第一工科大学研究報告
第36号（2024）pp.86-101

日本における数学的モデル化に関する近年の研究動向
―査読論文を対象としたシステマティックレビュー―

森田大輔[1]，奥田航真[2]，渋沢良太[3]

[1] 第一工科大学　共通教育センター（〒899-4395　鹿児島県霧島市国分中央 1-10-2）

[2] 第一工科大学　工学部　情報・AI・データサイエンス学科（学部生）（〒899-4395　鹿児島県霧島市国分中央 1-10-2）

[3] 第一工科大学　工学部　情報・AI・データサイエンス学科（〒899-4395　鹿児島県霧島市国分中央 1-10-2）

Recent research trends in mathematical modeling in Japan: A systematic review of peer-reviewed papers

Daisuke Morita[1], Kazuma Okuda[2], Ryota Shibusawa[3]

[1]Common Education Center, Daiichi Institute of Technology (1-10-2, Kokubu-chuo, Kirishima, Kagoshima 899-4395 Japan)

[2]Faculty of Engineering, Daiichi Institute of Technology (undergraduate) (1-10-2, Kokubu-chuo, Kirishima, Kagoshima 899-4395 Japan)

[3]Faculty of Engineering, Daiichi Institute of Technology (1-10-2, Kokubu-chuo, Kirishima, Kagoshima 899-4395 Japan)

Abstract: In mathematics education in Japan, mathematization and mathematical modeling are becoming increasingly important in mathematics learning. In addition, with the development of technology, more enhancement of these learning activities is expected. Therefore, the purpose of this paper is to explore trends in mathematical modeling research from 2014 to the present and to identify trends and issues. The methodology employed in this paper is a systematic review, which attempts to reduce bias by selecting relevant individual literature and evaluating its validity using objective and reproducible criteria. 41 articles were identified as original papers on mathematical modeling research in Japan that have been peer-reviewed and published. The review identified trends and biases in mathematical modeling research from the two perspectives of "research and investigation targets" and "teaching materials and keywords." The following three points were highlighted as research that should be undertaken in the future:

1. research on mathematical modeling that relies on critical mathematics education,
2. research on teacher training and teacher education regarding the teaching of mathematical modeling,
3. research on mathematical modeling associated with technology and programming.

Key words: Problem solving, Mathematical modeling, Systematic review

1. はじめに

これまで，数学教育研究では問題解決や数学的活動の重要性が幾度となく強調されてきた．遡れば，その源流はポリヤ（1945/1954）や Freudenthal（1968）にあると考えられる．特に，Freudenthal（1968）は「人間が学ばなければならないのは閉じた体系としての数学ではなく，むしろ活動としての数学であり，現実を数学化することの過程，そして可能であれば，数学を数学化することの過程」（p.7）の重要性を主張し，後に「数学化」と位置づけられることとなった．そして，これは現行の学習指導要領においても重要視されており，中央教育審議会（2016）は次頁のような図を提唱し，その中に数学化を明確に位置づけている．

図 1 の中でも，左側のサイクル（A1→B→C→D1）を示す一連の学習活動は「数学的モデル化」と呼ばれる．池田（2010）によれば，「実世界の問題が生じる

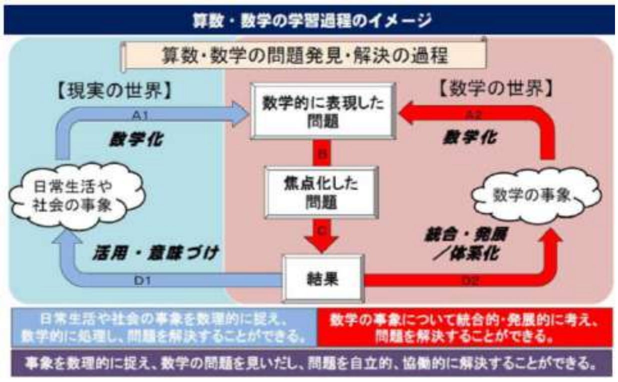

図１　算数・数学の学習過程のイメージ
（中央教育審議会，2016）

場面から始まって，数学的モデルをつくり，妥当な結論が得られるまで数学的モデルを繰り返し修正していく一連の活動」（p.273）が数学的モデル化，あるいは数学的モデリングと呼ばれるものである．数学的モデル化の研究は，三輪（1983）を皮切りに国内で研究の数が増え，2010 年代には研究動向を整理するレビュー記事が出るようになった（e.g., 池田，2010，2013；佐伯，2013）．2013 年以後も数学的モデル化に関する研究は国内外で増加の一途を辿るばかりであるが，この 10 年の間には研究の質的・量的増加だけでなく，テクノロジーの発達も進んできた．特に，新型コロナウイルス感染症（COVID-19）の流行を契機に，我が国の学校教育においても「1 人 1 台端末の普及」と「高速通信環境の整備」を軸とした GIGA スクール構想が一層進められることとなった．それでは，GIGA スクール構想下において，どのような数学的モデル化の学習活動が期待できるだろうか．また，ここ 10 年の数学的モデル化研究は，GIGA スクール構想にどのように応えることができるのだろうか．かねてから，グラフ電卓や関数電卓を用いた数学的モデル化の実践事例（e.g., 佐伯ら，1997）があるが，BYOD（Bring Your Own Device）が人口に膾炙した現代においては，より洗練された学習者の活動が期待できる．

そこで，本稿では，最後にレビュー記事が出た次の年（2014 年）から現在に至るまでの数学的モデル化研究の動向を探り，その傾向と課題を明らかにすることを目的とする．そのために，本稿ではシステマティックレビューを方法論として採用する．システマティックレビューとは，客観的で再現性のある基準を用いて，関連する個々の文献を選択し，その妥当性を評価することで，バイアスを軽減しようとするレビュー方法である（Collins & Fauser, 2005, p.103）．システマティックレビューを行うことで，数学的モデル化研究の動向を明らかにした研究は国外でもしばしばみられる（e.g., Cevikbas et al., 2022; Hidayat et al., 2022）．また，国内の数学教育研究においてもシステマティックレビューが用いられるようになっている．例えば，森田（2022）は査読論文を対象として，我が国における数学教師教育研究の動向と課題を明らかにしている．

本稿の章構成は以下の通りである．まず，先行研究群やレビューの観点を同定するための予備作業として，国内外の数学的モデル化研究を概観する（2 章）．次に，本稿における調査の対象と方法について詳述する（3 章）．そして，調査の結果を明示したうえで（4 章），それに対する考察を行う（5 章）．最後に，本稿の結論と今後の課題を述べていく（6 章）．

2. 本稿におけるレビューの観点

数学的モデル化の研究動向を追うにあたっては，「各論文をどのように特徴づけるか？」というレビューの観点を定める必要がある．本稿では，その観点として「研究・調査の対象」と「開発教材とキーワード」の 2 つを定めることとする．

まず，「研究・調査の対象」については，学校種で区分することが適切であると考えられる．具体的には，「小学校」「中学校」「高等学校」「高専・大学等」を定めるのが適当である．さらに，近年では数学的モデル化の指導に関する教員研修についても研究がされるようになってきている．そこで，上記の学校種に加え，「教師教育」という区分を設けて，各論文の特徴づけを行うこととする．

また，「開発教材とキーワード」については，本文などを参照することで抜き出すことは十分可能であるが，多くの場合，キーワードにはその論文の理論的枠組みが現れることが多く，また開発された教材はその理論的枠組みに基づいて作成されている．各論文の理解を深めるためには，当該論文における理論的枠組みを理解することが重要である．そのため，こ

こでは数学的モデル化に関わる理論的枠組みとして代表的なもの（RME 理論，MEA 理論，批判的数学教育）を列挙し，それぞれの特徴を概観する．

まず，RME（Realistic Mathematics Education）理論は Freudenthal（1968）の「活動としての数学」という考えに基づいたものであり，「数学化」を核とした理論である．RME 理論においては追発明（reinvention）が重要視される．追発明とは，「発明者の歴史的足跡ではなく，今日の学習者に合わせて修正され，適切な軌跡へと導かれた歴史の解釈に沿って行われる」（伊藤，2006，p.627）教授・学習の原理である．追発明においては，「児童・生徒が自力で意図した考えを見出さなくても，教師の場面設定，発問等により自然な流れでそれらの考えが導出されればよいという考えで，児童・生徒の知識観がどのように構築されるか」（池田，2013，p.4）という点が重要視される．また，RME 理論におけるモデルは，数学がインフォーマルで文脈固有の状態である水準と，相対的によりフォーマルで一般的である水準を橋渡し・媒介する道具であるとみなされる．そして，その特徴は，モデルははじめ文脈上の問題を表現する方法であり，学習者の活動を参照する文脈固有のものとして表面化し（model-of），のちに新たな問題状況を整理するための，そしてよりフォーマルに数学的な推論をするための基盤（model-for）へと転換するという「model-of から model-for への転換」にあり，これらは「自己発達モデル」と呼ばれる（e.g., Gravemeijer, 1997; Van den Heuvel-Panhuizen, 2003）．以上を総合すると，「Model-of から Model-for への移行は，生徒たちの『常識』を徐々に広げていくためのメカニズム」であるとともに，「長期にわたる指導の中で，複数の文脈のある問題を取り扱っていくことにより，生徒のインフォーマルな知識がフォーマルな知識へと成長していく過程」（池田，2013，p.4）を重視する点が RME 理論の大きな特徴であるということができる．

次に取り上げるのは，MEA（Model Eliciting Approach）理論である．これは，米国における問題解決学習を背景に，その問題点を克服する形で提唱されている理論である．従来の問題解決は既習の数学的概念や数学的知識を問題解決に応用するものとみなされていたが，MEA 理論においては問題を解決する中で新しい数学的概念や数学的知識の考え方を導出していくような問題解決の在り方が重要視される．このような問題解決の捉え方を Lesh and Doerr（2003）や Lesh and Zawojewski（2007）は Models-and-Modeling Perspective（以下，MMP と略記）と呼んでいる．このように MEA 理論においては，できあがった数学を理解して応用するのではなく，生徒自身が見出した考えを基に，それを表現・検証・修正していく過程が重要視され，生徒なりの考え（model）を引き出す（elicit）という MEA 理論の名称の由来となっている．また，MEA 理論は RME 理論と共通している部分もあり，「リアリティーを数学化すること」という点が共通している一方，RME 理論では model-of から model-for への移行による長期的な概念構成に焦点をあてている一方，MEA 理論は複雑で社会的な場面で意思決定していく活動に焦点をあてているという点に違いが見られる（池田，2013，p.9）．

最後に検討するのは，批判的数学教育（Skovsmose, 1994/2020）である．これは，Adorno による批判的教育学を数学教育へ展開した理論であり，政治や環境などに関する題材を扱うことで，社会や政治の中で独立して判断できる市民，公平さを追求する市民の育成を目指した理論である．批判的数学教育の関心は次のように要約することができる．

> 生徒が科学技術社会に効果的に馴染み，同時に，この社会に向けて批判的な態度を育成する可能性をなくさないようにするためには，教育を批判的に見ることが重要である．数学の形式化力についての論は形式科学が発明を現実に変えることを示唆し，そして，このことは数学教育に焦点があてられることを意味する．重要な問いは，この教育が生徒たちに批判的な市民になるための基礎的な能力を身につけさせることができるかどうかである．
> （Skovsmose，1994/2020，p.89）

また，批判的数学教育において，算数・数学は社会的な進歩に関連するもので，社会生活のあらゆる面で用いられたり，社会生活の一部になっていたりす

るものである．このように，批判的に見ることを強調した数学指導では，生徒が将来社会の中で出くわすであろう数学的モデルを対象にし，それを再解釈・再構成して批判的に考えていく点が特徴として挙げられる（池田，2013，p.6）．

3. 調査の対象と方法

3.1 調査の対象

本稿では，2014 年から現在までに発刊された，日本における数学的モデル化に関する一連の先行研究群を調査の対象とする．なお，論文の質を担保するため，調査対象は学術雑誌に掲載された査読付き原著論文のみとする．また，森田（2022）と同様，学術雑誌は教科教育学を議論の中心に据えている全国的規模の以下の 5 つの学会誌を対象とする．

- 日本数学教育学会誌：算数教育，数学教育，数学教育学論究（秋期研究大会特集号を含む）
- 全国数学教育学会誌：数学教育学研究
- 数学教育学会誌
- 日本科学教育学会誌：科学教育研究
- 日本教科教育学会誌

調査対象となる論文の抽出方法についても，森田（2022）と同様，学術論文の検索エンジンである CiNii Research を用いた．論文の抽出にあたっては，論文によって「数学的モデル化過程」や「数学的モデリング」のように用いられる用語が違うこと，「教育」や「教材」といった言葉がしばしば用いられること，題目に「モデル化」などの言葉が用いられていない可能性もあることという 3 点を考慮し，フリーワードに「(算数 OR 数学) AND 教 AND (モデ OR 数学化)」と入力したうえで，出版年を 2014 年から 2024 年と指定し，検索を実行した．その結果，881 本の論文がヒットした（2024 年 4 月 13 日現在）．そこから，以下のような除外基準を設け，①から⑤まで順に追って検索対象を除外することによって，本稿で対象とする「査読を経て公表された，日本における数学的モデル化研究に関する原著論文」を抽出した．なお，末尾の括弧内の数字はそれぞれの除外基準によって除外された論文の本数を指している．

---

①本稿では論文の質を担保するため，前述の 5 誌を調査対象としている．そのため，これら 5 誌以外の論文や資料を除外する．（753 本）

②検索結果の中には，博士論文や修士論文等の要約，報告や翻訳，寄稿論文，講演録等も含まれている．本稿では原著論文を対象とするため，これらの論文を除外する．（32 本）

③授業モデルや理解モデルなどのように，数学的モデル化以外の意味で「モデル」という言葉が用いられている場合がある．そこで本稿では，「数学的モデル化」以外の意味で「モデル」が用いられている論文を除外する．（32 本）

④検索結果の中には，分量が少なく，原著論文とみなすことのできないものもあった．そこで本稿では，5 頁以下の論文を除外する．（1 本）

⑤検索エンジンの仕様で，検索結果が重複しているものがあったため，それらを除外した．（22 本）

このような過程を経た結果，41 本の論文が抽出された．抽出された論文は，森田（2022）と同様，本稿巻末の「引用・参考文献」においてアスタリスクマーク(*)が付された上でリストアップされている．

3.2 調査の方法

前述の通り，本稿ではシステマティックレビューを方法論とし，41 本の論文群の分析を行う．具体的には，論文を著者のアルファベット順に配列した上で，「研究・調査の対象」「開発教材とキーワード」の観点から各論文の特徴づけを行う．その際，「研究・調査の対象」については，「小学校」「中学校」「高等学校」「高専・大学等」「教師教育」と区分を設定し，該当する項目に “X” と入力する．また，題目や本文から対象が同定できなかった場合，該当論文はマークを入れずに空欄のままとする．なお，小学校算数科では「A 数と計算」「B 図形」「C 測定（1〜3 年）」「C 変化と関係（4〜6 年）」「D データの活用」，中学校数学科では「A 数と式」「B 図形」「C 関数」「D データの活用」といった 4 つの領域がそれぞれ設定されている一方，高等学校数学科では数学 I を除いて，領域による区別化は明示的になされていない．そこで，以

下のように，各科目の内容を暫定的に 4 つの領域に振り分けることで，各論文の特徴づけを行うこととする．ただし，数学と人間の活動（数学 A），数学と社会生活（数学 B），数学的な表現の工夫（数学 C）は扱う項目が多岐にわたっており，以前の学習指導要領で設定されていた科目「数学活用」から移行されたものであることから，4 つの領域と区別するため「M」とラベリングすることとする．

A: 数と式（数学Ⅰ），いろいろな式（数学Ⅱ），数列（数学 B）

B: 図形と計量（数学Ⅰ），図形と方程式（数学Ⅱ），図形の性質（数学 A），ベクトル（数学 C），平面上の曲線と複素数平面（数学 C）

C: 二次関数（数学Ⅰ），指数関数・対数関数（数学Ⅱ），三角関数（数学Ⅱ），微分・積分の考え（数学Ⅱ），極限（数学Ⅲ），微分法（数学Ⅲ），積分法（数学Ⅲ）

D: データの分析（数学Ⅰ），場合の数と確率（数学 A），統計的な推測（数学 B）

また，「開発教材とキーワード」については本文や J-STAGE を参照し，具体的な項目を列挙する．その際，抽出論文の中には，教材を開発していないものも散見される．その場合は「—」を入力することとする．これらの作業を行った後，数学的モデル化に関する研究の特徴と課題について考察を行うこととする．ただし，石川（2021）に限っては本文中にキーワードの記載がなく，本稿執筆の段階で J-STAGE でも論文の公開がなされておらず，キーワードを同定することができなかったため，空欄とする．

4. 結果

まず，「研究・調査の対象」という観点から各論文の特徴づけを行った．その結果を整理したのが，表 1 である．この中でも，最も多いのが中学校を対象とした研究であり，その数は 17 本（約 41.5%）と 4 割ほどの数を占めている．また，領域ごとに見ていくと，その中でも最も多いのが「C 関数」領域に関する研究で，7 本の論文があげられた（浜田，2014；稲葉・黄瀬・竺沙，2016；圓岡・服部，2023；宮川ら，2014；清野，2015；田中・服部，2020；吉村・秋田，2021）．このことから関数領域と数学的モデル化の親和性がみてとれる．他方で，図形領域に関する論文は 2 本のみ（稲葉・黄瀬・竺沙，2016；山中，2022）であった．また，他の校種に着目すると，高等学校を対象としたのが 10 本（約 24.4%），小学校を対象としたのが 7 本（約 17.1%），高専・大学等，教師教育がともに 3 本（約 7.3%）であった．高等学校を対象とした研究は，複数領域にまたがった教材開発がなされていることが特徴として挙げられる（福嶋，2021；鈴木，2021；田村，2021）．それ故，表 1 において，領域による極端な偏りは見られない．その一方，小学校を対象とした研究の多くは「A 数と計算」領域のものである（平林，2015a，2016a，2016b，2023）．その一方で，B，C，D 領域に関する論文は 1 本ずつしかない．また，学校種が同定できず，空欄となっている論文がいくつかある．これらは，学校種を問わずに指導やカリキュラム構成の在り方を論じたものであったり（阿部，2015；福田，2016；松嵜ら，2021），統計的モデリングに関するレビュー論文だったり（川上，2019）するものである．

表 1　研究・調査の対象から捉えた各論文の特徴づけ

文献	学校種														
	小学校				中学校				高等学校					高専・大学等	教師教育
	A	B	C	D	A	B	C	D	A	B	C	D	M		
阿部（2015）															
福田（2016）															
福嶋（2021）										X		X	X		
浜田（2014）							X								

文献	学校種														
	小学校				中学校				高等学校					高専・大学等	教師教育
	A	B	C	D	A	B	C	D	A	B	C	D	M		
平林（2015a）	X														
平林（2015b）			X												
平林（2016a）	X														
平林（2016b）	X														
平林（2023）	X				X										
久冨（2014）											X				
五十嵐（2014）												X		X	
稲葉・河﨑ら（2016）													X		
稲葉・黄瀬・竺沙（2016）						X	X								
井上（2018）														X	
石橋（2020）								X							
石橋・上ヶ谷（2019）					X										
石川（2021）					X										
上村（2017）										X					
川上（2018）															X
川上（2019）															
川上・佐伯（2022）								X							
川上ら（2020）															X
紀平ら（2015）										X					
小林（2014）									X						
小林（2017）									X						
小林（2019）								X							
小林・辻山（2020）								X							
圓岡・服部（2023）							X								
松嵜（2015）														X	
松嵜ら（2021）															
峰野（2017）								X							
宮川ら（2014）							X								
岡本ら（2020）				X											
佐伯ら（2019）															X
清野（2015）							X								
鈴木（2021）											X	X			
田村（2021）										X	X				

文献	学校種														
	小学校				中学校				高等学校					高専・大学等	教師教育
	A	B	C	D	A	B	C	D	A	B	C	D	M		
田中・服部（2020）							X								
渡邉（2020）		X													
山中（2022）						X									
吉村・秋田（2021）							X								

次に,「開発教材とキーワード」について，集約の結果をまとめたのが以下の表 2 である．開発教材に着目すると，その多くが日常生活に関する場面を題材としていることが伺える. 他方で, 理科的な事象を取り上げている論文が 9 本あることが伺える（稲葉・黄瀬・竺沙，2016 ; 上村，2017 ; 紀平ら，2015 ; 小林，2014，2017 ; 松嵜，2015 ; 宮川ら，2014 ; 鈴木，2021 ; 山中，2022）．さらに，稲葉・河崎ら（2016）は「一票の格差に係わる選挙区割問題」という, 選挙を題材とした政治的な問題を取り扱っており，数学的モデル化研究の広がりを見ることができる.

他方で, 2 章で言及した数学的モデル化研究における主要な理論的枠組み（RME 理論，MEA 理論，批判的数学教育）に依拠した研究が相対的に少ないことが指摘できる．例えば，RME 理論に依拠した研究は 4 本（久冨，2014 ; 小林，2014，2017，2019），MEA 理論に依拠した研究は 5 本（平林，2015a，2015b，2016a，2016b，2023），また批判的数学教育に依拠した研究は今回のレビューでは見受けられなかった. また，中には RME 理論と MEA 理論を組み合わせている論考も見受けられた（福田，2016 ; 山中，2022）. 一方で，ここで取り上げなかった論文全てが理論的基盤を持ち合わせていないということではない．例えば，数学的リテラシー（阿部，2015）やデータ駆動型モデリング（川上・佐伯，2022）など，2 章で取り上げた主要な理論的枠組み以外のものを援用している例もあり，ここから数学的モデル化における理論もこの 10 年で広がりをもつようになったと見ることができる．また，フッサール現象学（松嵜，2015）や概念的相対主義・言語相対論（石川，2021）など，哲学的な議論を数学的モデル化研究に援用している研究も見られるようになってきている.

表 2　開発教材とキーワードから捉えた各論文の特徴づけ

文献	開発教材	キーワード					
		①	②	③	④	⑤	⑥
阿部（2015）	—	数学的リテラシー	数学的モデル化	論証			
福田（2016）	—	生命論－進化的方法	モデリング	統計教育			
福嶋（2021）	有人自動運転カーシェアリング	数学的モデル化	推移確率行列	教材開発			
浜田（2014）	年賀状の配達	数学的モデル化	現実事象	授業課題			
平林（2015a）	ジュースの問題	数学的モデル化	問題場面	文章題	MMP	小学校	比例関係の不成立

文献	開発教材	キーワード					
		①	②	③	④	⑤	⑥
平林 (2015b)	混み具合の問題	数学的モデル化	問題場面の解釈	インタビュー調査			
平林 (2016a)	長いすの問題	数学的モデル化	問題場面	文章題	真正さ	小学校	
平林 (2016b)	長いすの問題	数学的モデル化	解の解釈・評価	教授実験			
平林（2023）	長いすの問題	数学的モデル化	解の解釈・評価	余りのある割り算			
久冨（2014）	体育館のシート片付け	2軸過程モデルに基づく授業構成	創発的モデリング	高等学校数学I「二次関数」			
五十嵐（2014）	時間軸の問題	「時間軸の問題」	数学的モデル化	条件付き確率			
稲葉・河﨑ら（2016）	一票の格差に係わる選挙区割問題, 平面や空間の充填問題	数学的モデリング	組合せ最適化問題	空間充填問題			
稲葉・黄瀬・竺沙（2016）	粒数問題, 葉数問題	数学的モデリング	チャレンジプログラム				
井上（2018）	ローンの利用	問題解決力	数学的モデリング	アクティブ・ラーニング			
石橋（2020）	直方体のさいころ	モデル化	確率教育	確率の意味			
石橋・上ヶ谷（2019）	からあげとまぐろのパック数	妥当化	数学的モデル化	文章題の虚構性	中学校	文章題	連立方程式
石川（2021）	買い物場面におけるかけ算・たし算の順序問題						
上村（2017）	「スーパームーン」の日の予測	幾何学化	スーパームーン	天文現象	数学的モデル化		
川上（2018）	—	数学的モデリング	教員養成	モデリング過程に関わる模式図	数学教科書の問題	教材研究	初等数学

文献	開発教材	キーワード					
		①	②	③	④	⑤	⑥
川上（2019）	—	統計的モデリング	モデル	統計教育	インフォーマルな統計的推測	統計ソフトウェア	
川上・佐伯（2022）	人口予測の課題	データ駆動型モデリング	数学的モデル	統計的モデル	数学教育	統計教育	
川上ら（2019）	—	数学的モデリング	教員研修	算数・数学教科書の問題	再教材化		
紀平ら（2015）	太陽の動きの軌跡, 日影曲線	数学的モデル	日影曲線	空間認識	2 次曲線		
小林（2014）	スリップ痕, 金利	階差数列と一般項の関係	数学を使う・創る授業	モデル			
小林（2017）	金利, スリップ痕	数学化	モデルの転換	数列			
小林（2019）	お小遣い	階級幅の異なるヒストグラム	モデル転換プロセス				
小林・辻山（2020）	コイントス	数学的モデル化過程	解釈・評価・比較	多様なモデル	確率	根源事象	同様に確からしいこと
圓岡・服部（2023）	先生にエアコンをお薦めしよう	数学の問題発見・解決の過程	数学化	活用			
松嵜（2015）	読書をするために必要な明るさ	応用反応分析マップ	原場面の機能	フッサール現象学			
松嵜ら（2021）	—	Disciplinary アプローチ	ディシプリンの構造	数理科学	Multi-Inter-disciplinary モデル		
峰野（2017）	桜の開花予想	数学的モデリング	変数の生成・選択	関数	統計	データの相関	
宮川ら（2014）	斜面を転がる台車の運動	数学的モデリング	モデリング・チャレンジ	斜面上の運動	数学の応用		
岡本ら（2020）	Die Fermi Box	数学的モデリング	フェルミ推定	Die Fermi Box			

文献	開発教材	キーワード					
		①	②	③	④	⑤	⑥
佐伯ら（2019）	—	数学的モデリング	モデリング教材	算数・数学教科書の応用問題	モデリング過程の図式		
清野（2015）	大腿骨の長さから身長を予測する	数学的モデル化	仮定の意識化	比例とみなす			
鈴木（2021）	「高潮」の潮位予測	高潮	吹き寄せ効果	吸い上げ効果	数学化	三角関数	防災
田村（2021）	地球の水平線	射影幾何学	動的幾何学ソフトウェア	数学モデル	無限		
田中・服部（2020）	携帯電話の購入	中学校数学	社会的オープンエンドな問題	批判的思考力			
渡邉（2020）	UFO キャッチャー	プログラミング教育	プログラミング的思考	Computational Thinking	Programming Modeling		
山中（2022）	ライトアップ問題	RME	MMP	接線	対称性	数理モデリング	ライトアップ問題
吉村・秋田（2021）	電球の購入	教材開発	数学的モデリングサイクル	現実事象	現実モデル		

5. 考察

前章における結果を整理すると，次のように整理することができる．

- 中学校を対象とした研究が全体の 4 割を占め，その中でも「C 関数」領域に関するものが最も多い．
- 高等学校を対象とした研究は，領域による極端な偏りは見られず，複数領域をまたいだ教材の開発がなされる傾向がある．
- 他方，小学校を対象とした研究は「A 数と計算」領域に関するものが大半を占めており，「B 図形」「C 測定（1〜3 年）」「C 変化と関係（4〜6 年）」「D データの活用」領域に関する研究は僅少である．
- また，高専や大学等を対象とした研究や，数学的モデル化に関する教師教育の研究は僅少である．
- 開発教材の多くは日常生活に関連したものであるが，中には理科的な事象を題材とした教材も開発されている．
- 主要な理論的枠組み（RME 理論，MEA 理論，批判的数学教育）を援用した研究は相対的に少なく，上記以外の理論的枠組みや他の学問領域における議論を援用するようになりつつある．

これらが近年の数学的モデル化の研究動向ということができる．それでは，今後はどのような数学的モデル化研究を推進する必要があるのだろうか．以下では，森田（2022）同様，研究動向の多寡に基づいて，今後行う必要があると考えられる数学的モデル化研究の方向性として 3 点を挙げ，それぞれに対する考察を行う．

1 点目は，批判的数学教育に依拠した研究の必要性である．もとより，日本において批判的数学教育に関する研究は積極的になされているわけではなかった（中和，2019）．しかし，これからの社会を生きる子どもの資質・能力を育成するという意味では，批判的数学教育に着目することの意義は少なからず存在するものと見受けられる．これからの社会は，より変わりやすくて不確実，複雑で曖昧（Volatile, Uncertain, Complex and Ambiguous: VUCA）な世界となっていく．そして，そのような世界を生き抜く子どもの育成に向けて策定された OECD Education2030 プロジェクトで提案されたラーニング・コンパスでは，ウェルビーイングの達成のために，生徒のエージェンシー（変化を起こすために，自分で目標を設定し，振り返り，責任をもって行動する能力）を高め，発揮していくことの重要性が主張された．例えば，政治への参加の方法，企業のガバナンスの仕組み，コミュニティにおける生活上の取り決めなどの社会のルールも，社会が変化することによって，これまでの伝統的な常識やマナーが通用しなくなるケースも増えてくる．そこで，新たにルールを作ったり，状況に応じてルールを柔軟に変えたりする際にエージェンシーが発揮される（cf. 白井，2020）．このような方向性は，批判的数学教育と軌を一にするものと思われる．リテラシーやマテマシーを発揮させ，社会変革を促す民主主義的な市民を育成することが，今後ますます求められる．そこに批判的数学教育の必要が生じるとともに，その過程において数学的モデル化が機能するものと思われる．

2 点目は，数学的モデル化の指導に関する教師教育研究の必要性である．究極的に，数学教師教育の目標は「問題解決型授業を実現することのできる数学教師の育成」にあると言えよう．そして，中央教育審議会（2016）や MMP の議論にあるように，問題解決と数学的モデル化は同列のものと位置づけることができる．現状では，川上（2018），川上ら（2019），佐伯ら（2019）が「教科書問題の再教材化」を視点にした教師教育研究を展開しているが，現職教員の多くは学習者として数学的モデル化を経験していないことが想定される．それ故，数学的モデル化を題材とした教員研修用の教材の開発が希求される．他にも，数学的モデル化の指導に関わる教授学的内容知識（Pedagogical Content Knowledge: PCK）の形成や，「どのようにして，数学的モデル化を重要だと考えるようになったか？」などといった数学教師の信念やアイデンティティの研究といった展開が想定される．また，川上（2018）や川上ら（2019）を見る限り，研修に参加した高等学校教員は 1 名のみであり，高等学校教員がどのように数学的モデル化の指導を実現するようになるのかという点は明らかになっていない．このような，高等学校の教員養成・現職教育の研究の必要性は，森田（2022）で指摘されている点と重なる．

3 点目は，テクノロジーやプログラミングと関連づけた数学的モデル化に関する研究の必要性である．表 2 のキーワードを見る限りでは，ソフトウェアについて言及しているのは，田村（2021）と渡邉（2020）のみである．その中でも，渡邉（2020）が指摘する，数学的モデル化とプログラミングを関連づける指導は，プログラミング教育の重要性が叫ばれている昨今において注意をひくものであると考えられる．両者を関連づけるような指導実践は 2010 年代から少しずつ見られるようになってきている（e.g., Gadanidis et al., 2020；Lehmann, 2024；松嵜，2017；中村，2017；塚原・松嵜，2017）．このような状況に鑑みると，現行の学習指導要領においてプログラミング教育が位置づいている中学校の技術・家庭科技術分野や高等学校の情報科との教科等横断的な授業開発を行うことによって，生徒の学習活動のさらなる充実が期待される．特に，本稿での結果でも示された通り，高等学校における数学的モデル化は複数領域をまたぐということも十分に起こりうる．また，プログラミングを題材とするにあたっては，育成すべき資質・能力として計算論的思考（Computational Thinking）やアルゴリズム的思考（Algorithmic Thinking）を位置づけることも想定できるだろう（Stephens & Kadijevich，2020）．

6. おわりに

本稿では，システマティックレビューによって抽出された「査読を経て公表された，日本における数学

的モデル化研究に関する原著論文」41 本に対して特徴づけをするとともに，それを基に日本における数学的モデル化に関する近年の研究の動向と偏りを明らかにすることができた．詳細は，5 章の冒頭にある通りである．また，これらの結果を基に，今後行う必要がある数学的モデル化研究として，批判的数学教育に依拠した数学的モデル化の研究，数学的モデル化の指導に関する教師教育の研究，テクノロジーやプログラミングと関連づけた数学的モデル化研究の 3 点を指摘した．

今後の課題として，大きく 2 点があげられる．1 点目は他の観点から捉えた，数学的モデル化研究のレビューの実施である．本稿では年代を 2014 年から現在に絞ったうえでレビューを実施したが，特定のテーマに絞ったレビューを行うことも想定される．また，「包括的であるトピック内の幅広い問題をカバーし，トピックに対する広範な理解を得ることができる」ナラティブレビューを行うことも想定される．2 点目は，本稿で指摘した 3 つの課題に対するアプローチである．それぞれの課題に対する直接的な解決を目指すことで，数学的モデル化研究のさらなる発展が期待される．

謝辞

本研究は JSPS 科研費 JP23K18926 の助成を受けたものです．

また，本文の英文要約の作成に際しては，David Kellaway 氏（第一工科大学航空工学部講師）にネイティブチェックをしていただきました．衷心より感謝申し上げます．

引用・参考文献

*阿部好貴（2015）．数学的モデル化と論証の接続に関する一考察：数学的リテラシーの視点から．日本数学教育学会誌 数学教育学論究，97(第 48 回秋期研究大会特集号)，1–8. https://doi.org/10.32296/jjsme.97.RS_1

Cevikbas, M., Kaiser, G., & Schukajlow, S. (2022). A systematic literature review of the current discussion on mathematical modelling competencies: state-of-the-art developments in conceptualizing, measuring, and fostering. *Educational Studies in Mathematics*, *109*, 205–236. https://doi.org/10.1007/s10649-021-10104-6

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）（中教審第 197 号）. http://www.mext.go.jp/b_menu/shingi/chukyo/chukyo0/toushin/1380731.htm

Collins, J. A., & Fauser, B. C. J. M. (2005). Balancing the strengths of systematic and narrative reviews. *Human Reproduction Update*, *11*(2), 103–104. https://doi.org/10.1093/humupd/dmh058

Freudenthal, H. (1968). Why to teach mathematics so as to be useful. *Educational Studies in Mathematics*, *1*(1-2), 3–8. https://doi.org/10.1007/BF00426224

*福田博人（2016）．生命論－進化的方法によるモデリングの実現に向けた統計教育の在り方．全国数学教育学会誌 数学教育学研究, 22(2), 153–162. https://doi.org/10.24529/jasme.22.2_153

*福嶋卓海（2021）．行列を用いた数学的モデル化の教材開発に関する研究：推移確率行列に焦点をあてて．日本数学教育学会誌 数学教育, 103(7), 13–21．https://doi.org/10.32296/jjsme.103.7_13

Gadanidis, G., Hughes, J. M., Namukasa, I., & Scucuglia, R. (2020). Computational modelling in elementary mathematics teacher education. In S. Llinares & O. Chapman (Eds.), *International handbook of mathematics teacher education: Vol. 2. Tool and processes in mathematics teacher education* (2nd ed., pp.197–222). Brill. https://doi.org/10.1163/9789004418967_008

Gravemeijer, K. (1997). Mediating between concrete and abstract. In T. Nunes & P. Bryand (Eds.), *Learning and teaching mathematics: An international perspective* (pp.315–345). Psychology Press. https://doi.org/10.4324/9781315784939

*浜田兼造（2014）．数学的モデル化のサイクルを実現する授業に関する研究：問題場面への手立ての

工夫．日本数学教育学会誌 数学教育，96(3)，21–28．https://doi.org/10.32296/jjsme.96.3_21

Hidayat, R., Adnan, M., Abdullah, M. F. N. L., & Safrudiannur (2022). A systematic literature review of measurement of mathematical modeling in mathematics education context. *Eurasia Journal of Mathematics, Science and Technology Education*, *18*(5), Article em2108. https://doi.org/10.29333/ejmste/12007

*平林真伊（2015a）．数学的モデル化における児童による問題場面の解釈に関する調査研究—比例関係の成り立たない問題場面を例として—．日本科学教育学会誌 科学教育研究, 39(2), 195–206. https://doi.org/10.14935/jssej.39.195

*平林真伊（2015b）．数学的モデル化における児童による問題場面の解釈の促進：混み具合の問題に関するインタビュー調査を通して．日本数学教育学会誌 数学教育学論究，97(第 48 回秋期研究大会特集号)，169–176. https://doi.org/10.32296/jjsme.97.RS_169

*平林真伊（2016a）．数学的モデル化過程からみた算数科文章題の特質：余りのあるわり算に関する調査を通して．日本科学教育学会誌 科学教育研究，40(2)，144–154. https://doi.org/10.14935/jssej.40.144

*平林真伊（2016b）．数学的モデル化における児童による解の解釈・評価とその促進：余りのあるわり算の問題を事例として．日本数学教育学会誌 数学教育学論究, 98(第 49 回秋期研究大会特集号), 33–40．https://doi.org/10.32296/jjsme.98.RS_33

*平林真伊（2023）．数学的モデル化における児童・生徒による解の解釈・評価に関する調査研究：余りのあるわり算の問題を例として．日本数学教育学会誌 算数教育，105(6)，3–13.

*久冨洋一郎（2014）．高等学校数学における理解を深めるための指導方法に関する研究（Ⅱ）：創発的モデリングによる二次関数の学習指導における数学的活動のデザイン．全国数学教育学会誌 数学教育学研究，20(1)，45–57. https://doi.org/10.24529/jasme.20.1_45

*五十嵐慶太（2014）．モデル化という視点から見た条件付き確率に関する困難性：「時間軸の問題」を用いた分析．日本数学教育学会誌 数学教育学論究，96(第 47 回秋期研究大会特集号)，1–8． https://doi.org/10.32296/jjsme.96.RS_1

池田敏和（2010）．数学的モデル化．日本数学教育学会（編），数学教育学研究ハンドブック(pp.271–281)．東洋館出版社.

池田敏和（2013）．モデルに焦点を当てた数学的活動に関する研究の世界的傾向とそれらの関連性. 日本数学教育学会誌 数学教育，95(5)，2–12． https://doi.org/10.32296/jjsme.95.5_2

*稲葉芳成・河﨑哲嗣・黄瀬正敏・柳本哲（2016）．高等学校における数学的モデリングに関する実践事例：モデリング・チャレンジプログラムの記録. 日本科学教育学会誌 科学教育研究，40(2)，186–197．https://doi.org/10.14935/jssej.40.186

*稲葉芳成・黄瀬正敏・竺沙敏彦（2016）．中学生を対象とした数学的モデリング・チャレンジプログラムの記録．数学教育学会誌，57(1・2)，75–88． https://doi.org/10.34323/mesj.57.1-2_75

*井上秀一（2018）．数学的モデリングによる問題解決力を涵養する教育：文系大学生の授業実践を通して．日本教科教育学会誌，41(1)，85–94． https://doi.org/10.18993/jcrdajp.41.1_85

*石橋一昴（2020）．モデル化の視点からみた中学生の確率の意味理解に関する考察．全国数学教育学会誌 数学教育学研究，26(2)，73–81. https://doi.org/10.24529/jasme.26.2_73

*石橋一昴・上ヶ谷友佑（2019）．数学的モデル化の観点から見た学習者の解の吟味を支援する教材の条件：方程式の文章題を中学 2 年生が解決する過程の分析を通じて．日本科学教育学会誌 科学教育研究，43(4)，333–344. https://doi.org/10.14935/jssej.43.333

*石川雅章（2021）．事象の数学化に及ぼす言語の影響：概念的相対主義・言語相対論の視座からみた「かけ算・たし算の順序問題」の分析を通して. 全国数学教育学会誌 数学教育学研究，27(2)，1–19.

伊藤伸也（2006）．H．フロイデンタールの教授原理「追発明」と「発見学習」の異同．日本数学教育学会 数学教育論文発表会論文集, 39, 625–630.
*上村健斗（2017）．「スーパームーン」の日を予測する教材の意義：天文現象を題材とする問題における幾何学化の特徴に着目して．日本数学教育学会誌 数学教育，99(11)，2–10. https://doi.org/10.32296/jjsme.99.11_2
*川上貴（2018）. 数学的モデリング指導に向けた小学校教師の算数教科書の問題をみる視点の形成. 日本科学教育学会誌 科学教育研究，42(4)，350–365．https://doi.org/10.14935/jssej.42.350
*川上貴（2019）. 統計的モデリングの指導と学習に関する研究の国際的動向：日本の初等中等教育段階における統計研究の展望. 日本数学教育学会誌 数学教育，101(3)，15–27. https://doi.org/10.32296/jjsme.101.3_15
*川上貴・佐伯昭彦（2022）. 学校数学におけるデータ駆動型モデリングの活動をとらえる枠組み：数学的モデルと統計的モデルを視座として．日本科学教育学会誌 科学教育研究, 46(4), 421–437. https://doi.org/10.14935/jssej.46.421
*川上貴・佐伯昭彦・金児正史（2019）．算数・数学教科書の問題から数学的モデリングの問題への再教材化を目指した教員研修の可能性．数学教育学会誌，60(3・4)，35–47. https://doi.org/10.34323/mesj.60.3-4_35
*紀平武宏・竺沙敏彦・河崎哲嗣（2015）．日常現象の図形モデル表現を目指した教材研究：2 次曲線を日常現象の解明に活かすための空間図形教育の教材開発（その 1）．数学教育学会誌，56(1・2), 41–50．https://doi.org/10.34323/mesj.56.1-2_41
*小林廉（2014）．「階差数列と一般項の関係」の創出に関する一考察：モデルの発展とリアリティを視点として．日本数学教育学会誌 数学教育学論究，96(第 47 回秋期研究大会特集号)，57–64. https://doi.org/10.32296/jjsme.96.RS_57
*小林廉（2017）. モデル転換プロセスの精緻化による「数学化」実現に関する一考察：階差数列と一般項の関係の創出を事例として．日本数学教育学会誌 数学教育，99(7)，4–13. https://doi.org/10.32296/jjsme.99.7_4
*小林廉（2019）. ヒストグラム本来の意味理解を促す学習指導に関する一考察：階級幅の異なるヒストグラムを創出する活動を通して．日本数学教育学会誌 数学教育，101(1)，3–11. https://doi.org/10.32296/jjsme.101.1_3
*小林隆義・辻山洋介（2020）. 中学校数学科における多様なモデルの解釈・評価・比較に焦点を当てた確率の学習過程：根元事象と同様に確からしいことの意識化を視点として．日本数学教育学会誌 数学教育，102(1)，3–14. https://doi.org/10.32296/jjsme.102.1_3
Lehmann, T. H. (2024). Mathematical modelling as a vehicle for eliciting algorithmic thinking. *Educational Studies in Mathematics*, *115*, 151–176. https://doi.org/10.1007/s10649-023-10275-4
Lesh, R., & Doerr, H. (Eds.). (2003). *Beyond constructivism: Models and modelling perspectives on mathematical problem solving, learning and teaching*. Lawrence Erlbaum. https://doi.org/10.4324/9781410607713
Lesh, R. & Zawojewski, J. (2007). Problem solving and modelling. In F. K. Lester (Ed.), *Second handbook of research on mathematics teaching and learning* (pp.763–804). Information Age.
*圓岡悠・服部裕一郎（2023）．中学校数学授業における算数・数学の問題発見・解決の過程の具現化：「日常生活の事象の数学化」及び「活用・意味づけ」の過程の強調．日本数学教育学会誌 数学教育，105(3)，2–14. https://doi.org/10.32296/jjsme.105.3_2
*松嵜昭雄（2015）. 数学的モデリングの記述的枠組みにおける原場面の機能：中後期フッサール現象学の方法の適用．日本数学教育学会誌 数学教育，97(3)，14–23．https://doi.org/10.32296/jjsme.97.3_14
松嵜昭雄（2017）．小・中・高等学校を見通したプログラミング指導とモデリング：ICT 利用を前提とするモデリングの記述に焦点をあてて．日本科学教育学会年会論文集，41，147–148.

https://doi.org/10.14935/jssep.41.0_147

*松嵜昭雄・松島充・西村圭一・山口武志・島田功（2021）．学校教育における数理科学教育のカリキュラム構成モデル：STEM 教育の Disciplinary モデルとシュワブによるディシプリンの概念を参照して．数学教育学会誌，62(3・4)，15–28. https://doi.org/10.34323/mesj.62.3-4_15

*峰野宏祐（2017）．変数を生成・選択する活動を軸にした「桜の開花予想」の指導の再考．日本数学教育学会誌 数学教育，99(9)，3–11. https://doi.org/10.32296/jjsme.99.9_3

三輪辰郎（1983）．数学教育におけるモデル化についての一考察．筑波数学教育研究，2，117–125. http://hdl.handle.net/2241/00136407

*宮川敏之・深尾武史・谷口和成・渡邉伸樹・柳本哲（2014）．数学的モデリングにおける理科的問題の可能性：中学生対象の台車実験を通した学習．数学教育学会誌，55(1・2)，11–20. https://doi.org/10.34323/mesj.55.1-2_11

森田大輔（2022）．我が国における数学教師教育研究の動向と課題：研究の対象，焦点，方法に着目したシステマティックレビュー．日本教科教育学会誌，45(3)，51–65. https://doi.org/10.18993/jcrdajp.45.3_51

中村好則（2017）．算数科におけるプログラミングを取り入れた指導の可能性：数学的モデリングを視野に入れて．日本科学教育学会年会論文集，41，75–78. https://doi.org/10.14935/jssep.41.0_75

中和渚（2019）．批判的数学教育の近年の研究傾向：Critical Mathematics Education: Theory, Praxis, and Reality より．関東学院大学理工学部建築・環境学部教養学会 科学／人間，48，135–148. https://kguopac.kanto-gakuin.ac.jp/webopac/NI30003439

*岡本英通・河崎哲嗣・柳本哲（2020）．フェルミ推定を活用した数学的モデリング教材の開発：ドイツの教材分析と小学生を対象とした教育調査．数学教育学会誌，61(1・2)，81–87. https://doi.org/10.34323/mesj.61.1-2_81

ポリヤ，G.（1954）．いかにして問題を解くか（柿内賢信，訳）．丸善出版．(Original work published 1945)

佐伯昭彦（2013）．日本における数学的モデリング研究の動向と今後の課題．日本数学教育学会 春期研究大会論文集，1，33–38.

佐伯昭彦・礒田正美・清水克彦（編）．(1997)．テクノロジーを活用した新しい数学教育：実験・観察アプローチを取り入れた数学授業の改善．明治図書.

*佐伯昭彦・川上貴・金児正史（2019）．算数・数学教科書の応用問題を数学的モデリングの教材に作り替えるための枠組みに関する一考察．日本科学教育学会誌 科学教育研究，43(3)，220–232. https://doi.org/10.14935/jssej.43.220

*清野辰彦（2015）．「仮定の意識化」を重視した数学的モデル化の学習指導：「比例とみなす」見方に焦点をあてて．日本数学教育学会誌 数学教育学論究，97(第48回秋期研究大会特集号)，105–112. https://doi.org/10.32296/jjsme.97.RS_105

白井俊（2020）．OECD Education 2030 プロジェクトが描く教育の未来：エージェンシー，資質・能力とカリキュラム．ミネルヴァ書房.

Skovsmose, O.（2020）．批判的数学教育の哲学：数学教育学の新しい地平（馬場卓也，監訳）．丸善プラネット．(Original work published 1994)

Stephens, M., & Kadijevich, D. M. (2020). Computational/algorithmic thinking. In S. Lerman (Ed.), *Encyclopedia of mathematics education* (2nd ed., pp.117–123). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-030-15789-0_100044

*鈴木亮太（2021）．「高潮」の潮位予測を題材とした教材の開発．日本数学教育学会誌 数学教育，103(7)，2–12. https://doi.org/10.32296/jjsme.103.7_2

*田村篤史（2021）．射影幾何学と動的幾何学ソフトウェアを用いた数学モデル構成教材の提案．数学教育学会誌，62(3・4)，39–48. https://doi.org/10.34323/mesj.62.3-4_39

*田中勇誠・服部裕一郎（2020）．中学校数学授業における社会的オープンエンドな問題の開発とその実践：生徒の批判的思考力の涵養を目指して．日本数学教育学会誌 数学教育，102(11)，2–11.

https://doi.org/10.32296/jjsme.102.11_2
塚原康介・松嵜昭雄（2017）．プログラミングを取り入れたモデリング授業の実践報告．日本科学教育学会研究会研究報告，31(6)，41–46. https://doi.org/10.14935/jsser.31.6_41
Van den Heuvel-Panhuizen, M. (2003). The didactical use of models in Realistic Mathematics Education: An example from a longitudinal trajectory on percentage. *Educational Studies in Mathematics*, *54*(1), 9–35. https://doi.org/10.1023/B:EDUC.0000005212.03219.dc
*渡邉伸樹（2020）．プログラミング教育の学習モデル：Programming Modeling の提案．数学教育学会誌，61(3・4)，37–44. https://doi.org/10.34323/mesj.61.3-4_37
*山中仁（2022）．数理モデリングにおける教師の役割の RME に基づく同定．数学教育学会誌，63(3・4)，1–20.
*吉村昇・秋田美代（2021）．数学的モデリングの教材開発の一視点：現実事象から現実モデルの生成過程に関する考察をもとに．数学教育学会誌，62(1・2)，49–59．https://doi.org/10.34323/mesj.62.1-2_49