

**2017/11/21 大阪府立大学 放射線研究センター
共同利用成果報告会**

**クルツクス管からの低エネルギーX線
評価手法の開発**

**大阪府立大学 放射線研究センター 秋吉 優史
日本科学技術振興財団 掛布 智久
千代田テクノル 谷口 和史
放射線教育フォーラム 宮川 俊晴**

本発表の背景

2017年3月に公布された新・中学校学習指導要領

p65 (3) 電流とその利用 ア(ア)電流 ○エ 静電気と電流

「異なる物質同士をこすり合わせると静電気が起こり、帯電した物体間では空間を隔てて力が働くこと及び静電気と電流には関係があることを見いだして理解すること。」

↓「内容の取扱」

p71 アの(ア)の ○エ については、電流が電子の流れに関係していることを扱うこと。また、

真空放電と関連付けながら放射線の性質と利用にも触れること。

2008年3月に公布された旧・中学校学習指導要領には記載がなかった内容

**実際問題としてクルックス管以外に
選択支の無い内容**

2017年3月に公布された新・中学校学習指導要領

p69 (7) 科学技術と人間 (ア) エネルギーと物質

○ア エネルギーとエネルギー資源様々なエネルギーとその変換に関する観察, 実験などを通して, 日常生活や社会では様々なエネルギーの変換を利用していることを見いだして理解すること。また, 人間は, 水力, 火力, **原子力**, 太陽光などからエネルギーを得ていることを知るとともに, エネルギー資源の有効な利用が大切であることを認識すること。

↓「内容の取扱」

p72 アの(ア)の○アについては, 熱の伝わり方, **放射線にも触れること**。また, 「エネルギーの変換」については, その総量が保存されること及びエネルギーを利用する際の効率も扱うこと。

2008年3月に公布された旧・中学校学習指導要領にも同様の内容

**依然としてこの内容も効果的に学習できる
コンテンツの開発を行う必要がある**

クルックス管を安全に使用出来ないか？

「真空放電と関連付けながら放射線の性質と利用にも触れること」という内容は、完全にクルックス管の利用を前提としている。クルックス管は従来から放射線教育に用いられているが、低エネルギーX線の被曝線量が想像以上に多い(数10mSv/hに達する)場合があることが明らかになりつつある。(*1)



←
5kV で動作中の
クルックス管
→
9V電池駆動の
5kV 高圧電源



電子線の観察だけであれば非常に安全であり、安価でもあるため最適であるが、X線の測定を含めた実習を考えると、もう少し高電圧を印加して特定の方向でだけX線が測定できるような装置と、遮蔽体を組み合わせた実験体系が望ましい。

株式会社ホリゾンからは、冷陰極を用いて低電圧で被ばく線量を抑えての陰極線観察を可能としたクルックス管が 22,000円、電源も18,000円と手軽な金額で発売されている(*2)。低電圧動作が可能であり、専用の電源での5kV程度での動作では全くX線の放出が観測されなかった。さらに、20kV程度と同じ電圧で駆動させても他社製品よりX線放出量は少ない。

(*1) 教育現場における冷陰極管の漏洩X線について, 宇藤 茂憲, 福岡教育大学紀要, 66(2017)第3分冊_1-11.

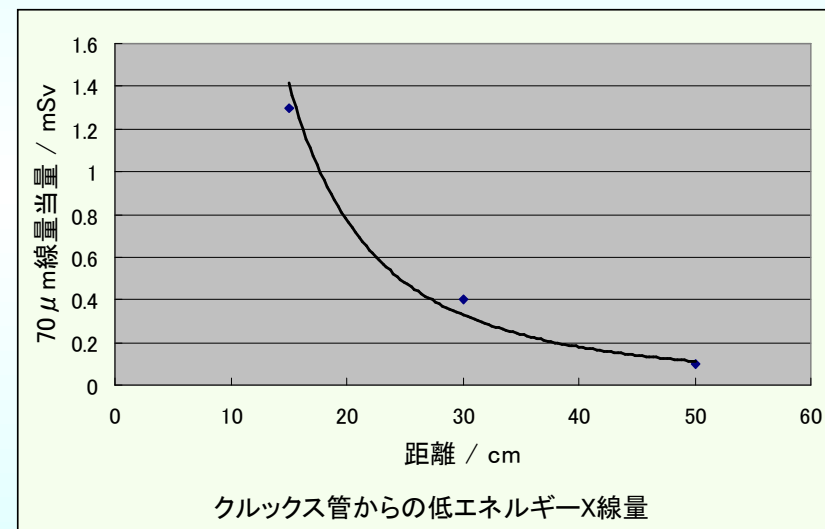
(*2) http://www.horizon21.co.jp/products_detail1_4.html

ガラスバッジを用いた線量当量測定

20keV 程度の低エネルギーX線は、透過力が低く一般的なNaIシンチレーターや電離箱では測定する事が出来ない。



低エネルギーのX線でも測定可能な信頼できる測定手段として、蛍光ガラス線量計を用いた、千代田テクノルのガラスバッジによる環境線量測定サービスを利用した。



ケニスの誘導コイルの放電針距離20mm(20kV強に相当)、十字板付きクルックス管の十字板を下げた状態で測定。

照射時間は10分間。1cm線量当量は0であったが、70 μm線量当量は有意な値を示した(β線として評価されていた)。

測定結果の不安定性

クルックス管からのX線量は様々な測定結果が報告されているが、低エネルギーX線の性質を理解しておらず測定手段が不適切であったり、印加電圧が極端に高かったりして報告により値がバラバラである。

使用する装置によっても大幅に値が異なり、クルックス管の内部に封入したガスがガラス管に吸着されて枯れてしまい、高電圧を印加せざるを得なくなった事などが原因と考えられる。それを差し引いて、同一の装置を用いても測定する度に測定結果が大幅に変化する。

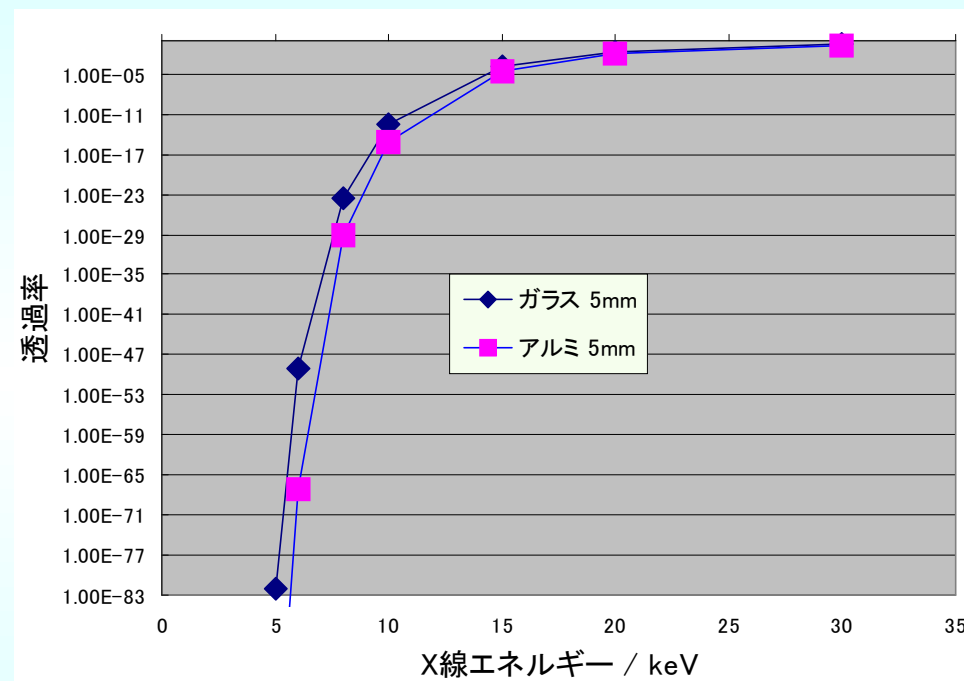
10-15kV 程度のX線は僅かなエネルギー変動により何桁も透過率が変わるためであると考えられる。

様々な装置が全国に存在するため、使用する都度教員が測定を行い線量を確認する必要があるが、10keV程度の低エネルギーX線の評価は非常に困難である。

GM管での計数率測定と、霧箱による飛程の観察からスペクトル評価を行い、線量当量を求められないか？

低エネルギーX線の透過率

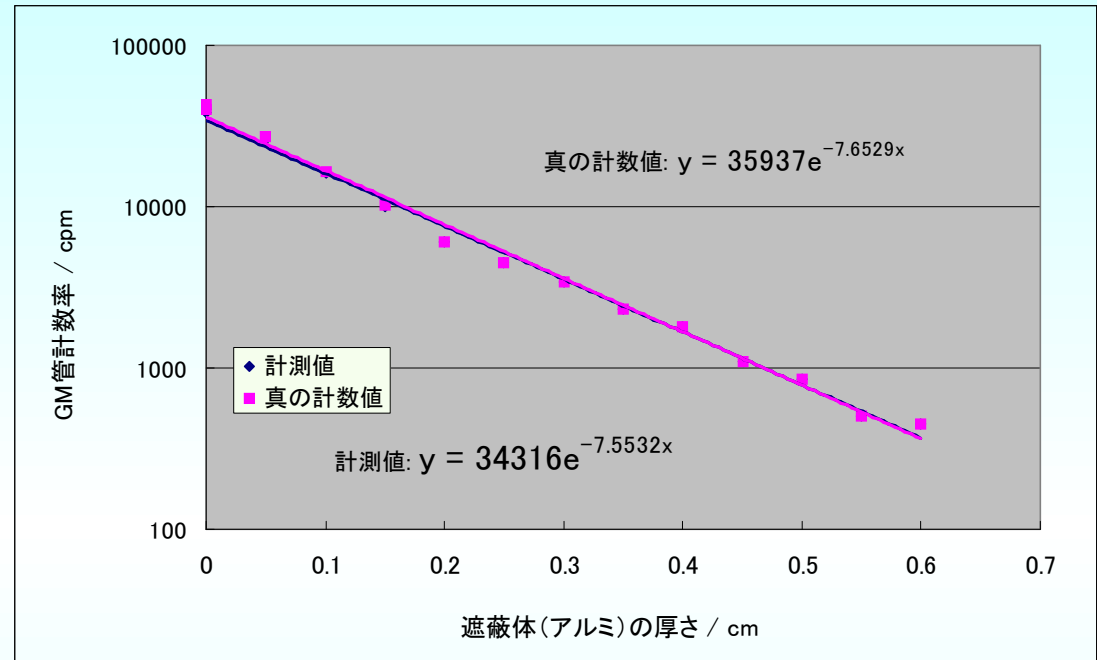
エネルギー (keV)	質量減衰係数 (cm ² /g)	密度 (g/cm ³)	厚さ(cm)	透過率	遮蔽体
5	41.5	1.00	1.0	9.48E-19	水
6	23.85			4.39E-11	
8	9.94			4.82E-05	
10	5.051			6.40E-03	
15	1.546			2.13E-01	
20	0.7505			4.72E-01	
30	0.3455			7.08E-01	
5	146	2.59	0.2	1.43E-33	ガラス (コンクリート 等価として計算)
6	87.29			2.31E-20	
8	42.13			3.33E-10	
10	22.16			1.03E-05	
15	6.809			2.94E-02	
20	2.973			2.14E-01	
30	0.983			6.01E-01	
5	192.4	2.70	0.5	1.57E-113	アルミ
6	114.4			8.46E-68	
8	49.7			7.26E-30	
10	25.75			8.00E-16	
15	7.697			3.07E-05	
20	3.279			1.20E-02	
30	1.045			2.44E-01	



アイントープ手帳 第11版, p154-155

- ・水1cmで遮蔽できるのであれば、実効線量については気にする必要はないが、10keV以上ではそれなりに透過する。
- ・クルックス管を構成するガラス壁によって 10keV 以下のX線はほとんど遮蔽される
- ・15keV 程度から急激に遮蔽率が変化し、わずかな印加電圧の違いにより大きく透過率が異なるため、放出されるX線の線量が安定しない。

GMサーベイメーターによるX線エネルギー評価



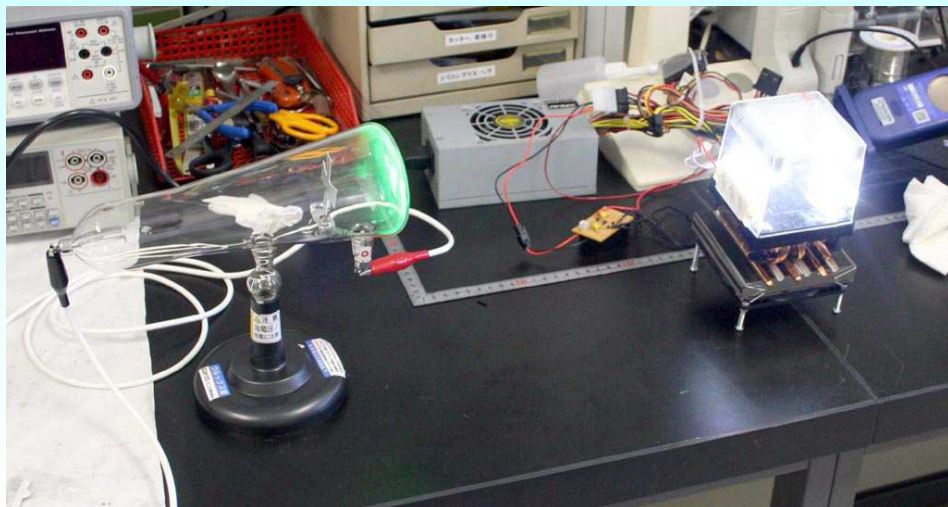
GMサーベイメーターの前にアルミ遮蔽板を置いていき、透過率を測定した。測定結果から線減衰係数を求めると、 7.65cm^{-1} となり、放電針距離の 20mm から想定されるエネルギー20keV強でのアルミの線減衰係数と**非常に良い一致を示した**。

当初低エネルギー側に尾を引いたスペクトルを想定しており、遮蔽が薄い領域で計数率が高くなる事が予想されたが、**単一のエネルギーだけで説明できてしまった**。

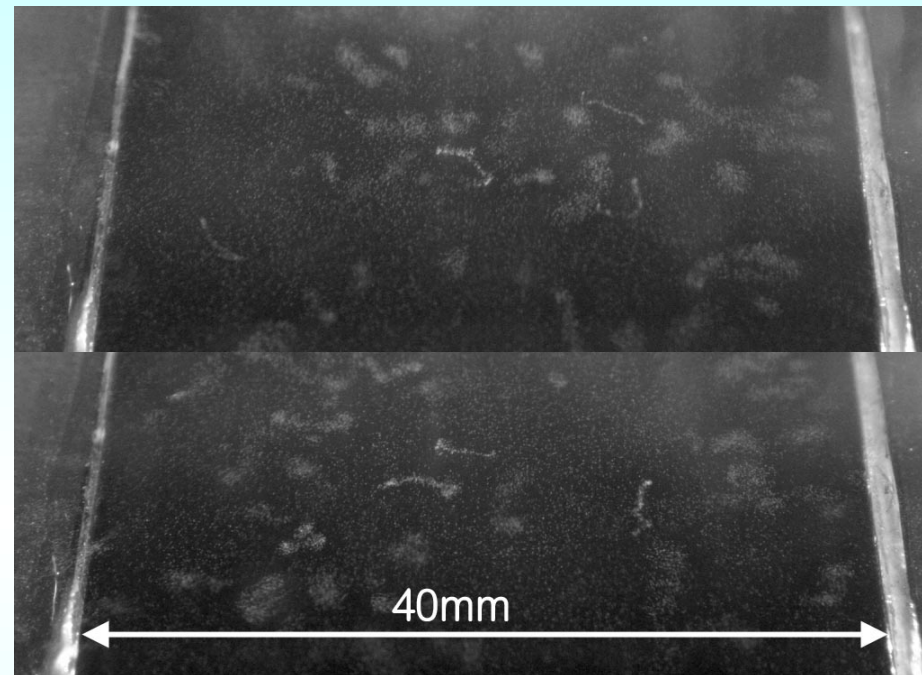
遮蔽体を用いた測定前後での遮蔽無しでの測定値はほぼ一致しており安定していた。また、クルックス管から 30cm位置、50cm位置で測定し、評価結果はほぼ同じであった。

X線エネルギー (keV)	アルミ中の 線減衰係数 μ (cm^{-1})
10	69.5
15	20.8
20	8.9
30	2.8

クルックス管を利用したX線のエネルギー評価



飛跡の長さは4mm程度であり、
空気中での20keV電子線の飛程
4mm程度と良く一致している。



クルックス管からのX線によって弾き出された
光電子の霧箱観察結果(放電針距離20mm)。

エネルギー既知のX線を入射して飛跡の長さのヒストグラムを作成し、エネルギーに拡がりを持つX線のスペクトルが評価できないか？

**霧箱を用いた低エネルギーX線の
エネルギースペクトル評価の可能性**

クルックス管からのX線による光電子放出

①

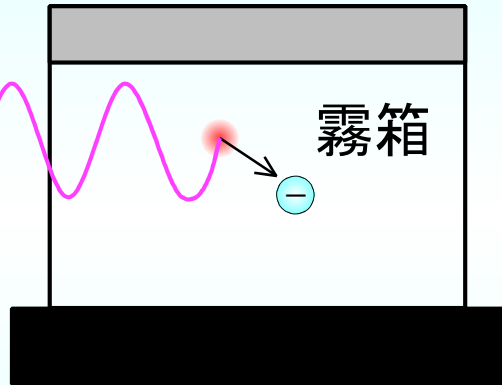
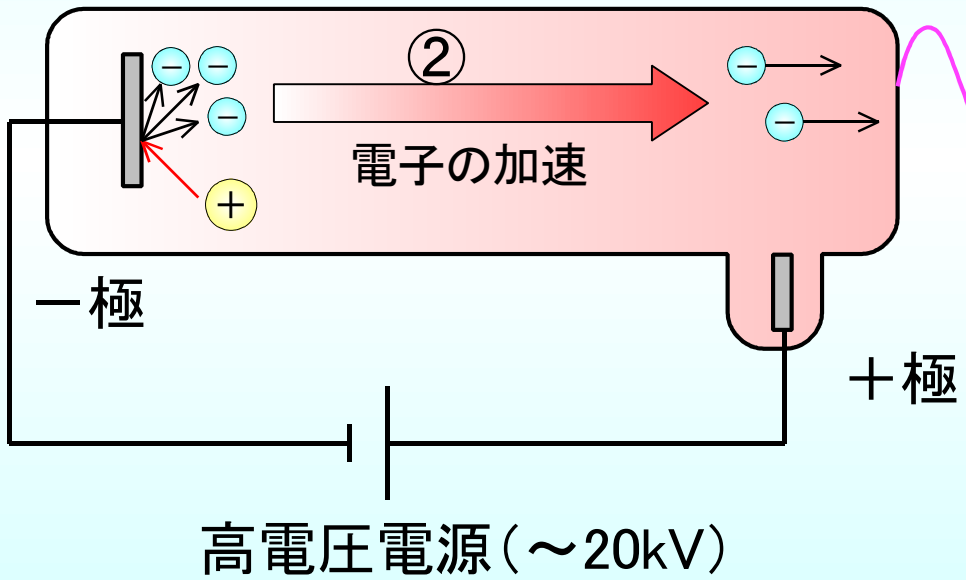
＋のイオンが一極に引きつけられて電子を叩き出す
(二次電子放出)

③

電子がガラス管の壁に衝突するときに、制動放射X線を放出する

④

X線は最終的に原子の周りを回る電子を光電効果などで弾き飛ばして(電離作用)、弾き飛ばされた高速電子はβ線と同じように振る舞う。



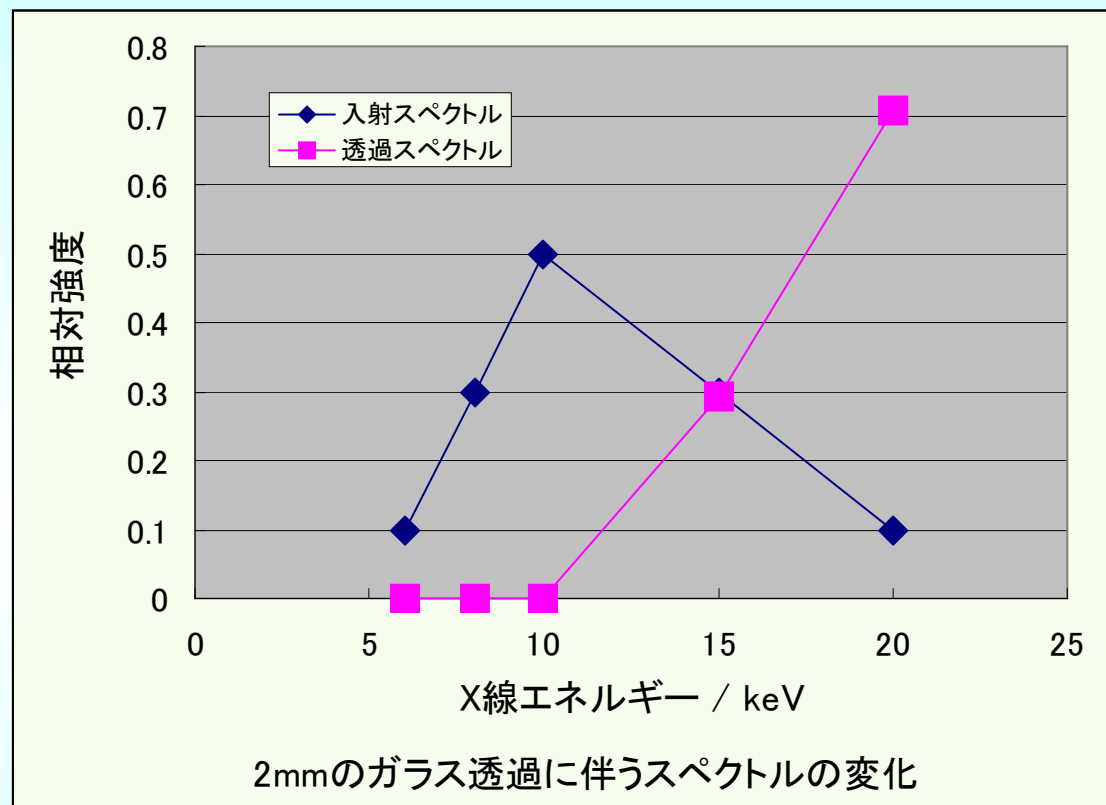
単色のX線でも飛跡の長さは有限の幅のスペクトルを持つ。

弾き出された光電子のエネルギーは、最大でもクルックス管にかけた電圧程度。実際には、放出されるX線スペクトルのピークは印加電圧の半分程度だがガラスの吸収により大きく変化する。光電子のエネルギーはX線のエネルギーから軌道電子の結合エネルギーの分だけ低くなる。コンプトン電子では角度によってさらにエネルギーは低くなる。

クルックス管のガラスによるスペクトル変化

エネルギー (keV)	質量減衰係数 (cm ² /g)	密度 (g/cm ³)	厚さ(cm)	透過率
6	87.29	2.59	0.2	2.31E-20
8	42.13			3.33E-10
10	22.16			1.03E-05
15	6.809			2.94E-02
20	2.973			2.14E-01

ガラス管を透過する前のX線のエネルギースペクトル(最大エネルギー20keVでその半分の位置にピークを持つ)を適当に決め、2mmのガラスで遮蔽された後の強度を透過率から求めた後、全体の強度が1となるように規格化した。



入射スペクトル	透過スペクトル	規格化
0.1	2.31E-21	7.62E-20
0.3	9.99E-11	3.30E-09
0.5	5.17E-06	1.71E-04
0.3	8.82E-03	2.91E-01
0.1	2.14E-02	7.08E-01

元のスペクトルよりも透過率が支配的となり、最大エネルギーである 20keV がほとんどを占めるスペクトルとなった。

今後の課題

・GMサーベイメーターの計数値から線量当量の算出

- ・個体差のある GMサーベイメーターの計数値をどのように取り扱うか？
ガラスバッジで校正は可能であるが、個体毎に実施する事は困難である。
- ・透過率の小さい低エネルギーX線被ばくの考え方
皮膚近傍の局所的な被ばくとなり、従来のX線の取扱とは大きく異なり β 線に近い。
特に、目の水晶体への等価線量が近年注目されており、非常に重要である。
→ 保健物理学会などの専門家に確認する必要がある

・どの程度の線量まで落とす必要があるのか？

- 2002/05 学校におけるエックス線装置を使用した実験等について: 文部科学省
においても明確なガイドラインを示していない。

・どの程度の電圧まで下げれば、許容できる範囲内に線量を落とせるか

- 装置により大きく放出量が異なる事を加味して十分な安全度を取る
必要に応じて遮蔽体の使用も検討する。
5keVで駆動する装置であれば絶対的に安全であり、それとビデオなどを併用した
授業を実施するののも一つの手段である。