細胞膜透過性に及ぼす高圧の影響

第4編　電導度に就て

岡山大学医学部生理学教室（主任：林教授）

講師　岡田勝喜

〔昭和29年9月17日受稿〕

I 緒論

古くから電気抵抗を測る事により細胞の生活現象が研究されて居る．一般に液体の電導度の本態は，其の中に含まれるイオンの移動にある．生体細胞組織の電導度も其の本態は液体と同一であつて，其の細胞を通過移動するイオンによつて決る．そしてイオンの移動に対して最大の障碍の一つは形質膜と思われる．故に形質膜のイオンに対する透過性が増減すれば，細胞の電導度も増減するであろう．従つて細胞の電導度を測れば，形質膜の透過性を伺う事が出来るわけである．電導度が電気抵抗に逆比例する事は云う迄もない．著者が先の研究[1)2)]に於て述べたように，蛙の筋肉及び上皮の直流抵抗が高圧の作用で減少する事を以て，それらの形質膜透過性が高圧の作用で増大すると云う事実の一つの根拠とした．そこで今回は種々の生体細胞組織の交流電気抵抗（以下単に抵抗と云う）を測定し，高圧の作用による夫等形質膜透過性の変化を明かにする為に本実験を行つた．

II 実験方法

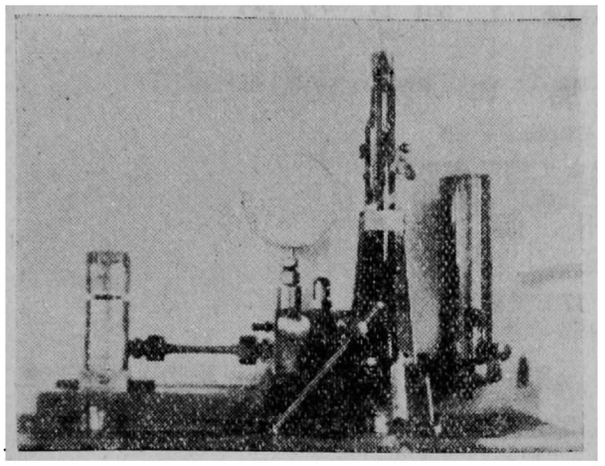
液体の電導度測定には Kohlrausch 橋を用いる．著者は此の装置と組合わせて用うべき電極の部分を高圧ボンベに入るように工作した．即ち直径約1.2糎長さ約10糎の試験管を水溶液の容器とし，其の中に二枚の面積約1平方糎の白金円板を電極として上下に約1糎の距離に平行に保つた．此の電極は固定的なものではなく何時でも試験管から出す事が出来る．尚電極の白金板には白金黒[3)]を附けた．

斯る装置で Ringer 氏液，動物血球浮游液，其の他液体の抵抗を測り，更に生体細胞組織即ち蛙，蟇の皮膚，膀胱，腸間膜等を一方の白金電極に充分被い覆せて，それらの抵抗を測つた．又セロハン紙，コロヂウム膜等の抵抗も同様にして測つた．教室の従来の報告にもあるように，高圧ボンベは操作が困難で二枚の電極白金板の間隔は正確に1糎の距離に保ち難く，実験は凡て電気抵抗の圧力変化に対する相対的な値を比較した．電導度は電気抵抗の逆数であるから，簡単に抵抗の減少は電導度の増大であり，抵抗の増大は電導度の減少であると考えて実験を行つた．

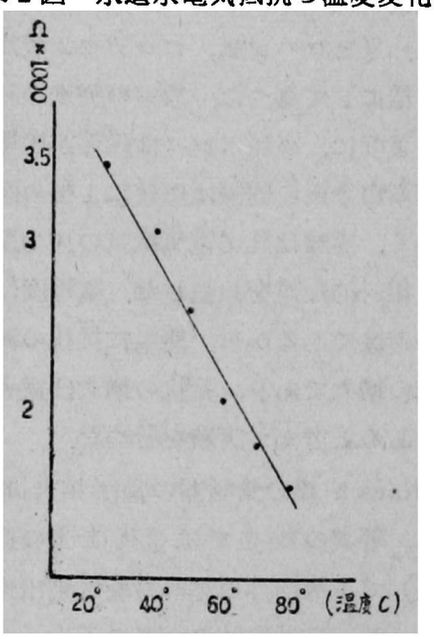
Kohlrausch 橋の受話器の音は相当聞き取り難く，著者の組立では全長1米の抵抗弦（洋銀）で1糎内外の差が音を区別出来る限度であつた．又抵抗弦の金属の不均一に基く測定値の誤差に対しては弦の異る2～3の場所で抵抗を測り其の平均を求めた．以下の実験では何れも，圧力に対する抵抗の変化は可逆的で，増圧の場合と減圧の場とは略同じ経路を往復するので，中間圧に於ける抵抗値としては増圧，減圧両時の平均を取つた．尚作用させた圧力は最高1500気圧で此の高圧ボンベは2000気圧迄圧力が上る（第1図）．

液体の電導度は温度によつて著しく変動する[4)]．著者の方法でも著明に現われるので（第2図，水道水の温度による電気抵抗の変化）本実験では温度による影響に充分注意した．

第　1　図



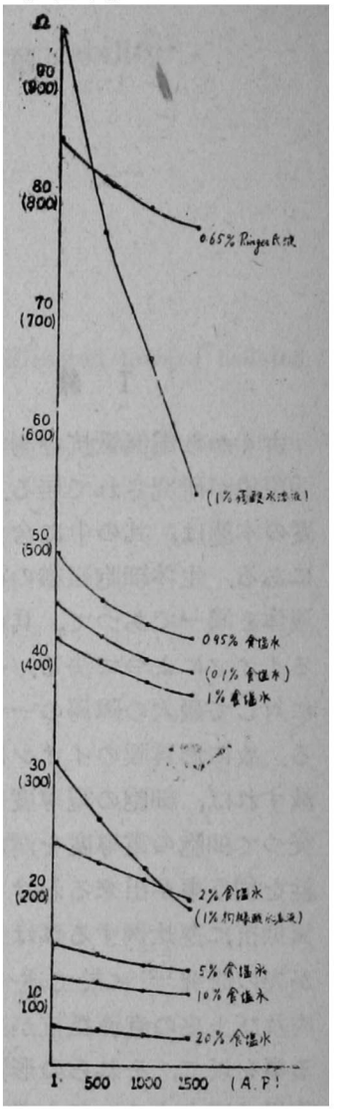
第2図　水道水電気抵抗の温度変化



Ⅲ　実験成績

1.　本実験では，生体細胞組織その他をRinger 氏液或は食塩水に没した儘その溶液に負圧して其の時の抵抗の変化を測るのであるから，二枚の電極の間には細胞其の他があると共に Ringer 氏液或は食塩水も存在する．そこで先ず夫等 Ringer 氏液，食塩水等の抵抗が高圧の作用で如何に変化するか観測した．第3図は0.1～20％の各種濃度の食塩水，0.65％ Ringer 氏液，1％枸櫞酸，蓚酸水溶液等の圧力（1500気圧迄）による抵抗変化である．一般に濃度が低い程，圧力に依る抵抗の減少が大きく，又弱電解質は強電解質に比し抵抗の低下は著明である．何れにしても此れ等溶液は圧力の作用で電導度が増大する．

第3図
各種水溶液の抵抗変化



2.　蛙上皮及び蛙腸間膜

蛙上皮の外面を内側にして折り重ね，上皮流を打消して其の抵抗を測つた．第4図に示す如く，圧力の増強と共に其の抵抗は著減する．腸間膜に就ても略同様であるが，抵抗減少の程度は上皮の場合程著しくない．何れの場合も 1. の項に述べたように，周囲にある Ringer 氏液自体の抵抗が高圧で変化するから，上皮，腸間膜の圧力による変化は Ringer 氏液の変化を差し引いたもの（即ち両者の抵抗変化の傾斜の差）になる．従つて上皮は1500気圧迄次第に抵抗が減少するのに，腸間膜では 500 気圧以上は抵抗の変化が殆んどない事になる．

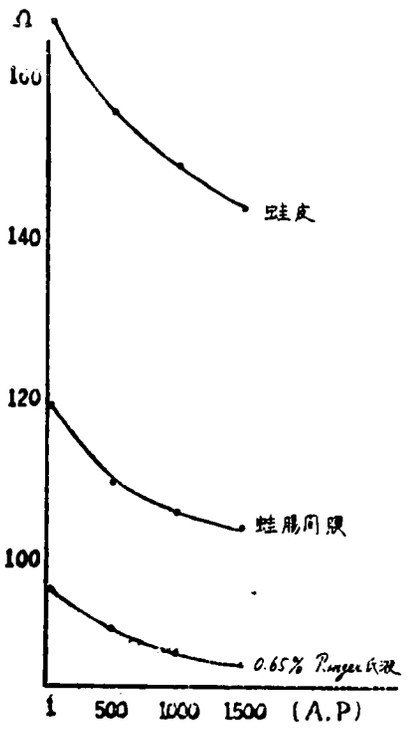
3.　セロハン紙，コロヂウム膜

生体と比較する目的でセロハン紙，コロヂウム膜を0.65％ Ringer 氏液に浸した儘加圧して抵抗の変化を観察した（第5図）．一見明かな如く，夫等の抵抗減少の程度は Ringer 氏液と殆んど同じであるから，加圧によるセロハン紙，コロヂウム膜自体の抵抗変化は殆んどないと認められる．

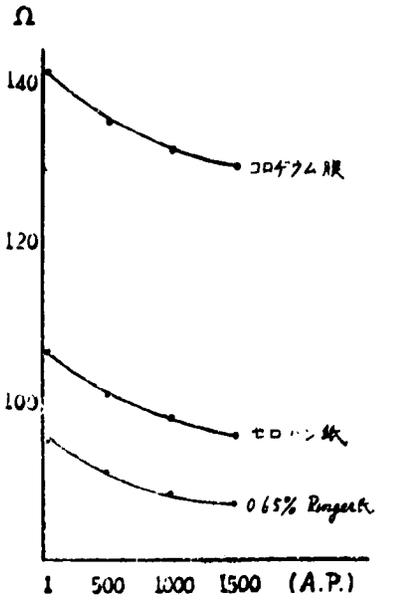
4.　蛙及び蟇の膀胱

蛙及び蟇の膀胱を0.65％ Ringer 氏液に入

第4図　蛙の上皮及び腸間膜

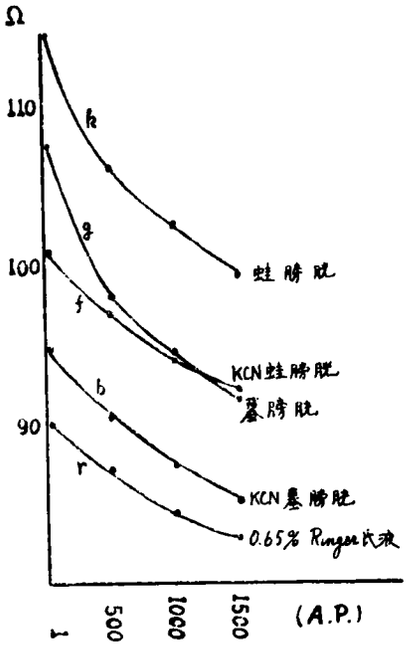


第5図　セロハン紙コロヂウム膜



れて，加圧による抵抗の変化を測つた．何れも（第6図 k，g）圧力の増大（1500気圧迄）と共に抵抗は著減する．但し500気圧以上では膀胱自体の抵抗変化は殆んどない．一方1％ KCN 水溶液に浸した膀胱の，加圧による抵抗変化（第6図 b，f）は，0.65％ Ringer 氏液の変化（第6図 r）と殆んど同じである．即ち生きて居る膀胱は加圧により電導度が増すが，細胞機能の失われたものの電導度は殆んど変らない事がわかる．

第6図　蛙及び蟇の膀胱



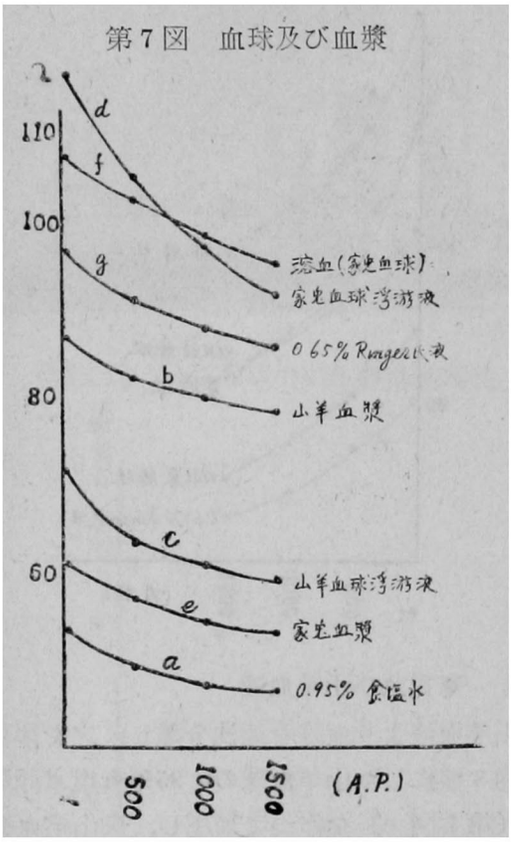
5.　家兎及び山羊血液

山羊血液より血球を遠沈分離し，之を体積で約8倍にした山羊血球の0.95％食塩水浮游液（第7図 c）を作つて加圧し，又山羊血漿（第7図 b）に加圧した時の抵抗変化を測つた．血球浮游液でも血漿でも作用させる圧力を増すに従つて抵抗は減少するが，血球は血漿に比し減少の程度が著しく，又血球の抵抗減少の傾斜は0.95％食塩水（第7図 a）に比し稍急（500気圧迄）であるのに，血漿と0.95％食塩水との傾斜には殆んど差がない．

次に家兎血球（第7図 d）を前と同様にして加圧の影響を調べ，又家兎血漿を0.95％食塩水で約4倍に稀釈して加圧による抵抗の変化を調べた（第7図 e）．此の場合，血球は0.95％食塩水に比し抵抗減少の度合が著しく急激であるのに，血漿は山羊血漿の場合と同様0.95％食塩水の加圧による変化と殆んど同じである．更に家兎血球を0.65％ Ringer 氏液にて約4倍に稀釈して加圧による影響を調べた（第7図 f）．斯る血球は大部分溶血を起すので，溶血した血液の加圧による抵抗変化を測つた事になる．図から明らかなよう

に，溶血では正常血球に加圧した場合に比べ抵抗減少の度合は著しく小さく，0.65％ Ringer 氏液（第7図 g）の変化と殆んど同様である．

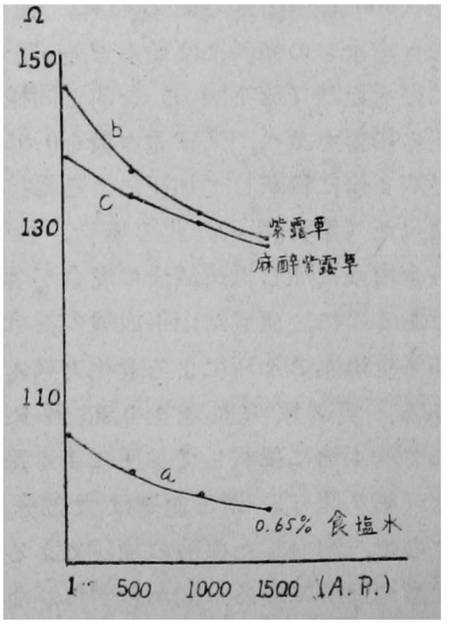
第7図 血球及び血漿



6. 紫 露 草

紫露草の裏面表皮細胞を0.65％食塩水（略等滲透圧）に入れて同様に加圧による抵抗の変化を測つた．前記諸実験で生体細胞の場合に見られたと同様，抵抗減少の傾斜は，其の浮游液なる食塩水に比べ著明である（第8図 a，b）．又0.65％食塩水に2％の割にアミルアルコールを加えた液に細胞を入れて加圧すると，其の抵抗の変化は0.65％食塩水と殆んど変らない（第8図 a，c）．

第8図 紫 露 草



Ⅳ 総括並に考察

電解質溶液が電流を通すのは，溶液の陰陽両イオンが溶液中で一極から他極に向い移動するに由ると考えられて居る．従つて溶液中で移動出来るイオンの数が多い程電極にかけられた同じ電圧に対し，通ずる電流は大になる[5]．又液体の電導度は温度の上昇と共に増大するのが原則[4]であるが，第2図でも此の関係は明かである．

次に生体細胞組織に就ては緒言にも触れた如く，上述の物理化学的なイオンの移動に加えて，其のイオンの通過に対する障壁が問題になる．元より生体細胞の電導度を取扱う時も，原則的には液体と異るわけではなく，電導度は陰陽両イオンが，それを通過移動するにある事は云う迄もない．併し細胞の内部は純液体ではないから，それが細胞と液体との電導度の相違の一つとなり，中でも一般に形質膜がイオンの通過に著しい選択性をもつ事から，形質膜が細胞の電導度の特性を現わす最大の要因と考えられる．即ち細胞の電導度が大きい事は，其の形質膜の透過性が大きい事を示すと考えられる．著者は先の研究[1,2,16]で，生体細胞組織が高圧の作用で其の透過性が亢進する事を発表したが，本実験では種々の生体細胞組織に高圧を作用させ，其の交流電気抵抗が何れも減少する事，即ち電導度が増大する事を知り，高圧の作用でその膜透過性が亢進すると云う確信を高めた．

以下各実験に就て詳しく考察して見る．蛙の上皮及び腸間膜（実験2）では，圧力が増強する程抵抗は減少するが，500気圧迄が特に著しい．圧力により周囲の Ringer 氏液の抵抗も減少するが，Ringer 氏液のみの抵抗の減少と，上皮等が介在する場合の抵抗の減

少との程度を比較すれば，一見して著しい差のある事がわかる．即ち生体と周囲の液体を合せたものゝ抵抗から液体の抵抗を引いたものが真の生体の抵抗であり，其の抵抗値が加圧により減少する（即ち電導度はよくなる）．一方実験3によればセロハン紙等の抵抗は高圧により殆んど変らない．実験2と3を比較すれば，透過性の変り易い形質膜をもつ生体と，透過性の変り難い無生物膜とが高圧の影響に就て著しく異る事がわかる．

蛙及び蟇の膀胱膜に高圧を作用させても（実験5），実験2の場合と同様500気圧迄の加圧により抵抗は著減し，以後1500気圧迄の加圧で徐々に減少する．而もKCNで処置し，其の生理的機能を障碍した膀胱膜に加圧した場合には，セロハン紙等の時（実験3）と殆ど同様で，膀胱膜自身の抵抗は加圧により殆んど変化しない．此処でも不安定な透過性をもつ形質膜のある生活組織と，言わば死して其の形質膜透過性が固定したものとの高圧に対する態度が著しく異る事がわかる．

実験6でも特に注目を引くのは，加圧による家兎及び山羊の血球浮游液の抵抗減少が血漿乃至食塩水に比べ著しい事である．此の事実によると，血球浮游液の抵抗には血球膜が大きな役目をなし（故に抵抗が高い），此れが圧力により特に影響されて透過性が増し，抵抗の減少が著しいのであると考えられる．此の際抵抗の高い家兎血球は山羊血球に比べ，元来透過性が小さく，其れが圧力により大となる結果，著明な（山羊では1～500気圧，家兎では1～1500気圧）影響を受けたのであろう．家兎血球に溶血を起させると（実験5），比較すべき0.65%食塩水の抵抗変化と殆んど同程度であるのは多分上記の理由による．即ち血球浮游液と異り赤血球膜がその主な抵抗要因ではないから，単に其の溶液として丈け加圧の影響，電導性の増大を来したのであろう．

植物細胞，紫露草の裏面表皮細胞に就ても（実験6），前記生体の諸実験と同様で，1000気圧位迄は細胞自身の抵抗が高圧により減少する事を示し，電導度は増大する事になる．即ち圧作用で形質膜透過性が増大する事を意味する．一方麻酔薬としてアミルアルコールを作用させると，細胞自身の電導度は圧作用で余り変化しない．此の事実によると，細胞はアルコールにより既に膜透過性が増大して[7]，易変性を失つて居るから，圧力に対応する能力がないものと考えられる．

Ebbecke[8][9]は高圧による筋肉の抵抗の減少は，其の中に含まれる弱電解質の抵抗が高圧により減少する為であると考えて居る．実験1で明かなように弱電解質溶液の抵抗が圧作用で著減する事は事実であるが，前記実験成績から見れば，高圧による透過膜の性状の変化が生体細胞組織の電気抵抗の減少となつて現われると考える方が遙かに妥当である．

V 結　論

1. 食塩水，Ringer氏液等電解質溶液の電導度は高圧の作用で増大する．弱電解質はその増大の程度が著しい．

2. 蛙の上皮，腸間膜，蛙及び蟇の膀胱，家兎及び山羊の血球，植物細胞等所謂生体細胞組織は高圧の作用で電導度が増大する．而も其の電導の変化は略可逆的で，生体としての反応である事を示す．

3. 殺した膀胱，コロヂウム膜，セロハン紙，麻酔薬を作用させた生体細胞等に高圧を作用させても，其の電導度は殆んど変らない．

4. 以上の事から生体細胞組織に高圧を作用させると，其の細胞膜透過性が亢進すると考えられる．又其の膜が反応する圧力の大きさは細胞の種類で異る．

擱筆するに当り終始御懇篤なる御指導と御校閲を賜つた恩師林教授並に御助言を賜つた西田教授に対し深く感謝の意を表す．

文　献

1) 著者：第一編．本誌．

2) 著者：第二編．本誌．

3) 吉村 pH の理論と測定法.
4) 岩波書店：物理学概説. 241.
5) 千谷：一般物理化学.
6) 著者：第三編. 本誌.
7) 池宗：岡山医誌. 52巻, 4号 (1940) 781.
8) Ebbecke U. : pflüger Arch. 157 (1914) 79.
9) Tammann : Zeitschr. Elektrochem. (1908)

Department of 1 Physiology, Okayama University Medical School.
(Director . Prof. Dr. K. Hayasi)

Effects of Hydrostatic High Pressure on the Permeability of Plasma Membrane

IV. On Electric Conductivity

By

Katuki Okada

When some high pressure (1500 atm. at maximum) is applied to various living cell tissue, (such as, red corpuscle, bladder, mesenterium, plant cell etc.), their electric conductivity may greatly be enhanced.

These facts may probably ascribed to the augmented permeability of plasma membrane, due to high pressure.