

探究の過程における仮説形成に関する研究

—システム思考に着目して—

Study on Hypothesis Formation in the Process of Inquiry:

Focus on Systems Thinking

津田 惇¹, 内海 志典²

TSUDA Atsushi¹, UTSUMI Yukinori²

[キーワード Keyword]	理科教育, システム思考, 仮説形成, 説明仮説
[所属 Institution]	¹ 垂井町立不破中学校 (Fuwa Lower Secondary School, Tarui Town), ² 岐阜大学教育学部 (Faculty of Education, Gifu University)

[要 旨 Abstract]

向井・村上・松本 (2019) は、仮説形成に停滞する学習者には、現象と関係する要素を抽出できても、その要素がいかに関係を引き起こすかという説明仮説を形成することに課題があると指摘している。本研究では、向井ら (2019) が作成した仮説形成段階の「要素の抽出」と「説明仮説の形成」に対する課題の解決に向け、複雑な現象を理解するために必要となると考えられるシステム思考のスキルを文献研究により論究した。その結果、仮説形成段階の「要素の抽出」と「説明仮説の形成」に必要なシステム思考のスキルをRichmond (1997) とAssaraf & Orion (2010) を基に分析し、「要素の抽出」と「説明仮説の形成」において必要となるシステム思考のスキルを導出した。

1. はじめに—問題の所在と研究の目的—

わが国の『幼稚園、小学校、中学校、高等学校及び特別支援学校の学習指導要領等の改善及び必要な方策等について (答申)』では、新しい問いや仮説を立てるなど、既に持っている考えの構造を転換する力を育成することが重要であると述べられている (中央教育審議会, 2016)。

しかしながら、仮説形成に関する事例的研究を行った向井・村上・松本 (2019) は、仮説形成に停滞する学習者に、「現象と関係する要素を抽出できても、その要素がいかに関係を引き起こすかという説明仮説を形成することに課題がある。仮説形成を促す具体的な支援方略について検討できなかった。」と指摘している。これは、向井ら (2019) が提案している仮説形成段階において、「説明仮説の形成」と称される段階に課題があることを指摘している。「説明仮説の形成」は、ある要素が、どのような過程を経てその (自然) 現象をもたらしているか (または、ある要素と疑問の関係はどうなっているか) 説明している (向井ら, 2019) 段階を指している。また、「説明仮説の形成」に至る直前の段階には、「要素の抽出」と称される段階がある。「要素の抽出」は、注目する (自然) 現象や疑問

と関係ありそうな要素を挙げたり、関係を検証したりしようとしている (向井ら, 2019) 段階を指している。「説明仮説の形成」の課題を解決するためには、「要素の抽出」にも着目する必要があると考えられる。

科学の発達などにより、私たちの身の回りには、複雑なシステム¹⁾が次々と生まれ、急速に増加している (Arnold & Wade, 2015)。身の回りの多くの現象 (生態系、月の満ち欠け、エネルギーの移動など) が複雑なシステムの事例である (Evagorou, Korfiatis, Nicolaou & Constantinou, 2009)。システムの作用を理解するためには、「システム思考 (Systems thinking)」が必要であるとされている (Arnold & Wade, 2015)。

そこで、本研究では、「要素の抽出」と「説明仮説の形成」における課題の解決に向け、複雑な現象を理解するために必要となると考えられるシステム思考のスキル²⁾を文献研究により明らかにすることを目的とする。

2. 研究の方法

向井ら (2019) の仮説形成段階 (以下、仮説形成段階とする) の「要素の抽出」と「説明仮説の形成」に該当すると考えられるシステム思考のスキルを

Richmond (1997) と Assaraf & Orion (2010) の文献研究を基に分析する。その後, Assaraf & Orion (2010) のシステム思考を基に「要素」に着目してシステム思考のスキルを捉え直し, 「要素の抽出」と「説明仮説の形成」に必要となるシステム思考のスキルを導出する。

3. 仮説形成段階

3.1. 一般的な仮説形成段階の評価指標

向井ら (2019) は, 仮説形成に関する先行研究を基に, 仮説形成の段階を示し, 高校生に行った仮説形成に関する事例的研究から, 表1に示される学習者の仮説形成段階を評価するための一般化させた評価指標を作成している。

表1 一般的な仮説形成段階の評価指標

①: 操作 …明確な意図がなく, 実験素材を用いて何らかの試行をしている。
②: 要素の抽出 …注目する(自然)現象や疑問と関係がありそうな要素を挙げたり, 関係を検証したりしようとしている。
③: 説明仮説の形成 …ある要素が, どのような過程を経てその(自然)現象をもたらしているか(または, ある要素と疑問の関係は, どうなっているか)説明している。
④: 作業仮説の形成 …説明仮説から導かれる他の現象を予想し, 検証的な実験を立案している。

(出典: 向井ら, 2019, p. 463)

山口・田中・小林 (2015) は, 仮説を説明仮説と作業仮説の2種類に分け, 変数を抽出することを述べているが, 変数をいかに認識するかに関して詳細に述べていない。変数をいかに認識するかについては, 中村・松浦 (2018) と橘・藤村 (2010) の研究がある。中村・松浦 (2018) は, 仮説の表現に至る思考過程において, 変数の同定を行い, 因果関係を認識した上で, 仮説の表現が行われていることを示している。橘・藤村 (2010) は, 課題解決の活動において, 解決に関わる要素の抽出を行った後, 要素の関連付けを行い, 説明構築をす解決のための方略を提示している。

これらを基に, 向井ら (2019) は, 要素の抽出を経て, 要素を関連付けることによって, 説明仮説・作業仮説を形成するといった仮説形成の一連の段階における評価指標を作成している。

3.2. 仮説形成段階の詳細

向井ら (2019) の研究を基に, 各仮説形成段階の内容を示す。段階「①: 操作」は, ある現象や疑問についての仮説に基づかない探索的な実験を行う段階であり, 実験素材を用いた試行錯誤が行われる。段階「②: 要素の抽出」は, 現象や疑問に関する要素を挙げる段階であり, 段階「①: 操作」の探索的な実験から考えられる現象や疑問に関する要素が取り上げられる。段階「③: 説明仮説の形成」は, 段階「②: 要素の抽出」で挙げた要素が現象や疑問とどのように関係しているかを説明する段階である。なお, 山口ら (2015) は, この説明仮説を「ある事象を説明するための仮説」と説明している。最後の段階「④: 作業仮説の形成」は, 段階「③: 説明仮説の形成」で得た説明仮説を用いて, 他の現象を予想しながら, 検証する実験の計画を行う段階である。山口ら (2015) は, この作業仮説を「…すれば, …は, …になる。」と作業を伴う仮説であるとしている。

本研究では, この仮説形成段階の評価指標で評価される探究活動の内容に着目し, 学習者が段階「②: 要素の抽出」と段階「③: 説明仮説の形成」で行う探究活動に焦点を当てる。

4. システム思考の捉え方

システム思考の定義は, Richmond (1994) や Senge (1990) など研究者によって様々である (Arnold & Wade, 2015, p. 675)。

システム思考の第一人者である Richmond (1994) は, システム思考を「森と木の両方を見ることができるような視点を有することである。」と指摘している。つまり, システム思考は, 全体的な視点と部分的な視点の両方を持つことであると考えられることができる。

さらに, Evagorousら (2009) は, システム思考を「複雑なシステムを理解し, 解釈する能力である。」と指摘している。

以上から, 本研究では, システム思考を全体的な視点と部分的な視点の両方を持ち, 複雑な問題を解決するための能力と捉えた。

5. 「要素の抽出」と「説明仮説の形成」に該当するシステム思考のスキル

Orgill, York, & MacKellar (2019) は, システム思考を行う際に, どのスキルやコンピテンシーを身に付けるべきかというコンセンサスはないと述べている。し

かしながら, Orgillら (2019) は, 化学教育へのシステム思考として, Richmond (1997) と Assaraf & Orion (2010) のシステム思考を挙げている。

本章では, Richmond(1997)と Assaraf & Orion(2010) のシステム思考のスキルを分析し, 仮説形成段階の段階「②:要素の抽出」と段階「③:説明仮説の形成」における現象に関係のある要素を検討するスキルについて明らかにする。

5.1. Richmondのシステム思考

5.1.1. Richmondのシステム思考の段階

Richmond (1997) は,システム思考を用いるにあたって, 表2に示す4つのシステム思考段階を設定している。

表2 システム思考の段階

段 階	内 容
1.問題・課題の特定	解決したい問題を特定する。
2.仮説の構築	問題を説明するための仮説を立てる。
3.仮説の検証	モデルを使って仮説を検証する。
4.変更, 理解したこと を伝達	新たに見つけたことを 他者に伝え, 変更する。

(出典: Richmond, 1997を基に筆者が作成)

5.1.2. 「要素の抽出」と「説明仮説の形成」に該当するRichmondのシステム思考のスキル

仮説形成段階の段階「②:要素の抽出」では, 現象

や疑問と関係のありそうな要素を挙げる段階であり, 段階「③:説明仮説の形成」では, 要素が現象や疑問とどのように関係しているかを説明する段階である。

Richmond (1997) のシステム思考の段階において, 仮説形成段階の段階「②:要素の抽出」と段階「③:説明仮説の形成」に該当するのは, 解決したい問題を説明するための仮説を立てる段階「2:仮説の構築」であると考えられる。

仮説形成段階における段階「②:要素の抽出」と段階「③:説明仮説の形成」に該当すると考えられる Richmond (1997) のシステム思考のスキルとそのスキルの説明を表3に示す。

「原因としてのシステム思考」は, システムの動きの内部における原因に焦点を当てて考える (Orgill et al., 2019)。このスキルについて, Richmond (1997) は, 整理できる要素であり, 説明しようとしているシステムの動きを生み出すことができるものを要素として含めるべきであると述べている。つまり, システム内で起こる現象に関係のある原因を特定するスキルであると考えられる。原因を要素と見た場合, このスキルは, 仮説形成段階の現象と関係ある要素を挙げる段階である段階「②:要素の抽出」に該当すると考えられる。

「フォレスト思考」は, システムの一部だけに焦点を当てるのではなく, システム全体の動きを検討する (Orgill et al., 2019)。Richmond (1997) は, 「違いではなく共通点に焦点を当てるようにする。」と述べている。つまり, 「フォレスト思考」は, システム内で起こる現象における要素どうしで共通している事柄を

表3 「要素の抽出」と「説明仮説の形成」に該当するRichmond (1997) のシステム思考のスキル

仮説形成段階 (向井ら, 2019)	スキルの名称 (Richmond, 1997)	スキルの説明 (Orgill et al., 2019)
②:要素の抽出	原因としてのシステム思考 (System-as-Cause Thinking)	システムの動きの外部の原因ではなく, システムの動きの内部の原因を考える。
③:説明仮説の形成	フォレスト思考 (Forest Thinking)	システムの部分としての動きではなく, システム全体としての動きを考える。
	操作的思考 (Operational Thinking)	システムの動きの原因となる変数とその変数がどのようにシステムの動きに変化をもたらすかについて焦点を当てる。
	閉回路思考 (Closed-Loop Thinking)	システムに関連する2つの変数が互いにどのように影響するかを考える。
	定量的思考 (Quantitative Thinking)	あるシステムの動きの変数の絶対的な影響ではなく, 変数の相対的な影響を考える。

(出典: 向井ら, 2019; Richmond, 1997; Orgill et al., 2019を基に筆者が作成)

挙げ、現象をシステム全体で捉えるスキルであると考
えられる。このスキルは、要素を用いて、現象を説明
するものになるため、仮説形成段階の段階「③：説明
仮説の形成」に含まれると考えられる。

「操作的思考」は、変数がどのようにして現象の動き
を引き起こすかについて考える (Orgill et al., 2019)。
つまり、「操作的思考」は、システム内で起こる現象
を独立変数によりどのように変化するかについて説明
するスキルである。このスキルは、要素と現象の関係を
説明するものであるため、仮説形成段階の段階「③：
説明仮説の形成」に含まれると考えられる。

「閉回路思考」は、システムに関連する2つの変数が
互いにどのように影響するかを考える (Orgill et al.,
2019)。つまり、「閉回路思考」は、システム内で起
きる現象を2つの変数の因果関係により説明するスキ
ルである。このスキルは、要素どうしの因果関係を調
べ、現象と結びつけて考えるものであり、仮説形成段
階の段階「③：説明仮説の形成」に含まれると考えら
れる。

「定量的思考」は、変数の絶対的な影響と対照的に、
あるシステムの動きの変数の相対的な影響を考える
(Orgill et al., 2019)。Orgillら (2019) は、このスキ
ルの説明の際に、システムの部分間の相互関係を明ら
かにするだけでないと述べている。つまり、このスキ
ルは、部分間の相互関係に影響を与える要素に着目す
るスキルであると考えられる。このスキルは、相対的
な変数を要素と見たとき、要素と現象との関係を説明
することから仮説形成段階の段階「③：説明仮説の形
成」に含まれると考えられる。

5.2. Assaraf & Orionのシステム思考

5.2.1. Assaraf & Orionのシステム思考の段階

Assaraf & Orion (2010) のシステム思考は、スキル
が階層的かつ順序的に展開されているため、「システ
ム思考の階層モデル」(以下、Systems Thinking
Hierarchical の頭文字を取って、STHモデルとする)
と称されるピラミッド型の階層構造で整理されている
(Assaraf & Orion, 2010, pp. 1255-1256; Orgill et al.,
2019)。

また、高レベルのスキルに到達した生徒は、低レベ
ルのスキルを習得していることになり、高レベルであ
るほど、そのスキルを用いることができる生徒が少な
くなるとされている (Assaraf & Orion, 2010)。しか
しながら、このシステム思考のスキルを生徒に指導し、

定着度を図った研究では、大部分の生徒が高レベルの
スキルを身に付けたことが明らかにされている
(Keynan, Assaraf, & Goldman, 2014, p. 90)。

これらのスキルには、3つの段階があり、段階「1：
システムの構成要素³⁾の分析」、段階「2：システムの
構成要素の統合」、段階「3：実施」の3つに分けら
れている。

5.2.2. 「要素の抽出」と「説明仮説の形成」に該当する Assaraf & Orionのシステム思考のスキル

仮説形成段階の段階「②：要素の抽出」では、現象
や疑問と関係のありそうな要素を挙げる段階である。
Assaraf & Orion (2010) のシステム思考の段階におい
て、仮説形成段階の段階「②：要素の抽出」に該当す
るのは、システム内の要素について調べる段階「1：
システムの構成要素の分析」であると考えられる。ま
た、仮説形成段階の段階「③：説明仮説の形成」では、
要素が現象や疑問とどのように関係しているかを説明
する段階である。Assaraf & Orion (2010) のシステ
ム思考の段階において、仮説形成段階の段階「③：説
明仮説の形成」に該当するのは、要素間の関係付けを行
う段階「2：システムの構成要素の統合」であると思
えられる。

仮説形成段階の段階「②：要素の抽出」と段階「③：
説明仮説の形成」に該当すると考えられる Assaraf &
Orion (2010) のシステム思考のスキルを表4に示す。

「STH1：システムの構成要素を明らかにする能力」
は、システムにおける構成要素を挙げている点で、仮
説形成段階の段階「②：要素の抽出」に該当すると考
えられる。

「STH2：システムの構成要素の中の関係を明らかに
する能力」は、どの構成要素が現象と関連、接続して
いるかを考える。このスキルは、構成要素と現象の関
係を明らかにする説明を行うため、仮説形成段階の段
階「③：説明仮説の形成」に含まれると考えられる。

「STH3：システム内のダイナミックな関係を明らか
にする能力」は、どのように構成要素と現象が関連し
ているのか、また、時間に伴い、構成要素が互いにど
のように影響しあっているのかを明らかにする。この
スキルは、構成要素と現象の関係を説明するためのも
のであり、仮説形成段階の段階「③：説明仮説の形成」
に含まれると考えられる。

「STH4：システムの構成要素を関係の枠組みの中で
整理する能力」は、STH1で取り上げた構成要素すべて

表4 「要素の抽出」と「説明仮説の形成」に該当するAssaraf & Orion (2010) のシステム思考のスキル

仮説形成段階 (向井ら, 2019)	スキルの名称 (Assaraf & Orion, 2010)	スキルの説明 (Orgill et al., 2019)
②：要素の抽出	STH1： システムの構成要素を明らかにする能力	システムの構成要素とは何か、また、その特徴は、何かを明らかにする能力である。
③：説明仮説の形成	STH2： システムの構成要素の中の関係を明らかにする能力	システムの構成要素のどれが関連しているのか、接続しているのかを明らかにする能力である。
	STH3： システム内のダイナミックな関係を明らかにする能力	システムの構成要素は、どのように関連しているのかを明らかにする能力である。また、時間とともに、構成要素は互いにどのような影響を与えるかを明らかにする能力である。
	STH4： システムの構成要素を関係の枠組みの中で整理する能力	システム内のすべての関係は、どのように相互に関連しているのかを整理する能力である。
	STH5： システムの循環的性質を理解する能力	システムの動きで繰り返されるパターンには、どのようなものがあるかを明らかにする能力である。また、それらの繰り返し、あるいは、循環的な動きの原因は何かを明らかにする能力である。

(出典：向井ら, 2019；Assaraf & Orion, 2010；Orgill et al., 2019を基に筆者が作成)

注) 名称には、順番ごとにSTH1～STH5と表現している。

がどのように相互に関連しているかということの整理を行う。このスキルは、構成要素と現象の関係の説明をまとめるものであるため、仮説形成段階の段階「③：説明仮説の形成」に含まれると考えられる。

「STH5：システムの循環的性質を理解する能力」は、循環する現象がある際に、その現象の構成要素の動きを明らかにし、循環の原因が何であるかを把握する。このスキルは、構成要素と現象の関係を見ている点で、仮説形成段階の段階「③：説明仮説の形成」に含まれると考えられる。

6. 「要素の抽出」と「説明仮説の形成」におけるシステム思考のスキル

本章では、Assaraf & Orion (2010) のシステム思考のスキルを「要素」に着目して捉え直し、「要素の抽出」と「説明仮説の形成」におけるシステム思考のスキルを導出する。Assaraf & Orion (2010) のシステム思考のスキルは、システムの構成要素に応じた考え方を示したものである。本研究の課題である要素に焦点を当てて考える「要素の抽出」と「説明仮説の形成」にAssaraf & Orion (2010) のシステム思考のスキルが


類似するものであると考え、これらのスキルを採用した。導出したスキルを表5に示す。

STH1からSTH5を用いて、「要素の抽出」と「説明仮説の形成」におけるシステム思考のスキルを5つ導出した。

「スキル6：各要素における変数の相対的な影響を明らかにする。」に関しては、Richmond (1997) のシステム思考のスキルである「定量的思考」を参考としている。「定量的思考」は、あるシステムの動きの変数の絶対的な影響とは違って、変数の相対的な影響を考えるものである。これは、Assaraf & Orion (2010) のシステム思考には見られなかったスキルである。「定量的思考」から導出したスキルは、要素すべてと現象との関係付けを行った後に考えるため、高レベルのスキルとして位置付けている。

Assaraf & Orion (2010) のシステム思考のスキルは、低レベルのスキルから高レベルのスキルのものへと順番に習得していくことが必要であり、同様に「要素の抽出」と「説明仮説の形成」におけるシステム思考のスキルも階層的に表されると考えられる。下位にあるスキルが低レベルのものであり、上位が高レベルのも

表5 「要素の抽出」と「説明仮説の形成」におけるシステム思考のスキル (筆者作成)

Assaraf & Orion (2010) のシステム思考のスキルの説明	「要素の抽出」と「説明仮説の形成」におけるシステム思考のスキル	レベル
—	スキル6： 各要素における変数の相対的な影響を特定する。	 <p>高</p> <p>低</p>
システムの動きで繰り返されるパターンには、どのようなものがあるかを明らかにする能力である。また、それらの繰り返し、あるいは、循環的な動きの原因は何かを明らかにする能力である。	スキル5： 繰り返される現象がどのような要素の動きで生じるかを考察する。	
システム内のすべての関係は、どのように相互に関連しているのかを整理する能力である。	スキル4： すべての要素が互いにどのように影響しているかを考察する。	
システムの構成要素は、どのように関連しているのかを明らかにする能力である。また、時間とともに、構成要素は、互いにどのような影響を与えるかを明らかにする能力である。	スキル3： 各要素がどのように現象の動きと関連しているか、また、各要素が互いにどのように関連しているかを考察する。	
システムの構成要素のどれが関連しているのか、接続しているのかを明らかにする能力である。	スキル2： 各要素と現象とのつながりを特定する。	
システムの構成要素とは何か、また、その特徴は、何かを明らかにする能力である。	スキル1： 各要素を特定する。	

注1) —は、該当するスキルがないことを示している。

注2) 導出した「要素の抽出」と「説明仮説の形成」におけるシステム思考のスキルには、それぞれスキル1からスキル6と示す。

注3) スキル1からスキル4までは、順にレベルが高くなっていくが、スキル5とスキル6にはレベルに差はない。

のとなっている。また、「スキル6：各要素における変数の相対的な影響を特定する。」は、Richmond(1997)のシステム思考のスキルから採用しているため、「スキル5：繰り返される現象がどのような要素の動きで生じるかを考察する。」と「スキル6：各要素における変数の相対的な影響を特定する。」にはレベルに差がない。

7. 考察

「要素の抽出」と「説明仮説の形成」におけるシステム思考のスキルと授業における課題の設定の関係について考察する。

Assaraf & Orion (2010) のシステム思考のスキルでは、高レベルのスキルに到達した生徒は、低レベルのスキルを習得していることになる (Assaraf & Orion, 2010)。つまり、導出した「要素の抽出」と「説明仮

説の形成」におけるシステム思考のスキルにおいても、高レベルのスキルを習得していたとき、低レベルのスキルも習得していると考えられる。

また、Assaraf & Orion (2010) のシステム思考のスキルでは、高レベルであるほど、そのスキルを用いる生徒が少なくなる (Assaraf & Orion, 2010)。つまり、生徒の発達段階や課題の難易度によっては、「要素の抽出」と「説明仮説の形成」におけるシステム思考の高レベルのスキルを用いることが困難になると考えられる。

以上のことから、「要素の抽出」と「説明仮説の形成」におけるシステム思考のスキルを授業に導入する際は、生徒が用いることができるスキルのレベルに応じて、課題となる現象を選択する必要がある。授業において、生徒が用いることができるスキルを活用し、現象を解決させることで、仮説形成段階における、「要

素の抽出」と「説明仮説の形成」を促すことができることが示唆される。

8. おわりに

本研究では、「要素の抽出」と「説明仮説の形成」におけるシステム思考のスキルを導出した。これらのスキルを活用して、部分的な視点で現象における要素を明らかにし、要素と現象、または、要素どうしの関係を導くことで、要素すべての関係から現象全体を理解する視点に広げることができると考えられる。

また、導出した「要素の抽出」と「説明仮説の形成」におけるシステム思考のスキルは、レベルごとに分かれており、生徒が用いることができるレベルに応じた適切な課題を選択する必要がある。また、この課題では、システム思考が必要とされていた実世界における複雑な現象を扱うことと、生徒に課題解決をさせるために生徒が興味・関心のある現象を扱うことが望ましいと考えられる。

附記

本稿は、令和3年度一般社団法人日本理科教育学会第66回東海支部大会において発表した「理科教育におけるシステム思考に関する研究—探究の過程における仮説形成に着目して—」の内容を、大幅に加筆・修正したものである。

註

- 1) 本研究では、システムについては、複雑な要素で構成される系と捉えている。
- 2) 本研究では、スキルについては、英英辞典における“skill”の意味から“an ability to do something well, especially because you have practiced it.” (Summers, 1998) を基に、「何かを実践したために、上手くできるようになる能力」と捉えている。
- 3) Assaraf & Orion (2010) のシステム思考のスキルでは、構成要素 (component) という用語が用いられているが、本研究では、構成要素のあるシステムに含まれる要素 (element) として捉えている。

引用文献

Arnold, R. D., & Wade, J. P. (2015). A Definition of Systems Thinking: A Systems Approach. *Procedia Computer Science*, 44, 669-678.

Assaraf, O. B., & Orion, N. (2009). System thinking skills at the elementary school level. *Journal of research in science teaching*, 47(5), 540-563.

Assaraf, O. B., & Orion, N. (2010). Four case studies, six years later: Developing system thinking skills in junior high school and sustaining them over time. *Journal of research in science teaching*, 47(10), 1253-1280.

中央教育審議会 (2016) 『幼稚園、小学校、中学校、高等学校及び特別支援学校の学習指導要領等の改善及び必要な方策等について(答申)』 Retrieved from https://www.mext.go.jp/b_menu/shingi/chukyo/chukyo0/toushin/_icsFiles/afieldfile/2017/01/10/1380902_0.pdf (accessed 2021. 11. 12)

Evagorou, M., Korfiatis, K., Nicolaou, C., & Constantinou, C. (2009). An investigation of the potential of interactive simulations for developing systems thinking skills in elementary school: A case study with fifth-graders and sixth-graders. *International Journal of Science Education*, 31(5), 655-674.

Keynan, A., Assaraf, O. B., & Goldman, D. (2014). The repertory grid as a tool for evaluating the development of students' ecological system thinking abilities. *Studies in Educational Evaluation*, 41, 90-105.

向井大喜・村上忠幸・松本伸示 (2019) 「高校生による科学的問題解決における仮説形成過程の評価に関する研究」『理科教育学研究』第60巻, 第2号, 455-464.

中村大輝・松浦拓也 (2018) 「仮説設定における思考過程とその合理性に関する基礎的研究」『理科教育学研究』第58巻, 第2号, 279-292.

Orgill, M., York, S., & MacKellar, J. (2019). Introduction to systems thinking for the chemistry education community. *Journal of Science Education*, 96(12), 2720-2729.

Richmond, B. (1993). Systems thinking: Critical thinking skills for the 1990s and beyond. *System Dynamics Review*, 9(2), 113-133.

Richmond, B. (1994). System dynamics/systems thinking: Let's just get on with it. *System Dynamics Review*, 10(2-3), 135-157.

Richmond, B. (1997). The “thinking” in systems

- thinking: How can we make it easier to master?. *The Systems Thinker*, 8(2), 1-5.
- Senge, P. (1990). *The fifth discipline, the art and practice of the learning organization*. New York: Doubleday/Currency.
- Summers, D. (1998). *Longman active study dictionary*. Harlow: Addison Wesley Longman.
- 高橋信幸・松本伸示 (2018) 「高等学校理科『課題研究』における話し合いを重視した実践：メタ認知を促し仮説設定力を高める研究プロセス」『兵庫教育大学教育実践学論集』第19巻, 211-218.
- 橘春菜・藤村宣之 (2010) 「高校生のペアでの協同解決を通じた知識統合過程」『教育心理学研究』第58巻, 第1号, 1-11.
- 山口真人・田中保樹・小林辰至 (2015) 「科学的な問題解決において児童・生徒に仮説を設定させる指導の方略—The Four Question Strategy (4QS) における推論の過程に関する一考察—」『理科教育学研究』第55巻, 第4号, 437-443.