



Title	骨X線像の定量的観察についての研究（骨鉱物質含有量のX線学的測定）
Author(s)	奥山, 武雄
Citation	日本医学放射線学会雑誌. 1965, 25(7), p. 775-790
Version Type	VoR
URL	https://hdl.handle.net/11094/15992
rights	
Note	

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

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

The University of Osaka

特別掲載

骨 X 線像の定量的観察についての研究 (骨鉱物質含有量の X 線学的測定)

東京医科歯科大学医学部放射線医学教室（主任 足立忠教授）

奥 山 武 雄

(昭和40年8月30日受付)

A Study of the Quantitative Analysis on the Mineral
Contents of the Bone by X-Rays

By

Takeo OKUYAMA

Department of Radiology, School of Medicine, Tokyo Medical and Dental University,
Yushima, Bunkyo, Tokyo, Japan.
(Director: Prof. T. Adachi)

1) X-ray diagnosis has been mainly based upon the subjective or qualitative impression of the physician on the roentgenogram to be examined.

It is the author's belief that the objective or quantitative informations obtained from the roentgenogram should play more important role in x-ray diagnosis in the future. To the first step toward the objective observation of the roentgenogram, the author performed a study of the quantitative analysis on the mineral contents of the ulna by means of dosimetric measurement of the transmitted x-rays through the forearm, and densitometry of its roentgenogram.

2) The patient's forearm was placed in a water-phantom in order to standardize the thickness of the non-osseous tissues. The points in the distal portion of the ulna to be examined were chosen. The quantity of the bone salt in the above-mentioned portion was compared with a series of standard absorbers (bone models) (Table 1, Fig. 2 and 12) by the dosimetric measurement of the transmitted x-rays through the points to be examined (Fig. 3, 4, 6, 8 and Table 3), and the densitometric measurement at the same points on the roentgenogram (Fig. 14, 17 and 18).

3) The dosimetric value in the mineral contents of the bone was slightly higher than the densitometric one (Table 4, 5 and 6).

4) The results of the application on the clinical materials were as follows; (a) The normal value by the dosimetric method ranged from 300 to 450 mg/cm³ and, on the other hand, the normal value by the densitometric method ranged from 260 to 400 mg/cm³ (Table 4, 5 and 6). (b) There was found a tendency of the higher mineral contents in the right arm than the left, in the right-handed persons. (c) The mastectomized patients who had edema of the arm and limitation of motion at shoulder-joint on the same side of the operation showed the remarkable decrease in the mineral contents in ulna in comparison with the normal side. The longer persistence of the edema and limitation of motion of the arm caused the more decrease in the mineral contents of the bone (Table 3 and 6). (d) In a case of senile atrophy,

the mineral contents were one-third of the normal (Table 5 and 6). (e) In a case of Hyperostosis generalisata, the bone survey of the skeletal system on roentgenogram gave an impression of generalized sclerosis of the bones. However, the author's investigation of the same case disclosed the normal value of the mineral contents (Fig. 10 and Table 5).

5) The author is now exploring the possible technique to extend the objective analysis of the bone salt to any part in the human skeleton and the analysis of the minute structures of the bone such as trabeculae.

目 次

- I. 緒言
- II. 骨等価基準吸収体(骨模型)
 - 1. 基材として用いる物質
 - 2. 骨鉱物質として用いる物質
 - 3. 作製方法
 - 4. X線透過百分率の測定
- III. 尺骨骨鉱物質含有量の測定
 - 1. 線量計による(物理的)測定
 - 1) 方法
 - 2) 臨床例に於ける測定結果
 - 3) 小括
 - 2. X線写真学的(濃度)測定
 - 1) 方法
 - a) 散乱線の影響
 - b) X線写真撮影法
 - c) X線写真濃度測定法
 - 2) 臨床例に於ける測定結果
 - 3) 小括
- IV. 総括並びに考案
- V. 結論
- VI. 文献

I. 緒 言

本研究の目的は、従来から主観的、定性的に取り扱はれていたX線診断を、多少とも客観的、定量的に押し進めんとするところにある。即ち、目で見て診断する段階から器械で測つて診断する方向に近づくのが目的である。

周知の如くX線が物体を透過する場合、その透過X線量の割合を線コントラストと称するが、これが更に、写真フィルム上の濃度の差として表現されると写真学的コントラストとなる。即ち、透過X線量の割合は、物理学的に線量計によつても、写真学的に濃度計によつても測定が可能であ

る。この様にして之等の原理を応用すれば、X線像を定量的に取り扱うことが出来る。例えは骨のX線診断については、炎症、骨折、腫瘍等の形態的変化のみを対象とする場合には従来通りのX線診断にて十分その目的は達せられるが、斯かる場合に屢々問題とされる osteoporosis 又は osteosclerosis 等の量的問題を論ずる場合には、撮影条件、現像過程により、それのみでは同一患者についても再現性ある検討は勿論、更に之等を正確に定量的に取り扱うことは殆ど不可能のこととなろう。

本論文に於ては、定量的X線診断学の第一歩として、生体に於ける骨の鉱物質含有量を測定することとし、先づ骨と等価の基準吸収体を考案作製し、検査せんとする生体骨とのX線透過線量を、線量計を用いて物理学的に、更にX線写真学的に比較検討したのである。

II. 骨等価基準吸収体(骨模型)

生体骨と基準吸収体について、X線透過線量を比較することにより其の骨鉱物質量を求めるわけであるから、生体骨に近似な骨等価基準吸収体の作製が先づ必要である。この点については、従来は屢々アルミニウムが用いられていた¹⁾²⁾³⁾。これによると、厚さ 1.0mm のアルミニウムは骨鉱物質 130mg/cm^2 と等価であるとされている。又プラスチックの中に実際の骨粉を封入したものもある⁴⁾⁵⁾。併し、アルミニウムは、骨とは組成が異なり、而もX線のエネルギー吸収は其の物質の有効原子番号 (effective atomic number) にも依存する⁶⁾ 点等、種々問題がある。即ち、アルミニウムの原子番号は 13.00 であり、骨鉱物質の有効原子番号は 15.86⁷⁾ であつて、明らかに骨基準吸収体としての不利益さを免れない。又、骨質をプ

ラスチックに封入する方法は、化学的純度、再現性等の面で問題がある。

之等の点を考慮し、本研究で行った方法は次のようにある。

骨と等価の基準吸収体として要求される諸条件を列挙すると、i) 骨に組成の上で似ていること、ii) 有効原子番号が骨鉱物質に近似なること、iii) 化学的純度の高いものであること、iv) 作製が容易で再現性があること、v) 階段状又は楔型のもの⁴⁾⁵⁾⁷⁾より厚みが一定で、組成濃度に変化があること、等である。

周知の如く、骨組織は骨細胞と間質より成るが、更に間質は organic matrix と骨塩 (bone salt) と言はれる鉱物質から出来ている。X線に対して問題となるのは主として鉱物質であり、種々なるイオンの形で存在するが、X線学的に定量しようという臨床レベルではカルシウム (Ca) と燐 (P) を主体とした hydroxyapatite の形であると考えれば十分であろう。而して骨鉱物質量は年令や種々の疾患で増減するが、其の主成分たる酸化カルシウム (CaO) と五酸化燐 (P₂O₅) の比は約 3 : 1 で、その変動範囲は極めて少ないことも知られている (Gabriel 2.918 : 1, Weidenreich 2.825 : 1, Klement 3.35 : 1, Heuck 3.08 : 1⁴⁾)。従つて骨等価基準吸収体としては、之等の骨質主成分たる CaO と P₂O₅ が 3 : 1 の割合で、而も骨塩以外の骨成分と X線学的に等価の吸収を示す基材に封入すればよいことになろう。

1. 基材として用いる物質

基材として用いた物質は、methylmethacrylate なるプラスチック (polymethylmethacrylate) である。此の物質が適性なる理由は、i) 骨鉱物質として用いる第二燐酸カルシウム (Ca₃(PO₄)₂) 及び炭酸カルシウム (CaCO₃) を均等に混入出来る、ii) X線吸収が水と略等しい、iii) 固相になる際の条件によって容積に変化を来さない、iv) 加圧、加熱重合が容易に出来、Ca₃(PO₄)₂, CaCO₃ を種々の濃度で略一定の容積に封入することが出来、而も再現性がある等による。polymethylmethacrylate (PMMA) は、比重1.17、分子式 C₃H₈O₂なる重合体で、粉末状の polymer

に液状の monomer を 2 : 1 の割合で均等に混じ、加圧、加熱重合したもので、その有効原子番号は6.46であり (Spiers の式⁶⁾によつて算出), 比重は1.17であるが、一方水の有効原子番号は同じ式によつて算出すると7.41で比重は1.0である。水槽内に polymethylmethacrylate を入れて透過線量を実測しても、又X線写真を撮影しても水とのX線吸収差は認められない。

2. 骨鉱物質として用いる物質

化学的に純度の高い Ca₃(PO₄)₂ 及び CaCO₃ を骨鉱物質として用いた。即ち骨鉱物質として Ca₃(PO₄)₂ 及び CaCO₃ を 3 : 1 の割合で用いると、前述の hydroxyapatite の組成 CaO : P₂O₅ = 3 : 1 という値に近似となる。hydroxyapatite の Ca, P, O の比は 3 : 2 : 8 であるのに対し、3 [Ca₃(PO₄)₂] · CaCO₃ では 10 : 6 : 27 となり略等しい比率となる。更に 3 [Ca₃(PO₄)₂] · CaCO₃ の有効原子番号を Spiers の式⁶⁾によつて算出すると 15.75 となり骨塩 hydroxyapatite の有効原子番号 15.86⁷⁾ に比し極めて近い値が得られる。

3. 作製方法

Ca₃(PO₄)₂ 及び CaCO₃ を重量比 3 : 1 の割合で種々の濃度にするために表1に示す如く、13段階に秤量した。基材 methylmethacrylate (以下 MMA と略す) の polymer に之等を加え乳鉢で十分均等に混合する。其の粉末状混合物が均等に湿潤になる程度に MMA の monomer を加えて鋳型 (図1) に封入して加圧加熱重合する。加熱条件は、150°C, 30分間で、初めの10分間は

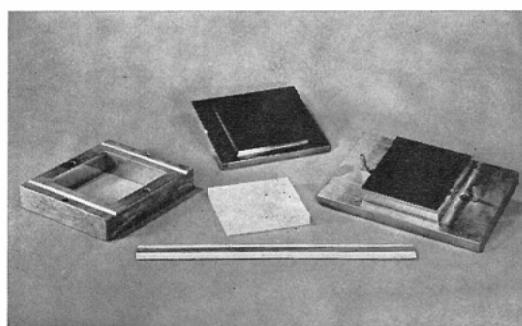


Fig. 1 The parts of the mould by which the bone models are made.

Table 1 Composition of the standard absorbers (bone models).

Bone models No.	Mineral materials			Organic material (polymethylmethacrylate) PMMA	
	Ca ₃ (PO ₄) ₂ g	CaCO ₃ g	Weight of Ca + P g	Polymer g	Monomer c.c.
1	0	0	0	110	40
2	9	3	6.48	100	38
3	18	6	12.97	100	38
4	24	8	17.30	85	58
5	33	11	23.77	70	58
6	42	14	30.23	55	68
7	51	17	36.50	40	75
8	60	20	43.21	35	80
9	69	23	50.20	30	85
10	78	26	56.20	25	88
11	87	29	62.70	20	93
12	96	32	69.20	10	100
13	108	36	77.80	10	120
14	120	40	86.50	10	130

加圧せず、後半20分間、20—25kg/cm² 加圧して、その後加熱ヒーターを断ち、加圧のまま温度が80°Cに下るまで放置する。猶、この重合反応を促進させるために、触媒として少量(0.2—1.0g)の過酸化ベンゾイル(BPO)を用いるとよい。

斯くして作製した骨等価基準吸収体(骨模型)は図2に示す如きもので、CaとPは均等に封入され、X線写真によつても気泡の混入が全くないことが確かめられた。結局、骨質の入つていない基材のみのものを含めて14種類の骨模型を作つ

た。厚さに多少の変動はあるが、1.2cm—1.9cmの間に在る。厚さ10cmの水槽底部に骨模型を置きX線写真を撮影すると、基材のみ(即ちPMMA)は陰影を造らず、又、それ以外のものでは鉱物質の含有量により濃度の差異はあるが、いづれも均等に分布していることが知られた。

4. X線透過百分率の測定

作製した骨模型は生体骨のX線吸収と比較する基準体として用いるものであるから、線量計を使用する物理学的方法によるにせよ、又は、フィルムの濃度を測る写真学的方法にせよ、個々の透

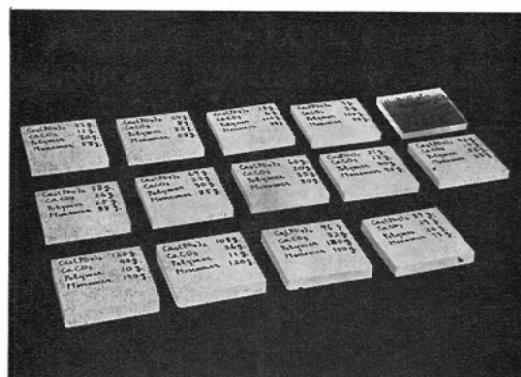


Fig. 2 14 standard absorbers (bone models).

Each of the bone models is 10cm×10cm in surface area, but is varied from 1.2cm to 1.9cm in thickness.

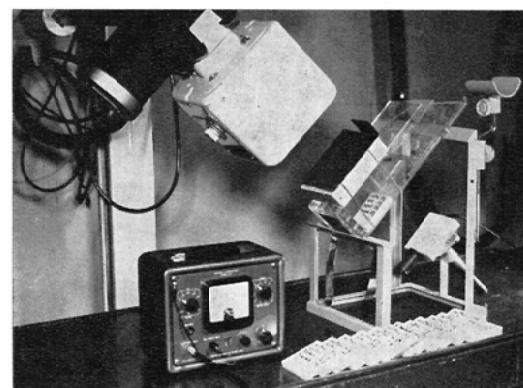


Fig. 3 The method to measure percentage of narrow beam x-rays transmitted through the bone model.

過X線量の割合を正確に測定出来ることが必要である。

実際の測定に当つては図3に示す如く、厚さ10cmの水槽底部に骨等価基準吸収体（骨模型）を置き、管電圧50kVp（濾過板0.5mmAl）、焦点一水槽底面間距離70cmの条件でPortable Electrometer Model 37Aを使用して透過線量を測定した。更に散乱線除去の目的で水槽前面に径4mmの小孔を穿つた厚さ3mmの鉛板を置き、X線束を絞つた。水槽底面と線量計の距離は20cmとし（Groedel氏法），従つて焦点一線量計間距離は

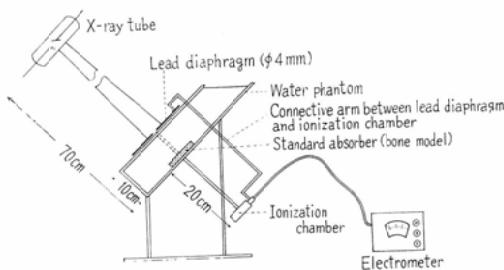


Fig. 4 Schematic illustration of the experiment. (Measurement of percentage of narrow beam x-rays transmitted through the bone model)

Table 2 Measurement of percentage of narrow beam x-rays transmitted through the bone models. (50kVp) (*polymethylmethacrylate)

Bone models No.	Ca+P mg/cm ²	Readings of electrometer							Percentage transmission	
		I	II	III	IV	V	Average	σ	%	σ
Water phantom 1 (PMMA*)	0	0.177	0.177	0.175	0.176	0.176	0.1762	0.0007	100.0	
	0	0.175	0.173	0.177	0.175	0.173	0.1750			
2	64.8	0.152	0.150	0.150	0.151	0.150	0.1506	0.0008	85.5	0.57
3	129.7	0.127	0.128	0.129	0.128	0.126	0.1276	0.0010	72.4	0.64
4	173.0	0.113	0.118	0.115	0.115	0.114	0.1150	0.0017	65.3	1.00
5	237.7	0.097	0.097	0.094	0.096	0.096	0.0960	0.0011	54.0	0.65
6	302.3	0.081	0.083	0.083	0.081	0.084	0.0824	0.0012	46.8	0.70
7	365.0	0.076	0.075	0.072	0.077	0.075	0.0750	0.0017	42.6	0.98
8	432.1	0.064	0.065	0.065	0.065	0.064	0.0646	0.0005	36.7	0.32
9	502.0	0.056	0.055	0.054	0.056	0.057	0.0556	0.0010	31.6	0.58
10	562.0	0.049	0.050	0.051	0.050	0.051	0.0502	0.0008	28.5	0.47
11	627.0	0.043	0.040	0.045	0.044	0.043	0.0430	0.0017	24.4	0.97
12	692.0	0.039	0.040	0.038	0.040	0.039	0.0392	0.0008	22.3	0.46
13	778.0	0.032	0.033	0.033	0.035	0.033	0.0332	0.0010	18.8	0.57
14	865.0	0.030	0.030	0.031	0.030	0.031	0.0304	0.0050	17.3	0.29

90cmとなる（図4）。細X線束と線量計の関係は測定前に一応透視で確かめた。

測定に際して必要なことは透過百分率であり、即ち水槽のみの透過線量を100%とした場合に

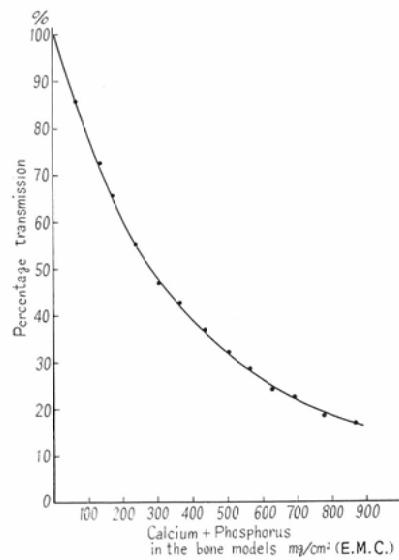


Fig. 5 The standard calibration curve relating percentage transmission of narrow beam x-rays to mineral contents in the bone models. (Standard attenuation curve)

に対する骨模型の透過線量の比率を求めるのであるから、線量計（電離箱）と透過X線束の相対的位置が変わなければよいことになる。この様にして測定した結果を表示すると表2の如くで、更にこれから得た骨模型の透過百分率曲線を図5に示し、これを骨模型透過百分率曲線と呼ぶことにする。

III. 尺骨骨鉱物質含有量の測定

1. 線量計による（物理的）測定

1) 方法

以上の基礎的実験によつて骨等価基準吸収体（骨模型）が臨床的に応用し得る可能性が確かめられたので、次の如き測定を試みた。

(1) 骨鉱物質によるX線吸収を正確に測定するためには、先づ骨周囲の軟組織の厚さの違いによつて生じるX線吸収の差を除外する必要がある。このためには前腕部を前記の一定厚さの水槽に入れること¹⁾²⁾³⁾⁷⁾により、一応の目的は達し得る。

(2) 骨模型透過百分率曲線を作る（前述）。

(3) 生体尺骨に対しても骨模型に於けると同様に測定する。被検者の前腕尺骨小頭より一定の部位（3—4cmの部）にマークをつけ、前腕を水槽底に固定する。水槽前面の鉛板絞りと電離槽をarmで連結して連動可能とし、当該尺骨部数点について透過線量を測定する（図6）。尺骨中央部の透過百分率を求め、前記の骨模型透過百分率曲線に照合することにより骨鉱物質質量がわかる。これを骨模型等価骨鉱物質質量（equivalent mineral

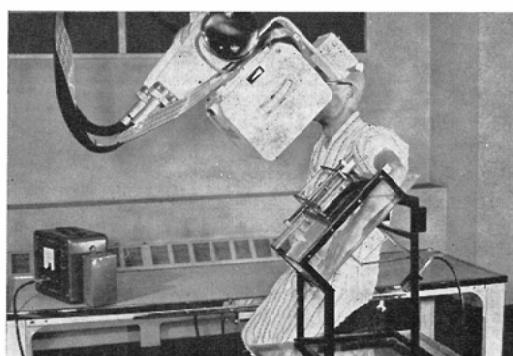


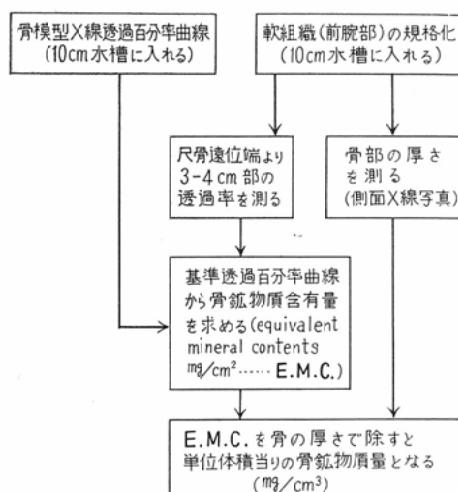
Fig. 6 The clinical method to measure percentage transmission.

contents—以下 E.M.C. と略す）と呼ぶ。即ち単位は mg/cm^2 である。

(4) 次に側面X線写真を撮影し、同部の尺骨の厚さ（lateral thickness¹⁾）を計測する。この際、焦点フィルム間距離を大にし（150cm）被写体をフィルムに密着させて出来るだけ実物大に近づける。

得られた骨の厚さ（cm）で E.M.C. (mg/cm^2) を除すれば、骨鉱物質質量が求められる。但しこの数値は骨皮質及び髓質を平均した単位体積当たりの数値である。

以上の測定方法を図式化すると次の如くである。



この様な測定によれば、単に osteoporosis や osteosclerosis を主観的に目で見て評価するにとどまらず骨鉱物質量を或る程度、絶対量として求めることができるので、其の年令、性別、個人差、疾患に於ける変動等を検討することが可能である。

2) 臨床例に於ける測定結果

二、三の症例について測定した結果を記すと次の如くである。

(1)茲に示す症例（表3—表5）は、左右の骨鉱物質質量を比較検討する目的で測定を行つたものであるが、之等の健側の測定値を正常値と考えればこの年代に於ける成人の正常値域は 300—450 mg/cm^3 であると推定することも出来る。

Table 3 Case: A.T., 50-year-old, female, left breast cancer, 17 months after mastectomy.
(Measured at the portion 4.5 cm above the tip of styloid process)

	Points on a transverse line 4.5 cm above styloid process	Readings of electrometer	Percentage transmission %	E.M.C. mg/cm ²	Lateral thickness of ulna cm	Mineral contents mg/cm ³
	Water phantom PMMA	0.127	100	0		
Right side (normal side)	A	0.101	41.7	371	1.10	337
	B	0.067				
	C	0.056				
	D	0.053				
	E	0.062				
	F	0.063				
	G	0.071				
Left side (mastectomized side)	A	0.086	48.0	305	1.07	285
	B	0.071				
	C	0.073				
	D	0.061				
	E	0.061				
	F	0.064				
	G	0.083				

Table 4 Results of the dosimetric measurement of the mineral contents.
(Post-mastectomy cases)

Case	Age	Sex	Findings				Percentage transmission %	E.M.C. mg/cm ²	Lateral thickness of ulna cm	Mineral contents mg/cm ³
			Side of mastectomy	Post operative period(month)	Edema	Limitation of motion				
I M.S.	24	♀	Right	8	Slight	Slight	Right 38.4	407	1.00	407
							Left 42.7	363	0.96	379
II U.Y.	32	♀	Right	4	(-)	Slight	Right 38.6	410	1.15	357
							Left 41.6	372	1.05	356
III T.N.	36	♀	Right	2	(-)	Severe	Right 42.8	357	0.98	364
							Left 45.7	325	0.90	361
IV S.M.	49	♀	Bi-lateral	3	(-)	(-)	Right 49.0	294	0.98	300
							Left 48.0	305	0.98	311
V Y.K.	34	♀	Right	5	(-)	(-)	Right 43.0	328	1.20	273
							Left 41.0	347	1.24	280

Table 5 Results of the dosimetric measurement of the mineral contents in a few diseases.

Case	Age	Sex	Diagnosis	Percentage transmission %	E.M.C. mg/cm ²	Lateral thickness of ulna cm	Mineral contents mg/cm ³
I T.N.	66	♂	Senile osteoporosis	Right 45.6	327	1.68	195
				Left 49.5	292	1.60	183
II T.A.	70	♀	Senile osteoporosis + Rhabdomyosarcoma (right elbow region)	Right 80.4	73	1.00	73
				Left 74.2	107	0.95	113
III M.I.	26	♂	Hyperostosis generalisata	Right 31.9	511	1.47	348
				Left 35.6	450	1.38	326
IV S.Y.	15	♂	Hemophilic arthropathy (left elbow joint)	Right 35.7	450	1.15	391
				Left 53.5	253	0.92	278

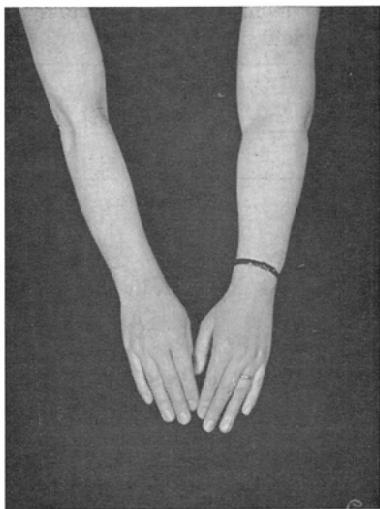


Fig. 7 Marked edema of the left arm, 17 months after mastectomy (See Table-3).

(2) 乳癌術後症例（6例）

周知の如く、乳癌術後の症例については、手術侵襲、又は術後の放射線治療の影響等により患側上肢の浮腫や運動制限等による廃用性骨萎縮（disuse bone-atrophy）が認められることが知られている。この様な骨萎縮は、特に運動の激しい部に著明であるといわれているから、手関節附近にこれが強く現われることが想像される。併し、この程度を普通X線写真のみによつて量的に判断することは困難であろう。

次に一症例を挙げて実際の測定経過について述べよう。

症例：A.T. 50才，♀，左乳癌（図7）

1年5カ月前に根治手術を受けたが、術後左上肢の浮腫が著明で、前腕部最大周囲は左側27.5cm、右側23.0cmであり、上肢には高度の運動制限が認められる。此の患者の右側（健側）と左側（患側）の尺骨遠位部の骨鉱物質量を測定した結果が表3である。

測定は骨部の外側より内側に向つてA-Gの数個所について行はれたが、之等の中、最も数値の少ない点（右D、左D及びE）が尺骨の正中部の骨鉱物質量に相当する数値となる。この数値を以つて透過線量率を求めて、骨模型透過百分率曲線に

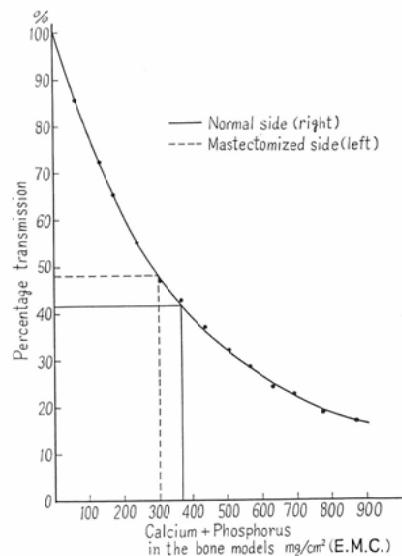


Fig. 8 Dosimetric measurement in Case A.T., 50-year-old, female. (See Table-3).

照合すれば E.M.C. が求められる（図8）。次に側面X線写真より同骨部の厚さを計測し、この値で E.M.C. を除すれば同部の骨鉱物質量となり、其の結果では右側（健側） $337\text{mg}/\text{cm}^3$ 、左側（患側） $285\text{mg}/\text{cm}^3$ で患側前腕に明らかな骨鉱物質量の減少が認められる。即ち、乳癌の患者が根治手術を受け、上肢に相当長期間に亘つて浮腫運動制限等が現われた場合には著明なる廃用性骨萎縮の存在することが定量的にも証明することが出来る。

一方、乳癌術後の患者で、患側上肢の運動制限が軽度乃至は全くない者、或るいは運動制限があつても術後経過の短い場合等はどうであろうか。これ等の数例については、表4に示してあるが、測定の結果は、患側、健側の骨鉱物質量に差異を認めることは出来ない。表4の症例Ⅲは、患側上肢に相当著明な運動制限があるが、術後2カ月の経過で測定した結果では左右共、約 $360\text{mg}/\text{cm}^3$ で骨萎縮の存在は認められなかつた。Krockowski¹⁰⁾¹¹⁾によれば、廃用性骨萎縮に於ける骨鉱物質量の減少の程度は廃用の存続期間に関係があるとし、四肢が麻痺状態になつてから約5カ月目に減少の傾向が現われ、1年目に其の



Fig. 9 Rhabdomyosarcoma in the right elbow region (Table-5: Case II).

程度が増加し、2年目に最大となつて、それ以後は余り変化しないとしている。但しこの場合には、異つた二種の電圧で撮影したフィルムの黒化度と減弱係数の関係を数式的に処理して求めたものであつて、骨模型等を用いて直接測定したものではない。

(3) 老人性骨粗鬆症 (senile osteoporosis) 及び其の他二、三の症例 (表 5)

症例 I (表 5) は66才の体格大、骨格強壮な農夫である。測定の結果は E.M.C. に対し骨の厚さが大であるため、結局単位体積当たりの骨鉱物質量は、右 195mg/cm^3 、左 183mg/cm^3 となり、むしろ著明な減少が確かめられ、老人性 osteoporosis なることが明らかとなつた。この様に骨が太い場合には普通X線写真では osteoporosis と判断する事は屢々困難であり、上記の如き測定により、はじめて証明し得るのである。

症例 II (表 5) は70才女性で、右上腕屈曲側の横紋筋肉腫のため、右肘関節は7カ月前から約 130° の屈曲位に固定され日常生活での使用は殆ど不可能の状態であつた (図 9)。測定結果は、右 (患側) 73mg/cm^3 、左 113mg/cm^3 で、両側共に高度の骨鉱物質量の減少が認められるが、之等は老人性 osteoporosis によるものであり、更に患側の 73mg/cm^3 という著明なる減少は、上記の如き廃用性萎縮に起因すると考えられる。

症例 III (表 5) は、Hyperostosis generalisata



Fig. 10 Hyperostosis generalisata (Table-5: Case III).

の一例である。本症は比較的稀な疾患であるが、四肢の管状骨が長さに変化を来さず、太さを増し、その結果全体の形が棍棒状となるのを特長とする。長い経過では骨皮質の構造が粗になり骨梁様に変化するといわれているが、X線写真では太さが増すが故に、屢々、sclerosis の状態を示す (図10)。

本症例の尺骨骨鉱物質量は表 5 にみる如く、E.M.C. は大なる値を示すが、骨の厚さで除した単位体積当たりの値は、右 348mg/cm^3 、左 326

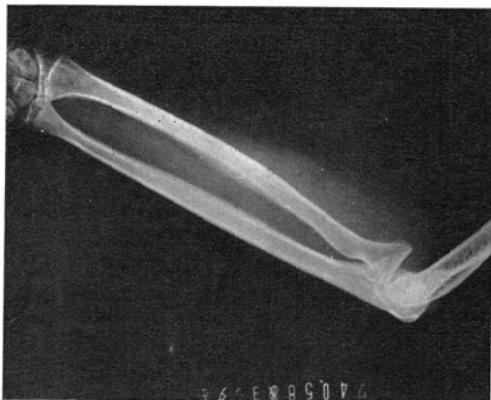


Fig. 11 Hemophilic arthropathy in the left elbow joint (Table-5: Case IV).

mg/cm^3 であり、特に増加しているとはいは得ない。

これ等の点は、或るいは骨鉱物質の動態からみた本疾患の特長であるかも知れない。

症例IV（表5）は15才男子でhemophiliaの患者である。hemophiliaの一症候としてhemarthrosisがある。関節内に出血が繰り返して起ると慢性滑液膜炎を誘発し、関節周囲軟組織の肥厚をして関節運動に障害をもたらす¹²⁾。本症例も左肘関節は約2年前からhemophilic arthropathyのために110°以上の伸展運動が不可能で（図11）そのために負荷作業は為し得ない状態であった。左前腕部には筋萎縮を認める。

測定結果では、右391 mg/cm^3 に比して、左（患側）278 mg/cm^3 であり、左尺骨は太さの減少と共に骨鉱物質も健側に比べ著明な減少を証明した。

3) 小括

以上の結果を小括すると

(1) X線診断を主観的、定性的段階から客観的定量的段階へ移行せしめる目的で、骨を対象とし、其の鉱物質をX線により物理学的に、又は写真学的に測定することを試み、その第一歩として線量計による測定を行った。

(2) このために既知の種々なる段階の骨鉱物質を含有するプラスチック製骨模型（骨等価基準吸収体）を考案作製した。

(3) 生体に於ける骨周囲軟組織の厚みを規格

化するために、被検体及び骨模型を一定厚さの水槽内に固定し測定を行つた¹⁾²⁾³⁾⁷⁾。

(4) 被検骨としては尺骨遠位部を対象とした。

(5) 細X線束を用い、先づ骨模型について透過線量率と既知骨鉱物質含有量の関係を示す曲線（骨模型透過百分率曲線）を作り、次に被検骨部についての透過線量を測定し、この数値を前記の基準透過百分率曲線に照合して骨鉱物質量（E.M.C.）を得る。而して同時に被検部骨の厚さ（lateral thickness¹⁾）を側面X線写真により計測し、この両者より単位体積当りの骨鉱物質含有量を計測する。

(6) 以上 の方法により得られた二、三の結果について述べると、

i) 正常値は300—450 mg/cm^3 で、従来の種々なる報告¹⁾²⁾¹⁰⁾とほぼ一致する。

ii) 老年者に骨鉱物質量の相当著明な減少が認められた。

iii) 数例の乳癌術後症例について、患側の浮腫、運動制限が著明で、而も長期に亘る場合には、骨鉱物質量の減少が健側に比し著明であつたが、同程度としても術後期間の短い場合又は、運動制限の軽度なる場合には、減少は認められなかつた。

iv) 通常のX線写真にて臨床的には骨硬化像を呈する一症例（Hyperostosis generalisata）について実測せる結果は、骨鉱物質量は略正常値にあり、単に骨の太さの増加によりこの様な所見を現らわしたことが確かめられた。

(7) この方法を更に一般化するためにX線写真学的測定を試みる必要がある。

2. X線写真学的（濃度）測定

1) 方法

a) 散乱線の影響

前記の如く、水槽中に被検部及び骨模型を挿入するために、これによる散乱線の影響を考慮する必要があるが、線量計を用いた場合には鉛板により径4mmの細X線束を使用したために散乱線は殆どこれを無視することが出来た。併し、X線写真法に於いては、被検部と同時に骨模型全般を

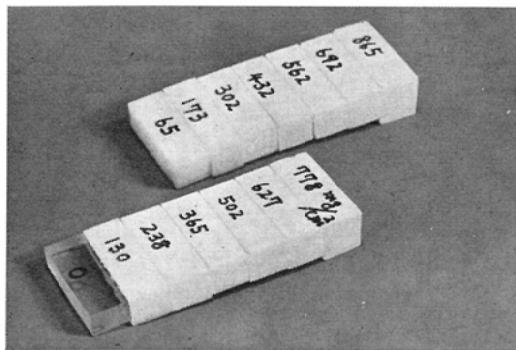


Fig. 12 Bone models used for densitometric measurement.

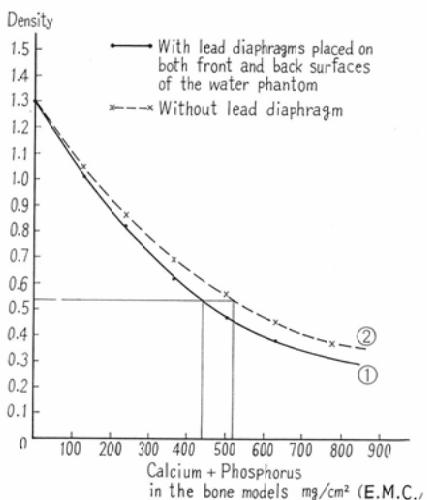


Fig. 13 The effect of scattered radiation on the film density.

撮影する必要上、照射野は相当大となり、従つて散乱線の影響を無視することは出来ない¹³⁾。又、この場合の骨模型は前記の図2に於ける骨模型を夫々適當なる大きさ($4.0 \times 1.4\text{cm}$)に切断し、これを含有せる鉱物質の濃度の順に並列、接着せしめたもので、全体の大きさは $4.0\text{cm} \times 10.0\text{cm}$ である(図12)。此の骨模型を用いて散乱線の影響を検討した結果が図13である。この場合、曲線①は、鉛板絞りを水槽前後面に置き骨模型撮影に必要な最少限($1.3 \times 9.5\text{cm}$)に絞つた場合である。この両者を比較すれば、絞りを用いない場合の方が曲線は上方に位置し(曲線②)，図に示す如く同一写真濃度に対しては絞

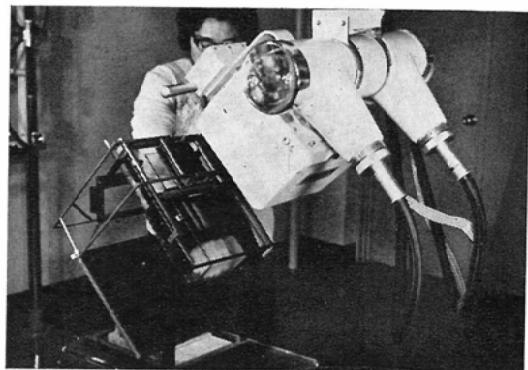


Fig. 14 The roentgenography for densitometric measurement.

りを用いた場合に比し、骨鉱物質量は大なる数値として示されることになる。斯かる点を考慮し、撮影に当つては鉛板を用い、被検尺骨部及び骨模型に対し可及的に縮少した照射野を用いた。

この様にしても猶且つ線量計の場合よりは、散乱線の影響が相當含まれることは、本法より得られた数値を評価する際に十分考慮すべきことであろう。

b) X線写真撮影法

図14の如く線量計による測定の場合と幾何学的関係は略同様で、フィルム(極光F.S.増感紙使用)の位置は前記に於ける線量計の位置とする。従つて焦点—フィルム間距離は 90cm である。被写体(水槽底)—フィルム間距離は 20cm となり、これ等は前記同様 Groedel 氏法の原理により、一応散乱線の除去に関与している。照射野は前記の如く、鉛板により骨模型に対しては $1.3 \times 9.5\text{cm}$ 、尺骨部に対しては $3.5 \times 8.3\text{cm}$ に区画した(図15)。写真濃度を測定する場合には、其の濃度が適當な範囲内にあることが望ましいので、管電圧 50kVp (濾過板 0.5mmAl)に対し 80mAAs と定めた。

c) X線写真濃度測定法

写真濃度(黒化度)の測定は東京光電研究所製 Multiplier Photometer によつた。本測定に於ける測定孔は直徑 1.0mm である。

其の順序は、

(1) 骨模型の濃度(黒化度)を測定して濃度と骨鉱物質量との関係の曲線を作る(図18)。

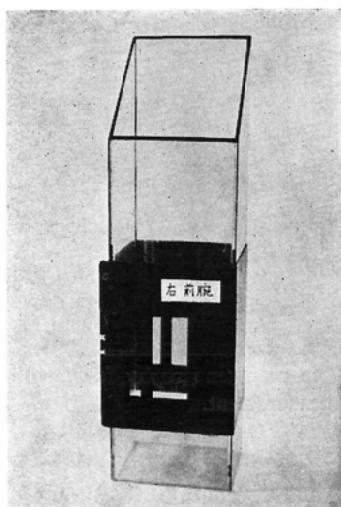


Fig. 15 Lead diaphragms used in the roentgenography.

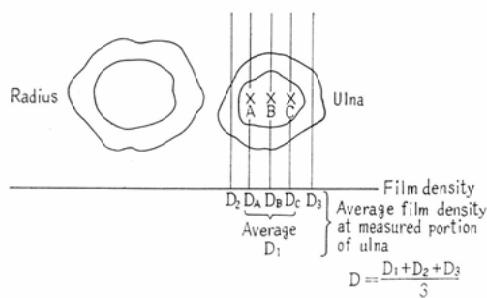


Fig. 16 Average film density at the measured portion of ulna.

(2) 被検尺骨部については尺骨茎状突起端から一定の部位(3cm及び4cmの2個所)を選び、これを撮影に於ける拡大率を考慮し写真上にてこれ等に相当する位置を定め(夫々3.9cm及び5.1cmの位置)この部について図16に示す如く数カ所の測定点をとり、これ等を図に示す如き式に従つて平均し、その値を以つて尺骨部の濃度と定めた。周知の如く管状骨のX線写真に於いては、いわゆる皮質部と髓質部とは相当に濃度差を生じるので、一個所のみの測定では適切なる値は得がない。

(3) 此の数値を前記骨模型の曲線に照合して夫々の骨鉱物質含有量を定め、これを前記と同様、骨模型等価骨鉱物質量 (mg/cm^2) equivalent



Fig. 17 The roentgenograms used for densitometric measurement (Table-6: Case I).

mineral contents (E.M.C.) と呼ぶ。

(4) 次いで線量計の場合と同様に側面X線写真により当該尺骨部の厚さ (lateral thickness¹⁾) を求め、前記の E.M.C. を除すれば、単位体積当たりの骨鉱物質量が得られる。

2) 臨床例に於ける測定結果

上記の方法により臨床的に10例の症例に対して測定を行った(表6)。

(1) 症例Ⅰは先に線量計による測定の項で例

Table 6 Results of the densitometric measurement of the mineral contents.

Case	Age Sex	Diagnosis & Findings	Measured points (above styloid process) cm	E.M.C. mg/cm ²	Lateral thickness of ulna cm	Mineral contents mg/cm ³
I A. T.	51 ♀	Left breast cancer (33 months after mastectomy) Edema: severe; Limitation of motion : severe	3	290	1.08	269
			Right 4	326	1.08	302
			Left 3 4	165 180	0.97 1.00	170 180
II T. A.	71 ♀	Senile osteoporosis	Left 3 4	100 115	0.95 0.97	105 109
III Y. H.	53 ♀	Right breast cancer (3 months after mastectomy) Edema: slight; Limitation of motion : slight	3	322	1.32	244
			Right 4	338	1.28	264
			Left 3 4	302 347	1.28 1.20	236 289
IV N. M.	48 ♀	Left breast cancer (4 months after mastectomy) Edema : (-); Limitation of motion:moderate	3	334	1.16	288
			Right 4	346	1.15	300
			Left 3 4	262 282	1.15 1.10	228 257
V S. M.	50 ♀	Bilateral breast cancer (18 months after mastectomy) Edema : (-); Limitation of motion : (-)	3	271	0.93	291
			Right 4	310	0.95	326
			Left 3 4	248 283	0.91 0.96	272 295
VI K. M.	44 ♀	Left breast cancer (6 months after mastectomy) Edema:(-); Limitation of motion : moderate	3	376	1.11	338
			Right 4	400	1.12	357
			Left 3 4	260 285	1.11 1.12	234 254

Case	Age Sex	Occupation	Measured points (above styloid process) cm	E.M.C. mg/cm ²	Lateral thickness of ulna cm	Mineral contents mg/cm ³
VII W. K.	31 ♂	X-ray technician	Right 3 4	360 380	1.23 1.23	293 310
			Left 3 4	333 363	1.19 1.21	281 300
VIII A. N.	17 ♂	Student	Right 3 4	346 360	1.20 1.12	288 321
IX S. T.	32 ♂	Physician	Right 3 4	394 424	1.16 1.14	339 372
			Left 3 4	357 417	1.16 1.15	308 363
X T. O.	32 ♂	Physician	Right 3 4	395 433	1.20 1.21	330 358

示した乳癌術後の症例について、其の後の経過を写真法によつて測定したものである。本測定時は術後2年9カ月であるが、患側(左側)上肢の浮腫、運動制限は相変わらず高度である。

図17は前記の方法により撮影したX線写真で左右各々の骨模型及び尺骨部の濃度より、夫々のE.M.C.を求め(図18)、骨の厚さで除すると、右側269mg/cm³(3cmの部)、302mg/cm³(4cm

の部)、左側(患側)170mg/cm³、180mg/cm³なる数値が得られた。

この結果から患側は健側に比して著明な減少を示し、その程度は術後1年5カ月時に比べて(前述)更に大となり廃用性骨萎縮の時間的進行が定量的に知られた。又右側の値269mg/cm³、302mg/cm³は50才代女性の骨鉱物質量の一例を示しているといえよう。

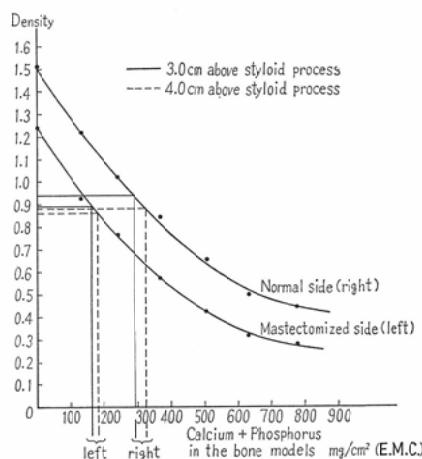


Fig. 18 Densitometric measurement in Case A.T., 51-year-old, female. (See Table-6)
Calibration curves relating film density to mineral contents in the bone models.

(2) 71才の女性について測定した結果は、骨鉱物質量の著明な減少を認め、正常人の約 $\frac{1}{3}$ にも減少していることが知られた（症例Ⅱ）。

(3) 更に他の8例の結果から i) 健康成人の平均値は略 $300\text{mg}/\text{cm}^2$ であり、 260 — $400\text{mg}/\text{cm}^2$ を正常域と推定することが出来る。ii) 一般に「右利き」の症例では右側は左側に比して稍々大なる値を示す (10 — $20\text{mg}/\text{cm}^2$)。iii) 前にも記した如く、この表に於ても乳癌術後の被検例では患側尺骨の骨鉱物質量は健側に比べて減少している。

其の量的減少は、浮腫、運動制限の程度及び存続期間に關係があるらしい。

(4) これ等の症例の中、前記の線量計による測定をも併せ行つた例について（表6、症例Ⅰ、Ⅱ及びⅤ）両者の数値を比較する、又其の他の値を検討すると、濃度測定による場合の方が、稍々低い値を示していることが知られる。

3) 小括

以上を小括すると次の如くである。

(1) 写真学的濃度測定法によつても骨鉱物質量の定量的測定は可能である。

(2) 写真法は骨模型と被検体とを同時に測定

し得る点で線量計の場合より実際的には有利である。

(3) 併しこの場合には、散乱線の影響を考慮に入れる必要がある。

(4) 臨床的に応用した場合に、線量計に於ける場合と略同様な結果が得られて、十分この方法の実用価値が立証された。

IV. 総括並びに考案

以上の結果を総括すると

(1) X線診断を目で見て診断する主観的段階から器械で測つて診断する客観的段階へ移行する目的で、線量計による物理的測定とフィルム濃度による写真学的測定を行つた。

(2) 対象としては、X線診断の上で重要な要素を占める骨を選び、その鉱物質量を定量することを目標とした。

(3) 骨質と同様なる割合で、而も種々なる既知の密度に骨鉱物質を含有する特別なる骨模型（骨等価基準吸収体）を作製し、これを規準とした。

(4) 生体骨周囲の軟部組織の厚みがX線透過線量に影響する点を除外する目的で一定の厚さの水槽を用い、被検体及び骨模型をこれに挿入して測定を行つた。

(5) 斯くして被検体と骨模型に対し、透過線量を線量計により或るいはX線写真学的に測定し、骨鉱物質含有量を計測した結果は、従来の文献に比し¹⁾²⁾¹⁰⁾、実用価値ある数値が得られた。

(6) 更に、この両者共に臨床的に応用して、単なるX線写真のみの診断では達し得なかつた定量的診断が可能となつた。即ち、運動制限の程度やその継続期間、或るいは高年令に際しての著明なる骨鉱物質減少等の関係が明らかにせられ、又単なるX線写真上にては、骨硬化像ありと診断された症例に於て、計測の結果は、骨鉱物質は正常値域内にあつたこと等も証明された。

(7) 二、三點改善すべき点もあるが、写真学的測定法は実用的にも勝れ、今後一層推進すべき方法である。

(8) 骨質の変化を定量的に取り扱う場合に、個々の症例に於いて單にその割合のみ

を目標とした評価は、従来二、三報告されたが^{14)~18)24)}この方法によつては異つた多くの症例を相互に比較検討することは困難である。これに対し本研究に於ける如く、骨質の絶対量を計測し得る点は其の客観性に於て、更に一步を進めたものと言えよう。

(9) 今後単に骨のみならず、身体の他の臓器に対し定量的X線診断を推進せんとする場合には、診断の目標となる臓器以外の身体成分に対し、本実験に於ける水槽の応用と同様なる方法によりこれを規格化し、更に夫々の目標に叶つた適切なる基準吸収体を作製して、これ等を同時に撮影する方法により、定量的X線診断は一層の進歩と発展が予想され、この点胸部については既に一、二の工夫が報告されている¹⁹⁾²¹⁾²²⁾²³⁾²⁵⁾²⁶⁾。又フィルム濃度の測定に当つては、單なる固定法による濃度計の使用のみならず、走査検査法等を応用すれば更に一段の向上も期待されるのである。最近はこの様な考案も発表されつつある²⁰⁾²¹⁾。

(10) 以上の如く、X線診断の今後の進む可き一つの道は「見る診断」から「測る診断」へと移行す可きであつて、これによりX線診断もその科学的客観性に於て一層の向上を示し得ると言えよう。本実験がこれ等に対し、一つの示唆を与えれば幸せである。

V. 結論

(1) X線診断を目で見る主観的、定性的診断から、測定する客観的、定量的診断へ移る試みとして、骨の鉱物質量をその対象とし、尺骨遠位部について実験的、臨床的研究を行つた。

(2) 一定の水槽を用いて生体軟部を規格化せる後、一定の骨等価基準吸収体と生体骨について、物理学的にそのX線透過率を比較し、或るいはX線写真学的に両者の濃度を比較して生体に於ける骨鉱物質の量を検討した。

(3) 物理学的測定の方が写真学的測定よりも稍々大なる数値が得られた。

(4) 臨床的測定結果についての概略を述べると、

i) 正常値としては物理学的測定に於ては300—450mg/cm³、写真学的測定に於ては260

— 400mg/cm³ が得られた。

ii) 左右については右の方が僅かに大なる値が得られた。

iii) 乳癌手術等により、一側に浮腫、運動制限等ある場合には、健側に比し著明な骨質の減少が認められ、その程度は症状の継続期間が大なる方が著明であつた。

iv) 老人性骨萎縮を思はせる一例では、正常値の約^{1/3}の数値も得られた。

v) Hyperostosis generalisataの一例で、X線写真像に於てはむしろ骨硬化像が認められた症例について測定の結果は、骨鉱物質量は略正常値域内にあつた。

(5) 今後の問題としては、下肢、骨盤、脊椎骨等、他の骨部に対しても同様な客観的診断の可能性と、他方、骨梁等の微細なる変化に対する測定の改良等が望まれる。

稿を終るに当り、終始御懇意なる御指導と御校閲を賜つた恩師足立忠教授に深甚なる感謝の意を表します。併せて本研究に数々の示唆を与えられ、御校閲を賜つた整形外科青池勇雄教授、第二内科大淵重敬教授、基礎的実験について御指導を頂いた村井竹雄教授、中村正助教授、更に骨模型の作製に御援助を与えられた歯学部補綴学教室田中吉三先生に厚く感謝致します。

尚、Hyperostosis generalisataの症例について測定の機会を与えられました済生会中央病院放射線科、板津三良、小林公治両博士、並びに種々御協力を頂いた教室員各位に謝意を表します。

VI. 文獻

- 1) Keane, B.E., Spiegler, G. and Davis, R.: Brit. J. Radiol. 32 : 375, 1959.
- 2) Mayo, K.M.: Brit. J. Radiol. 34 : 407, 1961.
- 3) Doyle, F.H.: Brit. J. Radiol. 34 : 407, 1961.
- 4) Heuck, F. und Schmidt, E.: Fortschr. Röntgenstr. 93 : 5, 1960.
- 5) Heuck, F. und Schmidt, E.: Fortschr. Röntgenstr. 93 : 6, 1960.
- 6) Spiers, F.W.: Brit. J. Radiol. 19 : 217, 1946.
- 7) Meema, H.E., Harris, C.K. and Porrett, R. E.: Radiol. 82 : 6, 1964.
- 8) McLean, R.C. and Urritt, M.R.: Bone, The University of Chicago Press. 1961.
- 9) Krokowski, E. und Schlungbaum, W.: Fortschr. Röntgenstr. 91 : 6, 1959.
- 10) Oeser, H. and Krokowski, E.: Brit. J.

- Radiol. 36 : 424, 1963.
- 11) Krokowski, E.: Fortschr. Röntgenstr. 100 : 3, 1964.
 - 12) Moseley, J.E.: Bone Changes in Hematologic Disorders, Grune & Stratton, 1963.
 - 13) Glasser, O. et al.: Physical Foundations of Radiology, Paul B. Hoeber, Inc. 1961.
 - 14) Mack, P.B., Brown, W.N., Jr, and Trapp, H.D.: Am. J. Roentgenol. 61 : 808—825, 1949.
 - 15) Vose, G.P.: Radiol. 71 : 1, 1958.
 - 16) Virtama, P. and Mähönen, H.: Brit. J. Radiol. 33 : 385, 1960.
 - 17) Virtama, P. and Telkka, A.: Brit. J. Radiol. 35 : 417, 1962.
 - 18) Barnett, E. and Nordin, B.E.C.: Brit. J. Radiol. 34 : 407, 1961.
 - 19) 梅垣洋一郎, 他: 臨床放射線, 7 : 5, 1962.
 - 20) 梅垣洋一郎, 他: 日医放学会誌, 24 : 6, 1964.
 - 21) 梅垣洋一郎, 滝沢正臣: 文部省科学研究費綜合班研究「放射線診断法の開発と総合的応用に関する研究」に於て発表, 1965, 6月.
 - 22) 藤森岳夫, 高江四郎, 谷合哲: 第4回日本胸部疾患学会発表, 1964.
 - 23) 藤森岳夫: 医学のあゆみ, 53 : 4, 1965.
 - 24) 精松紀雄: 日整会誌, 37 : 11, 1964.
 - 25) 田岡忠弘: 日医放学会誌, 24 : 12, 1965.
 - 26) 足立忠, 他: 文部省科学研究費綜合班研究: 研究報告集録(日本学術振興会), No. 12, 1961.
-