

大量輸液による経胸壁インピーダンスの 変動に関する実験的研究

東京女子医科大学第二外科教室 (主任：織畑秀夫教授)

大学院学生 岡 寿 士
オカ ヒサシ

(受付 昭和48年2月8日)

Changes of Transthoracic Impedance by a Huge Amount of Transfusion

Hisashi OKA, M.D.

Second Department of Surgery (Director: Prof. Hideo ORIHATA)
Tokyo Women's Medical College

A huge amount of transfusion was employed to provide pulmonary oedema. 42 dogs were used in this experiment.

The impedance was measured on the head, thoracic wall, abdomen and leg, to observe the whole body oedema, and also at 4 points on the chest wall where the upper, middle and lower lobes of the lungs are projected.

A half bridge type instrument was used. Prior to the experiment on animals, the pulmonary and the femoral artery pressure were recorded by the inserted catheter, the respective impedances were measured, and chest x-ray films were taken. After this procedure, a huge amount of transfusion was started at a constant speed, and following the transfusion, the respective data were collected, and upon completion of the transfusion, the dogs were sacrificed, and autopsied.

Following the transfusion, the respective impedances were remarkably decreased. The abdominal impedance showed the largest decrease ratio.

The respective impedances started decreasing rapidly, mostly in proportion to the transfused volumes and after the transfusion reached some volumes, those decrease pattern changed from the rapid decrease to a slow decrease.

Among the chest impedances, the impedance that projected the lower lobes of the lungs showed the same two-step pattern such as the those recorded at other points, those are, the impedance first showed a slow decreasing curve, and then started rapidly decreasing again.

This was the peculiar pattern of the impedance that projected the lower lobes and it showed a three-step curve.

Pulmonary blood pressure registered a rapid rise following the transfusion, and after the transfusion reached some volumes, it changed to a slow rise as a whole, started rapidly rising again, and showed a three-step curve.

The lungs are the aerial organ, and exist in the thoracic cavity of the limited volume. Therefore, when the pulmonary oedema occurs, the lungs cannot expand enough outward beyond the thoracic capacity. The air inside the lungs is expired out and the ratio of water to air in the lungs increases accordingly, and consequently, it is considered that the impedance of the pulmonary tissues is decreased. The first decrease phase in the three step decreasing curve was the time of water retention in the pulmonary alveolar interstices, and it was almost entirely parallel with the transfused volume. The latter phase of the curve meant that the water in the alveolar interstices moved into the pulmonary alveoli.

There was a relation between the pulmonary pressure and the impedance that even if the pulmonary pressure rose, the impedance did not vary as a whole, and following this phase, there was a phase in which the impedance decreased rapidly, even though the pulmonary pressure remained. This phase projected the movement of water from the alveolar interstices into the alveolar cavity.

Clinically, the impedance method employed in the experirrent is important method for early diagnosis of pulmonary oedema.

内容目次

第I章	緒言
第II章	インピーダンス法について
第III章	実験方法
第1節	実験的肺水腫の作製方法
第2節	インピーダンスの測定
第3節	実験方法
第IV章	実験結果
第1節	頭部, 胸部, 腹部, 大腿部のインピーダンス
第2節	胸壁インピーダンスの部位的差異
第3節	肺動脈圧とインピーダンス
第4節	胸部 X-P および摘出肺の肉眼的観察
第V章	実験結果の総括
第VI章	考察
第VII章	結語
	文献

第I章 緒言

臨床上, 肺水腫¹⁾²⁾に遭遇する頻度は比較的に高いものである。特に冠疾患, うつ血性心疾患等を基礎疾患として発生することが多く, また開胸, 開腹手術等の術後合併症としても発生する³⁾。肺水腫はその基礎疾患からもわかるように, 心肺循環動態の異常がその主なる原因と思われる。すなわち, 肺水腫は肺における血管外の水分の異常貯溜であり, 肺含水量の増加, および肺含気量の低下を来す。したがってこのような水分の貯溜状態を観察することは, 心肺の循環動態の異常を察知することにも役立ち, 肺水腫の早期診

断の指標としても重要な役割を果すものと考えられる。現在, 肺水腫の診断は, 臨床的に, 理学的診断および胸部レ線像による診断が, 最も確実な診断法として採用されている。肺水腫は, 重症なものでは特異的な臨床症状を呈するが, その重症度は, 発見しがたいものから, 死にいたるものまで種々の程度に存在する。軽度のもの, あるいはその初期では, 見のがされたり, 誤診されたりするが, それは間質肺水腫期では, 肺胞内水腫期よりも, 一般に特異的な症状が少なく, そのため原因疾患の症状にかくされたり, またはそれにより症状が修正されてしまうからである⁴⁾。また, 現段階で確実な肺水腫の証明は主として, 剖検または病理標本等等にもとづく直接的方法でなされており, 非観血的な生前での研究は, 実験方法の困難さ等のため極めて少ない。本実験ではインピーダンス法による肺水腫の動的解析を試みた⁵⁾⁶⁾。後で述べるインピーダンスの性質を利用すれば, 比較的早期に, かつ非観血的, 簡単な操作で, 肺水腫を発見できるのではないかと考えた。同時に, 肺動脈圧, 胸部レ線像を測定し, インピーダンスとこれらの相関について検討した⁷⁾。

第II章 インピーダンス法⁸⁾

古くから, Rheocardiograph, Rheoencephalograph, Rheaspirograph, また Impedance Plethysmograph⁹⁾のように, 多くの生体現象の観察に, インピーダンス法が応用されてきた。

インピーダンス法は、人為的に、一定高周波電流を生体に注入し、その電流波形の生体通過時に起こるひずみから、逆に、生体の状態を推察しようとするもので、脳波や心電図等のように、生体自身から発生する微弱電気を測定するものとは異なる。

生体のインピーダンス値を決定する主なものとして二つの要素が考えられる。すなわち、1) 測定臓器個有組織のインピーダンスと、2) 物理学的運動に伴って変化するインピーダンス¹⁰⁾の、二つである¹¹⁾。例えば、胸壁外の2点間から高周波電流を注入し、肺インピーダンスを測定しようとする時、電流分布は、2点間の最短距離に近い局限された部分に集中的に流れ介在する。胸壁、肺等の組織個有のインピーダンス、すなわち前述の1)に相当する要素と、呼吸に伴う運動の要素によるインピーダンス、すなわち前述の2)に相当する要素とが、同時に、インピーダンス変化として測定される。

この時、肺組織個有インピーダンスを決定するものとして、肺は含気性臓器であるため、高インピーダンスの空気部分より、低インピーダンスの肺胞間組織、特に、間質内イオン溶液(間質液)の量により決定される。しかし、病的な状態、肺水腫に陥つた場合は、肺含水量は著しく増加し、逆に肺含気量は低下し、肺組織個有インピーダンスは、このイオン溶液量の増加に伴い低下するものと考えられる。

インピーダンスが浮腫に伴って低下することは、実験的に脳組織において証明されている。最近のImpedograph法を用いた立花¹²⁾の研究では、脳内浮腫部位に一致した低インピーダンス部位が明確に証明された。インピーダンス法を用いた肺水腫の診断法は、非観血的であるということ、しかも、比較的、正確に循環動態を測定でき、操作が簡単である等の利点から、今後臨床的に利用される可能性は少なくないと思われる。

第III章 実験方法

第1節 実験的肺水腫の作製方法

肺水腫の作製方法には種々の方法がある。

Visscher¹⁴⁾は発生原因から、表一に示すような種類

表1 実験的肺水腫 (Visscher)

-
- I. 原発性の血行力学的変化
 - A. 心, および, 大脈管
 - 1. 心室閉塞: 左, 右
 - 2. 心冠脈管閉塞
 - 3. 左室の圧迫, あるいは, 閉塞
 - 4. 左房の圧, あるいは, 閉塞
 - 5. 弁欠損: 大動脈弁閉鎖不全, 僧帽弁閉鎖不全, 僧帽弁口狭窄
 - 6. 大動脈, あるいは, および, その分枝の閉塞
 - 7. 肺静脈の圧迫
 - B. 多血症: 左, 右
 - C. 動脈性低血圧: ショック, 出血
 - D. 塞栓症
 - II. 中枢神経系の変化
 - 脳障害: 圧迫, あるいは, 刺戟
 - III. 末梢神経系の変化
 - A. 迷走神経切断
 - B. 迷走神経切断+気管切断
 - C. 肺根部の感応電気刺戟
 - IV. 呼吸器系の変化
 - A. 気道閉塞: 吸気性; 呼気性; 呼吸性, および, 呼吸性
 - B. ヒポキシア+心負荷, あるいは, 心不全
 - C. 呼吸性火傷, および, 熱
 - D. 溺死
 - E. 気管支内液体注入
 - F. 胸部傷害
 - G. 爆風
 - V. 薬物学的効果
 - A. 脈管活性薬: muscarine: acetylcholine: neostigmine: histamine: amylnitrite: epinephrine: pentylenetetrazol (Cardiazol^R Metrazol^R) および nikethamide (Coramine^R): picrotoxine: nicotine
 - B. いろいろの肺刺激ガス: 酸素中毒
 - C. その他: alloxan: ammonium ion: thiourea 化合物; methylene violet, methylene blue: methylsalicylate: acetic, sulfuric, および, butyric ether: acetic ether, および, iodide solution: iodoacetamide: bile, および, bile salts: urethane: CO: CO₂: barbiturates
 - D. 代謝性効果: アルカロージス, 低血糖
 - IV. 雑
 - 高熱; 感作現象; 気管支の機械的刺戟
-

に分類した。胸壁インピーダンスの測定という目的に対して、最も合理的な肺水腫の作製方法を選ぶ事が重要である。

著者は、最終的に、急速大量輸液法を採用した。この方法を採用した理由は、先ず第1に、非観血的な作製方法でなくてはならない。それは、開胸等を行なつた場

合、胸壁のインピーダンスは生体の無負荷状態とは全く異なってしまう¹⁵⁾。

第2の理由は、実験は胸壁インピーダンスの時間的な変化を観ることから、生体は、正常状態から徐々に変化の方が観察が容易であると思われる。第3の理由は、胸壁インピーダンス、および肺動脈圧との相関を見る時、輸液量が指標となるので都合がよい。

以上、3つの理由から、一定急速度の大量輸液法による肺水腫の作製をおこなった¹⁶⁾。

文献的に、急速な輸液により肺水腫の出現をみたという報告が多数見られる。Doyle¹⁷⁾らは、人間で生理食塩水の静脈投与により、肺動脈 wedge 圧の上昇を認め、Haddy¹⁸⁾らは、大量の食塩水の輸液により、肺静脈圧が上昇して、ついで肺水腫の出現を認めている。Jordan および、Commander¹⁹⁾によれば、犬で実験的に肺水腫を作る最も良い方法は、hypoxia, 吸気時抵抗呼吸、および急激な輸液の3法を合併することであるという。

著者が行なった急速大量輸液法は、生理食塩水を使用し、輸液量は、実験犬42匹にて、輸液最終量は 100ml/kg ~ 1,300ml/kg に及び、輸液速度は、ほぼ 2 ml/kg/min とした。

第2節 インピーダンスの測定方法

インピーダンス測定の電極は、安全ピンを使用し、これを皮膚に固定した(写真1)。

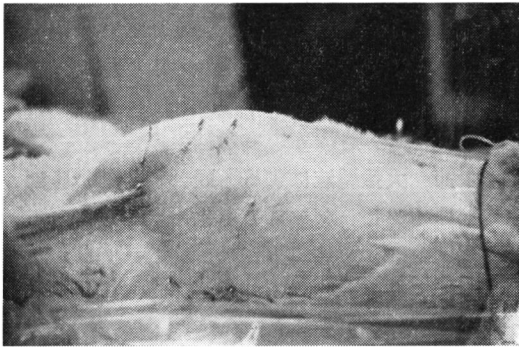


写真1

電極の装着部位は、全身6カ所で、頭部、胸部(上, 中, 下葉を投影する4カ所)および腹部, 下肢皮膚である。この装着は透視下で行なった²⁰⁾。

頭部は左右側頭部に装着した。腹部の電極も同様に、両腸骨突起の2cm上方に装着した。以上の頭部、腹部、大腿部の電極は全身性浮腫状態の観察のために用いられた(図1)。

胸部電極は、前述の如く4カ所に装着した。すなわ

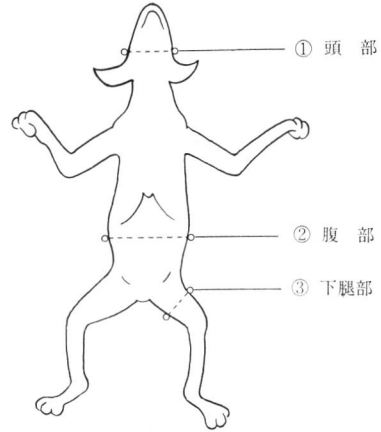


図1 電極の装着部位

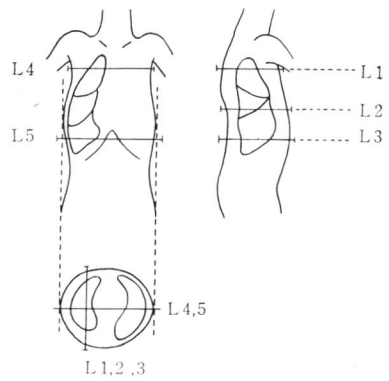
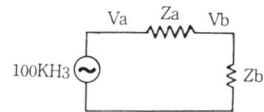


図2 電極の装着部位



$$Vb = \frac{Zb}{Za + Zb} Va$$

$$Vb(Za + Zb) = Va Zb$$

$$(Va - Vb) Zb = Vb Za$$

$$Zb = \frac{Vb}{Va - Vb} Za$$

Va = 出力電圧
 Vb = 分割電圧
 Za = 10000Ω
 Zb = 生体

図3

ち、透視下にて、肺の上葉を投影する。前後・左右に電極を置いた。この実験では、全例において、肺のインピーダンスの測定には、右側前後胸壁でおこなった。また

中・下葉を投影する2カ所前後に電極を装着した。この6カ所の各電極を回路にした配線を行なった(図2)。

インピーダンス値は、2点電極法を用い、100KCで動作する²¹ ハーフブリッジタイプのインピーダンス計(図3)にて測定し、出力電圧、分割電圧の値を、デジタルカウンターを用いて、数として読みとつた。胸部および腹部電極を用いた測定値は、呼吸運動に一致した周期的変動が測定されるが、本実験では、肺組織抵抗値変動を問題としたので、呼吸性変動の最低値、すなわち呼出時インピーダンスを測定基準にした。

第3節 実験方法

実験動物は42匹の体重8~16kgの成熟犬を使用し、雌雄は特に限定しなかつた。実験犬に、経耳介静脈的に、約40mg/kgのペントバルビタールによる静脈麻酔をおこなつた。気道確保のため気管チューブを挿入し、脈搏、血圧、呼吸が安定したところで、気管チューブを抜管した。頭部、胸部、腹部、下肢の電極の装着部位は全て剃毛し、体毛による電極への影響をのぞいた。次に、大腿部の動静脈切開をおこない、静脈へは点滴セットを接続し、これを固定した。また動脈からは、血圧測定のためのカテーテルを挿入し、腹部大動脈に留置した。つづいて反対側の大腿部の静脈より、肺動脈カテーテルを挿入し、また、このカテーテルをポリグラフに接続し、透視下により、波形を観察しながら、カテーテルの先端を、下大静脈、右房、右室を経て、肺動脈に挿入し、一旦wedge 圧を確かめて、これを留置した(写真2)。

肺動脈圧および、血圧は、ポリグラフにて連続的に記

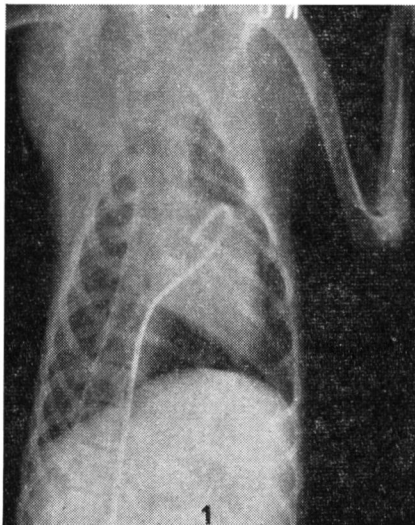


写真2

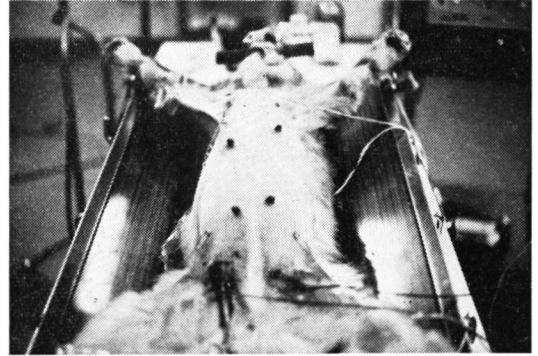


写真3

録できるように接続した(写真3)。

以上の準備が整つたところで、無負荷状態での頭部、胸部、腹部、大腿部の各インピーダンスを測定する。つづいて胸部レ線像を撮影し、肺動脈圧、血圧を測定した。

その後、輸液を開始する。輸液の注入量に伴い、胸部レ線像の撮影、インピーダンスの測定、肺動脈圧、血圧の測定をおこなつた。インピーダンスの測定は、輸液量500ml/kg 毎におこなつた。また胸部レ線像は輸液量400ml/kg毎に撮影した。撮影条件は一定とした。すなわち、200mA, 75KV, 0.05sec とした。

輸液の全量が終了したところで、最終的に各検査項目について測定し、実験犬を開胸し、肺動脈、肺静脈を結紮し、気管支を切断し、両肺を摘出した。これを肉眼的に観察し、10%ホルマリンに固定した。

第IV章 実験結果

第1節 大量輸液による、頭部、胸部、腹部、大腿部のインピーダンスの変化

頭部、胸部、腹部、下肢のインピーダンスの実測値を示す(表2, 表4の L_3)。但し胸部は下葉を投影する L_3 を比較した。

輸液開始前の無負荷状態における各部位のインピーダンス値は、実験例によつて必ずしも一定値を示さなかつたが、本実験は急速な大量輸液によるインピーダンスの絶対値より、むしろ変化率を問題としたので、各例の変化度を比較検討するために、輸液開始前の無負荷状態のインピーダンス値をコントロールとし、これを1,000とした時のインピーダンスの変化率であらわした(表3, 表の5の L_3)。

表2 体の各部におけるインピーダンス (実測値)

測定部位	輸液量 (L)	無負荷 0.5 1 1.5 2.0 2.5 3.0 3.5 4 5 6 7 8 9 10														
		頭部	①	0.890		0.822		0.730		0.671		0.606	0.584	0.578	0.563	0.471
	②	1.134	0.829	0.803	0.758	0.723	0.692	0.650	0.623	0.615	0.543	0.505	0.407			
	③	0.996					0.670			0.589	0.506	0.347	0.461	0.445	0.435	0.422
	④	1.372		0.997		0.932		0.880		0.833	0.686					
	⑤	1.337		1.191		1.010		0.849		0.812	0.7848	0.735	0.702	0.630		
	⑥	1.830		1.238		1.065		1.052		0.935	0.738	0.846	0.778	0.748		
	⑦	1.429		1.170		1.132		0.896		0.817	0.793	0.779				
腹部	①	0.713		0.580		0.569	0.311	0.685		0.482	0.532	0.314	0.598	0.271	0.230	0.177
	②	0.597	0.421	0.400	0.401	0.328	0.255	0.858	0.239	0.230	0.210	0.199	0.164			
	③	0.593								0.195	0.212	0.158	0.146	0.132	0.124	0.114
	④	0.905		0.642		0.529		0.520		0.362	0.285					
	⑤	0.517		0.421		0.264		0.082		0.140	0.119	0.127	0.099	0.093		
	⑥	0.391		0.296		0.264		0.221		0.135	0.083	0.082	0.070	0.062		
	⑦	0.690		0.522		0.396		0.286		0.248	0.197	0.173				
大腿部	①	0.361	0.695	0.262		0.265		0.258		0.268	0.247	0.254	0.264	0.236	0.223	0.212
	②	1.117		0.693	0.676	0.616	0.617	0.563	0.551	0.546	0.532	0.543	0.525			
	③	0.437					0.283			0.236	0.217	0.218	0.217	0.204	0.209	0.202
	④	0.405		0.320		0.319		0.296		0.292	0.289					
	⑤	0.606		0.593		0.486		0.485		0.465	0.454	0.451	0.443	0.441		
	⑥	0.286		0.226		0.207		0.213		0.209	0.206	0.197	0.193	0.186		
	⑦	0.480		0.381		0.377		0.346		0.317	0.283	0.277				

表3 体の各部におけるインピーダンス比 (無負荷状態を 1,000とする)

測定部位	輸液量 (L)	0.5 1 1.5 2.0 2.5 3.0 3.5 4 5 6 7 8 9 10														
		頭部	①	0.731	0.924		0.783		0.754		0.681	0.656	0.660	0.633	0.529	0.490
	②		0.708	0.668	0.638	0.610	0.573	0.549	0.542	0.479	0.445	0.359				
	③					0.673			0.589	0.506	0.347	0.461	0.445	0.435	0.422	
	④		0.712		0.679		0.641		0.607	0.500						
	⑤		0.891		0.755		0.635		0.637	0.587	0.550	0.525	0.471			
	⑥		0.677		0.584		0.575		0.511	0.403	0.469	0.425	0.469			
	⑦		0.819		0.792		0.627		0.572	0.555	0.545					
腹部	①		0.813		0.798		0.761		0.676	0.746	0.440	0.439	0.380	0.323	0.248	
	②	0.705	0.620	0.605	0.549	0.521	0.432	0.400	0.385	0.352	0.333	0.274			0.192	
	③					0.430			0.329	0.358	0.266	0.246	0.323	0.209	0.912	
	④		0.709		0.585		0.575		0.400	0.315						
	⑤		0.814		0.511		0.359		0.271	0.230	0.245	0.192	0.180			
	⑥		0.757		0.675		0.565		0.345	0.213	0.209	0.181	0.159			
	⑦		0.757		0.574		0.414		0.359	0.285	0.250					
下腿部	①	0.622	0.726		0.734		0.715		0.742	0.684	0.704	0.731	0.654	0.618	0.587	
	②		0.620	0.605	0.551	0.551	0.504	0.493	0.489	0.476	0.486	0.470				
	③					0.648			0.540	0.499	0.499	0.497	0.467	0.478	0.462	
	④		0.790		0.788		0.731		0.721	0.713						
	⑤		0.979		0.802		0.800		0.767	0.749	0.745	0.731	0.727			
	⑥		0.790		0.724		0.745		0.732	0.721	0.689	0.675	0.659			
	⑦		0.794		0.785		0.721		0.660	0.590	0.577					

表4 胸壁各部におけるインピーダンス (実測値)

測定部位	輸液量 (L)	インピーダンス (実測値)														
		無負荷	0.5	1	1.5	2	2.5	3.0	3.5	4	5	6	7	8	9	10
L ₁	①	0.5377		0.489		0.402		0.397		0.362	0.338	0.347	0.333	0.302	0.294	0.284
	②	0.499	0.316	0.299	0.282	0.264	0.229	0.250	0.227	0.219	0.199	0.192	1.890			
	③	0.502					0.287			0.258	0.240	0.213	0.215	0.207	0.192	0.179
	④	1.114		0.806		0.634		0.520		0.524	0.437					
	⑤	0.575		0.462		0.429		0.405		0.343	0.332	0.289	0.287	0.248		
	⑥	0.433		0.353		0.391		0.250		0.234	0.217	0.161	0.150	0.144		
	⑦	0.664		0.562		0.504		0.478		0.450	0.404	0.378				
L ₂	①	0.470		0.421		0.339		0.304		0.264	0.256	0.261	0.249	0.257	0.242	0.222
	②	0.737	0.506	0.499	0.472	0.449	0.440	0.421	0.410	0.401	0.389	0.372	0.332			
	③	0.482					0.305			0.269	0.241	0.223	0.217	0.206	0.190	0.213
	④	0.723		0.542		0.500		0.472		0.472	0.428					
	⑤	0.606		0.560		0.391		0.366		0.346	0.338	0.302	0.298	0.271		
	⑥	0.489		0.340		0.339		0.316		0.318	0.314	0.274	0.253	0.250		
	⑦	0.637		0.485		0.437		0.397		0.408	0.371	0.362				
L ₃	①	0.323		0.263		0.229		0.213		0.198	0.186	0.191	0.183	0.186	0.175	0.158
	②	0.591	0.348	0.328	0.324	0.290	0.263	0.232	0.226	0.226	0.223	0.220	0.197			
	③	0.527					0.316			0.284	0.274	0.251	0.236	0.223	0.217	0.209
	④	0.739		0.449		0.388		0.375		0.354	0.334					
	⑤	0.431		0.398		0.330		0.290		0.288	0.281	0.264	0.259	0.241		
	⑥	0.441		0.343		0.350		0.311		0.311	0.302	0.297	0.265	0.248		
	⑦	0.624		0.501		0.437		0.389		0.408	0.358	0.354				
L ₄	①	0.287		0.261		0.222	0.342	0.209		0.195	0.185	0.180	0.174	0.173	0.157	0.153
	②	0.495	0.457	0.416	0.409	0.349	0.319	0.250	0.261	0.265	0.224	0.214	0.193			
	③	0.486								0.278	0.247	0.231	0.247	0.203	0.200	0.183
	④	0.686		0.628		0.538		0.376		0.314	0.274					
	⑤	0.733		0.671		0.512		0.563		0.423	0.339	0.317	0.302	0.268		
	⑥	0.291		0.245		0.211		0.189		0.146	0.147	0.145	0.122	0.118		
	⑦	0.545		0.472		0.426		0.377		0.346	0.329	0.288	0.250	0.219		

表5 胸部における各部のインピーダンス比 (無負荷状態を 1,000とする)

測定部位	輸液量 (L)	インピーダンス比 (無負荷状態を 1,000とする)													
		0.5	1	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5	4	5	6	7	8	9	10
L ₂	①		0.896		0.721		0.647		0.562	0.545	0.555	0.530	0.547	0.518	0.473
	②	0.687	0.677	0.640	0.609	0.597	0.571	0.556	0.544	0.528	0.505	0.450			
	③					0.633			0.558	0.500	0.463	0.450	0.427	0.394	0.442
	④		0.750		0.692		0.653		0.653	0.592					
	⑤		0.924		0.645		0.604		0.571	0.557	0.499	0.491	0.447		
	⑥		0.695		0.672		0.646		0.650	0.643	0.560	0.518	0.511		
	⑦		0.761		0.686		0.623		0.641	0.582	0.568				
L ₃	①	0.589	0.814	0.548	0.709		0.659		0.613	0.576	0.591	0.567	0.575	0.543	0.498
	②		0.555		0.491	0.445	0.393	0.382	0.382	0.377	0.373	0.333			
	③					0.600			0.593	0.520	0.476	0.448	0.423	0.412	0.397
	④		0.608		0.525		0.507		0.497	0.452					
	⑤		0.923		0.766		0.673		0.668	0.652	0.613	0.587	0.560		
	⑥		0.778		0.794		0.705		0.705	0.685	0.673	0.600	0.563		
	⑦		0.803		0.700		0.623		0.654	0.573	0.569				

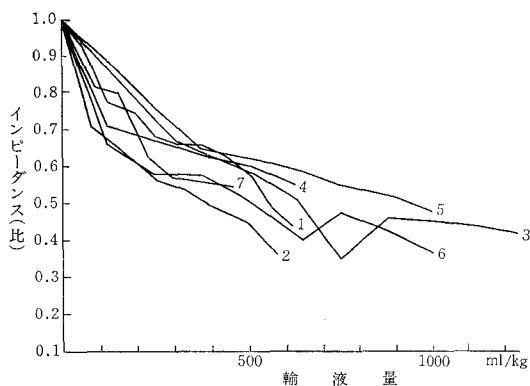


図4 大量輸液による頭部インピーダンスの変化
(無負荷状態を 1,000とする)

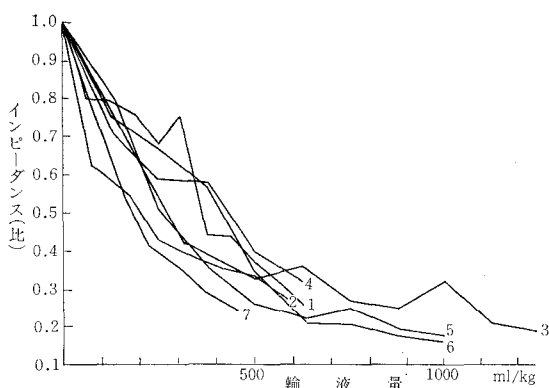


図5 大量輸液による腹部インピーダンスの変化
(無負荷状態を 1,000とする)

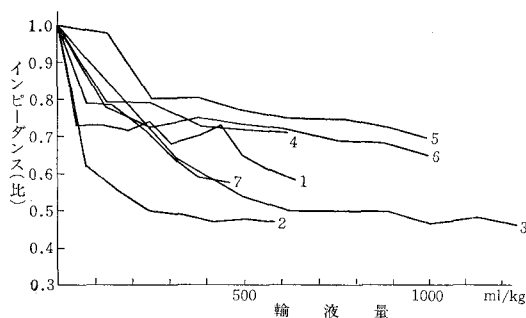


図6 大量輸液による大腿部インピーダンスの変化
(無負荷状態を 1,000とする)

図4, 図5, 図6は, インピーダンスの変化率と輸液量の相関関係をグラフにあらわしたものである。この場合, 輸液を一定速度で注入するため, 輸液経過時間を同時にあらわし, したがつ

て, X軸は 500ml で約 250分である。Y軸はインピーダンスの変化率を示す。

輸液開始とともに, 各部のインピーダンスはいずれも著明な減少をはじめる。

腹部のインピーダンスは, 輸液量 500ml/kg の時, ほぼ60~75%程度の減少を示す。これを他の部位のインピーダンスと比較して見ると, 頭部では35~55% (500ml/kg), 胸部では, 27~60% (500ml/kg), 下肢では, 20~40% (500ml/kg) の減少を示す。最も大きな減少を示すのは腹部であり, 最も少ない減少を示すのは下肢である。

次に, 各々のインピーダンスの下降速度と輸液量の関係を見ると, はじめ輸液量とインピーダンスの減少は, 逆比例的になる。これを初期急速下降期とする。その後, インピーダンスは, 比較的なだらかな下降に移る。これを緩慢下降期とする。

いずれの部位でも, インピーダンスは初期急速下降期と, 緩慢下降期の2段階を示す。

各部位における, 急速下降期から緩慢下降期への移行時期を輸液量で見ると, 腹部では 750ml/kg, 胸部では 250ml/kg, 下肢では, 250ml/kg である。頭部では, インピーダンスの減少の鈍化は他の部位程著明ではない。

胸部におけるインピーダンスは, 急速下降期から緩慢下降期への移行期への移行は, 極めて明瞭で, また緩慢期では, ほぼ同値を示すので平坦期という。さらに, 胸壁インピーダンスは, 輸液量 500ml/kg 以後, 平坦期につづいて再び減少率が大きくなる。これを急速下降期という。

以上をまとめると, 1) 輸液に伴い, 各部位のインピーダンスは著明に減少する。これを初期急速下降期という, 2) 同量の輸液量の最終インピーダンスを見ると, 腹部のインピーダンスが最も減少する。3) 各部位のインピーダンスは, 或る輸液量に達すると, 余り減少しなくなる。これを緩慢下降期という (他し L_3 は平坦期という), 4) 胸部 (L_2) のインピーダンスは平坦期につづいて, 再び減少率が大きくなる。これは他の部位には見られない特異的なもので, 後期急速下降期という。

表6 胸部における各部のインピーダンス比（無負荷状態を 1,000とする）

測定部位	輸液量 (L)	0.5	1	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5	4	5	6	7	8	9	10
L ₁	①		0.909		0.747		0.738		0.673	0.628	0.645	0.619	0.561	0.548	0.528
	②	0.633	0.599	0.565	0.529	0.459	0.501	0.455	0.439	0.399	0.391	0.378			
	③					0.572			0.514	0.478	0.424	0.428	0.412	0.382	0.357
	④		0.724		0.541		0.467		0.470	0.392					
	⑤		0.803		0.746		0.704		0.597	0.577	0.501	0.449	0.430		
	⑥		0.815		0.903		0.577		0.542	0.501	0.372	0.347	0.332		
	⑦		0.846		0.759		0.720		0.678	0.608	0.570				
L ₄	①		0.909		0.774		0.728		0.679	0.645	0.627	0.606	0.604	0.547	0.532
	②	0.923	0.840	0.826	0.705	0.691	0.505	0.527	0.535	0.452	0.432	0.390			
	③					0.656			0.572	0.508	0.475	0.508	0.418	0.412	0.377
	④		0.915		0.784		0.548		0.458	0.400					
	⑤		0.915		0.698		0.680		0.578	0.462	0.433	0.413	0.366		
	⑥		0.842		0.725		0.649		0.500	0.504	0.449	0.420	0.408		
	⑦		0.866		0.872		0.692		0.635	0.604	0.528	0.458	0.401		

第2節 経胸壁インピーダンスの部位的差異

上葉を投影する前後方向 (L₁) および左右方向 (L₄) 中葉の前後方向 (L₂) および下葉の前後方向 (L₃) を投影する4カ所のインピーダンスを、同輸液量にて測定し、その差異を比較検討した。

その実測値は表一4に示す。表一5、表一6は、前項同様、輸液開始前の無負荷状態のインピーダンス値を1,000として、その変化率を示したものである。

上葉、前後方向 (L₁)、左右方向 (L₄) は、ともにほぼ同様な変化を示す。すなわち、輸液量 500 ml/kg で、50%前後の減少が見られる。すなわち、初期急速下降期を示す。続いてゆるやかな下

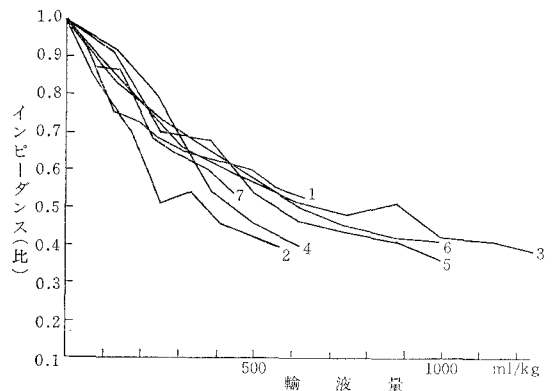


図8 大量輸液による胸部インピーダンスの変化（無負荷状態を 1,000とする）(L₄)

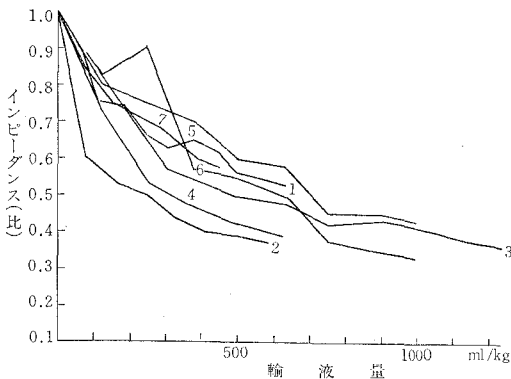


図7 大量輸液による胸部インピーダンスの変化（無負荷状態を 1,000とする）(L₁)

降、緩慢下降期に移る。しかし、初期急速下降期から緩慢下降期への移行は緩徐で、余りはつきりしない(図7, 8)。

前後方向 (L₁) による測定値より、左右方向 (L₄) の方が各例における下降曲線のばらつきは少ない。

肺の中葉前後方向 (L₂) での測定は、上葉前後方向 (L₁) とほぼ同様なインピーダンス下降曲線を示したが、各例での下降曲線のばらつきは、(L₁) に比して、より、少なくない(図9)。初期急速下降期から、緩慢下降期への移行期は、(L₁)、(L₄) よりもはつきりわかる。しかしその

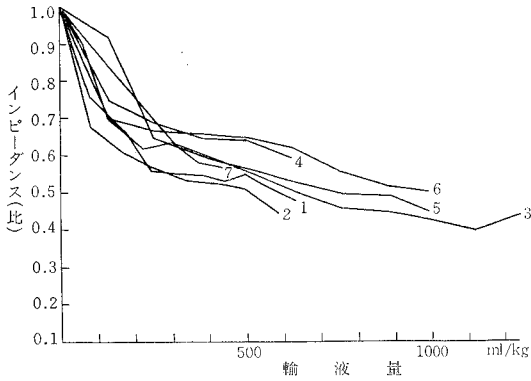


図9 大量輸液による胸部インピーダンスの変化
(無負荷状態を 1,000とする) (L₂)

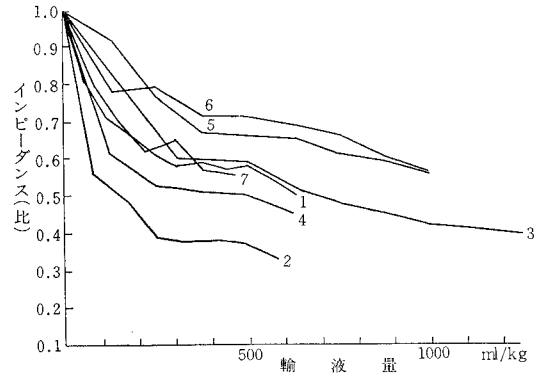


図10 大量輸液による胸部インピーダンスの変化
(無負荷状態を 1,000とする) (L₃)

輸液量は各例においてばらつきがある。

肺の下葉を投影する部位の前後方向(L₃)測定では、初期急速下降期は、輸液量 250ml/kg ~ 300ml/kg の頃まで、その後、平坦期はほぼ輸液量 300ml/kg ~ 500ml/kg の時期で出現し、その後、輸液量 500ml/kg 以上になると、後期急速下降へと移行する。3段階下降曲線をあらわす。

上葉、中葉、下葉のうち、各例での下降曲線でのばらつきは、下葉で最も著しく、最も急速な下降を示した例では 250ml/kg で60%の下降を示した(図10)。

第3節 大量輸液と肺動脈圧の変化

表一7、図11は、輸液量と肺動脈圧との関係を示したものである。実験全例において、輸液開始直後より著明な圧の上昇を示した。圧の上昇は輸液量とほぼ正比例関係を示しているが、輸液量 500ml/kg 以後は、圧の上昇は著明でなく、殆ど一定値(20—30mmHg)を示す輸液量 500ml/kg ~ 800ml/kg の間、圧の平坦期がつついたあと、輸

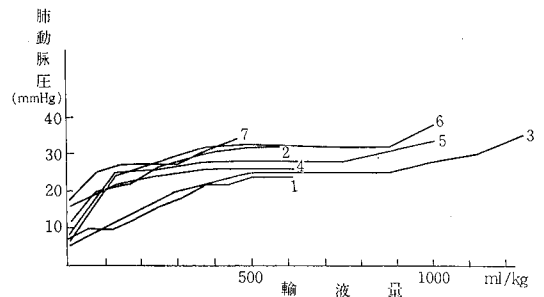


図11 大量輸液による肺動脈圧の変化

液量 800ml/kg 以上で圧は再び上昇する。肺動脈圧の変化は、無変化期を間にして、初期圧上昇と後期圧上昇の3段階の上昇曲線を示す。前項でも述べたように、胸壁(L₃)インピーダンスも3段階下降曲線が認められたので、肺動脈圧とインピーダンスの時間的相関を示した(図12)。全体の相関は、インピーダンス下降と肺動脈圧上昇は逆比例的関係にあるが、両者の平坦期の出現に、輸液量、すなわち、時間的にずれがあり、直線的下降

表7 大量輸液による肺動脈圧の変化 (mmHg)

実験	輸液量	無負荷	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	8	10	10	13	17	18	22	22	24	24	24	
2	12	20	22	27	29	31	32	33				
3	6			20	25	25	25	25	28	30	35	
4	16	22	24	26	26	26						
5	8	25	26	28	28	28	28	31	34			
6	8	24	28	32	32	32	32	32	38			
7	18	25	27	27	27	32	34					

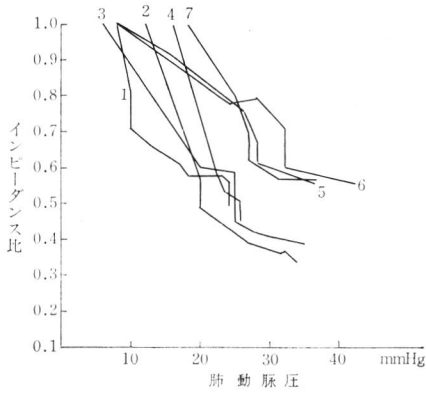


図12 インピーダンス比と肺動脈圧

線に階段状突出が認められる。

第4節 大量輸液による胸部線像および肺摘出標本の肉眼的観察

実験犬10匹を使用し、同条件による急速大量輸液をおこない、胸部レ線像の撮影、肺動脈圧、血圧、および各部インピーダンスを測定し、輸液量各 200ml, 400ml, 600ml, 800ml/kg にて、それぞれ開胸、剖検し、肉眼的観察をおこなった。但し、肉眼的観察には、Singer の分類を用いた。写真4は電極装着、肺動脈カテーテルを挿入して、輸液開始前の無負荷状態での胸部レ線像である。

写真5は輸液量 200ml/kg の時で、心陰影の拡大を認めるが、肺には特に異常所見を認めない。

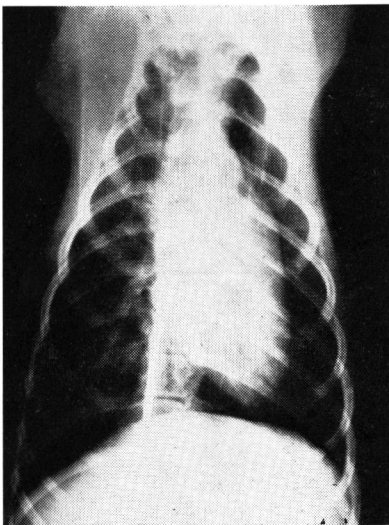


写真4

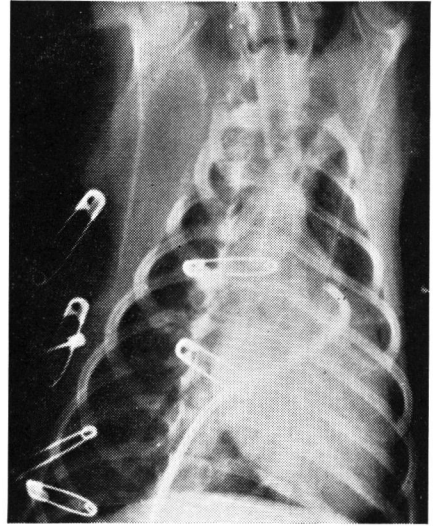


写真5

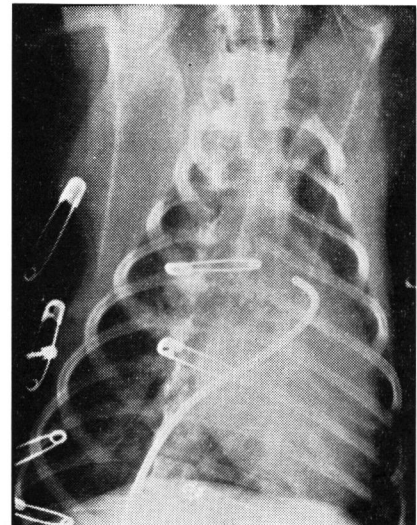


写真6

また、肉眼的にも変化はなく、標本に断面をいれ難く、圧縮しても、水分は断面より、ほとんど出なかつた。分類上 (+) とした。写真6は輸液量 400ml/kg の時の状態で、心陰影は増々増大し、肺紋理の増強が多少認められる。肉眼的に肺の表面は極めて浸潤となり光沢を増している。また、肺を圧すと、断面からでごくわずかに水分が出るので、分類上 (++) と判定した (写真7)。

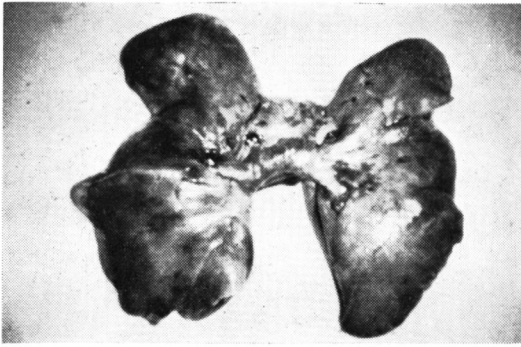


写真7

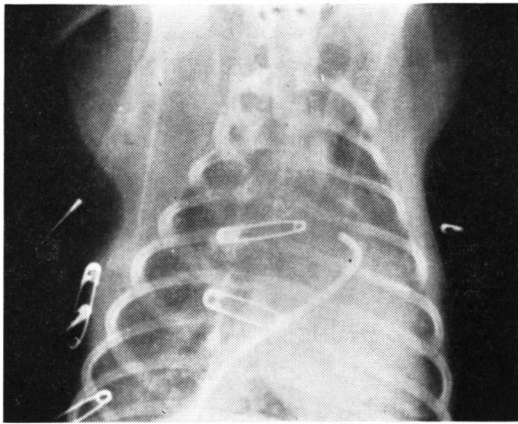


写真8

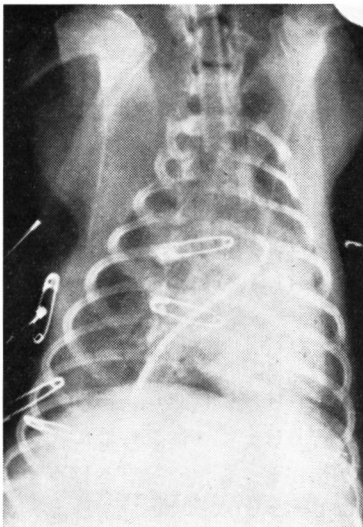


写真9

写真8は輸液量 600ml/kg の時の状態で、肺に明らかな異常所見が認められる。それは肺の中心部より、辺縁にむかつて、透過性が減少し、全体に白っぽい。肉眼的観察では、上・中葉では、ほぼ 200ml/kg の時より、多少、その湿潤さは増したように思うたが、分類上では(++)と判定した。しかし、下葉においては、割面を軽度で圧すと水分が出てくる。気管支は、水泡で満されている。分類上(++)と判定した。

さらに、写真9は、輸液量 700ml/kg の時のもので、肺の全域にわたつて、透過性が減少している。肺は水浸しのようで、下葉は赤褐色を呈している。割面をいれると自然に水分が出てくる。気管は泡で満されている。分類上(++)と判定した(写真10)。

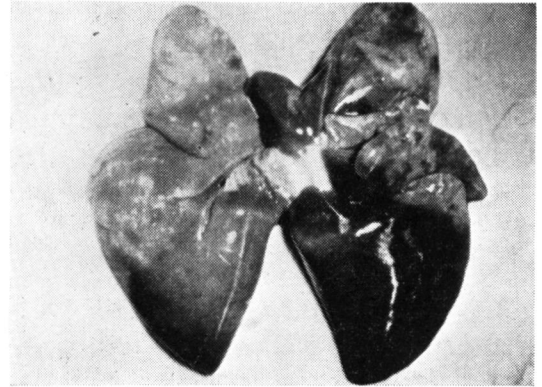


写真10

第V章 実験結果の総括

実験成績の結果をまとめると次のようになる。

まず、急速大量輸液による体の各部位の測定結果をみると、頭部、胸部、腹部、下肢のいずれも、輸液に伴いインピーダンスの著明な減少、すなわち、初期急速下降を示す。

次いで、各部のインピーダンスは、或る輸液量に達すると、余り減少しなくなる。これを緩慢下降期という。しかし、下葉を投影する(L_3)は、この緩慢下降期には、インピーダンスは同値を示すので、平坦期というべきであろう。したがって、他の部位において、急速下降期から緩慢下降期への移行は、極めてゆるやかで、余りはつきりしないが(L_3)ではこの移行がはつきりしてい

る。

さらに、(L₃)は特異的な変化をあらわす。それは他の部位と同様に、急速下降期と緩慢下降期(平坦期)とを示すが、つづいてインピーダンスは、再び減少する。つまり、後期急速下降期をあらわすということである。

次に、同一実験犬における輸液終了時のインピーダンスの減少率を見ると、いずれも腹部のインピーダンスの減少率が最も大きく、また、下肢のインピーダンスの減少率が最も小さい。

次に、急速大量輸液による肺動脈圧の変化を見ると、輸液量 500ml/kg～800ml/kgの間の圧の平坦期をはさんで、その前後に、輸液量にほぼ正比例する、初期圧上昇と後期圧上昇との、3段階の上昇曲線を示す。そこでインピーダンスと肺動脈圧との相関を示すと、逆比例的関係にあるが、直線の下降線に階段状突出が認められた。

実験終了後、摘出肺の肉眼的観察をおこなったところ、輸液量に伴い、Singer²²⁾の分類に従って重症度をあらわしている。胸部X Pーをみると、輸液量 500ml/kg 以上で異常所見を認めることができた。

第VI章 考 察

インピーダンスの性質から、水分貯留量の増加によりインピーダンスは減少する。したがって電極間に存在する容量増加の可能性を考えて見ると、例えば腹部の場合、腹腔内には腸管および腸間膜などがあり(もちろん、肝、脾などの臓器なども水分貯溜が、極めて大きいと考えられるが、この場合、電極間にはこれらは存在しないと思える)、容量増加が、他の部位に比べて、最も起こりやすいと思える。しばしば臨床的に、4,000ml以上の腹水の貯溜を認めることがあるし、また、術後輸液が、胃内および腸管に多量に推泄されることなどから、腹部に多量の水分貯溜が可能であることがわかる。それゆえ腹部のインピーダンスが、他の部位のそれと比較して、著明な減少を示すことが理解できる。言いかえると、頭部、胸部、下肢のインピーダンスの減少率と、その鈍化(緩慢下降期)が、腹部に対して少ない輸液量で出現するという事は、水分の貯溜が腹部に比べ

て少量であることを物語っている。

胸部のインピーダンスも同様に、輸液量に伴い減少し、初期急速下降、それにつづく緩慢下降期を示す。

肺は、解剖学的に胸廓内の限定された容積内にあり、他臓器内にみられるような浮腫による容積増大はできにくい条件にある²³⁾。この点、頭蓋骨につつまれる脳と似たものと思われるが、肺は、脳などのような実質臓器と異なる含気性臓器である。以上のことから、肺水腫が起こるとき、外に向つて肥大することは制限されるため、力学的には、増加した水分によつて、肺胞内空気が押し出される結果、水と空気とのしめる割合がちがつてくる²⁴⁾。この場合、水分は電解質溶液で、低インピーダンスであり、高インピーダンスの空気は減少し、その結果、肺組織のインピーダンスは、低下したものとかがえられる。つまり、含気性臓器である肺において、正常状態での、高インピーダンスの空気と低インピーダンスの水分の占める割合は決つているが、肺の病的状態、この場合、肺水腫に陥ると、肺胞内空気が押し出され、水分が増加し、空気は減少する。したがつてインピーダンスは減少することになる。

インピーダンスの低下が、直接、肺内への水分の浸出量を表わすかどうかについての、直接的な証明はしなかつたが、剖検による肉眼的観察でも、ほぼ併行するような所見が認められていることなどから、インピーダンスが主として、液量変化をあらわすものと考えてよいと思う。

さらに詳しく胸部インピーダンスの変化を検討する。

(L₁), (L₂), (L₃), (L₄)の各部位で測定したインピーダンスは、大量輸液で著明な減少を示した。しかし、(L₂), (L₃)におけるインピーダンスは、他の部位すなわち(L₁), (L₄), 頭部、腹部、下肢、におけるインピーダンスとは異つた減少曲線をあらわす。特に(L₃)ではつきりあらわれている。それは、第1に、輸液に伴い、初期急速下降期が出現し、緩慢下降期へ移行するのは他の部位と同じであるが、その移行はきわめてはつきりしており、輸液量 250ml/kg～500ml/kg に

におけるインピーダンス値はほぼ同値を示す。

第2に特異な点は、輸液量 500ml/kg 以後、再度インピーダンスの減少が大きくなり、後期急速下降期が出現することである。

この二つの特異なインピーダンスは、何を意味するのだろうか。

インピーダンスが容量の変化に伴うという性質を考えると、インピーダンスが同値を示すということは、容量が無変化ということになる。(L₃)において、輸液量 250ml/kg～500ml/kg の間、輸液にかかわらず、容量が無変化ということになる。

(L₃)における3段性のインピーダンスの変化において、初期急速下降期は、輸液による血管外浸出液が、肺間質内に貯溜する時期であり、注入量にはほぼ逆比例して減少することは、物理的圧差によるものと考えられる。(L₃)における輸液量 250ml/kg～500ml/kg の平坦期(緩慢下降期)は、水分の間質内許容量に限界があり、その飽和状態を維持している状態であろうと考えられる。

肺が、大量輸液にもかかわらず、飽和状態を維持できるのは、Warren²⁵⁾らによつて研究された、リンパ管ドレナージも活発におこなわれ、生物学的な、ホメオスタシスが働くことによると思われる。

(L₃)において輸液量 500ml/kg 以上で、後期急速下降期を示すのは、間質飽和状態にもかかわらず輸液がおこなわれ、間質内貯溜液圧が限界閾値を越し、肺毛細管圧の上昇²⁶⁾、血管膠質浸透圧の低下²⁷⁾、肺毛細管の透過性の亢進²⁸⁾、表面活性物質の減少²⁹⁾などが、単独に、または、そのいくつかが合併し、それがリンパ管ドレナージ³⁰⁾に打勝つた場合に、間質内貯溜液が肺胞内へ移行したことを示すものである。後期急速下降期は、間質内貯溜液が肺胞内へ移行したことを示す。すなわち、間質内水腫期から肺胞内水腫期への移行を示すものと思われる。このことは肺動脈圧とインピーダンス比との相関からもうかがえる。(L₃)において、インピーダンスの平坦期は、輸液量 250ml/kg～500ml/kg で出現し、肺動脈の平坦期は、輸液量 500ml/kg～800ml/kg で出現す

る。両者の平坦期の出現は、輸液量のずれ、つまり時間的ずれがあり、これは図9で示す肺動脈圧とインピーダンス比との相関にて、直線の下降線の間にある階段状突出であらわされている。つまり、輸液に伴い、インピーダンスは減少し、肺動脈圧は上昇するが、その後、肺動脈圧が上昇するにもかかわらず、インピーダンスは一定であり、グラフで見ると水平移動し、その後、肺動脈圧は一定となり、インピーダンスが減少する垂直移動としてあらわれる。この水平移動は、前述の(L₃)のインピーダンスの平坦期、つまり、間質内貯溜液の飽和状態をあらわし、また垂直移動は、肺動脈圧の平坦期、つまり、間質内貯溜液の肺胞内への移行をあらわしている。

飽和状態の間質貯溜液があるところに、さらに大量輸液をおこなうと、余剰の水分は、肺のリンパ管ドレナージなどにより、肺から排除され、その状態を保つ。それゆえ(L₃)のインピーダンスはど減少せず一定となり、肺動脈圧が上昇する。しかしこの生物学的ホメオスタシスを越えて、大量輸液がなされると、遂に間質内貯溜液は肺胞内へ移行するため、肺含気量の減少、含水量が増加し、インピーダンスは下降し、肺動脈圧はど逆に、外圧低下のため、上昇を一時停止したものと考えられる。

また、胸部レ線像と(L₃)のインピーダンスの優位について考察する。

(L₃)のインピーダンスの平坦値が間質内貯溜液飽和状態をあらわすことから、両者の優位性は、胸部 X-P の異常所見の出現と、(L₃)の平坦値の出現が、どちらが早く出現するかということになる。

輸液量 400ml/kg の時の胸部レ線像は、肺紋理の増強が軽度認められ、輸液量 600ml/kg の時、肺は全体に白く、明らかな異常所見として認められることができる。

前述の如くインピーダンスの平坦期は、輸液量 250ml/kg～300ml/kg の時に出現する。

したがつて、大量輸液における肺水腫の診断は、本実験においては、胸壁インピーダンスによる方が優位であるという結果を得た。

以上のことから臨床的に、胸部インピーダンス連続観察により、肺内の水分の貯溜液を察知でき、その変動から心肺循環動態の異常を察知することも可能となり、肺水腫の早期診断の指標としても重要な役割を果すものと思われる。

第VII章 結 論

1) 大量輸液により、頭部、胸部、腹部、下肢のインピーダンスは著明に減少した。減少率の最も大きいのは腹部であり、最も小さいのは下肢である。初期の急速なインピーダンスの減少する時期を初期急速下降期という。

2) 初期急速下降期につづいて出現するインピーダンスの減少率が小さくなる時期を緩慢下降期と言い、この出現は下肢が最も早くど腹部が最もおそい。

3) (L_2), (L_3) は、特に緩慢下降期のインピーダンス値は、各々ほぼ同値を示すので平坦期という。それは輸液量 300ml/kg~ 500ml/kgの間である。

4) 平坦期につづいて、(L_2), (L_3) では、さらに減少率が大きくなる時期があり、これを後期急速下降期という。

5) 頭部、(L_1), (L_4), 腹部、下肢のインピーダンスはど初期急速下降期、緩慢下降期の2段性的変化をした。

6) (L_2), (L_3) においては、初期急速下降期、平坦期、および後期急速下降期の3段性的変化をあらわした。

7) (L_2), (L_3) における初期急速下降期は、大量輸液による肺間質内への水分貯溜をあらわし、平坦期は、間質内水分貯溜の飽和状態をあらわし、後期急速下降期は、間質内水分貯溜から肺胞内への移行をあらわす。

8) 前項7)は、インピーダンスと肺動脈圧の相関をあらわすグラフにおいて、直線の下降線の間にある階段状突出でうらづけられた。

9) 胸部インピーダンスは、循環動態の異常を察知するのに胸部 X-P よりも早い。

稿を終るにあたり、終始ご懇篤なるご指導とご校閲を賜わった恩師織畑秀夫教授に深甚の謝意を捧げるとともに、ご懇切なるご教示ご鞭撻を頂いた倉光秀磨助教授、

山中非常勤講師、ならびに理論外科堀原一教授に心から謝意を表わし、また、Impedograph 法に関する文献をお送り下さったStanford University School of Medicine, Neurosurgery, Research Prof. S. Tachibana に深謝します。

参考文献

- 1) 渡辺昌平：肺水腫、肺うつ血の関する考察、呼吸と循環 3 205 (1955)
- 2) 斎藤千六：肺水腫、呼吸と循環14 4 (1966)
- 3) 友松達也：肺水腫の病態生理ならびに発生機序について、最新医学 269 (2) 23 (1968)
- 4) Lee, C.J. et al: J Thorac Cardiovasc Surg 53 759 (1967)
- 5) Joseph, M., Van De Water: The Archives of surgery 540 102 June (1971)
- 6) Domerantz, M. et al: Surgery 681 July (1969)
- 7) Hayward, G.W.: Pulmonary edema. Brit M J 1 1361 (1955)
- 8) Atzler, E. and G. Lehmann.: Arbeitsphysiol 5 637 (1932)
- 9) 斎藤一郎：呼吸と循環 2 8 (1968)
- 10) More, A.G.: The Impedance Pneumograph. Aerosp Med 33 28 (1962)
- 11) Geddes, L.A. et al: Aerospace Medicine 34 January (1962)
- 12) Tachibana Shunro: Impedance study of Brain tissue changes after penetrating injury. Experimental Neurology 32 206 1971
- 13) 原沢道美：急性肺水腫特にその成因をめぐって、最新医学 16 2896 (1961)
- 14) Visscher, M.B. et al: Pharmacolog Reves 8 398 (1956)
- 15) Pomerantz, M. et al: Surgery July 66 260 (1969)
- 16) Haddy, F.J.: Amer J Physiol 161 336 (1950)
- 17) Doyle, F.T.: The effect of intravenous infusion of saline on pulmonary arterial and pulmonary capillary pressure in man. J Clin Invest 36 345 (1951)
- 18) Haddy, F.J.: Pulmonary vascular pressures in relation to edema production by air way resistance Campbell and plethors in dogs. Amer J Physiol 161 336 (1950)
- 19) Commander, A.Y.: Standard method for the production of pulmonary edema in the dog. Arch Surg 63 191 (1951)
- 20) 中川恭一・他：心臓及び大動脈レオグラフィーに関する研究、日循誌 28 907 (1964)
- 21) 今野草二：心臓カテーテル法 南山堂 (1964)
- 22) Singer, D.: Circulation Res 6 4 (1958)

- 23) 原沢道美：肺循環. 金原出版 (1968)
- 23) 仲田 祐：肺水腫の発生機序. 臨床生理 1 51 (1971)
- 25) **Warren, M.F. et al:** Amer J Physiol 137 641 (1956)
- 26) **Visscher, M.B. et al:** Pharmacolog. Reves 8 398 (1956)
- 27) **Paine, R.:** J Lab Clin Med 3 1544 (1949)
- 28) **Wasserman, K.:** Circulation Res 3 594 (1955)
- 29) 渡辺昌平：肺水腫の成因. 臨床生理 33 (1) 1 (1971)
- 30) 大岡 剛：肺水腫の発生機序に関する実験的研究. 臨床生理 41 (1) 1 (1971)