



Title	陽子線ラジオグラフィーの二三の知見
Author(s)	稻田, 哲雄; 河内, 清光; 金井, 達明 他
Citation	日本医学放射線学会雑誌. 1979, 39(6), p. 599-604
Version Type	VoR
URL	https://hdl.handle.net/11094/19225
rights	
Note	

Osaka University Knowledge Archive : OUKA

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

Osaka University

陽子線ラジオグラフィーの二三の知見

筑波大学基礎医学系

稻 田 哲 雄

放射線医学総合研究所物理研究部

河内 清光 金井 達明 松沢 秀夫

(昭和53年12月12日受付)

(昭和54年2月20日最終原稿受付)

Primary Studies on Proton Radiography

Tetsuo Inada

Institute of Basic Medical Sciences, The University of Tsukuba, Niihari-Gun,
Ibaraki-Ken, 300-31

Kiyomitsu Kawachi, Tatsuaki Kanai and Hideo Matsuzawa
Physics Division, National Institute of Radiological Sciences, 4-9-1, Anagawa,
Chiba-Shi, 260

Research Code No.: 501

Key Words: Radiography, Proton, Proton radiography

Efficacy study on proton radiography was performed in comparison with conventional X-ray radiography. The slight differences in soft tissue and the structure of low Z material surrounded by high Z material are noticed by proton radiography on the film placed at Bragg peak position, while those can not be detected by X-ray. However, MTF curve obtained with high Z test chart plate for proton fell below that for X-ray, since X-ray was better in detecting high Z variation and in scattering problem.

I. 緒 言

高エネルギーの陽子、ヘリウムまたは重荷電粒子(C, Neなどのイオン)ビームの医学利用が考えられている¹⁾。これらの荷電粒子ビームの特徴は、深部に急峻な線量ピークがあり診断・治療に有利であることと、一次加速ビームであり制御が容易であることである。とくに治療ビームによって診断が可能であることは、これら高LET粒子線の治療にとって正確な照準照射が重要であることから、注目すべきことである。荷電粒子線による診断は、いわゆるプラグ・ピークの存在と

側方散乱が小さいために、従来のX線像と異なる画質の読影となるが、X線では検知できない密度の変化、とくに軟部組織の僅かな密度の変化を検出できると考えられた^{2,3)}。ここでは陽子線による写真を実際に撮影し、X線写真との比較において、その特質を検討し、また、陽子線撮影のためにどのような考慮を必要とするかについて、現在使用できる装置により確かめた。これらの検討からその臨床応用への問題を究め、今後の粒子線医学利用計画に寄与することが本稿の目的である。

II. 装置と方法

現在利用できる荷電粒子線として放医研サイクロトロンによる陽子線(60MeV)が有用である。これは軟組織中の飛程が約3cmであり、人体透過に要するエネルギー(200~250MeV)に比べると低エネルギーであり、実用にはなりえないが、陽子線写真的特質に関しては検討しうるものと考えた。さらに放医研サイクロトロン施設に設けられた汎用照射室では照射野形成に必要な充分長いビーム拡散距離をとることができた。ここで照射野形成とは、収束して加速・輸送された陽子ビームを均一な大照射野に拡大し、モニターおよび照射制御をおこなうものである。ビームの拡大には簡便かつ安定な散乱法によることとした。Fig. 1

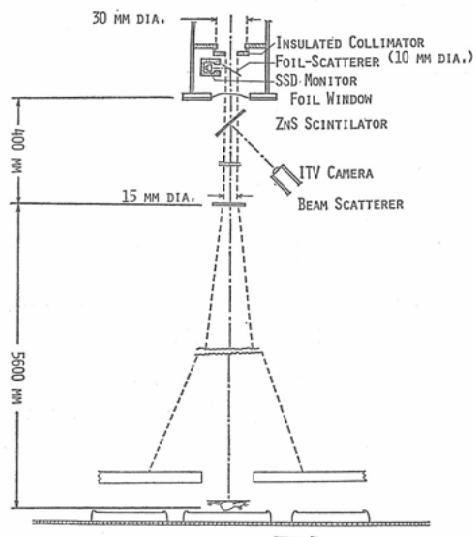


Fig. 1 Illustration of proton flux [monitoring and field shaping arrangement]. The beam shutter of quick response is set in upstream upwards the figure.

にその概念図を示す。図の上方より収束された陽子ビームがコリメーターにより一定の大きさ、形状にて入射する。照射線量モニターとして薄いアルミ箔とこれをみやる固体半導体検出器(SSD)が用いられ、箔による散乱陽子を高速度で計数積算し、プリセット値に達すれば、ビーム・シャッターを閉ざした。ビームをアルミ窓を通じて大気

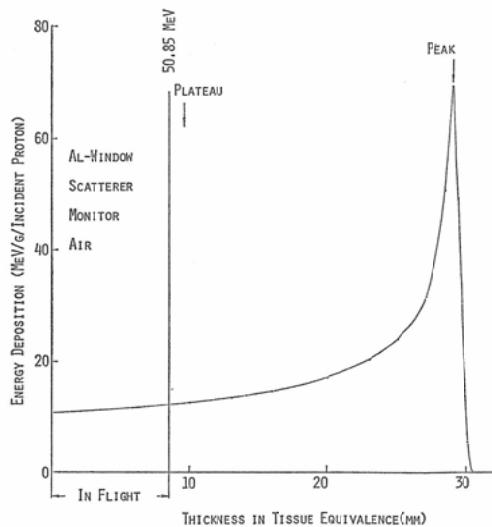


Fig. 2 Proton energy depositin curve in tissue equivalent material after passing through several required substances and air in the flight path to the sample. The curve has been obtained for 3 cm diameter proton beam incident on a polystyrene stack with an aluminum-foil-walled transmission chamber.

中に取り出した後、ZnSを塗付した散乱板によりビーム形状をTV監視する。これと約6mの被照射体までの飛行中の空気によるエネルギー吸収により、陽子エネルギーは約51MeVに減速される。よって、このときにはFig. 2に示した陽子線深部線量分布における矢印(plateau)で示した部位が入射する。フィルムもプラート一部にあれば、陽子の小角散乱により被検体周縁が強調された、いわゆるline drawing像をえる。これに適当な厚さのポリスチレン吸収板(Range Adjuster)を置いて、フィルム位置が丁度矢印(peak)の部位となるように調節すれば、プラグ・ピークの移動により僅かな密度差にも感度の高い吸収像がえられる。Fig. 2に示したように、この減速された陽子線の軟組織(ポリスチレン)中の飛程は約2.1cmにすぎない。よって、ここではテスト・チャート、構造上特徴のあるボールペンおよびマウスを被検体として、各種条件下にてえた陽子線写真を供覧し、その特質を検討する。

使用したフィルムは、簡単のためにコダック・

レディパック(X-Omat M)によったが、写真材料としてとくに陽子線に適するか否かの検討はなされていない。テスト・チャートは、厚さ0.1mmのタングステンマイクロチャートを厚さ2mmのアクリル板に挟んだもので、0.5~5line pairs/mmに12段階のスリットがある。

III. 結 果

III-1. テスト・チャート

Fig. 3 (a), (b) にミクロ黒化度計により求めた50KV X線(a)および陽子線プラグ・ピーク近傍(proton marginal range)(b)によるラスト・チャートの結果を示した。Fig. 4はこれにもとづくMTF曲線である。このテスト・チャートに関するMTFはX線が優れており、分解可能限界は陽子線で3.2Lp/mmであるのに対しても

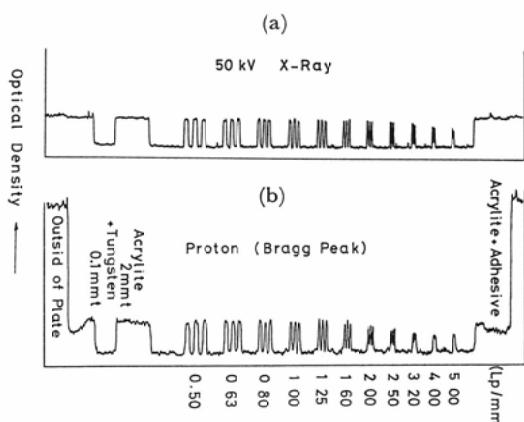


Fig. 3 Microdensitometric measurements of radiographic patterns of a test chart taken by X-ray (a) and proton beam (b).

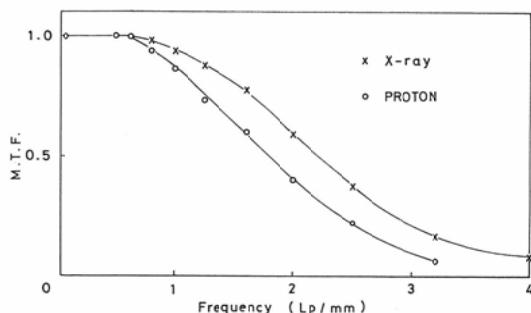


Fig. 4 MTF curves for X-ray and proton beam based on the patterns shown in Fig. 3.

X線で5.0Lp/mmであった。これはX線での散乱成分の寄与が小さいこともあるが、タングステンのごとき高Z物質については、X線がその Z^{3-4} 依存性によって有利であることを示す。しかし、Fig. 3 (a), (b) を比較して、(b) 陽子線においてはタングステン板周辺の接着剤部分および2mmアクリル板のない部分が明瞭に認められるが、(a) X線では接着剤部分は認められず、2mmアクリルが無い部分の表示は前者の1/30にすぎない。よって、低Z物質については陽子線が有利であることを示す。よって、骨や体内高Z異物の検出にはX線が適しているが、軟組織、腫瘍の撮影には陽子線が適していることが示唆されよう。また従来のタングステン板を用いたテスト・チャートが上の意味からX線写真系の分解能を測定するに適するものであるが、それとの比較において陽子線写真の分解能を表示するには適当ではないと考えられる。

III-2. ボールペン

構造上特徴があり、比較的簡明なボールペンが前項の結果をさらに支持するために有用と考えられた。

Fig. 5 (a) にX線写真を示した。管電圧150KVの場合であるが、低圧撮影より金属筒内の構造が認められるはづである。(b) は陽子線プラートー部での撮影であり、周辺の小角散乱により、いわゆるline drawingとよばれる周縁部の強調効果が認められるが、(a), (b) 両者の比較では、陽子線プラートー部の写真に診断上大きな利点があるとは考えられない。しかし、(c) の陽子線プラグ・ピーク近傍(marginal range)部での写真において、金属筒内のプラスチック製ノック構造が明瞭である。X線では周囲の高Z物質による吸収により内部の低Z物質の吸収差は蔽われてしまい認めることがないが、陽子線ピーク部では、その鋭い立ち上りまたは立ち下りによって通過飛程上の僅かな密度変化もその前後の大きな吸収にもかかわらず認識できるものである。

III-3. マウス

最大体厚約2cmのICR雄8週齢マウスを被写

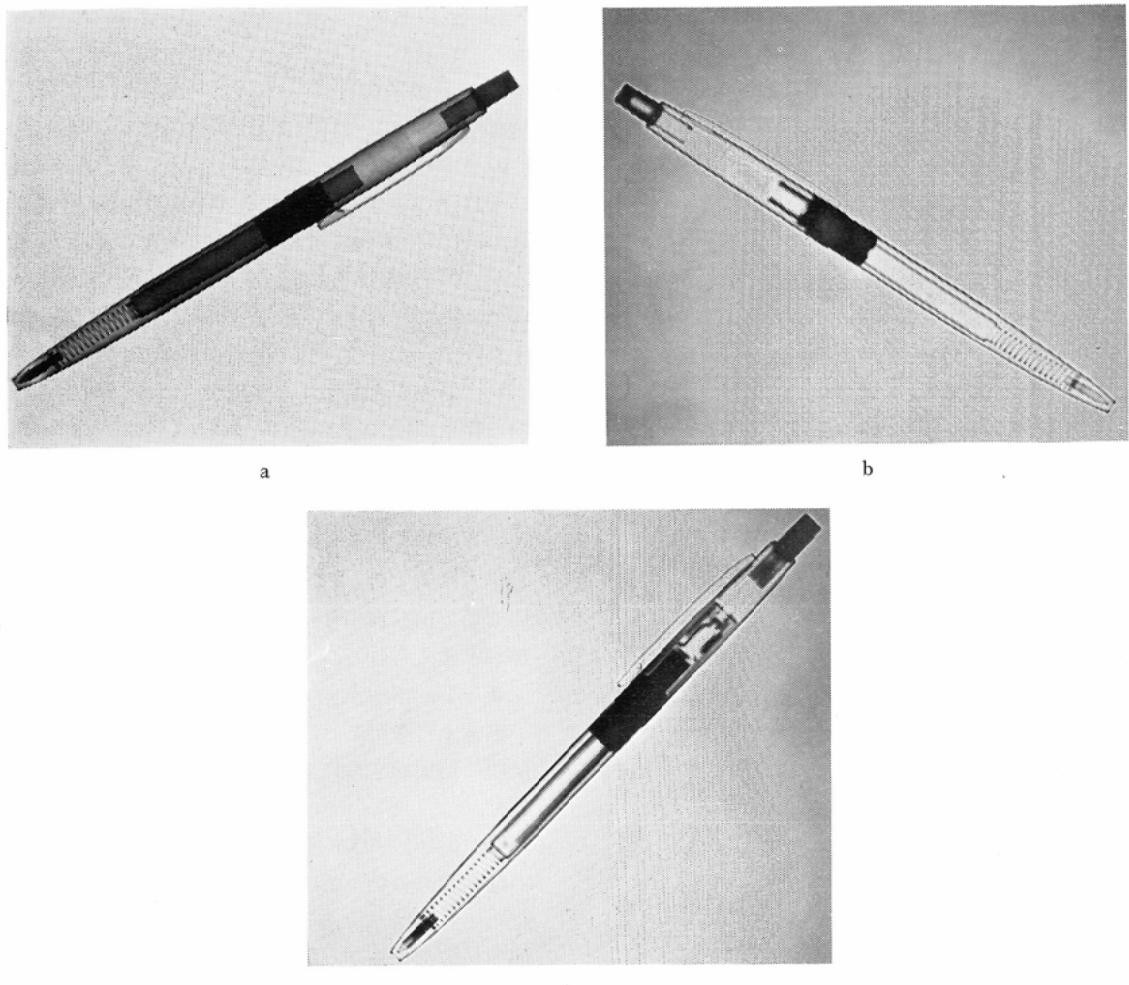


Fig. 5 Comparative displays of a ball-point-pen radiography. (a) X-ray (150kV),
 (b) proton (plateau region) and (c) proton (marginal range).

体とした陽子線ラジオグラフィーを試みた。この場合には各部位にて体厚が異なるので、吸収体の厚さを変えて、各部位に対応する Bragg Peak 位置を移行させつつ、何枚かの撮影をおこなった。Fig. 6に、概して最大体厚部に Bragg Peak を一致させた例を示した。脊椎部に陽子線は既に透過しない部分があるが、体表や骨周辺は Plateau 部に相当し、line drawing 効果によって強調されて描写されている。鼻孔より肺に至る気管も陽子がよく透過し、鮮明である。

厚さの異なる各部位を同時に Bragg Peak 部

に対応させて撮影することが望ましいが、そのためには水槽に浸してほぼ均等な厚さにするが、実際の診断には不可能な場合が多く、空間分解能も劣化する。我々は、とくにある程度の厚さの範囲での診断を望む場合に、適用の dynamic range を拡大することを考えている。そのためには(1) フィルムを多数枚重ねたスタックを用いる、(2) 傾斜厚の range adjuster を回転使用して Bragg Peak 幅、とくにその立ち下り傾斜を拡大する、(3) range adjuster の厚さを僅かずつ変化させて撮影した数枚の像を重ね合せる等の方法が考え

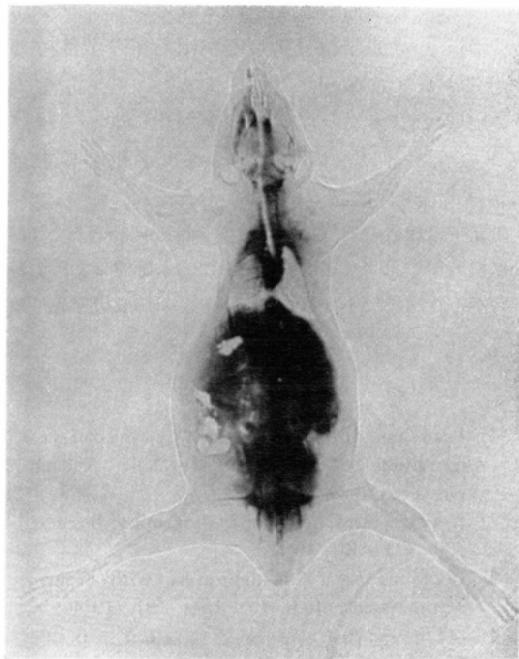


Fig. 6 Proton radiography of 2 cm thick mouse at 50MeV incident energy.

られる。(1), (2)の方法では適用厚の拡大とともにボケが大きくなり、空間分解能が劣化する結果をえた。(3)については、現在えられた数枚の写真の重ね焼きによっているが、このような画像処理が将来の電算機利用により即時に可能になれば有用であろう。

IV. 考 察

陽子線ラジオグラフィーの特徴は、陽子の飛程がその径路に沿った電子密度の積分値に依存し、この飛程のゆらぎ(range straggling)が小さい($\sim 1\%$)ことによっている。これはある点について、そこを通過した個々の陽子が、その経路上の密度情報を与えうることを示し、X線写真では線束の通過する強度が他の点との相対値として与えられて成立することと本質的に差違がある。画像構成は線束を増せばその統計精度が向上することは何れも同じであるが、陽子線の検出能と被曝線量との関係は、河内⁴⁾の計算によれば、厚さ30cmの体内の正常組織と5%の密度差の癌組織を 10^4 コの陽子により約2cmまで検出でき、これは

0.3mm厚のバリウム属の検出に対応し、その被曝線量は約1mradである。なおこの線量は陽子線のプラトー域により与えられるものでありRBEはほぼ1である。側方散乱が小さいので、さらに重い荷電粒子を用いればよりよい空間分解能がえられようが、本質的な問題点は陽子線ラジオグラフィーと変わらないと考えられ、被曝線量には考慮すべき障害発生のRBEの補正が必要であり低線量での発癌の議論になると面倒である。

陽子線ラジオグラフィーについて密度分解能が優れていることと、dynamic rangeが狭いことは表裏の関係にある。実用上は蛍光面上にブレーディング・ピークが位置するようエネルギーを変化させつつTV画像として連続的に診断がなされるものと考えられる。よってrange adjusterは遠隔で任意にその厚さを制御できるものであるが、そこからビームの等方性を乱す散乱陽子が被写体に入射することを防ぐために、被写体より充分遠方におくことが望ましい。このことは、range adjusterが厚くなり低エネルギーになると急激に入射線束強度が減少することになる。よって、曝射量の設定には時間によらず線束の高速モニター積算によるビーム・シャッター制御が不可欠である。現在この一連の応答に数10msecを要しており、この高速化が望まれる。現在、陽子線の診断利用計画を考えている筑波大学一高エネルギー物理学研究所での案では、1パルス(パルス幅 $\sim 50\text{nsec}$)での撮影によるとし、このパルス強度を予めモニター制御しておくことにしている⁵⁾。

高エネルギー陽子線が使用可能となり、診断が行われた場合に本稿で示したごとき結果が期待できるかについて考えたい。観測すべき部位とフィルムとの間の被検体の残部厚が大きい場合、これによる像のボケはX線写真の場合より問題である。残部厚が均質、均等厚であっても、そこでうける散乱陽子線がフィルムに到達して、本来の画像情報を乱すためである。III-1節に述べたテスト・チャートによるMTFは、チャート板とフィルム間にアクリル板を挿入してゆくと劣化するが、その程度は陽子線においてより著しい。X線

の場合には散乱は吸収に比較してより小さく、ほぼ一様に起るので、対比度は低下するが本質的には画像情報を乱さない。陽子線写真にとくに画像処理が重要と考えられる理由である。一般に観測部位と観測位置との間での散乱等による画像のボケの補正是多くの分野での共通課題であり、解決されつつある。ここでの問題にも適用可能であろうが、かなり大容量の電算機処理を要する⁶⁾。

最後に感光材料について簡単に考えたい。比較の議論を簡単にするために、ここでは撮影に増感紙を使用していない。現用の増感紙は当然のことながらX線に対して有利であり、そのZ依存による感度増強は陽子線に対して必ずしも有効ではない。よって、本章の始めに述べた被曝線量の議論も増感紙等を考慮すれば変ってくる。しかし、陽子線ラジオグラフィーが一般診断に用いられるものではなく、とくに限られた目的に行われるものであり、また同一ビームにより、診断・治療を行うようなシステムが陽子線の利点を生かすものと考えられるので、被曝線量の議論は陽子線ラジオグラフィーの本質的なものとは思われない。

V. 括 め

陽子線ラジオグラフィーによれば、X線では検出困難であった部位を認めうることを示した。とくに軟部組織の僅かな変化および高原子番号物質

に囲まれた軟組織形状を検出できる。

しかし、高原子番号物質の検出および散乱線の寄与においてはX線が有利である。

陽子線ラジオグラフィーの実用化においては、高速モニターまたはビーム・パルス化が要求され、また画像処理が重要にならう。

附記：本報告の要旨は日医放学会第36回物理部会（浜松医科大学）にて発表された。また、本研究は文部省科研費がん特別研究I（坂本班）および一般研究B（秋貞班）によつた。

文 献

- 1) Particles and radiation therapy, Second International Conference. Int. J. Radiat. Oncology Biol. Phys., 3: 1977
- 2) Koehler, A.M.: Proton radiography. Science, 160: 303—304, 1968
- 3) Cookson, J.A.: Radiography with proton. Naturwissenschaften, 61: 184—191, 1974
- 4) 河内清光：陽子線深部線量の計算法. 日本医放会誌, 37: 877—886, 1977
- 5) 高LET放射線生命科学センター：筑波大学高LET放射線生命科学センター準備委員会, 昭和53年12月
- 6) S. Ueno et al.: The atmospheric blurring effect on remotely sensed earth imagery. (In) Fymat, A.L., Zuev, V.E., ed: Remote sensing of the atmosphere: Inversion methods and applications. pp. 305—319, 1978, Elsevier Scientific Publishing Company, Amsterdam