

# 気・血・津液を考慮した東洋医学の人体モデルの構築

## Construction of a Human Body Model of Traditional Chinese Medicine by Taking into Account of Qi, Blood and Fluid

甘 泉\*, 呉 韜\*\*, 葛 崎偉\*\*\*

Quan GAN, Ren WU, Qi-Wei GE

### (摘要)

鍼灸治療は副作用が少なく未病や難病に効果があるとされ、WHOにも認められており今や世界中に広まっている。しかしながら、その治療は未だ経験的・臨床的に行われていることが多く、治療の仕組みや過程が科学的とされていない部分が多い。そのため、現代の西洋医学および科学技術的な観点を取入れた客観的・統一的な研究方法や評価基準の確立が求められている。一方、システムの構造と動作の両方を表現・解析できるモデリングツールであるベトリネットは、生命システムのモデル化や解析に広く応用されており、生物情報学の分野でも多くの成果を上げている。本論文では、我々が高水準ベトリネットであるカラーベトリネットを用いて、鍼灸治療向けの人体モデルの構築法を提案する。このモデルは、気・血・津液を取り入れ、臓腑間の影響を東洋医学の五行説および臓腑の表裏一体関係に基づいて数値的に表現することで構築される。それによって、鍼灸治療の仕組みや過程の解明に向けての客観的な分析手段を提供することを目指す。まずは、東洋医学における気・血・津液の化生・輸送の過程および臓器の新陳代謝を分析したうえで計算式を考案し、カラーベトリネットを用いたモデルの構築法を提案する。次に、五臓間や臓腑間の並行的・逐次的な働きを表すために、モデルへの補助要素の加え方を提案する。最後に、臨床で有効と検証された鍼灸治療法のシミュレーションを行い、モデルの妥当性を検証する。

キーワード：東洋医学、鍼灸治療、ベトリネット、人体モデル、シミュレーション

## 1. はじめに

漢方や鍼灸などの東洋医学における治療は、副作用が少なく、未病や難病の治療も可能であるため、古くから用いられている。鍼灸治療は、鍼や灸により経穴を刺激して体内の気や血の流れを良くして病気を治す治療法であり、1989年にWHOに認められて以来、急速に世界に浸透してきている。東洋医学に

おいて人体は主に五臓六腑と経脈から構成され、五臓六腑が健康な状態を維持していれば人は健康であると考えられている[1]-[3]。しかし、鍼灸治療は未だ経験的・臨床的に行われており、その仕組みや過程も科学的に解明されていない。そのため、現代の西洋医学や科学技術的な観点も取入れた客観的・統一的な研究方法や評価基準・評価方法の確立が求められている[4]。

\*山口大学大学院東アジア研究科博士課程 (The Graduate School of East Asian Studies, Yamaguchi University)

\*\*山口短期大学情報メディア学科 (Department of Informational Media, Yamaguchi Junior College)

\*\*\*山口大学教育学部 (Faculty of Education, Yamaguchi University)

ペトリネット（以降, PN）は1962年に Carl Adam Petri によって発表されてから、様々なシステムの表現・解析に用いられてきている[5][6]。PNは多種多様なシステムに適用可能なグラフィカルで数学的なモデル化ツールであり、並行的・非同期的・分散的・並列的・非決定的な動作を特徴とする情報処理システムを記述・研究する有力なツールであるが、大規模なシステムをモデル化する際には、同型の構造を持つ部分ネットが数多く生成され、システムを記述する上で大きな負担となる。この問題を解消するために、高水準PNであるカラーペトリネット（以降, CPN）が提案されている[7]。

これまで、東洋医学における五臓六腑や経脈等に関するいくつかの研究が行われている。Liらは五行説の定量的解析の研究についてサーベイを行っている[8]。Sunらは五臓の生理的平衡状態に着目し、五行説の基本理論とファジィシステム理論を融合したファジィモデルを作っている[9]。Guoらは数学的手法で五行説を解く目的で、五臓システムの進化法則に基づいて定量的に測るモデルを作っている[10]。鍼灸治療や経脈・経穴に関して、Hengらは仮想現実技術を利用して、鍼灸治療のトレーニングのためのインテリジェント仮想環境を提案し、伝統的な東洋医学における学習仮想人体モデルを開発している[11]。PanとZhouはPNを利用して、経脈だけのモデル化を行っている[12]。Liらは東洋医学の考え方を取入れた症状に基づく健康診断項目の推定という健康管理支援ツールを開発している[13]。

近年、我々はCPNを用いて、人体の仕組みをモデル化することを試み、五行説・表裏関係に基づく五臓六腑のモデル、および、補瀉治療と刺激量の定量化を含む経脈・経穴のモデルを加えた人体モデルを構築した[14]-

[19]。しかしながら、今までのモデルにおいて、(1) 東洋医学における構成要素である気・血・津液がモデルに含まれていなく、(2) 五臓間や臓腑間の並行的・逐次的な働きを表現するための補助要素の加え方について明確に与えていない、といった課題が残っている。

本論文では、これらの課題を解決した東洋医学人体モデルを提案する。

## 2. 鍼灸治療とペトリネット

### 2.1 鍼灸治療・五臓六腑・経脈と経穴

鍼灸治療とは、鍼や灸によって経穴を刺激し、その刺激が経脈に伝わることで体内の気や血の流れが改善され、その結果として五臓六腑の機能が活性化されるものである[1]-[3]。五臓六腑とは、五臓の肝・心・脾・肺・腎および六腑の胆・小腸・胃・大腸・膀胱・三焦である。五臓の間には五行説があり、臓と腑の間には表裏関係があると考えられる。五行説は図1のように五臓を五行に対応づけ、相生や相克の関係を持つことである。表裏関係とは、それぞれが互いに強く結びついているため、どちらかが変調すると、もう一方も変調しやすくなることである。具体的には、肝と

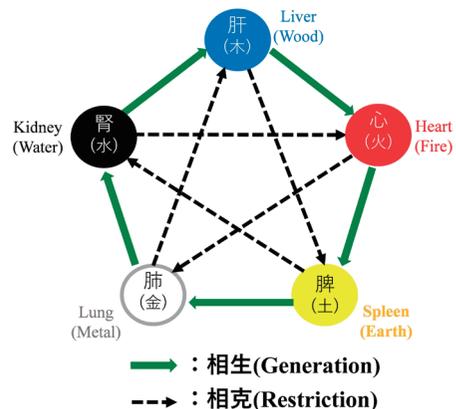


図1 五臓と五行との対応と相生相克の関係

胆、心と小腸、脾と胃、肺と大腸、腎と膀胱のように互いに影響しあう関係である[1][2]。また、腑の1つである三焦は具体的な臓器ではなく、臓器を含む胸腹部の一部を指している。古くから伝わる東洋医学の文献である『皇帝内径』で初めて言われ、『難経』では有名無形と考えられている。『中蔵経』では、三焦が全ての臓腑を総領し、各臓腑を協調させて、それぞれの正常な生理機能を発揮させることで、人の健康を保っていると述べられている。三焦は上焦・中焦・下焦から構成されている。上焦は横隔膜より上部を指し、心と肺を含む。中焦は横隔膜以下で臍以上の腹部を指し、肝と脾を含む。下焦は臍より下の腹部であり、腎を含む[1][2][20][21]。[18]では、他の臓腑との関係を判明していない三焦に対して、上焦と心・肺、中焦と肝・脾、下焦と腎、それぞれ間に表裏関係を持つとしている。

東洋医学における五臓六腑については、①臓が人体の中心であり、腑の働きを制約・調節し、腑が臓からの制御を受け取り、それぞれの独自の効能を発揮してから、臓にフィードバックの影響を与えると考えられている[2]。また、②人体の中心的な部分である五臓は、一定の順序に従って動いているのではなく、それぞれ同時に動いていると考えられている。本論文では、①を「逐次的な働き」と呼び、②を「並行的な働き」と呼ぶ。即ち、五臓六腑には、並行的と逐次的の両方の働きが存在する。

人体には、経脈と経穴と呼ばれるものがある。経脈は、気と血が巡る通路のことで、主に十二正経と奇経八脈からなる。表皮の近くを通る経脈に経穴が存在している。WHOが認めた経穴は合計409個あり、それぞれ独自の効能を持っている[1][2]。

## 2.2 気・血・津液

東洋医学における気・血・津液は、臓腑の生理機能によって、空気と水穀の精微から作られるものであり、人体の臓腑などを機能させ、人体の生命活動を維持するための基礎物質である。東洋医学では、気・血・津液が重要な位置を占めている。それぞれが順調に作られ、全身を滞ることなく循環すれば、健康な体となる[1][2]。気・血・津液を作ることを「化生」、人体の臓腑などに送ることを「輸送」、代謝した廃物を外部に出すことを「排泄」、と呼ばれている[22]。

気は、生命活動のエネルギー源であり、人体に分布部位と来源の違いにより、元氣・宗氣・營氣・衛氣の名称がつけられている。気は推動・温煦・防禦・固摂・気化の作用を持っている。血は脈管中の赤い液体であり、人体の各臓腑・組織・皮膚などを濡養している。津液は体内における各種の正常な水液の総称であり、全身に行きわたり、組織や骨や関節などを潤す。気・血・津液は体を正常に動かすための欠かせないものである[1][2]。

また、東洋医学では、気・血・津液と三焦の関係が深いと考えられている。中焦は気・血・津液が化生する場所であり、上焦は全身に輸送する際の通路であり、下焦は人体の代謝した糟粕や尿液を排泄する通路である[1][2][22]。

人体の臓腑などは気・血・津液を吸収し、それぞれの健康を保ちながら、人体の生命活動を維持すると考えられている[2]。本論文では、この過程を「新陳代謝」と呼ぶ。

## 2.3 ベトリネットとカラーベトリネット

PNは回路やオペレーティングシステム等の大規模ソフトウェアの設計、および並列で非同期的な振る舞いをするシステムをモデル化するために有用なグラフィックモデルであ

る。グラフとして表現する場合、プレースは円で、トランジションは棒状（または四角形）で表されるノードであり、アークはノード間を結ぶものとして、トークンはプレース上の点として描かれる[5][6].

トークンに色をつけ、属性を持たせればより複雑なシステムをモデリングすることが可能になる。このようなPNをCPNと呼ばれる[7]. 我々は人体モデルを構築し、モデルのシミュレーションを実行するために、CPNのシミュレーションツールであるCPN Tools[23]を用いて行う。

### 3. 気・血・津液を加えたモデルの構築

ここでは、[19]で提案したモデルに、気・血・津液を加え、モデルの構築方法を述べる。

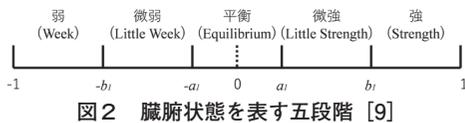


図2 臓腑状態を表す五段階 [9]

Sun らは五臓の生理的平衡状態に着目し、五行説とファジィシステム理論を融合したファジーモデルを提案した。このモデルでは、臓器の状態を図2のように五段階で表現している。その中で、平衡が健康状態であり、弱・微弱・微強・強が不健康な状態である。また、五臓間の相生相克関係について、例えば、肝・心・腎の場合、それぞれ心に対する相生と相克の働きをするという五行説に基づき、また臓（心）自身の自然衰退を考慮に入れて、臓（心）の状態値を以下の計算式(1)で与えている[9]. そして、我々は臓腑の表裏関係と鍼灸治療の虚実補瀉に基づいて、式(2)-(5)を提案している[18][19]. 式(2)は臓から腑へ（心から小腸へ）の表裏関係、式(3)は腑から臓へ（小腸から心へ）の表裏関

係を表している。心（小腸）の状態値は、小腸（心）からの表裏関係の影響と自身の自然衰退から構成されている。また、式(4)は鍼灸治療の虚実補瀉と鍼灸治療の手技（針や灸などの使い方）による刺激の値を表している。刺激の値は、経穴の状態（経穴を刺すか）と刺激の程度（刺す強さなど）から構成されている。鍼灸治療には、「補」と「瀉」の2種類の治療法に対して、経穴の刺激値を「正の数」と「負の数」で表現している。さらに、式(5)は経穴から臓器への影響を表している。現時刻の臓器状態値は、前時刻の経穴から影響を前時刻の臓器状態値に足すことと設定している。

$$f_H(\tau') = g \cdot f_L(\tau - 1) - r \cdot f_K(\tau - 1) + s \cdot f_H(\tau - 1) \quad (1)$$

$$f_{SI}(\tau') = c \cdot f_H(\tau') + s \cdot f_{SI}(\tau - 1) \quad (2)$$

$$f_H(\tau'') = c \cdot f_{SI}(\tau') + s \cdot f_H(\tau') \quad (3)$$

$$f_p(\bar{\tau}) = \mu(\bar{\tau}) \cdot (e + e \cdot v(\bar{\tau})) \quad (4)$$

$$f_V(\tau) = f_V(\bar{\tau}) + w \cdot f_p(\bar{\tau}) \quad (5)$$

式(1)-(5)において、 $\tau(\tau', \tau'', \bar{\tau})$ も含むは時刻であり、 $f(f_H, f_L, f_K, f_p)$ などは臓器または経穴の状態値を表している。 $\mu$ は経穴の状態を表し、経穴を刺す時に $\mu=1$ 、刺さない時に $\mu=0$ 、としている。 $v$ は刺激の程度であり、1から5の強さを整数と表現しており、 $v \in [-5, -1] \cup [1, 5]$ である。 $g, r, s, c, e, w$ はパラメータである。 $g$ は臓からの相生の力の影響度合い、 $r$ は臓からの相克の力の影響度合い、 $c$ は臓（または腑）からの表裏関係の力の影響度合い、 $s$ は自然衰退の影響度合い、 $e$ は経穴に刺す強さによる刺激の値に影響の度合い、 $w$ は経穴から刺激の値が臓器に与える影響の度合いである[18][19]. 東洋医学では、各臓腑の働きや血液の循環・新陳代謝といった人体の生命活動を維持するための生理活動はすべて一定のリズムをもって動いており、またすべての臓腑はバランスの取れた働きをするのが基本であると考えられている

[1][2]. この考えに基づいて、五臓六腑モデルの構築、および、シミュレーションを行うためのシミュレーションモデルの構築において、一定単位の心の鼓動数を時間間隔とみなして、時間  $\tau$  を設定している。  $\tau-1$  から  $\tau$  までは1単位時間としており、式(1)-式(5)において、  $\tau-1 < \tau' < \tau'' < \bar{\tau} < \tau$  が満たされるものとしている [18][19].

### 3.1 計算式の提案

人体には、気・血・津液の化生・輸送・排泄の過程が存在しているが、「化生」と「輸送」より、「排泄」が臓腑に影響が小さいため、本論文では「排泄」の過程を扱わないこととする。さらに、本論文で構築するモデルには五臓六腑と経脈・経穴のみであるため、輸送先と新陳代謝を行うところを五臓五腑とする。また、全体の計算式に関する計算順は「相生相克」⇒「表裏関係」⇒「経穴から影響」⇒「気・血・津液の化生・輸送および臓器の新陳代謝」とする。従って、式(5)の終了時刻  $\tau$  を  $\bar{\tau}$  と置き換え、「気・血・津液の化生・輸送および臓器の新陳代謝」の終了時刻を  $\tau$  として、  $\tau-1 < \tau' < \tau'' < \bar{\tau} < \tau$  と設定する。

我々は [2][21] に基づいて、気・血・津液の化生・輸送に関わる臓腑を表1にまとめる。表1の気の場合は、「脾・肺・腎・胃の働きによって、中焦で化生する」、「心・脾・肺・腎の働きによって、上焦を通路として全身に輸送する」ということを示している。

表1 気・血・津液の化生・輸送に関わる臓腑

	化生に関わる臓腑	化生の場所	輸送に関わる臓腑	輸送の通路	効能
気	脾, 肺, 腎, 胃	中焦	心, 脾, 肺, 腎	上焦	生命活動を維持する
血	肝, 心, 脾, 腎, 胃		肝, 心, 脾, 肺		
津液	脾, 胃, 小腸, 大腸		肝, 心, 脾, 肺, 腎, 胃, 小腸, 大腸		



図3 気・血・津液の状態を表す3段階

東洋医学では、気・血・津液について、量の不足（気虚など）と巡りの不良（気滞など）という異常状態はあるが、量の過剰という異常状態はないとされている [1][2]. それに基づいて、我々は気・血・津液の状態（即ち、気・血・津液の量）を図3のように、気・血・津液の状態が不足・やや不足・正常という3段階で表すこととする。

気・血・津液は、人体に摂取された空気と水穀から、関係の臓腑の働きによって、中焦で化生される。言い換えれば、人体で化生した気・血・津液の量は共に、「1. 外部から吸収した空気と水穀の量」、「2. 関係臓腑の働き」、「3. 中焦の状態」という3つの要素で決定される。3つの要素の中で、どちらかが不調になれば、化生したものの量が減ることになる。そして、中焦で化生した気・血・津液は、関係臓腑の働きによって、上焦を通路として、臓腑に輸送される。即ち、臓腑までに輸送されてきた気・血・津液の量に関する要素は「4. 化生した量」、「5. 輸送先の数」、「6. 関係臓腑の働き」、「7. 上焦の状態」である。

さらに、新陳代謝は臓腑が気・血・津液を吸収し、自分自身の損失量を補充し、健康の状態を維持していることである。即ち、新陳代謝に関する要素は「8. 損失」と「9. 気・血・津液の吸収」である。

本論文では、式(5)の時間  $\tau$  を  $\bar{\tau}$  と置き換えた式(5)、気・血・津液の化生の式(6)、輸送の式(7)および臓腑の新陳代謝の式(8)を提案する。

$$f_V(\bar{\tau}) = f_V(\bar{\tau}) + w \cdot f_p(\bar{\tau}) \quad (5')$$

$$f_i(\hat{\tau}) = f_{normal} \times \frac{(n \times h) - |\sum_{j \in O} f_j(\hat{\tau}) - (h \times n)|}{n \times h} \times \frac{h - |f_{me}(\hat{\tau}) - h|}{h} \quad (6)$$

$$f_{i,v}(\hat{\tau}) = \frac{f_i(\hat{\tau})}{v} \times \frac{(n \times h) - |\sum_{j \in O} f_j(\hat{\tau}) - (h \times n)|}{n \times h} \times \frac{h - |f_{ue}(\hat{\tau}) - h|}{h} \quad (7)$$

$$f_v(\tau) = f_v(\hat{\tau}) \times m + [f_{a,v}(\hat{\tau}) \times q + f_{b,v}(\hat{\tau}) \times b + f_{l,v}(\hat{\tau}) \times l] \quad (8)$$

式(6)では、 $f_i$ は気( $f_a$ )、血( $f_b$ )、津液( $f_l$ )のいずれかの状態値、 $f_{normal}$ は「1.外部から吸収した空気と水穀の量」を表す。本論文では $f_{normal}=3$ とする。 $n$ は関係臓腑の総数、 $h$ は関係臓腑が健康時の状態値( $h=3.0$ )、 $\sum_{j \in O} f_j$ は関係臓器の総状態値、 $O$ はこの過程に関係臓器の集合である。よって、 $\frac{(n \times h) - |\sum_{j \in O} f_j(\hat{\tau}) - (h \times n)|}{n \times h}$ は臓腑の健康度(健康状態の割合)を表し、「2.関係臓腑の働き」と対応している。また、 $f_{me}$ は中焦の状態値、 $\frac{h - |f_{me}(\hat{\tau}) - h|}{h}$ は中焦の健康度(健康状態の割合)であり、「3.中焦の状態」と対応している。この式は、気・血・津液の化生は、3つの要素で決定されることを示している。例えば、気の化生の関係臓腑の脾の働きが弱く( $f_{脾}=1.0$ )、他の臓腑および中焦が正常( $f_{肺}=f_{腎}=f_{胃}=f_{心}=3.0$ )であれば、 $f_{normal}=3$ 、 $n=4$ 、 $h=3.0$ 、 $\sum_{j \in O} f_j(\hat{\tau}) = f_{肺} + f_{脾} + f_{腎} + f_{胃} = 10$ となり、化生した気量は低くなる( $f_a=2.5$ )。

式(7)では、 $f_{i,v}$ は臓器まで輸送されてきた気・血・津液の量、 $f_i$ は「4.化生した量」との対応、 $v$ は「5.輸送先の数」である。輸送先の五臓五腑の総数は10であるため、 $v=10$ である。 $\frac{f_i(\hat{\tau})}{v}$ は化生したものを輸送先の数

分を均等分割した値、 $\sum_{j \in O} f_j$ は関係臓器の総状態値、 $O$ はこの過程に関係する臓器の集合、 $f_{ue}$ は上焦の状態値を表す。よって、 $\frac{(n \times h) - |\sum_{j \in O} f_j(\hat{\tau}) - (h \times n)|}{n \times h}$ は関係臓腑の健康度(「6.関係臓腑の働き」と対応)を表しており、 $\frac{h - |f_{ue}(\hat{\tau}) - h|}{h}$ は上焦の健康度(「7.

上焦の状態」と対応)である。この式は、臓器までの気・血・津液の輸送は、3つの要素で決定されることを示している。例えば、気の輸送の関係臓腑の心の働きが弱く( $f_{心}=1.0$ )、気の化生、他の臓腑と上焦が正常( $f_{肺}=f_{脾}=f_{腎}=f_{胃}=3.0$ )であれば、 $\frac{f_i(\hat{\tau})}{v} = 0.3$ 、 $n=4$ 、 $h=3.0$ 、 $\sum_{j \in O} f_j(\hat{\tau}) = f_{心} + f_{肺} + f_{脾} + f_{腎} = 10$ となり、臓器まで輸送した気量は低くなる( $f_{a,v}=0.25$ )。

式(8)では、 $f_v$ は臓器の状態値、 $f_{a,v}$ 、 $f_{b,v}$ 、 $f_{l,v}$ は臓器に輸送してきた気・血・津液の量、 $m$ 、 $q$ 、 $b$ 、 $l$ はパラメータである。ただし、 $q$ は気量が臓器に影響を与える影響の度合い、 $b$ は血の量が臓器に影響を与える影響の度合い、 $l$ は津液の量が臓器に影響を与える影響の度合い、 $m$ は新陳代謝の度合い(損失量)である。 $f_v(\hat{\tau}) \times m$ は臓器の新陳代謝による損失を引いたものであり、「8.損失」と対応している。 $[f_{a,v}(\hat{\tau}) \times q + f_{b,v}(\hat{\tau}) \times b + f_{l,v}(\hat{\tau}) \times l]$ は「9.気・血・津液の吸収」を示している。この式は、臓器の新陳代謝は2つの要素で決定されることを示している。気・血・津液の化生と輸送が正常であれば、「臓器の損失」と「気・血・津液の吸収」のバランスが取られ、健康状態が維持される。

式(6)-(8)によって、「気・血・津液の化生・輸送は臓腑との関係が深い」、「三焦は気・血・津液の化生・輸送を場所・通路を提供する」および「臓器が気・血・津液を吸収し、それ

ぞれの健康を保つ」ことが明らかである。

### 3.2 モデル構築法の提案

ここでは、CPNToolsを用いて、気・血・津液の化生・輸送および臓器の新陳代謝を表現するCPNモデルを構築する。気の場合の例として、気の化生の過程を図4のように示しており、対応のCPNの九項組式は以下の通りである。

$$\begin{aligned}
 CPN &= (\Sigma, P, T, F, V, C, G, E, M_0) \\
 \Sigma : \Sigma &= \{REAL\}; \\
 P : P &= \{p_{out}, p_{sp}, p_{lun}, p_{kin}, p_{sto}, p_q, p_{me}\}; \\
 T : T &= \{t_{make}\}; \\
 F : F &= \{(p_{out}, t_{make}), (p_{sp}, t_{make}), (t_{make}, p_{sp}), \\
 &\quad (p_{lun}, t_{make}), (t_{make}, p_{lun}), (p_{kin}, t_{make}), \\
 &\quad (t_{make}, p_{kin}), (p_{sto}, t_{make}), (t_{make}, p_{sto}), \\
 &\quad (t_{make}, p_q), (p_{me}, t_{make}), (t_{make}, p_{me})\}; \\
 V : V &= \{out, sp, lun, kin, sto, q, me\}; \\
 C : C_{p_{out}} &= C_{p_{sp}} = C_{p_{lun}} = C_{p_{kin}} = C_{p_{sto}} = C_{p_q} = C_{p_{me}} = \\
 &\quad REAL; \\
 G : G &= \forall t \in T, G(t) = True; \\
 E : E_{(p_{out}, t_{make})} &= out, E_{(p_{sp}, t_{make})} = sp, \\
 &\quad E_{(t_{make}, p_{sp})} = sp, E_{(p_{lun}, t_{make})} = lun, \\
 &\quad E_{(t_{make}, p_{lun})} = lun, E_{(p_{kin}, t_{make})} = kin, \\
 &\quad E_{(t_{make}, p_{kin})} = kin, E_{(p_{sto}, t_{make})} = sto, \\
 &\quad E_{(t_{make}, p_{sto})} = sto, E_{(t_{make}, p_q)} = q, \\
 &\quad E_{(p_{me}, t_{make})} = me, E_{(t_{make}, p_{me})} = me; \\
 M_0 : M_0(p_{out}) &= M_0(p_{sp}) = M_0(p_{lun}) = M_0(p_{kin}) = M_0(p_{sto}) \\
 &= M_0(p_q) = M_0(p_{me}) = \emptyset;
 \end{aligned}$$

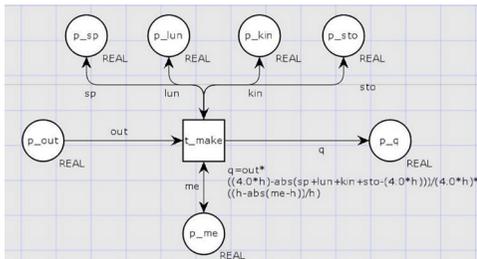


図4 気の化生

図4において、 $p_{out}$  は外部の空気と水穀を表しており、1個のトークンを持ち、トークンの値がその量（前述のように3.0とする）を表す。気の化生に関わる臓腑である脾・肺・腎・胃を  $p_{sp} \cdot p_{lun} \cdot p_{kin} \cdot p_{sto}$ 、気の化生の場所である中焦を  $p_{me}$ 、と表し、それぞれに1個のトークンを置き、トークンの値が臓腑の状態値を表す。化生した気を  $p_q$ 、化生することを  $t_{make}$ 、と表現する。 $t_{make}$  の発火によって、式(6)の計算が行われる。 $f_{normal}$  を  $out$ 、 $n$  を  $4.0$ 、 $\sum_{i=0}^n f_i = (f_{脾} + f_{肺} + f_{腎} + f_{胃})$  を  $sp + lun + kin + sto$ 、 $f_{me}$  を  $me$ 、 $f_q$  を  $q$ 、にそれぞれ対応している。

臓器までの気の輸送は化生した気を心・脾・肺・腎の働きによって、上焦を通路として全身に送ることである。図5は気の輸送の過程をモデル化したものであり、対応のCPNの九項組式は以下の通りである。

$$\begin{aligned}
 CPN &= (\Sigma, P, T, F, V, C, G, E, M_0) \\
 \Sigma : \Sigma &= \{REAL\}; \\
 P : P &= \{p_q, p_{hea}, p_{sp}, p_{lun}, p_{kin}, p_{q_e}, p_{ue}\}; \\
 T : T &= \{t_{send}\}; \\
 F : F &= \{(p_q, t_{send}), (p_{hea}, t_{send}), (t_{send}, p_{hea}), \\
 &\quad (p_{sp}, t_{send}), (t_{send}, p_{sp}), (p_{lun}, t_{send}), \\
 &\quad (t_{send}, p_{lun}), (p_{kin}, t_{send}), (t_{send}, p_{kin}), \\
 &\quad (t_{send}, p_{q_e}), (p_{ue}, t_{send}), (t_{send}, p_{ue})\}; \\
 V : V &= \{q, hea, sp, lun, kin, q_e, ue\}; \\
 C : C_{p_q} &= C_{p_{hea}} = C_{p_{sp}} = C_{p_{lun}} = C_{p_{kin}} = C_{p_{q_e}} = \\
 &\quad C_{p_{ue}} = REAL; \\
 G : G &= \forall t \in T, G(t) = True;
 \end{aligned}$$

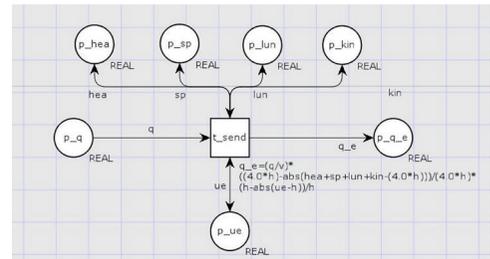


図5 気の輸送

$$\begin{aligned}
 E : E_{(p_q, t_{send})} &= q, E_{(p_{hea}, t_{send})} = hea, \\
 E_{(t_{send}, p_{hea})} &= hea, E_{(p_{sp}, t_{send})} = sp, \\
 E_{(t_{send}, p_{sp})} &= sp, E_{(p_{lun}, t_{send})} = lun, \\
 E_{(t_{send}, p_{lun})} &= lun, E_{(p_{kin}, t_{send})} = kin, \\
 E_{(t_{send}, p_{kin})} &= kin, E_{(t_{send}, p_{q_e})} = q_e, \\
 E_{(p_{ue}, t_{send})} &= ue, E_{(t_{send}, p_{ue})} = ue;
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 M_0 : M_0(p_q) &= M_0(p_{hea}) = M_0(p_{sp}) = M_0(p_{lun}) = \\
 &M_0(p_{kin}) = M_0(p_{q_e}) = M_0(p_{ue}) = \emptyset;
 \end{aligned}$$

化生した気を  $p_q$ , 気の輸送に関わる臓器である心・脾・肺・腎を  $p_{hea}$ ,  $p_{sp}$ ,  $p_{lun}$ ,  $p_{kin}$ , 気の輸送の通路である上焦を  $p_{ue}$ , と表現し, それぞれに1個のトークンを置き, トークンの値が臓腑の状態値を表す. 輸送先を  $p_{q_e}$ , 輸送することを  $t_{send}$ , と表現する.  $t_{send}$  の発火によって, 式(7)の計算が行われる.  $f_q$  を  $q$ ,  $v$  を常に10.0,  $\sum_{j \in O} f_j = (f_{心} + f_{脾} + f_{肺} + f_{腎})$  を  $hea + sp + lun + kin$ ,  $f_{q_e}$  を  $ue$ ,  $f_{ue}$  を  $q_e$ , にそれぞれ対応している.

図6は[18]で提案した単体臓器モデルに「気・血・津液を吸収し, 新陳代謝すること」を加えたモデルである. 対応のCPNの九項組式は以下の通りである.

$$\begin{aligned}
 CPN &= (\Sigma, P, T, F, V, C, G, E, M_0) \\
 \Sigma : \Sigma &= \{REAL\};
 \end{aligned}$$

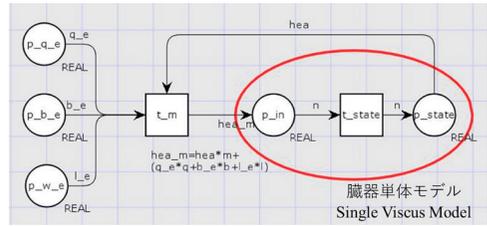


図6 臓器の新陳代謝

$$\begin{aligned}
 P : P &= \{p_{q_e}, p_{b_e}, p_{l_e}, p_{in}, p_{state}\}; \\
 T : T &= \{t_m, t_{state}\}; \\
 F : F &= \{(p_{q_e}, t_m), (p_{b_e}, t_m), (p_{l_e}, t_m), \\
 &(t_m, p_{in}), (p_{state}, t_m), (p_{in}, t_{state}), (t_{state}, p_{state})\}; \\
 V : V &= \{q_e, b_e, l_e, hea, hea_m, n\}; \\
 C : C p_{q_e} &= C p_{b_e} = C p_{l_e} = C p_{in} = \\
 &C p_{state} = REAL; \\
 G : \forall t \in T, G(t) &= True; \\
 E : E_{(p_{q_e}, t_m)} &= q_e, E_{(p_{b_e}, t_m)} = b_e, E_{(p_{l_e}, t_m)} = l_e, \\
 E_{(t_m, p_{in})} &= hea_m, E_{(p_{state}, t_m)} = hea, E_{(p_{in}, t_{state})} = n, \\
 E_{(t_{state}, p_{state})} &= n; \\
 M_0 : M_0(p_{q_e}) &= M_0(p_{b_e}) = M_0(p_{l_e}) = M_0(p_{in}) = M_0(p_{state}) \\
 &= \emptyset;
 \end{aligned}$$

臓器まで輸送してきた気を  $p_{q_e}$ , 血を  $p_{b_e}$ , 津液を  $p_{l_e}$ , と表現する.  $t_m$  の発火によって, 式(8)の計算が行われる.  $f_v(\tau)$  を  $hea_m$ ,  $f_v(\tau)$  を  $hea$ ,  $f_{q_e}(\tau)$  を  $q_e$ ,  $f_{b_e}(\tau)$  を  $b_e$ ,  $f_{l_e}(\tau)$  を  $l_e$

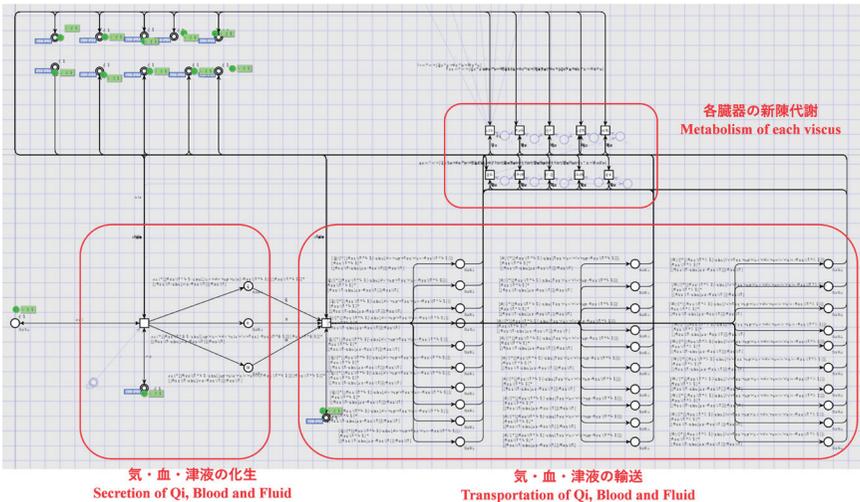


図7 気・血・津液の化生・輸送および臓器の新陳代謝

を  $L_e$  にそれぞれ対応している。

### 3.3 CPN Toolsによる全体モデルの構築

前述した方法によって構築したモデルを統合して、図7のような気・血・津液の化生・輸送および臓器の新陳代謝のモデルを構築する。そして、このモデルと[19]で提案した人体モデルに繋ぎ合わせて、気・血・津液に対応した新たな人体モデルを構築する。さらに、CPNモデルの構造を変えず、ネットワークを読みやすくするために、CPN Toolsを用いてモデルの階層化を行う。図8は階層化したモデルを示す。

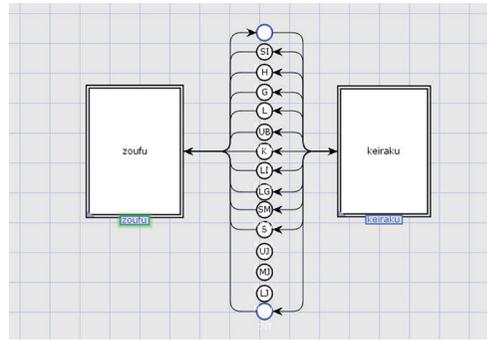


図8 階層化した人体モデル

ここで、図8のモデルに、「相生相克」⇒「表裏関係」⇒「経穴から影響」⇒「気・血・津液の化生・輸送および臓器の新陳代謝」という順序で計算するように補助要素を追加することとした。ただし、補助要素は東洋医学における人体の要素だけではなく、計算式の結果にも影響を及ぼさないことに注意されたい。

## 4. 構築したモデルの検証

### 4.1 シミュレーションモデルの設計

これまで構築してきた図8のモデルは直ちにCPN Toolsによる鍼灸治療のシミュレーションに用いることはできない。その理由は、図8のモデルはこれまでの人体モデルに気・血・津液の化生・輸送および臓器の新陳代謝のモデルを加えただけで、3.1で提案した各式の実行順序である「 $\tau-1 < \tau' < \tau'' < \tau \ll \tau < \tau$ 」を規定していないからである。そ

図9は図8に補助要素を加えたモデルの一部分を示しており、この図における補助要素の追加方法を説明する。図9における追加した補助要素は  $p_{s1} - p_{s17}$  と表2に示しているアークである。これらの補助要素があると、 $\tau-1$ から $\tau$ までの間に、CPNモデルの各トランジションの発火順番は表3のようになる。表3は、 $\tau-1$ から $\tau$ までの6列があ

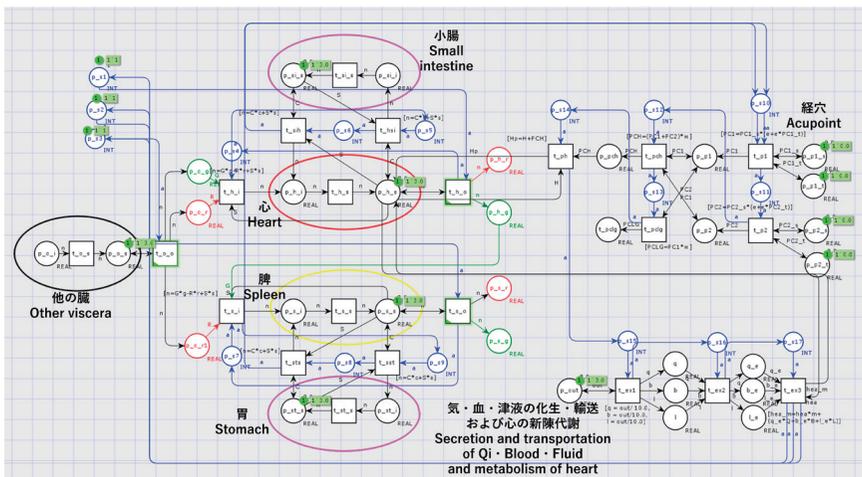


図9 補助要素を加えたモデルの例

表2 図9の補助要素のアーチ

アーチ			
$(p_{s1}, t_{h_o})$	$(p_{s2}, t_{s_o})$	$(p_{s3}, t_{o_o})$	$(t_{ph}, p_{s15})$
$(t_{h_o}, p_{s4})$	$(t_{s_o}, p_{s7})$	$(t_{p1}, p_{s11})$	$(p_{s15}, t_{ex1})$
$(p_{s4}, t_{h_i})$	$(p_{s7}, t_{s_i})$	$(p_{s11}, t_{p2})$	$(t_{ex1}, p_{s16})$
$(t_{h_i}, p_{s5})$	$(t_{s_i}, p_{s9})$	$(t_{p2}, p_{s12})$	$(p_{s16}, t_{ex2})$
$(p_{s5}, t_{hs1})$	$(p_{s9}, t_{ss1})$	$(p_{s12}, t_{ph})$	$(t_{ex2}, p_{s17})$
$(t_{hs1}, p_{s6})$	$(t_{ss1}, p_{s8})$	$(t_{ph}, p_{s13})$	$(p_{s17}, t_{ex3})$
$(p_{s6}, t_{sh})$	$(p_{s8}, t_{ss})$	$(p_{s13}, t_{pc1g})$	$(t_{ex3}, p_{s1})$
$(t_{sh}, p_{s10})$	$(t_{ss}, p_{s10})$	$(t_{pc1g}, p_{s14})$	$(t_{ex3}, p_{s2})$
$(p_{s10}, t_{p1})$	$(p_{s10}, t_{p1})$	$(p_{s14}, t_{ph})$	$(t_{ex3}, p_{s3})$

表3 図9における各トランジションの発火順番

時刻	$\tau-1$	$\tau'$	$\tau''$	$\bar{\tau}$	$\hat{\tau}$	$\tau$
トランジション	$t_{h_o}$	$t_{h_i}$	$t_{h_s} \rightarrow t_{hs1}$	$t_{s_s} \rightarrow t_{ss1}$	$t_{h_s} \rightarrow t_{p1} \rightarrow t_{p2} \rightarrow t_{ph} \rightarrow t_{pc1g} \rightarrow t_{p14} \rightarrow t_{ph}$	$t_{ex1} \rightarrow t_{ex2} \rightarrow t_{ex3}$
	$t_{s_o}$	$t_{s_i}$	$t_{s_s} \rightarrow t_{ss}$	$t_{s_s} \rightarrow t_{ss}$	$t_{s_s}$	
	$t_{o_o}$					
式		式(1)	式(2)	式(3)	式(4)→式(5)	式(6)→式(7)→式(8)

り、各列内の時刻にトランジションは並行的に発火できる。例えば、時刻  $\tau-1$  では、相生相克の計算を行うため、 $t_{h_o}$ 、 $t_{s_o}$ 、 $t_{o_o}$  が発火する。時刻  $\tau'$  では、心および脾への相生相克の計算（式(1)）を行うため、 $t_{h_i}$  と  $t_{s_i}$  が発火する。時刻  $\tau''$  では、心から小腸、脾から胃の表裏関係の計算（式(2)）を行うため、 $t_{h_s} \rightarrow t_{hs1}$  と  $t_{s_s} \rightarrow t_{ss1}$  のように順次に発火する。その後の時刻  $\bar{\tau}$ 、 $\hat{\tau}$ 、 $\tau$  では、式(3)、式(4) (5)、式(6) (7) (8)をそれぞれ計算する。この方法を図8のモデルに適用して、CPN Toolsを用いた鍼灸治療のシミュレーションが可能になる。

また、CPN Toolsは、ネットワークに関する構造と宣言を自動的にチェックすることができる。本論文では、チェックすることにかかる時間を「読込時間」と呼ぶ。本論文では、構築した膨大なモデルの長い読込時間を短縮するために、CPN Toolsにおけるネットワーク構造を調整した。このネットワーク構造の調整は計算式および計算結果には影響を及ぼさない。調整方法は図10で示す。変更前（図10の左）では、計算式はトランジション  $t$  で行われ、計算結果はアーチ  $(t, p_3)$  を

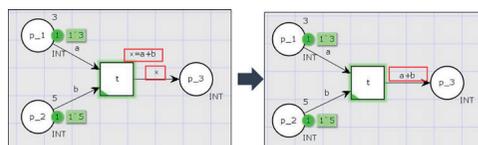


図10 CPN 構造の変更前（左）後（右）

通して、プレース  $p_3$  に流れる。変更後（図10の右）では、計算式はアーチ  $(t, p_3)$  にて行われ、計算結果はプレース  $p_3$  に流れる。この方法を図8のモデルに適用して、同様な計算機環境（Intel (R) Core (TM) i7-2600 CPU @ 3.40GHz）で実行した結果、読込時間が20分間から6分間に短縮できた。

## 4.2 鍼灸治療シミュレーションとその結果

ここでは、4.1で構築したモデルを用いて、臨床で有効と検証された鍼灸治療法のシミュレーション、並びに、シミュレーション結果と臨床データとの比較を行う。各種のパラメータは以下のように設定した。

- i. すべてのプレースを *REAL* 型とした。
- ii. 臓腑の状態を図2に示した弱、微弱、平衡、微強、強の5段階で表し、臓腑モデル内の状態プレースのトークンの値域を  $(0.5, 5.5)$  とした。トークンの値が  $(0.5, 1.5)$  であれば弱の状態、 $[1.5, 2.5)$  であれば微弱の状態を表す。同様に、平衡状態と微強の状態と強の状態をそれぞれ  $[2.5, 3.5]$ 、 $(3.5, 4.5]$ 、 $(4.5, 5.5)$  で表す。
- iii. 五臓間の相生相克に関わる式 (1) におけるパラメータを  $g=0.15$ 、 $r=0.05$ 、 $s=0.90$  とした。
- iv. 臓と腑の表裏関係に関わる式(2) (3) 中のパラメータを  $s=0.90$ 、 $c=0.10$  とした。
- v. 経穴から臓器への影響に関わる式(4) (5) のパラメータを  $e=0.25$ 、 $w=0.01$  とした。

- vi. 気・血・津液の化生・輸送に関わる式(6) (7)のパラメータを  $h=3.0$ ,  $v=10$  とした。
- vii. 臓器の新陳代謝に関わる式(8)のパラメータを  $m=0.999$ ,  $q=0.004$ ,  $b=0.004$ ,  $l=0.002$  とした。

本論文では、「下痢」と「パーキンソン病」に対する鍼灸治療のシミュレーションを行った。表4に示しているように、下痢は脾と胃が悪くなったため、気・血が不足になり、胃酸下流や胸部締め付け感などの症状がある。治療用経穴である内関穴(PC6)と公孫穴(SP4)を刺激し、脾・胃と気・血を改善すると示されている[24]。パーキンソン病は肝と腎が悪くなったため、気が不足になり、振戦や起立性低血圧などの症状がある。治療用経穴である曲池穴(LU11)、合谷穴(LI4)、足三里穴(ST36)、太衝穴(LR3)、肝腧穴(BL18)と腎腧穴(BL23)を刺激し、肝・腎と気を改善すると示されている[25]。従って、表4に基づいて、シミュレーションモデルにおける各初期値の設定を表5に示す。そのうえで、下痢とパーキンソン病の鍼灸治療

シミュレーション（以降、それぞれCase 1とCase 2と表記する）を行った。

シミュレーションにおいて、それぞれ  $\tau=0$  から  $\tau=50$  まで、続けて実行した。時刻  $\tau-1$  から  $\tau$  までの間には、トランジションを順次に発火させ、式(1)-(8)を1回ずつ計算させた。Case 1とCase 2の実行結果を図11-14に示す。図の縦軸は臓腑または気・血の状態値、横軸は時間  $\tau$  を示している。時間  $\tau$  が増えるにつれ、各臓腑の状態値は図中の曲線のように変化している。図11と図12はCase 1の五臓六腑と気・血の状態値変化図であり、図13と図14はCase 2の五臓六腑と気の状態値変化図である。図11-14から次のことが得られる。

- I. Case 1について、最初、臓器の肺と胃の働きが弱かったため、化生・輸送の気・血の状態値が低くなっていた。鍼灸治療していくに連れ、すべての臓腑が健康状態に回復され、気・血の状態

表4 鍼灸治療症例

病名	悪い臓腑	気・血・津液の変化	症状	臨床治療用経穴	補瀉	刺激の強さ
下痢	脾虚	気不足 血不足	・胃酸下流 ・下痢 ・胸部締め付け感	内関(PC6)	補	普通
	胃虚			公孫(SP4)	補	普通
パーキンソン病	肝虚	気不足	・振戦 ・筋強剛 ・起立性低血圧 ・認知症 ・知覚過敏	曲池(LU11)	補	普通
	腎虚			合谷(LI4)	補	普通
				足三里(ST36)	補	普通
				太衝(LR3)	補	普通
	肝腧(BL18)	補	普通			
	腎腧(BL23)	補	普通			

表5 鍼灸治療のシミュレーションに関する設定

鍼灸治療のシミュレーション病例		臓腑		経穴	
		悪い臓腑	正常臓腑	治療用経穴	強さ
Case 1	下痢	脾: 1.0	他: 3.0	PC6	+3.0
		胃: 1.0		SP4	+3.0
Case 2	パーキンソン病	肝: 1.0	他: 3.0	LU11	+3.0
				LI4	+3.0
				ST36	+3.0
		腎: 1.0		LR3	+3.0
				BL18	+3.0
				BL23	+3.0

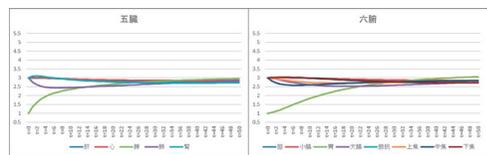


図11 Case1: 五臓六腑の状態値の変化図

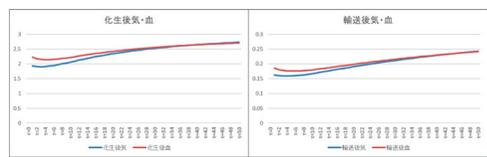


図12 Case1: 気・血の状態値の変化図

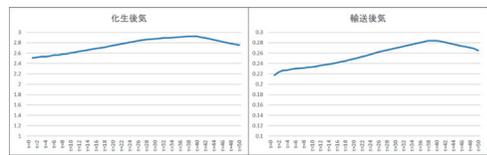


図13 Case2: 血の状態値の変化図

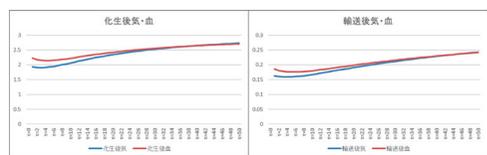


図14 Case2: 五臓六腑の状態値の変化図

値も改善された。

- II. Case 2について、最初、臓器の肝と腎の働きが弱かったため、化生・輸送の気の状態値が低くなっていた。鍼灸治療に伴い、すべての臓腑を健康状態に回復され、気の状態値も改善された。一方、経穴への刺激を続けると、臓腑の状態値が強すぎ、「強」状態となるため、気の量が再び低くなった。従って、最良の治療時間は、 $t=38$ 前後であることが分かった。

これらのことから、Case 1のシミュレーション結果は文献[24]に記載の臨床結果と一致している。Case 2のシミュレーション結果については、 $t=38$ までの結果は文献[25]の臨床結果と一致しているが、 $t=38$ 以降の結果は文献[25]の記載にはない。このことについては、今後治療現場での確認が必要である。総じていうと、本論文で提案した人体モデルは妥当であると考えられる。

## 5. おわりに

本論文では、東洋医学に基づいて、気・血・津液の化生・輸送および臓器の新陳代謝を含めた人体のベトリネットモデルを構築した。まずは、東洋医学における気・血・津液の化生・輸送と臓腑の関係に基づいて、それぞれの計算式を提案した。次に、ベトリネットのツールの1つである CPN Tools を用いて、これらの計算式のモデルの構築法を提案し、従来のモデルに加えることで、新しい人体モデルの構築を行った。最後に、構築した人体モデルに実行順序を規定する補助要素を加えたうえで、モデルの検証のための鍼灸治療シミュレーションを行った。シミュレーション結果より、文献[24][25]記載の臨床結果と同様に、五臓六腑はやがて、健康状態に回復さ

れたとの結論を得た。いわゆる、シミュレーション結果と文献[24][25]記載の臨床結果と一致していることを確認できた。よって、モデルの構築法が妥当であり、提案したモデルが有用であることが言える。

本論文では、システムの静的構造と動的挙動の両方を表現・シミュレーションでき、生命システムのモデル化や解析に広く応用されているツールであるベトリネットと、複雑に絡み合う臓腑や経脈などを扱う東洋医学との融合を試みた。提案したモデルはベトリネットを用いることで、東洋医学における人体の相生相克関係、表裏関係、および、経穴の影響と気・血・津液の影響を視覚的に表現できた。また、鍼灸治療のシミュレーションが可能となり、そのシミュレーションによって、治療現場で観測できない臓腑状態の変化過程を示すことができた。本論文の成果は、これまで経験的・臨床的に行われ、定性的な説明しかできていない鍼灸治療に対して、医学的・科学的な観点に基づいた検証の仕組みを提案するものであり、新たな鍼灸治療法の発見にもつながるものであると言えよう。

一方、現時点で提案した人体モデルには、いくつかの問題点を今後改善していく必要がある。まず、五臓六腑の働きと関連している「排泄」は、提案のモデルには含まれていないことである。排泄は人体の外部へ廃物を出すことであり、一般的に人体の五臓六腑へ及ぼす影響が微小であると考えられるが、健全な人体モデルを構築するには排泄の過程も加味することが必要である。次に、Case 2のシミュレーション結果において、過剰な経穴刺激による気の量が再び減少することが見られているが、文献[25]では過剰な経穴刺激による気への影響は記載されていない。従って、過剰な経穴刺激に関して、治療現場での調査およびその調査結果に関する考察が必要であ

る。さらに、提案のモデルにおける各式とパラメータは、東洋医学の文献に基づいて検討したうえで設定しているが、人体の各要素間の相互関係をより一層明らかにするために、治療現場における数多くの鍼灸治療データの収集と分析が必要であり、また分析の結果を人体モデルに反映させていかなければならない。

従って、本研究に関連する今後の課題として、(1) 治療現場の医師と連携して、気・血・津液の排泄を人体モデルに加えることを検討すること、(2) 治療現場における過剰な経穴

刺激に関する調査と分析をすること、(3) 臨床データに基づいて、人体モデルで用いられている式やパラメータ等を改善していくこと、などが挙げられる。

## 謝辞

本研究は JSPS 科研費 (基盤研究 (B)) 20H04284 と JST 次世代研究挑戦的研究プログラム JPMJSP2111 の助成を受けたものであり、ここで謝意を表する。

## 文献

- [1] 兵頭明, 『東洋医学経絡・ツボの教科書』, 新星出版社, 2012.
- [2] 天津中医薬大学・学校法人後藤学園, 『針灸学 [基礎篇]』, 東洋学術出版社, 2013.
- [3] 薛永東, 『黄帝内経五臓六腑養生法』, 北方婦児出版社, 2010.
- [4] 篠原昭二, 他, “第二次日本経穴委員会の提言”, 医道の日本, vol.71, no.5, pp.142-154, 2012.
- [5] 村田忠夫, 『ペトリネット解析と応用』, 近代科学社, 1992.
- [6] 太田淳, 辻孝吉, “ネット理論—ペトリネットとその解析問題—”, 電子情報通信学会FR誌, vol.2, no.4, pp.56-67, 2008.
- [7] Jensen Kurt, Colored Petri Nets (2 ed.), Berlin: Heidelberg, 1996.
- [8] X.W. Li, Y.M. Wang, X. Liu and Y. Zhang, “The Summarization on The Quantitative Models of Five Elements”, BME & Clin Med., vol.16, no.4, pp.411- 414, 2012 (in Chinese).
- [9] C.L. Sun, X.Y. Li and L.C. Zhao, “Fuzzy Modeling and Analysis Based on Five Elements Theory for The System of Five Organs System”, Journal of Anshan Normal University, vol.13, no.6, pp.1-4, 2011 (in Chinese).
- [10] W.Y. Guo, J.Q. Wu and S. Wang, “Five elements system modeling and solving”, Journal of Shanghai Second Polytechnic University, vol.25, no.4, pp.253-256, 2008 (in Chinese).
- [11] P.A. Heng, T.T. Wong, R. Yang, Y.P. Chui, Y. Xie, K.S. Leung and P.C. Leung, “Intelligent inferencing and peptic simulation for Chinese acupuncture Learning and Training”, IEEE Trans. Inf. Technol. Biomed, vol. 10, no. 1, pp. 28-41, 2006.
- [12] J. Pan and M. Zhou, “Modeling and analysis of meridian systems using Petri nets”, International Journal of Intelligent Control and Systems, vol. 10, no. 3, pp. 226-234, 2005.
- [13] H. Li, Y.B. Cheng, Y.H. Li, X.C. Ma and D.L. Li, “Health Assessment System Based on Big Data Analysis of Meridian Electrical Potential”, ICBIP '18 Proceedings of the 3rd International Conference on Biomedical Signal and Image Processing, pp. 75-80, 2018.
- [14] Q.W.Ge, R.Wu and M.Nakata, “On Modeling Internal Organs and Meridian System Based on Traditional Chinese Medicine”, Proc. BioPPN2015, pp.56-69, 2015.
- [15] Q.W.Ge, R.Wu, M.Nakata and S.C.Lin, “Petri Net Model of Internal Organs and Meridian System Based on Five-Elements Theory of Traditional Chinese Medicine”, Journal of East Asian Identities, vol.2, pp.107-115, 2017.
- [16] 甘泉, ゲン ティ トウイ, 呉韜, 中田充, 葛崎偉, “五臓六腑と十二正経のペトリネットモデル”, Journal of East Asian Identities, vol.3, pp.79-89, 2018.
- [17] 甘泉, 呉韜, 中田充, 葛崎偉, “中医学に基づく人体経絡のモデル構築とそのシミュレーション”, Journal of East Asian Identities,

- vol.4, pp.49-60, 2019.
- [18] 甘泉, 吳靱, 中田充, 葛崎偉, “カラーペトリネットによる東洋医学における人体モデルの構築”, *IEICE Trans. Inf.& Syst.*, vol. J104-D, no.04, pp. 217-227, 2021.
- [19] Q. Gan, R.Wu, M.Nakata and Q.W.Ge, “Construction of a Human Body Model for Acupuncture and Moxibustion Treatment by Colored Petri Nets”, *BioSystems*, vol. 210, 104526, 2021.
- [20] 宮川浩也, “三焦新解 その1 三三焦論 張介賓『質疑録』”, *日本内径医学会*, no.36, pp.16-21, 1991.
- [21] 宮川浩也, “三焦新解 その8分類”, *日本内径医学会*, no.43, pp.17-18, 1992.
- [22] 衷中会 編著, 『臟腑経絡・三焦の弁証と処方』, たにぐち書店, 2011.
- [23] CPN Tools homepage, <http://cpntools.org/start>
- [24] 郷家明子, “内科疾患に対する鍼灸経絡治療の有用性”, *日医大医会誌*, vol.9, no.4, pp.221-224, 2013.
- [25] 福田晋平, 江川雅人, 苗村健治, “パーキンソン病に対する鍼治療の臨床効果に関する研究—ランダム化比較試験 (RCT) による検討—”, *明治国際医療大学誌*, no.6, pp.21-45, 2012.