

博士論文

直腸温連続測定データに基づく死後経過時間推定法の乳幼児例における検討

東北大学大学院医学系研究科公衆衛生学専攻

公共健康医学講座法医学分野

猪狩 由

1. 要旨

背景：法医学実務において、死亡時刻推定は重要な課題の一つであり、100年以上前から様々な試みが為されている。現時点では、最適な方法は未確立であるものの、ある程度の有用性が認められた方法がいくつか報告されている。直腸温に基づく死後経過時間推定法は、その簡便さと客観性から実務でもよく用いられ、有用性も報告されているが、そういった報告の殆どが成人例を対象としており、乳幼児例について検討しているものは見られない。成人と乳幼児とでは体格差も大きく、成人での方法をそのまま乳幼児に当てはめることの適否は未だ明らかではないが、近年では乳幼児での事件性の疑われる解剖事例も散見され、より妥当性のある死後経過時間推定法が望まれている。

方法：当教室では2004年より、警察での検視の際に死体の直腸内にボタン型温度データロガーを留置し、また死体の足首にも同様の温度データロガーをゴムバンドで装着し、5分間隔で死体直腸温および死体周囲の環境温を測定して死後経過時間推定の実務に役立ててきた。今回、この直腸温・外気温連続測定データを基に、死亡時刻の絞り込める成人14例について、複数の方法を用いて死亡時刻を推定した。その上で、本研究で目的とする2歳未満の乳幼児例20例についても同様に死亡時刻を推定し、成人例と比較しつつ検討した。なお、大半の乳幼児解剖症例では明らかな死亡時

刻が不明であるため、本研究では独自に最終生存確認時刻から発見時刻までを「死亡時刻範囲」と定義し、この範囲と算出した死亡推定時刻とを比較した。さらに、実際の死亡時刻（成人例）または死亡時刻範囲（乳幼児例）と推定法による死亡推定時刻との差に影響を与える要因として、温度データロガーの肛門からの深さ、死亡（乳幼児例では発見）から直腸温測定開始までの経過時間、直腸温測定中の外気温の変化、更に乳幼児例では体表面積、および死亡時刻範囲の長さについて、相関の有無を検討した。死後経過時間推定法としては、①無限円柱モデルに基づいたシミュレーションプログラム（大野法）、②Henssge の式に基づいた二重指数関数近似プログラム（Henssge 法）、③Henssge 法を乳幼児用に改変した Henssge 法変法 A・B、④直腸温降下曲線法に基づく直線近似法（直線近似法）、の計 4 法を使用した。大野法および直線近似法は従来用いられてきた方法であるが、Henssge 法はそれらとは別の従来法を元に考案されたものであり、更にそれを今回新たに乳幼児用に改変したものが Henssge 法変法 A・B である。結果の評価のため、成人例では実際の死亡時刻と算出した死亡推定時刻との差を「時間差」と定義し、死亡推定時刻が実際の死亡時刻より前であればマイナスの符号を、後であればプラスの符号を付けて表した。乳幼児例では、死亡推定時刻が死亡時刻範囲内であれば「範囲内」とし、範囲外の場合は、死亡推定時刻が最終生存確認時刻より前であればその差を、発見時刻より後であればその

差をそれぞれ時間差と定義した。この場合も、前者にはマイナスの符号を、後者にはプラスの符号を付けて表した。

結果：成人 14 例での時間差の絶対値の平均は、大野法 82 ± 74 分、Henssge 法 97 ± 75 分、直線近似法 96 ± 61 分であった。また、大野法と直線近似法において、時間差の絶対値と直腸温測定開始までの経過時間に正の相関が見られた。乳幼児 20 例では、推算した死亡推定時刻のうち、死亡時刻範囲内となったものは大野法で 7 例、Henssge 法で 0 例、直線近似法で 6 例であり、死亡時刻範囲外となったものの時間差の絶対値の平均は、大野法で 83 ± 61 分、Henssge 法で 205 ± 74 分、直線近似法で 168 ± 129 分であった。一方で、Henssge 法変法 A では 6 例、Henssge 法変法 B では 8 例が死亡時刻範囲内となり、時間差の絶対値の平均は Henssge 法変法 A で 85 ± 60 分、Henssge 法変法 B で 77 ± 52 分となった。さらに、大野法では時間差の絶対値と直腸温測定開始までの経過時間および測定中の環境温の変化に、また Henssge 法変法 B では時間差の絶対値と温度データロガーの深さにそれぞれ正の相関が見られた。

考察：成人例では、大野法・Henssge 法・直線近似法の 3 法間で結果に大差はなく、かつ既存の報告と同等の結果が得られたが、乳幼児例では Henssge 法及び直線近似法で明らかに大幅な時間差が認められた。一方で、今回新たに考案した Henssge 法

変法 B では結果に最も大きな改善が見られた。Henssge 法、および Henssge 法変法 A・B では、直腸温測定中の死体の保管状況に応じた「補正因子」を考慮する必要があるが、本検討からは補正因子を Henssge らが文献中に示した値より大きく設定する必要があると考えられた。なお、直線近似法については、乳幼児例における直腸温降下を直線的に近似すること自体が不適切と考えられた。さらに、時間差を少なくするためには、直腸温測定用データロガーを死体発見後できるだけ速やかに、かつできるだけ深く死体直腸内に挿入することと、直腸温測定中の環境温をできるだけ一定に保つことが重要であると考えられた。

結論：2 歳未満の乳幼児例に対する死後経過時間推定法として、大野法および Henssge 法変法 B は実務に応用可能であると考えられる。ただし、算出した死亡推定時刻はあくまで目安であり、死亡状況等を考え合わせ、幅を持った時間帯として捉えることが重要である。

2. 研究背景

死亡時刻の推定は、かねてより法医学分野における重要な課題の一つである。犯罪が疑われる事例ではもちろんのこと、民事上でも相続などで死亡時刻が問題となる場合があり、できるだけ正確な死亡時刻の推定を目指して様々な試みが為されてきた。しかし、現在においても最適と認められる方法は未だ確立されていない。

現在、法医学で用いられている死亡時刻推定法は、死体现象の出現度合いに基づくものである。死体现象とは、死後に現れる物理的・化学的・生物学的変化の総称であり、死亡時刻推定に当たっては、死体の冷却・硬直・乾燥や、体液組成の死後変化などが指標とされてきた。これらのうち、死後の時間経過に伴う変化が計測可能なデータについては、計測値を時間変化のグラフに沿って初期値まで外挿して死後経過時間を推定する、というのがその基本原理である[1, 2]。中でも、死体の冷却に基づく推定法は、その簡便さと客観化(数値化)が可能なることから主流の一つを成している[2-4]。

死体の冷却とは、死後にエネルギー産生が停止することによって体温が周囲の環境温に向かって変化していく現象であり、通常は体温よりも環境温の方が低いために冷却が起こる。深部体温として直腸温を計測した場合、逆シグモイド曲線を描きながら降下していくことが知られている[4]。これは死亡直後からの体温低下が殆どない、ないしは比較的緩やかなプラトー相の後、ニュートンの冷却の法則に従って体温がほぼ

直線的に降下する段階を経て、環境温に近づくにつれて再びその勾配が緩やかとなる、
というものである[4] (図 1)。

直腸温から死後経過時間を推定する試みは従来から行われており、今までに様々な
方法が提唱されている[5, 6]。死体の冷却に関しての最初の科学的報告は 1830 年代で
あり、これは戦場で死亡した兵士の体温変化を観察したものであった。続いて 1868
年に、Rainy が初めて死体の冷却現象にニュートンの冷却の法則を当てはめて数学的
に解釈し[4-6]、この考えは、現在に至るまでの直腸温冷却モデルに大きな影響を与え
ている。20 世紀半ばに入り、1958 年に Fiddes と Patten が、死後の時間経過に伴う
ニュートン冷却の割合を標準化した[7]。これによると、外気温が一定であれば、少な
くとも 2 回の直腸温測定で死後経過時間を推定可能としているが、この方法では以下
に述べるプラトー相は含まれていない。

死亡直後の体温変化が殆どない、ないし比較的緩やかな段階を「プラトー」として
初めて定義したのは Shapiro であるが[8]、このプラトー相と、ニュートンの冷却の
法則に従う冷却相とから成る逆シグモイド曲線を数学的に解釈し、二重指数関数とし
て表したのが Marshall と Hoare である[9-11]。彼らの二重指数関数モデルは画期的
ではあったものの、式の煩雑さなどから実務には用いられなかったが、Henssge はこ
れに手を加える事によってノモグラム法を編み出した[12]。これは体重、環境温、死

体の状況などを図表に当てはめることによって死後経過時間を推定する方法であり、現在では最も実用的な方法の一つとされている[4]。また、この Henssge が表した式を元にして、後述する温度データロガーで得られた直腸温連続測定データを二重指数関数で近似するプログラムを金武らが考案した（私信）。なお、この方法のアルゴリズム及び成人例における有用性の検証は、井上幹康氏（早稲田大学大学院先進理工学研究科 応用化学専攻）による 2010 年度修士論文「直腸温連続測定による高体温死体に適用可能な死後経過時間推算法の開発」として提出されているが、この論文は一般には公開されておらず、また他の雑誌等への投稿もなされていない。よって、現時点では私信として引用せざるを得ず、本研究ではまず Henssge 法のアルゴリズムを明示し、改めて成人例での検証を行った上で、乳幼児例での妥当性を検討することとした。

一方、1958 年に電熱工学的なアプローチを発表したのが Sellier らであり、彼らは人体を長さ無限の円柱に模し、その熱力学モデルを死体の冷却に当てはめたが[13]、このモデルは実務に応用するには複雑すぎた。そこで平岩らは、無限円柱モデルの熱伝導方程式に既存の文献からの熱物性値を適用して、数値計算的に解く方法を報告した[14]。その後、それを基にしたコンピュータシミュレーションモデルを報告しており[15]、過去に当教室や沖縄県での実務に適用されていた[16]。そのプログラムは当

時の大型計算機用に FORTRAN でプログラムされており、一般的な利用は困難であったが、1990 年に大野らが C 言語に書き直したプログラムを発表し[17]、現在のパーソナルコンピュータでの利用が可能となった。

当教室での実務では、以前より直腸温降下曲線法を用いて死後経過時間を推定してきた[18]。これは、死体発見後できるだけ早期から直腸温をおよそ 1 時間ごとに 3 回以上測定し、それを自在曲線定規などで逆シグモイド曲線に近似して正常な直腸温の平均値とされる 37.2 °C まで外挿し、その時刻を死亡推定時刻とするものである。

2004 年までの直腸温測定法は、死体発見現場や霊安室で警察係官が、また解剖前に執刀医が、それぞれ別の温度計を直腸内に挿入してその都度計測するものであったが、得られた死亡推定時刻が実際の死亡時刻と明らかに異なっていたり、使用するデータによって大きなばらつきがあったりと、その精度や信頼性に疑問を持つ事が少なからずあった。そこで、その原因が測定法、つまり①別の測定者が、②別の温度計と、③別の環境で直腸温を測定し、しかも④測定は数回が限度である、という 4 点にあると考え、金武らはボタン型温度データロガーを用いた直腸温連続モニタリングを導入し、その信頼性が高い事を示した[19]。ここで用いた温度データロガーとは、元々は倉庫などでの食品温度管理などのために、自動的に一定間隔で温度を測定・記録するものである。これを直腸内に留置して直腸温を測定・記録させることで、上記①・②・④

の問題は解決される。得られた直腸温連続測定データは直腸温降下曲線として描き出され、これを逆シグモイド曲線に近似的に外挿することで死後経過時間の目安としてある。なお、この詳細と実際の運用については4-4.温度データロガーの項で述べる。

ところで、当教室では乳幼児例においても成人例と同様の方法で直腸温を測定し、死後経過時間推定の目安としてきた。乳幼児解剖症例は、就寝中の死亡例が殆どであり、明らかな死亡時刻が不明な場合が大半であるものの、保護者などが頻りに様子を見ているため、最終生存確認時刻から発見時刻までの間隔が短い傾向にある。実務上は、この最終生存確認時刻から発見時刻までの間と、直腸温から導き出した死亡推定時刻とを比較し、もし両者が大きく異なる場合には、前者を優先して死亡推定時刻を判断している。しかし、そもそも乳幼児例を成人例と同様に扱う事の適否については未だ明らかではなく、乳幼児例における直腸温に基づいた死後経過時間推定法を、実際のデータから検討した報告はこれまでに為されていない。その一方で、近年では乳幼児虐待など犯罪性の疑われる解剖事例も散見され、より妥当性のある死後経過時間推定法が望まれている。

そこで本研究では、2歳未満の乳幼児解剖症例において、直腸温連続測定データを基に、①無限円柱モデルに基づいたシミュレーションプログラム（大野法）、②Henssgeの式に基づいた二重指数関数近似プログラム（Henssge法）、③Henssge法

を乳幼児用に改変した Henssge 法変法 A・B、④直腸温降下曲線法に基づく直線近似法（直線近似法）、の 4 法を用いて死後経過時間を推定し、その結果を成人例と比較しつつ検討した。

3. 研究目的

本研究の目的は、2歳未満の乳幼児症例における直腸温連続測定データに基づいた死後経過時間推定法、即ち、①無限円柱モデルに基づいたシミュレーションプログラム(大野法)、②Henssgeの式に基づいた二重指数関数近似プログラム(Henssge法)、③Henssge法を乳幼児用に改変したHenssge法変法A・B、④直腸温降下曲線法に基づく直線近似法(直線近似法)、の妥当性及び問題点を、成人例と比較しつつ検討する事にある。

4. 研究方法

4-1. 症例

本研究では、2009年1月から2014年12月に東北大学大学院医学系研究科法医学分野で行われた法医解剖合計2141症例のうち、以下の条件に合致する成人14例、乳幼児20例を対象とした（表1・2）。なお、乳幼児例では2歳未満であることを選択条件としているが、これは当教室での小児の解剖例のほとんどが2歳未満の乳幼児例であり、かつ2歳以上の症例では死因が溺水等で本研究には不適当なものが多かったためである。また、成人例・乳幼児例共に溺水例が1例ずつあるが、最終生存から発見までの時間が短時間であり、直腸温に影響は無いと考え除外しなかった。さらに、乳幼児例の症例2・15・16・17は剖検時にRSウイルス簡易検査（クイックナビTM-Flu+RSV; デンカ生研株式会社, 東京）で陽性反応を示し、症例10・11は解剖から何らかの感染症が疑われたが、いずれも最終生存時に特に発熱を示唆する根拠が無かったため除外しなかった。

4-1-1. 成人例（表1）

選択条件)

- ・ 病院死亡例、または目撃情報のある即死例など、死亡時刻が明らかなもの。

- ・死体直腸温が環境温と平衡に達する前に温度データロガーが挿入されており、かつ死体用冷蔵庫に保管する前に 2 時間以上、霊安室の室温で安置してあるもの。
- ・解剖前 CT を撮影しており、死体腰囲および温度データロガーの肛門からの深さが計測可能であるもの。

除外条件)

- ・死因が頭蓋内病変あるいは炎症性疾患であるもの。(死亡時に高体温であった可能性があるため。)
- ・火災や寒冷などの極端な外気温に暴露されたもの。
- ・温度データロガー挿入時の直腸温が 37.2 °C 以上であったもの。
- ・温度データロガー挿入直後から死体用冷蔵庫で冷却されたもの。

4-1-2. 乳幼児例 (表 2)

選択条件)

- ・ 2 歳未満の乳幼児
- ・最終生存確認から心肺停止状態で発見されるまでが 6 時間以内であるもの。
- ・死体直腸温が環境温と平衡に達する前に温度データロガーが挿入されており、かつ死体用冷蔵庫に保管する前に 2 時間以上、霊安室の室温で安置してあるもの。

- ・解剖前 CT を撮影しており、死体腰囲および温度データロガーの肛門からの深さが計測可能であるもの。

除外条件)

- ・温度データロガー挿入時の直腸温が 37.2 °C 以上であったもの。
- ・温度データロガー挿入直後から死体用冷蔵庫で冷却されたもの。

4-2. CT 機器

解剖前 CT 撮影は 8 列マルチスライス CT (Aquilion 8; 東芝メディカル株式会社, 東京) を用いて行った。

4-3. 画像操作

CT データは Digital Imaging and Communications in Medicine (DICOM) 規格で三次元ワークステーション (Ziostation2 ver. 2.1.5.0; ザイオソフト株式会社, 東京) に送信され、このワークステーション上で腰囲および肛門から温度データロガーまでの距離を測定した。なお、腰囲は CT 体脂肪測定ソフトウェアを用いた自動計測であり、肛門から温度データロガーまでの距離は冠状断で直線距離を測定した。

4-4. 温度データロガー

4-4-1. 仕様 (図 2)

温度データロガーとは、自動で定期的に温度データを採取し、メモリー内に保存する装置である。本研究ではボタン型温度ロガー (温度ロガー3650; 日置電機株式会社, 上田) を使用した。

形状はボタン形電池と同様の円盤状で、直径 17.35 mm・厚さ 5.89 mm・重量 3.3 g と小型で直腸内に留置可能である。装置内にセンサ・メモリ・時計・電源を内蔵しており、予め設定した時間間隔 (1 分～255 分) で温度を分解能 0.5 °C で測定する。装置内に最大 2048 個のデータが保存可能であり、上書きモードに設定すると、2049 個目のデータが 1 個目のデータに上書きされ、以後これが繰り返される。当分野では、5 分間隔・上書きモードに設定しているが、この場合、直近約 1 週間分の温度データが保存される。保存されたデータは、専用のデータリーダー (データリーダー 3920; 日置電気株式会社, 上田) を介してコンピュータに転送・回収される。

4-4-2. 運用

温度データロガーは 2 個 1 組で当分野から宮城県下の全警察署に配布されており、一方は直腸温測定用、もう一方は環境温測定用である。直腸温測定用のデータロガー

は、①ラテックス手袋の先端部に入れ、②用手的に示指の深さまで死体直腸内に挿入する。環境温測定用は予め製品付属のホルダーにセットしており、③これを死体足首に装着する（図 3）。各署には、以上①～③を現場係官が死体発見後できるだけ早期に実施するよう指示を出している。

直腸温測定用データロガーは解剖時に直腸内から回収し、環境温測定用データロガーと共にデータリーダを介してコンピュータ上にデータを転送後、専用ソフト（日置温湿度記録システム ver.3.5.6; 日置電気株式会社, 上田）を利用して温度降下曲線グラフを描き出す。

死亡時に異常な高・低体温が無いこと、死亡から直腸温測定開始までの環境温と直腸温測定中の環境温とに大差が無いこと、温度データロガーが直腸内に完全に挿入されていることを前提とし、得られた直腸温下降曲線を逆シグモイド曲線に近似的に外挿し、正常な直腸温の平均値とされる 37.2 °Cとの交点を求めることで、死亡時刻の推定が理論的には可能となる（図 4）。

4-4-3. データの選択

測定データをコンピュータに転送すると、直腸温・環境温の 2 つのグラフが描き出される。本研究で使用するデータは、以下に述べる方法で区間を選択した。

まず、直腸温測定用データロガーが直腸内に挿入されると、記録されている温度がそれまでの外気温から急激に上昇する。挿入直後は温度が変動するものもあるため、温度が安定した後、できるだけ挿入時刻に近い点を測定開始点（第1点）として選択した（図5）。

測定終了点（第2点）は、環境温の変化を目安とした。温度データロガー挿入後の死体は、数時間は霊安室の室温にて安置した後、冬季を除いて死体用冷蔵庫で保管される。よって、環境温が急激に低下する前で、そのうち第1点からできるだけ離れているものを第2点として選択した（図5）。一方、冷蔵庫に入れたことを示唆する明らかな外気温の低下が見られないものについては、直腸温測定用データロガーが解剖時に直腸内から取り出された点を第2点とした（図6）。この場合、取り出された時点で直腸温測定用データロガーに明らかな温度変化があるため、判別可能である。また、死体の搬送の際に環境温が大きく変化した場合には、その変化直前を第2点とした（図7）。

4-5. 死後経過時間推定プログラム

使用するプログラムは、C++Builder XE3（エンバカデロ・テクノロジーズ、東京）を使用して作成した。

4-5-1. 無限円柱モデルに基づいたシミュレーションプログラム（大野法）

無限円柱モデルとは、人体を均一な長さ無限の円柱に模し、円柱内での上下方向の熱移動がないと仮定したものである。この場合、皮膚を介した横方向の熱移動のみを考えればよく、熱の移動は以下の式で表される[13]（図 8）。

$$a \left(\frac{\partial^2 v}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial v}{\partial r} \right) = \frac{\partial v}{\partial t} \quad (1)$$

$$v = V \text{ (constant)} \quad (2)$$

$$-k \frac{\partial v}{\partial r} = hv \text{ (r = R)} \quad (3)$$

a: 温度拡散率, v: 温度, V: 初期温度, r: 半径方向の位置

t: 時間, k: 熱伝導率, h: 熱伝達率, R: 半径

(1)式は円柱内の温度を表現しており、(2)式は初期条件（円柱内は初期温度 V で均一である）を表し、(3)式は熱が皮膚表面から外気へ出て行くときの式である。この式

を解き、温度拡散率 a には既存の値を、半径 R には腰囲を測定したものを、初期温度 V には正常人の直腸温の平均値として 37.2 °Cを代入する。熱伝達率 h は熱が皮膚表面から外気中に移動するときのパラメーターであり、死体が置かれた状況によって大きく異なる。よって規定の値を代入する事はできないが、直腸温を2回測定する事で、その2点を通るような適切な値 h を決定するプログラムが考案された[14, 15]。本研究ではそれを C 言語で書き直したものを使用した[17]。

プログラムの実行には、直腸温2点、環境温、腰囲の計測が必要である。直腸温は、「4-4-3. データの選択」の条件に則って決定された第1点・第2点を選択した。環境温は、2点間の平均値とした。腰囲は、解剖前 CT 画像を元に、ワークステーション上で体脂肪測定ソフトウェアを使用し自動測定した (図 9)。

4-5-2. Henssge の式に基づいた二重指数関数近似プログラム (Henssge 法)

直腸温降下の逆シグモイド曲線において、冷却の比率 (Q) を二重指数関数で表したものが以下の式(4)であり、右辺の第一項がニュートン冷却を表し、第二項がプラト一相を表している[9-11] (図 10)。

$$Q = \frac{T_r - T_a}{T_0 - T_a} = A \times \exp(B \times t) + (1 - A) \times \exp\left(\frac{A \times B}{A - 1} \times t\right) \quad (4)$$

T_r : 直腸温 (逆シグモイド曲線上の任意の測定値), T_0 : 死亡時の直腸温,

T_a : 環境温 (測定期間中一定であることを前提とする), $A \cdot B$: 定数, t : 時間

この式に対し、Henssge は死体の観察から、 $T_a \leq 23$ °Cの時はプラト一相の指数が冷却相の指数の 5 倍であるとし、 $A=1.25$ とおいた。さらに、 $T_a \geq 23$ °Cの時はプラト一相の指数が冷却相の指数の 10 倍であるとし、 $A=1.11$ とおいた。これによって(4)式は以下のように書き換えられる[12]。

$$Q = \frac{T_r - T_a}{37.2 - T_a} = 1.25e^{Bt} - 0.25e^{5Bt} \quad (T_a \leq 23) \quad (5)$$

$$= 1.11e^{Bt} - 0.11e^{10Bt} \quad (T_a \geq 23) \quad (6)$$

また、式(5)(6)の定数 B はニュートンの冷却定数であり、補正因子 (corrective factor)

C を用いて以下のように表した[12]。

$$B = -1.2815(C \times kg)^{-0.625} + 0.0284 \quad (7)$$

補正因子 C とは、被服や外環境などの死体の置かれた状況によって決まる値であり、「裸・無風・強い熱放射源がない」という定常状態で $C=1$ となる。熱の放散に関して、死体が外界から孤立するほど C の値は大きくなり、これを実体重に乗じる事で補正を行う（表 3）。さらに、Henssge は補正因子が 1.4 以上となるような、より外界から孤立した状態では、体重の少ない者にはより大きな補正因子が、体重の大きい者にはより小さな補正因子が必要となることを指摘しており、後にその補正值を報告した[20]（表 4）。

式(5)(6)(7)を基にして、連続測定した直腸温の降下率を二重指数関数で近似することで死後経過時間を推算するプログラムが金武らにより考案された（金武，私信）。なお、このプログラムは井上幹康氏（早稲田大学大学院先進理工学研究科 応用化学専攻）による 2010 年度修士論文「直腸温連続測定による高体温死体に適用可能な死後経過時間推算法の開発」として提出されているが、これは一般には公開されておらず、他の雑誌等への投稿もなされていないため、以下にその詳細を示す。

このプログラムでは、直腸温測定中の死体が置かれている状態を補正因子 $0.7 \leq C \leq 1.3$ と仮定し、以下の式(7)が得られる。

$$-1.2815(0.7 \times kg)^{-0.625} + 0.0284 \leq B \leq -1.2815(1.3 \times kg)^{-0.625} + 0.0284 \quad (7)$$

推算アルゴリズムは以下の手順による。

- ① 式(5)(6)の左辺に測定した直腸温 T_r と環境温 T_a を代入し、直腸温の降下率 Q を求める。なお環境温 T_a は測定期間中の平均値で一定とする。
- ② 死体体重を式(4)に代入し、ニュートンの冷却定数 B の制約条件を求める。
- ③ ①で求めた Q と、式(5)(6)の右辺の誤差の二乗の総和が最小となるような B と死後経過時間 t を試行錯誤法で推算する。

プログラムの実行には、直腸温連続測定データ、環境温、体重が必要である。直腸温は「4-4-3. データの選択」に則って推算区間を設定し、環境温はその区間中の平均値とした。入力した直腸温の実測値と近似曲線は、フリーソフト **Gunplot** でグラフ化され表示される。

なお、一般に法医学実務においては、直腸温測定中の死体の保管状況は、「裸にした上で、ブランケット等で全身を覆う」というものであり、補正因子は概ねこの範囲で妥当であると考えられる。さらに、補正因子が 1.4 未満であるような環境では、補正因子は体重に依存しないため、理論的には体重に関わらずこのプログラムを当てはめる事

が可能である。よって、成人例・小児例ともにこのままプログラムを実行することとした。

4-5-3. Henssge 法を乳幼児用に改変した Henssge 法変法 A・B

4-5-2 に示した Henssge 法では、補正因子を $0.7 \leq C \leq 1.3$ に設定しているが、これを改変し、補正因子の上限値を自由に設定できるようにした。

$$-1.2815(0.7 \times kg)^{-0.625} + 0.0284 \leq B \leq -1.2815(C \times kg)^{-0.625} + 0.0284 \quad (7'')$$

プログラムを起動し、設定したい補正因子の上限値を入力すると、式(7'')右辺の C にその値が代入され、ニュートンの冷却定数 B の制約条件が定まる。これ以外は Henssge 法と同様のアルゴリズムで死後経過時間が推算される。

なお、補正因子が 1.4 以上となるような環境では、体重に応じた補正因子が必要となる (表 4)。本研究では、式(7'')右辺の C に対し、表 4 に示した体重別の補正因子のうち中間の値を代入したものを Henssge 法変法 A、最大値を代入したものを Henssge 法変法 B とした。

4-5-4. 直腸温降下曲線法に基づく直線近似法（直線近似法）

当分野ではこれまで、温度データロガーにより得られた直腸温降下曲線グラフを外挿する際に、フリーハンドや自在曲線定規を用いてきた。具体的には、ニュートンの冷却の法則に従ってほぼ直線的に直腸温が降下している部分を、その傾きのまま 37.2℃に近づくまで直線的に外挿し、37.2℃に近づくにつれてその傾きを小さくし、プラトー相とするものである（図 4）。この方法には、プラトー相をどの程度取るか、直線部の傾きをどの程度にするか、など主観的な手法が多く含まれる。よって本研究を行うに当たって、この方法を客観的に再現するため、最小二乗法による直線近似プログラムを作成した。

このプログラムは、温度データロガーで記録した直腸温連続測定データのうち、第 1 点と第 2 点を決定すると、最小二乗法によりその区間の近似直線を表示するものである。

プログラムを起動し、温度データロガーのデータファイルを開くと、温度を縦軸、日付・時刻を横軸とする直腸温・環境温の降下曲線が表示される。そのうち、「4-4-3. データの選択」に則って第 1 点・第 2 点を決定すると、近似直線が表示される。表示された近似直線と 37.2℃との交点の時刻を死亡推定時刻とする（図 11）。ただし、この方法ではプラトー相が含まれていないことを前提としている。

4-6. 評価法

成人例では、それぞれのプログラムで推算された死亡推定時刻と、実際の死亡時刻との差を時間差とした。

乳幼児例では、涕泣中に突如虚脱した 1 例以外は就寝後暫くしてから心肺停止状態で発見されたものであり、明らかな死亡時刻が不明である。よって、最終生存確認時刻から発見時刻までを「死亡時刻範囲」と定義し、推算した死亡推定時刻がその範囲外にあるものについては、死亡推定時刻と最終生存確認時刻あるいは発見時刻との差を、それぞれ時間差とした（図 12）。

なお、死亡推定時刻が成人例での死亡時刻、ないし乳幼児例での死亡時刻範囲以前の場合は「マイナス〇〇分」、実際の死亡時刻ないし死亡時刻範囲以降の場合は「プラス〇〇分」と表した。

成人例では時間差の絶対値の平均を求め、乳幼児例では死亡時刻範囲外であったものに関して、その時間差の絶対値の平均を求めた。次に、時間差の絶対値と、①直腸温計測用温度データロガーの肛門からの深さ、②死亡時刻（成人例）または発見時刻（乳幼児例）から直腸温測定開始時刻までの経過時間、③直腸温測定中の環境温の変化、さらに乳幼児例では④体表面積、および⑤死亡時刻範囲の長さ、についてそれぞれ

れスピアマンの順位相関係数を求め、有意性の検定を行った。なお本研究では、P 値が 5%以下の場合に統計学的に有意であると判断した。統計学的解析は統計ソフト R (version 3.2.1; R Foundation for Statistical Computing) を用いた。その際、乳幼児例で死亡時刻範囲内であったものは時間差 0 として統計処理した。また、乳幼児の体表面積は以下の式により求めた[21]。

$$0 \text{ 歳代 : } BSA=W^{0.473} \times H^{0.655} \times 95.68$$

$$1 \text{ 歳代 : } BSA=W^{0.423} \times H^{0.362} \times 381.89$$

BSA: 体表面積 (cm²) , W: 体重 (kg) , H: 身長 (cm)

5. 結果

5-1. 成人例

それぞれの推算プログラムにおける時間差の絶対値の平均は、大野法で 82 ± 74 分、Henssge 法で 97 ± 75 分、Henssge 法変法 A・B で 93 ± 67 分、直線近似法で 96 ± 61 分であった (表 5)。

時間差の絶対値と測定開始までの経過時間には、大野法で $r_s = 0.67$ ($p < 0.05$)、直線近似法で $r_s = 0.56$ ($p < 0.05$)の正の相関が見られたが、Henssge 法及び Henssge 法変法 A・B では相関は見られなかった。また、時間差の絶対値と温度データロガーの深さ・測定中の環境温の変化ではいずれの方法でも相関は見られなかった (表 6)。

大野法では、プログラムエラーとなりシミュレーション結果が得られないものが 3 例あり、大野法の統計解析はその 3 例を除いて行った。また、成人例では Henssge 法変法 A、B 間で結果は不変であり、表 5・6 ではまとめて表記した。

5-2. 乳幼児例

死亡時刻範囲 (平均 140 ± 100 分) に対し、死亡推定時刻が死亡時刻範囲内であったものは、大野法で 7 例、Henssge 法で 0 例、直線近似法で 6 例であり、死亡時刻範囲外となったものは、大野法で 12 例 (時間差の絶対値の平均 83 ± 61 分)、Henssge

法で 20 例（時間差の絶対値の平均 205 ± 74 分）、直線近似法で 13 例（時間差の絶対値の平均 168 ± 129 分）であった。一方で、Henssge 法変法 A では 6 例、Henssge 法変法 B では 8 例が死亡時刻範囲内となり、死亡時刻範囲外となったものは、Henssge 法変法 A で 14 例（時間差の絶対値の平均 85 ± 60 分）、Henssge 法変法 B で 12 例（時間差の絶対値の平均 77 ± 52 分）、であった（表 7）。

時間差の絶対値と温度データロガーの深さには、Henssge 法変法 B で $r_s = 0.52$ ($p < 0.05$) の正の相関が見られた。時間差の絶対値と測定開始までの経過時間には、大野法で $r_s = 0.52$ ($p < 0.05$)、Henssge 法で $r_s = 0.63$ ($p < 0.05$)、直線近似法で $r_s = 0.68$ ($p < 0.05$)、の正の相関が見られた。時間差の絶対値と測定中の環境温の変化では、大野法で $r_s = 0.71$ ($p < 0.05$)、Henssge 法で $r_s = 0.48$ ($p < 0.05$) の正の相関が見られた。時間差の絶対値と死亡時刻範囲の長さには、Henssge 法で $r_s = -0.77$ ($p < 0.05$)、直線近似法で $r_s = -0.53$ ($p < 0.05$) の負の相関が見られた。時間差の絶対値と体表面積では、いずれの方法でも相関は見られなかった（表 8）。

なお、大野法でプログラムエラーとなりシミュレーション結果が得られないものが 1 例、直線近似法で温度データロガー間での時間のずれからプログラムが実行できないものが 1 例あり、これら 2 法の統計解析の際はそれぞれその 1 例を除いて行った。

6. 考察

6-1. 成人例

死体の直腸温に基づいて死後経過時間を推定する際には、着衣や周囲の気温の変化といった死体を取り巻く条件の変化が大きな障害となる。近年の警察の捜査方針により、死体の検視・検案は発見現場ではなく警察署に移送後に行われるため、死体を発見現場で発見状態のまま数時間放置して直腸温を測定するのは困難である。よって直腸温測定中の条件と、死亡から測定開始までの条件とが変化する事は事実上不可避であり、実務上は温度データロガーを死体直腸内に挿入後暫く霊安室の室温で保管することで、発見現場とその室温に大差は無いという前提の下に死後経過時間を推定せざるを得ない。よって、求めた死亡推定時刻には大なり小なりの誤差が含まれている事を常に念頭におかねばならず、逆に言えば分単位で死亡時刻を推定することは、現時点で法医が目標とするところではない。

ところで、本研究の中で死後経過時間推定法として用いた大野法は、成人例ではその有用性が報告されている[16, 22, 23]。今回の成人例の検討でも、プログラムエラーとなりシミュレーション結果が得られないものが3例あったものの、その他の症例における時間差の絶対値の平均は約80分であり、改めてその有用性が示された。

Henssge法および直線近似法も、その基礎となる方法論は既に確立されたものであり、

今回の検討でも成人例での時間差の絶対値の平均はともに 90 分前後と、大野法と大差無い結果となった。そこでこれらの死後経過時間推定法を用いて、今回の研究の主目的である、乳幼児の直腸温連続測定データによる死後経過時間推定の可能性を検証した。

6-2-1. 乳幼児例における大野法

まず、大野法を試行したところ、死亡時刻範囲内が 7 例、範囲外が 12 例であり、その 12 例の時間差の絶対値の平均は 83 ± 61 分(最大 180 分、最小 10 分)であった。乳幼児例での時間差は「死亡時刻範囲」を以て評価せざるを得ないため、成人例との単純な比較はできない。しかし、成人例での時間差の絶対値の平均が 82 ± 74 分であることを踏まえると、症例によるばらつきはあるものの、今回の「死亡時刻範囲」を「死亡時刻」とみなす限りにおいては概ね許容範囲内と思われる。

大野法の根拠となる無限円柱モデルにおいて、冷却曲線への影響が最も大きいパラメーターは半径であり[13]、また熱物性値に関して死体の体型を考慮する必要は無いことが示されている[24]。つまり、標準体型や肥満体型といった死体の内部構造の相違は冷却曲線に影響せず、骨盤部の断面積が同じであれば冷却曲線に差はないということである。言い換えれば、大野法では死体の腰囲を正しく測定することができれば、

比較的正しい冷却曲線が得られるということであるが、このことは、本法で乳幼児例での時間差が成人例に比べて大きく逸脱していない理由の一つと考えられる。もちろん、大野法では環境温が一定であることが前提であり、本研究では外気温は測定期間中の平均値で一定であるとしてプログラムを実行しているが、実務では外気温の変化を免れ得ないため、死亡推定時刻に差が生じることは避けられない。さらに、外気温の変化が 2 °C 以内であれば殆ど影響しないとの報告もあるが[14]、環境温が変化する場合、小児では腰囲が小さいため、よりその影響を受けやすい可能性が指摘されている[25]。本研究でも、直腸温測定中の環境温の変化と大野法での時間差の絶対値の間には、成人例では相関が無かったのに対し、乳幼児例では $r_s = 0.71$ ($p < 0.05$) の正の相関が見られた。また、大野法では成人・乳幼児例共に死亡時刻または発見時刻から直腸温測定開始までの経過時間と時間差の絶対値との間に正の相関が見られたが、これは測定開始第 1 点は死亡時刻に近い方がよいとする過去の報告と一致する[16, 26]。測定終了第 2 点に関しては、できるだけ第 1 点から離れて取るのがよいとするものと[16]、測定間隔が長ければ良いとは限らないとする報告とがあり[26]、また外気温が大きく変化する場合は第 1 点の直後に取った方がよいとするものもある[25]。ここに我々が温度データロガーで直腸温と共に外気温も連続測定する利点があり、外気温が急激に変化するような場合はその直前を第 2 点とすることや、外気温が緩徐ではある

が大きく変化するような場合はそのことを念頭に置いてプログラムを実行することが重要と考える。

6-2-2. 乳幼児例における Henssge 法および Henssge 法変法 A・B

次に、Henssge 法について考察する。今回の研究ではまず、補正因子を $0.7 \leq C \leq 1.3$ とする金武らのプログラムを用いて成人例を検討したところ、時間差の絶対値の平均 97 ± 75 分という結果が得られた。これは大野法と比較しても大差無いものであり、補正因子を $0.7 \leq C \leq 1.3$ に設定することは概ね妥当と考えられた。先にも述べたが、補正因子 C とは、被服や外環境などの死体の置かれた状況によって決まる値であり、1.4 未満の環境では体重に依存しない。法医実務においては、成人例と乳幼児例で捜査機関内での死体の保管状況はほぼ同じであり、理論的には体重に関わらずこのプログラムを当てはめることが可能である。よって、乳幼児例でも同法を施行したところ、全例で死亡時刻範囲外となり、しかも時間差の絶対値の平均 205 ± 74 分と大幅な差が生じた。これは乳幼児例における大野法の平均を大きく上回るものである。

そもそも同プログラムでは、試算結果と同時に直腸温の実測値と近似曲線のグラフが表示されるが、乳幼児例では $0.7 \leq C \leq 1.3$ という条件下ではこの近似曲線が実測値から大きくかけ離れていることが分かった (図 13)。よって本研究では C の上限値を

自由に設定できるようにプログラムを改め、体重別の補正因子のうち中間の値（Henssge 法変法 A）と最大値（Henssge 法変法 B）を代入して新たな検討を行ったところ、Henssge 法変法 B とした時に死亡時刻範囲内が 8 例、範囲外 12 例の時間差の絶対値の平均が 77 ± 52 分と顕著な改善が見られ、乳幼児例における大野法とほぼ同等の結果が得られた（図 13）。

補正因子が各体重の最大値となる状況とは、「羽毛布団などで体が覆われる」ものである[20]。これは法医学実務における死体の保管状況が「裸にした上で、ブランケット等で全身を覆う」ものであるのに対し、死体の外界からの孤立の度合いを実際より大きく評価したものと言える。そもそも乳幼児は体重当たりの体表面積が成人より大きく、外気温の影響をより受けやすい[27]。そのため、「より外界から孤立した状態では、体重の少ない者にはより大きな補正因子が必要[12]」となり、Henssge らはダミーを用いた実験によって表 5 の補正因子を導いたが、本研究からは、実際の乳幼児例の直腸温降下においては、表 5 に示したものよりも熱の遮断の影響がより大きくなる可能性が示唆された。一方で、ブランケットをかけるにしても、乳幼児は体が小さいため二重にくるまれていた、といった単純な条件の違いの可能性も残る。乳幼児例は解剖数自体が少なく、今回は過去の症例のデータを基に検討を行ったが、条件を揃えた上での前向き研究が今後の課題であると考えられる。

ところで、Henssge らはノモグラム法での結果が誤りとなるリスクを減らすために、いくつかの提案をしている[28]。その一つに「補正因子を単一の値ではなく、幅のある値として捉える」ことを挙げているが、今回我々が使用した Henssge 法は、そもそも補正因子を範囲として捉え、上・下限を設定した上でプログラムを実行するものである。この補正因子の範囲の設定については上述の通り、乳幼児例では上限値を各体重における補正因子の最大値とした Henssge 法変法 B で最も良い結果が得られた。一方で成人例では結果はほとんど改善せず、一概に補正因子の範囲を広く設定すれば良い訳ではないと考えられる。実際の状況より大きな補正因子を適用すると死後経過時間を過大に見積もる可能性があるとした報告もあり[29]、現時点では成人例では通常の Henssge 法を、乳幼児例では Henssge 法変法 B を用いるのが妥当と考える。

乳幼児例での Henssge 法変法 B と時間差の絶対値に影響する条件について統計学的解析を行ったところ、温度データロガーの肛門からの深さととの間に $r_s = 0.52$ ($p < 0.05$) の正の相関が見られた。直腸温計測の際には肛門からの深さが重要であり、少なくとも肛門から 8cm の深さで計測すべきとの記載もある[5]。もっとも、これはあくまで成人例での報告であり、乳幼児例で実際に検討した報告は無いが、やはり可能な限り深くまで挿入することが必要と考えられる。他方で、直腸温測定開始までの経過時間、測定中の外気温の変化、体表面積、死亡時刻範囲の長さ、と時間差の絶対値

の間にはいずれも相関は見られなかった。

6-2-3. 乳幼児例における直線近似法

直線近似法については、乳幼児例で死亡推定時刻が死亡時刻範囲内となったものは6例あったものの、範囲外となった13例の時間差の絶対値の平均は 168 ± 129 分であった。これは乳幼児例での大野法・Henssge 法変法 B のほぼ2倍であり、成人例では3法間に大きな差が無かったのに対して、乳幼児例での直線近似法は他の2法に比べて明らかに誤差の大きい結果となった。

乳幼児例の直線近似法では、発見時刻から直腸温測定開始までの経過時間と時間差の絶対値との間に正の相関が見られたが、これは大野法でも正の相関が見られており、直線近似法における時間差には他の要因による影響が大きいと考えられる。その一つとして、まずは冷却相を直線的に近似することの問題が挙げられる。確かに、物体の冷却を直線的に近似する事は冷却の原理に反するが[4]、一方で成人例においては比較的安定した結果を出している。これについては、成人例では冷却相を直線的に近似したことによる誤差が比較的目立たないものであったのに対し、乳幼児例ではそれが顕著に現れた可能性があり、その一因として成人と乳幼児の体格差が考えられた。

次に、本研究における直線近似法ではプラトー相を含んでいないことが挙げられる。

古くから死後経過時間推定に用いられてきたものに「Rule of thumb」という方法があるが、これは本法同様に死体の冷却を直線的に捉えるものであり、1時間当たり1°C低下するとして死亡時の直腸温である37°Cと測定時の直腸温の差を求め、それにプラトー相に相当する3時間を加えて死後経過時間を推定するものである[6]。この方法は他の方法よりも比較的矛盾の少ない結果が出たという報告[30]がある一方で、科学的ではないとするものもある[4]。また、Al-Alousiらは死後の直腸温冷却曲線でプラトー相の認められたものが約27%のみであったと報告している[31]。近年では、プラトー相とは死体の個体差や置かれた状況によって変化するものであり、予測することはできないとの結果も示されている[32]。よって、本研究でも直線近似法にプラトー相に相当する時間を一定時間加えることはしなかった。プラトー相を個別に予測することが困難であるとするれば、それによって生じる直線近似法の時間差を改善することもまた困難であると考えられる。

以上のことから、乳幼児例では冷却相を直線的に近似することが、死亡推定時刻に大きな誤差を生じさせた要因の一つであると考えられた。もっとも、直線近似自体に関する問題は成人例についても同様であるが、今回の結果からは他の2法と大差無い結果が得られており、成人例においてはあくまで目安として他の2法と併せて評価することは可能と考えられた。

6-3. 正確な温度測定的重要性：測定機器の精度と直腸温の初期値について

直腸温に基づく死後経過時間推定法においては、正確な温度測定的重要性も指摘されている[33]。そのためには測定機器の精度も重要であり、少なくとも分解能が0.1℃であることが必要であるとされているが[6]、分解能が0.1℃であっても顕著な丸め誤差を生じたとする報告もある[34]。本研究では、分解能0.5℃の温度データロガーを使用しており、これにより生じた時間差も小さないものと考えられる。現在、分解能0.1℃の温度データロガーが市場化されており、今後、実務への導入を検討する予定であるため、この問題もいずれは解決されるものと期待する。

死亡時の直腸温度については、本研究では Marshall らによって報告され[11]、広く受け入れられている37.2℃としたが、これはあくまで平均値であり、実際の深部体温には個人差もあり、また身体活動や日内変動によっても変化する。死亡時の直腸温の誤差は、死後あまり時間経過の無い時点での死後経過時間推定には大きな誤差をもたらす要因となり得るが、死後ある程度時間が経過した後での死後経過時間推定ではあまり影響が無いとする報告もあり[33, 35]、現時点で一般的な実務において37.2℃とすることに問題は無いと考えられる。また、本研究では乳幼児例でも直腸温の初期値を37.2℃に設定した死後経過時間推算プログラムを使用した。乳幼児

の直腸温の平均を 37.3 °C とする報告もある[36]。しかし、0.1°C の差は実務上特に支障無いものと考ええる。

6-4. 死後経過時間推定法の限界と今後の展望

現在も、様々なパラメーターや新たな技術を利用した死後経過時間推定法が多数試みられているが[1, 37]、突破口となるような報告は未だ為されていない。その大きな原因の一つとして、生前・死後にそのパラメーターに影響する因子を評価し定量化することの困難さが挙げられる。そもそもその初期値に個人差がある上、死亡から発見に至るまでの内的・外的な影響を正確に数値化することは困難と言える。こうしたことを前提とした上で、推算した死亡推定時刻を盲目的に信じるのではなく、他の状況などと合わせて幅を持たせて捉えることや、Nokes らの指摘するように[30]、複数の推算アルゴリズムを併用し、各々の結果を比較検討することなどが、現時点における死亡時刻推定には必要であると考えられる。こうしたことを踏まえた上で、今回の結果から、乳幼児例においても大野法、および今回改変した Henssge 法変法 B は、実務において有用であると考ええる。

今後はより精度の高い測定機器を導入することで死亡時刻推定の正確性の向上を図り、また乳幼児例では特に、直腸温測定中の室温や死体を覆うブランケットといっ

た死体の保管状況を一定とした上で、更なる検討を行う必要があると考える。

7. 結論

2歳未満の乳幼児例の死後経過時間推定法として、大野法および Henssge 法変法 B は実務に応用可能であると考えられる。

ただし、症例によっては大きな時間差が生じる場合もあり、推定した死亡時刻はあくまで目安であると考え、死亡状況等と合わせて幅を持った時間帯として捉えることが重要である。

8. 文献

- [1] Henssge C, Madea B. Estimation of the time since death. *Forensic science international*. 2007;165:182-4.
- [2] Henssge C, Madea B. Timing of death. In: Payne-James J, Busuttill A, Smock W, editors. *Forensic Medicine: Clinical and Pathological Aspects*. San Francisco · London: Greenwich Medical Media Ltd; 2003. p. 91-114.
- [3] Kaliszan M, Hauser R, Kernbach-Wighton G. Estimation of the time of death based on the assessment of post mortem processes with emphasis on body cooling. *Legal medicine (Tokyo, Japan)*. 2009;11:111-7.
- [4] Saukko P, Knight B. The pathophysiology of death. *Knight's Forensic Pathology*. 3 ed. London: Arnold; 2004. p. 52-97.
- [5] Henssge C. Temperature-based methods II. In: Knight B, editor. *The Estimation of the Time since Death in the Early Post Mortem Period*. 2 ed. London: Arnold; 2002. p. 43-102.
- [6] Knight B, Nokes L. Temperature-based methods I In: Knight B, editor. *The Estimation of the Time since Death in the Early Post Mortem Period*. 2 ed. London: Arnold; 2002. p. 3-42.
- [7] Fiddes FS, Patten TD. A percentage method for representing the fall in body temperature after death. *Journal of Forensic Medicine*. 1958;5:2-15.
- [8] Shapiro HA. The postmortem temperature plateau. *Journal of Forensic Medicine*. 1965;12:137-41.
- [9] Marshall TK, Hoare FE. Estimating the time of death. The rectal cooling after death and its mathematical expression. *Journal of Forensic Science*. 1962;7:56-81.
- [10] Marshall TK. Estimating the time of death. The use of the cooling formula in the study of postmortem body cooling. *Journal of Forensic Science*. 1962;7:189-210.
- [11] Marshall TK. Estimating the time of death. The use of body temperature in estimating the time of death. *Journal of Forensic Medicine*. 1962;7:211-21.
- [12] Henssge C. Death time estimation in case work. I. The rectal temperature time of death nomogram. *Forensic science international*. 1988;38:209-36.
- [13] Sellier K. Determination of the time of death by extrapolation of the temperature decrease curve. *Acta medicae legalis et socialis*. 1958;2:279-301.
- [14] Hiraiwa K, Ohno Y, Kuroda F, Sebetan IM, Oshida S. Estimation of postmortem interval from rectal temperature by use of computer. *Medicine, science, and the law*. 1980;20:115-25.

- [15] Hiraiwa K, Kudo T, Kuroda F, Ohno Y, Sebetan IM, Oshida S. Estimation of postmortem interval from rectal temperature by use of computer--relationship between the rectal and skin cooling curves. *Medicine, science, and the law.* 1981;21:4-9.
- [16] Funayama M, Aoki Y, Odaira T, Sagisaka K. Evaluation of estimation of postmortem interval from rectal temperature by use of computer. *The research and practice in forensic medicine.* 1986;29:243-51.
- [17] Ohno Y, Kajiwara M, Mukai T. Computer simulation program of rectal temperature by infinite cylinder model. *The research and practice in forensic medicine.* 1990;33:335-41.
- [18] 大野 曜. 直腸温降下曲線法による死後経過時間推定. *日本医科大学雑誌.* 1993;60:89-94.
- [19] Kanetake J, Kanawaku Y, Funayama M. Automatic continuous monitoring of rectal temperature using a button-type thermo data logger. *Legal medicine (Tokyo, Japan).* 2006;8:226-30.
- [20] Henssge C. Rectal temperature time of death nomogram: dependence of corrective factors on the body weight under stronger thermic insulation conditions. *Forensic science international.* 1992;54:51-66.
- [21] Fujimoto S, Watanabe T, Sakamoto A, Yukawa K, Morimoto K. Studies on the physical surface area of Japanese. 18. Calculation formulas in three stages over all ages. *Nihon eiseigaku zasshi Japanese journal of hygiene.* 1968;23:443-50.
- [22] 大野 曜, 梶原 正, 内間 栄. 沖縄県におけるデジタル温度計による直腸温測定の実験と死後経過時間推定について. *法医学の実際と研究.* 1985;28:179-83.
- [23] 押田茂実, 平岩幸一, 黒田房邦, 他. 直腸温降下曲線法による死後経過時間推定法の沖縄県導入半年間の成果と問題点. *法医学の実際と研究.* 1980;23:179-207.
- [24] Kanawaku Y, Kanetake J, Takahashi S, Hashiyada M, Sakai J, Komiyama A, et al. Two-dimensional simulation of postmortem rectal cooling considering inhomogeneity of tissues between normal weight and obese subjects. *The research and practice in forensic medicine.* 2006:141-50.
- [25] 大野 曜, 向井 敏, 梶原 正, 他. 沖縄県におけるデジタル温度計による直腸温測定と死後経過時間推定の実験と問題点. *法医学の実際と研究.* 1988;31:307-11.
- [26] 青木 康, 谷尻 豊, 三枝 聖, 藤田 さ, 琵琶坂 仁, 高宮 正, et al. 直腸温・環境温連続モニタリングデータを用いた無限円柱モデルに基づく死後経過時間推定. *法医学の実際と研究.* 2010:63-9.

- [27] Ophoven JJ. Pediatric forensic pathology. In: Gilbert-Barness E, editor. *Potter's pathology of the fetus, infant and child*. 2 ed. Philadelphia: Mosby Elsevier; 2007. p. 741-839.
- [28] Henssge C, Althaus L, Bolt J, Freisleder A, Haffner HT, Henssge CA, et al. Experiences with a compound method for estimating the time since death. I. Rectal temperature nomogram for time since death. *International journal of legal medicine*. 2000;113:303-19.
- [29] Hubig M, Muggenthaler H, Sinicina I, Mall G. Body mass and corrective factor: impact on temperature-based death time estimation. *International journal of legal medicine*. 2011;125:437-44.
- [30] Nokes LD, Flint T, Williams JH, Knight BH. The application of eight reported temperature-based algorithms to calculate the postmortem interval. *Forensic science international*. 1992;54:109-25.
- [31] Al-Alousi LM. A study of the shape of the post-mortem cooling curve in 117 forensic cases. *Forensic science international*. 2002;125:237-44.
- [32] Smart JL, Kaliszan M. The post mortem temperature plateau and its role in the estimation of time of death. A review. *Legal medicine (Tokyo, Japan)*. 2012;14:55-62.
- [33] Hubig M, Muggenthaler H, Mall G. Influence of measurement errors on temperature-based death time determination. *International journal of legal medicine*. 2011;125:503-17.
- [34] Kanawaku Y, Kanetake J, Komiya A, Maruyama S, Funayama M. Effects of rounding errors on postmortem temperature measurements caused by thermometer resolution. *International journal of legal medicine*. 2007;121:267-73.
- [35] Muggenthaler H, Sinicina I, Hubig M, Mall G. Database of post-mortem rectal cooling cases under strictly controlled conditions: a useful tool in death time estimation. *International journal of legal medicine*. 2012;126:79-87.
- [36] Morley CJ, Hewson PH, Thornton AJ, Cole TJ. Axillary and rectal temperature measurements in infants. *Archives of Disease in Childhood*. 1992;67:122-5.
- [37] Madea B. Is there recent progress in the estimation of the postmortem interval by means of thanatochemistry? *Forensic science international*. 2005;151:139-49.

謝辞

本研究を行うに当たり、ご指導頂きました金武 潤教授（防衛医科大学校法医学講座）、また、プログラムの作成にご協力頂きました細貝 良行先生（東北大学大学院医学系研究科画像解析学分野）に深く感謝致します。

倫理審査

本研究は、東北大学大学院医学系研究科倫理委員会により承認された。
(受付番号：2015-1-165)

9. 図

- 図 1. 死後の直腸温冷却
- 図 2. 温度データロガー（外観と仕様）
- 図 3. 温度データロガー（使用時）
- 図 4. 温度データロガーにより得られた直腸温降下曲線グラフ
- 図 5. データの選択①
- 図 6. データの選択②
- 図 7. データの選択③
- 図 8. 無限円柱モデル
- 図 9. 腰囲の計測
- 図 10. シグモイド曲線と 2 指数関数モデル
- 図 11. 直線近似法
- 図 12. 死亡時刻範囲
- 図 13. Henssge 法と Henssge 法変法 B

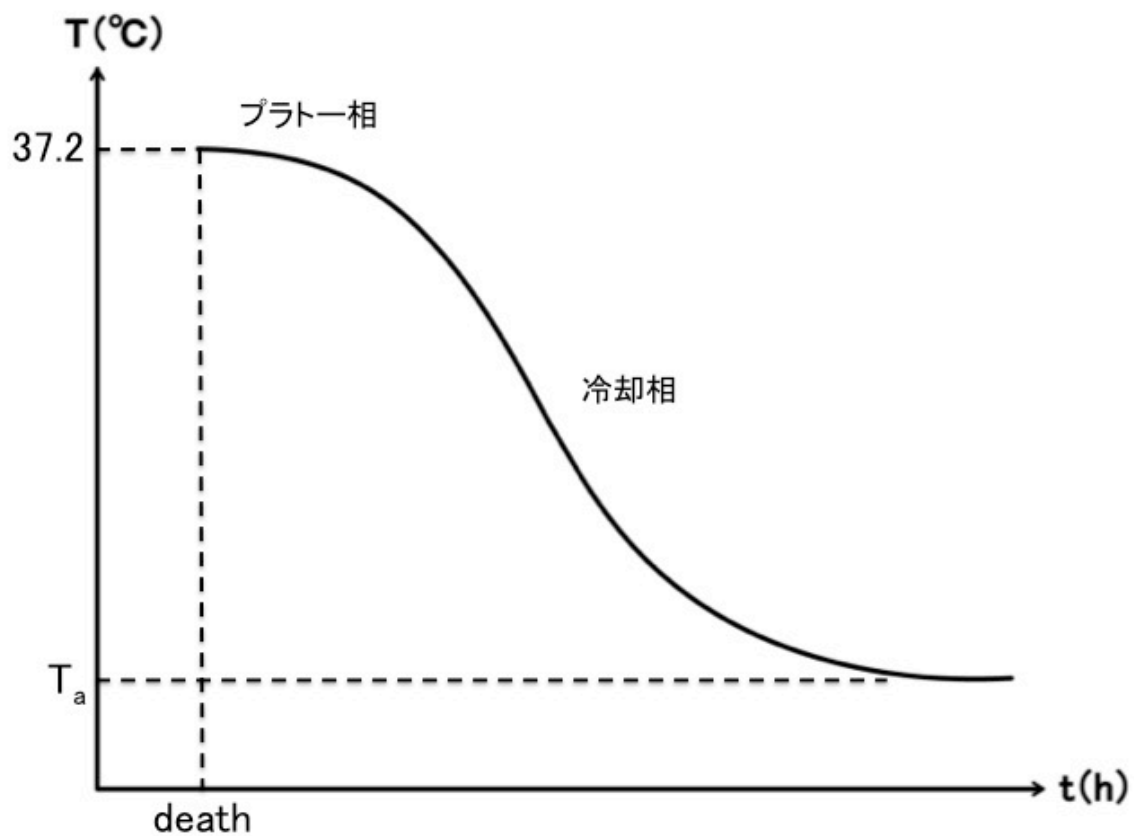
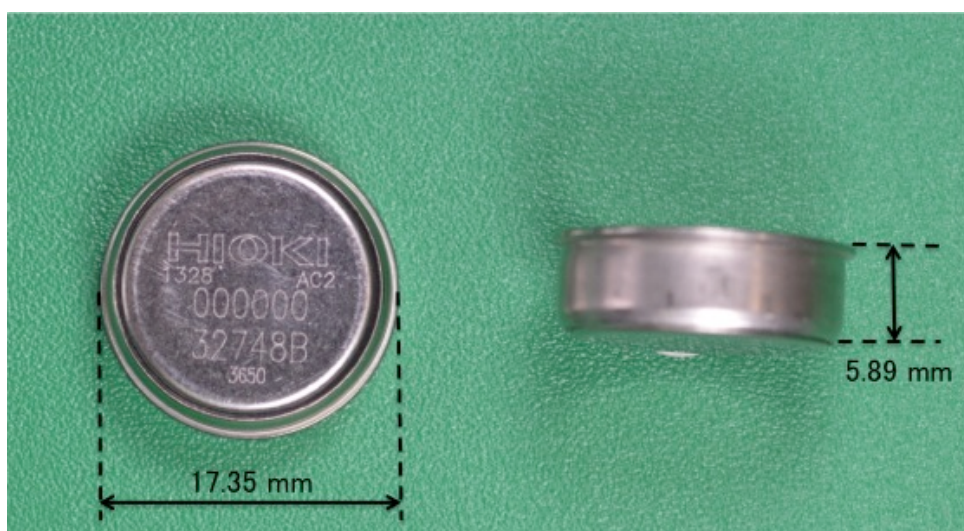


図 1. 死後の直腸温冷却

死後、直腸温は若干の時間のプラトー相と、ニュートンの冷却の法則に従う冷却相とから成る逆シグモイド曲線を描いて環境温 (T_a) へと降下していく。



温度ロガー（ボタン型）

製造者	日置電機株式会社, 上田
型番	3650
測定範囲	-40 °C~85 °C
分解能	0.5 °C
精度	±1.5 °C (-10.0 °C~30.0 °Cにて)
測定間隔	1~255 分
大きさ	直径 17.35 mm×厚さ 5.89 mm
重量	3.3 g

図 2. 温度データロガー（外観と仕様）



図 3. 温度データロガー（使用時）

写真右：温度データロガーをラテックス手袋の先端に入れたもの。これを用手的に示指の深さまで、死体直腸内に挿入する。

写真左：温度データロガーをホルダーにセットしたもの。ゴムバンドの部分を死体足首に装着する。

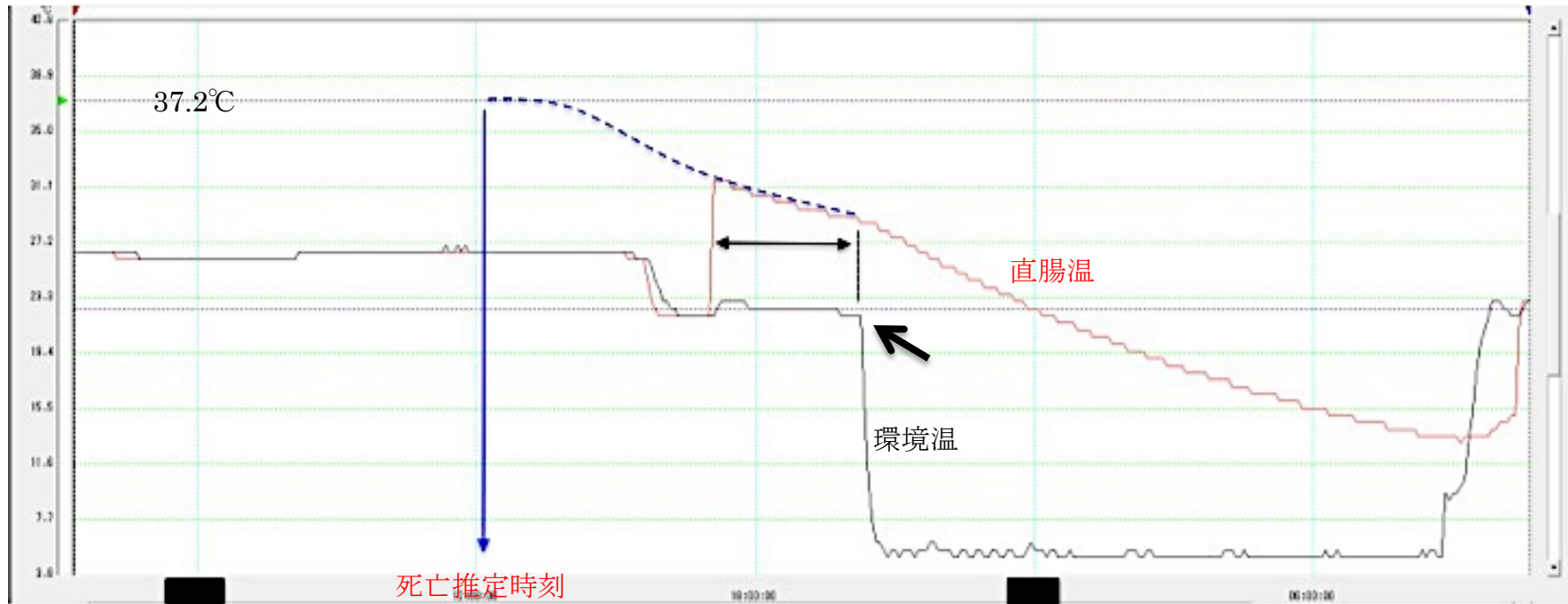


図 4. 温度データロガーにより得られた直腸温降下曲線グラフ

直腸温が赤色、環境温が黒色で表示されている。グラフ半ばでの環境温の急降下（矢印）が、死体が冷蔵庫に入れられた事を示す。両矢印の範囲の直腸温降下曲線を、シグモイド曲線に近似的に 37.2°Cまで外挿し（青点線）、交点の時刻を読み取る。

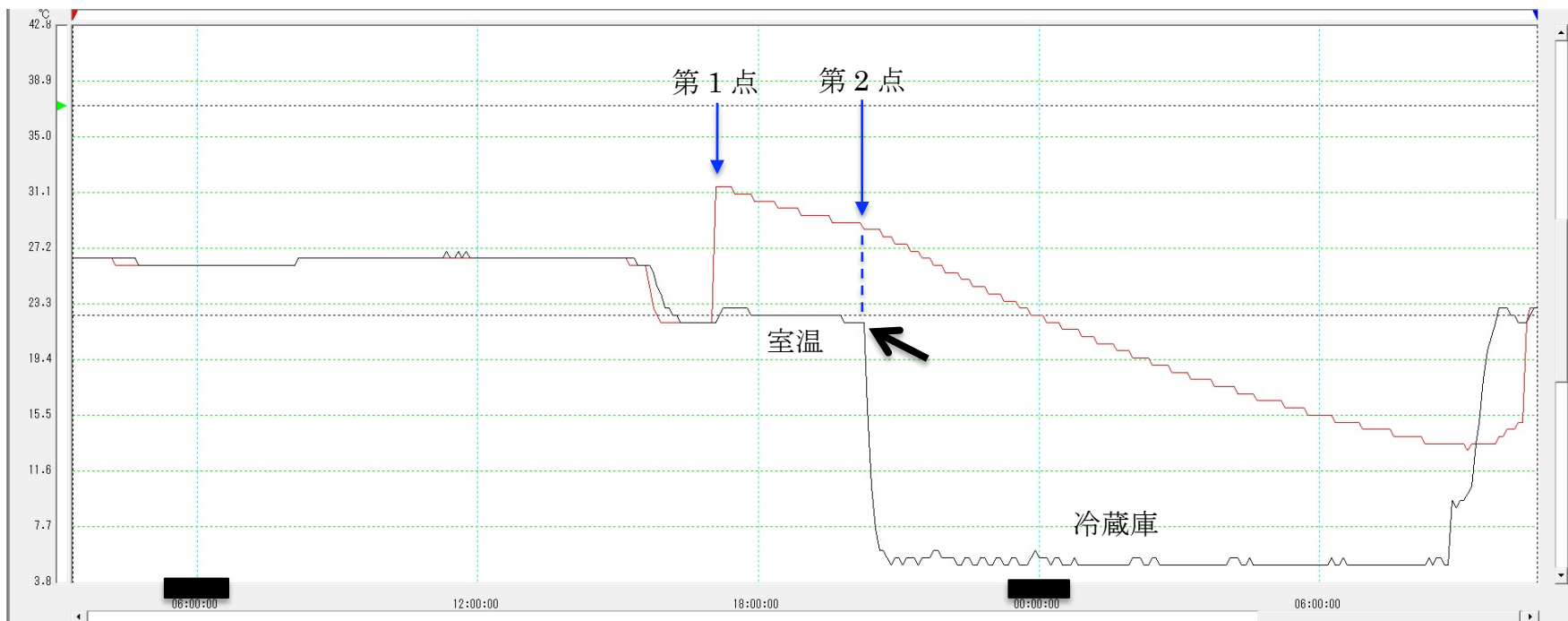


図 5. データの選択①

直腸温が赤色、環境温が黒色で表示されている。環境温の急降下（矢印）が、死体を冷蔵庫に入れた事を示しており、その直前を第 2 点とする。

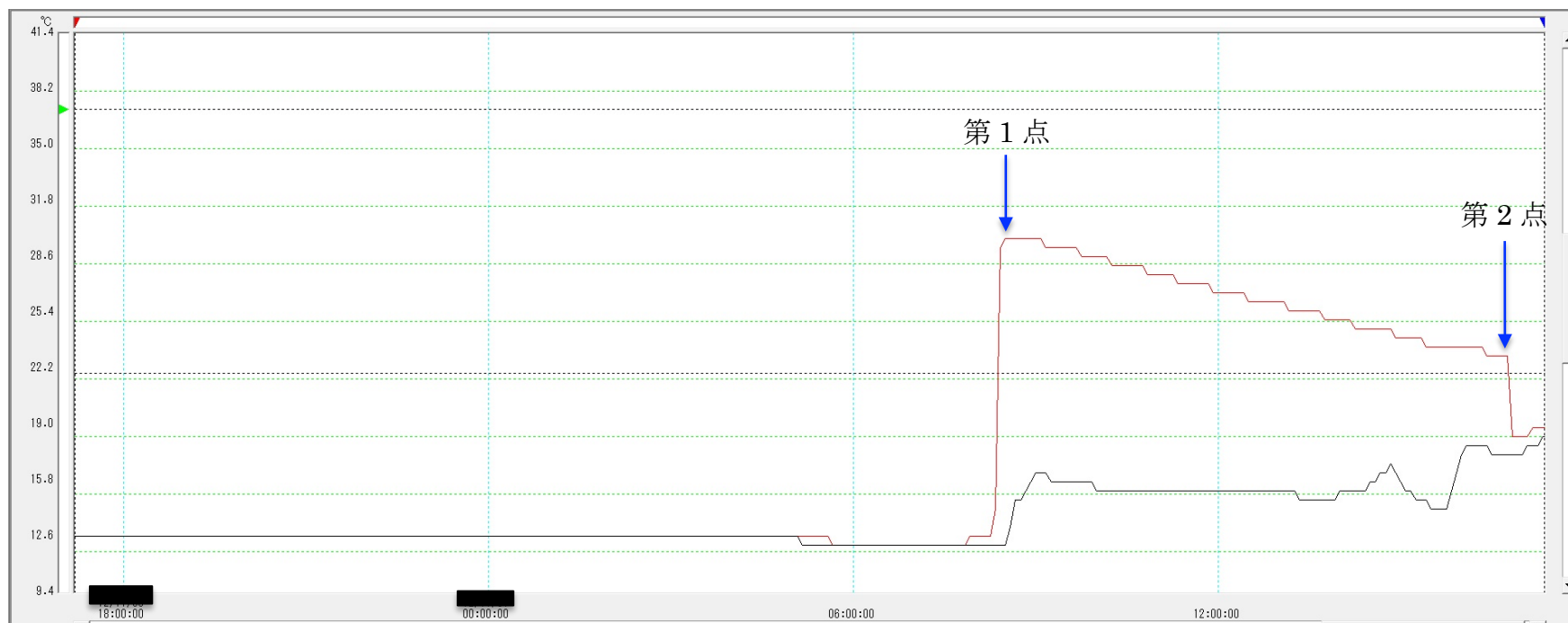


図 6. データの選択②

解剖まで室温で保管されており、外気温（黒）に大きな変化が無い。直腸温（赤）の急降下が、直腸温測定用データロガーが死体直腸内から取り出された事を示している。

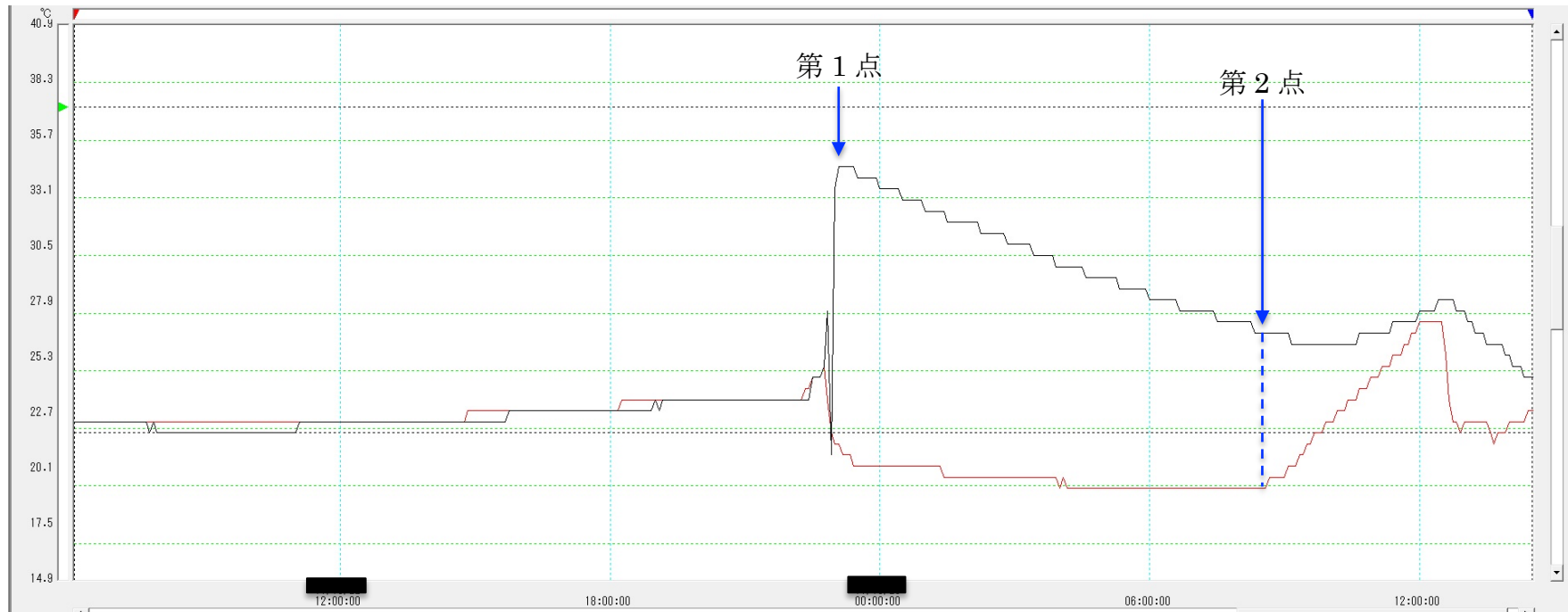


図 7. データの選択③

グラフ後半から環境温（赤）が上昇し始めているため、その直前を第 2 点とする。

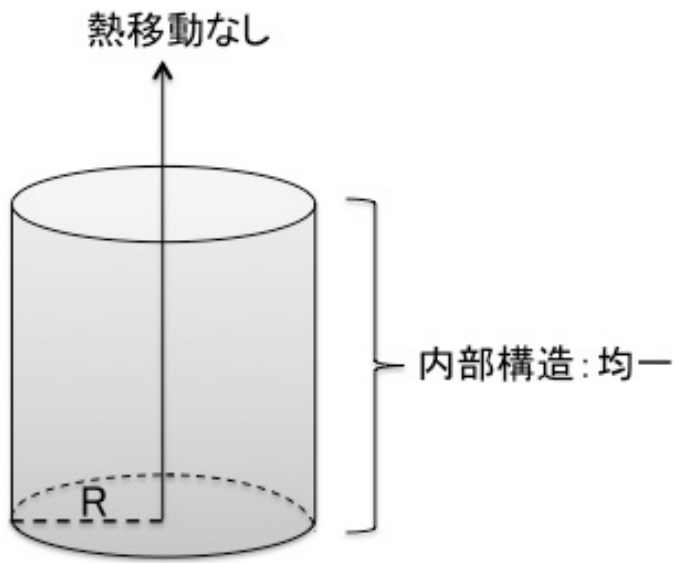


図 8. 無限円柱モデル

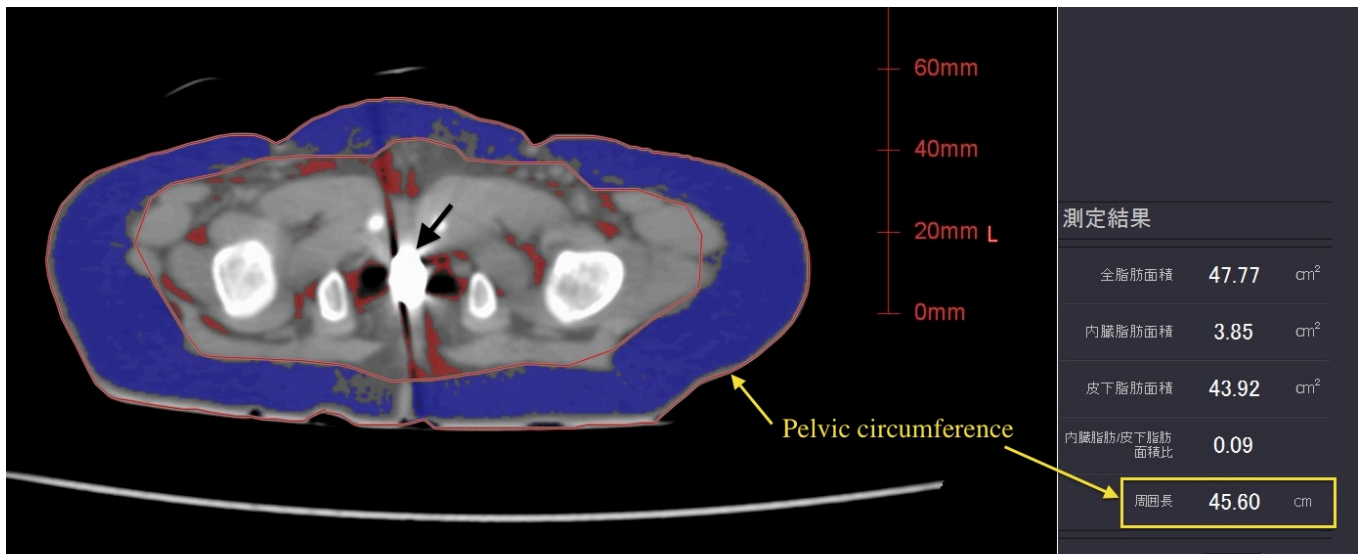


図 9. 腰囲の計測

解剖前 CT 画像を元にワークステーション上で腰囲を計測した。なお、腰囲は直腸内の温度データロガーの高さで測定するものとし、画像中央の高輝度の物体（矢印）が死体直腸内の温度データロガーである。

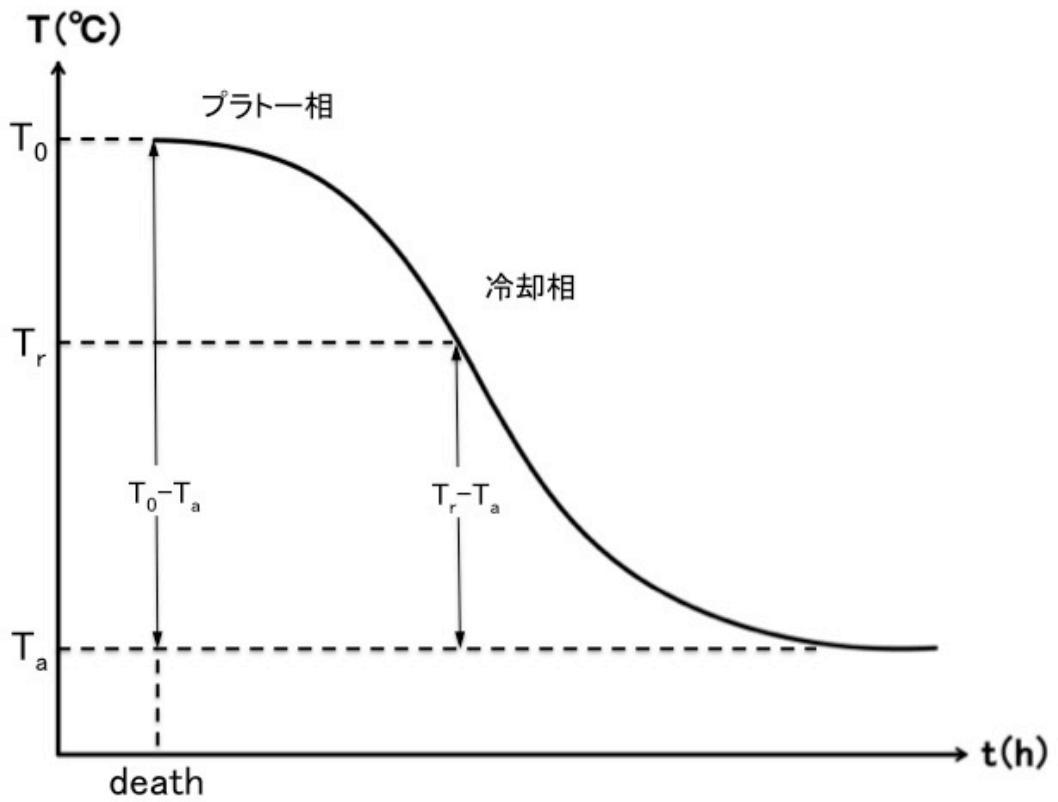


図 10. シグモイド曲線と二重指数関数モデル

Marshall と Hoare は冷却の比率 $(T_r - T_a)/(T_0 - T_a)$ を二重指数関数で表した。

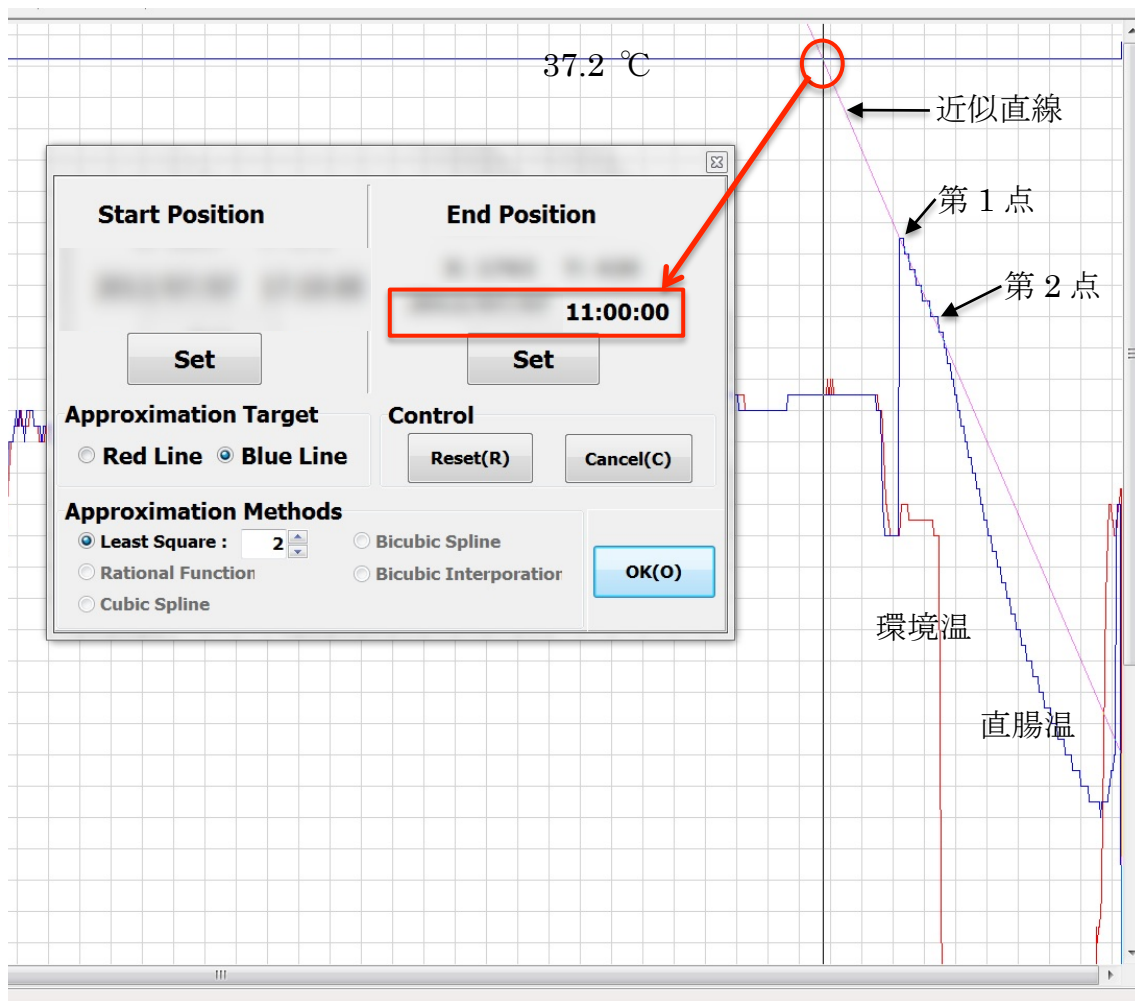


図 11. 直線近似法

第 1 点と第 2 点を決定すると近似直線（ピンク）が表示され、37.2 °Cとの交点を読み取る。（交点の時刻は End Position の欄に表示される。）

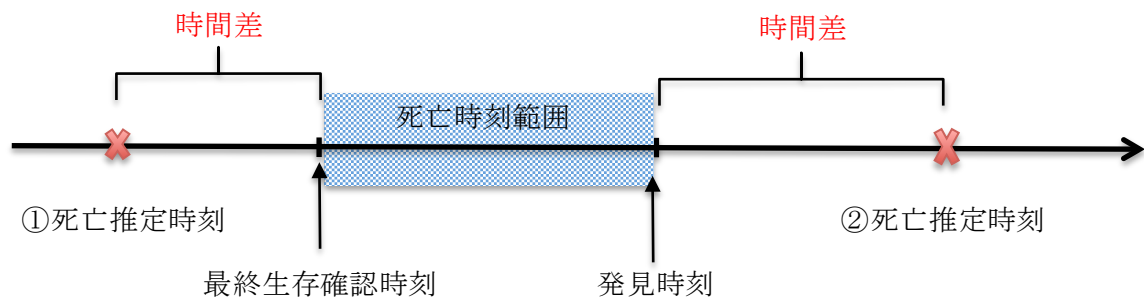
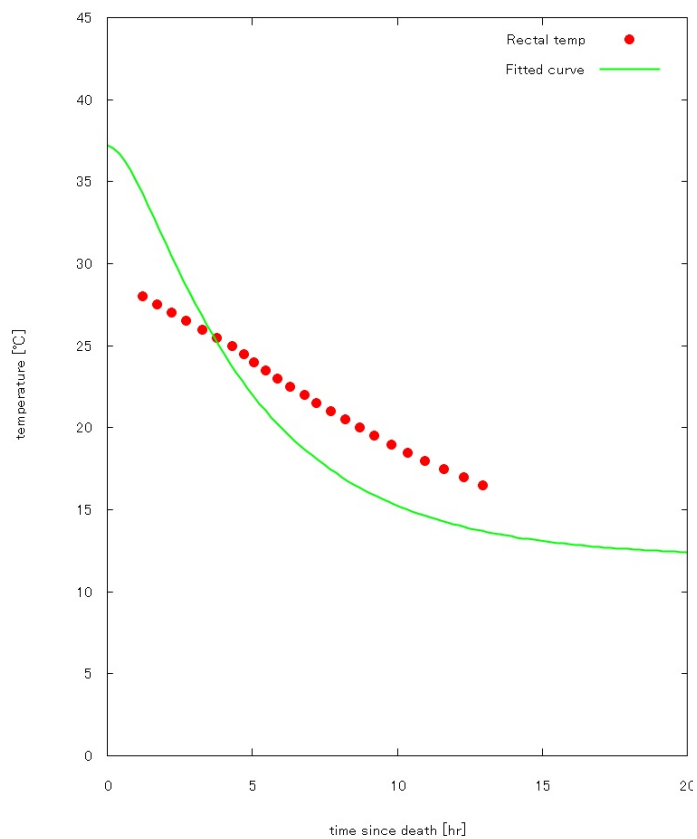


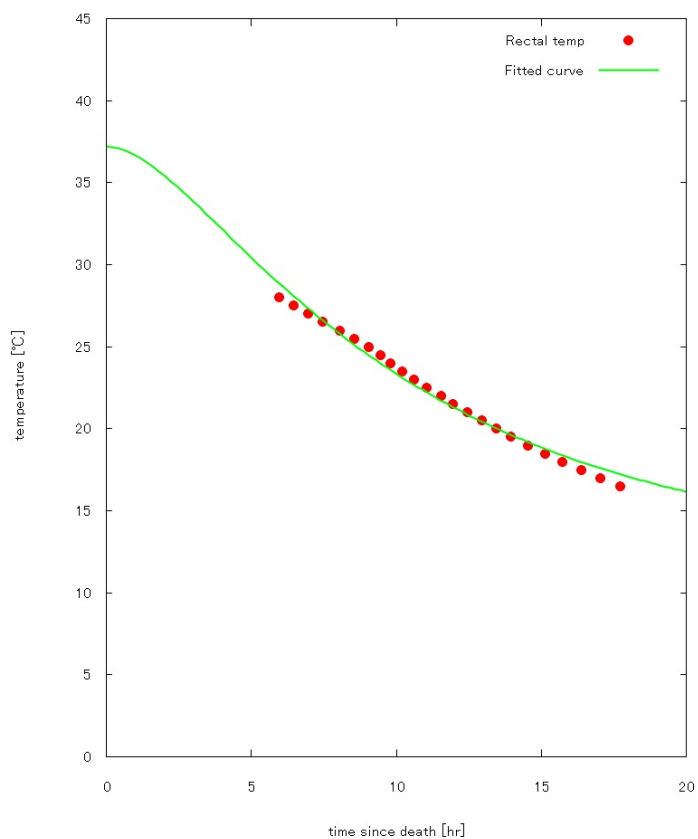
図 12. 死亡時刻範囲

最終生存確認時刻から発見時刻までを「死亡時刻範囲」とし、推算した死亡推定時刻が①最終生存確認時刻以前の場合はその差を、②発見時刻以後の場合はその差を「時間差」とする。



Henssge 法 ($0.7 \leq C \leq 1.3$)

時間差 +270 分



Henssge 法変法 B ($0.7 \leq C \leq 8.3$)

死亡時刻範囲内

図 13. Henssge 法と Henssge 法変法②

症例 14 (体重 10.3 kg) を例とすると、Henssge 法で時間差 270 分であったものが Henssge 法変法②では死亡時刻範囲内となった。

近似曲線 (緑色) も実測値 (赤点) により近いものとなっている。

10. 表

表 1. 成人症例

表 2. 乳幼児症例

表 3. 補正因子①

表 4. 補正因子②

表 5. 成人症例の推算結果

表 6. 成人症例におけるスピアマンの順位相関係数 (r_s) と p 値

表 7. 乳幼児症例の推算結果

表 8. 乳幼児症例におけるスピアマンの順位相関係数 (r_s) と p 値

症例番号	年齢	性別	身長/体重	死因	蘇生処置
1	51	M	176/63	腎機能障害	
2	不明	M	166/85	心肥大を伴う虚血性心疾患	有
3	73	F	150/61	急性心筋梗塞	有
4	34	M	168/73	肥大型心筋症に伴う慢性虚血性心疾患	
5	84	F	149/30	誤嚥による窒息	有
6	36	F	154/63	肺血栓塞栓症	有
7	82	M	162/70	外傷性上行大動脈離断による胸腔内出血	有
8	50	M	166/77	腸間膜破裂による腹腔内出血	有
9	43	F	156/46	失血	有
10	19	M	171/71	急性循環不全(感電による可能性あり)	有
11	55	F	149/38	上行大動脈解離による心嚢血腫	有
12	76	M	161/71	溺水による窒息	有
13	83	M	154/56	急性心筋梗塞	
14	79	M	158/39	吐物吸引による窒息	

表 1. 成人症例

症例番号	年齢	性別	身長/体重	死因	蘇生処置	ウイルス抗体
1	2ヶ月	F	58.6/5.3	原因不明の乳児突然死	有	
2	7ヶ月	M	71/8.2	原因不明の乳児突然死	有	RSV (+)
3	4ヶ月	M	62/6.6	軽度の心筋炎を伴った乳児突然死		
4	2ヶ月	M	62.5/6.4	原因不明の乳児突然死		
5	3ヶ月	F	65/6.5	原因不明の乳児突然死	有	
6	1週	F	48.5/2.8	原因不明の乳児突然死	有	
7	11ヶ月	M	77/8.7	原因不明の乳児突然死	有	
8	3ヶ月	F	60/5.6	原因不明の乳児突然死		
9	2ヶ月	F	53/3.8	肥大型心筋症	有	
10	3週	M	54/3.9	ウイルス感染(疑い)を伴う乳児急死	有	
11	18ヶ月	M	80.5/10.5	急性気管支炎・細気管支炎		
12	6ヶ月	M	68/7.7	吐乳吸引による窒息		
13	2週	M	50/3.3	原因不明の乳児突然死	有	
14	13ヶ月	M	75.5/10.3	溺水による窒息	有	
15	8ヶ月	M	71/8.3	原因不明の乳児突然死	有	RSV (+)
16	15ヶ月	F	75/8.3	原因不明の乳児突然死	有	RSV (+)
17	2ヶ月	M	56/5.5	原因不明の乳児突然死	有	RSV (+)
18	4ヶ月	M	61/6.2	原因不明の乳児突然死	有	
19	5ヶ月	F	60/5.3	原因不明の乳児突然死	有	
20	3ヶ月	M	62/6.4	原因不明の乳児突然死	有	

表 2. 乳幼児症例

Dry clothing/covering	In air	Corrective factor	Wet-through clothing/covering wet body surface	In air/water
		0.35	Naked	Flowing
		0.5	Naked	Still
		0.7	Naked	Moving
		0.7	1-2 thin layers	Moving
Naked	Moving	0.75		
1-2 thin layers	Moving	0.9	2 or more thicker	Moving
Naked	Still	1.0		
1-2 thin layers	Still	1.1	2 thicker layers	Still
2-3 thin layers		1.2	More than 2 thicker layers	Still
1-2 thicker layers	Moving or Still	1.2		
3-4 thin layers	Without	1.3		
More thin/thicker layers	influence	1.4		

表 3. 補正因子①

Henssge C. Death time estimation in case work. I. The rectal temperature time of death nomogram. Forensic science international. 1988;38:209-36. より引用。

Real body weight (kg)	4	6	8	10	20	30	40	50	60	70	80	90	
Clothing, more layers	1.6	1.6	1.6	1.6	1.5					1.4			
e.g.	2.1	2.1	2	2	1.9	1.8				1.6			
Bedsread e.g.	2.7	2.7	2.6	2.5	2.3	2.2	2.1	2		1.8			
	3.5	3.4	3.3	3.2	2.8	2.6	2.4	2.3		2		1.8	
	4.5	4.3	4.1	3.9	3.4	3	2.8	2.6	2.4	2.2	2.1	2	A
Clotjing + bedsread	5.7	5.3	5	4.8	4	3.5	3.2	2.9	2.7	2.4	2.3	2.2	
e.g.	7.1	6.6	6.2	5.8	4.7	4	3.6	3.2	2.9	2.6	2.5	2.3	
Feather-bed e.g.	8.8	8.1	7.5	7	5.5	4.6	3.9	3.5	3.2	2.8	2.7	2.5	
	10.9	9.8	8.9	8.3	6.2	5.1	4.3	3.8	3.4	3	2.8	2.6	B

表 4. 補正因子②

Henssge C. Rectal temperature time of death nomogram: dependence of corrective factors on the body weight under stronger thermic insulation conditions. Forensic science international. 1992;54:51-66. より引用 (抜粋)。

Henssge 法変法 A では体重別に下線 A の補正因子を用い、Henssge 法変法 B では体重別に下線 B の補正因子を用いた。

症例	深さ	経過時間	温度変化	大野法	Henssge 法	変法 A・B*1	直線近似法
1	66	220	-2.5	+30	+50	+50	+20
2	62	200	-2	error	-70	-70	+20
3	42	360	-1	error	+40	+40	+100
4	65	200	+4	error	-20	-20	-70
5	43	240	-6	+10	+80	+80	+100
6	83	250	+0.5	-10	+40	+40	+100
7	48	260	-0.5	+120	+200	+200	-50
8	48	470	-1.5	-280	+30	+30	-60
9	68	230	+0.5	-60	-10	-10	-30
10	40	380	-1	-50	+110	-110	+70
11	52	360	-0.5	+120	+190	+190	+210
12	40	380	-4.5	-70	-90	-90	-170
13	46	340	-0.5	-30	-260	-200	+160
14	49	420	-2.5	+120	+170	+170	+190
平均±SD	54±12	310±90	2.0±1.7*2				
	error			3	0	0	0
	時間差が「+」であるもの			5	9	8	9
	時間差が「-」であるもの			6	5	6	5
	時間差の絶対値の平均			82	97	93	96
	SD			74	75	67	61

表 5. 成人症例の推算結果

深さ：温度データロガーの肛門からの深さ（mm）

経過時間：実際の死亡時刻から直腸温測定開始までの経過時間（分）

温度変化：直腸温測定中の環境温の変化（℃）

error：プログラムエラーとなり、シミュレーション結果が得られなかったもの。

*1 変法 A、B 間で結果は不変であり、表中の結果はまとめて表記した。

*2 温度変化の絶対値の平均および標準偏差

		大野法	Henssge 法	変法 A・B ^{*1}	直線近似法
深さ	r _s	-0.060	-0.46	-0.45	-0.37
	p 値	0.86	0.10	0.10	0.19
経過時間	r _s	0.67	0.35	0.34	0.56
	p 値	0.026	0.23	0.23	0.037
温度変化	r _s	-0.089	-0.19	-0.19	0.0091
	p 値	0.79	0.52	0.52	0.98

表 6. 成人症例におけるスピアマンの順位相関係数 (r_s) と p 値

深さ：温度データロガーの肛門からの深さ (mm)

経過時間：実際の死亡時刻から直腸温測定開始までの経過時間 (分)

温度変化：直腸温測定中の環境温の変化 (°C)

赤字は p 値が 5 %以下であるもの。

*1 変法 A、B 間で結果は不変であり、表中の結果はまとめて表記した。

症例	深さ	経過時間	温度変化	体表面積	死亡時刻範囲	大野法	Henssge 法	変法 A	変法 B	直線近似法	
1	17	380	-2	3031	80	+120	+230	+10	+10	-450	
2	15	260	-3.5	4211	240	+10	+130	in	in	in	
3	18	320	-6	3422	20	+100	+290	+100	+60	-70	
4	26	160	-1.5	3444	340	in	+110	in	in	in	
5	23	270	-1	3536	180	in	+100	in	in	-90	
6	24	220	-0.5	1944	170	in	+170	+50	in	-20	
7	48	240	-21	4608	150	error*1	+200	+180	+180	in	
8	33	200	-7	3213	360	+50	+180	+40	+40	error*2	
9	32	320	+3.5	2325	0	+130	+320	+140	+60	+50	
10	25	300	-2	2472	140	+30	+230	+40	in	-60	
11	39	400	-1	5080	180	+20	+160	in	in	-270	
12	47	180	+1	3955	250	in	+50	+10	+10	in	
13	31	360	-6.5	2239	90	+170	+320	+200	+130	in	
14	29	350	-10.5	4880	10	+40	+270	in	in	-170	
15	52	360	-3.5	4211	60	+180	+280	+160	+160	+170	
16	23	270	+1	4366	80	in	+190	+40	+40	-70	
17	40	300	-3	2947	220	+140	+220	+90	+90	in	
18	32	370	0	3330	15	+10	+230	+70	+70	-180	
19	27	300	-1.5	3073	90	in	+130	in	in	-400	
20	27	350	-1.5	3422	30	in	+280	+60	-70	-180	
平均±SD	30±10	300±70	3.9±4.7*3	3485±862	140±100						
						死亡時刻範囲内(in)	7	0	6	8	6
						error	1	0	0	0	1
						時間差が「+」であるもの	12	20	14	11	2
						時間差が「-」であるもの	0	0	0	1	11
						範囲外の時間差の絶対値の平均	83	205	85	77	168
						SD	61	74	60	52	129

表 7. 乳幼児症例の推算結果

深さ：温度データロガーの肛門からの深さ（mm）

経過時間：実際の死亡時刻から直腸温測定開始までの経過時間（分）

温度変化：直腸温測定中の環境温の変化（℃）

体表面積（cm²）

死亡時刻範囲（分）

*1 プログラムエラーとなり、シミュレーション結果が得られなかったもの。

*2 温度データロガー間での時間のずれからプログラムが実行できなかったもの。

*3 温度変化の絶対値の平均および標準偏差

		大野法	Henssge 法	変法 A	変法 B	直線近似法
深さ	r_s	0.32	0.093	0.39	0.52	-0.13
	p 値	0.18	0.69	0.086	0.020	0.61
経過時間	r_s	0.52	0.63	0.21	0.26	0.68
	p 値	0.022	0.0029	0.37	0.27	0.0013
温度変化	r_s	0.71	0.48	0.35	0.37	-0.28
	p 値	0.00071	0.033	0.13	0.11	0.24
体表面積	r_s	-0.25	-0.30	-0.36	-0.087	0.13
	p 値	0.30	0.19	0.12	0.72	0.61
死亡時刻 範囲	r_s	-0.29	-0.77	-0.38	-0.32	-0.53
	p 値	0.24	0.000063	0.095	0.17	0.020

表 8. 乳幼児症例におけるスピアマンの順位相関係数 (r_s) と p 値

深さ：温度データロガーの肛門からの深さ (mm)

経過時間：実際の死亡時刻から直腸温測定開始までの経過時間 (分)

温度変化：直腸温測定中の環境温の変化 (°C)

体表面積 (cm²)

死亡時刻範囲 (分)

赤字は p 値が 5 %以下であるもの。