

Coolidge 管の診断および治療応用に関する予備報告

A preliminary report on the diagnostic and therapeutic application of the Coolidge tube

Cole LG. Am J Roentgenol 1:125-31,1914*

従来のX線管の原理

Dr. Coolidge の設計になる純粋な電子放出による強力なX線管は、レントゲン科学の誕生以来最も重要な貢献であることは疑いのないところである。従来のX線管は、その構造や真空度の調整機構にときに多少の変更が加えられてきたことを除けば、すべて基本的には同じで、X線透過性(硬度)は真空度によって制御されていた。

新しいX線管の原理

当然のことながら Coolidge 管と称すべき Dr. Coolidge 設計の新しいX線管は、全く新しい原理に基づくものである。X線管の構造と作動時の物理現象については、Physical Review 誌 12 月号に詳述されている。従来のX線管の制約は、真空度を約 1,000 倍も高めることによって克服されている。X線管は、陰極を加熱した場合のみ作動する。陰極のタングステンフィラメントを電流で加熱すると電子が放出される。Dr. Coolidge の言葉によると、陰極から電子が「煮出され」(stewed out)、コイル、変圧器、静電発電機などによる高電圧によって陰極・陽極間で加速される。

X線の透過性は、電子が陰極から放出される速度に依存する。この速度は回路中の低電圧電池の電流によって制御できる。

Coolidge 管の利点

新しいX線管の利点はいくつもある。

1. 制御の正確性
2. 安定性
3. 結果の再現性
4. 適応性
5. 大出力
6. 長管球寿命
7. 間接X線の欠如

制御の正確性

Coolidge 管を使用してみると、従来のX線管における制御の正確性に制約があることに初めて気付く。自動調整装置付きの管球であっても、電源にコイルを使用しても期待外れで、ましてや通常変圧器で使用する

ような高 mA で使用する場合は、調整器に流れる大電流の短絡によって真空度が損なわれるために全く役に立たない。従って、最も良い調整方法は単純な当て推量によるもので、小電流で所望の透過性まで低下したところでレオスタットで抵抗を絞ると透過性が実質的に再上昇し、より多くの電流で作動ようになる。

Coolidge 管の場合、透過性は陰極フィラメントに発生する熱によって増加、減少を調整可能で、これは Dr. Coolidge の抄録に書かれているように、変圧器やコイルからの二次回路につながれた蓄電池からの電流で制御される。

安定性

安定性も、制御の正確性と同じく優れたものである。Dr. Coolidge によると、まだ開発段階の現状でも、25mA で 50 分間、ほとんど透過性に变化なく連続使用可能である。X線撮影ではこのような長時間の安定性は不要であるが、全身いかなる部位でも、撮影に必要な時間にわたって安定であることから、これまで放射線科医にとって実現不可能な理想であった均一なX線写真が得られる。特定の部位の撮影に必要な透過性が決まれば、X線管をそれに応じて事前に調整し、1 ~ 200mA の任意の電流で、適切な条件が得られるだけ十分な時間照射できる。mA 値に曝射時間を掛けると mAs 値が得られる。筆者のいくつかの実験によると、1mA × 50s, 50mA × 1s のいずれも本質的に同じである。これが正しければ、撮影時の透過性を正確に制御でき、mAs 値を使って全身各部位の撮影について均一な結果を得ることはいとも簡単なことである。我々がこの管球を試用する機会を得た短期間でも、各部位の撮影において完全に安定した透過性が得られた。

結果の再現性

X線撮影に携る者なら誰しも、なにかのはずみにすばらしいX線写真を撮影できたことを経験していると思うが、個人的にはこれを確実に再現できたことは一度もない。私も数回、細部がとても良くみえる写真が撮れたことがある。Coolidge 管による経験では、これまでたまにしか撮れなかったこのような著しく優れた写真が、その部位に応じた透過性をひとたび決定しておけば、常に撮影できる。所定の透過性に設定し、同じ mA で撮影すれば、100 枚のX線写真でも、互いに区別できないほどほぼ同じように撮影できる。

* コーネル医科大学放射線科教授 (Professor of Roentgenology at Cornell University Medical College)

適応性

X線管球の適応性 (flexibility) は、ほとんど未知の特性である。これまで真空度を高めることはできなかった。真空度を低くして透過性を所望に応じて低下させることはできたが、真空度が不安定なため著しく不確実であった。Coolidge 管では、この適応性が利点のひとつである。ある時は、四肢の血管吻合がみえる程度に透過性を弱くし、次の瞬間には操作室を出ることもなくこれまでの管球にはありえないほどの強い透過性で撮影することもできる。従って、おなじ管球をすべてのX線撮影、X線治療に使用できる。

大出力

Coolidge 管では、正確に制御可能で、長時間にわたって絶対に安定、かつ再現性のある大出力が得られ、放射線科医には計り知れない診断的、治療的手段を手にしたことになる。

長寿命

Dr. Coolidge によると、この管球の寿命は連続使用下で少なくとも 1,000 時間あり、実際の所、劣化よりも落としたり破損したりして寿命を迎えることの方が多いであろうということである。また、通常の使用法では破裂することはないという。

間接 X 線

二次陰極線、すなわち偏向した陰極線によって管球前部から発生する間接 X 線は、通常の X 線管では不都合な存在である。間接 X 線は、X 線撮影に無用であるばかりか、画像のボケや組織内の二次線の原因となるなど積極的に有害なものである。以前に筆者は、通常の X 線管から放出される X 線の半分が間接 X 線であることを示した。他の報告では、この割合はさらに大きい。陽極を囲む様々なスクリーンやフードが工夫されたが、その有害作用を除去する最も実地的な方法は、その発生を阻止するのではなく管球外の絞りで遮蔽することであった。Coolidge 管では、管球前部に緑色の蛍光が見られないことから分かるように、またピンホールカメラ試験でも証明されているように、間接 X 線が存在しない。このため管球のそばに小さな絞りや圧迫グリッドを置く必要がなく、圧迫グリッドは管球ホルダーと独立に設置して、専ら圧迫と照射部位を絞るために使用できる。

新型管球の X 撮影、X 線治療への応用

この管球の著しい実地的な利点を簡単に述べた上で、X 線撮影、X 線治療への応用について考える。所定の透過性、mA、照射時間で全身各部位の X 線撮影を比較することにより、管球の透過性、mAs 値の基準表を作ることができる。この表はもちろん、透過性の程度、

患者の体格に応じた調整を加味してさらなる改良の余地がある。しかし、以下の表はまだ未完成なものではあるが、我々がルチーン撮影で使用し、非常に有用かつきわめて正確な再現性のあることが判明していることから、この管球をすぐにも使用したい諸氏への指針として提示する^{*1}。

我々の実験では、mAs 値は従来の X 線管で使用していたものより大きい傾向がある。これを確かめるために、できる限り安定な真空状態の従来管で撮影し、同じ条件を Coolidge 管で繰り返して撮影した。その結果、濃度、解像度に差はなかった。従って、新しい X 線管における鮮明度の向上は、少なくともその一部は真空度に変動がないこと、間接線によるくもりが無いことによると考えられた。

撮影部位	火花間隙 (インチ)	電流 (mA)	曝射時間(秒)	mAs
手 (軟部)	1 1/2 - 2	25	2	50
手 (骨)	2	25	2	50
足 (軟部, 側面)	3	25	3	75
足 (骨, 側面)	3	25	3	75
膝 (軟部)	3	25	4	100
膝 (骨と軟部)	4	25	4 - 5	125
膝 (骨のみ)	4 1/2	30	5	150
肩 (軟部)	4	30	8	240
肩 (骨)	4 1/2 - 5	30	10	320
股関節 (骨)	5	30	15	450
腎	4	30	15	450
脊椎 (骨, 詳細)	5	30	15	450
頭部 (側面)	5	30	15	400
頭部 (前後)	5 1/2	40	15	600
肺	3	40	10	400
胃 (スクリーニング)	5	100	0.06	6

X線撮影における利点

短時間に大きな mA をかけられることは、胃十二指腸の撮影には大きな利点である。タイムスイッチを使用して、中等度の体格の男性に 10 枚の撮影を行なうために必要な累計時間を正確に計測した。10 回の撮影に要した時間は 4/10 秒、1 回約 0.06 秒で、コントラスト、解像度はいずれも良好であった。高速撮影は、特にシネ撮影に有用であり、蛍光板から直接シネ画像を得る事ができる。

X線透視における利点

Coolidge 管は、最小の mA 値で任意の透過性が得られ、次の瞬間には同じ管球を使ってただちに消化管撮影が可能であることから、X 線透視にも大きな利点がある。従って、理想的な消化管検査である連続 X 線撮影、シネ撮影、X 線透視の組合わせを行なうにあたっては、計り知れない有用性があると考えられる。

Coolidge 管の X 線治療への応用

より効率的な X 線治療用管球が強く求められているこ

とから、著者は Dr. Coolidge に、彼自身はまだ開発段階にあると考えているこの管球の成功を発表するよう促したものである。当時はまだ X 線撮影 3 例のみで、治療については経験がなかった。しかし、研究室で著しく大きな mA 値で安定に動作したことから、その治療分野での有用性は既に明らかであり、最近行なった実験でも、放射線科医が従来なっていた標準的な方法に比較して Coolidge 管が著しく効率的であることが証明された。この実験には、Kienboeck と Hampson のラジオメーターを使用した。

厚さ 2 インチの牛肉片の表面を、X 線管の焦点から 5 1/2 インチの距離に置き、厚さ 3mm のアルミニウムをその間に置いた。Hampson の試験小体^{*2}と Kienboeck の試験小片^{*2}を牛肉の表面に載せ、2 組目の試験小体、試験小片を表面から 1 インチの位置に、3 組目を厚さ 2 インチの牛肉の下面に置いた。

実験 I：X 線管球は、火花間隙 7 3/8 インチに設定した。Bauer 硬度計は計測範囲外、Walter 硬度計の読みは 8+ であった^{*3}。照射時間は 3 1/2 分で、この間 mA 値は 10 から 8 に変化し、その後 9 に戻った。表面に置いた Hampson の試験小体は 12H、つまり紅斑線量の 3 倍であった。表面の Kienboeck の試験小片は破損した。深さ 1 インチの Hampson 試験小体は 6H、16K、1 1/2 紅斑線量であった。深さ 2 インチの底面では、3H、8K、3/4 紅斑線量であった。

前回に引き続いて、2 回目の実験を行なった。

実験 II：火花間隙 7 3/8 インチで同じ透過度とした。Bauer 硬度計は計測範囲外、Walter 硬度計は 8+、mA 値は 8 から 10 に変化した。厚さ 3mm のアルミニウムを間置した。1 分間の照射を 4 回、2 分間の照射を 2 回行なった。

最初の 1 分間の照射後、表面の試験小体、試験小片は 4H、12K であった。深さ 1 インチ、2 インチの小体、小片は読まなかった。

2 回目の 1 分間照射後、つまり累計 2 分の照射後、新たに表面に置いた小体、小片の読みは 4H、18K であった。計 2 分間照射された深さ 1 インチの小体は 3H、Kienboeck の小片は読まなかった。

3 回目の 1 分間照射後、新たに表面に置いた小体、小片の読みは 4H、15K であった。累計 3 分間照射された深さ 1 インチの小体は 4H、Kienboeck の小片は読まなかった。

4 回目の 1 分間照射後、新たに表面に置いた小体、小片の読みは 4H、15K であった。累計 4 分間照射された深さ 1 インチの小体、小片は 4H、15K であった。深さ 2 インチの小体は 3H、Kienboeck の小片は読まなかった。

5 回目の 2 分間照射後、表面の試験小体は 8H、Kienboeck の小片は真っ黒であった。深さ 1 インチの小体、小片は読まなかった。深さ 2 インチの小体、小片は、4H、15K であった。

以下の表にこの結果をまとめた。

火花 間隙	電流 (mA)	曝射時間 (分)	フィル ター	硬度 (Hampson, Kienboeck)
7 3/8 インチ	10→8→9	3 1/2	3mm Al	表面 12H-破損 1 インチ 6H-16K 2 インチ 3H-8K
"	9	1	"	表面 4H-12K 1 インチ 欠測 2 インチ 欠測
"	8 1/2	1 (累計 2)	"	表面 4H-18K 1 インチ 3H-欠測
"	9→8 1/2→8	1 (累計 3)	"	表面 4H-15K 1 インチ 4H-欠測
"	9→8 1/2 →8→8 1/2	1 (累計 4)	"	表面 4H-15K 1 インチ 6H-15K 2 インチ 3H-欠測
"	10→8	2 (累計 6)	"	表面 8H-黒化 1 インチ 欠測 2 インチ 4H-15K

この実験から、6 回の照射により、表面から 2 インチの位置、6 分間で紅斑線量が得られることがわかる。このような高度透過性の著しい X 線量が得られれば、いくらでも所望の試験線量が得られ、治療期間を必要以上に延長する必要はなくなる。Dr. Coolidge によれば、陽極を大焦点とすれば、mA 値は 2,000 まで増加することが可能で、透過性を向上するような変圧器や X 線発生装置も設計しうる。

このような性能を手にすることができれば、X 線量に制限はなくなり、十字照射法を用いれば、深部の癌にも表層の癌がただちに消失するのと同程度の線量を照射できると期待できる。

【註】

^{*1} mAs 値は任意の mA 値、曝射時間に設定できるが、撮影部位の安静が保てる限り、中等度の mA 値、ある程度の長さの曝射時間が望ましい。

^{*2} 訳注：いずれも化学反応を利用した X 線量の半定量法。Hampson の Radiometer は、シアン化白金バリウムろ塗布した円形の試験紙 (pastille、試験小体) の黄色変化、Kienböck の Quantimeter は、臭化白金を塗布した短冊状の試験紙 (strip、試験小片) の黒化を利用する。

^{*3} その後の実験で、Walter 硬度計を乾板上において撮影すると、X 線は最も厚いアルミニウム円板を透過し、さらにその周囲の鉛も透過することがわかった。

図 1. 足, Walter ベル型硬度計*. 試験写真 No.1. 軟部陰影が見える.

火花間隙 2", 電流 10mA, 曝射時間 5 秒, 50mAs. Benoist 硬度 2

図 2. 足, Walter ベル型硬度計. 試験写真 No.2. 軟部陰影が明瞭. 骨構造の一部が見えはじめる.

火花間隙 3", 電流 10mA, 曝射時間 5 秒, 50mAs. Benoist 硬度 4

図 3. 足, Walter ベル型硬度計. 試験写真 No.3. 図 2 と全く同じ条件で撮影. 2 枚の写真の正確な再現性がわかる.



図 4. 足, Walter ベル型硬度計. 試験写真 No.4 軟部陰影が消え始める. 骨の構造の詳細が強調されている.

火花間隙 5", 電流 10mA, 曝射時間 5 秒, 50mAs. Benoist 硬度 8

図 5. 足, Walter ベル型硬度計. 試験写真 No.5. 軟部陰影はほとんど消失し, 骨の非常に細かい構造が見える.

火花間隙 6", 電流 10mA, 曝射時間 5 秒, 50mAs. Benoist 硬度 9

図 6. 足, Walter ベル型硬度計. 試験写真 No.6. 軟部陰影は完全に消失し, 骨構造も消えはじめている

火花間隙 7", 電流 10mA, 曝射時間 5 秒, 50mAs. Benoist 硬度 10

* 訳注:Walter Bell. Benoist 硬度計とほぼ同じ構造で, 中央に銀の円板, その周囲に 6 段階の厚さの異なる扇型アルミニウム板があり, 撮影して両者の濃度が一致するアルミニウム板の番号をもって硬度とする.



図7. 上腕. Leone Cottrell 氏. 写真No.39721. 骨, 筋, 静脈内の血液, そして脂肪の小葉構造まで明瞭に認められる. 火花間隙 $3\frac{1}{2}$ ", 電流 70mA, 曝射時間 $\frac{1}{4}$ 秒

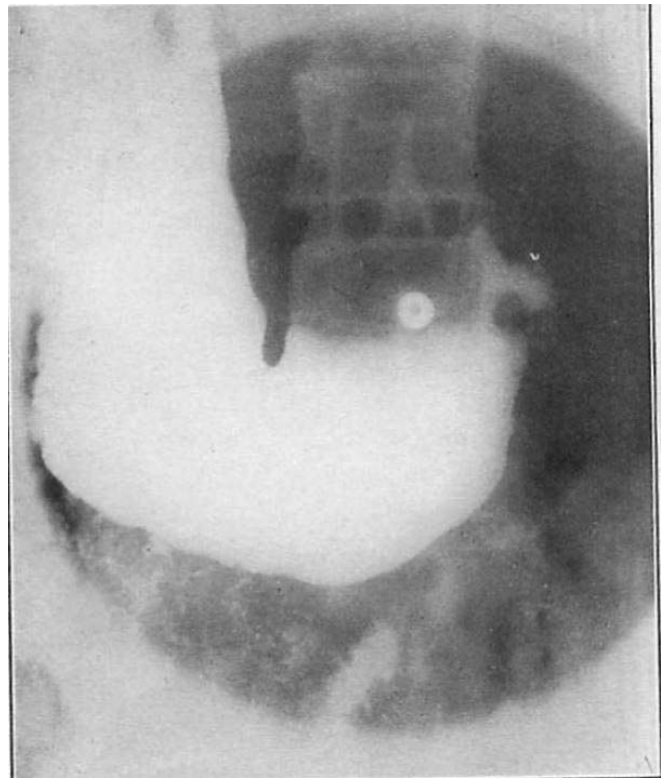


図8. 胃. Prendergast 氏. 写真No.4580. 10枚連続撮影の1枚. 10枚の総曝射時間は $\frac{4}{10}$ 秒, 1枚あたり $\frac{6}{1100}$ 秒. 火花間隙 $5\frac{1}{2}$ ", 電流 110mA, 曝射時間 0.06 秒

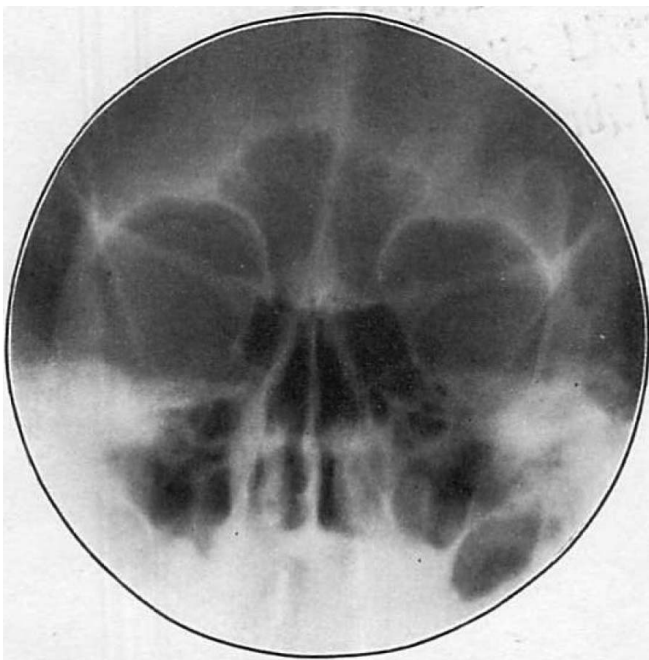


図9. 前頭洞. Hazel Hill 氏. 写真No.39593. 火花間隙 $5\frac{1}{8}$ ", 電流 30mA, 曝射時間 15 秒

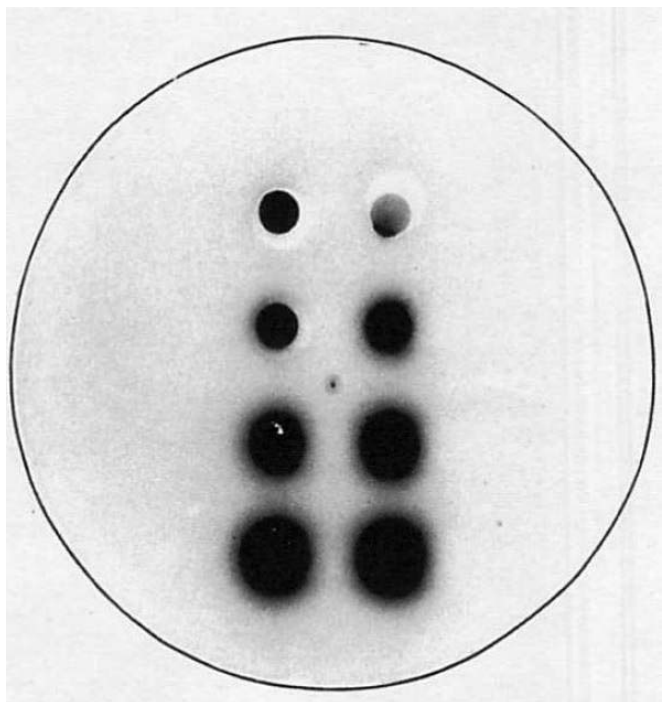


図10. Walter 硬度計*. 試験写真No.10. Walter 硬度計のX線撮影で, 示度は 8+, 白金円板周囲の鉛板も透過していることがわかる. 火花間隙 $7\frac{1}{2}$ ", 電流 10mA, 曝射時間 10 秒

* 訳注: Walter penetrometer. 鉛板に 1 ~ 8 番まで, 8つの孔があいており, それぞれ 0.005 ~ 0.64mm 厚の白金箔が貼られている. 撮影して輪郭が見える最も大きな孔の番号をもって硬度とする.