

# シミュレーションとシミュレーター

諏訪 邦夫、石田 等、立原 敬一

Simulation and Simulator

Kunio Suwa, Hitoshi Ishida, Keiichi Tachihara

---

## 要 旨 :

Simulation and simulators were investigated and reviewed in various aspects. Their meanings and definitions were presented. A flight simulator, because of its nature and its prevalence, was taken as their typical examples and discussed in some detail. In the field of medical education and learning, the simulator may be considered as a bridge between studying by lectures or textbooks and on-sight training (clinical training), and by this nature it contributes greatly to decrease the barrier between these two and to facilitate the transition from the former to the latter.

Various types of simulators were discussed, namely mathematical formulation, electrical analogue, mechanical models, and computer simulators. Examples of simulation analysis were presented; in anesthesia, pharmacokinetics of inhalational anesthetic agent is a typical example. It was used a great deal in 1950's and 1960's because the measurements and analyses of the agents were difficult while the model analysis was possible and fairly accurate because these agents move freely in the body, being uptaken and excreted only by ventilation, and undergoing virtually no metabolism. In physiology, the Guyton's model was used extensively because it integrated just about every aspects of human physiology. This author's pulmonary gas exchange model using a tidally ventilated model was presented. It specifically aimed to analyze the effect of tidal ventilation, contrary to the conventional steady gas flow model.

Various simulators used as training tools were presented, from a simple "resuscitation doll" to a large scale anesthesia simulator occupying an operating room and using a real anesthesia machine and common monitor combined with a high grade mechanical doll-simulator.

Finally, a concept is presented that medical technologists, whom we are teaching in our institution of junior college, may be defined as the special group of personnel using simulators in their daily work.

## 日本語訳

シミュレーションとシミュレーターを各面から考察した。その意義と定義を述べ、特にフライトシミュレーターを例にとってややくわしく考察した。医学領域において、シミュレーションは書籍と講義による学習と臨床実習との橋渡しとして重要な役を果たし、これによって基礎学習から臨床へと滑らかな移行が期待できる。

シミュレーターの各タイプ、数式型、電気回路、機械モデル、コンピュータシミュレーターなどを考察し、その例として吸入麻酔のファーマコキネティクスをやや詳しく述べた。この領域は1950年代から使われ始めたのは、この薬物は体内での動きが速く出入りは換気に依存し、代謝は受けないなどの特徴によっている。生理学の領域では、ガイTONのモデルが人体のすべての面を包括している故にひろく使われた。筆者自身の往復換気による肺ガス交換の解析も解説した。

臨床のトレーニングに使われるシミュレーターとしては、簡単な心肺蘇生学習用人形から手術室を一つつぶして構成される実体麻酔シミュレーターまで幅広い。

最後に、当施設においてわれわれの教える臨床工学技士は仕事自体が毎日の業務にシミュレーターを使用している特殊な職種とも定義されることを述べた。

## 本文

本原稿は、帝京短期大学ライフケア学科臨床工学専攻課程での授業の同名タイトルの講義のアウトラインを本誌向きに書き換えたものである。

### シミュレーションとシミュレーター

まず用語について簡単に述べると、「シミュレーション」は概念・考え方・やり方に使う抽象名詞であり、「シミュレーター」はそれを使う実体のあるもの・仕掛けを呼ぶ。用途は、解析・教育・遊び（ゲーム）などが中心と言えよう。他に「シミュレート」という動詞も日本語化しており、サ変動詞として使用する。

シミュレーターのわかりやすい例として、「フライトシミュレーター flight simulator」を挙げて考察する<sup>1)</sup>。これは飛行機の操縦を練習ないし遊ぶもので、パソコン用では無料からせいぜい数千円で入手でき、携帯電話で使えるものもある。実際に手をつかって動かす実体シミュレーターは、「操縦幹だけ」というごく簡単単純なものから、もう少し複雑で「操縦している気分にしてくれる」ものまで段階はいろいろで、ごく簡単な小型機用なら装置も小さく価格も数万円～数十万円で入手できる。本格的なものは、旅客機用の場合は本物の航空機の操縦室を忠実に再現して窓からみえる景色も実物に近く、サイズもそれに対応し価格も実機の10分の1程度の数億～数十億円と高価で、主として乗員の訓練につかわれる。20年ないしそれ以前より、旅客機の実機自体を訓練に使用することは行われなくなったと理解している。つまり、パイロット（操縦士）は小型機で空を飛んでトレーニングを受けることはあるものの、実際に我々が乗り込んで旅行する大型機自体を飛ばしてトレーニングを受けることはなくなっている。ちなみに、旅客機の免許は機種ごとに異なるもので、たとえばボーイング747機の免許を持っていても、A300系の航空機を操縦するには別の免許を取得する必要がある、この点は自動車の免許とは著しく異なるルールに基づいている。

フライトシミュレーターの有用性は計り知れない。大型ジェット旅客機の価格は100億円のレベルだから、「直接費用を回収する」用途に極力使用したいのは当然で、それがパイロット養成にシミュレーターしか使わなくなった最大の要因と言う。その上に、シミュレーターの特徴として通常のフライト訓練に限らず実機ではできない墜落を始めとする各種の事故なども容易に実現できるので、その訓練にも使われる。たとえば、旅客機内の火災や不時着などの事故のシミュレーション訓練がこれにあたる。

一方、シミュレーターではどうしてもうまくいかな

い点として、G（重力の加速度）の大幅な変化は経験させられないという話である。

### 目的と用途：坐学と実務を結ぶもの

シミュレーションとシミュレーターの目的と用途としては、上記フライトシミュレーターのような「トレーニング」がまず挙げられる。そもそも、頭と身体を使うすべての業務において、坐学（講義と教科書などの書籍による学習）から実務に移行する中間段階としてトレーニングは必須で、その際にシミュレーターは有用な役割を果たす。

医療関係についてもこの点は同一で、医師・看護師・臨床工学技士・検査技師などすべての職種の養成において「実習」は重要な要素だが、現場では学ぶべき事柄が系統的に登場するわけではなく、また稀な事象には遭遇しない可能性も高い。しかし、遭遇しない故にトレーニングをないがしろにはできない。シミュレーターは、系統的な実習を可能にし、一方で特に稀な事象への対応を学習することによって、患者を傷つけず周囲を危険に曝すことなく学習・練習できるのが大きな特徴である。

当初よりゲームとして製作されている各種のソフトはもとより、元来はシミュレーターとして出発しながら、現在では独立のカテゴリーに成長したものも少なくない。各種模型飛行機の競技・モデルカーのレースはもちろん、テレビで放映されるロボットコンテストもこれに属するだろう。

チェスと将棋は、当初は人と闘うプログラムとして開発されたが、現在ではチェスでは人間はパソコンにまったく敵わなくなり、ソフトウェア同士の闘いに興味移っているという。将棋の場合も、当初はただの「遊び」として開始されたが、21世紀初頭の現時点でプロと互角という。2日間かける名人戦ではプロが強いが、6時間の制限ならパソコンが強く、現時点で最強ソフトに勝てる可能性のあるプロの棋士は数百人未満で、しかもパソコンはどんどん強力になっておりプログラムの改良も進むから、間もなく人間は敵わなくなるはずというのが、羽生善治（はぶよしはる）名人の意見である<sup>2)</sup>。

### シミュレーターの種類（表1）

表1 シミュレーターの種類

数学モデル（数式モデル）
電気回路モデル（等価回路）
機械装置（模型）
コンピュータモデル
パソコン単体で使うモデル
複雑な機械モデルと大仕掛けなコンピュータソフトウェアを組み合わせた高価なモデル

シミュレーターの種類を簡単に概観する。もっとも簡単に理解・解釈の容易なのが数学モデルないし数式モデルである。それに近接したものとして、電気回路モデルを挙げられる<sup>3)</sup>。いわゆる「等価回路」が一種のシミュレーターである。

次が機械的な装置、いわゆる「模型」である。模型の乗り物は子供の遊び・楽しみと把握される一方でシミュレーターとして実用に供する場合も多い。模型のヘリコプターを種まき・農業散布・谷にロープを渡す使用などは模型ではあるが、用途は実物の用途と等しい。

最後がコンピュータモデルで、これもごく簡単なパソコンモデルから実機のトレーニングに使用するフライトシミュレーターのように、複雑な機械モデルと大仕掛けなコンピュータモデルを組み合わせた高価なものまでレベルの幅はひろい。

図1 は同一の事柄を、数式と機械モデルの図、それにグラフで表現した例である<sup>4)</sup>。

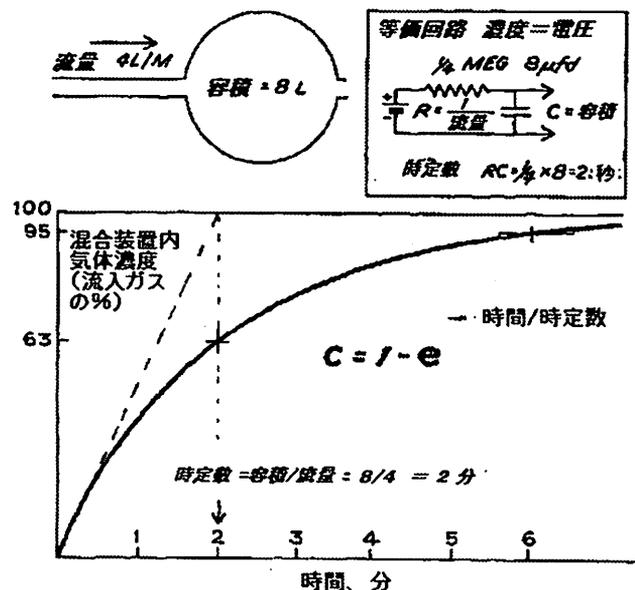


図1 定量の容積に定流量の流れを流し込んでよく混合した場合の濃度変化を、数式と電気アナログと機械モデル、それにグラフで表現した例である<sup>4)</sup>。筆者が日本語化した。

## 医学における解析とシミュレーション

医学と医療におけるシミュレーションの応用の例を挙げる。

### 1) 生体システムの解析とシミュレーション<sup>5)</sup>

生体システムの解析にシミュレーションを応用する例は数多いが、その中で大規模なものとしてテキサス大学の故ガイトン (Guyton AC) 教授を中心に行われたものを挙げよう。このモデルは人体生理の「すべて

の面を包含する」内容で、1960年代に当時のアナログコンピュータおよびハイブリッドコンピュータを使用してはじまったもので、その後現在のコンピュータ技術に移植されており、日本でもいくつかのシステムに応用され、その一つが後で述べる商品である。

### 2) 吸入麻酔のファーマコキネティクス<sup>6-11)</sup>

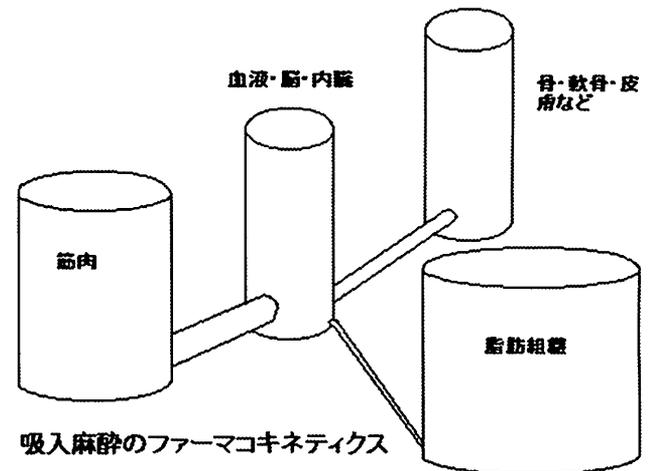


図2 薬物のファーマコキネティクスを実体模型にする図、各タンクの太さがコンパートメントの大きさを、深さが薬物濃度を表現する。タンクをつなぐ管の太さは、血流と移動の容易さを表現する。筆者作成。

医学の中の麻酔科学の領域では、「吸入麻酔のファーマコキネティクス」が1950年代にシミュレーション分析が始まり1970年頃までは大きな領域だった。当時の技術では、吸入麻酔薬の実際の測定にはいろいろな困難が伴った上に、吸入麻酔薬のファーマコキネティクスは数式や簡単なモデルで優れた解析可能であり、コンピュータ時代になってさらに容易になった故で、実は「ファーマコキネティクス」という用語が一般化して分析が盛んになった1970年代には、「吸入麻酔のファーマコキネティクス」の研究はほぼ完了しており、この領域でその後に原著論文として提出されたものはむしろ数少なく「落穂拾い」的な内容にとどまっている。吸入麻酔のファーマコキネティクスのモデルには、生理モデルが適用されている点も特徴で、つまり等価回路や等価コンポーネントを作成する際に肺・心臓・脳・内臓・肝臓・腎臓・脂肪組織・筋肉などの数多くのコンポーネントを組み合わせている。

理由は、次のような要素によっている。

- 2-1) 吸入麻酔薬の場合、薬物の移動は血流と組織への溶解度に依存し、血管壁・細胞壁でのバリアが存在しない。
- 2-2) 摂取と排泄はもっぱら肺と換気に依存し、腎や皮膚からの喪失は一時近似としては無視できる。

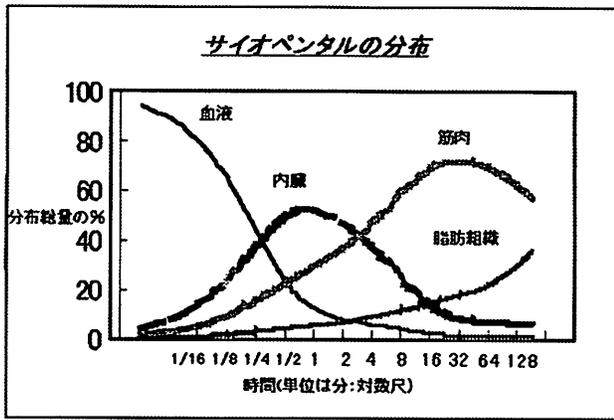


図3 薬物のファーマコキネティクスの図の例：サイオペンタルは、投与後数分で覚醒する。血中濃度は投与直後から急速に低下し、内臓の量も数分で減少に向かう。その時点では薬物は筋肉組織に移行し、さらに遅れて脂肪組織へ移行する。筆者の論文より<sup>15)</sup>。原文は英語だが、図の説明を日本語化した。

2-3) 体内の代謝は一般に微量で、やはり一時近似としては無視できる。

こうした条件によって、基礎の微分方程式が常に線形であって数学的手順やコンピュータを使わない単純な電気回路でもある程度有用な解析が可能であった。

### 3) 薬物動態の分析

現在の医療は、数値計算に大幅に依存しているが、その例として各種薬物の投与方法などが挙げられる。こちらはコンパートメントモデルによる分析であり、上記の吸入麻酔薬の場合と比較するとコンパートメントの数はむしろ少ない。その代わりに、血液中濃度と作用点での濃度を推測する際には代謝と排泄の要素が厳しく要求され、その点が上記の吸入麻酔薬のファーマコキネティクスとは異なっている。現在、麻酔の臨床が従来の吸入麻酔薬中心から静脈麻酔薬中心に移行してきているが、条件の一つにこのような手法によって、「麻酔薬の作用点（脳）濃度」がある程度精度よく計算できるようになったことも挙げられよう。

### 4) 肺ガス交換

生理学は、先に挙げたガイドンの分析を始めとして分析の種類・数が多い。ここでは、肺のガス交換にこの手法を適用した筆者自身の研究論文を例に引く<sup>12)</sup>。肺のガス交換は通常は換気側も定常流すなわちガスが一方向きに定常流で流れているとして分析するのが慣例だが、実際には往復換気つまり出たり入ったりしていることは明らかである。それによって、「吸気はしたけれど肺胞には達しない成分と、呼気はしたけれど外界に達しない成分」とが存在し、それを「死腔換気」と呼ぶ。そうして、吸気の終わりには肺胞の酸素が多くて二酸化炭素が少なく、逆に呼気の終わりには肺胞

の酸素が低くて二酸化炭素が高いことは容易に想像できる。その関係を分析したいが、筆者の狙いはもう一つあって、自発呼吸（ふつうに横隔膜が働いて呼吸する状況）では吸気で肺が膨らむと同時に心臓への静脈還流が増加して肺血流が増加し、呼気で肺がしぼむと同時に心臓への静脈還流も減少して肺血流も減少する。一方、人工呼吸（外から人工呼吸器で押し込む）では、吸気で肺が膨らむと同時に心臓への静脈還流が減少して肺血流が減少し、呼気で肺がしぼむと同時に心臓への静脈還流が増加して肺血流は増加する。つまり、自発呼吸と人工呼吸では、肺気量の増減と肺血流の増減の位相関係が逆になる。

ここまでは、判明していたり想像できたことだが、この関係をガス交換に当てはめると自発呼吸では吸気の終わりに肺胞の酸素が多くて二酸化炭素が少ない時に肺血流が増加するからガス交換に有利（酸素を大量に取り込み二酸化炭素を大量に呼出する）のに対して、人工呼吸では呼気の終わりに肺胞の酸素が少なく二酸化炭素が多い時に肺血流が増加するからガス交換は不利（酸素を取り込みにくく二酸化炭素を呼出しにくい）はずである。そうした想定の下に計算したところ、ほぼ予想通りの結果が得られた。微分方程式はできたものの、酸素と二酸化炭素の解離曲線が直線でない点、二つのガスがヘモグロビンに対して面倒な相互作用を有する点など、解析にも手間を要し計算の手順はなかなか厄介で、大げさなプログラムになった。計算自体は今ならパソコンで簡単だが、1972年当時は大学のコンピュータセンターに通ってカードスタックをあずけ、しかも費用もかかった。

## 医療におけるシミュレーション

医療におけるシミュレーションの応用は、トレーニング装置としての用途が重要で、用途もレベルも多彩である。これを簡単な実体模型・パソコン上のシミュレーター・大掛かりな実体模型などに分けて考察する。

### 1) 簡単な実体模型

もっとも単純なものとしては、各種の模型たとえば点滴練習用模型・気管挿管練習用模型・救急蘇生模型などが挙げられる。この中で、救急蘇生模型の「レサシアン」と呼ばれるものが1950年代に創始という長い歴史を有しており、種類も多く実際にもひろく普及している。他にも種類が多い。

### 2) パソコンシミュレーター

パソコンの普及に伴って各種のシミュレーターが開発されているに普及している。筆者自身もパソコンの初期に「呼吸管理シミュレーター」を開発した。集中治療室に入室した重症患者に診断と治療を施すことによって、48時間以内に診断と治療が妥当なら軽快

退出でき、不適切なら逆に重症化した場合によっては死亡するというプログラムであった。なかなか好評であったが、ウィンドウズ以前にMS-DOS レベルで開発した故に、図が乏しくて現在では生命を失っている<sup>13)</sup>。

現在も使われるものとしては、EKG のシミュレーターは種類が多い。例としては、古谷実氏（平塚共済病院）の作品が"http://hp.vector.co.jp/authors/VA010695/soft\_contents.html"に掲示されており、小型だが使いやすい。

麻酔回路のパソコンシミュレーターとしては、VAM (The Virtual Anesthesia Machine, <http://vam.anest.ufl.edu/index.html>) という作品がフロリダ大学のスタッフによって開発されて、日本語版を含めて世界30ヶ国語に対応して無料で配布されている。主に麻酔器の働作を解説するものであるが、大変に行き届いた作品である。(図4)

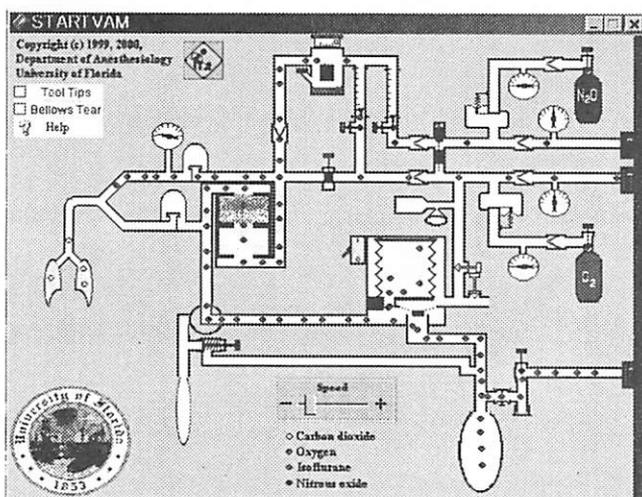


図4 VAM の初期画面：実体は動画で、ガス粒子や人工呼吸器のペローなどが動くが、ここでは固定した。また実物のカラー画面を、印刷用にモノクロームに変換した。

有料の製品としては、医学書院と日本電気が共同開発したシムクールとシムアネステジアという二つの製品がある。前者は救急医療のシミュレーターであり、後者は麻酔医療のシミュレーターである。

定価28000円は内容からみれば高価ではないが、個人で購入使用するのはためらうだろう。しかし、教室や部局で購入して使用するのは有用と思う<sup>14)</sup>。いずれも上記ガイトン教授のモデルを基礎にして作成されている。

### 3) 実体シミュレーター

「手術室類似のスペースに麻酔器と模擬患者をおいて実際に麻酔する状況」をシミュレーションするもので、外国生まれだが日本でも九大・兵庫医大・浜松医大

などいくつかの施設に導入されて稼動している。東京では、窓口会社の東機貿(株)にあって試用が可能なようである。価格は数千万円であり、他にスペースの要素と使用と維持のためのマンパワーが必要である。

### シミュレーターとしての生体機能代行装置

臨床工学技士の役割の一つが、生体機能代行装置(透析装置、人工心肺装置、人工呼吸器、高圧タンク、およびその周辺の機器)を使用することである。

ところで、こうした装置を一般には「シミュレーター」と意識はせず、シミュレーターに含めることもないが、実はその一部のペースメーカー・人工心肺装置・透析装置・人工呼吸器などはいずれも「一種の生体機能シミュレーター」でもある。たとえば、ペースメーカーは心臓が有するペースメーカー機能を電気装置で代行するシミュレーターであり、人工心肺装置は心臓と肺の機能を代行するシミュレーターであり、透析装置は腎機能を代行するシミュレーターであり、人工呼吸器は横隔膜の機能を代行するシミュレーターに他ならない。

つまり、臨床工学技士は「シミュレーターの使用を生業とする職種」ともいえるだろう。

### おわりに

医療と医学におけるシミュレーションとシミュレーターを概観した。特に筆者の所属する臨床工学専攻科が育てる臨床工学技士は、本質的に「シミュレーターの使用を生業とする職種」であることを指摘した。

言うまでもないことだが、シミュレーションは実物とは「まったく異なる」もの、実物の一面を抜き出したものにすぎない。だからこそ、その面を解釈し提示するのに有用なのであって、「実物に近づける努力」はまったくムダではないとしても、必ずしも実り多いものではない。

### 引用文献

1. Schwid HA. A flight simulator for general anesthesia training. *Comput Biomed Res.* 20: 64-75, (1987)
2. 羽生善治, 伊藤毅志, 松原仁共著. 先を読む頭脳. 新潮社, 東京. (2006)
3. Mapleson WW. An electric analogue for uptake and exchange of inert gases and other agents. *J Appl Physiol.* 18: 197-204. (1963)
4. Papper EM, Kitz RJ. Uptake and Distribution of Anesthetic Agents. McGraw-Hill, New York. (1963.)
5. Guyton AC, Coleman TG, Granger HJ.

- Circulation:overall regulation. *An Rev Physiol* 34 : 13-46, (1972)
6. Kety SS. The physiological and physical factors governing the uptake of anesthetic gases by the body. *Anesthesiology* 11 : 517-526. (1950)
  7. Kety SS. The theory and applications of the exchange of inert gas at the lungs and tissues. *Pharmacol Rev* 3 : 1- 41. (1951)
  8. Fink BR. Diffusion anoxia. *Anesthesiology* 16 : 511-519 (1955)
  9. Epstein RM, Rackow H, Salanitro E, Wolf GL. Influence of the concentration effect on the uptake of anesthetic mixtures: The second gas effect. *Anesthesiology* 25 : 364-371. (1964)
  10. Eger EI. *Anesthetic Uptake & Action*. Williams & Wilkins, Baltimore, (1974.)
  11. 諏訪邦夫：吸入麻酔のファーマコキネティクス。克誠堂。東京。(1986.)
  12. Suwa K, Bendixen HH. Pulmonary gas exchange in a tidally ventilated single alveolus model. *J Appl Physiol* 32 : 834-841. (1972.)
  13. Suwa K. A computer program for studying blood gases in respiratory care. *J Anesthesia* 1 : 155-161. 1987.
  14. 落合亮一監修、日本電気製作。SimAnesthesia (シムアネステジア) 医学書院、東京 (2000.)
  15. Suwa K. Reproducing the classical research on computer study is easy. *J Anesthesia* 14 : 48-49. (2000.)