

皮下組織に残留した放射性同位元素
による皮膚被曝線量の
モンテカルロ法を用いた推計

国立保健医療科学院

山口 一郎、緒方 裕光

背景

- わが国では、多数(Tc-99m試薬使用量は年間30万バイアルに及ぶ)の核医学検査及び核医学治療が約1,300の病院で実施されている。
- 核医学診療は標的組織以外に確定的影響は引き起こさず、確率的影響のリスクも検査によるメリットを下回るよう実施されている。
- その一方、診療用RIが皮下に漏洩しリンパ節に集積し事例や放射線皮膚炎を起こした事例(P-32, TI-201)がいくつか報告されている。このような事例では被曝線量の推計が有効な対策を講じるために必要とされている。

目的

- 皮下組織に漏洩したTI-201による皮膚組織内吸収線量を推定する。

方法の概要

- 皮膚モデルを作成。
- 光子及び電子のモンテカルロ法による輸送コードであるEGS4(Electron Gamma Shower Version 4)を用い、皮膚モデルに基づき皮下組織に漏洩したTl-201から放出された放射線による皮膚組織内吸収線量分布を推定。
- 皮膚モデルおよび線源条件の変数を変化させターゲット細胞の吸収線量の変化を観察。

皮膚モデルの基本構造

- ICRPの新呼吸器モデルのInterstitium – subepithelial layer– basal cellよりなる上皮組織モデルの一部を援用し、皮膚構造を皮下組織(subcutaneous tissue)、真皮(dermis)、表皮(epidermis)に分けた。さらに表皮を角質と基底細胞層に細分化した。

皮膚モデルの設定方法

- 手背皮膚表皮の厚さを80 μm とし、その最下層の一層を占める基底細胞基層の厚さを10 μm とした。
- 真皮（表層の乳頭層と深層の網状層からなる）の厚さを100 μm とし、その下に皮下組織が存在するとした。

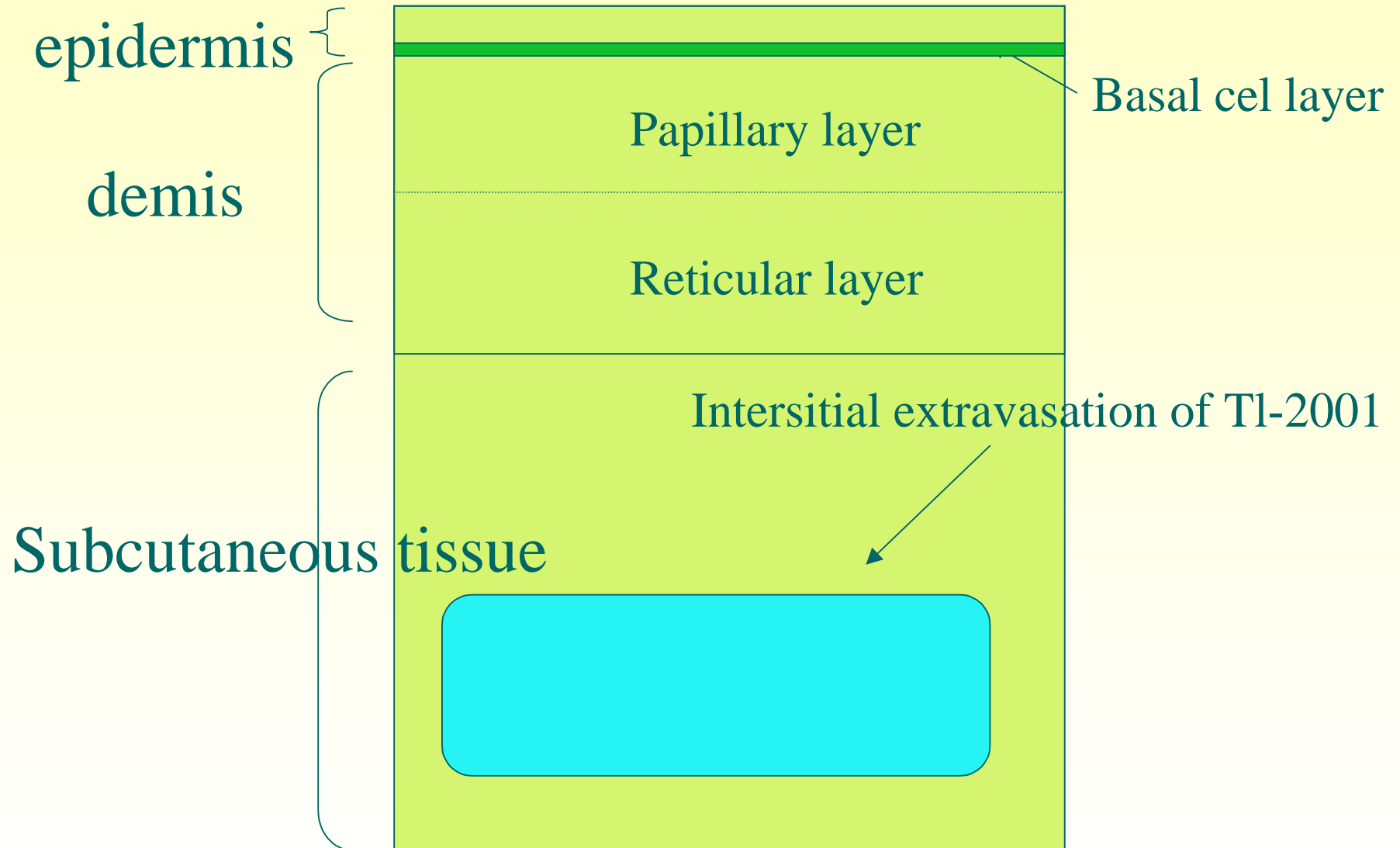


Fig. 1 A skin model for the dose calculation

線源条件

- 線源が毛細血管層に移動するモデルと線源がその場で毛細血管に吸収されるモデルを考えた。
- 線源の初期条件は、漏洩時の表面からの深さ、漏洩時の線源の厚み、漏洩時の線源の表面積によって決定される立方体とした。

線源が移動するモデルの仮定

- 皮下に漏れたRIが単純に濃度勾配に比例して網状層の毛細血管まで移動して血液中に吸収される。血管から見ればだんだん近づいてきて、血管内に吸収されたとたんに内皮細胞に与える線量は急減する（皮下にもれた場合、リンパ管から吸収されるルートもあるが無視した）。
- RIの移動は皮膚面に対して垂直。

推計した線量

- 基底細胞層および真皮（乳頭層および網状層）における吸収線量を厚さ $20\mu\text{m}$ 、断面積 10cm^2 ごとの容積について求めた。

組織吸収線量の計算方法

- 線源からターゲット細胞層への放射線の輸送を考え、光子及び電子のモンテカルロ法による輸送コードであるEGS4(Electron Gamma Shower Version 4)を用いて、皮下組織に漏洩したTl-201から放出された放射線による皮膚組織内吸収線量分布を推定した。

線量推計における変数

- 漏洩時に線源の深さとその厚み。
- 皮下組織から消失する生物学的半減期。
- 漏洩した線源のZ軸(垂直面)の大きさ。
- 線量を推計する組織の皮膚面からの深さ。

EGS4による線量推計の仮定

- 人体の元素組成

C: 60%、H: 8%、O: 32%

(原子の数による構成割合)

- 人体の密度

1.9g/ cm³

- 皮膚の各組織の組成・密度は同じ

- 骨からの皮下組織への後方散乱はない

^{201}Tl から放出される放射線のエネルギーと放出割合の設定

■ 内部転換電子

0.03 MeV 0.06%

0.17 MeV 1.9%

■ γ (X)線

0.08 MeV 94%

0.01 MeV 46%

(蛍光収率を考慮しオージェ電子は無視)

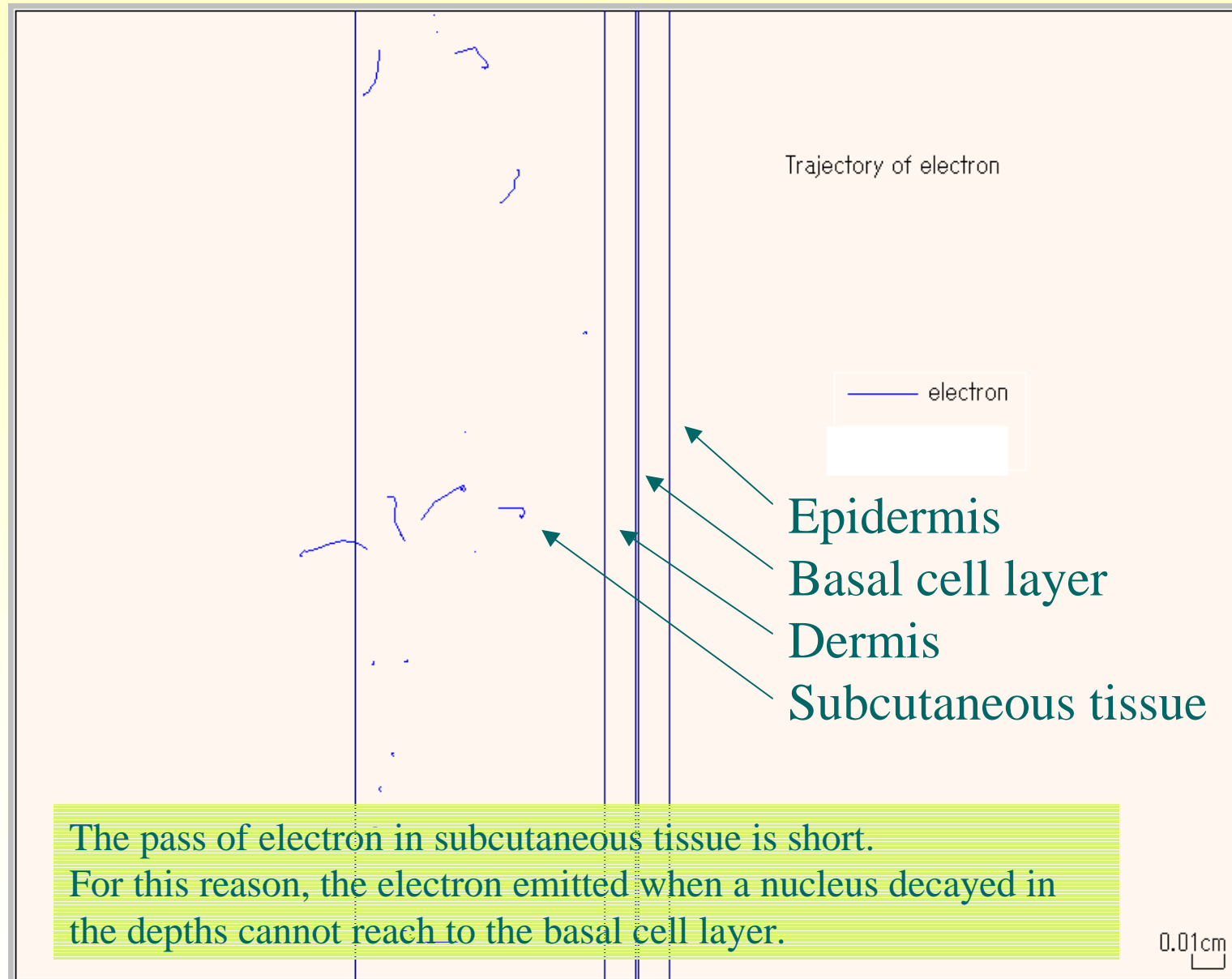


Fig. 2 Trajectory of electrons in the skin model

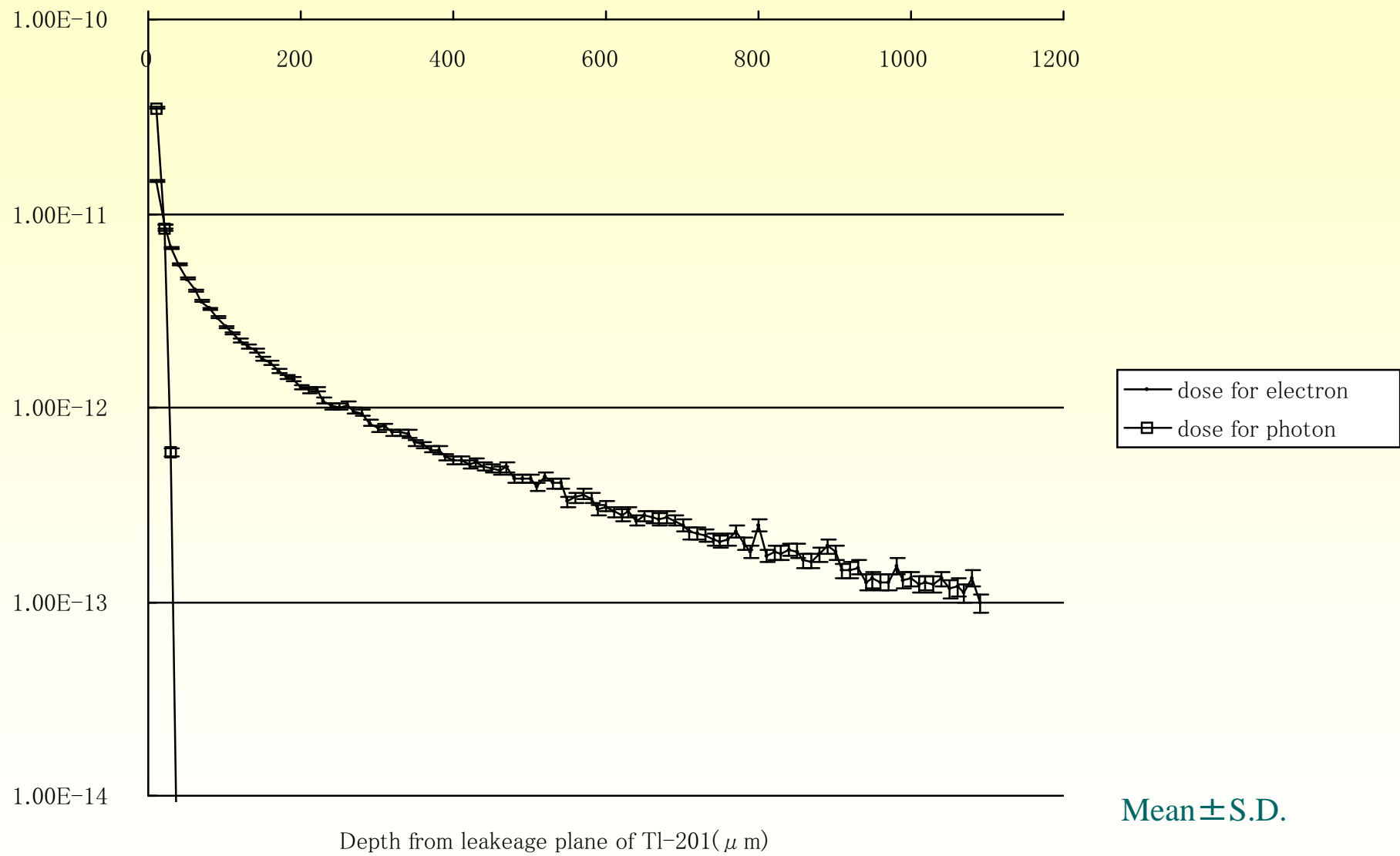


Fig.3 Absorbed dose distribution for Tl-201 (fixed source)

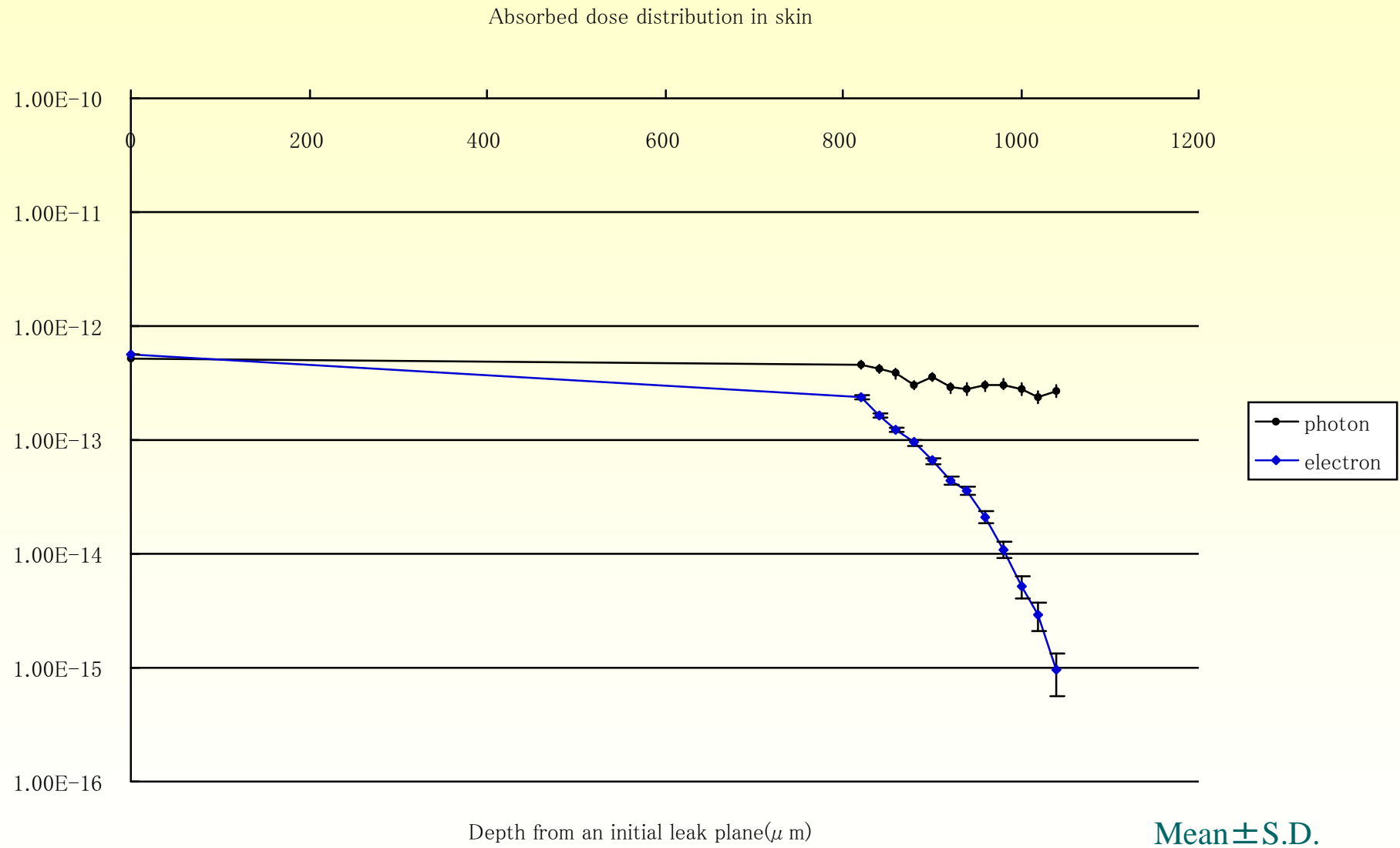


Fig.4 Absorbed dose distribution (source moves to dermis)

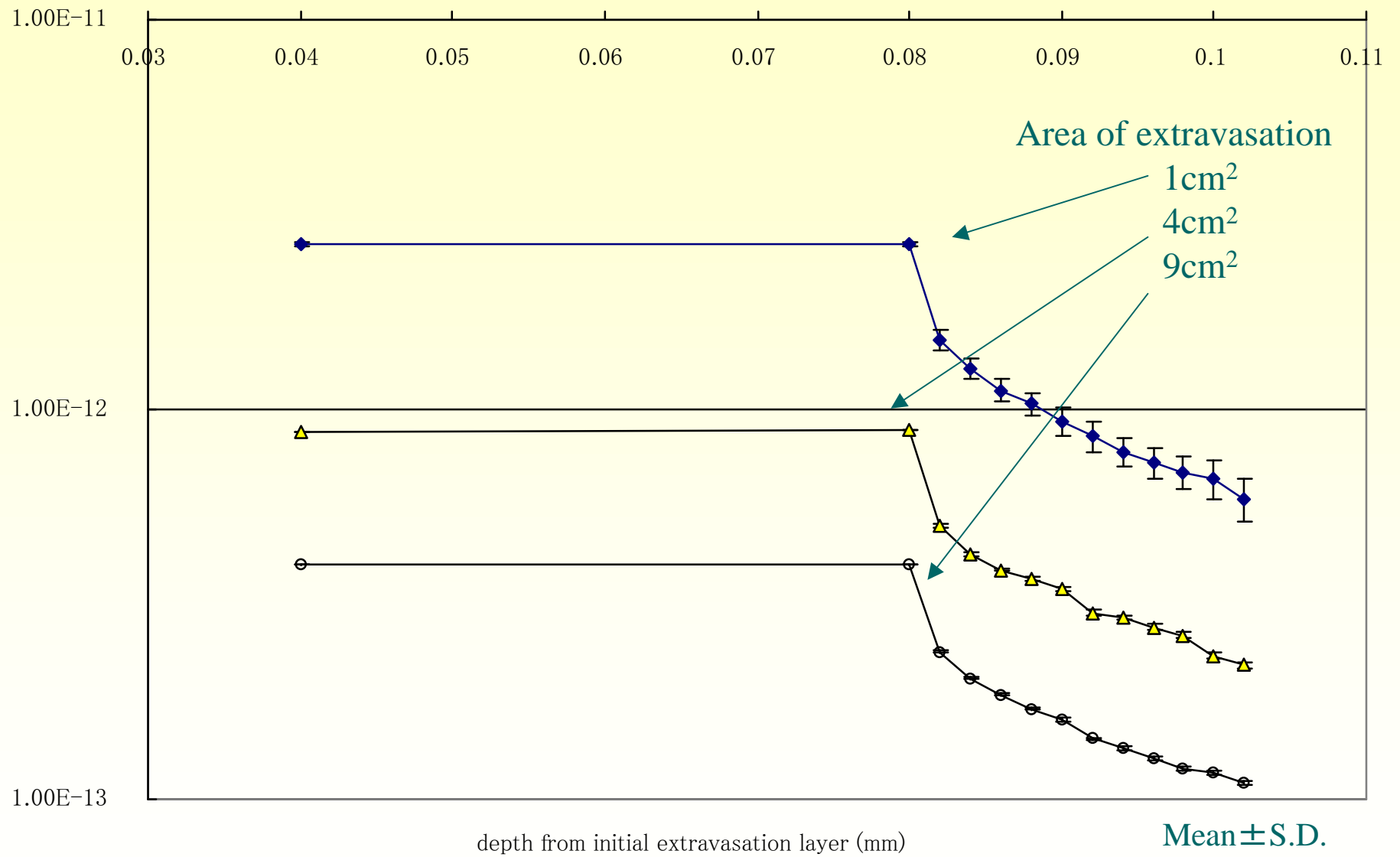


Fig.5 Absorbed dose distribution in skin model (thickness of extravasations: $800 \mu \text{ m}$)

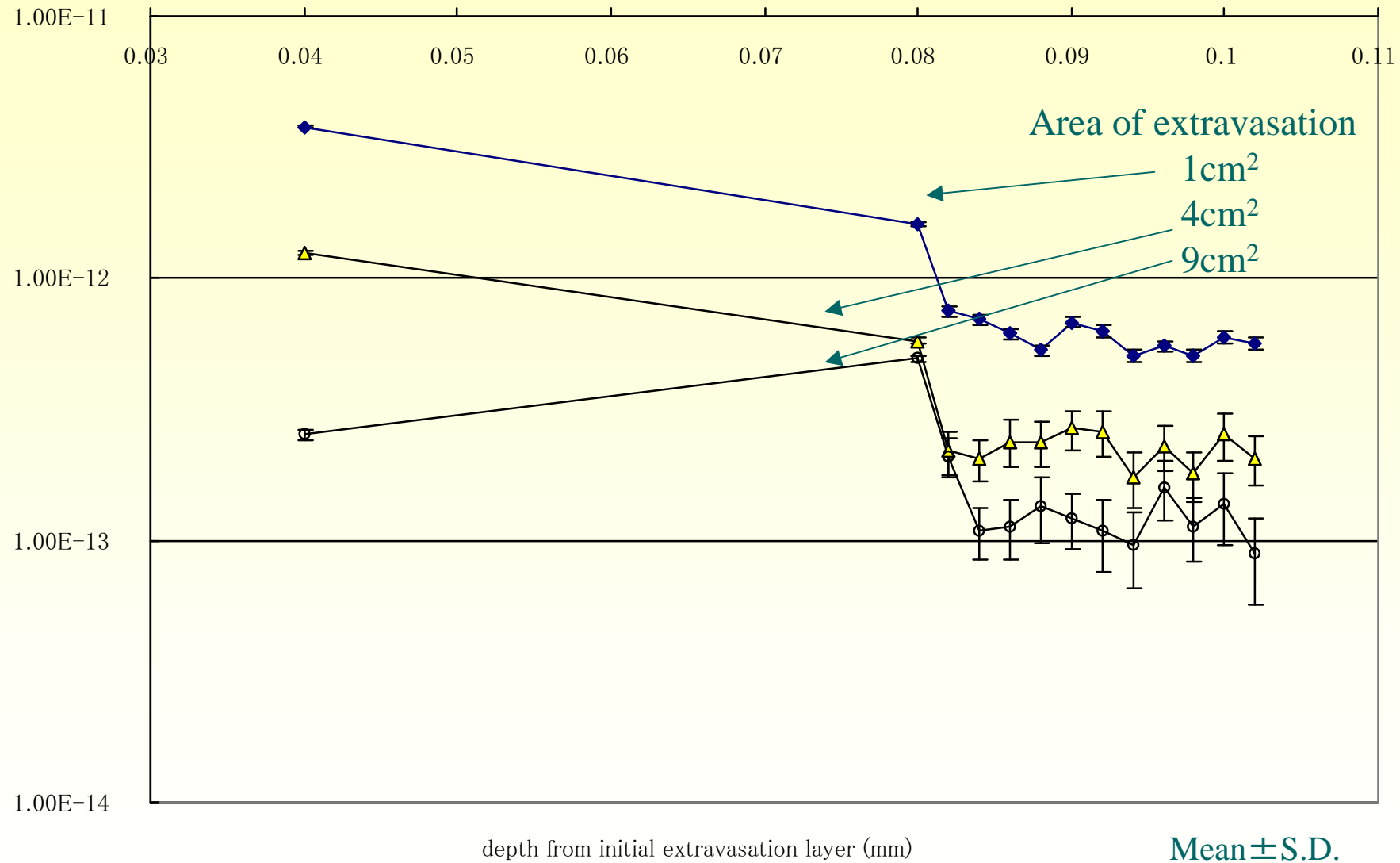


Fig.6 Absorbed dose distribution in skin model (thickness of extravasations: 500 μ m)

結果

- 皮下組織での²⁰¹Tlの総崩壊数を 3×10^{11} 回とすると（74MBq投与、有効半減期6時間）、基底細胞層の吸収線量は80 mGy程度と推定された。同様に、真皮における吸収線量は、1.2～0.1 Gy程度と推計された。
- ²⁰¹Tlから放出される放射線は比較的組織中の飛程が短く、このため、有棘細胞、真皮乳頭層、皮下組織の毛細血管には、より大きな線量を与えうる。
- 線源の移動により線源が接近する組織の吸収線量は増加する。

考察(漏洩の深さ)

- Tl-201から放出される電子は、100 μ m程度離れた部位の線量には、ほとんど影響を与えない。
- しかし、漏洩部位には放射線障害を起こしうる細胞が存在する。
- 線量推計の精度を高めるには、線量推計対象組織と線源との位置関係を明確にすることが重要と考えられる。

考察(線源の厚み)

- 漏洩時には生理食塩水をフラッシュするので線源はある厚みで存在する。
- 線源の厚みは、内部転換電子等の影響を考えない場合には、あまり影響を与えない。
- しかし、線源からの距離が短いと、内部転換電子の影響が相対的に大きくなる。

考察(有効半減期と線量推計)

- 組織内の有効半減期が長いと、組織内での総崩壊数が増大するため、線量が増加する。
- このため、組織内での放射性化合物の動態は線量の大きさに影響を与える。
- 心筋等での洗い出し像は、生体内でのRIの動態の情報を与えるため、皮下組織内実効半減期の推計に役立つと考えられる。
- さらに、バイオドシメトリーなどを行えばより詳細な情報が得られる可能性がある。

結論

- 皮膚モデルを作成し一定の条件下で皮下に漏洩した²⁰¹Tiによる皮膚の吸収線量を推計した。
- 過大に見積もっても、²⁰¹Tiの血管外漏洩による皮膚基底細胞の被ばく線量は、確定的影響の閾値を超えなかった。しかし、条件によっては、ある程度の線量を組織に与えるため、RI投与時には注意が必要であると考えられた。
- 皮下組織中での薬物動態に関する情報がより明らかになれば、変数やモデルをより精緻にし、皮膚に生じた傷が放射性物質に汚染した際などの被曝線量の推定の精度も高めるなど、より適切な治療法の選択に役立てることができると考えられる。