総説論文

シミュレーション医学教育の現状

—日米欧医療訓練センタ比較調査報告—

寺田尚史¹⁾, 和田則仁²⁾, 黒田知宏³⁾

1. 概要

本研究では、大量の医療三次元画像データを高速に処理・表示する画像処理技術、計算機上で事象の再現や試行を行う模擬実験（シミュレーション）技術、様々な場所に情報が埋め込まれ誰でも容易にアクセス可能なユビキタス技術などを中心とした最新の情報技術（IT 技術）を活用した将来型医療安全教育・訓練手法に関し、現状の活用状況や研究開発動向、将来実用化が期待される技術や手法に関する調査・研究を実施した。その結果、シミュレーション技術を応用した医療訓練が、既に欧米では広く行

われており、国内においても緒についていること、国内の技術水準は世界的にもリードする位置にあることなどを見いだした。今後、これらの技術を活かした医療教育訓練カリキュラムの整備や、医学系学会の各種資格制度と連携した指針やガイドラインの策定、さらに、医療教育訓練が集中的に実施できる環境・場をつくることにより、これまで以上に安全で質の高い医療の提供が行えるものと考察された。一方、これらの実現のためには、現在個々の研究者の研究資金によって行われている研究開発のプロジェクト化や、各病院あるいは医師個人及び、医療機器メーカーの負担となっている訓練費用の援助の必要性等、経済的な問題も浮き彫りになった。

Research of the Simulation Based Medical Education

Takafumi TERADA, Norihito WADA, Tomohiro KURODA

Abstract :

This paper presents a survey of the work done in a medical education based on a information technology (IT) and a simulation technology. We researched some medical center in Japan, Europe, and USA. Special emphasis is placed on two types of simulator. One is a human patient simulator for a education of students and intern, the other is a VR based surgical simulator for a surgeons.

Key Words :

medical training, skills training, information technology, simulation technology, virtual reality

1) 三菱プレシジョン（株）, Research and Development Division, Mitsubishi Precision Co., Ltd.

2) 慶應義塾大学, Department of Surgery, School of Medicine, Keio University

3) 大阪大学, Graduate School of Engineering Science, Osaka University

2. はじめに

本調査・研究は、最新の IT 技術を活用した将来型医療安全教育・訓練手法の指針を明確にすることによりその迅速なる発展を促し、国民が安心して享受できる質の高い医療の提供を目的として実施した。

CT, MRI, PET, 超音波などに代表される診断装置の高性能化, 内視鏡などを用いて患者への負担を最低限に抑える低侵襲手術の発展, 遺伝子工学や再生医療の登場など, 医療技術の急速な発展は計算機の性能向上など IT 技術の急速な進歩に伴っており, その成果は, 病気の早期治療・早期回復を実現し, 患者 QOL (Quality of Life: 生活の質) の向上と医療費の削減の両立を成し遂げつつある。一方, 医療技術の急速な高度化, 専門化, 細分化はこれまでにない技術と知識の習得を医療従事者に要求するものであるが, 医療教育という点での IT 技術の活用はまだ不十分であり, 従来ながらの「現場で覚える」式の教育・訓練手法が, 医療技術の向上に追いつかず, 昨今の医療事故・医療ミス増加の一つの大きな要素になっているものと考えられる。高度三次

元グラフィックス技術や, シミュレーション技術, 高速ネットワーク技術, ユビキタス技術は, 医療安全教育の面でも注目を集めており, 欧米各国では既にこれらの最新技術を適応した医療教育・訓練と評価への適用も検討され始めているが, 本邦においてはまだ研究の緒についたばかりの状況であり, 今後の発展のためには医療安全教育制度や活用手法の指針づくりが必須と考えられる。本調査研究では, 国内外の現在の取り組みや技術動向, 及び, 現行システムの実用性を評価・検証し, 新しい医療安全教育・訓練の枠組みの検討を行うとともに, その医療安全面, 医療経済面での波及効果の検討を行った。

3. 調査手法

従来の医療安全教育・訓練の方法, 新しい医療安全教育・訓練の取り組みに関し, 国内・海外での調査を行い, 比較検討を行った。調査に当たってはまず表 1 に示すように, 医師免許取得までの卒前教育, 医師免許取得後の卒後教育に分け, さらに前者に関しては, 医療の基礎知識を習得する時期 (多くは学部 1-4 年に相当) と, ベッドサイドでの臨床実習を中心としたクリニカルクラークシップ期 (学

表 1 教育時期と内容

対象 (時期)	教育施設	従来の教育内容と課題	新しい教育手法の試み	教育用ツール
卒前 学部 1 年 - 4 年	大学医学部	講義・座学・解剖実習・医学知識の詰め込み, 解剖指導医の不足	プレチュートリアル, グループによる初期体験実習	教科書・3D 解剖図・e-ラーニング・Web 教材
卒前 クリニカルクラークシップ 学部 5 年, 6 年	大学医学部	現場 OJT・指導教授同行・「観察」による知識向上 患者同意が困難な事例も	チュートリアル教育, アーリーエクスポージャー	e-ラーニング・Web 教材・マネキンシミュレータ
卒後 初期臨床研修	(厚生労働省指定) 臨床研修指定病院	現場 OJT・新卒後臨床教育制度 限られた症例	マネキンシミュレータによる救急医療・チーム医療の実習	e-ラーニング・Web 教材・マネキンシミュレータ
卒後 専門医教育	各大学病院, 各病院, 学会講習, 訓練センタ	現場 OJT・助手として技能習得 「習うより慣れる」・「技術を盗め」, 限られた症例	ボックストレーナ, 手術訓練用 VR シミュレータの導入	ボックストレーナ・ウェットラボ・手術訓練用 VR シミュレータ

部 5, 6 年) に、後者に関しては、資格取得後 2 年間の初期臨床研修と、その後の特に学会認定の専門医資格取得を目指す時期に分類し、各時期に特徴的な教育手法・カリキュラムと教育用ツール等の整理を行った。次に、新しい教育用ツールとして注目を集めている、e-ラーニング・Web 教材、マネキンタイプシミュレータ、手術訓練用 VR シミュレータを中心に技術調査を行った。最後に、国内外の関連学会及び、医療トレーニング施設において、これらの活用状況や教育カリキュラムに関し、現地調査を実施した。

4. 調査結果と考察

4.1 医療教育の現状

卒前の基礎知識習得期においては、従来、書籍や講義等、いわゆる「活字と図」による教育が中心であった。IT 技術が進歩した今日でも、基本的に大きな変化はないが、より視覚的 (ビジュアル)、より対話的 (インタラクティブ) な教材が多く使われるようになってきている。その代表的な例が 3D 映像を用いた解剖図である。

3D 解剖図は、CT、MRI などの医療画像診断装置によって得られた映像を再処理して 3 次元画像として提示することにより、よりリアリティの高い学習を可能としている。特にパーソナルコンピュータ (PC) 用の教材ソフトウェアでは、3D の特徴を活かして、任意の見たい方向からの画像や、断面画像、色分け処理された画像などを学習者が設定・選択する機能が整備されている。

卒前臨床教育では、臨床現場で実際の患者に接する前段階として、マネキンタイプシミュレータを用いて、患者への接し方の学習や医療知識の確認の他、皮膚縫合、BLS (Basic Life Support: 一次救命処置)、気管挿管、ACLS (Advanced Cardiac Life Support: 一次救命処置)、静脈採血等の手技の習得を行うことが主流となってきている。更に、卒前教育として、卒後臨床研修へのスムーズな導入

図1 日本内視鏡外科学会 ボックストレーナを用いた訓練 (同学会 HP より転載)

を目指して、チュートリアル教育、アーリーエクスポーザーなどの疑似臨床体験に基づく学習の後に、患者の同意を得る根拠となる OSCE (Objective Structured Clinical Examination: 客観的臨床能力試験)、CBT (Computer Based Test) などの客観的評価を経て侵襲的医療行為を伴う臨床実習を実施する、より実践的な教育手法がとられるようになってきていることも挙げておかねばならない。本研究で調査を行った岐阜大学医学部では、いち早くこの教育手法を導入すると共に、問診や触診などにも対応した「バーチャル患者ロボット」の開発も進め、大きな成果を挙げている。今後同様の取組みが各大学へ普及していくのか注目すべき点である。

卒後初期臨床研修においては、卒前研修にも増して、マネキンタイプシミュレータの活用が重視されている。卒前教育に比べて、侵襲的手技や診察手技など、臨床に直結した手技の習得に用いる割合が高くなっている。特に、医療チーム内での連携と瞬時的な判断が要求される救急医療の訓練には、必須のアイテムとなっている。

専門医教育に関しては、既に十分な医療知識と技能、及び、経験を持つ医師が、修得した技能の認定を受ける、という点で専門医認証制度と深く関連しており、卒前教育、卒後 (後期) 臨床教育とは大きく様相が異なっている。また、多くの専門医認定が

あり、全てを網羅するのは難しいため、本研究では、外科分野、特に低侵襲手術とされる、内視鏡下手術を中心に調査を行った。

専門医の認定は、各学会の規定に基づき、修練年数、症例数、論文等の業績、講習会やセミナーへの参加などの一定条件を満たした申請者への筆記試験で行われているところが多い。専門医認定に技能認定を取り入れているところは少なく、日本内視鏡外科学会では関連学会と連携して、専門医の指導に当

たる認定指導者の認定に当たり、術者として担当した未編集ビデオによる審査を行っている。これまでに1,000人以上の応募があり、審査の合格率は各領域で40-50%であった。一方、専門医教育としては、従来ながらの熟練医による臨床現場でのOJT (On the Job Training) における「習うより慣れる」が主流である。しかしながら、上記の低侵襲手術分野では、指導医の不足や手術症例そのものの不足などから、十分な訓練が難しい状況となってい

表2 関連学会における取組み

学会名	対象及び活動内容
日本外科学会	「外科専門医」と「外科指導医」資格の認定を行っている。教育としては、各資格の認定単位の対象となる「卒後教育セミナー」と「生涯教育セミナー」を実施する他、手術ビデオライブラリや外科学用語集 Web の発行を行っている。07 年度学術集会では、「内視鏡外科手術における教育の確立へ向けて」や「世界の外科医教育の現状」などのシンポジウムが開催され、医学教育への関心が高まっている。
日本内視鏡外科学会	内視鏡外科手術を対象とする関連学会と連携して、ビデオ審査を中心とした「技術認定制度」を実施している。また、月に数回開催される「内視鏡下結紮・縫合手技講習会」では、講義とボックストレーナによる実技トレーニングを実施。06 年度総会では、シンポジウム「内視鏡外科手術の教育と評価」の他、「教育-VR シミュレーター」で手術訓練用 VR シミュレータによる教育効果等に関する発表が行われた。
モデル&シミュレーション医学教育研究会	学部学生への医学教育の充実を目的とし、主にマネキン型シミュレータを用いた医療教育の研究と普及を行っている。特にシミュレータ教育においてまだまだ不十分とされる「教育シナリオ・カリキュラム」「教育ソフトパッケージ」の研究・開発に力を注いでいる。
日本医療教授システム学会	医療教育の充実のために、「研修・訓練コースの開発、普及と改善」、「シミュレーションセンターの支援」等を目的に設立された。ハワイ大学と連携して、「医療教授システム国際シンポジウム」を開催。
日本 VR 医学会	バーチャルリアリティ技術の医療応用と医工連携をテーマに設立された。07 年度学術大会では、医療 VR システムを研究している各大学の研究デモを行った「学術展示」や、シミュレータによる専門教育として確立された運用が行われている「フライトシミュレータ」の講演などが開催された。
MMVR Medicine Meets Virtual Reality	IT 技術を用いた医療教育訓練システムに関する最も著名な学会。毎年 1 月に米国西海岸で開催され、医療 VR に関する最新の情報が入手できる。
SESAM Society in Europe for Simulation Applied to Medicine	欧州最大のシミュレーション医学教育に関する学会。当初はマネキンシミュレータを用いた教育手法やシミュレーション訓練センタの運営等が主要議題であったが、ここ数年、VR シミュレータへの関心も高くなっている。毎年 6 月に会議を開催（開催地は欧州内で毎年異なる）している。
SSH Society for Simulation in Healthcare	2004 年に米国で設立されたシミュレーション医学教育に関する学会。医療全般に亘るタスクトレーナー、マネキンタイプシミュレータ、VR シミュレータの活用が主要議題である。毎年 1 月にフロリダにおいて、IMSH (International Meeting on Simulation in Healthcare) を開催している。

図2 テルモ社シミュレーション訓練施設の様子
(同社パンフレットより転載)

図3 ESIにおける訓練の様子
(同センタパンフレットより転載)

る。このような状況の下、基本手技の訓練を目的とした「ボックストレーナ」や、基本手技と同時に特定の手術の擬似体験が可能な「手術訓練用 VR シミュレータ」による訓練が徐々に広がりを見せている。

ボックストレーナは安価で、かつ取り扱いも容易であることから、多くの大学や病院でも導入され、「自主学习」用機材として使われている。また、日本内視鏡外科学会では、ボックストレーナを用いた実技指導を定期的に行い、参加者には技術試験認定申請のための参加証明とポイントが与えられる。一方、手術訓練用 VR シミュレータは非常に高価で、また取扱にも一定の習熟が必要であるため普及率はまだ低く（全国で 10-20 箇所程度）、まだその有効性を見極める段階にあると言える。

4.2 医療訓練センタ訪問調査

国内外でシミュレータ教育の導入を図っている複数の拠点を訪れ、教育プログラムの運営方法、シミュレーションシナリオの取得方法、制度的なインセンティブ、経済的裏付け等の調査を行った。

九州大学では、「ボックストレーナ」、「手術訓練用 VR シミュレータ」と「Live tissue（動物実習、ウェットラボ）」を組合せた講習会を開催している²⁾。また、名古屋大学³⁾、や大阪大学⁴⁾、では学生や関連病院の医師を対象に、独自のカリキュラムによ

るトレーニングを行っている。

米国及び欧州では、IT 教材・Web 教材・e-learning、及びマネキンタイプシミュレータの医療教育への活用は幅広く浸透しており、これらの活用に関する複数の学会が 10 年以上前から活動を行っている。特に欧州においては、近年動物愛護に対する社会的要求が強まりコスト面、倫理面から動物を用いた医学教育が困難になりつつある中、動物実習の代替としてシミュレータ教育を導入する動きが強まりつつある。

更に、専門医教育においては、資格取得及び更新条件に手術訓練用 VR シミュレータを用いた訓練を取り込んでいるところが多く見られた。医師免許更新制度の中の必要得点の一部として位置づける（ドイツ）、専門医認定制度の必要得点の一部として位置づける（イギリス）、州法、あるいは、院内規定として実地臨床にはいるまでの必須課程として位置づける（スウェーデン、スペイン）などの規則の導入が行われている。特に医師免許更新制度の得点については、EU の枠組みの中で得点を互換にする動きがあり、シミュレータ教育の導入が更に加速される可能性が高い。

インセンティブについては国内でも同様であり、内視鏡外科学会の得点制度に組み込む（九大）ほか、卒後臨床教育課程の一部として組み込む（阪大、岐阜大）などの取り組みが徐々に行われ始めて

表3 訓練センタ訪問先一覧（国内）

施設名(及び運営主体)	対象	導入機材	内容
岐阜大学医学教育開発研究センタ	医学部学生	マネキンシミュレータ、問診訓練システム・患者ロボット（自主開発）	マネキンシミュレータを用いた「模擬体験実習」とカリキュラム開発の他、問診訓練システムや患者ロボット（言語による応答や表情の変化などが可能）の研究開発を行っている。
九州大学内視鏡外科手術トレーニングセンタ	専門医を目指す医師（全国）	ボックストレーナ、手術訓練用 VR シミュレータ、ウェットラボ	スタンダードコース（月1回、各種内視鏡外科手術術式の習得、受講料2日間5万円）とアドバンスコース（不定期、実践的な手術指導）がある。日本内視鏡外科学会の技術認定制度後援実技セミナー3点が取得できる。
大阪大学病院未来医療センタ	医学部5、6年生、研修医	ボックストレーナ、手術訓練用 VR シミュレータ	ボックストレーナでは、ビーズ玉やメジャー（巻尺）等を用いた独自の訓練を実施。また夜間でも「自主学習」が出来るような運用を行っている
名古屋大学鏡視下トレーニングセンタ	学内・関連病院医師・研修医	ボックストレーナ、手術訓練用 VR シミュレータ	基本的なカンシ操作技術の習得を中心にトレーニングを組立て。トレーニングシステムとモニタの位置を工夫するなど、独自のカリキュラムを構築している。
日本メドトロニック教育センタ	医師（主に循環器系）	循環器領域トレーニングシミュレータ	併設のカンファレンスルーム用いた講義（製品の取扱や新しい手技の解説など）と、カテーテル手術訓練用 VR シミュレータによる訓練を行っている。
Ethicon 須賀川トレーニングセンタ（Johnson & Johnson 社）	医師（内視鏡下手術関連）	ボックストレーナ、手術訓練用 VR シミュレータ、ウェットラボ	全世界に展開する Ethicon 社トレーニングセンタの一つ。ボックストレーナ、手術訓練用 VR シミュレータ、ウェットラボを効率的に組み合わせた複数の訓練プログラムを準備。
テルモメディカルブラネックス	医師・看護師・放射線技師等	マネキンシミュレータ、循環器領域トレーニングシミュレータ	マネキンシミュレータを用いた大規模な「模擬病棟」による臨床教育・チーム医療教育がメイン。病室や手術室における「器具の配置」なども訓練の一環となっている。

いる。

一方、経済的裏づけについては各国の制度や、シミュレーション拠点の運営形態によって大きく異なり、学内・院内の教育費用でまかなう、州政府の教育費用でまかなう、設立会社のショールームとして位置づけられ社内費用でまかなう等の「持ち出し」形態の運営も多く見られる一方、受益者に負担させる形態で費用徴収を行うもの、あるいは、特定企業に拠点利用時間枠、シミュレーション教育プログラム作成請負などを販売し、企業の「貸ショールーム」となることで収入を得ることも行われており、一定の経済効果を上げている。国内では、消耗品費用分だけを徴収している形態をとっている拠点（九大）もあるが、基本的には、運営拠点自身の持ち出

しによってまかなわれているのが実態である。特に教育を行う講師、カリキュラムやソフトウェアを構築する開発人員の費用をあてがうことが難しく、一部（イギリス、スペイン）の例をのぞいて、人件費は持ち出しになっている施設が多い。

今後のシミュレーション教育普及における重要な点として、いかによりシナリオを作り出すのかが多くの施設で議論の中心であった。訓練シナリオ運用の自由度から見た場合、現行の VR シミュレーション教育システムは「編集」が非常に難しく、教育に適用するにはまだ課題が多いという指摘が多く聞かれた。IT 技術を用いていながら、商品として「固まった」形態をとってしまっていることで、実際の教育場面で求められる柔軟性が欠けてしまっている

ことは、非常に大きな問題であり、今後のシミュレーション機器やシステムのあり方を考える上で、重要な視点であると考えられる。

4.3 技術動向

(1) IT 教材・Web 教材・e-learning

3D 映像を用いた解剖図と、ロールプレイング形式で解答を導き出す IT 教材などが、より視覚的、より対話的な教材として多く使われるようになっていく。また、この他に、インターネットの発達を背景に、いわゆる e-learning の普及が目ざましい。これは、従来の教科書を「Web ページ」に置き換えて配信するものや、講義を衛星中継によりライブ配信するもの、ビデオ録画したものをダウンロードして見るものなど、様々な形態のものが見られる。特記すべき物として、手術映像の生中継やビデオ録画された手術映像をデータベース化して配信するサイトが増えていることである。このような形態は、通信帯域の増大や圧縮技術の進歩、更にはファイル配信技術の進歩により、また国境を越えた配信が容易に行えることから、今後更に増大するものと思われる。

また、これまで膨大なデータ量のために困難であった Web 上での利用が難しかった医療画像の分野においても、上記のような通信帯域の増大、画像処理技術の発展により、徐々に可能となってきた。今後、Web を利用した医療画像診断技術の教育や、手術シミュレータ訓練への応用が進むものと考ええる。

(2) マネキンタイプシミュレータ

マネキンタイプシミュレータは、人の外観（全身）を模擬したタイプと、人体の一部を模擬したものに大別できる。前者は、胎児（妊婦シミュレータと組合せて、出産の模擬訓練が可能）から成人まで、数多くのタイプが製品化されている。以前は、救急救命講習でよく用いられていたような、単なる「マネキン」だけであったが、機能の発展は目ざま

図4 マネキンシミュレータ「SimMan」
(Laerdal 社 HP より転載)

しく、心音・呼吸音の他、脈拍や血圧などのバイタルサインを測定可能なもの、更に、コンピュータと連動して、投薬などの処置によりこれらのバイタルサインが適切に変動するものなど高度化が進んでいる。後者のタイプでは、気管挿管や静脈穿刺、静脈注射、皮膚縫合などの他、乳房、前立腺、直腸等の触診が可能なものなども製品化されている。国内では、京都科学社や坂本モデル社が独創的な製品開発を進めており、世界的にも注目を浴びている。マネキンタイプの特徴は、外観・形状・触り心地、などが人体に非常に近いことであり、今後も更なる発展が期待される。

一方で、導入はされたものの、まだ十分に使い切れていない面も指摘された。その原因の一つが、教育カリキュラム、あるいは教育シナリオの未整備と使用後の評価手法が確立されていない点であると言われている。この点に関しては、モデル&シミュレーション医学教育研究会や SimClub（本年3月に「日本医療教授システム学会」へ移行）を中心に、教育カリキュラムやシナリオの開発を行う動きが見られ、今後の動向に注目したい。

既に多くの施設で導入されその費用対効果が認められていること、また破損や磨耗、あるいは機能追加などによる定期的な更新が見込まれること、装置の価格から考えて各導入機関の予算処置でも購入可能なことなどから、今後も発展が期待される。一方で、更なる普及を目指す上で、先に述べた教育カリキュラムやシナリオ（ソフトウェア）の開発は必須のものとするが、これにはある程度のコストが必

表4 訓練センタ訪問先一覧（海外）

施設名(及び運営主体)	対象	導入機材	内容
European Surgical Institute (Ethicon/Johnson&Johnson 社)	医師（内視鏡下手術関連）	ボックストレーナ、手術訓練用 VR シミュレータ、ウェットラボ	ボックストレーナ、手術訓練用 VR シミュレータ、ウェットラボを効率的に組み合わせた複数の訓練プログラムを準備。欧州各地から受け入れている。
Karolinska Center for Advanced Medical Simulation (Karolinska Hospital)	学内及び附属病院 医師・看護師	マネキンシミュレータ、ボックストレーナ、手術訓練用 VR シミュレータ	内視鏡下手術トレーニングでは、実際の手術をするために必須となっている。また、マネキンシミュレータを用いたチーム医療教育にも熱心である。
Bristol Medical Simulation Center	看護師	マネキンシミュレータ	看護師を対象としたチーム医療教育がメイン。「独立運営」を目指し、外部団体と提携している。
Stanford University Medical Media and Information Technologies	医師	マネキンシミュレータ、手術訓練用 VR シミュレータ	数多くのシミュレータを開発・改良し、医師の研修に使用している。さらに、受講者の評価も行われており、世界的にも先進的な取り組みがみられた。
Brigham and Women's Hospital Center for Medical Simulation	医師・看護師・その他	マネキンシミュレータ	主として救急医学と ICU でのチーム医療のトレーニングを行っており、医療安全を推進する上でクリティカルな部分を担っている。企業の「貸しホール」そして機能するなど、外部資金の導入実績を多く持っている。
Children's Hospital Boston	医師・看護師	マネキンシミュレータ	乳幼児のマネキンを用いた看護師のシミュレーション教育を実施。専門の技術者がマネキンの状態をコントロールして、より効果的に看護学生の教育を行っている。
New York University	医学部学生	Web 教材	WISE-MD (Web Initiative for Surgical Education Modules) と呼ばれるネット環境で外科領域の卒前教育を実施している。

要となる。また、評価手法の標準化等を考慮した場合、各メーカーの負担に委ねるのも難しい点がある。この資金をどこから調達していくのが今後の大きな課題である。

(3) 手術訓練用 VR シミュレータ

IT 技術と仮想現実感提示技術（VR 技術）の発展に伴い、この 10 年ほどで急速に製品化が進められてきた。現在は欧米のメーカーから数種類の製品が販売されており、国内でも 10 数箇所の施設に導入されている。VR シミュレータの特徴は、画像のリアリティ（クオリティ）が高いこと、様々な症例への対応が可能なこと、希少症例や危険体験を繰り返し体験できること、などである。国内ではまだ製

図5 腹腔鏡手術シミュレータ「LapSim」
(SurgicalScience 社 HP より転載)

表 5 腹腔鏡手術トレーニングの比較

項目	ボックストレーニング	ウェットラボ（動物実習）	手術訓練用 VR シミュレータ
機能・ 訓練 内容	<ul style="list-style-type: none"> ・ Basic Skills（基本操作） カメラ操作, 鉗子操作, 把持操作 協調運動, クリッピング, 縫合 結紮操作（LCS による切離操 作, 圧排・把持操作）（布・肉等 の代わりに, シャーレに入れた ビーズや巻尺など, 訓練者が工 夫して使っている。） ・ ストップウォッチで時間計測 	<ul style="list-style-type: none"> ・ Basic Skills（基本操作） カメラ操作, 鉗子操作, 把持操作 協調運動, クリッピング, 縫合 結紮操作 LCS による切離操作, 圧排・把持操作 ポート位置の選定 膜組織・脂肪組織の剥離 ・ 手術訓練 各臓器摘出 	<ul style="list-style-type: none"> ・ Basic Skills（基本操作） カメラ操作, 鉗子操作, 把持操作 協調運動, クリッピング, 縫合 結紮操作 LCS による切離操作, 圧排・把 持操作 ・ 手術訓練 胆嚢摘出術 産婦人科（卵管閉塞・切除・筋 腫縫合） ・ 時間や誤差等の計測機能
特徴	<ul style="list-style-type: none"> ・ 実際の術具を使える ・ 縫合結紮等のリアリティが非常 に高い ・ 使い方が簡単 ・ 立上げに時間がかからない 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 実際の術具を使って, 手術の一 連の動作が実際と同じように出 来る ・ リアリティが高い（画像, 触 覚, 匂い） 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 多くの基本操作訓練が可能 ・ 習熟度（時間や誤差）の計測機 能
問題点	<ul style="list-style-type: none"> ・ 臓器の摘出ができない ・ 膜組織・脂肪組織の剥離ができ ない ・ 人体の解剖の理解にはならない ・ 病巣がない ・ 自動計測機能がない 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 動物（豚）の準備・後始末が大 変（特別な施設（手術室）, 取 扱担当者等） ・ 人体解剖との相違がある ・ 動物愛護の観点から廃止の方向 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 縫合結紮操作機能のリアリティ 低い（特に, 結紮糸の動きや触 覚） ・ 装置（特に触覚提示装置）が壊 れ易い
価格	<ul style="list-style-type: none"> ・ ボックスだけなら数十万円程度 ・ 内視鏡や術具を含めると数百万 円 ・ 実際に切開や縫合を行うと布や 肉などの「消耗品」費用が必要 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 豚 1 頭：30～50 万円程度 ・ 他に, 施設（手術室）使用料, 手配のための人件費, 手術器具 費用（使い捨て・消耗品）等が 必要となる 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 基本セットで 1,000～2,000 万 円 ・ 触覚機能は +500～1,000 万円 ・ 手術ソフトはオプション（数百 万円）

品化に至っていないが, 京都大学⁵⁾, 大阪大学⁶⁾, 奈良先端大学⁷⁾, 名古屋大学⁸⁾, 千葉大学⁹⁾, 名古屋工業大学¹⁰⁾ など, 多くの研究機関で, また企業としては三菱プレシジョン社¹¹⁾で開発が行われており, 近い将来の実用化が期待される。

一方で, マネキンタイプシミュレータと同様に, 教育カリキュラム, 教育シナリオの開発, 使用後の評価手法の確立などで研究が進んでいない点は大きな課題となっている。製品化されたものに関してもこの点では不十分であり, 前述の大阪大学, 名古屋大学等では, 既存製品を用いたカリキュラムの開発と評価手法の確立に研究の多くを割いているのが実情である。

訓練用 VR シミュレータは, その機能や模擬範囲などにより, いくつかのレベル（グレード）に分けられるが, 手術訓練用に関しても以下の 5 レベルに分類されている。

Level 1: Eye-hands coordination

基本動作の習得

Level 2: Task skills

基本タスクの習得

Level 3: Procedural training

施術手順の模擬体験

Level 4: New surgical techniques

新しい高度な手技の開発と習得

Level 5: Pre-Operative Planning

個別手術の計画、予行演習

現行の製品は、Level 3 の一部が可能となった程度であり、「初心者入門用として、学生の興味を引くためには使えるが、専門医の訓練にはまだまだ使えない」と言う声が聞かれる。今後、更なる普及を目指すためには、Level 2、及び 3 に対応した、教育カリキュラム、教育シナリオの開発、使用後の評価手法の確立と、更に、Level 4 及び 5 達成のための VR 技術の高度化の両面での発展が必要と考える。

5. 今後の展望 —資格制度との関連—

調査・検討の結果、「シミュレーション医療教育」が、今後の医療教育に不可欠であること、一方その普及を図るには、運用・制度面及び、教育カリキュラム開発の点で更なる飛躍が必要であることがわかった。

まず、開発に関して、「技術」の項で述べたように、専門医の訓練に提供できるような Level 3 を十分満足するシステムの開発には最低でも数億の開発資金が必要になると試算されている。需要予測（どれだけ売れるか）の目途がつかない中、企業の社内予算に頼った開発は非常に難しいと言える。また導入に関して、開発に多くの資金を要すること、販売台数がそれほど多くを望めないことを考慮すると、かなり高額なものとなることは避けがたい。現在導入している機関でも通常の予算の中での処理は難しく、研究助成や研究プロジェクト等の特別予算を活用しているところが多い。特殊な例として、本研究会でも見学を行った、ジョンソン&ジョンソン社須賀川トレーニングセンタ、日本メドトロニクス社、テルモ社メディカルプラネックスでは、自前予算により導入しているが、これは自社製品の販促活動費用の一環として支出しているものであり、公正取引法に關した制限などの問題点も指摘され、今後の展開にはこの点での考慮も必要とされる。

現在、多くの施設では、（自機関または関連機関

図6 羽田総合センタシミュレータの例
(航空振興財団資料より抜粋)

の受講者を除いて）3万円から5万円程度の受講料を課している。これらの費用は主に、講師への謝金や消耗品の購入、また同時に行われることが多いウェットラボでの動物の調達費用等に充てられるが、ほとんどの施設が支出超過（別予算から補填）となっている。一方受講者側は、自己研鑽として自費または所属組織からの派遣として参加している場合が多いが、受講してもそれによるインセンティブが少ないため、受講者が増える傾向にはないようである。

このように、手術訓練用 VR シミュレータに関しては、その有効性が多く認められるようになってきたが、今後、専門医教育に取り込んでいくには思い切った施策が必要になると考える。

米国におけるシミュレーション教育は、設立費と運営費の多くの部分を寄付でまかなうとともに、コース運営に関わる費用を講習費用として受講医師に課すことで費用支弁を行っている。医療技能が医師の収入に大きな影響を及ぼし、寄付文化が浸透している米国の社会的状況によるところが大きく、同モデルを本邦に導入することは難しい。

欧州の一部では企業施設で行われる認定教育コースに資金を出す試みや、共同利用のためのバーチャルセンターを州政府レベルで整備する試みが行われており、見習うべき先行例は多い。一方で、医療教育機関が整備した教育センター施設や教育プログラムを、企業の販促活動に対価を得て提供している例

もあり、公的機関の弾力的な利用を許す環境整備が社会資源の最大利用のためには有効であると考えられる。運用・制度面では、既に「シミュレーション教育」により大きな実績を持つ「航空機シミュレータ」の運用に非常に学ぶべきことが多い。航空機シミュレータにおいては、シミュレータの性能によって数段階のクラスに分けられており、クラス毎に適用できる訓練の範囲が定められている。また、訓練プログラムについては訓練シナリオも含めて詳細に定められており、航空事故調査の結果などから迅速に訓練内容に反映される仕組みが整えられている。医療においても、インシデントレポートなどから得られた「典型的事故状況」などから訓練シナリオを導き出す道筋を整えるとともに、しかるべき基準と期間を設定し、訓練プログラムやシミュレータの機能を審査・認証することが必要であると考えられた。

一方、教育カリキュラム開発の点では、二つの方向性が考えられた。まず現在のシミュレータ開発においては、「何でもできる」VR 技術を前面に出し、他の訓練シミュレータにあるような、パートトレーナ、トレーナ、シミュレータなどの目的別の設計がなされていないため、必ずしも訓練と結びついた機器開発が行われていないことなどが指摘された。このことを考慮すると、教育カリキュラムの中の「何」をシミュレータにさせるのかに基づいて、ボックストレーナなどの関連訓練器との役割分担も含めて、役割と機能を明確に定めたシミュレータ開発シミュレータ開発を行うことが必要であると考えられた。

更に、教育プログラムの可塑性を高めることが、教育者の創意工夫を生かし、様々な教育プログラムを作る上で重要であることが技術開発の上で重要な課題である。このためには、医療用データからのシミュレーションモデル半自動作成、シナリオの作り込みなどが可能なエディタ開発、一定レベルでのデータモデルの「定義」が必要であると考えられた。テルモメディカルプラネックスなどでは、カテーテルの VR シミュレータを用いた教育が行われ

ていたが、同社の要求にあわせたシステムの変更などを開発メーカ側に依頼しており、その効果は非常に大きいとのことである。ある程度の可塑性を持ったシステムを作る技術開発を、小さなシステムの集合として確立することができれば、テーラーメイドな訓練ソフトウェアの構築などが可能なのではないかと考えられた。

6. おわりに

本研究では、情報技術を活用した医療安全教育の可能性について、国内外の最新動向を調査し、今後の可能性を探った。医療安全問題が社会的にクローズアップされるようになった今、シミュレーション医療教育は、疑似「臨床体験」を可能とし、医学知識と臨床技術とを結びつける助けとなることから、臨床現場の教育負荷を軽減するとともに、臨床の望む前に「一定の基本的な臨床能力」を研修医等にあたえる手段として期待できる。

本研究を通じて情報技術を活用した医療教育は、技術的には十分適用可能なレベルに達している一方、運用面では未だ緒に着いたばかりの状況であることが明白になった。また、国内外の取り組みを調査した結果、本邦の関連情報技術は世界トップレベルにあり、運用面でのニーズにあった技術開発、利用法の積極的な検討を、臨床医学・医学教育・情報工学・経済学などの関連研究者間の緊密な連携の下で、国家的取り組みとして進めることが、本邦の臨床現場の医療安全向上、高度臨床技術の普及による国民福祉の向上はもとより、臨床医学、医療工学分野における学術的・経済的競争力の確保のためにも、喫緊の課題であることが明らかになった。

謝辞

本研究において、多忙の中、施設見学・調査に快く応じていただいた諸氏、国際医療福祉大学 北島教授を始めとし、様々な御議論・御意見を頂いた緒先生方に深く感謝致します。

なお本研究の一部は、厚生労働科学研究費補助金（医療安全・医療技術評価総合研究事業）「IT 技術を取り入れた教育・訓練システムと医療安全教育研修制度に関する研究」（平成 18 年度，19 年度実施）として行われた。

参考文献

- 1) 田辺政裕，仁田善雄；学部教育・卒後研修におけるシミュレータを利用した教育の現状，VR 医学，Vol. 7，No. 1，2008（印刷中）
- 2) S. Yamaguchi A. D. Yoshida A. Y. Kakeji A. M. Hashizume K. Tanoue A. S. Ieiri A. K. Konishi A. T. Yasunaga A. K. Okazaki, A Effectiveness of endoscopic surgery training for medical students using a virtual reality simulator versus a box trainer : a randomized controlled trial, *Surg Endosc* (2008) 22 : 985-990
- 3) 三澤一成，藤原道隆，小寺泰弘，小池聖彦，菊森豊根，中尾昭公；バーチャルリアリティ手術シミュレーターによる内視鏡外科手術の技術評価，手術，Vol 60，No. 11，pp 1765-1771，2006
- 4) Kiyokazu Nakajima, MD, Masafumi Wasa, MD, Shuji Takiguchi, MD, Eiji Taniguchi, MD, Hideki Soh, MD, Shuichi Ohashi, MD, Akira Okada, MD, A Modular Laparoscopic Training Program for Pediatric Surgeons, *JSLs* (2003) 7 : 33-3733
- 5) M. Nakao, K. Minato, N. Kume, S. Mori and S. Tomita, "Vertex-preserving Cutting of Elastic Objects", *IEEE Virtual Reality*, p. 377-378, Mar. 2008.
- 6) Y. Kuroda, M. Nakao, T. Kuroda, O. Oshiro, "Haptic Rate for Surgical Manipulations with Fingers and Instruments", *Medicine Meets Virtual Reality*, pp. 230-232, Long Beach, Jan. 29-Feb. 1, 2008.
- 7) M. J. Rissanen, Y. Kuroda, M. Nakao, N. Kume, T. Kuroda and H. Yoshihara, "Toward Visualization of Skill in VR : Adaptive Real-Time Guidance for Learning Force Exertion Through the "Shaping" Strategy", *Second Joint EuroHaptics Conference and Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems (WorldHaptics)*, pp. 324-329 Tsukuba, Japan, March 22-24, 2007.
- 8) 鬼頭正和，チウンチュンズン，森健策，北坂孝幸，末永康仁，三澤一成，藤原道隆，"三次元 CT 像に基づく腹腔鏡および鉗子操作シミュレーションの構築"，第 16 回日本コンピュータ外科学会大会/第 17 回コンピュータ支援画像診断学会大会合同論文集，pp. 77-78 (2007/11)
- 9) 牛木卓，松隈ちひろ，小石毅，中口俊哉，津村徳道，三宅洋一，"VR 腹腔鏡下手術トレーニングシステムのための複数の構造梁を用いたリアルタイム臓器変形モデル"，VR 医学，Vol. 6，No. 1，pp. 43-50，2008
- 10) M. Sakaguchi, A. Hayashi, H. You, J. Arata, H. Fujimoto, M. Fujiwara, K. Misawa, A. Nakao : Development of Bladeless Trocar Insertion Skill Training System for Endoscopic Surgery, *Proc. 3 rd Asia Conf. on Computer Aided Surgery (ACCAS 2007)*, P 110111 (2007. 12.)
- 11) 緒方正人，菊川孝明，寺田尚史，本郷新；手術手技訓練用 VR 手術シミュレータの開発，VR 医学，Vol. 7，No. 1，2008（印刷中）