OUKA
Osaka University Knowledge Archive

Title	133Xeによる換気-血流不均等分布の定量化
Author(s)	石井, 靖; 伊藤, 春海; 鈴木, 輝康 他
Citation	日本医学放射線学会雑誌. 1978, 38(11), p. 1064-1072
Version Type	VoR
URL	https://hdl.handle.net/11094/19341
rights	
Note	

Osaka University Knowledge Archive : OUKA

https://ir.library.osaka-u.ac.jp/

Osaka University

^{133}Xe による換気—血流不均等分布の定量化

京都大学医学部放射線核医学科
石井　靖　伊藤　春海　鈴木　輝康　米倉　義晴
浜中大三郎　向井　孝夫　鳥塚　莞爾

（昭和53年4月21日受付）
（昭和53年7月13日最終原稿受付）

Quantitative Assessment of Ventilation-Perfusion Mismatch by Radioxenon Imaging of Lung.

Yasushi Ishii, Harumi Itoh, Teruyasu Suzuki, Yoshiharu Yonekura
Daisaburo Hamanaka, Takao Mukai and
Kanji Torizuka
From the Department of Radiology and Nuclear Medicine, Kyoto University, Medical School

Research Code No.: 722
Key Words: ^{133}Xe *Pulmonary scintigraphy, Ventilation-perfusion mismatch, Alveolar-arterial gas pressure difference*

By the use of xenon-133 and a scintillation camera with digital data storage and processing system, a topographical relationship between ventilation distribution ($\dot{V}$) and perfusion distribution ($\dot{Q}$) was examined quantitatively in two groups of normal non-smokers and one of older smokers, all healthy. In addition, subjects with a variety of cardiopulmonary disease were tested. The fractional reginal ventilation ($\dot{V}_R$) and regional perfusion ($\dot{Q}_R$) were plotted against the $\dot{V}/\dot{Q}$ ratio on a logarithmic abscissa for the normal subjects; both were distributed log-normally with a narrow standard deviation, and were dissociated slightly from each other. However, with smoking and with increasing age, the standard deviation and the dissocation became wider, suggesting an imparirment of gas exchange as estimated by alvelolar-artrial gas-pressure differences (A-aD), which were calculated by putting these topographical relationships into a gas-exchange program in a computer. In various cardiopulmonary diseases a good correlation was found between the estimated A-aDo_2 thus obtained and actual A-aDo_2 derived from analysis of the blood gases.

1. 緒　言

肺の主要な機能はガス交換機能であり，これは肺血流分布と換気分布の末梢肺胞領域における相対的対応関係によつて決定される[1]．放射性ガスと体外計測装置の出現によつて，両者の関係を局所的に知ることができるようになり，ガス交換機能の不全は換気—血流比の不均等分布として具体化することが可能となつた[2)3)]．しかしながらこれらの仕事は数本のシンチレーションカウンターを胸壁上に並置して測定したものであり，各局所毎に算出した不均等分布の値は，一つのシンチレーションカウンターの視野内で平均化されたもの

であり，従つて，その不均等分布の程度は，実際の不均等分布の程度を詳細に表現するものではない．

シンチレーションカメラとその付属データ処理装置の出現は，この様な肺における換気と血流分布の対応関係の不均衡の局所的な詳細をさらに明らかにしうるものと考えられるが[4)5)]，現在までのこの点に関する研究は，単に肺換気分布シンチグラムと血流分布シンチグラムとを対比させて両者間の局所的不均衡の局在を主観的に評価するにとどまつた[6)7)]．しかしながら，両者間の不均衡はガス交換機能の低下を示唆するものであり，できうればその程度を機能低下の程度に言い換える必要がある．

我々はシンチレーションカメラの分布情報を機能値の分布として表現する試みを functional image と名付けて，種々臓器について行つて来たが[8)9)10)]，我々の今回の目的は換気—血流の不均等分布の情報をガス交換機能低下の情報に言い換えることにある．そのためにまず換気及び血流の両分布を，換気／血流比分布に対比させ，その対比関係を定量的に検討し，次いで換気／血流比を O_2-CO_2 ダイアグラム[1)]に対比させて，そこで決定されるガス分圧値を求め，これを換気，血流分布の定量的対応関係で荷重平均し，肺のガス交換機能の指標である，肺胞気—動脈血ガス分圧較差（alveolar-arterial gas pressure difference）A-aD 値を推定算出し，これと血液ガス値から算出したものとを比較し，シンチグラムで知りうる不均等分布がどの程度定量的機能評価に役立ちうるかについて検討した．

2．対象及び方法

昭和51年12月から昭和52年10月にわたり，京都大学医学部附属病院中央放射性同位元素診療部にて次の対象を検討した．

13人の正常被検者をまず検討対象としたが，このうち5人は21～25歳の非喫煙者，4人は30～44歳の非喫煙者及び4人は35～49歳の喫煙者からなり，いずれも呼吸器疾患の主訴及び既往はない．次いで15人の心肺疾患患者を検討の対象としたが，7例は慢性閉塞性肺疾患（COPD）であり，4例は僧帽弁狭窄症（MS）であり，3例は気管支肺癌，1例は心房中隔欠損症（ASD）であつた（Table 1）．これらの疾患例については，検査施行後48時間以内に動脈血採血を行つた．採血試料のガス分圧値より ideal alveolar air aquation[1)] を用いて肺胞気—動脈血酸素分圧較差（$A\text{-}aDO_2$）を算出した．

被検者の座位状態において，ダイバージングコリメータを装着した，シンチレーションカメラ（Searle Radiographics Pho Gamma HP）で両側肺を視野に収めるよう照準し，日本メジフィジックス社提供の VSS システムを通じて ^{133}Xe の約10mCi を正常呼吸位にて一回吸入せしめた．吸入後呼吸停止させて得た像は換気分布（$\dot{V}$）とした．次に約3～4分 VSS システム内の閉鎖システム内で再呼吸をくりかえさせたのち，平衡に達した処で正常呼吸状態にて充分な放射能が得られるまで記録し，これを容量分布（V）とした．次いで同じ位置で約5mCi の ^{133}Xe の生食溶液を静注し，これが肺に到達した時点で呼吸停止し得た像を血流分布像（$\dot{Q}$）とした．容量分布記録後または血流分布記録後，肺内の ^{133}Xe が換気洗い出される過程の積分値を記録し，これと初期分布値から洗い出しの時定数すなわち換気率（λ）に相当する分布像を得た[10)]．これらのイメージは，いずれも㊵×㊵のディジタル量に変換して相互計算等を行ない Fig. 1 に示す様な様々な分布像の作成を行つた．すなわち λ 分布に加えて，肺容量当り換気分布（$\dot{V}/V$），肺容量当たり血流分布（$\dot{Q}/V$），換気／血流比分布（$\dot{V}/\dot{Q}$）等である．なお，肺領域は容量分布（V）において最高放射能の20%以上の領域とし，それ以下は統計誤差を含む肺外部として計算の対象としなかつた．今回検討の対象は，これらの作成分布像のうち $\dot{V}$ 分布及び $\dot{Q}$ 分布と $\dot{V}/\dot{Q}$ 分布との定量的関係である．

O_2-CO_2 ダイアグラムで定義される肺胞換気量／肺動脈毛細血管血流量比（$\dot{V}_A/\dot{Q}_C$）は，これらの分母，分子の値について実測していないので

Table 1

Case	Sex/Age	Clinical Diagnosis	Ideal alveolar A-aDo$_2$	Computer		Distribution function of $\dot{V}_A/\dot{Q}_C$					
						$\dot{V}_R-\dot{V}_A/\dot{Q}_C$			$\dot{Q}_R-\dot{V}_A/\dot{Q}_C$		
				A-aDo$_2$	A-aDco$_2$	Mean	Log SD	Skew	Mean	Log SD	Skew
1	M/65	Silicosis	12.6	7.6	−0.27	0.90	0.24	−0.59	0.85	0.25	−0.40
2	M/52	Lung Cancer	12.6	9.0	−2.42	0.98	0.50	−0.24	0.69	0.47	−0.14
3	F/60	Lung Cancer	9.9	5.3	−0.59	0.99	0.34	−0.21	0.87	0.36	−0.27
4	F/35	Mitral Stenosis	15.0	13.1	−1.99	1.22	↓58	+0.71	0.77	0.39	−0.57
5	M/48	Asthma	18.3	20.3	−1.37	1.10	0.47	−0.27	0.85	0.46	+0.40
6	M/61	COPD*	26.9	29.3	−0.86	1.03	0.51	−0.11	0.76	0.46	+0.40
7	F/50	bronchitis	5.2	3.9	+0.01	0.87	0.26	+0.25	1.00	0.32	+0.23
8	M/28	bronchitis	15.8	11.9	−0.69	0.93	0.29	+0.56	0.82	0.24	+0.35
9	M/57	COPD*	21.0	24.6	−1.71	0.92	0.53	−0.26	0.72	0.53	+0.04
10	F/17	ASD**	18.8	11.6	−0.88	0.99	0.36	+0.10	0.81	0.33	+0.08
11	F/51	Mitral Stenosis	11.6	9.1	−0.7	0.92	0.38	+0.22	0.79	0.32	+0.08
12	F/44	Mitral Stenosis	15.5	8.2	−1.15	1.15	0.54	+0.14	0.77	0.30	+0.34
13	F/23	Mitral Stenosis	17.6	15.7	−1.30	1.02	0.44	+0.55	0.80	0.33	+0.36
14	M/66	COPD*	23.4	24.2	−0.78	0.91	0.52	−1.16	0.76	0.65	−0.50
15	M/65	Lung Cancer	18.0	16.5	−1.94	1.35	0.62	+0.32	0.70	0.32	+1.15
Young Non-smokers***			—	6.9	−0.18	0.83	0.25	−0.12	0.79	0.23	−0.14
Non-smokers****			—	9.3	−0.39	0.86	0.27	−0.10	0.79	0.25	−0.08
Smokers*****			—	14.3	−1.03	1.10	0.30	+0.53	0.83	0.31	−0.44

* chronic obstructive pulmonary disease,　** atrial septal defect,　*** mean of five non-smokers aged 21–25y.o,　**** mean of four non-smokers aged 30–44y.o.,　***** mean of four smokers aged 35–49y.o.

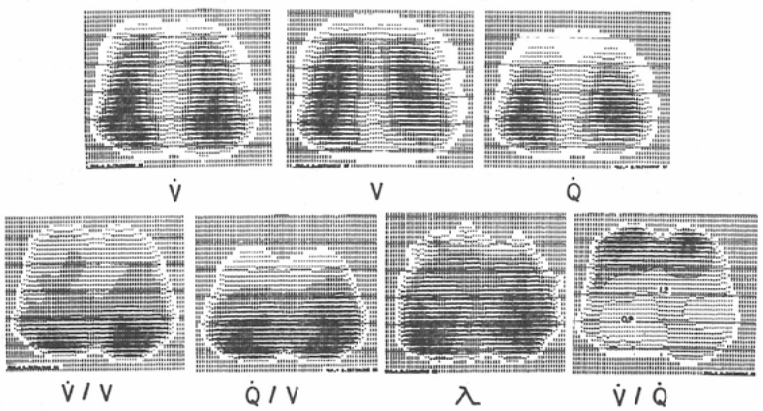

Fig. 1　Various types of functional imaging of the lung of normal subject in upright position. $\dot{V}$=ventilation, $\dot{Q}$=perfusion, V=volume, $\dot{V}/V$=ventilation/volume, $\dot{Q}/V$=perfusion/volume, λ=ventilation rate, $\dot{V}/\dot{Q}$=ventilation/perfusion

知りえないが，我々は $\dot{V}/\dot{Q}$ 比分布に0.85を掛けたものを $\dot{V}_A/\dot{Q}_C$ 比分布値とした．その根拠は肺のガス交換が局所の不均等の存在の有無にかかわらず，正常な酸素摂取及び炭酸ガス排出の定常状態を営む場合，全体としての対応関係がこの程度であるとの仮定によつている[12]．このように $\dot{V}/\dot{Q}$

値を $\dot{V}_A/\dot{Q}_C$ 値に換算して，これの対数を横軸にとり，$\dot{V}_A/\dot{Q}_C$ 値0.2から3までを10等分し，それぞれの区間に対応する換気分布（$\dot{V}_R$）及び血流分布（$\dot{Q}_R$）を求め百分率で表現し，これを縦軸にとりそれぞれ $\dot{V}_R$-,$\dot{Q}_R$-$\dot{V}_A/\dot{Q}_C$ 分布とした(Fig. 3, 4). 推定 A-aD の算出は，それぞれの $\dot{V}_A/\dot{Q}_C$ 区間の中間値に対応する O_2 分圧及び CO_2 分圧を O_2-CO_2 ダイアグラムによつて求め（Fig. 2），

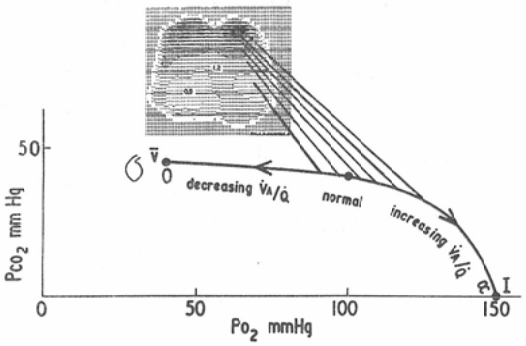

Fig. 2　Illustrating relation between $\dot{V}/\dot{Q}$ imaging and O_2-CO_2 diagram.

これを $\dot{V}_R$-,$\dot{Q}_R$-$\dot{V}_A/\dot{Q}_C$ 分布で荷重平均し，前者を平均肺胞気分圧，後者を平均動脈血分圧とし，両者の差によつてそれぞれ A-aDo_2 及び A-aDco_2 とし，ガス交換機能評価の手掛りとした．既述の $\dot{V}_R$, $\dot{Q}_R$ 分布の作成，O_2-CO_2 ダイアグラム上のガス分圧値探索，及び荷重平均による A-aD の算出等，West のガス交換モデル等を参考として電算機にて行つた[12)13)14)]．計算時間は小型電算機で数分である．

3. 結　果

a．正常肺の換気／血流比分布像

正常人座位時の換気／血流比分布像（$\dot{V}/\dot{Q}$）は Fig. 1 及び 2 に示す通りであり，上肺に 1 より高い値を下肺に 1 より低い値を示し，均一でない．これは換気分布（$\dot{V}$）と血流分布（$\dot{Q}$）の重力効果の差を反映したものである[15)]．

ちなみに本分布像は，換気，血流両分布について，それぞれ5万カウント以上，各画素について100カウント以上のものについて作成したので，その統計誤差はたかだか5～10%程度である．この場合最高カウントの20%以下は算出の対象としていない．

b．正常肺の換気及び血流の換気／血流比に対する対応関係

換気及び血流の換気／血流比に対する関係（$\dot{V}_R$-$\dot{V}_A/\dot{Q}_C$, $\dot{Q}_R$-$\dot{V}_A/\dot{Q}_C$）を横軸を対数としてその統計モーメント，すなわち平均，偏差，歪度について検討した．

Fig. 3 は換気及び血流の換気／血流比に対する

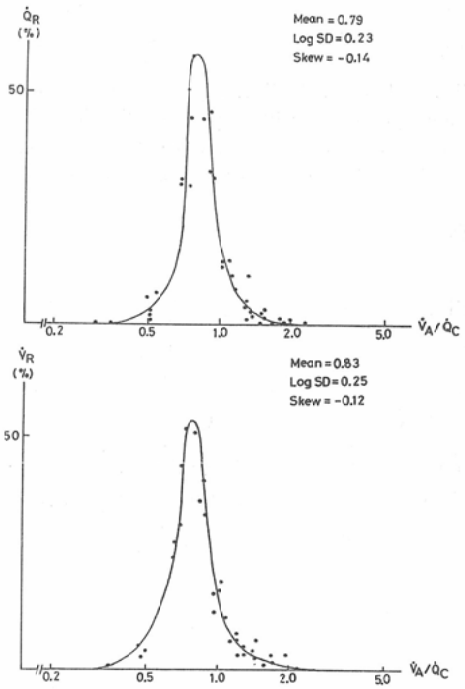

Fig. 3　Fractional distributions of ventilation ($\dot{V}_R$) and perfusion ($\dot{Q}_R$) with respect to ventilation-gerfusion ratio ($\dot{V}_A/\dot{Q}_C$) with logarithmic scale in young non-smokers.

分布曲線（以下単に $\dot{V}_R$ 及び $\dot{Q}_R$ 分布と略す）を5人の21～25歳の正常非喫煙者群の平均値についてプロットしたものであるが，ほぼ幅の狭い対数正規分布をしており，その対数標準偏差（log SD）は $\dot{V}_R$ 分布=0.25, $\dot{Q}_R$ 分布=0.23，歪度は $\dot{V}_R$ 分布=0.12, $\dot{Q}_R$ 分布=−0.14でほぼ対称的な分布である．その平均は $\dot{V}_R$ 分布=0.83, $\dot{Q}_R$ 分布=0.79であるから，換気は $\dot{V}_A/\dot{Q}_C$ のや

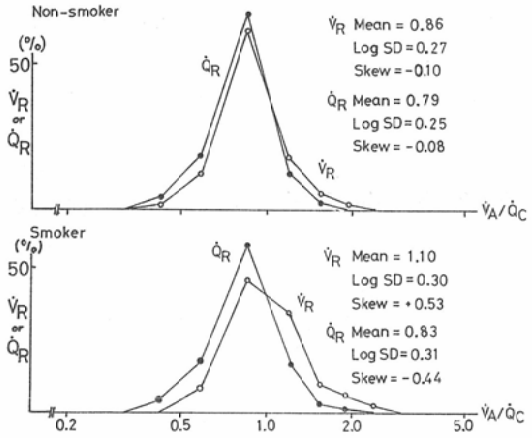

Fig. 4　Fractional distributions to $\dot{V}_R$ (circles) and $\dot{Q}_R$ (dots) with respect to $\dot{V}_A/\dot{Q}_C$ in the older (ages 30–34) non-smokers (upper panel) and in older (ages 35–49) smokers (lower panel).

や高い値に，血流はやや低い値にわずかに解離していることになる．

Fig. 4 は同様の関係を，中年者群の非喫煙者群（上段），喫煙者群（下段）の平均値についてプロットしたものである．まず前者については，その平均は $\dot{V}_R$ 分布＝0.86，$\dot{Q}_R$ 分布＝0.79，対数標準偏差は $\dot{V}_R$ 分布＝0.27，$\dot{Q}_R$ 分布＝0.25，歪度は $\dot{V}_R$ 分布＝−0.10，$\dot{Q}_R$ 分布＝−0.08であり，既述の若年者のそれと左程の差はないが，それぞれやや大きい値となつている．他方後者の喫煙者群については，$\dot{V}_R$ と $\dot{Q}_R$ の解離は更に大きい．すなわち平均が $\dot{V}_R$ 分布＝1.10，$\dot{Q}_R$ 分布＝0.83である．又分布の幅も広い．すなわち対数標準偏差にて $\dot{V}_R$ 分布＝0.30，$\dot{Q}_R$ 分布＝0.31であり，又両分布はそれぞれ反対側に歪曲している．すなわち歪度は，$\dot{V}_R$ 分布＝0.53，$\dot{Q}_R$ 分布＝−0.44である．

この様に $\dot{V}_R$ 及び $\dot{Q}_R$ の対数 $\dot{V}_A/\dot{Q}_C$ に対する関係をみると加齢及び喫煙歴の増加によつて，正規分布が解離し幅広くなり歪んでくる事があきらかであり，この様な関係をガス分圧値に置換して算出した推定 A-aD は，その様な変化を反映して増加している．すなわち若年非喫煙者で $A\text{-}aDO_2$＝6.9mmHg，$A\text{-}aDCO_2$＝−0.18mmHgであるに比べて，中年喫煙者で $A\text{-}aDO_2$＝14.3 mmHg，$A\text{-}aDCO_2$＝−1.03mmHgと，それぞれの較差が増加している（Table 1）．これは不均等分布によるガス交換効率の低下を示すものである．

c．疾患肺の換気及び血流の換気／血流比に対する関係

Table 1 に正常肺に行つたのと同様な検討の結果を示す．疾患の性質によつて，$\dot{Q}_R$ 及び $\dot{V}_R$ 分布曲線間の解離，偏差幅の拡大，歪度の増加

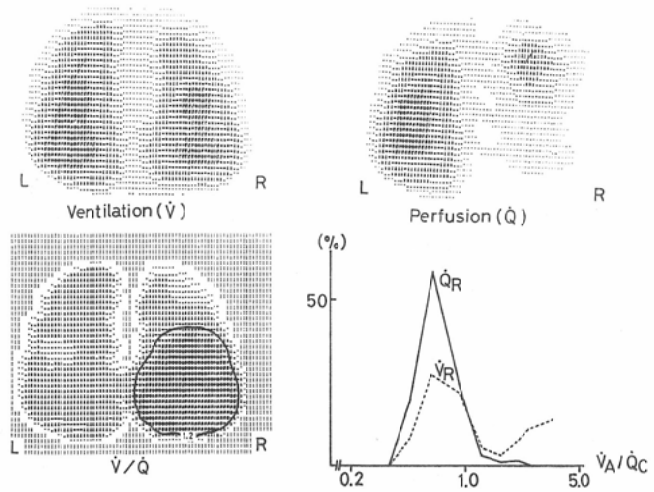

Fig. 5　Images providing $\dot{V}/\dot{Q}$, and the distributions of fractional $\dot{V}_R$ (dashed line) and $\dot{Q}_R$ (solid line) as a function of $\dot{V}_A/\dot{Q}_C$ in a patient with bronchogenic carcinoma.

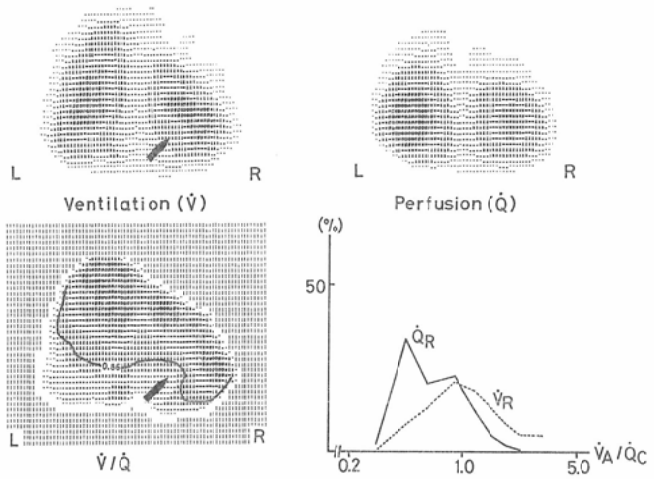

Fig. 6 Images providing $\dot{V}/\dot{Q}$, and the distributions of fractional $\dot{V}_R$ (dashed line) and $\dot{Q}_R$ (solid line) as a function of $\dot{V}_A/\dot{Q}_C$ in a patient with chronic obstructive pulmonary disease.

等が認められた．これらの分布関係から同様に A-aDO$_2$ 及び A-aDCO$_2$ を算出し，これを血液ガス値から算出したものと比較した．

分布関係は大別して2群に分けられた．一つは $\dot{V}_R$ 分布が $\dot{V}_A/\dot{Q}_C$ 値の高値に相応するものであり，他は $\dot{Q}_R$ 分布が $\dot{V}_A/\dot{Q}_C$ 値の低値に相応するものである．Fig. 5 に示す像は肺門部気管支肺癌の例であり，右下葉において前者の典型例を示している．推定 A-aDO$_2$＝16.5mmHg, A-aDco$_2$＝−1.94mmHg と CO$_2$ 較差の拡大が著明であり，この部に生理的死腔様効果を形成していることが明らかである．Fig. 6 は後者の典型例であり，本例は閉塞性肺疾患を有し，両下肺の血流 $\dot{Q}_R$ が $\dot{V}_A/\dot{Q}_C$ の低い値に多く対応している．推定 A-aDo$_2$＝29.3mmHg, A-aDco$_2$＝−0.86mmHg と，この場合 O$_2$ 較差の拡大が著明であり，生理的シャント様効果を形成されていることが明らかである．

$\dot{V}_A/\dot{Q}_C$ に対する $\dot{V}_R$ 及び $\dot{Q}_R$ 分布の変動の意味付けを行うために，実測 A-aDo$_2$ 値との比較において Table 2 に示す様な検討を行つた．まず両分布の解離の度合を両分布の平均値の差（$\dot{Q}_R$〜$\dot{V}_R$）で示し，これと A-aDo$_2$ との相関を求めたが，r＝0.401，p＜0.25であつた．次に $\dot{Q}_R$ 分布の偏差幅との相関を求めたところ，r＝0.443，p＜0.1であつた．いずれにしても両曲線の解離，偏差幅，歪みがガス交換効率低下の程度の何らかの指標となりうるものと考えられた．

Toble 2 Correlation between Parameters of Distribution Function of $\dot{V}_A/\dot{Q}_C$ and Ideal Alveolar A-aDo$_2$

	Computer	Distribution Function of $\dot{V}_A/\dot{Q}_C$	
	A-aDo$_2$	Log SD of $\dot{Q}_R$	$\dot{Q}_R-\dot{V}_R$
Ideal Alveolar A-aDo$_2$	0.924*	0.443**	0.401***

* $p<0.001$
** $p<0.1$
*** $p<0.25$

最後にこの様な定量化の示す妥当性を検討する目的で，$\dot{V}_R$ 及び $\dot{Q}_R$ 分布値から求めた A-aDo$_2$ と実測 A-aDo$_2$ と比較したところ，両者の相関は r＝0.924，P＜0.001ときわめて良好であつた．この事実は解像力の限界に加えて，三次元分布情報を深さに依存して減弱する二次元分布情報として定量的にとり扱うことの本質的限界を考慮に入れても，肺シンチグラムで知られる換気—血流の不均等分布が充分に肺ガス交換機能の推定の手掛り

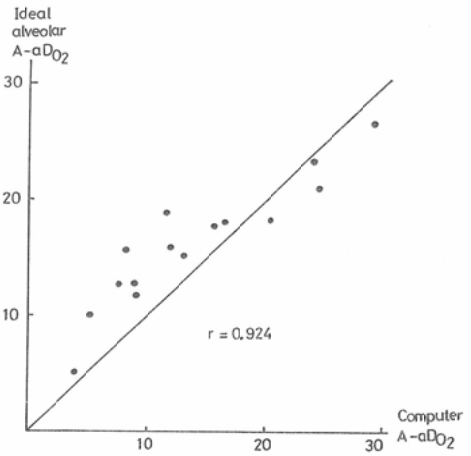

Fig. 7　Correlation between A-aDo$_2$ calculated from the pulmonary imaging (abscissa) and from actual blood-gas values (ordinate).

を与えてくれるものであることを示している．

なお，検討した対象全例に副作用はみられなかつた．

4．考　察

形態分布の三次元分布を非侵襲的に描出することを可能にしたX線 CT の出現は，今後核医学のありかたを変えることになろう．すなわち核医学的情報は，ある臓器病変の形態的位置づけを行なうにとどまらず，病変が描出されるに至つた過程の機能的手掛りを与えるものでなければならない．いずれにせよ，ある現象が選択的に標識されている訳であるから，その現象の実態の究明がより志向される必要がある．肺に関して言えば，換気と血流分布の両者の関係は，ガス交換機能の推定に役立たなくてはならない．幸いにして換気／血流比は，一義的にある呼吸単位におけるガス分圧組成を決定するものであるから[1]，この分布内容が非侵襲的に核医学的手段によつてあきらかにされるものであれば，原理的にその不均等分布をガス交換機能障害の程度に関連させようと発想することは当然のことである．我々の今回の目的は，この様な事情に立脚している．しかしながらこの様な試みを可能にするためには，現在の核医学分布情報は，なお充分なものではない．すなわち，まず空間分解能が限られたものであること，加えて三次元分布情報が深さに依存して減弱する二次元分布情報として得られることである．いくつかのシンチレーションカウンターの胸壁外計測の組合せによつてなされた換気／血流比分布の現在までの試みについてみると[17)18)]，いずれも空間分解能の限界がその実用上の制限となつている．例えば両側胸壁上に6組のカウンターを照準して換気—血流不均等分布を検討した Dawson 等の成績によると[19)]予測算出される A-aDo$_2$ は実測 A-aDo$_2$ とよく一致していない．彼らは検出される不均等の範囲がカウンターの視野より小さいものであろうとしている．これに比べて空間分解能を二次元分布面について40×40に細分した我々の方法が，より良好な現関を示している事は示した通りである．

換気及び血流の換気／血流比に対する定量的分布の関係は，数種の溶解度を異にするガスの持続点滴と換気ガス及び動脈血についての持続試料測定を行い正確に算出することができる[16)]．本法は信頼性に富み正確であるが，測定法が煩雑であり日常の臨床検査としては使用できない．本法の示す結果において換気及び血流の換気／血流比に対する関係は，我々の示した結果と同様正常肺においては幅の狭い対数正規分布を示し，シャント様効果は血流のより低い換気／血流比部分への偏りを，死腔様効果は換気のより高い換気／血流比部分への偏りとして示されている．ちなみに本法の分布曲線の偏差値は，正常人において血流が0.35であり，換気で0.43と我々のそれよりは狭い幅で示されており，この事実は我々の方法になお限界があることを示唆している．しかしながら，我々の方法は非侵襲的であり，日常の臨床に使用しうる利点がある．

換気分布について我々は一回吸入分布を採用したが，VSS システムを使用して簡便かつ室内汚染をさけて行うことができた．元来換気分布は肺容量レベル，呼吸方式によつて微妙な変動を示すものであり，自然な換気分布を得るためには正常呼吸時におけるガス洗い出し法等で評価することがのぞましいとされている[20)21)]．しかし我々が敢

えてこの方法を避けたのは使用する ^{133}Xe が比較的溶解度が高く，従つて非呼吸部分のバックグランドの関与が無視できない．加えて処理過程において無用な統計雑音が幅増されその信頼性が低下することのためである．

若し換気／血流の不均衡が肺区域単位で存在するものであれば，側面計測が比較的区域を分離して観察しうる点において有用であるが，この場合，左，右別々に行う必要がある．しかし，今回の方法で最も重要な欠点は，三次元分布情報を深さに依存して減弱する二次元分布情報として得ていることである．この様な本質的な矛盾を解決するために，放射性核種の体内三次元分布を定量的三次元分布として検出する方式の確立が望まれて来たが，幸いなことに現在，核医学の衝撃となつたCTの出現によつてこれが可能になつて来つつある[22]．すなわち陽電子放出核種の対向検出情報にCTの合成断層画像アルゴリズムを適用して放出線電算機合成断層像（ECT）を作成することである．この方式により将来肺においても，その換気，血流分布の定量的三次元分布の検出が可能になれば，本法の様な試みは今後極めて有用になると考えられる．

本研究の一部は日本専売公社の「喫煙と健康に関する委託研究費」によつたこと記し，謝意を表します．

References

1) Rahn, H. and Fahri, L.E.: Ventilation, perfusion and gas exchange—The V/Q concept. In "Handbook of Physiology", Section 3, Respiration, Vol. 1. American Physiological Soceity, Washington DC, 1964, pp. 735—766
2) Ball, W.C., Stewart, P.B., Newsham, L.G.S. Bates, D.V.: Regional Pulmonary function studied with xenon-133. J. Clin. Invest., 41: 519—531, 1962
3) West, J.B. and Dollry, C.T.: Distribution of blood flow and ventilation-perfusion ratio in the lung, measured with radioactive CO. J. Appl. Physiol., 15: 405—410, 1960
4) Newhouse, M.T., Wright, F.J. and Ingham, G.K.: Use of scintillation camera and 135-xenon for study of topographic pulmonary function. Resp. Physiol., 4: 141—153, 1968
5) Loken, M.K., Medina, J.R. and Lillehei, J.P.: Regional pulmonary function evaluation using xenon-133, a scintillation camera and computer. Radiology, 93: 1261—1266, 1969
6) Medina, J.R., Lillhei, J.P. and Loken, M.K.: Use of scintillation anger camera and xenon (Xe^{133}) in the study of chronic obstructive lung disease. J.A.M.A., 208: 985—991, 1969
7) DeNardo, G.L., Goodwin, D.A., Ravasini, R. and Dietrich, P.A.: The ventilatory lung scan in the diagnosis of pulmonary embolism. New Engl. J. Med., 282: 1334—1336, 1970
8) MacIntyre, W.J., Inkley, S.R., Roth, E., Drescher, W.P. and Ishii, Y.: Spatial recording of disappearance constants of xenon-133 washout from the lung. J. Lab. Clin. Med., 76: 701—712, 1970
9) Torizuka, K., Hamamoto, K., Morita, R., Mukai, T., Kosaka, T., Handa, J. and Nishitani, H.: Regional cerebral blood flow measurement with xenon 133 and the scinticamera. Amer. J. Roentgenol. Radium. Ther Nucl. Med., 112: 691—700, 1971
10) Ishii, Y., Kawamura, J., Mukai, T., Takahashi, M. and Torizuka, K.: Functional imaging of intrarenal blood flow using scintillation camera and computer. J. Nucl. Med., 16: 899—907, 1975
11) 石井　靖，久野健志：肺シンチグラフィー，その機能的意味「検査法からみた呼吸器疾患の診断」p. 166～178，1974，克誠堂出版，東京．
12) West, J.B.: Ventilation-perfusion inequality and overall gas exchange in computer models of the lung. Resp. Physiol., 7: 88—110, 1969
13) 石井　靖，向井孝夫，伊藤春海：呼吸機能の肺内不均等分布の視覚定量化，第12回 ME 学会論文集，371—372，1973．
14) 石井　靖，伊藤春海，鈴木輝康：換気一血流の不均等分布とガス交換機能に関する肺のシミュレーション，第13回 ME 学会論文集，534—535，1974．
15) West, J.B.: Regional differences in gas exchange in the lung of erect man. J. Appl. Physiol., 17: 893—898, 1962
16) Wagner, P.D., Laravuso, R.B., Uhl, R.R. and West J.B.: Continuous distributions of ventilation-perfusion ratios in normal subjects breathing air and 100% O_2. J. Clin. Invest., 54: 54—68, 1974
17) Pain, M.C.F., Glazier, J.B., Simon, H. and West, J.B.: Regional and overall inequality of ventilation and blood flow in patients with

chronic airflow obstruction. Thorax, 22: 453—461, 1967
18) Anthonisen, N.R., Bass, H., Oriol, A., Place, R.E.G. and Bates, D.V.: Regional lung function in patients with chronic bronchitis. Clin. Sci., 35: 495—511, 1968
19) Dawson, A. and Rocamora, J.M.: Regional Lung function and overall gas exchange in chronic obstructive lung disease: The effect of intermittent positive pressure breathing with isoproterenol. Am. Rev. Resp. Dis., 109: 338—344, 1974
20) Anthonisen, N.R., Dolovich, M.B. nd Bates, D.V.: Steady state measurement of regional ventilation to perfusion ratio in normal man. J. Clin. Invest., 45: 1349—1356, 1966
21) Inkey, S.R. and MacIntyre, W.J.: Dynamic measurement of ventilation-perfusion with xenon-133 at resting lung volumes. Amer. Rev. Resp. Dis., 107: 429—441, 1973
22) Ter-Pogossian, M.M., Phelps, M.E., Hoffman, E.J. and Mullani, N.A.: A positron-emission transaxial tomograph for nuclear imaging (PEET). Radiology, 114: 89—98, 1975