気の不均等化が是正され、事実 clearance delay も術前の75%から術後の34%へとほぼ半減した (図10)。

2) 血液ガス

肺胞 O_2 分圧は術前の 114.7mmHg に対して術後は 115.2mmHg となり両者間に著変を認めず、したがって肺胞動脈血間 O_2 較差も術前の 29.6mmHg に対して術後は 31.4mmHg で、平均では両者間に大きな変動を見なかつた (図11)。

図11 一側肺全切除術 (術前・術後) の血液ガス



動脈血 O_2 飽和度の平均値も術前後でほとんど不変であつたが荒蕪肺に対して肺全切除術をおこなつたにもかかわらず、症例51のごとく、低 O_2 血症の改善をみないものが注目された。PHは術前の7.44に対して

術後7.41を示し、その変動は顯著でなかつた。動脈血 CO_2 分圧も術前の 35.8mmHg から術後の 37.4mmHg へとわずかな増加を示したのみであつた。以上のごとく肺全切除における血液ガスの変動は少数例を除いて著しくなかつた。

解剖学的短絡率 (\dot{Q}_S/\dot{Q}_T) は症例53を除く全例とも低下を示し、平均で術前の4.4%から術後の3.9%へと減少した。症例53ではわずかな短絡率の上昇をみたものの、明らかな低 O_2 血症の増強はみられなかつた。

肺内血流の分布状態をみると、換気良好部へ向う血流 (\dot{Q}_1/\dot{Q}_T) は術前の45.5%から術後62.7%へ上昇し、逆に換気不良部へ向う血流率 (\dot{Q}_2/\dot{Q}_T) は術前の50.1%から術後33.4%に低下した。

3) 換気血流比の分布

換気良好部における \dot{V}_{A_1}/\dot{Q}_1 は術前の1.78から術後の1.55、換気不良部における \dot{V}_{A_2}/\dot{Q}_2 は術前の0.97から術後の0.94へと変化し、いずれも著しい変動を示さなかつた。

考 按

1) 換気血流比測定史

肺の局所的換気血流比についての報告は少なく、換気血流分布関係に関する研究の多くは肺全体としての動脈血化機能を最終点で追求したものであつた。1949年 Riley^⑦らは Bohr の equation を用いて換気血流比の不均一性に関する dead space like effect を生理学的静脈混合として量的に示したが、この方法では間接に換気血流比の不均一性を窺いうるだけである。最近になつて West ら^⑧(1957), Briscoe ら^⑨(1960) および Rahn^⑩(1961) により、部位的、時間的換気血流比の分析的な試みの端緒が開かれた。とくに Briscoe ら^⑨は肺気腫例について、機残量の66%が換気不良部で占められ、この部は心搏出量の52%で灌流されていることを明らかにした。このほか Martin ら^⑪は broncho spirometry を用いて、各肺葉の換気量と O_2 摂取量とが肺血流量にほぼ比例することを利用し、間接的に肺内各部の血流量を分離測定した。彼らは上葉の \dot{V}_A/\dot{Q} が 3.1、下葉のそれは 0.92であると報告している。現在は放射性ガスを用いる試みもさかんになり^{⑫~⑭}、この方法によつて正常肺の換気血流比は肺上野に向つて上昇し、坐位で肺尖部の血流は比較的が少ないことが明らかにされつつある。たとえば West^⑮は肺尖3.3、肺底部0.6の数値を挙げている。

2) 換気血流比測定上の問題点

表 5

一側肺全切除前後における検査成績

No.		49		50		51		52		53	
氏名・性別		竹○・♂		赫○・♂		松○・♀		三○・♂		中○・♀	
年令		18		31		32		36		30	
所見	術前	術後	術前	術後	術前	術後	術前	術後	術前	術後	
											
経過期間(日)		5	90	15	92	22	118	21	147	8	152
換気諸量および肺内ガス分布	%VC	52	43	80	49	60	51	50	40	40	37
	FEV1.0%	96	94	83	89	45	42	54	52	61	67
	FRCcc	1671	1150	2307	2100	1190	1509	1714	1726	1152	1560
	RV%	35	24	29	40	25	39	38	50	38	32
	CD%	20	8	135	0	58	62	35	31	173	74
	L ₁ /L _T %	14	19	43	100	14	51	43	16	14	15
	L ₂ /L _T %	86	81	57	0	86	49	57	84	86	85
	$\dot{V}_{A1}/\dot{V}_{AT}\%$	37	34	85	100	36	84	70	40	58	60
	$\dot{V}_{A2}/\dot{V}_{AT}\%$	63	66	15	0	64	16	30	60	42	40
	\dot{V}_{A1}/L_1	8.4	6.2	4.9	6.5	4.9	2.2	2.6	3.6	13.2	9.7
\dot{V}_{A2}/L_2	2.3	2.8	0.6		1.9	0.4	0.8	1.2	2.9	1.9	
PaO ₂ mmHg	113.9	112.0	118.2	115.0	111.5	116.1	109.0	113.1	121.1	122.0	
血液ガス	PaO ₂ mmHg	80.9	88.2	94.3	94.0	76.5	74.8	77.7	79.3	95.0	87.6
	PH	7.44	7.44	7.42	7.41	7.45	7.47	7.43	7.40	7.44	7.32
	SaO ₂ %	95.4	96.1	96.9	96.8	94.0	94.8	94.7	94.9	96.6	95.4
	PaCO ₂ mmHg	37.6	36.0	31.8	33.7	37.8	34.0	37.3	42.5	33.0	38.4
AaDo ₂ mmHg	33.0	23.8	23.6	21.0	35.0	41.3	31.3	33.8	26.1	34.4	
短絡血流量および換気比	Q _S %	6.4	5.5	2.6	1.2	5.9	4.4	5.3	5.0	2.5	3.4
	Q ₁ %	14.0	31.4	23.2	98.8	81.5	84.6	37.9	56.6	85.6	51.8
	Q ₂ %	79.6	63.1	74.2	0	12.6	11.0	56.8	38.4	11.9	44.8
換気比	\dot{V}_{A1}/\dot{Q}_1	1.08	0.92	2.76	1.21	1.12	1.09	2.53	3.43	1.64	1.65
	\dot{V}_{A2}/\dot{Q}_2	0.94	0.81	0.80		0.81	0.91	0.72	0.76	1.54	1.17

換気/肺気量比 (\dot{V}_A/L), 換気血流比 (\dot{V}_A/\dot{Q}) の肺内分布が連続的であるか不連続的であるかについては, 現在なお問題のあるところである。また連続的であるとしても, 度数分布曲線がどのような形状を示すかは個体差がある。Finley の方法ではこの肺内分布を大まかに2~3分した各部の平均をみるから, 局所的ガス交換の分析とはいいながらも精密さにはおのずから限度がある。しかし換気不良部のガス交換を追求する点で, 低 O₂ 血症に対する影響の一端は窺い知ることができる。すなわち Riley の方法により拡散因子から分離された静脈混合因子を, 更に細分して

量的な検討を行なうことが可能である。Emmanuel¹⁸⁾ も慢性肺気腫につき運動時の \dot{V}_A/\dot{Q} の分析を試みているが, 彼らの用いた試行錯誤法にくらべて Finley の方法はより直接的であるといえる。

電極法を用いても, 高い血液 O₂ 分圧の正確な測定は低分圧の場合に比して困難である。これは大気の 150mmHg 前後に対して N₂ 洗い出し終了近くでは動脈血 O₂ 分圧が 400mmHg をこえるから較差が大きく, 採血時および測定までに気泡への気化や血液の代謝による O₂ の喪失¹⁹⁾ が起こりやすいからである。

このため本研究では採血時に気泡が混入せぬようと

54		平均	
小 O · δ			
55			
術前	術後	術前	術後
			
7	90	13	114
60	26	57	41
87	77	71	70
1560	1627	1599	1612
36	50	34	39
30	29	75	34
20	15	25	36
80	85	75	64
42	28	55	58
58	72	45	42
3.7	6.3	6.3	5.8
1.3	1.3	1.6	1.5
115.0	113.0	114.7	115.2
86.0	79.0	85.1	83.8
7.46	7.42	7.44	7.41
96.8	95.1	95.7	95.5
37.5	40.0	35.8	37.4
29.0	34.0	29.6	31.4
3.9	3.7	4.4	3.9
30.7	52.8	45.5	62.7
65.4	43.5	50.1	33.4
1.53	1.02	1.78	1.55
1.00	0.80	0.97	0.94

くに留意し、採血直後に測定をおこなうことを原則とした。その結果、本成績における健康例の解剖学的静脈混合の算定値からすると、 O_2 分圧測定はほぼ満足すべきものと思われる。また Finley の方法では肺胞 N_2 分圧の減衰率さえ正確ならば、 \dot{V}_A / \dot{Q} の算定値は解剖学的短絡の多寡に影響されない。したがって $PaO_{2,t}$ の大小は \dot{V}_A / \dot{Q}_2 の高低と無関係であり、 PaO_2 の誤差も \dot{V}_A / \dot{Q}_2 の精度にそれほど大きくひびかない。Finley⁶⁾ は動脈血 O_2 分圧を連続的に直記しているが、その方法の繁雑さと困難さのために著者は3時点での測定とした。彼の成績では肺胞 N_2 分

圧が指数函数的減衰を示しているから理論的には2時点での採血で十分であるが、3点が一直線上に並ぶことを計算により確かめた。この検定により \dot{V}_A / \dot{Q} の算定値にいつその正確さが期待される。

3) 肺結核症における低 O_2 血症

臨床的にみられる低 O_2 血症の原因として、一般に(1)肺胞低換気、(2)拡散障害、(3)静脈混合(a)生理学的短絡、(b)解剖学的短絡があげられている。

本成績によれば、結核例には軽度ながらも明らかな動脈血 O_2 飽和度の低下を示すものがみられた。この知見はすでに多くの学者により指摘されている²¹⁾。

この原因をえられた成績にもとずいて考察すると、まず各群とも肺胞気組成に異常はみられず、肺胞 O_2 分圧の低下、肺胞 CO_2 分圧の上昇を示すものはなかった。したがって肺結核においては著しい肺胞低換気を呈するものは少なく、肺胞 O_2 分圧低下による低 O_2 血症は一般論として考えにくい。

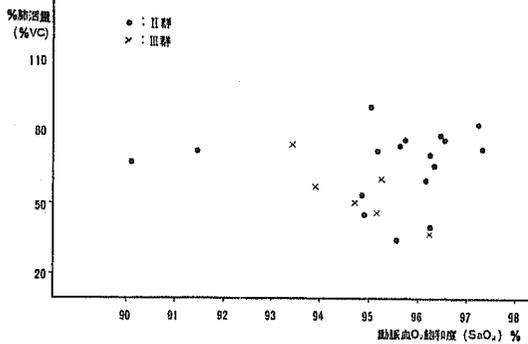
つぎに拡散については、肺胞気 O_2 の肺毛細管への移行が一般に接触時間の前半部でほとんど完了してしまう²²⁾。Bohr の積分値²³⁾もこの現象を明確に示しており、大気吸入時における肺胞 O_2 拡散はかなりの時間的な余裕をもつて行なわれるといえる。このため肺拡散能力の低下が著しくとも、大気吸入時における動脈血の不飽和はおこりにくいとされている²⁴⁾。拡散障害における低 O_2 血症の増強は吸入気 O_2 、したがって肺胞気 O_2 が低くなつて始めて著明になる²⁵⁾²⁶⁾。肺結核においては原則として拡散能力と肺活量との間に平行関係がみられる²⁷⁾から、%VC 低下例はその程度に応じた拡散障害を有するものと考えられる。また正常のスパイロメトリー所見を呈する I 群には低 O_2 血症の頻度が低かつた。つまり低 O_2 血症は多少にかかわらず換気障害、拡散障害をとまう例に著しく、これらが肺結核における低 O_2 血症の必要条件と考えられたが、逆に拡散障害例のすべてが必ずしも動脈血の不飽和を示さず、少なくとも換気障害例において肺活量と動脈血 O_2 飽和度との間には平行関係がみられなかった(図12)。

このように肺胞 O_2 拡散の態度から、肺結核の低 O_2 血症において演ずる拡散障害の役割は大きくないことが理論的にもうかがえるが、事実、拡散の著しい低下を思わせる例でもしばしば正常の O_2 飽和度を認めた。

低 O_2 血症の残る要因は静脈混合であるが、これを生理学的短絡および解剖学的短絡に分け、測定成績にもとづいて以下おのおのの影響を検討する。

4) 生理学的短絡による低 O_2 血症

図12 換気障害群 (I, II群) の%肺活量と動脈血 O₂ 飽和度との関係 %VC と SaO₂)



生理学的短絡は、肺の局所的な換気不良部に肺胞 O₂ 分圧の低下部分が生じ、この部を通過する肺毛細管血の動脈血化が不完全なためにおこる。O₂ 解離曲線によると O₂ 分圧上昇による肺毛細管血 O₂ 飽和度の上昇は微小である。したがって局所的肺毛細管血 O₂ 飽和度の低下は、CO₂ 上昇と異なり他の部の過換気によつて代償できない。

Rahn and Fenn^⑧によると肺胞 O₂ 分圧 (PAO₂) は動脈血 O₂ 含量 (CaO₂) および混合静脈血 O₂ 含量 (CvO₂)、吸入気 O₂ 分圧 (PIO₂)、吸入気 N₂ 分圧 (PIN₂)、肺胞 CO₂ 分圧 (PACO₂)、 \dot{V}_A / \dot{Q} によつて決定され、つぎのような関係式が示されている。

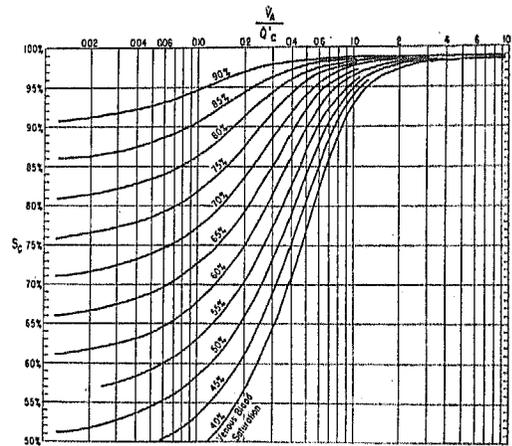
$$\frac{\dot{V}_A}{\dot{Q}} = \frac{(CaO_2 - CvO_2) - (1 - F_{IO_2}) \times 0.863}{PIO_2 - (PACO_2 - F_{IO_2}) - PAO_2}$$

Briscoe^⑨はこの理論を展開し、大気吸入時における \dot{V}_A / \dot{Q} が終末肺毛細管血の飽和度及ぼす影響を图示した (図13)。これは \dot{V}_A / \dot{Q} と混合静脈血 O₂ 飽和度 (SvO₂) とにより、肺胞を去る動脈血 O₂ 飽和度 (ScO₂) が決定されることを示すものである。安静時においては SaO₂ - SvO₂ がほぼ一定であり、Briscoe らは25%としているから、SaO₂ を90%以上にするとき SvO₂ は65%を下ることはない。図中に示されている65%曲線をたどると、 \dot{V}_A / \dot{Q} が0.7以上であれば ScO₂ は95%をこえる。いま解剖学的短絡を考慮の外におき、換気良好部の肺胞を支る毛細管血の飽和度を Sc₁、換気不良部のそれを Sc₂ とするとき、混合動脈血 O₂ 飽和度 (SaO₂) は

$$SaO_2 = Sc_1 \cdot \frac{\dot{Q}_1}{\dot{Q}_T} + Sc_2 \cdot \frac{\dot{Q}_2}{\dot{Q}_T}$$

と与えられる^⑩。したがって Sc₂ が95%より高ければ \dot{Q}_2 / \dot{Q}_T が100%であっても SaO₂ は95%を下らない。このように、 \dot{V}_A / \dot{Q} の不均等分布が存在しても

図13



大気吸入時、静脈血 O₂ 飽和度別 終末肺毛細管と \dot{V}_A / \dot{Q} との関係 PH7.4, 肺胞 CO₂ 分圧 40mmHg とする (Briscoe, W. A. J. Appl. Physiol. 14: 294, 1959 より引用)

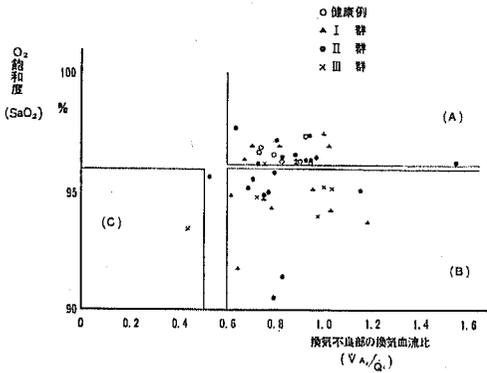
肺内のすべての部で \dot{V}_A / \dot{Q}_2 の値が0.7を下らなければ、生理学的短絡の効果は大きくない。これに反して \dot{V}_A / \dot{Q}_2 が0.5を下まわると急激に Sc₂ の低下度が強くなり、肺内にこのような部分が存在するとき短絡の効果は大きくあらわれる。

上式から明らかのように、生理学的短絡効果を増強するもう一つの因子は \dot{Q}_2 / \dot{Q}_T の上昇である。 \dot{V}_A / \dot{Q}_2 の低下による Sc₂ の下降が軽度であつてもこの部への血流が多ければ、SaO₂ は低値に傾き不飽和の程度は強くなる。しかしこのとき \dot{Q}_2 の増大にともなつて \dot{V}_A も増大しない限り \dot{V}_A / \dot{Q}_2 の低下をきたすから、 \dot{Q}_2 / \dot{Q}_T の上昇が一義的な意味をもつことは少ないと考えられる。

本成績ではⅢ群においてすら \dot{V}_A / \dot{Q}_2 の著しい低下を示すものは稀であつた。Finley^⑪は健康例の \dot{V}_A / \dot{Q}_2 を0.84~1.00 (平均0.92)、肺気腫のそれは0.11~0.56 (平均0.3) と報じているが、著者のⅢ群でえられた0.85は健康群の0.83とともに彼の示した健康例の成績に近い。Ⅲ群においては \dot{V}_A / L に関して換気相ではかなりの不均等化を認めたにもかかわらず、換気不良部への血流は少ないため \dot{V}_A / \dot{Q} が正常近くに保たれていることは注目に値する。肺結核におけるこの傾向は慢性肺気腫における諸家の成績^{⑥⑩⑪⑫}と対照的であり、肺結核では、 \dot{V}_A / \dot{Q} 比の均等分布が低 O₂ 血症の程度と頻度を減じていると考えられる。

\dot{V}_A / \dot{Q} と動脈血 O₂ 飽和度との関係は図14のごと

図14 酸素飽和度と換気不良部の換気血流比との関係 (SaO_2 と $\dot{V}A_2/\dot{Q}_2$)



く示される。領域A, B, Cにはそれぞれ健康例, 解剖学的短絡例, 生理学的短絡例が分布するはずであるが, 領域Aには健康例とI群とが, B群にはII群とIII群とが集中しており, Cに位置するのは1例にすぎない。以上のごとく肺結核例における動脈血 O_2 飽和度の低下に対して, 換気血流分布の不均一性による生理学的短絡の演ずる役割も少ないものと結論できる。

生理学的短絡の増大しない理由としてはつぎのようなものが考えられる。すなわち病巣部への血流は肺動脈の狭小化, 閉塞性変化²²⁾などによつて減少され, たとえ血液が残存してもその流量は少ないものと思われる。また気管支動脈肺動脈間の吻合が前毛細管性に発達し, 高圧系の血流が低圧系の肺動脈血流を抑えて動脈混合の流入を阻止する²³⁾ことも一因であろう。

5) 解剖学的短絡による低 O_2 血症

換気のない ($\dot{V}A = 0$) 部分に血流があると $\dot{V}A/\dot{Q} = 0$ となり, この部では肺毛細管血 O_2 飽和度が混合静脈血 O_2 飽和度と等しくなるので, 短絡血流量 (\dot{Q}_s) がそのまま動脈血 O_2 飽和度低下の程度を反映する。

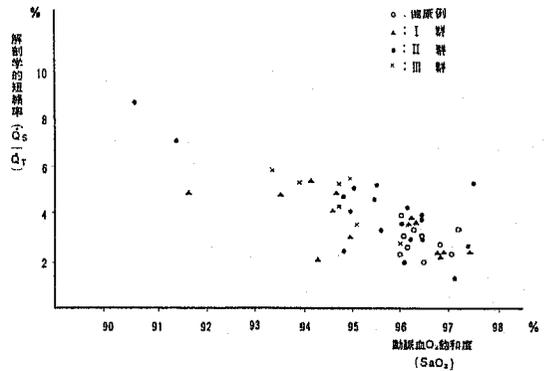
解剖学的短絡は 1) 心, 大血管系の奇形, 2) 気管支血管系からの静脈血の流入, 3) 他の血管系からの静脈血の肺静脈, 左房および左室への流入 (Thebesius 静脈, 門脈副行路など), 4) 肺動静脈短絡などによりおこる。この解剖学的短絡は肺結核をはじめ, 肺化膿症, 肺膿瘍, 気管支拡張症, 気管支瘤などの肺疾患^{24)~26)}で増大することが報告され, その多くはすでに病理学的にも確認されている。

正常人における短絡率の値は報告者により多少の差はあるが, Chidsey ら²⁷⁾は3%, Lassen ら²⁸⁾は1.1% Piiper²⁹⁾は1.7%, Lenfant³⁰⁾は1.5%としている。また Cole and Bishop³¹⁾は20~29才 (4例)の

平均0.8%に対して, 50~59才 (4例)では平均1.9%であるとし, 高齢者における解剖学的短絡の増大傾向を指摘している。Lenfant³⁰⁾は各種肺疾患例の平均は2.8%とし, 正常例の平均1.5%に対してほぼ倍加することを述べている。

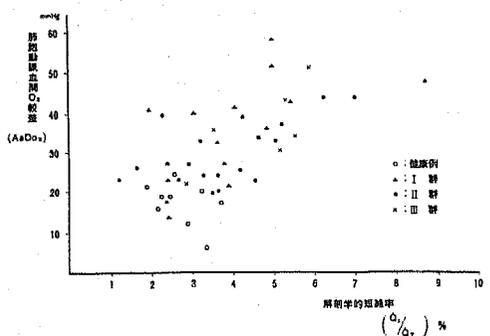
本研究の成績では健康例で2.9%, I群で2.9%, II群で4.0%, III群で4.1%を示し, 健康例における値が諸家の報告にくらべてやや高いが, II群, III群における増大が明らかに認められた。すなわち解剖学的短絡の増大は換気障害例でのみ認められ, その程度は必ずしも著しくなく, 正常の2倍までに至らなかった。

図15 動脈血 O_2 飽和度と解剖学的短絡率との関係 (SaO_2 と Q_s)



解剖学的短絡と動脈血 O_2 飽和度との間には図15のごとく, 全体として逆相関の傾向が認められた。すなわち動脈血 O_2 飽和度が94%に満たない6例は常に解剖学的短絡の上昇をともなつた。解剖学的短絡と肺動脈血 O_2 較差との関係は図の16のごとくで, 両者間に順相関の傾向がみられた。本成績では高度の換気障害

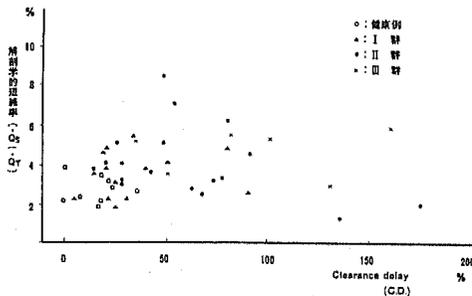
図16 肺動脈血間 O_2 較差と解剖学的短絡率との関係 ($AaDo_2$ と Q_s/\dot{Q}_T)



をとまなりⅢ群でも肺胞 O_2 分圧に変化がみられなかつたため、 $AaDO_2$ の拡大は Pao_2 の低下によるとみなされる。したがつて図16のごとき関係は図15の傾向から容易に推測されるところである。

解剖学的短絡と N_2 洗い出し遅延率との間には図17のごとく一定の関係がみられなかつた。つまり、解剖学的短絡の増大には既述のとおり換気障害の共存が確認されたが、ガス分布障害度には無関係であると思われる。

図17 Clearance delay と解剖学的短絡率との関係 (C. D.) (\dot{Q}_S / \dot{Q}_T)



以上のような成績から、肺結核における低 O_2 血症には解剖学的短絡の増大が決定因子と考えられる。生理学的短絡を無視すると、式(6)にならつて動脈血 O_2 飽和度は次式で示される。

$$Sao_2 = ScO_2 \left(1 - \frac{\dot{Q}_S}{\dot{Q}_T} \right) + Svo_2 \left(\frac{\dot{Q}_S}{\dot{Q}_T} \right)$$

ここで $Sc = 97\%$, $Svo_2 = Sao_2 - 25 (\%)$ と仮定

し、 $\frac{\dot{Q}_S}{\dot{Q}_T}$ から Sao_2 を算出するとこの理論値は実測値に近い値をとる。このことから、表示の肺結核例における動脈血 O_2 飽和度の低下は解剖学的短絡の増大のみにより説明しうる。

6) 手術前後の比較

一側肺全切除後における肺機能の推移に関してはこれまでも多くの報告がみられ^{45)~48)}, Gaensler and Strieder⁴⁹⁾ や Courmand⁴³⁾ らによれば術後3カ月を経過すると検査成績はほぼ固定化し術前に比して明らかな改善を示すものが多いという。とくに Courmand らはこの改善を換気、肺血流、拡散の3面から分析的に示した。

著者の成績ではまず肺気量の面で、荒蕪肺に対する肺全切除にもかかわらず術前の平均%VCは57から術後には41に減少したことが注目された。その原因は対側における換気運動の抑制が主なるものと解される。

事実%VCの激減をみた症例54では、対側の胸腔内に浸出液の出現を確認し横隔膜癒着が証明された。しかし術後の肺胞 O_2 分圧はほぼ不変であり、肺気量変化も肺胞低換気、過換気をもたらさなかつた。

clearance delay が術前の76%から術後の34%に減少したことは不均等換気の好転を意味する。瀬川ら⁴⁶⁾ もガス分布の改善を認めている。clearance delay の評価には%VCの減少を考慮すべきであるが、その影響は clearance delay を半減するほど大きいものとは思われない⁴⁶⁾。むしろ L_1/L_T の上昇(術前の25から術後の36)によつて実証されるとおり、換気不良部の切除による直接の影響として肺内ガス分布が正常化したとみるべきであろう。

術前における \dot{V}_{A_2}/\dot{Q}_2 の値はすべて0.7以上であるため生理学短絡の可能性は少ない。つまり換気血流分布は術前でも正常に近いから、術後に上記のごときガス分布状態の改善がみられても血液相への影響は少ないと考えられる。動脈血 O_2 飽和度の変動は少なかつたが、術後に上昇を示した症例では解剖学的短絡の減少をみとめ(症例49, 51)これらの例では無効の血流が残存する荒蕪肺を切除することによつて短絡が減少し、その結果動脈血 O_2 飽和度の上昇をきたしたと考えられる。しかし反面、術後に低 O_2 血症の改善も短絡の減少も示さない例(症例52)が認められた。この例では解剖学的短絡を荒蕪肺の病巣部のみに求めることはできず、他の部における無効血流も想定せざるをえない。広汎な肺結核病巣は肺血管床を減少させるから左心搏出量と同量であるべき肺血流量を保持するためには、右心血管系の減圧機構として予備血管床を開く必要を生ずる。この場合開く血管系がガス交換にあずかなければ、その部の血流はすべて解剖学的短絡の増大となつて現われるはずである。しかもかかる血流が切除肺内に存在しない限り解剖学的短絡は術後にも減少しない理である。このような可能性は解剖学直短絡の複雑さを物語っているが、短絡部位についての直接的証明はいまなおえられていない。

以上の成績から生理学的静脈混合は肺全切除例のガス交換に対して大きな影響を与えているとは考えられず、むしろ解剖学的静脈混合の役割がここでも重視された。

結 論

肺全切除例6例を含む肺結核患者45例と健康者9例を対象にして、換気血流比の肺内分布と解剖学的短絡との面から低 O_2 血症の要因を分析的に追求し、つぎの結論をえた。

- 1) 正常のスパイロメトリー所見を有する肺結核例では、健康者とほぼ同様な成績がえられた。
- 2) 拘束性もしくは閉塞性の換気障害を有する例では、低 O_2 血症の存在がみられたが程度の強いものは稀であり、動脈血 O_2 飽和度の下限は90.5%であった。また動脈血 O_2 不飽和の程度は%VCの低下など換気障害程度と無関係であった。
- 3) 換気障害例でも肺胞低換気を示す所見はえられなかつた。したがって低 O_2 血症は肺胞 O_2 分圧の低下によるものではないと考えられた。
- 4) 換気障害例ではかなりの不均等換気を示すものがみられたにもかかわらず、換気不良部への血流は少ないため換気血流比は正常近くに保たれている。
- 5) 換気障害例では解剖学的短絡率(平均4.1%)の上昇を認めた。短絡率と動脈血 O_2 飽和度との間には逆相関、短絡率と肺胞動脈血 O_2 較差の間には順相関を示す傾向がみられた。しかし解剖学的短絡率はガス分布異常の程度と無関係であった。
- 6) 肺全切除例で術前術後の成績を比較し、解剖学的短絡の減少例で術後に動脈血 O_2 飽和度の上昇を認めた。
- 7) 以上の成績から、肺結核における低 O_2 血症の主因は解剖学的短絡の増大であると考えられた。しかし肺全切除例では解剖学的短絡が減少しない例もみられ、かかる例の短絡の所在について考察を加えた。

本論文の要旨は第41回日本結核病学会において発表した。本稿を終るにあたり指導校閲を賜つた星子直行教授に深甚の感謝を表す。終始親切な御指導をいただいた塩沢正俊博士、渡部哲也博士、御協力をいただいた安野博博士、木下巖博士および井村价雄学士にあわせて深謝する。

文 献

- ①大久保隆男：結核 40：387, 1965
- ②Rahn, H. and Farhi, L. E.: Handbook of Physiology, Section 3. Respiration, Vol. I, P. 735. Am. Physiol. Society, Washington, D. G. 1964
- ③Briscoe, W. A. and Cournand, A.: J. Appl. Physiol., 14: 284, 1959
- ④Fowler, W. S. et al.: J. Clin. Invest., 31: 40, 1952
- ⑤Finley, T.: J. clin. Invest., 40: 1727, 1961
- ⑥Piiper, J. et al.: J. Appl. Physiol., 16: 499, 1960
- ⑦Riley, R. L. and Cournand, A.: J. Appl. Physiol., 1: 825, 1949
- ⑧West, J. B. et al.: Clin. Sc. 16: 549, 1957
- ⑨Briscoe, W. A. et al.: J. Appl. Physiol., 15: 785, 1960
- ⑩Rahn, H. and Klocke F. J.: J. Clin. Invest., 40: 286, 1961
- ⑪Martin, C. J. and Young, A. C.: J. Appl. Physiol., 11: 371, 1957
- ⑫West, J. B. et al.: Clin. Sc., 16: 529, 1957
- ⑬Chidsey, 111². et al.: J. Appl. Physiol., 14: 63, 1959
- ⑭Gurtner, H. P. et al.: J. Clin. Invsst., 39: 1080, 1960
- ⑮Hardwig, A. et al.: J. Appl. Physiol., 15: 723, 1960
- ⑯Ball, W. C. et al.: J. Clin. Invest., 41: 519, 1962
- ⑰West, J.: J. Appl. Physiol., 17: 839, 1962
- ⑱Emmanuel, G. E. and Moreno, F.: J. Appl. Physiol., 27: 1532, 1966
- ⑲Kelman, G. R. and Nunn, J. F.: J. Appl. Physiol., 21: 1484, 1966
- ⑳城鉄男, 他: 呼吸と循環, 3: 193, 1955
- ㉑Krogh, L.: Arch. F. Physiol., 27: 100, 1912
- ㉒Comroe, J. H. et al.: The Lung, 2nd edition, Year Book Medical Publsheres. P. Chicago, 1962
- ㉓Briehl, R. W. and Fishman, A. P.: J. Appl. Physiol., 15: 337, 1960
- ㉔Forster, R. E.: Handbook of Physiology Section 3 Resperation Vol I P. 827. Am. Physiol. Society. Washington, D. G. 1964
- ㉕渡部哲也, 他: 日胸, 25: 718, 昭41
- ㉖渡部哲也, 他: 日胸, 25: 850, 昭41
- ㉗木下巖, 他: 日胸掲載予定(投稿中)
- ㉘Rahn, H., Fenn, W. O. and Briscoe, W. A.: J. Appl. Physiol., 14: 29, 1959 より引用
- ㉙Briscoe, W. A.: J. Appl. Physiol., 14: 291, 1959
- ㉚Briscoe, W. A.: J. Appl. Physiol., 14: 291, 1959 より引用
- ㉛West, J. B. et al.: Clin. Sci., 16: 549, 1959
- ㉜青木貞幸: 日本病理学会々誌, 43: 1, 昭29
- ㉝Cudkowicz, L.: Thorax, 7: 270, 1952
- ㉞Cudkowicz, L. and Armstrong, J. B.: Thorax,

- 6 : 343, 1951
- ③ Barters, H. and Rodewald, G. : Arch. Ges. Physiol., 258 : 163, 1953
- ④ Liebow, A. A. : Am J. Pathol., 29 : 251, 1953
- ⑤ Fishman, A. P. : Circulation, 24 : 677, 1961
- ⑥ Cockett, F. B. and Vass, C. C. N. : Thorax, 6 : 268, 1951
- ⑦ Chidsey, E. P. et al. : J. Appl. Physiol., 14 : 69, 1959
- ⑧ Lassen, N. A. et al. : J. Appl. Physiol., 16 : 321, 1961
- ⑨ Lenfant, C. : J. Appl. Physiol., 18 : 1090, 1963
- ⑩ Cole, R. B. and Bishop, J. B. : J. Appl. Physiol., 18 : 1043, 1963
- ⑪ Gaensler, E. A. and Strieder, J. W. : J. Thorac. Surg., 22 : 1, 1951
- ⑫ Cournand, A. et al. : J. Thorac. Surg., 16 : 30, 1947
- ⑬ 卜部美代志, 他 : 呼吸と循環, 11 : 119, 1963
- ⑭ 日下芳郎, 他 : 日循学誌, 18 : 33, 1954
- ⑮ 瀬川安雄, 他 : 日胸外会誌, 8 : 817, 昭35
- ⑯ 三宅有 : 日胸外会誌, 9 : 1069, 昭36
- ⑰ 渡部哲也, 他 : 日胸, 25 : 33, 昭41