

## ワークショップ：これからのスマート技師教育について

呼吸機能検査学教育における  
実習機器ハイブリッド・シミュレータの開発和田 晋一<sup>\*1</sup> § 富井 博史<sup>\*2</sup> 井 桁 洋<sup>\*3</sup> 重面 明德<sup>\*3</sup>

**要旨** 呼吸機能検査は一次検査であるスパイロメトリーと二次検査である精密検査に分けられる。特殊ガス (O<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>, CO および He) を用いて行う二次検査はガスの分析装置を装備した大型で高額な機器となるため、すべての教育現場で実習用として装備できないのが現状である。そこで、電子スパイロメータを本体とし、ガス濃度に模擬データを描出させるソフトを挿入した教育用ハイブリッド・シミュレータを開発した。本機器は肺気量や流量はフローセンサーにより実測し、疑似のガス濃度には予測値から逆算するアルゴリズムを用いて導いた生成データを使用し、リアルタイムに活用することでリアリティのある実習を可能とした。ハイブリッド・シミュレータはガス分析計がないため安価であり、煩雑なメンテナンスもなく、繰り返し測定できる利点があり、学生への教育効果が期待できる。今後、更なる検討を加え、実習機器として導入できるように改良を加えたい。

**キーワード** 呼吸機能検査、ハイブリッド・シミュレータ、アルゴリズム、生成データ

## 緒 言

呼吸機能検査は症状や画像とは異なる面を評価し、他の方法では知りえない臨床情報をもたらす<sup>1)</sup>。呼吸機能測定には一次検査であるスパイロメトリーと二次検査である精密検査に分けられる。前者のスパイロメトリーはスクリーニングや経過観察を目的とし、肺活量や努力呼気曲線、Flow-Volume 曲線等、肺気量や気流量をフローセンサー等のスパイロメータを用い測定する。一方、後者の二次検査は解剖学的な異常の検出を目的とし、機能的残気量 (functional residual capacity :

FRC) 測定、クロージング・ボリューム (closing volume : CV) 検査、肺拡散能力 (diffusing capacity for carbon monoxide : DL<sub>CO</sub>) 等、検査に合わせて特殊ガスを吸入し呼気ガスを分析する。一次検査と組み合わせることで、より詳細な臨床的評価が行える。

しかし、これらの二次検査を実施するにはヘリウム (He) ガスや一酸化炭素 (CO) ガス等の特殊ガスやガス分析計が必要である。そのため、大型で高価となり、さらにメンテナンスが煩雑となる。臨床検査学教育の現場では二次検査を含めた精密検査機器の導入はハードルが高く、座学だけの学修に終わっているケースは少なくない。

<sup>\*1</sup> 神戸学院大学栄養学部臨床検査学 § shin1wada@nutr.kobegakuin.ac.jp

<sup>\*2</sup> 株式会社フクダ産業技術開発部開発課

<sup>\*3</sup> 株式会社フクダ産業営業・マーケティング部肺機能営業課

今回、我々は電子スパイロメータを本体とし、肺気量や流量は実測であるが、ガス濃度に予測値から逆算した生成データを用いたソフトを挿入した教育用ハイブリッド・シミュレータを開発した。

## I. 測定方法と原理

本機器は電子スパイロメータ・スパイロソフト SP-790COPD (フクダ産業社製) を本体とし、二次検査が行える同社の精密検査測定装置 FUDAC-7 のソフトを挿入した。

### 1. スパイロメトリーの測定

本体は開放回路系のニューモタコグラフ型電子スパイロメータを使用し、肺活量 (vital capacity : VC) や努力肺活量 (forced vital capacity : FVC) 等の肺気量、気流量は実測値として算出される。

必要なガス：なし

必要なアナライザ：フローセンサー

### 2. 機能的残気量

(He を指示ガスとする閉鎖回路法) の測定

#### A. 本来の測定方法と原理<sup>2) 3)</sup>

機器内の回路 (容積:  $V_1$ ) に 11% の He ガス (濃度:  $F_1$ ) を含んだ混合ガスを充填する。閉鎖回路につながっているマウスピースを介して安静呼吸位で開栓し、安静呼吸すると回路内の He ガスが一呼吸ごと希釈される。希釈に合わせ He 濃度が低下し、フラットになった He 最終濃度 ( $F_2$ ) から肺気量 (FRC) を求める (式 1)。FRC 値から肺気量分画を完成させる。

$$V_1 \times F_1 = (V_{FRC} + V_1) \times F_2 \quad \dots \dots \dots \text{式 1}$$

必要なガス：He ガス

必要なアナライザ：He 分析計、気量型スパイロメータ

#### B. ハイブリッド・シミュレータの測定方法と原理

図 1 に測定風景を示す。予測値を被検者の性別、年齢、身長から予測式を使い求める。回路の容積 ( $V_1$ ) を 10.5 L、He 濃度 ( $F_1$ ) を 11% に設定し、式 1 の  $V_{FRC}$  に FRC の予測値を挿入することで最終 He 濃度 ( $F_2$ ) が逆算される。被検者はフローセンサーを介して安静呼吸すると一呼吸ごとの実測した吸気量、呼気量から希釈された予測ヘリウ



図 1 ハイブリッド・シミュレータによる機能的残気量の測定風景

ム濃度 (生成データ) が画面上にリアルタイムに表示される (図 2)。He 濃度が予測式から逆算した濃度に向かい希釈が完了すると、フラットとなり終了となる。肺気量分画は FRC 値とあらかじめ実測したスパイログラムから作成する (図 2)。

必要なガス：なし

必要なアナライザ：フローセンサー

#### C. ハイブリッド・シミュレータによる教育効果

呼吸ごとにアルゴリズムによる生成値を設定しているため、被検者の換気の高さやリズムによって He 濃度曲線は変化し、He 濃度がリアルタイムに画面で観察できる。また、最終の He 濃度から FRC を再計算しているため、途中で終了すると低値になる等、終了のタイミングによって FRC 値は異なる。このように He の希釈濃度から FRC が決定することを観察することで測定原理が理解できる。また、実技を行うことで患者の負担や注意点、手技が理解できる。

### 3. クロージング・ボリューム検査 (単一 $N_2$ 呼出曲線)

#### A. 本来の測定方法と原理<sup>2) 3)</sup>

被検者に最大呼吸位から 100%  $O_2$  ガスを最大吸気位まで吸入させる。フローメータを確認しながら一定流量 (0.5 L/s 以下) で呼出させ、呼気の  $N_2$  濃度をグラフに表示させる。 $N_2$  濃度の傾きにより第 I ~ IV 相まで区分し、第 III 相の傾き ( $\Delta N_2$ ) やクロージング・ポイントを決定し、肺内換気分布や末梢気道病変の有無を評価する。

必要なガス：100%  $O_2$  ガス

必要なアナライザ： $N_2$  分析計、気量型または流量型スパイロメータ

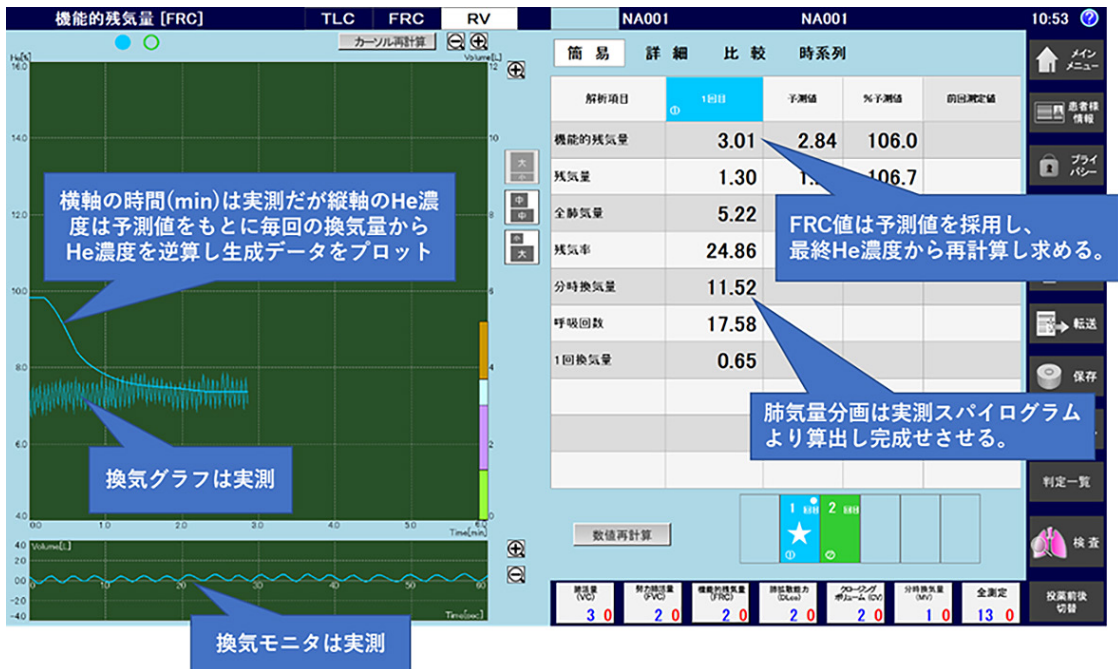


図2 ハイブリッド・シミュレータによる機能的残気量の測定画面  
肺気量は実測を用い、He濃度は生成データを使用しリアルタイムに表示させる。

**B. ハイブリッド・シミュレータの測定方法と原理**  
被検者にフローセンサーをくわえさせ、最大呼吸位から最大吸気位まで室内気を吸入させる。フローメータを確認しながら一定流量(0.5 L/s以下)で呼出させせる。肺気量は実測値を用い、呼気の窒素濃度にはダミーカーブを用意し、あらかじめ実測したVCに合わせて伸縮させ、リアルタイムにプロットし表示させる(図3)。伸縮させることで第III相の傾きやクロージング・ポイントが各被検者のVCにより変化する。単一N<sub>2</sub>呼出曲線により第I~IV相まで区分し、 $\Delta N_2$ やクロージング・ポイントを決定し求める。

必要なガス：なし

必要なアナライザ：フローセンサー

**C. ハイブリッド・シミュレータによる教育効果**  
フローセンサーによる呼出流量は実測であるため呼出手技の重要性が理解できる。さらに曲線を実測VCに合わせて伸縮させることで各被検者の曲線の傾きやクロージング・ポイントが変化する。検者がマニュアル操作で $\Delta N_2$ やクロージング・

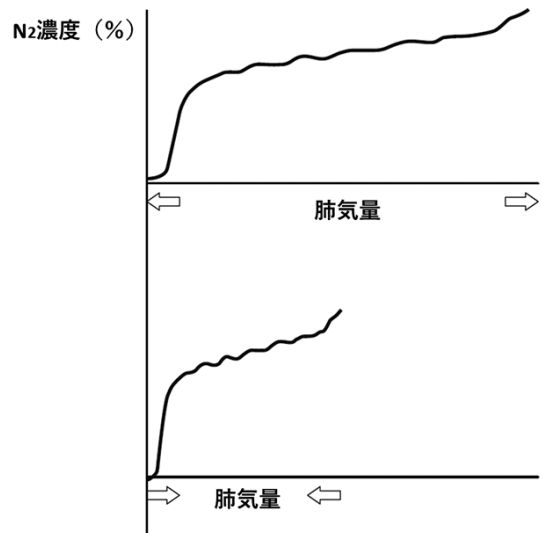


図3 単一N<sub>2</sub>呼出曲線のダミーカーブ  
実測の肺活量に合わせて伸縮し、N<sub>2</sub>濃度をリアルタイムにプロットする。

ポイントを決定することで測定手技や原理が理解できる。

#### 4. 肺拡散能検査(DL<sub>CO</sub>)

##### A. 本来の測定方法と原理<sup>2) 3)</sup>

被検者に最大呼気位から急速に0.3%一酸化炭素(CO)、10%Heを含む4種混合ガスを吸入させ、10秒間の息こらえ後、急速に呼出させる。呼気開始直後の死腔ガス洗い出し量である0.75Lを排出し、残りのサンプルガス1.0LのCO濃度とHeガス濃度を各アナライザで分析する。

DL<sub>CO</sub>は次式で求める

$$DL_{CO} = \frac{V_A \times 60}{(\text{大気圧} - 47) \cdot t} \cdot \ln \left[ \frac{F_{A_{CO}}(0)}{F_{A_{CO}}(t)} \right] \quad \dots \dots \text{式 2}$$

[V<sub>A</sub>(mL): 肺胞気量、t(s): 呼吸停止時間、F<sub>ACO</sub>(0): CO拡散開始直前の肺胞気CO濃度、F<sub>ACO</sub>(t): t秒後の肺胞気CO濃度=サンプリングCO濃度]

式2のF<sub>ACO</sub>(0)は式3で求める。

$$F_{A_{CO}}(0) = F_{I_{CO}} \cdot \frac{F_{A_{He}}}{F_{I_{He}}} \quad \dots \dots \text{式 3}$$

[F<sub>I<sub>CO</sub></sub>: 吸入したCO濃度、F<sub>I<sub>He</sub></sub>: 吸入したHe濃度、F<sub>A<sub>He</sub></sub>: サンプリングHe濃度]

また、V<sub>A</sub>は

$$V_A = V_I + \text{残気量 (RV)} \quad \dots \dots \text{式 4}$$

もしくは

$$V'_A = V_I \cdot \frac{F_{I_{He}}}{F_{A_{He}}} \quad \dots \dots \text{式 5}$$

により求める。

ガス分析波形では吸入ガス濃度、サンプリングガス濃度の順に各アナライザにより肺胞気CO濃度(F<sub>ACO</sub>(t))、肺胞気He濃度(F<sub>A<sub>He</sub></sub>)を分析する。各肺胞気ガス濃度からDL<sub>CO</sub>値を算出する。

必要なガス: CO、He、O<sub>2</sub>、N<sub>2</sub>の4種混合ガス

必要なアナライザ: CO分析計、He分析計、気量型または流量型スパイロメータ

B. ハイブリッド・シミュレータの測定方法と原理  
被検者はフローセンサーをくわえ、安静換気か

ら最大呼出後に急速に最大吸気を行い10秒間の呼吸停止後、急速に呼出させる。測定画面には実測波形のスパイログラムが描出される(図4-a)。

呼出後のサンプルガスの分析波形は以下のアルゴリズムにより描出する。

DL<sub>CO</sub>を算出する式2を逆算して最終のサンプリングガスである肺胞気CO濃度(F<sub>ACO</sub>(t))、肺胞気He濃度(F<sub>A<sub>He</sub></sub>)をシミュレーションする(図4-b)。

まず、式4を使い実測したV<sub>I</sub>と生成RV値からV<sub>A</sub>を求める。V<sub>A</sub>=V'<sub>A</sub>と考え、式5にV'<sub>A</sub>、V<sub>I</sub>、F<sub>I<sub>He</sub></sub>を代入しF<sub>A<sub>He</sub></sub>を求める。

次に式3にF<sub>A<sub>He</sub></sub>、F<sub>I<sub>CO</sub></sub>、F<sub>I<sub>He</sub></sub>を代入しF<sub>ACO</sub>(0)を求める。

式2に大気圧(1,013hPa)、実測の呼吸停止時間を代入し、計算で求めたV<sub>A</sub>、F<sub>ACO</sub>(0)を、被検者の性別、年齢、身長を任意の予測式に当てはめ求めたDL<sub>CO</sub>予測値を代入することでサンプリング濃度であるF<sub>ACO</sub>(t)が算出される。生成されたF<sub>ACO</sub>(t)とF<sub>A<sub>He</sub></sub>値にガス濃度が安定するようにガス濃度曲線の二次関数グラフを描出させる(図4-b)。

##### C. ハイブリッド・シミュレータによる教育効果

図4で示すスパイログラムは実測値であり、呼吸停止時間のカウント・ダウンも表示されることから測定手技が理解できる。サンプル採取後のガス濃度曲線は予測値から逆算したアルゴリズムによる生成データを使用しているため、リアルな傾斜となりガス分析の測定原理が理解できる。

## II. 考 察

近年、医療教育において、最先端のIT(Information Technology)技術を活用したシミュレータが取り入れられている。特に医学、看護学では等身大の人体シミュレータを使い、心音や呼吸音の聴診や心電図波形の記録もできるようなコンピュータで制御されたもの等が盛んに開発されている。医療シミュレーションは医療従事者や医療を学ぶ学生に対して重要なトレーニングツールとして広く利用されている。

学生が臨床に適応できるかを判断する方法としてMillerの臨床能力評価ピラミッドが知られて



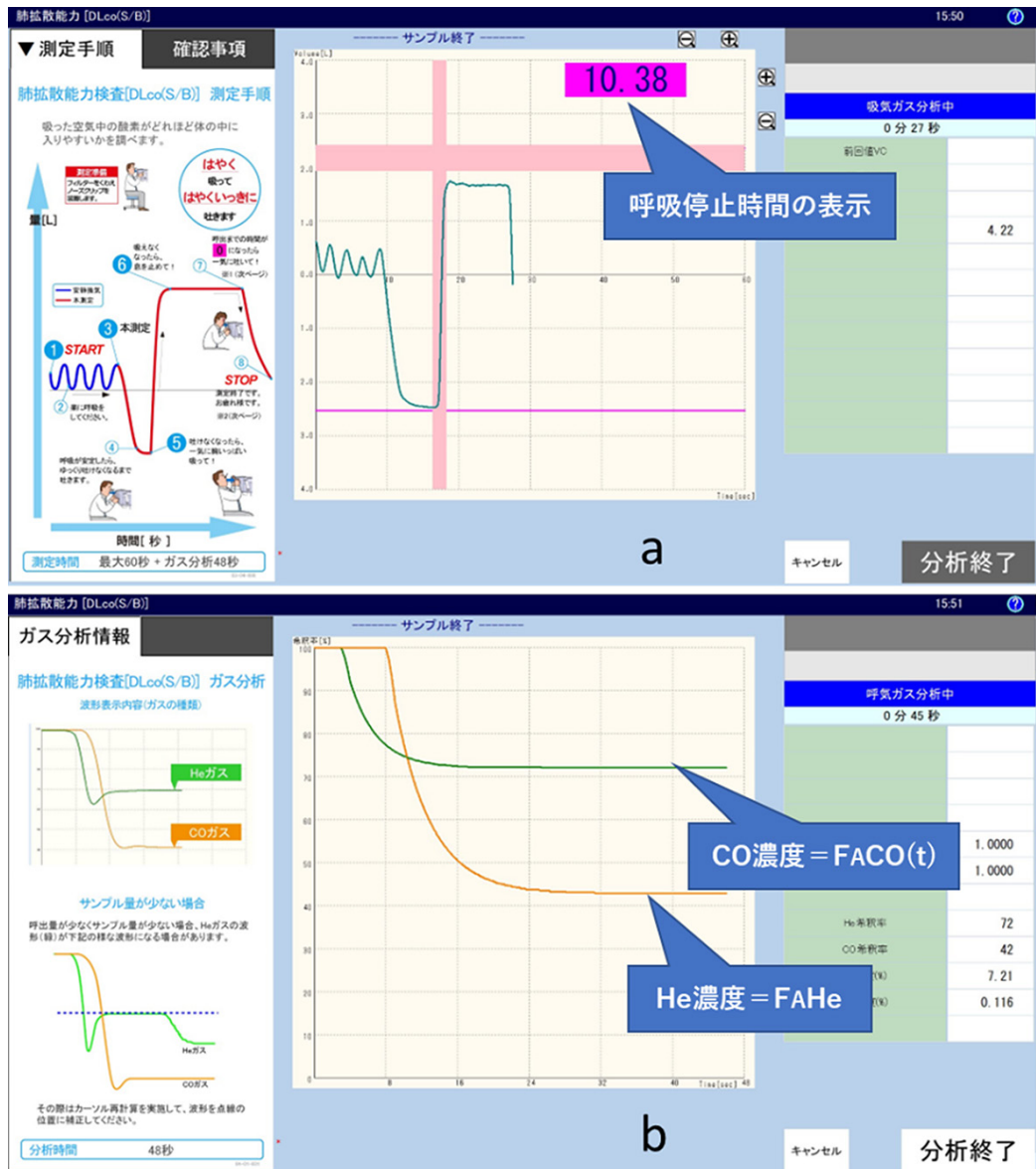


図4 DL<sub>CO</sub>検査の実測スパイログラムの画面(a)とCOガスとHeガスの濃度分析画面(b)

aの測定画面では呼吸停止時間やカウント・ダウンの時間表示もされる。bではCOおよびHeガス濃度が実測値と予測値から逆算した生成データとして描出される。

いる。下から Know(知る)、Knows how(応用力)、Shows how(模擬診療)、そして Does(臨床実習)の4段階の発達レベルが設定されている<sup>4)5)</sup>。臨床検査技師教育に当てはめると Knowは専門知識を身に着ける講義、Knows howは修得した知識を応用し、症例検討等が考えられ、評価は

主に筆記試験で行われる。Shows howは患者への検査を想定したシミュレーション教育を含む模擬検査を実践し、臨地実習前技能習得到達度評価で手技に应用できることを示せば、臨地実習での患者検査(Does)が許される。Shows howは臨地実習に向かう前段階として、患者を想定

し、測定手技をマスターする学内実習は臨床検査技師にとって重要であることはいうまでもない。

しかし、すべての教育施設の学内実習において臨床検査で使用される機器が充実しているはいえない。特に呼吸機能検査学実習においてはVC、FVC等の一次検査を測定するスパイロメータは装備されてはいるものの、二次検査を測定するガス分析計を装備した精密呼吸検査機器を導入している施設は多いとはいえない。その理由の一つとして精密検査機器がスパイロメータに比較して高額であることがあげられる。FRC検査、CV検査、DL<sub>CO</sub>検査は特殊ガスを分析するために各分析計が必要となり高額機器となる。また、吸入ガスの管理や分析計のメンテナンスが煩雑であり、実習前に十分な点検整備が必要で教員の負担になることも理由の一つと考えられる。

今回開発したハイブリッド・シミュレータはガス分析計を一切装備しないため、安価での導入が可能である。また、ガスポンプ等が不要であるため消耗品が少なく、本体とともに教育施設の経費削減にもつながる。さらにガス分析計がないので故障も少なく、メンテナンスはフローセンサーの校正のみで、教員の負担も軽減される。

シミュレーション教育の目的は実践的な経験の提供であり、現実の状況や業務を模倣することができ、学生はリアルな状況に直面して問題を解決し、実践的なスキルを身につけることである。また、安全な環境下で反復学習が可能であることも利点である。

ハイブリッド・シミュレータは電子スパイロメータを本体とし、二次検査用の精密検査測定装置FUDAC-7のソフトを挿入することで、機器の操作や計測は本来の方法と同一である。そのため、学生は実習を通して手技や方法論が理解できる。また、肺気量や気流量は実測値を用い、ガスの濃度曲線も単なる模擬データではなく、実測の肺気量や予測値から逆算したアルゴリズムにより作成した生成データを利用しているため、よりリアルに再現されており、測定原理も十分に理解できると考えられる。また、閉鎖回路を介さないので

感染のリスクも少なく、安全な反復学習が可能である。臨床の現場で用いる高額な精密検査機器を使用しなくとも呼吸機能検査に対する学生への教育効果は十分に期待できる。

今後の課題として二次検査の測定口は閉鎖回路やガスバルーンにつながるヘッド回路であるが、ハイブリッド・シミュレータはフローセンサーをくわえて実施させる。そのため、学生の測定手技の理解に混乱を招きかねない。今後、ハード面での改良を加え、よりリアリティのあるシミュレータに仕上げていきたい。

### III. 結 論

開発したハイブリッド・シミュレータはガス分析装置がないため安価であり、煩雑なメンテナンスもなく、繰り返し安全に測定できる利点がある。また、ガス濃度は実測の肺気量や予測値からのアルゴリズムによる生成データを使用しているため、精密検査の測定手技や原理を修得でき十分な教育効果が期待できる。

### COIの開示

本論文に関連し、開示すべきCOI状態にある企業等はありません。

### 文 献

- 1)呼吸機能検査ハンドブック，一般社団法人日本呼吸器学会肺生理専門委員会呼吸機能検査ハンドブック作成委員会．東京：メディカルレビュー社 2021.
- 2)臨床呼吸機能検査 第8版，日本呼吸器学会，肺生理専門委員会．東京：メディカルレビュー社 2016.
- 3)編集 東條尚子，川良徳弘，最新臨床検査学講座 生理機能検査学 第2版．東京：医歯薬出版 2022.
- 4)Miller GE. The assessment of clinical skills/competence/performance. Acad Med 1990; 65: S63-7.
- 5)田邊政裕．アウトカム基盤型教育の新たな展開ーマスター・ラーニングとシミュレーション教育ー．編集 鈴木利哉，臨床力を鍛えるシミュレーション教育．東京：医歯薬出版 2020: 10-4.