

博士論文

都市システムの自然災害に対する
再構築力の構造の解明

塩崎 由人

目次

第 1 章	序論	1
1.1	背景	1
1.2	先行研究における都市システムの再構築力の概念の整理	1
1.3	研究の目的	6
1.4	研究の構成	7
	参考文献	8
第 2 章	都市システムの再構築力に関する概念整理	9
2.1	はじめに	9
2.2	脆弱性評価におけるレジリエンスの概念	10
2.3	システムのレジリエンスの概念	13
2.4	まとめ	24
	参考文献	26
第 3 章	都市システムの受容力の構造の解明と制御の可能性	32
3.1	はじめに	32
3.2	微分方程式による都市システムモデルの構築	33
3.3	微分方程式モデルにより定義されるベクトル場の構造の分析	40
3.4	都市システムの受容力	57
3.5	都市システムの受容力の制御の可能性	61
3.6	まとめ	63
	参考文献	64
第 4 章	都市システムの適応力の構造の解明と災害による影響	65
4.1	はじめに	65
4.2	産業の衰退による影響	66
4.3	産業の衰退に対する適応力の構造の分析	71
4.4	災害が産業衰退への適応に及ぼす影響	87

4.5	まとめ	98
	参考文献	99
第 5 章	まとめと今後の展望	100
5.1	まとめ	100
5.2	今後の展望	101

第 1 章

序論

1.1 背景

大規模な自然災害への備えとしての都市の事前対策には2つの視点が考えられる。一つは、災害からの被害を防止・軽減するという防災・減災の視点である。もう一つは、都市が災害から被害を受けることを前提として、都市が回復・再生する能力を高めておくという視点である。災害による被害から都市が回復・再生する能力については、自然災害対策分野において、レジリエンス (resilience)、回復力、復元力等、多様な用語によって表されている。本研究では、これらの用語を総称して、都市の回復・再生する能力を「再構築力」と定義する。

日本では、阪神淡路大震災（1995 年）、東日本大震災（2011 年）をはじめとする大規模災害を経て、自然災害からの被害を完全に防ぐことは困難であることが認識されるようになった。今後も南海トラフ巨大地震、首都直下地震、ゼロメートル地帯における大規模水害等、都市が大規模災害に直面する可能性が想定されている（内閣府, 2015）[1]。こうした状況を踏まえると、大規模災害への事前対策として、防災・減災の視点からの対策に加えて、都市の再構築力を適切に制御するための方策が求められる。

1.2 先行研究における都市システムの再構築力の概念の整理

本研究では都市の再構築力に焦点を当てるが、先述の通り、自然災害対策分野では再構築力の概念が多様な定義において用いられている。本節では、先行研究や政策文書における再構築力の概念を文献レビューに基づき類型化した上で、先行研究の到達点を整理する。

1.2.1 再構築力の概念の分類

近年、自然災害に対する再構築力についての研究では、都市を住民の生活や企業の生産活動を支えるシステム（以下、都市システム）とみなす研究が多くみられる。本研究でも都

市システムの再構築力の概念に着目し、先行研究のレビューを行った。本研究では、自然災害によって被災した都市システムが回復すべき状態を、都市システムにとって「望ましい状態」と定義した。いずれの先行研究においても再構築力を「都市システムが被災した状態から望ましい状態に回復する能力」と考えている点では共通しているが、本研究では「望ましい状態」の前提の置き方に着目し、先行研究における再構築力の概念を、(1) 安定力としての再構築力、(2) 受容力としての再構築力、(3) 適応力としての再構築力、の3つの概念に類型化した。

(1) 安定力としての再構築力

本研究では、先行研究を基に、安定力としての再構築力を「都市システムが災害による被害を軽減し、被災後、被災前の状態に迅速に回復する能力」と定義する。安定力としての再構築力の概念では、都市システムにとって「望ましい状態」を被災前の状態とした上で、都市システムは被災した場合でも被災前の状態を回復できることを前提としている (Bruneau et al., 2003; de Bruijn, 2004a) [2][3]。この概念は、被災した都市システムがいかに速く被災前の状態を回復できるかということに着目した概念であると言える。安定力の大きさは、概念的には図 1.1 に示すように、災害による影響の軽減の程度、および、被災後に都市システムが被災前の状態を回復する速度、あるいは回復に要する時間によって測られるとされる (塩崎他, 2015) [4]。

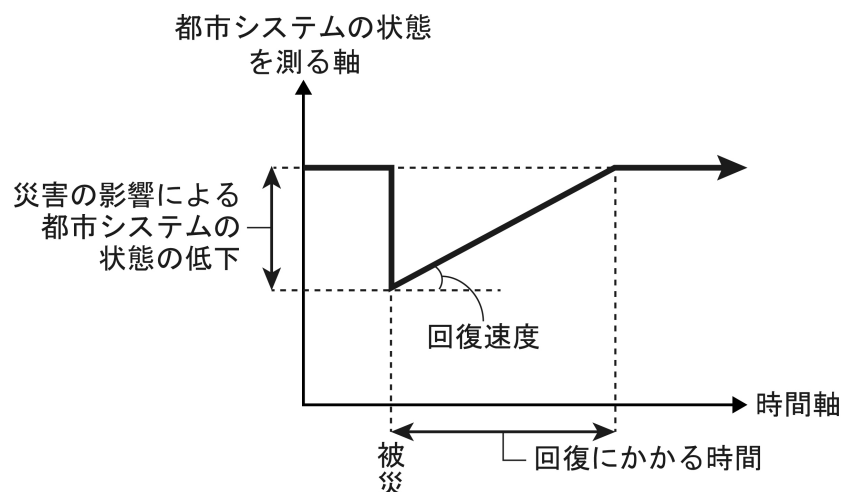


図 1.1: 安定力としての再構築力の概念

(2) 受容力としての再構築力

本研究では，先行研究を基に，受容力としての再構築力を「災害による被害を受け容れ，望ましい状態に到達可能な状態を保持する能力」と定義する．受容力としての再構築力の概念では，都市システムへの災害の被害が一定の規模を超えると，都市システムは回復する能力を失い，被害を受けた状態で停滞したり，衰退する等，望ましい状態を回復できない可能性があることを前提としている（de Bruijn, 2004b; Mens et al., 2011）[5][6]．この概念は，都市システムが災害による被害をどの程度まで受け容れても望ましい状態を回復できるかに着目した概念であると言える．受容力の大きさは，概念的には「都市システムが受容可能な被害の程度」によって表される．受容可能な被害の程度とは，図 1.2 に示すように，その被害を受けた場合でも望ましい状態を回復可能な被害の程度を指す．

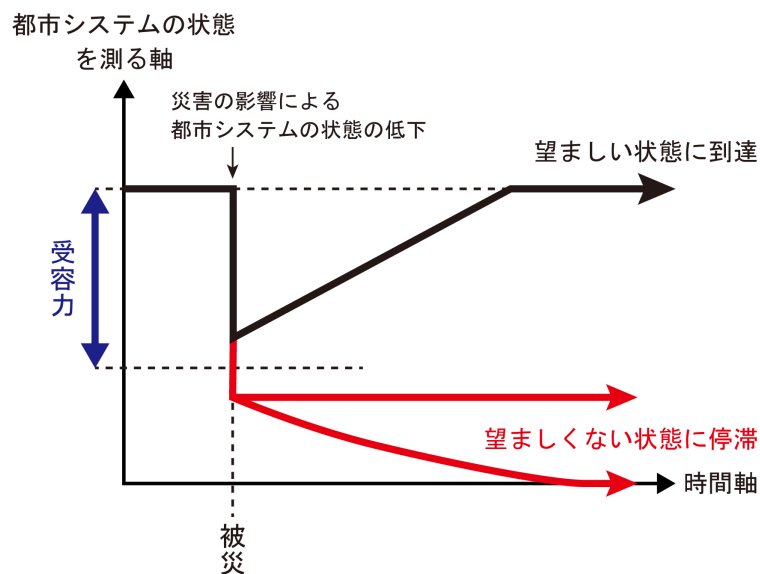


図 1.2: 受容力としての再構築力の概念

(3) 適応力としての再構築力

本研究では、先行研究を基に、適応力としての再構築力を「都市システムが置かれている社会・経済的環境が変化している状況下で被災した場合、都市システムが社会・経済的環境の変化にも適応して望ましい状態を回復するために自身を再構築する能力」と定義する。適応力としての再構築力の概念では、都市システムにとって望ましい状態は時代とともに変化するものであり、被災前の状態が必ずしも望ましい状態でないことを前提とした概念である（Norris et al., 2008; 塩崎他, 2015）[7][4]。十分な適応力を有している都市システムは、図 1.3 に示すように、被災前までの望ましさの方向性では望ましい状態に到達できない場合でも、その環境の変化に適応した望ましい状態に到達可能となる（塩崎他, 2015）[4]。

例えば、既存の産業が衰退しつつある都市システムが被災したとき、被災前の状態を回復しようとしても、いずれは産業が衰退してしまうため、都市システムは望ましい状態に到達することができない。この場合、新たに産業を興す等、産業の衰退という社会・経済的環境の変化にも適応して被災した状況から回復する必要がある。

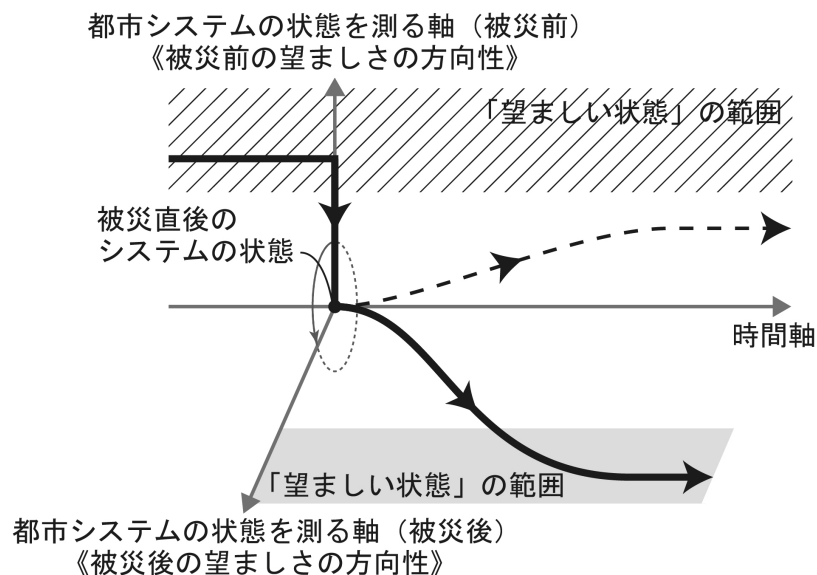


図 1.3: 適応力としての再構築力の概念

1.2.2 再構築力の各概念の関係性

3つに類型化した再構築力の各概念の関係性は、図 1.4 の通り整理される。まず、自然災害が発生した場合、その被害の程度に対して、都市システムが十分な「受容力としての再構築力」を有しているかが問われる。都市システムはその被害を受容できなければ、望ましくない状態に移行する。

その被害を受容できる場合、都市システムが置かれている社会・経済的環境が変化しているか否かが問題となる。社会・経済的環境が変化していない場合、いかに速く望ましい状態を回復できるかが課題となるので、「安定力としての再構築力」の多寡が問われる。

社会・経済的環境が変化している場合、都市システムが十分な「適応力としての再構築力」を有しているかが問われる。その変化に適応することができれば望ましい状態に到達することができるが、そうでなければ望ましくない状態に陥ることになる。

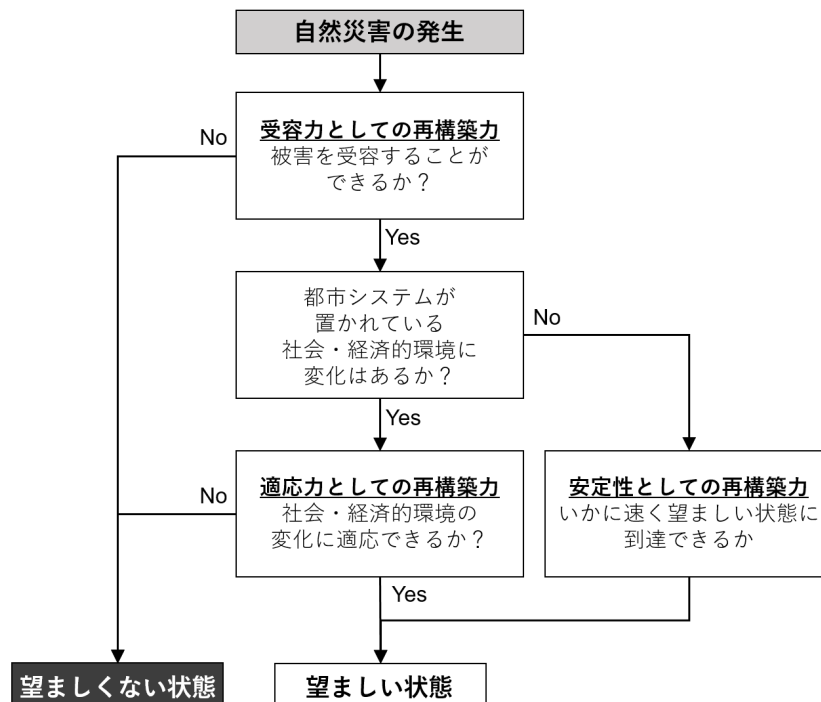


図 1.4: 各概念の位置づけ

1.2.3 各概念に関する先行研究の整理

ここでは、上述の3つの概念に関する先行研究の到達点について整理する。

安定力としての再構築力については、Bruneau et al. (2003) が都市システムの安定力に影響を与える要因と安定力との間の関係構造をモデル化した上で、安定力を定量的に測るための枠組みを提示している [2]。この枠組みに基づき、Miles and Chang (2006) は安定力を高める対策を評価・検討することを目的として都市システムの回復を記述するシミュレーションモデルを構築している [8]。畠山ら (2013) は、Bruneau et al. (2003) と同様の枠組みを用いたレジリエンス指標によって地域コミュニティのレジリエンス評価手法を提案している [9]。

受容力としての再構築力については、de Bruijn (2004b), Mens et al. (2011) によって、概念としては提示されている [5][6]。しかし、都市システムの受容力に影響を与える要因と受容力との関係構造について明らかにしている研究は見られなかった。

適応力としての再構築力については、Norris et al. (2008), 塩崎他 (2015) によって概念として提示されている。Norris et al. (2008) は適応力に影響を与えると考えらえる要因について提示している。しかし、それらの要因と適応力との関係構造について明らかにした研究は見られなかった [7][4]。

以上を整理すると、安定力としての再構築力については、Bruneau et al. (2003) および Miles and Chang (2006) の構築した枠組みやモデルを対策の評価・検討に用いることができる。一方、受容力および適応力としての再構築力については、先行研究では概念として提示されているにとどまる。受容力および適応力としての再構築力に関する対策を検討するためには、まず、受容力と適応力について、どのような要因が、どのような影響を与えるのか、という関係構造を明らかにする必要がある。

1.3 研究の目的

以上を踏まえ、本研究は都市システムの再構築力のうち、受容力および適応力としての再構築力を対象として、受容力および適応力に影響を与える要因とその定性的な関係構造を明らかにすることを目的とする。

本研究では、都市システムの状態の動的変化を記述可能な微分方程式モデルを構築し、このモデルを用いて受容力および適応力の構造を明らかにする。受容力および適応力を表現するためには、災害による被害あるいは環境の変化による影響を与えた場合に都市システムが衰退する等、望ましくない状態に陥るメカニズムを内包したモデルを構築する必要がある。安定力としての再構築力に関する先行研究のモデルは、基本的に被災前の状態への回復を記述するモデルであり、本研究には適用することができない。本研究では、安定力としての再構築力に関する先行研究のモデルとは別に、本研究の目的に即して、衰退の

メカニズムを含む微分方程式モデルを構築するものとする。

1.4 研究の構成

本研究の構成は下記の通りである。

第1章 はじめに

第2章 都市システムの再構築力の概念整理

第3章 都市システムの受容力の構造の解明と制御の可能性

第4章 都市システムの適応力の構造の解明と災害による影響

第5章 まとめと今後の展望

第1章では、先述の通り、研究の背景、目的について述べる。

第2章では、多様な定義において用いられている再構築力の概念を類型化し、本研究が対象とする再構築力の概念の位置づけを明確にすることを目的に、レジリエンスの概念を中心に都市システムの再構築力の概念に関連する先行研究、政策文書の文献レビューを行う。自然災害対策分野における脆弱性とレジリエンスの概念の関係、レジリエンスの概念の発展の経緯、生態システムおよび社会生態システム分野からの影響についても整理する。

第3章では、被災以前から都市システムが備えている産業の規模等の特徴が受容力の大きさに与える影響に着目して、その定性的な関係構造を明らかにし、受容力の制御の可能性について検討する。ここでは、都市システムの状態が人口および資本（生産設備）の2つの変数によって表されるものとして、都市システムの状態の動的変化を記述することができ、かつ、衰退のメカニズムも含んだ微分方程式モデル（基本都市モデル）を構築する。都市の備えている特徴は、モデル内のパラメータによって表されるものとする。都市システムの受容力は、この微分方程式モデルが人口および資本から成る相平面上に定義するベクトル場によって決定される。モデル内のパラメータの値が相平面上のベクトル場に与える影響を分析することにより、都市システムの特徴と受容力の大きさの定性的な関係構造を明らかにする。以上の分析結果に基づき、受容力の制御の可能性について検討する。

第4章では、環境変化に対する都市システムの適応力に影響を与える要因、および、災害が適応力に与える影響について明らかにする。ここでは、環境変化として、都市システムの産業の衰退を想定する。まず、第3章で構築した微分方程式モデルを基に、産業の衰退を組み込んだモデル（産業衰退モデル）を構築する。このモデルを用いて、産業の衰退が都市システムに与える影響について整理し、産業の衰退に適応するための必要条件を整理する。次に産業の衰退への適応を組み込んだ微分方程式モデル（産業適応モデル）を構築し、都市システムの適応の可否に影響を与える要因を明らかにする。また、災害が都市システムの適応の可否に与える影響についても明らかにする。

第5章では、第2章から第4章の結論を総括し、今後の展望について整理する。

参考文献

- [1] 内閣府. 平成 27 年版防災白書. 日経印刷, 東京, 第 1 版, 7 2015.
- [2] Michel Bruneau, Stephanie E. Chang, Ronald T. Eguchi, George C. Lee, Thomas D.O' Rourke, Andrei M. Reinhorn, Masanobu Shinozuka, Kathleen Tierney, William A. Wallace, Detlof von Winterfeldt. A framework to quantitatively assess and enhance the seismic resilience of communities. *Earthquake Spectra*, Vol. 19, No. 4, pp. 733–752, 2003.
- [3] K. M. de Bruijn. Resilience indicators for flood risk management systems of lowland rivers. *International Journal of River Basin Management*, Vol. 2, No. 3, pp. 199–210, 2004.
- [4] 塩崎由人, 加藤孝明, 菅田寛. 自然災害に対する都市システムのレジリエンスに関する概念整理. 土木学会論文集 D3 (土木計画学), Vol. 71, No. 3, pp. 127–140, 2015.
- [5] K.M. de Bruijn. Resilience and flood risk management. *Water Policy*, Vol. 6, No. 1, pp. 53–66, 2004.
- [6] Marjolein J.P. Mens, Frans Klijn, Karin M. de Bruijn, and Eelco van Beek. The meaning of system robustness for flood risk management. *Environmental Science and Policy*, Vol. 14, No. 8, pp. 1121 – 1131, 2011.
- [7] Fran H. Norris, Susan P. Stevens, Betty Pfefferbaum, Karen F. Wyche, and Rose L. Pfefferbaum. Community resilience as a metaphor, theory, set of capacities, and strategy for disaster readiness. *American Journal of Community Psychology*, Vol. 41, No. 1, pp. 127–150, Mar 2008.
- [8] Scott B. Miles and Stephanie E. Chang. Modeling community recovery from earthquakes. *Earthquake Spectra*, Vol. 22, No. 2, pp. 439–458, 2006.
- [9] 畠山慎二, 坂田朗夫, 川本篤志, 伊藤則夫, 白木渡. コミュニティ・レジリエンスの考え方に基づくコミュニティ継続計画 (CCP) 策定手法の提案. 土木学会論文集 F6 (安全問題), Vol. 69, No. 2, pp. 37–42, 2013.

第 2 章

都市システムの再構築力に関する 概念整理

2.1 はじめに

2.1.1 再構築力とレジリエンスの概念

本研究では、被災した都市システムが回復・再生する能力を総称する概念として「再構築力」と定義した。この再構築力に内包される概念のうち、近年、国内外の自然災害対策分野では「レジリエンス (resilience)」という用語が頻繁に用いられており、都市システムの再構築力を論じる上でも重要な概念として位置づけられる (塩崎他, 2012) [1]。レジリエンスという用語は、英語圏から持ち込まれた用語であり、元来、「跳ね戻る (jump back)」という意味のラテン語 “resilio” に由来する (Klein et al., 2003) [2]。英語圏では、当初、心理学、材料工学などの分野において、レジリエンスの概念が使われはじめたと考えられている (Lorenz, 2013) [3]。心理学の分野では、個人が困難な状況に遭遇した時、その状況から回復し、従前の状態を回復する能力、あるいは、その状況に適応する能力とされている (Masten et al., 1990; Waller, 2001) [4][5]。材料工学の分野では、負荷をかけられた物質が壊れたり変形したりすることなく、元の状態に戻る能力とされている (Norris et al., 2008) [6]。Longman Dictionary of Contemporary English においても、レジリエンスには心理学や材料工学と同様の定義が与えられている (Longman, 2009) [7]。システムにかかわる分野における原初的なレジリエンスの概念としては、Hashimoto et al. (1982) [8] が水資源システムのレジリエンスについて、システムが外力を受けて破たんした際、要求される水準まで迅速に回復する能力と定義されている。経済学の分野においても、概ね経済システムが内部あるいは外部から負の影響を受けた際に、従前の経済水準へ迅速に回復する能力をレジリエンスと定義している (藤井他, 2012) [9]。一方で、近年様々な分野で頻繁に引用されている生態システム、社会生態システムにおけるレジリエンスの概念は、システムが何らかの外力に曝された時、必ずしもシステムが従前の状態に戻ることを前提

としていない。ここで言う生態システムとは、ある一定の区域に存在する生物とそれを取り巻く大気、水文、土壌などの非生物的環境によって構成され、それらが相互に作用しあう動的なシステムである。例としては、サンゴ礁、熱帯雨林、草原、農地などがある。社会生態システムとは、農業や漁業のように生態システムに依存して生産活動を行う社会システムと、その社会システムの活動による影響を受ける生態システムから成るシステムである。生態システム、社会生態システムの分野では、外力による影響の程度によってはシステムの性質、特徴、機能が変化する可能性があることを前提に、システムを望ましい状態に管理するための概念的枠組みとしてレジリエンスが用いられている（Holling, 1973; Carpenter et al., 2001）[10][11]。このように、レジリエンスの概念には多様な分野において多様な定義が存在し、その定義が一意であるわけではない。

自然災害対策の研究分野では、Timmerman（1981）によってレジリエンスの概念が導入されたのが最初とされる（Klein et al., 2003; Eakin and Luers, 2006）[2][12]。自然災害対策分野におけるレジリエンスの概念は、研究あるいは政策の着眼点の変化、他分野のレジリエンスの概念からの影響を受けながら、多義的に発展してきた。近年、国際機関のアジェンダや各国の政策にもレジリエンスの概念が含まれるようになり、研究分野においてもレジリエンスの概念的枠組みが提示されている（UN/ISDR, 2007; Council of Australian Governments, 2011; FEMA, 2012; The World Bank, 2013）[13][14][15][16]。

2.1.2 本章の目的・構成

上述の通り、自然災害に対する都市システムの再構築力の概念のうち、「レジリエンス」の概念は多様な定義で用いられている。本章では、国内外の自然災害対策分野における再構築力の概念について、レジリエンスの概念を中心に文献レビューを行ったうえで、再構築力の概念を類型化し、本論文が対象とする再構築力の概念の位置づけを明確にすることを目的とする。

文献レビューの対象は、自然災害対策分野におけるレジリエンスに関する研究の他に、レジリエンスの概念と対にして用いられることの多い脆弱性の概念、および、自然災害対策分野のレジリエンスの概念に影響を与えている生態システム、社会生態システム分野のレジリエンスの概念に関する研究とした。

2.2 脆弱性評価におけるレジリエンスの概念

自然災害対策分野において、レジリエンスの概念は、脆弱性評価の枠組みの中で頻繁に用いられる。本節では、まず自然災害対策分野において多義的に用いられている脆弱性の概念を整理する。自然災害対策分野における脆弱性の概念にも多様な定義が存在するが、概ね、「物理的側面に着目した脆弱性の概念」、「社会的側面に着目した脆弱性の概念」の2つに分類することができる。本節では、この2つの脆弱性の概念を説明したうえで、脆弱

性の枠組みにおけるレジリエンスの概念の定義を示し、脆弱性とレジリエンスの概念の関係を明らかにする。

2.2.1 物理的側面に着目した脆弱性の概念

物理的側面に着目した脆弱性評価のアプローチは、20世紀前半からの米国の地理学における災害研究に端を発する（Cutter et al., 2000）[17]。このアプローチは自然災害の主たる要因を自然現象に起因するハザードであるとみなす。また、物理的な要因であるハザード（hazard）、暴露（exposure）、感受性（sensitivity）の制御によって自然災害リスクを管理することを目的としており、リスク-ハザード・アプローチ（risk-hazard approach）とも言われる（Turner et al., 2003; Eakin and Luers, 2006）[18][12]。

リスク-ハザード・アプローチにおける災害対策は、ハザード、暴露、感受性の制御によって実施される。ハザードの制御は、河川堤防や防潮堤等の工学的対策により実施される（White and Haas, 1975）[19]。ハザードの制御が可能となるのは洪水や高潮等、一部のハザードに限定される。ただし、ハザードの規模が堤防や防潮堤の安全水準を超える可能性もあり、完全にハザードを制御することができないわけではない。暴露の制御は、土地利用管理やハザードに関する情報の公開によって、ハザードの高い場所への人口や建物、インフラストラクチャーの立地を低減させることである（Burton et al., 1993）[20]。感受性の制御は、ハザードから受ける被害を防止・軽減する対策である。地震の場合であれば、建物やインフラストラクチャーの耐震強度を向上させることである。

リスク-ハザード・アプローチでは、脆弱性は概ね3つの意味で定義されている。一つ目は、人口・産業がハザードの危険に曝されている状態を脆弱な状態であるとする定義である。この定義では、ハザードに対する都市や地域の脆弱性の程度をハザードの危険に曝されている人口や建物等の量によって表す（Dow, 1992）[21]。二つ目は、都市あるいは建物やインフラストラクチャー等の要素が、ハザードによる物的な被害を受けやすい状態にあることを脆弱であるとする定義である。この定義では、ハザードに対する都市や建物の脆弱性の程度をその感受性によって表す（UNDRO, 1979; Ambraseys and Jackson, 1981; Alexander, 1997）[22][23][24]。三つ目は、都市や地域がハザードに対して抱えている潜在的被害の大きさを脆弱性を表す定義である（Eakin and Luers, 2006）[12]。このアプローチでは、いずれの脆弱性の定義でも物理的側面の要因に着目している。

リスク-ハザード・アプローチによる研究は、その後の自然災害対策や気候変動への対応策の枠組みに大きな影響を与えてきた（Fussel and Klein, 2006）[25]。その一方で、リスク-ハザード・アプローチが物理的側面のみに着目し、その脆弱性の概念的枠組みにおいて社会的側面を考慮していないという問題点が指摘されている（Hewitt, 1983; Turner et al., 2003）[26][18]。

2.2.2 社会的側面に着目した脆弱性の概念

社会的側面に着目した脆弱性に関する研究は、(1) 政治・経済・社会構造に着目した政治・経済学的アプローチ (political-economy approach)、(2) 個人や集団の対処能力に着目したアプローチに分類することができる。

(1) 政治・経済学的アプローチ

政治・経済学的アプローチは、1970年代にリスク-ハザード・アプローチへの反論として現れたアプローチである (Bankoff, 2001; Eakin and Luers, 2006) [27][12]。このアプローチでは自然災害が生じる要因を自然現象であるハザードだけでなく、政治・経済・社会構造にも求める。政治・経済・社会構造によって政治的権力や経済的資源から周縁化された貧困層や少数民族などの特定の社会的集団がハザードの高い地域に居住せざるを得ない状況に陥った結果、自然災害による被害が生じるとする考え方である (Hewitt, 1983; Susman et al., 1983) [26][28]。この考え方は発展途上国における自然災害の観察の結果として生じたものであるが、現在では先進国にも適用されている (O' Keefe et al., 1976; Morrow, 1999) [29][30]。政治・経済学的アプローチにおける脆弱性は、ある社会的集団がハザードに曝され、感受性が高く、被災後に生活を再建する能力が低い状態にあることを指す。

政治・経済学的アプローチの目的は、特定の社会的集団を脆弱な状況に陥れる政治・経済・社会構造に基づくプロセスを明らかにし、この構造を変革することによって脆弱性を解消することである (Wisner and Luce, 1993; Adger, 2006) [31][32]。このアプローチは社会的側面からマクロ的な視点で脆弱性の形成要因を明らかにしようとするものであると言える。

Susman et al. (1983) は、政治・経済・社会構造によって、特定の社会的集団において脆弱性が形成されるプロセスを「周縁化理論 (Theory of Marginalization)」によって説明している [28]。Wisner et al. (2004) は、権力や経済的資源の分配に差がある政治・経済・社会構造において、急速な都市化や人口増加などの環境変化が引き金となって脆弱性が生じることを説明する「Pressure and Release Model」を提案している [33]。

政治・経済学的アプローチは、脆弱性評価の研究に社会的側面から脆弱性の形成要因に着目する視点をもたらしたが、その課題も指摘されている。まず一つ目の課題は、このアプローチの研究成果が短期～中期的な対策には結びつきにくいことである。政治・経済学的アプローチに基づいて脆弱性を解消するには、その脆弱性を生み出している政治・経済・社会構造自体を変革する必要があるため、長期間を要することになる。もう一つの課題は、ミクロ的な視点（個人あるいは世帯レベル）が欠如していることである。特定の社会的集団内部においても個人あるいは世帯の所得や職業などの属性によって、被災後の生活再建の状況に差が生じていることが考慮されていない (Wisner and Luce, 1993; Pelling, 2003;

Wisner et al., 2004) [31][34][33].

(2) 個人・集団の対処能力に着目したアプローチ

対処能力 (coping/response capacity) を考慮した脆弱性評価のアプローチは、所得や職業、人種、属している社会的ネットワークの属性に応じて、ハザードに対する感受性を改善したり、被災した状態から回復する能力に差が生じることに着目したアプローチである。ハザードに対する感受性を緩和したり、被災した状況から回復する能力が対処能力である (Dow, 1992; Wisner et al., 2004) [21][33]。本稿では、このアプローチをキャパシティ・アプローチとする。

キャパシティ・アプローチには、(i) 個人あるいは集団の対処能力の多寡によって脆弱性を測定するグループと、(ii) 曝されているハザードと対処能力の程度を比較することにより脆弱性を測定するグループに分けられる。前者の事例としては、Anderson and Woodrow (1998) の Capacities and Vulnerability Analysis と Wisner et al. (2004) の Access モデルがあげられる [35][33]。Capacities and Vulnerability Analysis は、集団の災害に対する対処能力を把握したうえで、援助の必要な集団を特定とすることを目的とした分析の枠組みを提示している。Access モデルは、被災した世帯が生計をたてるために必要な資源を確保することができるかという視点から、所得、職業、人種、社会的ネットワークなどの属性の差が各世帯の対処能力に与える影響を分析するための概念的枠組みを示したものである。後者の事例としては、Cutter (1996) の hazard-of-place モデルがあげられる [36]。このモデルは、地域の物理的脆弱性 (biophysical vulnerability) と社会的脆弱性 (social vulnerability) を指標化し統合することで、その地域の脆弱性 (place vulnerability) を表すものである。物理的脆弱性はその地域で発生する可能性のある様々なハザードの発生確率に基づく指標によって表され、社会的脆弱性はその地域に住民の所得、職業、教育水準、人種などの属性から成る指標によって表されている。

(3) 脆弱性とレジリエンスの概念の関係

脆弱性評価の研究では、リスク-ハザード・アプローチ、政治・経済的アプローチ、キャパシティ・アプローチと発展していき、脆弱性の概念の領域が物理的側面から社会的側面へと拡張されていった。キャパシティ・アプローチにおいて、個人や集団の対処能力がレジリエンスと定義される場合があり、脆弱性評価の枠組みの中でレジリエンスの概念が位置づけられている (Pelling, 2003) [34]。

2.3 システムのレジリエンスの概念

レジリエンスの概念には、前章で説明した脆弱性評価の枠組みとは別に、都市やコミュニティをシステムとみなし、そのシステムが被災した際に、システムが望ましい状態に到達できるように管理することを目的とした概念的枠組みがある。本論文では、このような

概念的枠組みを用いるアプローチをシステム・アプローチとする。システム・アプローチにおけるレジリエンスの定義は、(i) 安定力としてのレジリエンスの概念、(ii) 受容力としてのレジリエンス、(iii) 適応力としてのレジリエンスの概念の3種類に分類できる。この3つのレジリエンスの概念は、いずれも生態システム、社会生態システムにおけるレジリエンスの概念の影響を受けている (Ainuddin and Routray, 2012) [37]。

本節では、まず生態システムおよび社会生態システムにおけるレジリエンスの概念を整理する。次に、生態システム、社会生態システムの分野から自然災害対策分野に適用されたレジリエンスの概念を、上記の3つに分類して説明する。

2.3.1 生態システム、社会生態システムにおけるレジリエンスの概念

(1) 生態システムにおけるレジリエンスの概念

生態システムの分野では、Holling (1973) によって導入されて以降、レジリエンスの概念が発展してきた (Janssen et al., 2006) [10][38]。生態システムにおけるレジリエンスの概念は、生態システムの外力に対する振舞いの特徴を表す概念である。Holling (1996) は、生態システムのレジリエンスに関する研究には、「工学的レジリエンス (engineering resilience)」と「生態学的レジリエンス (ecological resilience)」の2つの異なる定義があることを指摘している [39]。それぞれの定義では、生態システムが外力を受けたときの振舞いについての前提が異なる。

工学的レジリエンスでは、生態システムが外力を受けた場合に、そのシステムが有する唯一の平衡状態 (single/global equilibrium) に戻る (均衡点回帰的变化) を前提としている (Gunderson, 2000; 島田, 2008) [40][41]。工学的レジリエンスは、「外力を受けた後、システムが平衡状態に戻る能力」と定義される。システムの工学的レジリエンスの大きさは、ある大きさの外力を受けたときに、システムが平衡状態からどの程度離れた状態になるか、そしてその状態からどの程度の速度で平衡状態に戻るかということによって測定される (Holling, 1996) [39]。

一方、生態学的レジリエンスでは、生態システムは複数の平衡状態 (multiple equilibrium) を有しており、外力の大きさがある閾値を超えた場合、現在の平衡状態から別の平衡状態へと遷移してしまうこと (位相転換的变化) を前提としている (島田, 2008) [41]。別の平衡状態への遷移とは、システムの振舞いを制御している変数や変数間のプロセスが変化するシステムの構造的変化を指し、システムの主要な性質が変化することを意味する (Gunderson, 2000) [40]。このように生態システムが外力を受けることにより、別の平衡状態へと遷移する現象は「レジーム・シフト (regime shift)」と呼ばれている。生態システムにおけるレジーム・シフトの例としては、多様な動植物種を有する透明度の高い湖沼が、人間活動等の外的な影響によって栄養度が上昇していくと、ある閾値を境にして、突然、水が濁りはじめ、動植物の多様性が損なわれる事例が報告されている (Scheffer et al., 2001; Scheffer and Carpenter, 2003) [42][43]。生態学的レジリエンスは、「外力を受けた場合で

も、システムがその主要な性質を維持する能力（外力を受容する能力）」あるいは「外力を受けた場合でも、システムが従前の平衡状態に留まる能力」であると定義される。システムの生態学的レジリエンスの大きさは、システムが構造的に変化せずに受けることが可能な外力の総量によって測定される（Holling, 1996）[39]。生態学的レジリエンスの概念は、後述する社会生態システムにおけるレジリエンスの概念に引き継がれている。

（2） 社会生態システムにおけるレジリエンスの概念

Holling（1973）によって提唱された生態学的レジリエンスの概念は、1990年代以降、生態システムから社会生態システムに拡張されてレジリエンスの概念が構築されるようになった[10]。これは、生態システムと社会システムは相互に影響を与え合う関係であり、生態システムの振舞いを理解するためには二つのシステム間の相互作用を考慮し、システム全体を包括的に捉える枠組みが必要であると考えられるようになったためである（Gunderson and Holling, 2002; Folke, 2006）[44][45]。社会生態システムでは、生態システムと同様に複数の平衡状態が存在することを前提としている。複数存在する平衡状態には、望ましい平衡状態と望ましくない平衡状態があるとされる（Carpenter et al., 2001; Walker et al., 2004）[11][46]。社会生態システムにおけるレジリエンスの概念は、社会システムと生態システムの相互作用を考慮しながらシステムを望ましい状態に管理するための枠組みである。社会生態システムは複雑適応システムと考えられており、社会生態システムのレジリエンスには自己組織化と学習・適応能力の概念が導入された。Carpenter et al.（2001）は、社会生態システムのレジリエンスを、システムが現在の平衡状態に留まりながら、許容することのできる外力の総量（外力を受容する能力）、システムの自己組織化能力、システムの学習・適応力を向上させる能力、から成るとしている[11]。社会生態システムのレジリエンスの概念の特徴は、生態システムが望ましくない平衡状態に遷移した場合、社会システムがその状態に適応して自らを再構築する能力が含まれることである。本研究では、この能力を適応的レジリエンスとする。社会生態システムの適応的レジリエンスの事例としては、牧草地において畜産を営んでいた社会生態システムが干ばつによって牧草地が荒廃し、畜産の成立が困難となった際、残された野生動物を保護しながらエコツーリズムによって生計を立てるシステムへと転換した例がある（Walker et al., 2004）[46]。社会生態システムの概念では、システムが外力を受けた後、元の平衡状態に留まることができない場合でも、別の望ましい平衡状態に移行することができればよいと考えられている。

2.3.2 自然災害対策分野におけるレジリエンスの概念

自然災害対策分野においてシステムを対象とするレジリエンスの概念は、先述の通り、(i) 安定力としてのレジリエンスの概念、(ii) 受容力としてのレジリエンス、(iii) 適応力としてのレジリエンスの概念の3種類に分類できる。(i) 安定力としてのレジリエンスの概念

は生態システムにおける工学的レジリエンスの概念に、(ii) 受容力としてのレジリエンスは生態システムにおける生態学的レジリエンスの概念に、(iii) 適応力としてのレジリエンスの概念は社会生態システムにおける適応的レジリエンスの概念に影響を受けている。本項では、まず自然災害対策分野においてレジリエンスの概念の対象とされているシステムについて説明する。次に、3つのレジリエンスの概念的枠組みについて説明する。

(1) システムとしての都市、コミュニティ

システム・アプローチでは、都市、コミュニティを、住民の生活や企業の活動を支える機能を有するシステム（都市システム）とみなす。都市やコミュニティは、物理システム（physical system）、社会・経済システム（socio-economic system）、制度・組織システム（institutional/organizational system）のサブシステムから成るシステムとされる（図 2.1）。都市やコミュニティは、そのサブシステムやその構成要素が相互に影響しあうことにより形成される（Bruneau et al., 2003; Godschalk, 2003; De Bruijn, 2004a; De Bruijn et al., 2007; Cutter et al., 2008; Norris et al., 2008; Mens et al., 2011）[47][48][49][50][51][6][52]。

物理システムは、都市やコミュニティにおけるあらゆる活動を支える物理環境を指す。

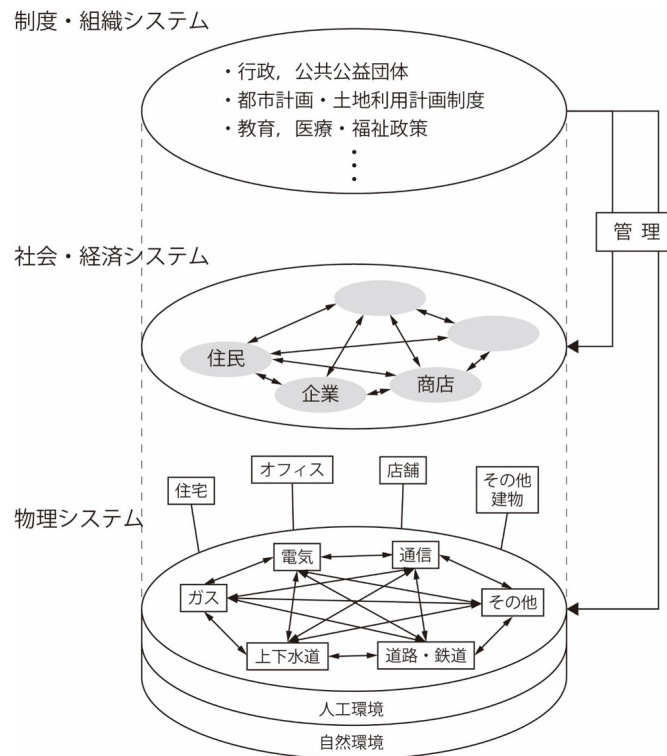


図 2.1: システムとしての都市、コミュニティの構造

物理システムは、自然環境（natural environment）および人工環境（built environment）に分けることができる。自然環境は、地形、水文、気象、植生、土壌などから成る。人工環境は電気・ガス・上下水道・通信、道路・鉄道などのインフラストラクチャー、建築物（住宅、事務所、工場など）・設備、農地などから成る。

社会・経済システムは、物理システムの上に成り立っているサブシステムであり、住民や企業の活動により形成される。社会・経済システムでは、住民、企業により各々必要な財・サービス、資本、労働力の交換が行われる。また、社会・経済システムにおける活動を通して建築物など一部の人工環境が構築される。社会・経済システムにおける活動は、システムを構成する人口属性（年齢、性別、職業、人種、教育水準など）や企業属性（業種、規模など）、社会的ネットワーク（地縁組織、商工会など）に影響される（De Bruijn, 2004b; Cutter et al., 2008; Norris et al., 2008）[53][51][6]。

制度・組織システムは、物理システム、社会・経済システムを公共・公益性の観点から直接的あるいは間接的に管理することを目的とした組織や制度から成る。これに該当する組織は、行政組織、または道路・鉄道、電気・ガス・上下水道・通信インフラ、公営住宅など公共・公益性の高い人工環境の建設・管理を行う公共・公益団体である（Bruneau et al., 2003）[47]。制度には、人工環境の構築を管理するための土地利用計画・都市計画制度などがある（Burby et al., 2000; Godschalk, 2003）[54][48]。また、これらの組織や制度によって、教育や医療・福祉などの公的サービスも提供される。

都市システムは、物理システム、社会・経済システム、制度・組織システムを通して住民の生活や企業の活動を可能とする環境を構築する機能を有していると考えられる。

（2）安定力としてのレジリエンスの概念

この概念では、被災した都市システムが望ましい状態に到達することを前提としている。この概念についての研究では、システムにとって望ましい状態を被災前の状態とすることが多く、レジリエンスはシステムの安定力として定義されている。システムの安定力とは、(i) システムがハザードに曝された時に、その状態・機能を可能な限り保持する能力、(ii) 状態・機能が損なわれた場合においても迅速に被災前の水準（あるいは許容可能な水準）まで回復する能力、から成るとされる（Tobin, 1999; Bruneau et al., 2003; Shinozuka et al., 2004; de Bruijn, 2004a; 中須, 2009; Longstaff, 2010; 林, 2012; 梶谷他, 2013）[55][47][56][49][57][58][59][60]。Bruneau et al. (2003) は、(i) の性質を頑健性（Robustness）、(ii) の性質を迅速性（Rapidity）と定義し、レジリエンスを構成する要素としている [47]。一方、(i) の性質のみをレジリエンスとして定義する場合もある。この場合、(i) の性質をレジスタンス（resistance）、(ii) の性質をレジリエンスと定義する（Dow, 1992; Buckle et al., 2000; Geis, 2000; McEntire et al., 2002）[21][61][62][63]。レジリエンスの定義自体は異なるが、どちらの場合もシステムの安定力に着目し、安定力を 2 つの構成要素に分解して概念を構築している点では共通している。本章では、(i) の性質を「頑

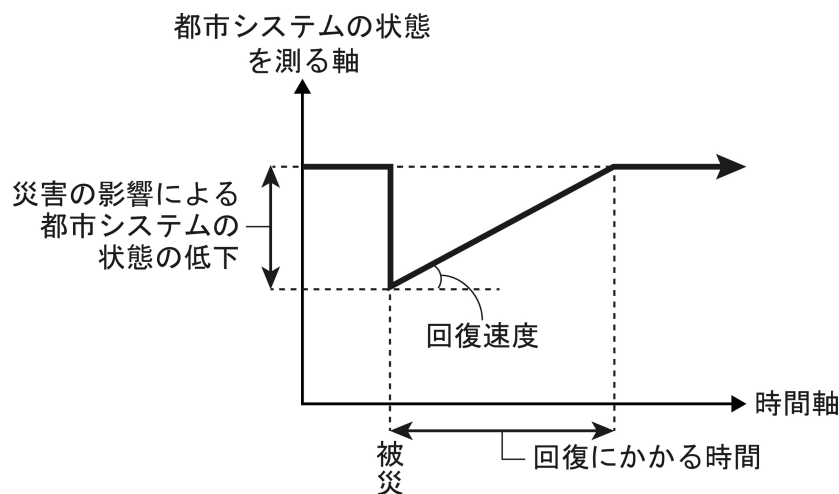


図 2.2: 安定力としてのレジリエンスの概念

健性」, (ii) の性質を「回復力」として議論を進める。

安定力としてのレジリエンスの概念では、システムがハザードによる被害を受けた時の挙動を概念的に示すと、図 2.2 のように表される。図 2.2 の縦軸は「システムの状態」を、横軸は「時間」を表す。システムの状態は、そのシステムが有する機能を発揮できる程度を左右するものであり、ハザードによる影響を受けると低下する。対象とするシステムにより、その状態を表す指標を設定することができる。例えば、電気・ガス・上下水道・通信システムなどの人工環境を対象とした場合、「システムの状態」は各システムの稼働率によって表される (Dow, 1992; Bruneau et al., 2003) [21][47]。一方、都市システム全体を対象とした場合、被災した都市システムの状態は、被災地域の居住人口、労働人口、地域総生産 (Gross Regional Product (GRP)), 就学率、住宅の供給数などの指標によって表される。 (Bruneau et al., 2003; De Bruijn, 2004b; Rose, 2005; 中須, 2009) [47][53][64][57]。

都市システムの頑健性は、ハザードに曝された時にそのシステムの状態・機能を可能な限り保持する性質である。図 2.2 において、頑健性は被災前のシステムの状態の水準に対する被災直後のシステムの状態の水準によって計測される。

システムの頑健性を向上させるには、一つ目にハザードを考慮した土地利用によって建物や施設の立地を管理することにより、被害を軽減することがあげられる (Burby et al., 2000) [54]。二つ目に、人工環境のハザードに対する感受性を改善することがあげられる。地震に対してはライフライン設備、建物の構造強度の向上、水害に対しては建物地盤の嵩上、ピロティ式建物などの例が考えられる。三つ目に、ライフラインの代替性 (redundancy) の確保があげられる (Bruneau et al., 2003) [47]。例としては、非常用電源の確保などが考えられる。四つ目に、緊急対応策があげられる。安全な避難場所の設置、避難警報システム、避難計画の整備などの人的被害を防止軽減する対策、消防・水防活動などの物理的被害を軽減する対策が含まれる。

都市システムの回復力は、ハザードによって損なわれた状態・機能を迅速に被災前の水準（あるいは許容可能な水準）まで回復しようとする性質である。図 2.2 において、回復力は、システムが被災前の水準（あるいは許容可能な水準）まで回復するのにかかる時間あるいは回復する速度によって計測される。

システムの状態・機能の回復は、人工環境および社会経済システムの回復によって決定される。社会経済システムの回復のためには、まず、電気・ガス・上下水道・通信、道路・鉄道などの主要な人工環境の回復が必要となる。主要な人工環境の回復に伴い、住宅や建物、設備の再建を経て、住民や企業が回帰し、生活・活動を再開することによって社会経済システムが回復する。

都市システムの回復力に影響を与える要因は、物理的要因、経済的要因、社会的要因、制度・組織的要因に分類できる。物理的要因とは、電気・ガス・上下水道・通信、道路・鉄道など、主要な人工環境の回復状況である。これらの人工環境の回復は、修繕のしやすさに係わるインフラ構造、各担当組織の緊急対応計画の整備状況および対処能力によって決定される。経済的要因には、住民の所得や貯蓄、雇用状況、企業の財務状況、業務継続計画（BCP）の有無がある。社会的要因には、コミュニティの団結力の強さ、コミュニケーション能力、問題解決能力、社会からの（非公的な）支援の有無（外部とのネットワーク）、地域における組織間の連携・協働、地域への愛着、教育水準、技能がある。制度・組織的要因には、公的な支援の有無、ゾーニングや建築規制などの計画、行政組織間の連携がある（表 2.1）（Bruneau et al., 2003; De Bruijn, 2004b; 浦野, 2007; 原口, 2010; 清水, 2012; 畠山他, 2013; 畠山他, 2014）[47][53][65][66][67][68][69]。

システムの回復では、構成要素が他の要素の回復状況に影響を受けること、つまり構成要素間の相互作用を考慮する必要がある。電気・ガス・上下水道・通信、道路・鉄道などのインフラは、他のインフラに依存している場合がある。例えば、通信システムや鉄道システムは電気システムに依存しているため、電気システムの復旧が前提条件となる。そのため、あるシステムの回復力を評価する場合、他のシステムとの相互の関係性を考慮する必要がある（Toubin et al., 2013）[70]。社会経済システムにおいても住民の回帰は生活利便施設である小売店の回帰に影響を受けることが指摘されている（Xiao and Van Zandt, 2012）[71]。また、企業の再建も顧客（住民あるいは取引先の企業）や供給業者、従業員の回復状況に影響を受けることが指摘されている（Zhang et al., 2009）[72]。Bruneau et al. (2003) は、ライフライン等のインフラシステムの回復が、社会経済システムの回復に影響を与える関係構造をモデル化した上で、レジリエンスを定量的に測るための枠組みを提示している [47]。Miles and Chang (2006) はレジリエンスを高める対策を検討することを目的として、都市システムの回復に影響を与える要因とその関係構造を明確にしたうえで、都市システムの回復を記述するモデルを構築している [73]。

表 2.1: 都市システムの回復力に影響を与える要因

	要因
物理的要因	<u>主要な人口環境の回復に関する要因</u> <ul style="list-style-type: none"> ● インフラ構造の修繕のしやすさ ● 各担当組織の対処能力 ● 緊急対応計画の整備状況
経済的要因	<u>住民に関する要因</u> <ul style="list-style-type: none"> ● 所得, 貯蓄 ● 雇用状況 <u>企業に関する要因</u> <ul style="list-style-type: none"> ● 財務状況 ● 業務継続計画 <u>都市における要因</u> <ul style="list-style-type: none"> ● 経済的資源の多寡・多様性
社会的要因	<u>住民に関する要因</u> <ul style="list-style-type: none"> ● 地域への愛着 ● 教育水準, 職能 <u>都市・社会に関する要因</u> <ul style="list-style-type: none"> ● コミュニティの団結力の強さ, 問題解決能力, コミュニケーション能力 ● 非公的な社会による支援の有無 ● 地域における組織間の連携, 協働
制度的要因	<ul style="list-style-type: none"> ● 公的な支援の有無 ● 被災後の都市計画 ● 行政組織間の連携

(3) 受容力としてのレジリエンスの概念

この概念は、被災した都市システムが望ましい状態に到達できない可能性があることを前提として、都市システムが災害による被害をどの程度まで受け容れることができるかに着目した概念である (de Bruijn, 2004b; Mens et al., 2011; Mens et al., 2012) [53][52][74]. 受容力としてのレジリエンスは、災害による被害を受け容れ、望ましい状態に到達可能な状態を保持する能力と定義することができる。受容力の大きさは、「都市システムが受容可能な被害の程度」によって表される。受容可能な被害の程度とは、その被害を受けた場合でも望ましい状態に到達可能な被害の程度を指す。災害により、受容力を超えるような被害を受けた場合、都市システムは被害を受けた状態のまま回復できずに停滞したり、衰退する等、望ましくない状態へと移行する (Mens et al., 2011) [52].

都市システムの受容力を超える被害によって、都市システムが望ましくない状態へと移行した事例として、Mens et al. (2011) がオランダのピースボス (De Biesbosch) の例を挙

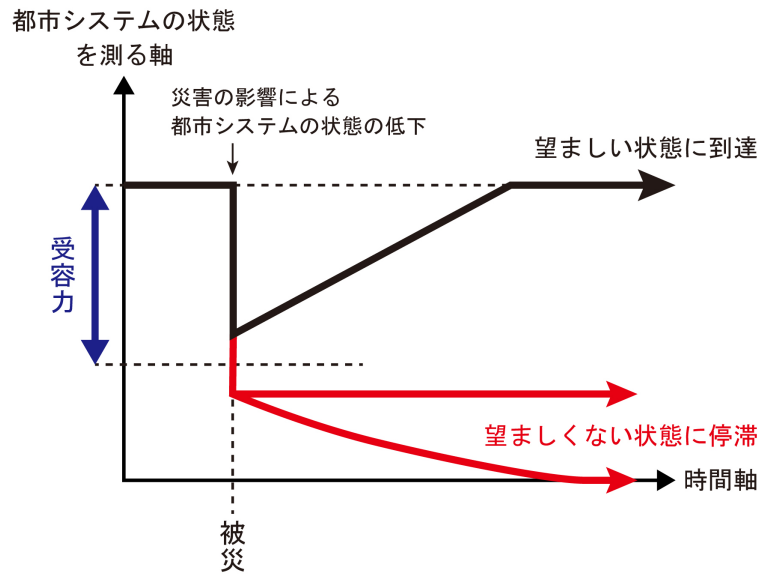


図 2.3: 受容力としてのレジリエンスの概念

げている [52]. 現在、ビースボスはオランダの国立自然公園となっているが、14 世紀には市街化された干拓地であった。ビースボスは 1421 年の水害 (St. Elizabeth flood) によって、干拓地のほとんどが浸水する被害を受けた。その後、1424 年に回復途上にあるビースボスは再び水害の被害を受けたことによって、その地域のコミュニティは干拓地を回復することを断念した。放棄されたビースボスの農耕地、居住地は自然へと回帰した (Mens et al., 2011) [52]. 別の事例としては、大航海時代にスペインと並んで世界の最強国であったポルトガルが、1755 年のリスボン地震による被害を契機に国力が徐々に衰退し、今日まで回復できていないことが指摘されている (林, 2012) [59]. Mens et al. (2011) は、受容力を超える被害によって都市システムが回復できない状況を、生態学的レジリエンスの概念に因んで「レジーム・シフト」としている [52].

都市システムの受容力の大きさを概念的に表すと、図 2.3 のように表すことができる。図 2.3 の縦軸は「システムの状態」を、横軸は「時間」を表す。災害被害によるシステムの状態への影響が受容力を超えなかった場合、都市システムは望ましい状態へと到達する。一方で、災害被害によるシステムの状態への影響が受容力を超えた場合、都市システムは被害を受けた状態のまま回復できずに停滞するか、衰退する等、望ましくない状態へと移行する。

都市システムの受容力に影響を与える要因としては、Mens et al. (2011) が社会的資本 (social capital) および経済的資本 (economic capital) を挙げているにとどまる。ここで言う社会的資本とは住居等の建築物やインフラストラクチャーの修繕や再建を組織する能力であり、経済的資本とはその修繕や再建を財政負担する能力とされる [52].

(4) 適応的再構築力としてのレジリエンスの概念

この概念では，都市システムには被災前の状態の他にも望ましい状態が複数存在する可能性があることを前提としており，その範囲内で都市システムが従前とは異なる状態へと変化することを許容している．このアプローチにおけるレジリエンスは，都市システムが被災した際，そのシステムが置かれている環境に適応し，都市システムが望ましい状態へと自身を再構築する能力であると定義できる（Godschalk, 2003; Norris et al., 2008; Cutter et al., 2008; Lorenz, 2013） [48][6][51][3]．

ある都市システムにとってどのような状態が望ましいかは，都市システムの構成要素がそのシステムに求める状態・機能によって決定される．構成要素がシステムに求める状態・機能は，文化や地域，時代によって異なる．そのため，都市システムにとって望ましい状態も文化や地域，時代によって変化するとされる（Lorenz, 2013） [3]．ただし，システムの望ましい状態を決定するための指標に関して，既往研究では，Norris et al. (2008) が人々の精神的な健康状態（mental and behavioral health），日常役割機能（role functioning），クオリティ・オブ・ライフ（quality of life (QOL)）をあげているに留まる [6]．

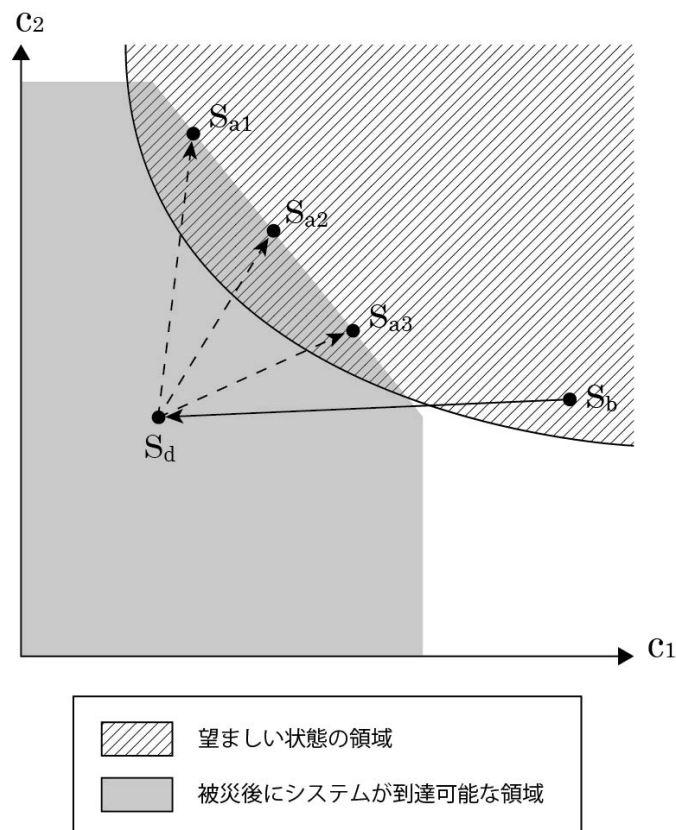


図 2.4: 都市システムの状態空間と望ましい状態

都市システムの状態が複数の指標によって測定可能であるとする、都市システムの状態はそれらの指標から成る状態空間に示すことができる。さらに、都市システムにとって望ましい状態が複数存在することを前提とすると、この状態空間に望ましい状態の領域を示すことが可能である。図 2.4 では、便宜上、2つの指標 (c_1, c_2) で都市システムの状態空間および望ましい状態の領域を表現した。

図 2.4 において、適応力としてのレジリエンスを考える。被災前に S_b にあった都市システムが災害による影響を受けて望ましくない状態 S_d に移行したとする。この時、システムは適応力に応じて、被災後に到達可能な領域が決定される。この領域がシステムの望ましい状態の領域に重なる部分があれば、このシステムは望ましい状態に到達することができる。被災後にシステムが到達可能な領域が被災前の状態 S_b まで及んでいる場合、システムは被災前の状態を回復することが可能である。ただし、この場合でも必ずしも被災前の状態を回復する必要はなく、到達可能な別の望ましい状態へと移行することも可能である。被災後にシステムが到達可能な領域が被災前の状態に及ばない場合でも望ましい状態の領域と重なりがあれば、いずれかの望ましい状態 (S_{a1}, S_{a2}, S_{a3}) に到達することが可能である。図 2.4 において、 $S_b, S_{a1}, S_{a2}, S_{a3}$ はいずれもこの都市システムにとって望ましい状態であるが、望ましさを構成する指標の組成が異なるため、望ましさの方向性が異なっていると言える。

以上を踏まえて、適応力としてのレジリエンスを時間軸も含めて概念的に表すと、図 2.5 のように表現することができる。横軸は時間軸、時間軸と垂直に交わる軸は都市システムの状態を表しており、システムの望ましさを測る軸である。システムの望ましさを測る軸

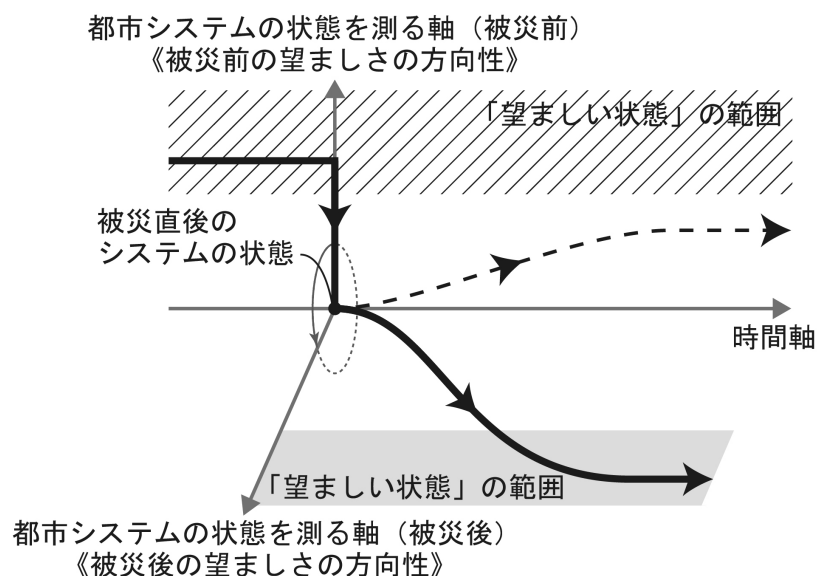


図 2.5: 適応的再構築力としてのレジリエンスの概念

を極座標を用いて表しており、偏角の違いが望ましさの方向性の違いを表す。被災したシステムが、被災前の望ましさの方向性の軸において「望ましい状態」の範囲に到達しない場合でも、別の望ましさの方向性の軸において「望ましい状態」の範囲に到達することができれば、十分なレジリエンスを有していると考えることができる。

システムにとって望ましい状態は複数存在し、文化や地域によって異なり、時代によって変容する可能性があるが、望ましい状態を実現するための要因、すなわち適応力を決定する要因は、「安定力としてのレジリエンス」の概念の回復力と同様の要因（表 2.1）で構成されている（Norris et al., 2008; Cutter et al., 2008）[6][51]。ただし、適応力としてのレジリエンスでは、これらの要因に加えて、システムを取り巻く環境の変化に対するコミュニティや行政組織の柔軟性、適応・学習する能力が、その要因に含まれることが特徴である。

2.4 まとめ

これまでに説明した脆弱性、レジリエンスの概念の各アプローチについて、図 2.6 にまとめる。自然災害対策分野におけるレジリエンスの概念は、脆弱性評価の枠組みからシステム・アプローチへと発展する中で、生態システムおよび社会生態システム分野からの影響も受けつつ変化してきた。本節では、自然災害対策分野におけるレジリエンスの概念の特徴について整理する。

自然災害対策分野におけるレジリエンスの概念は、個人、集団が住宅や生計手段を回復する能力としても用いられるが、近年では、システムが望ましい状態に到達する能力として用いられるようになった。個人や集団を対象としたレジリエンスの概念と比較すると、都市やコミュニティをシステムとみなすシステム・アプローチではレジリエンスに影響を与えるとされる要因が多様であり、構成要素間の相互作用も考慮する必要がある。

システム・アプローチにおける3つのレジリエンスの概念を比較すると、被災後に都市システムが到達すべき「望ましい状態」の定義について違いがみられる。安定力としてのレジリエンスの概念では、都市システムの望ましい状態を概ね被災前の状態としている。受容力としてのレジリエンスの概念では、都市システムの望ましい状態を被災前の状態に限定しないが、被害の程度によっては都市システムが望ましい状態に到達できない可能性があることを前提としている。適応的再構築力としてのレジリエンスの概念では、都市システムの望ましい状態は必ずしも被災前の状態だけでなく、複数存在する可能性があるとしている。

本研究では、第1章において、レジリエンス、回復力、復元力等、都市システムの回復・再生に関する能力を「再構築力」と定義したが、この都市システムの再構築力は、都市システムのレジリエンスと同義であるものとする。よって、上述の都市システムのレジリエンスの3つの概念を、(1) 安定力としての再構築力、(2) 受容力としての再構築力、(3) 適応力としての再構築力とする。

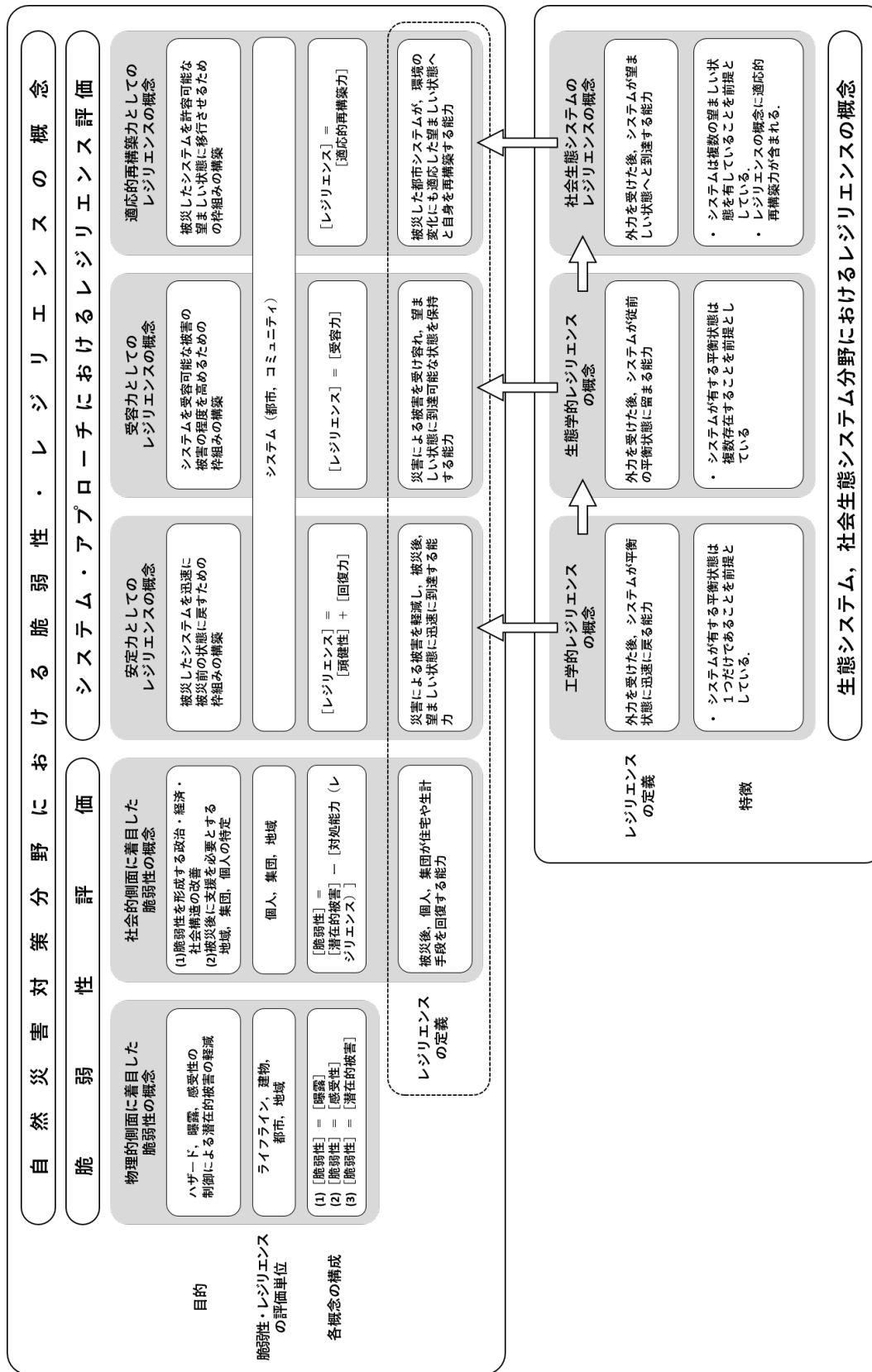


図 2.6: 脆弱性・レジリエンスの概念の各アプローチとその変遷

参考文献

- [1] 塩崎由人, 加藤孝明. 自然災害と関連分野におけるレジリエンス, 脆弱性の定義について. *生産研究*, Vol. 64, No. 4, pp. 643–646, 2012.
- [2] Richard J.T. Klein, Robert J. Nicholls, and Frank Thomalla. Resilience to natural hazards: How useful is this concept? *Global Environmental Change Part B: Environmental Hazards*, Vol. 5, No. 1, pp. 35 – 45, 2003.
- [3] Daniel F. Lorenz. The diversity of resilience: contributions from a social science perspective. *Natural Hazards*, Vol. 67, No. 1, pp. 7–24, May 2013.
- [4] Ann S. Masten, Karin M. Best, and Norman Garnezy. Resilience and development: Contributions from the study of children who overcome adversity. *Development and Psychopathology*, Vol. 2, No. 4, p. 425–444, 1990.
- [5] Margaret A. Waller. Resilience in ecosystemic context: Evolution of the concept. *American Journal of Orthopsychiatry*, Vol. 71, No. 3, pp. 290–297, 2001.
- [6] Fran H. Norris, Susan P. Stevens, Betty Pfefferbaum, Karen F. Wyche, and Rose L. Pfefferbaum. Community resilience as a metaphor, theory, set of capacities, and strategy for disaster readiness. *American Journal of Community Psychology*, Vol. 41, No. 1, pp. 127–150, Mar 2008.
- [7] P Longman. *Longman Dictionary of Contemporary English*. Longman ESL, Harlow, 5 edition, 1 2009.
- [8] Tsuyoshi Hashimoto, Jerry R. Stedinger, and Daniel P. Loucks. Reliability, resiliency, and vulnerability criteria for water resource system performance evaluation. *Water Resources Research*, Vol. 18, No. 1, pp. 14–20, 1982.
- [9] 藤井聡, 久米功一, 松永明, 中野剛志. 経済の強靱性 (Economic Resilience) に関する研究の展望. Discussion paper, 独立行政法人経済産業研究所, 2012.
- [10] C S Holling. Resilience and stability of ecological systems. *Annual Review of Ecology and Systematics*, Vol. 4, No. 1, pp. 1–23, 1973.
- [11] Steve Carpenter, Brian Walker, J. Marty Anderies, and Nick Abel. From metaphor to measurement: Resilience of what to what? *Ecosystems*, Vol. 4, No. 8, pp. 765–781, Dec 2001.

- [12] Hallie Eakin and Amy Lynd Luers. Assessing the vulnerability of social-environmental systems. *Annual Review of Environment and Resources*, Vol. 31, No. 1, pp. 365–394, 2006.
- [13] UN/ISDR (United Nations International Strategy for Disaster Reduction Secretariat). Hyogo framework for action 2005-2015: Building the resilience of nations and communities to disasters, 2007. accessed 25 September 2017.
- [14] Council of Australian Governments. National strategy for disaster resilience, 2011. accessed 25 September 2017.
- [15] FEMA(Federal Emergency Management Agency). Crisis response and disaster resilience 2030: Forging strategic action in an age of uncertainty.
- [16] Sofia U. Bettencourt, Jane Olga Ebinger, Marianne Fay, Francis Ghesquiere, Habiba Gitay, Jarl Krausing, Daniel Werner Kull, Kevin McCall, Robert Curle Jesse Reid, and Alanna Leigh Simpson. Building resilience integrating climate and disaster risk into developmente.
- [17] Susan L. Cutter, Jerry T. Mitchell, and Michael S. Scott. Revealing the vulnerability of people and places: A case study of georgetown county, south carolina. *Annals of the Association of American Geographers*, Vol. 90, No. 4, pp. 713–737, 2000.
- [18] B. L. Turner, Roger E. Kasperson, Pamela A. Matson, James J. McCarthy, Robert W. Corell, Lindsey Christensen, Noelle Eckley, Jeanne X. Kasperson, Amy Luers, Marybeth L. Martello, Colin Polsky, Alexander Pulsipher, and Andrew Schiller. A framework for vulnerability analysis in sustainability science. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, Vol. 100, No. 14, pp. 8074–8079, 2003.
- [19] G. White and E. Haas. *Assessment of Research on Natural Hazards*. MIT Press, Cambridge, 3 edition, 3 1975.
- [20] I. Burton, R. Kates, and G. White. *The Environment As Hazard*. The Guilford Press, New York, 2 edition, 4 1993.
- [21] Kirstin Dow. Exploring differences in our common future(s): The meaning of vulnerability to global environmental change. Vol. 23, pp. 417–436, 08 1992.
- [22] UNDRO (Office of United Nations Disaster Relief Co-ordinator). Natural disasters and vulnerabilty analysis.
- [23] N.N. Ambraseys and J.A. Jackson. Earthquake hazard and vulnerability in the northeastern mediterranean: the corinth earthquake sequence of february-march 1981. *Disasters*, Vol. 5, No. 4, pp. 355–368, 1981.
- [24] David Alexander. The study of natural disasters, 197797: Some reflections on a

- changing field of knowledge. *Disasters*, Vol. 21, No. 4, pp. 284–304, 1997.
- [25] Hans-Martin Füssel and Richard J. T. Klein. Climate change vulnerability assessments: An evolution of conceptual thinking. *Climatic Change*, Vol. 75, No. 3, pp. 301–329, Apr 2006.
 - [26] K. Hewitt. *The idea of calamity in a technocratic age*, pp. 3–32. Unwin Hyman, Boston, 1983.
 - [27] Gregory Bankoff. Rendering the world unsafe: ‘vulnerability’ as western discourse. *Disasters*, Vol. 25, No. 1, pp. 19–35, 2001.
 - [28] P. Susman, P. O’Keefe, and B. Wisner. *Global disasters, a radical interpretation*, pp. 263–282. Unwin Hyman, Boston, 1983.
 - [29] Phil o’keefe, Ken Westgate, and Ben Wisner. Taking the naturalness out of natural disasters. Vol. 260, , 04 1976.
 - [30] Betty Hearn Morrow. Identifying and mapping community vulnerability. *Disasters*, Vol. 23, No. 1, pp. 1–18, 1999.
 - [31] Ben Wisner and Henry R. Luce. Disaster vulnerability: Scale, power and daily life. *GeoJournal*, Vol. 30, No. 2, pp. 127–140, Jun 1993.
 - [32] W. Neil Adger. Vulnerability. *Global Environmental Change*, Vol. 16, No. 3, pp. 268 – 281, 2006. Resilience, Vulnerability, and Adaptation: A Cross-Cutting Theme of the International Human Dimensions Programme on Global Environmental Change Resilience, Vulnerability, and Adaptation: A Cross-Cutting Theme of the International Human Dimensions Programme on Global Environmental Change.
 - [33] B. Wisner, P. Blaikie, T. Cannon, and I. Davis. *At Risk*. Routledge, New York, 2 edition, 2004.
 - [34] M. Pelling. *The Vulnerability of Cities: Natural Disasters and Social Resilience*. Routledge, New York, 1 edition, 2003.
 - [35] M. B. Anderson and P. J. Woodrow. *Rising from the Ashes, Development Strategies in Times of Disaster*. Intermedite Technology Publication, London, 1 edition, 1998.
 - [36] Susan L. Cutter. Vulnerability to environmental hazards. *Progress in Human Geography*, Vol. 20, No. 4, pp. 529–539, 1996.
 - [37] Syed Ainuddin and Jayant Kumar Routray. Earthquake hazards and community resilience in baluchistan. *Natural Hazards*, Vol. 63, No. 2, pp. 909–937, Sep 2012.
 - [38] Marco A. Janssen, Michael L. Schoon, Weimao Ke, KatyB H rner. Scholarly networks on resilience, vulnerability and adaptation within the human dimensions of global environmental change. *Global Environmental Change*, Vol. 16, No. 3,

- pp. 240 – 252, 2006. Resilience, Vulnerability, and Adaptation: A Cross-Cutting Theme of the International Human Dimensions Programme on Global Environmental Change.
- [39] C. S. Holling. *Ecological Resilience-In Theory and Application*, pp. 31–43. The National Academy of Sciences, Washington DC, 1996.
 - [40] Lance H. Gunderson. Ecological resilience—in theory and application. *Annual Review of Ecology and Systematics*, Vol. 31, No. 1, pp. 425–439, 2000.
 - [41] 島田周平. 生態システムと社会システムの非対称的関係性とレジリエンス研究.
 - [42] M Scheffer, S Carpenter, J.A. Foley, Carl Folke, and Brian Walker. Catastrophic shifts in ecosystems. Vol. 413, pp. 591–, 01 2001.
 - [43] Marten Scheffer and Stephen R. Carpenter. Catastrophic regime shifts in ecosystems: linking theory to observation. *Trends in Ecology & Evolution*, Vol. 18, No. 12, pp. 648 – 656, 2003.
 - [44] L. H. Gunderson and C. S.. Holling. *Panarchy-Understanding Transformations in Human and Natural Systems-*. Island Press, Washington, 1 edition, 12 2002.
 - [45] Carl Folke. Resilience: The emergence of a perspective for socio-ecological systems analyses. Vol. 16, pp. 253–267, 08 2006.
 - [46] B. Walker, C. Holling, S. Carpenter, and A. Kinzig. Resilience , adaptability and transformability in social ecological systems. Vol. 9, , 2004. accessed 25 September 2017.
 - [47] Michel Bruneau, Stephanie E. Chang, Ronald T. Eguchi, George C. Lee, Thomas D.O’ Rourke, Andrei M. Reinhorn, Masanobu Shinozuka, Kathleen Tierney, William A. Wallace, Detlof von Winterfeldt. A framework to quantitatively assess and enhance the seismic resilience of communities. *Earthquake Spectra*, Vol. 19, No. 4, pp. 733–752, 2003.
 - [48] David R. Godschalk. Urban hazard mitigation: Creating resilient cities. *Natural Hazards Review*, Vol. 4, No. 3, pp. 136–143, 2003.
 - [49] K. M. de Bruijn. Resilience indicators for flood risk management systems of lowland rivers. *International Journal of River Basin Management*, Vol. 2, No. 3, pp. 199–210, 2004.
 - [50] K. M. De Bruijn, C. Green, C Johnson, and L. McFadden. *Evolving concepts in flood risk management: Searching for a common language*, pp. 61–75. Springer, Dordrecht, 2007.
 - [51] Susan L. Cutter, Lindsey Barnes, Melissa Berry, Christopher Burton, Elijah Evans, Eric Tate, and Jennifer Webb. A place-based model for understanding community resilience to natural disasters. *Global Environmental Change*, Vol. 18,

- No. 4, pp. 598 – 606, 2008. Local evidence on vulnerabilities and adaptations to global environmental change.
- [52] Marjolein J.P. Mens, Frans Klijn, Karin M. de Bruijn, and Eelco van Beek. The meaning of system robustness for flood risk management. *Environmental Science and Policy*, Vol. 14, No. 8, pp. 1121 – 1131, 2011.
- [53] K.M. de Bruijn. Resilience and flood risk management. *Water Policy*, Vol. 6, No. 1, pp. 53–66, 2004.
- [54] Raymond J. Burby, Robert E. Deyle, David R. Godschalk, and Robert B. Olshansky. Creating hazard resilient communities through land-use planning. *Natural Hazards Review*, Vol. 1, No. 2, pp. 99–106, 2000.
- [55] Graham A. Tobin. Sustainability and community resilience: the holy grail of hazards planning? *Global Environmental Change Part B: Environmental Hazards*, Vol. 1, No. 1, pp. 13 – 25, 1999.
- [56] Masanobu Shinozuka, Stephanie E. Chang, Tsen-Chung Cheng, Maria Feng, Thomas D. O'Rourke, M Ala, Xuejiang Dong, Xianhe Jin, Yu Wang, and Peixin Shi. Resilience of integrated power and water systems. *Research Progress and Accomplishments:2003-2004*, pp. 65–86, 01 2004.
- [57] 中須正. 災害からの都市の回復力—名古屋・ニューオリンズの比較—. 防災科学技術研究所報告, Vol. 75, pp. 69–82, 2009.
- [58] P. Longstaff, N. J. Armstrong, K. Perrin, W. M. Parker, and M. A. Hidek. Building resilient communities a preliminary framework for assessment. *Homeland Security Affairs*, Vol. 6, No. 3, pp. 1–23, 2010.
- [59] 林春男. 災害から立ち直る力=レジリエンスを (特集 「立ち直る力」を育む). 教育と医学, Vol. 60, No. 7, pp. 632–641, jul 2012.
- [60] 梶谷義雄, 横松宗太, 多々納裕一, 安田成夫. 東日本大震災後の電力供給不足に対する産業部門のレジリエンスの分析. 土木学会論文集 D3 (土木計画学) , Vol. 69, No. 5, pp. 181–188, 2013.
- [61] P. Buckle, G. Mars, and R. Smale. New approaches to assessing vulnerability and resilience. *Australian Journal of Emergency Management*, Vol.15, No.2, pp. 8-15, 2000., Vol. 15, No. 2, pp. 8–15, 2000.
- [62] Donald E. Geis. By design: The disaster resistant and quality-of-life community. *Natural Hazards Review*, Vol. 1, No. 3, pp. 151–160, 2000.
- [63] David A. McEntire, Christopher Fuller, Chad W. Johnston, and Richard Weber. A comparison of disaster paradigms: The search for a holistic policy guide. *Public Administration Review*, Vol. 62, No. 3, pp. 267–281, 2002.
- [64] Adam Rose and Shu-Yi Liao. Modeling regional economic resilience to disasters:

- A computable general equilibrium analysis of water service disruptions*. *Journal of Regional Science*, Vol. 45, No. 1, pp. 75–112, 2005.
- [65] 浦野正樹. 脆弱性概念から復元・回復力概念へ—災害社会学における展開, pp. 27–34. 弘文堂, 2007.
- [66] 原口弥生. レジリエンス概念の射程—災害研究における環境社会学的アプローチ (特集 災害—環境社会学の新しい視角). 環境社会学研究, Vol. 16, pp. 19–32, 2010.
- [67] 清水美香. 東日本大震災の教訓: 「レジリエンス」と災害マネジメントおよび公共政策の連関性. 国際公共政策研究, Vol. 16, No. 2, pp. 105–120, 2012.
- [68] 畠山慎二, 坂田朗夫, 川本篤志, 伊藤則夫, 白木渡. コミュニティ・レジリエンスの考え方に基づくコミュニティ継続計画 (CCP) 策定手法の提案. 土木学会論文集 F6 (安全問題), Vol. 69, No. 2, pp. 37–42, 2013.
- [69] 畠山慎二, 坂田朗夫, 川本篤志, 伊藤則夫, 白木渡. レジリエンスの考え方に基づいた行政機関 BCP 策定の提案. 土木学会論文集 F6 (安全問題), Vol. 70, No. 2, pp. 81–86, 2014.
- [70] M. Toubin, D. Serre, Y. Diab, and R Laganier. *An auto-diagnosis tool to improve urban resilience: The RATP case study*, pp. 143–150. Taylor and Francis, London, 2013.
- [71] Yu Xiao and Shannon Van Zandt. Building community resiliency: Spatial links between household and business post-disaster return. *Urban Studies*, Vol. 49, No. 11, pp. 2523–2542, 2012.
- [72] Yang Zhang, Michael K. Lindell, and Carla S. Prater. Vulnerability of community businesses to environmental disasters. *Disasters*, Vol. 33, No. 1, pp. 38–57, 2009.
- [73] Scott B. Miles and Stephanie E. Chang. Modeling community recovery from earthquakes. *Earthquake Spectra*, Vol. 22, No. 2, pp. 439–458, 2006.
- [74] M. Mens, F. Klijn, and R. Schielen. *Enhancing flood risk system robustness in practice*, pp. 1109–1116. Taylor and Francis, London, 2012.

第 3 章

都市システムの受容力の 構造の解明と制御の可能性

3.1 はじめに

都市システムの受容力の大きさ、つまり、都市システムが受容可能な被害の程度は、被災後の災害対応にも影響されるであろうが、被災以前からその都市システムが備えている、産業の規模等の特徴に大きく影響されると考えられる。本章では、被災前に都市システムが備えている特徴が受容可能な被害の程度に与える影響に着目する。

自然災害に対する都市システムの受容力に関する先行研究では、受容力を概念として提示している研究は存在する (de Bruijn, 2004 ; Mens et al., 2011) [1][2]。しかし、都市システムの特徴が受容力の大きさに与える影響に着目した研究は見られなかった。

以上を踏まえ、本章は、被災以前から都市システムが備えている特徴と受容力の大きさとの定性的な関係構造を明らかにし、受容力の制御の可能性を検討することを目的とする。

ここで、都市システムにとって望ましい状態を「都市システムが安定して存続可能な状態であること」と定義する。よって、都市システムの受容力は、「その被害を受けた場合でも都市システムが存続可能な状態を保持する能力」と定義される。

本章の構成は次の通りである。まず、人口 $x(t)$ と資本（生産設備） $y(t)$ の 2 つの変数によって表される都市システムの状態の、動的变化を記述する微分方程式モデルを構築する。産業の規模等、都市システムが備えている特徴は、このモデルにおけるパラメータによって表す。次に、都市システムの特徴の違いがシステムの状態の動的变化に与える影響を分析する。そして、都市システムが受容力の大きさが、微分方程式モデルによって表されることを示す。さらに、都市システムの特徴の違いが受容力に与える影響を分析することで、都市システムの特徴と受容力の大きさの関係構造を明らかにする。最後に、以上の分析結果を踏まえ、都市システムの受容力の制御の可能性を検討する。

3.2 微分方程式による都市システムモデルの構築

本節では、微分方程式モデルを用いて都市システムの状態の動的変化を記述するモデルを構築する。まず、本章における都市システムモデルの前提を示した上で、微分方程式を用いて、このモデルを定式化する。本研究では、このモデルを「基本都市モデル」と呼ぶことにする。

3.2.1 基本都市モデルの前提

本研究では、前述の通り、都市システムを居住者の生活や産業による生産活動を支える機能を有するシステムとみなす。都市システムの居住者は、生産活動に従事することで所得を得て、生活利便施設から生活に必要なサービス（以下、生活サービス）を受ける。生活利便施設とは、食品や衣服等を販売する小売店、教育・医療・福祉・娯楽等のサービスを提供する施設を指す。都市システムにおける産業は、労働人口と資本を基に生産活動を行う。労働人口は都市システムの居住者であり、資本は生産設備を指す。

基本都市モデルの構造を図 3.1 に示す。都市システムの状態は、人口 $x(t)$ と資本 $y(t)$ の2つの変数によって表す。図 3.1 中の関数やパラメータの詳細については、次節において説明する。

都市システムにおける人口 $x(t)$ は、社会増減（転入および転出）によってのみ変動するものとする。都市システムにおける出生数と死亡数は常に均衡しているものと仮定し、自然増減による人口の変動は考慮しない。単位時間当たりの人口 $x(t)$ の社会増減は、都市システムの有する吸引力 $A(x, y)$ と外部システムの吸引力 ω の差によって決定されると仮定

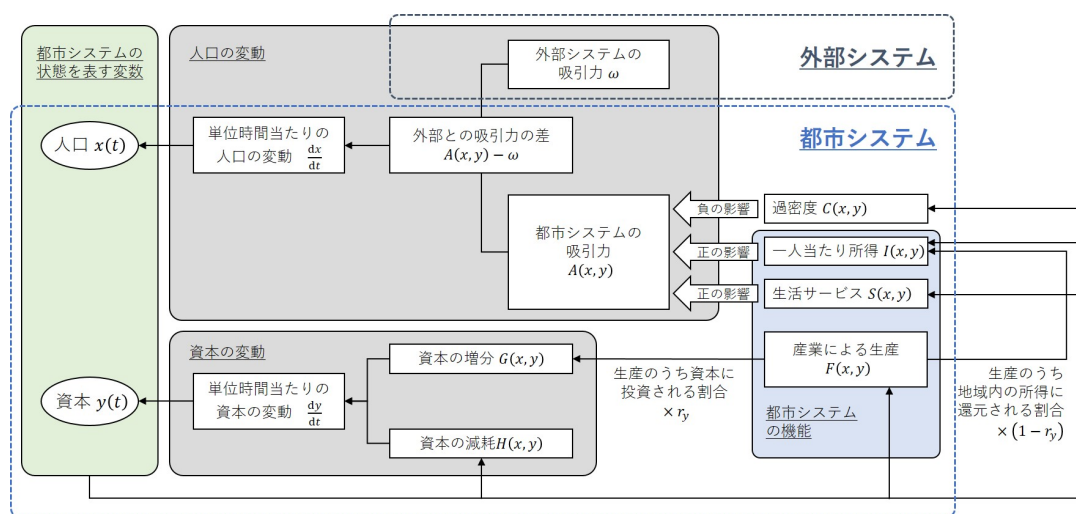


図 3.1: 基本都市モデルの構造

する。都市システムの吸引力とは、居住地としての魅力を指し、その都市に居住することで得られる効用によって決定される。都市システムの吸引力が外部システムよりも高ければ、外部から人口が流入する。逆に、都市システムの吸引力が外部システムより低ければ外部へと人口が流出する。

都市システムの吸引力 $A(x, y)$ は、都市システムにおける一人当たり所得 (Income) $I(x, y)$ 、生活サービス (Service) $S(x, y)$ 、過密度 (Congestion) $C(x, y)$ に基づく効用によって決定される。一人当たり所得および生活サービスは正の効用である。過密度は都市システムの人口 $x(t)$ および資本 $y(t)$ の過密による居住環境への負の影響を指し、負の効用となる。本研究では、一人当たり所得、生活サービス、過密度から受ける効用は人の選好によって変わらないものとする。

所得は都市システム内部の産業に従事することによってのみ得られるものとする。都市システムの居住者が外部システムの産業に従事することはないものとする。また、居住人口 $x(t)$ はすべて労働人口であるものとする。

生活サービスは都市システム内部の生活利便施設からのみ受けるものとする。都市システムの居住者が外部システムの生活サービスを受けることはないものとする。

過密度は都市システムの人口 $x(t)$ および資本 $y(t)$ の密度の上昇に伴い、高まるものとする。

都市システムの資本 $y(t)$ は、産業における生産 $F(x, y)$ からの投資による増分と減耗による減分の多寡に応じて変動するものとする。都市システムにおける産業では、労働人口 $x(t)$ と資本 $y(t)$ を生産要素として生産量 $F(x, y)$ が決定されるものとする (Solow, 1956) [3]。都市システムの労働人口は、都市システムの居住人口だけであり、外部から通勤する者はないものとする。資本は都市システムの居住者の間で平等に所有されているものとし、生産のうち一定の割合 r_y を資本への投資に回すが、その残りは労働人口によって所得として均等に分配されるものとする。

外部システムの人口および産業の規模は、都市システムに対して十分に大きく、都市システムの状態の変化が外部システムの吸引力 ω に直接影響を与えることはないものとする。

3.2.2 微分方程式による定式化

前節で前提条件を示した基本都市モデルを微分方程式によって定式化する。本研究では、都市システムの状態を人口 $x(t)$ と資本 $y(t)$ という2つの変数によって表すため、

$$\dot{x}(t) = \frac{dx}{dt} = f(x, y) \quad (3.1)$$

$$\dot{y}(t) = \frac{dy}{dt} = g(x, y) \quad (3.2)$$

という2つの式から成る連立微分方程式としてモデルを定式化する。

(1) 人口の変動

単位時間当たりの人口の変動（式（3.1））は，都市システムの吸引力 $A(x, y)$ と外部システムの吸引力 ω の差に比例するものと仮定して，

$$\frac{dx}{dt} = r_x(A(x, y) - \omega)x \quad (3.3)$$

$$= r_x(a_I(x, y) + a_S(x, y) + a_C(x, y) - \omega)x \quad (3.4)$$

$$\text{where } A(x, y) = a_I(x, y) + a_S(x, y) + a_C(x, y) \quad (3.5)$$

と表す． r_x は都市システムと外部の吸引力の差に応じた人口の転出入速度を表すパラメータである．都市システムの吸引力 $A(x, y)$ は，式（3.5）に示す通り，一人当たり所得に起因する吸引力 $a_I(x, y)$ ，生活サービスに起因する吸引力 $a_S(x)$ ，過密度に起因する吸引力 $a_C(x, y)$ の代数和としてと表す．

都市システムにおける一人当たり所得 $I(x, y)$ を

$$I(x, y) = \frac{(1 - r_y)F(x, y)}{x + 1} \quad (3.6)$$

と表す．生産量 $F(x, y)$ のうち資本への投資に回す割合を r_y とすると，生産量 $F(x, y)$ のうち所得として分配される割合は $1 - r_y$ となる．生産量に所得への分配率を乗じて得られる $(1 - r_y)F(x, y)$ を人口 $x(t)$ で除すことによって一人当たりの所得 $I(x, y)$ が得られる．ただし，式（3.6）において， $x(t) \rightarrow 0$ のときに一人当たりの所得 I が無限大に発散しないよう，便宜上，分母を $x + 1$ とする．生産量 $F(x, y)$ については「3.1(2) 資本の変動」において説明する．

一人当たり所得に起因する吸引力 a_I は，一人当たり所得の水準 I の上昇に伴い増加するが，限界効用逓減の法則に従い，その増加率は徐々に逓減していくものと仮定する．Lacitignola et al. (2007) は限界効用逓減の法則に従う効用関数をモノ一式 (Monod function) を用いて表しているが，本研究もこれにならい，一人当たり所得に起因する吸引力 a_I を

$$a_I = \mu_I \frac{I}{I + \varphi_I} \quad (3.7)$$

と表す [4]． μ_I は，一人当たり所得 I が無限大となった時の一人当たり所得に起因する吸引力 a_I の値であり，一人当たり所得に起因する吸引力の上限値である． φ_I は一人当たり所得に起因する吸引力が上限値の半分となる時の一人当たり所得の水準である．式（3.7）は，

$$\frac{\partial a_I}{\partial I} = \frac{\mu_I \varphi_I}{(I + \varphi_I)^2} > 0 \quad (3.8)$$

かつ

$$\frac{\partial^2 a_I}{\partial I^2} = \frac{-2\mu_I \varphi_I}{(I + \varphi_I)^3} < 0 \quad (3.9)$$

を満たすので、限界効用逓減の法則を満たす。横軸を一人当たり所得 I 、縦軸を一人当たり所得に起因する吸引力 a_I として、式 (3.7) をグラフに表すと図 3.2 のようになる。

一人当たり所得に起因する吸引力 a_I は、式 (3.7) に式 (3.6) を代入して、

$$a_I(x, y) = \frac{\mu_I(1 - r_y)F(x, y)}{(1 - r_y)F(x, y) + \varphi_I x + \varphi_I} \quad (3.10)$$

と表される。

都市システムにおける生活サービスの水準は、その都市システムにおいて受けることのできる生活サービスの種類の多寡によって決定され、人口の増加に伴い上昇するものとする。ここでは人口の規模が 10 倍になるごとに生活サービスの水準が 1 つ上昇すると仮定し、常用対数を用いて、生活サービスの水準 S を

$$S(x, y) = S(x) = \log_{10}(x + 1) \quad (3.11)$$

と表す。ただし、 $x(t) \rightarrow 0$ のとき、生活サービスの水準 S が 0 となるように、便宜上、式 (3.11) の常用対数の真数を $x + 1$ とする。

生活サービスに起因する吸引力 a_S は、一人当たり所得に起因する吸引力 a_I と同様に、生活サービスの水準 S の上昇に伴い増加するが、限界効用逓減の法則に従い、その増加率は徐々に逓減していくものとする。生活サービスに起因する吸引力 a_S についても、式 (3.7) と同様にモノー式を用いて、

$$a_S = \mu_S \frac{S}{S + \varphi_S} \quad (3.12)$$

と表す。 μ_S は、生活サービス S が無限大となった時の生活サービスに起因する吸引力 a_S の値であり、生活サービスに起因する吸引力の上限値である。 φ_S は生活サービスに起因す

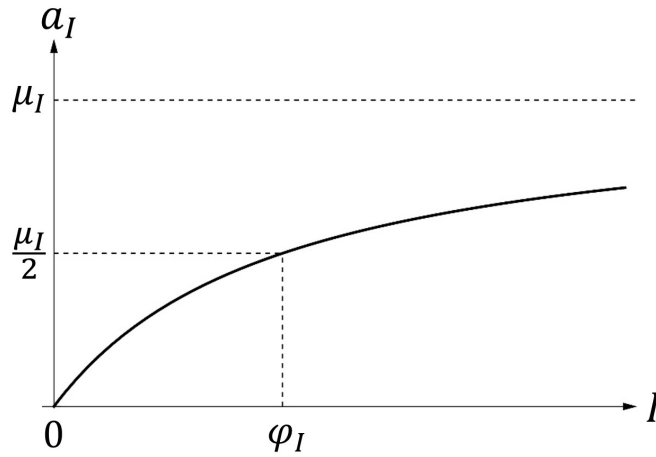


図 3.2: a_I のグラフ

る吸引力が上限値の半分となるときの生活サービスの水準である．式 (3.12) は，式 (3.7) と同様に，

$$\frac{\partial a_S}{\partial S} = \frac{\mu_S \varphi_S}{(S + \varphi_S)^2} > 0 \quad (3.13)$$

かつ

$$\frac{\partial^2 a_S}{\partial S^2} = \frac{-2\mu_S \varphi_S}{(S + \varphi_S)^3} < 0 \quad (3.14)$$

を満たすので，限界効用逓減の法則を満たす．

生活サービスに起因する吸引力 a_S は，式 (3.12) に式 (3.11) を代入して，

$$a_S(x, y) = a_S(x) = \frac{\mu_S \log_{10}(x+1)}{\log_{10}(x+1) + \varphi_S} \quad (3.15)$$

と表される．

都市システムの過密度 $C(x, y)$ を

$$C(x, y) = \frac{\rho_x x + \rho_y y}{\sigma} \quad (3.16)$$

と表す． σ は都市の空間の広がりを表すパラメータであり， ρ_x および ρ_y は，それぞれ人口および資本の密度が都市システムの居住環境に与える負の影響の程度を表すパラメータである．

過密度に起因する吸引力 a_C を

$$a_C(x, y) = -C(x, y) = -\frac{\rho_x x + \rho_y y}{\sigma} \quad (3.17)$$

と表す．過密度 C が高くなるほど，都市システムの吸引力に対する負の影響は大きくなる．

以上より，単位時間当たりの人口の変動は，式 (3.4) に式 (3.10)，式 (3.15)，式 (3.17) を代入することで，

$$\begin{aligned} \frac{dx}{dt} = r_x & \left(\frac{\mu_I(1-r_y)F(x, y)}{(1-r_y)F(x, y) + \varphi_I x + \varphi_I} \right. \\ & \left. + \frac{\mu_S \log_{10}(x+1)}{\log_{10}(x+1) + \varphi_S} - \frac{\rho_x x + \rho_y y}{\sigma} - \omega \right) x \end{aligned} \quad (3.18)$$

と表される．

(2) 資本の変動

単位時間当たりの資本の変動は，投資に基づく資本の増分 $G(x, y)$ と資本の減耗 $H(x, y)$ の差によって決定されるものとして，

$$\frac{dy}{dt} = G(x, y) - H(x, y) \quad (3.19)$$

$$= \frac{r_y F(x, y)}{\varepsilon} - \delta y \quad (3.20)$$

$$\text{where } G(x, y) = \frac{r_y F(x, y)}{\varepsilon}, \quad (3.21)$$

$$H(x, y) = \delta y \quad (3.22)$$

と表す． $G(x, y)$ 投資に基づく資本の増分 $G(x, y)$ ，資本の減耗 $H(x, y)$ については，それぞれ式 (3.21)，式 (3.22) の通り定める．式 (3.21) において， ε は資本 1 単位の増加に必要なコスト， r_y は生産量 $F(x, y)$ のうち資本への投資に充てられる割合を表す．式 (3.22) において， δ は単位時間あたりに資本が減耗する割合を表すパラメータである．

この都市システムにおける産業の生産量は，労働人口 $x(t)$ ，資本 $y(t)$ を生産要素とする生産関数 $F(x, y)$ によって決定される．本研究では，生産関数について，次の 3 つの前提条件を置く．条件 I は，「労働人口あるいは資本のいずれかの生産要素の投入量が 0 であれば，生産量も 0 となること」である．つまり，

$$F(0, 0) = F(x, 0) = F(0, y) = 0 \quad (3.23)$$

を満たすものとする．

条件 II は，「 $(x, y) = (0, 0)$ の状態から生産要素投入量を増やしていくとき，生産要素投入量が一定量までは規模の経済が働くこと」である．これは，労働人口も生産設備もない状況から生産要素を増やしていくとき，最初は得られる生産量の増加率は低いですが，徐々に生産効率が高まることによって，生産要素投入量が一定量までは，生産要素 1 単位を増やしたときに増加する生産量も高まっていくとする仮定である (Capasso et al., 2010) [5]．

条件 III は，「都市システムの産業には生産量の上限があるものとし，いくら生産要素投入量を増やしても生産量は上限値 k_{max} を超えないこと」である．つまり， $x > 0, y > 0$ のとき，

$$\lim_{x \rightarrow \infty} F(x, y) = k_{max} \quad (3.24)$$

$$\lim_{y \rightarrow \infty} F(x, y) = k_{max} \quad (3.25)$$

$$\lim_{x \rightarrow \infty, y \rightarrow \infty} F(x, y) = k_{max} \quad (3.26)$$

を満たすものとする．

本研究では，上記の 3 つの条件を満たす生産関数を

$$F(x, y) = F(P(x, y)) = k_{max} \frac{P^\gamma}{P^\gamma + k_h^\gamma} \quad (3.27)$$

$$= k_{max} \frac{(x^\alpha y^\beta)^\gamma}{(x^\alpha y^\beta)^\gamma + k_h^\gamma} \quad (3.28)$$

$$\text{where } P(x, y) = x^\alpha y^\beta \quad (3.29)$$

と定義する． $P(x, y)$ は生産要素投入量を表す関数， k_{max} は都市システムの産業による生産の上限値， k_h は上限値 k_{max} の半分の生産量となるときに生産要素投入量， γ は生産関

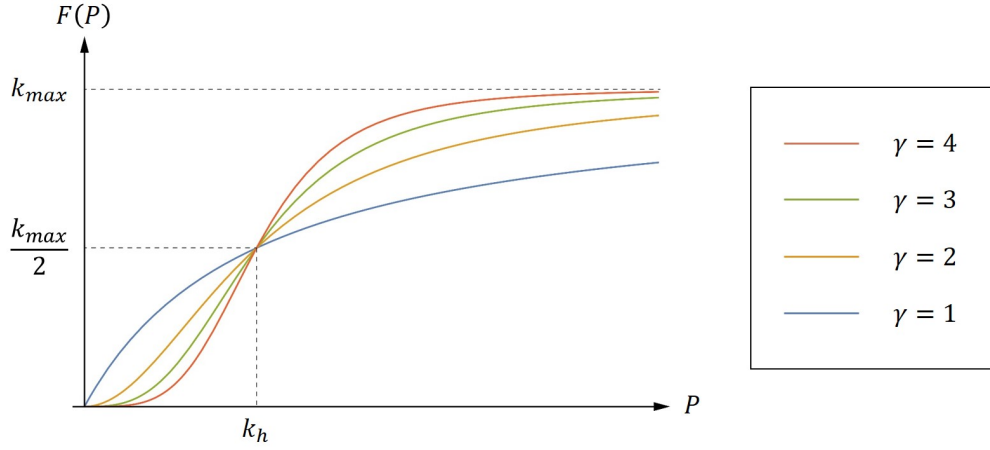


図 3.3: γ に応じた生産関数の形状

数の曲線の形状を決定するパラメータである．ただし， γ は正の整数とする． α および β は，それぞれ生産における労働および資本の寄与の程度を表すパラメータである．ここでは， $\alpha + \beta = 1$ となるように α および β の値を定めるものとする．

縦軸を生産量 $F(P)$ ，横軸を生産要素投入量 P として，グラフを描くと図 3.3 のようになる． $\gamma = 1$ のとき， P の値によらず，常に収穫逓減となる． $\gamma \geq 2$ のとき， P が一定量まで収穫逓増であるが，一定量を超えると収穫逓減となり，上記の生産関数の条件 II を満たす．本研究では， γ の値を $\gamma = 4$ と定める．このとき，式 (3.27) の生産関数は条件 I および条件 III も満たす．

3.2.3 微分方程式モデルとパラメータ

以上より，基本都市モデルの人口および資本の単位時間当たりの変動は，式 (3.18) および式 (3.20) に式 (3.28) を代入して，それぞれ式 (3.30) および式 (3.31) の通り表される．この微分方程式によって都市システムの状態の動的变化を記述する．また，このモデル内のパラメータによって，都市システムが備えている特徴が表される．

$$\frac{dx}{dt} = r_x \left(\frac{\mu_I k_{max} (1 - r_y) (x^\alpha y^\beta)^\gamma}{k_{max} (1 - r_y) (x^\alpha y^\beta)^\gamma + \varphi_I (x + 1) ((x^\alpha y^\beta)^\gamma + k_h^\gamma)} + \frac{\mu_S \log_{10} (x + 1)}{\log_{10} (x + 1) + \varphi_S} - \frac{\rho_x x + \rho_y y}{\sigma} - \omega \right) x \quad (3.30)$$

$$\frac{dy}{dt} = \frac{r_y}{\varepsilon} \cdot \frac{k_{max} (x^\alpha y^\beta)^\gamma}{(x^\alpha y^\beta)^\gamma + k_h^\gamma} - \delta y \quad (3.31)$$

$$(3.32)$$

微分方程式モデルのパラメータとその定義域を表 3.1 に整理する．生産関数の曲線の形状を決定するパラメータ γ は，先述の通り $\gamma = 4$ とする．一人当たりの所得に起因す

表 3.1: 基本都市モデルのパラメーター一覧

パラメータ	説明	値あるいは定義域
α	生産における労働の寄与の程度	$\alpha > 0. \alpha + \beta = 1$
β	生産における資本の寄与の程度	$\beta > 0. \alpha + \beta = 1$
γ	生産関数の曲線の形状を決定するパラメータ	$\gamma = 4$
r_x	吸引力の差に応じた人口の転出入速度	$r_x > 0$
μ_I	一人当たり所得に起因する吸引力の上限値	$\mu_I = 1$
φ_I	一人当たり所得に起因する吸引力が上限値の半分となるときの一人当たり所得の水準	$\varphi_I = 3$
μ_S	生活サービスの水準に起因する吸引力の上限値	$\mu_S = 1$
φ_S	生活サービスの水準に起因する吸引力が上限値の半分となるときの生活サービスの水準	$\varphi_S = 4$
ρ_x	人口密度の居住環境への負の影響の程度	$\rho_x > 0$
ρ_y	資本の密度の居住環境への負の影響の程度	$\rho_y > 0$
σ	都市システムの空間的な広がり	$\sigma = 10000$
ω	外部システムの吸引力	$\omega > 0$
r_y	生産における資本への投資の割合	$0 \leq r_y \leq 1$
ε	資本（生産設備）1 単位当たりのコスト	$\varepsilon > 0$
k_{max}	都市システムの産業における生産の上限値	$k_{max} \geq 0$
k_h	生産が上限値の半分となるときの生産要素投入量	$k_h > 0$
δ	単位時間当たりの資本の減耗率	$0 < \delta < 1$

る吸引力の最大値 μ_I ，その吸引力が最大値の半分となるときの一人当たり所得 φ_I ，生活サービスの水準に起因する吸引力の最大値 μ_S ，その吸引力が最大値の半分となるときの生活サービスの水準 φ_S は，いずれの都市においても同じであるものとする．本研究では， $\mu_I = 1$ ， $\varphi_I = 3$ ， $\mu_S = 1$ ， $\varphi_S = 4$ と定める．都市システムの空間的な広がり σ については， $\sigma = 10000$ と定める．その他のパラメータについては，表 3.1 の定義域において可変であり，都市システムの特徴に応じて決定されるものとする．

3.3 微分方程式モデルにより定義されるベクトル場の構造の分析

式 (3.30)，式 (3.31) のように微分方程式が定義されると， xy 平面上の各点 (x, y) において，ベクトル $\mathbf{v}(x, y) = (f(x, y), g(x, y))$ が割り当てられる．このとき， xy 平面上のベク

トルの全体が, xy 平面上のベクトル場である.

ベクトル場によって決定される xy 平面上の流れが微分方程式の解の軌道であり, 流線と呼ばれる. 微分方程式のパラメータが設定されれば, xy 平面上のベクトル場および流線が定まり, 都市システムの状態は初期値の置かれた点を通る流線に従って時々刻々と変化していくことになる. そのため, 都市システムの状態の動的変化は xy 平面上のベクトル場によって決定される流線の様子を把握することで理解できる. 第 4 章において説明するが, 都市システムが受容可能な被害の程度もベクトル場によって決定され, xy 平面上の流線の様子を把握することで受容可能な被害の程度を測ることが可能となる.

本節では, まず, 表 3.2 に示すパラメータを設定した場合を例として, xy 平面上における流線の様子を理解するために必要な概念を説明する. そのうえで, 表 3.2 に示すパラメータを基点として, パラメータを変化させたとき, xy 平面上における流線の様子がどのように変化するかを分析する. パラメータを変化させる際に表 3.2 を基点とするのは, 3.4 において, 都市システムが受容可能な被害の程度とパラメータの変化の定性的な関係を明確に示す上で都合がよいためである.

表 3.2: パラメータの設定

パラメータ	値	パラメータ	値	パラメータ	値
α	0.5	μ_S	1	r_y	0.2
β	0.5	φ_S	4	ε	40
γ	4	ρ_x	0.01	k_{max}	30000
r_x	0.1	ρ_y	0.01	k_h	3000
μ_I	1	σ	10000	δ	0.02
φ_I	3	ω	1		

3.3.1 平衡点の安定性, 吸引領域, 到達時間

本節では, xy 平面上における流線の様子を理解するために必要な概念として, 平衡点の安定性, 吸引点の吸引領域, 吸引点への到達時間について説明する.

(1) 平衡点の安定性

ここではまず, 平衡点の安定性を分析する. 平衡点とは, $f(x^*, y^*) = g(x^*, y^*) = 0$ を満たす点 (x^*, y^*) であり, 平衡点では解は静止した状態となる. 平衡点の安定性を分析することで, 平衡点のまわりの流線の流れを調べることができる. 一般的に微分方程式の平衡点の安定性の状態は, 安定, 漸近安定, 不安定に分類される. 平衡点 (x^*, y^*) の十分近くから出発するすべての解が常に (x^*, y^*) の近くにとどまるとき, (x^*, y^*) を安定な平衡点という. さらに, 平衡点 (x^*, y^*) の十分近くから出発するすべての解が (x^*, y^*) に収束

するならば、 (x^*, y^*) は漸近安定であるという。また、平衡点 (x^*, y^*) が安定でないとき、平衡点 (x^*, y^*) は不安定であるという（桑村，2015; Hirsch et al., 2017） [6][7]。

表 3.2 に示すパラメータを設定したとき、数値計算によって平衡点を求めると、表 3.3 のように 3 つの平衡点を得る。このとき、微分方程式によって定義される xy 平面上的流線の様子を描くと図 3.4 のようになる（Wolfram Research Inc., 2015） [8]。

各平衡点の安定性を分析すると、平衡点 Q_1 および Q_3 は、そのまわりの線形化行列（ヤコビ行列）の固有値が 2 つとも負の実数となるので漸近安定である。図 3.4 を見ても平衡点 Q_1 ， Q_3 のまわりでは、周辺から流線が平衡点 Q_1 ， Q_3 に流れ込んでいることがわかる。漸近安定な平衡点は、吸引力的な平衡点あるいは吸引点（attractor）とも呼ばれる（桑村，2015; Hirsch et al., 2017）。平衡点 Q_2 は、そのまわりの線形化行列の固有値が 1 つは負の実数、もう 1 つは正の実数となるので不安定である。平衡点 Q_2 には流れ込む流線と流れ出る流線の両方があり、このような平衡点は鞍点（saddle point）と呼ばれる（桑村，2015; Hirsch et al., 2017） [6][7]。

表 3.3: 平衡点の座標と安定性

平衡点	座標	安定性
Q_1	(0, 0)	漸近安定（吸引点）
Q_2	(2480.8, 2800.5)	不安定（鞍点）
Q_3	(7049.2, 7276.0)	漸近安定（吸引点）

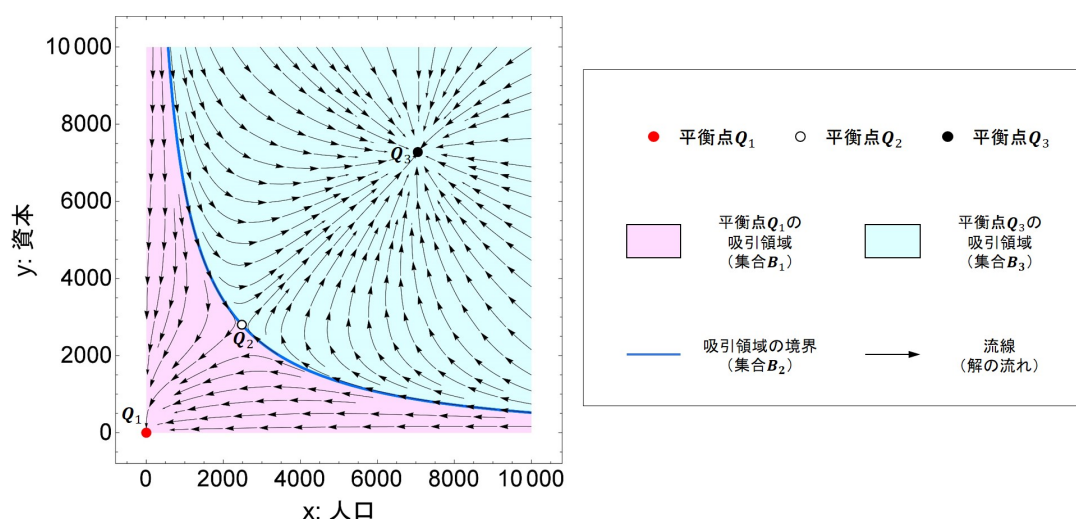


図 3.4: 表 3.2 に示すパラメータ設定時の xy 平面上における流線の様子

(2) 吸引点の吸引領域

漸近安定な平衡点が与えられたとき、 $t \rightarrow \infty$ でその平衡点に収束するような初期値の集合を吸引領域 (basin of attraction) と呼ぶ。 $\mathbf{z}(t) = (x(t), y(t))$ とおき、初期値 $\mathbf{z}_0 = (x(0), y(0))$ をみたす微分方程式の解を $\mathbf{z}(t; \mathbf{z}_0)$ とおく。表 3.2 に示すパラメータを設定したとき、平衡点 \mathbf{Q}_1 , \mathbf{Q}_3 の吸引領域に相当する集合 \mathbf{B}_1 , \mathbf{B}_3 は、それぞれ

$$\mathbf{B}_1 := \left\{ \mathbf{z}_0 \mid \lim_{t \rightarrow \infty} \mathbf{z}(t; \mathbf{z}_0) = \mathbf{Q}_1 \right\} \quad (3.33)$$

$$\mathbf{B}_3 := \left\{ \mathbf{z}_0 \mid \lim_{t \rightarrow \infty} \mathbf{z}(t; \mathbf{z}_0) = \mathbf{Q}_3 \right\} \quad (3.34)$$

と表される。また、 $t \rightarrow \infty$ で平衡点 \mathbf{Q}_2 に収束する初期値の集合 \mathbf{B}_2 は、平衡点 \mathbf{Q}_1 , \mathbf{Q}_3 の吸引領域を分割するので吸引領域の境界 (basin boundary) と呼ばれる。集合 \mathbf{B}_2 は、

$$\mathbf{B}_2 := \left\{ \mathbf{z}_0 \mid \lim_{t \rightarrow \infty} \mathbf{z}(t; \mathbf{z}_0) = \mathbf{Q}_2 \right\} \quad (3.35)$$

と表される。図 3.4 に、集合 \mathbf{B}_1 , \mathbf{B}_2 , \mathbf{B}_3 の領域を示す。 xy 平面上 (ただし、 $x \geq 0, y \geq 0$) のいずれの点を初期値にとった場合でも、微分方程式の解は平衡点 \mathbf{Q}_1 , \mathbf{Q}_2 , \mathbf{Q}_3 のいずれかに収束する。よって、 xy 平面は 3 つの集合 \mathbf{B}_1 , \mathbf{B}_2 , \mathbf{B}_3 に分割される。

(3) 吸引点への到達時間

ベクトル場は、 xy 平面上の流線の形状だけでなく、都市システムの状態が流線の上を移動する速さも決定する。都市システムの状態の動的変化を把握するため、都市システムの状態が xy 平面上の流線を移動する速さについても調べる。

本研究では、微分方程式の解が漸近安定な平衡点 \mathbf{Q}^* に収束するとき、 $\|\mathbf{Q}^* - \mathbf{z}(t)\| \leq 1.0$ となった状態を「微分方程式の解が漸近安定な平衡点 \mathbf{Q}^* に到達した」と定義する。ある初期値 $t = 0$ のときの値) から平衡点 \mathbf{Q}^* に到達するまでに要する時間を平衡点 \mathbf{Q}^* への「到達時間」と定義する。

xy 平面上の各点を初期値としたとき、平衡点 \mathbf{Q}_1 あるいは \mathbf{Q}_3 への到達に要する概ねの時間を調べる。 xy 平面上には平衡点 \mathbf{Q}_2 に到達する点 (集合 \mathbf{B}_2) もあるが、ここでは平衡点 \mathbf{Q}_1 および \mathbf{Q}_3 に到達する場合にのみ着目する。 xy 平面上の $(50m, 50n)$ (ただし、 m および n は正の整数) となる格子点を初期値としたとき、各格子点から平衡点 \mathbf{Q}_1 あるいは \mathbf{Q}_3 への到達時間を求めた。到達する平衡点と到達時間に応じて、各格子点から x 方向、 y 方向にそれぞれ ± 25 の範囲で図 3.5 の凡例に示す通りの色をつけると、各格子点から平衡点 \mathbf{Q}_1 あるいは \mathbf{Q}_3 への到達時間は図 3.5 に示す通りとなる (Wolfram Research Inc., 2015) [8]。図 3.5 から平衡点 \mathbf{Q}_1 および \mathbf{Q}_3 の吸引領域を概ね把握することができる。

表 3.4 に示す 2 つのケースの初期値を与えた場合を例として、横軸に時間、縦軸に各変数の値をとったグラフを作成し、都市システムの状態の動的変化を見ると、図 3.6 のようになる (Wolfram Research Inc., 2015) [8]。ケース I では、 $t = 533.482$ のときに平衡点

Q_3 に到達する．ケース II では， $t = 302.558$ のときに平衡点 Q_1 に到達する．この 2 つのケースを初期値としたときの xy 平面上での解の軌跡を図 3.5 に示す．

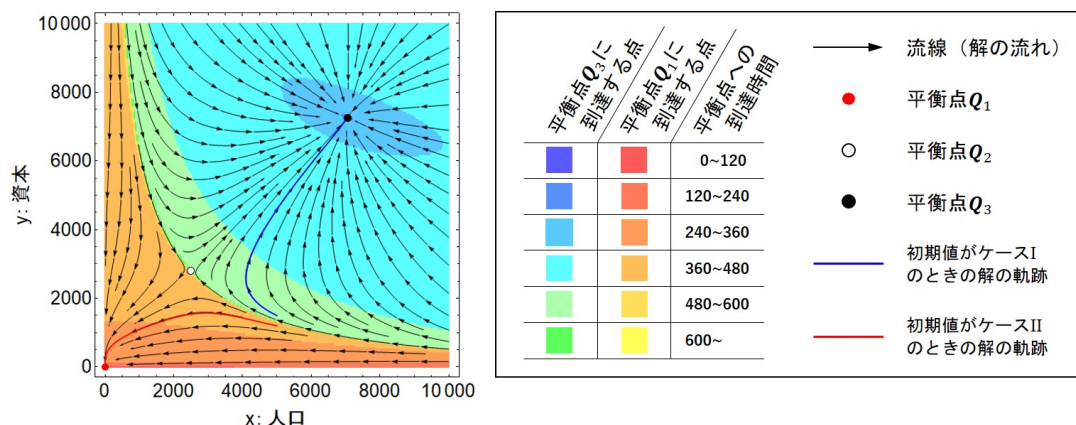


図 3.5: 各点から平衡点 Q_1 , Q_3 への到達時間，吸引領域

表 3.4: 各ケースの初期値の座標

初期値の座標	
ケース I	(5000, 1500)
ケース II	(5000, 1200)

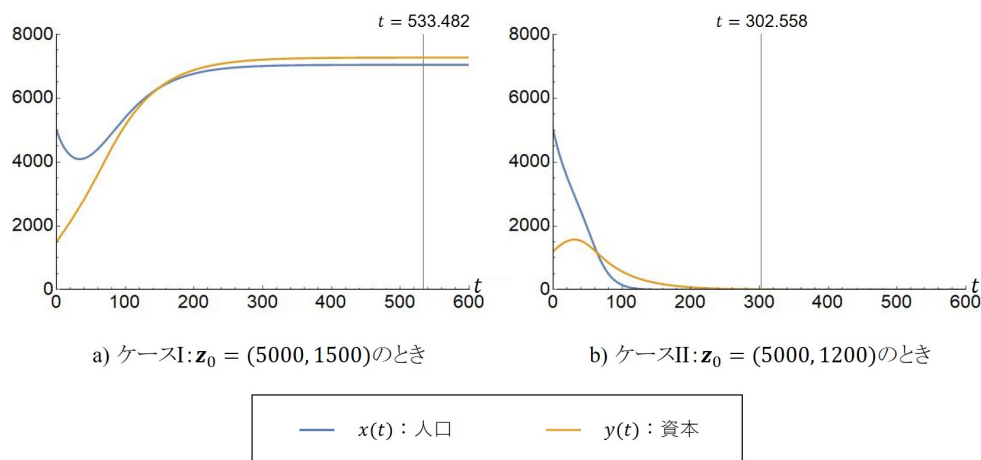


図 3.6: 表 3.4 の各ケースを初期値としたときの都市システムの状態の動的变化

3.3.2 パラメータの変化に伴うベクトル場の変化の分析

式 (3.30) および式 (3.31) のパラメータを変化させると, xy 平面上のベクトル場および流線の様子が変化する. 本節では, パラメータの変化に伴い, xy 平面上のベクトル場および流線の様子がどのように変化するかを把握するため, パラメータの変化に伴う平衡点の位置, 吸引領域の形状, 吸引点への到達時間の変化を分析する. ここでは, 先述の通り, 表 3.2 に示すパラメータの値を基点として, 表 3.1 において可変なパラメータとして定めた α および β , r_x , ρ_x , ρ_y , ω , r_y , ε , k_{max} , k_h , δ をそれぞれ変化させたときの平衡点の位置, 吸引領域の形状, 吸引点への到達時間の変化の様子を調べる.

平衡点の位置の変化については, 各パラメータを変化させたときの平衡点 Q_1 , Q_2 , Q_3 の x 座標および y 座標の位置の変化を分析した (Dhooge et al., 2008) [9]. 分析結果は, 図 3.7~図 3.16 の I) および II) に示す. I) および II) は各パラメータを変化させたときの各平衡点の x 座標および y 座標を表している. 赤の実線が平衡点 Q_1 , 青の破線が平衡点 Q_2 , 青の実線が平衡点 Q_3 の x 座標および y 座標を表す.

吸引領域の形状, 吸引点への到達時間の変化については, 図 3.5 と同様の図を作成することで分析した (Wolfram Research Inc., 2015) [8]. 図 3.7~図 3.16 に, 各パラメータの値が i), ii), iii) (図-15 については i)~vi)) のときの吸引領域および吸引点への到達時間を示す. 図 3.7~図 3.16 の I), II) にも, i), ii), iii) のパラメータの値の位置を示す. 図 3.7~図 3.16 の I), II) における※印は, 表 3.2 に示すパラメータの値と一致するときを示している. パラメータの値が※印のとき, 平衡点の位置, 吸引領域の形状, 吸引点への到達時間は, 図 3.5 に示す状態となる.

パラメータの変化に伴う平衡点の x 座標および y 座標, 吸引領域の形状, 吸引点への到達時間の変化は図 3.7~図 3.16 に示す通りであるが, 特筆すべき点について下記にまとめる.

(1) 平衡点の位置の変化

まず, 各パラメータを変化させたときの平衡点 Q_1 の位置を見ていくと, いずれのパラメータを変化させた場合でも常に原点に位置している. 式 (3.30) および式 (3.31) から, パラメータの値によらず, $f(0,0) = g(0,0) = 0$ が成り立つことは明らかであり, 原点は常に平衡点となる. また, 原点のまわりの線形化行列の固有値を求めると, $-r_x\omega$ および $-\delta$ となる. r_x , ω , δ の定義域は $r_x > 0$, ω , $0 < \delta < 1$ であるため, パラメータの値によらず, 原点のまわりの線形化行列の固有値はすべて負の実数となり, 原点は常に漸近安定な平衡点となる.

次に, 各パラメータを変化させたときの平衡点 Q_2 , Q_3 の位置を見ていく. α および β を変化させたとき, 平衡点 Q_2 , Q_3 の位置はほとんど変化しない.

r_x を変化させたとき, 平衡点 Q_2 , Q_3 の位置は変化しない. これは, 式 (3.30) の構造

上, r_x の値の変化が $f(x, y) = g(x, y) = 0$ の解に影響を与えないためである.

$\rho_x, \rho_y, \omega, \varepsilon, k_h, \delta$ を変化させたとき, 平衡点 Q_2, Q_3 の位置は図 3.9, 図 3.10, 図 3.11, 図 3.13, 図 3.15, 図 3.16 の I), II) のように変化する. これらのパラメータの値を大きくしていくと平衡点 Q_2, Q_3 は接近していき, パラメータの値が「LP」と表記のある赤い点に達したとき, 二つの平衡点は重なって消滅する. パラメータの値がそれ以上大きい領域では, xy 平面上において平衡点 Q_1 が唯一の平衡点となる. このように, パラメータの値の変化に伴い, 安定な平衡点と不安定な平衡点が接近, 衝突し, ともに消滅する現象, あるいは, 逆に安定な平衡点と不安定な平衡点が発生する現象をサドルノード分岐 (saddle-node bifurcation) と呼ぶ. 図 3.9~図 3.16 の I), II) における「LP」の表記は, リミットポイント (Limit Point) の略で, サドルノード分岐の起きる点を意味する (Dhooge et al., 2008) [9].

k_{max} を変化させたときは, 図 3.14 の I), II) に示すように, その値を小さくしていく場合に, サドルノード分岐が起きて, 平衡点 Q_2, Q_3 が消滅する.

r_y を変化させたときは, 図 3.12 の I), II) に示すように, その値を小さくしていく場合でも, 大きくしていく場合でも, サドルノード分岐が起きて, 平衡点 Q_2, Q_3 が消滅する.

図 3.13 および図 3.16 の I) において, ε あるいは δ の値が 0 付近で, 平衡点 Q_3 の x 座標の位置を表す線が途切れている. これは, ε あるいは δ の値を小さくしていくと, 平衡点 Q_3 の y 座標が無限大に発散し, コンピュータによる計算が停止するためである.

(2) 吸引領域の形状および吸引点への到達時間の変化

吸引領域の形状は各パラメータの変化に応じて図 3.7~図 3.16 のように変化する. サドルノード分岐が起きて平衡点 Q_2, Q_3 が消滅する場合, xy 平面上はすべて平衡点 Q_1 の吸引領域となる.

α および β, r_x については, その値を変化させたとき, 平衡点の位置は大きく変化しないが, 図-3.7, 図 3.8 に示すように吸引領域の形状や吸引点への到達時間は変化する.

$\rho_x, \rho_y, \omega, r_y, \varepsilon, k_{max}, k_h, \delta$ については, 図 3.9~図 3.16 に示すように平衡点 Q_3 が存在しているパラメータの範囲において, 平衡点 Q_2, Q_3 の距離が小さくなるほど, xy 平面上において平衡点 Q_3 への到達時間が長くなる領域が広がっていく. 逆に, 平衡点 Q_2, Q_3 の距離が大きくなるほど, 平衡点 Q_3 への到達時間が短くなる領域が広がっていく.

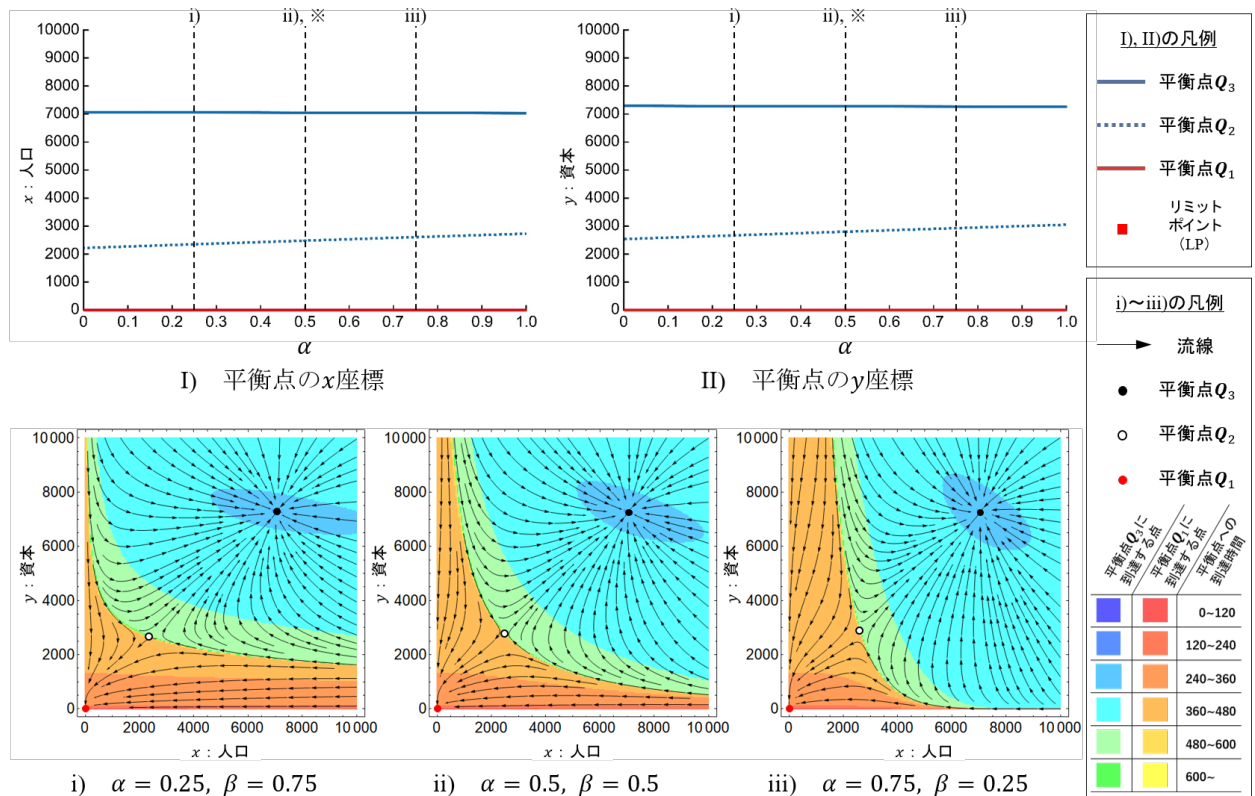


図 3.7: α および β を変化させたとき平衡点の座標，吸引領域，到達時間の変化

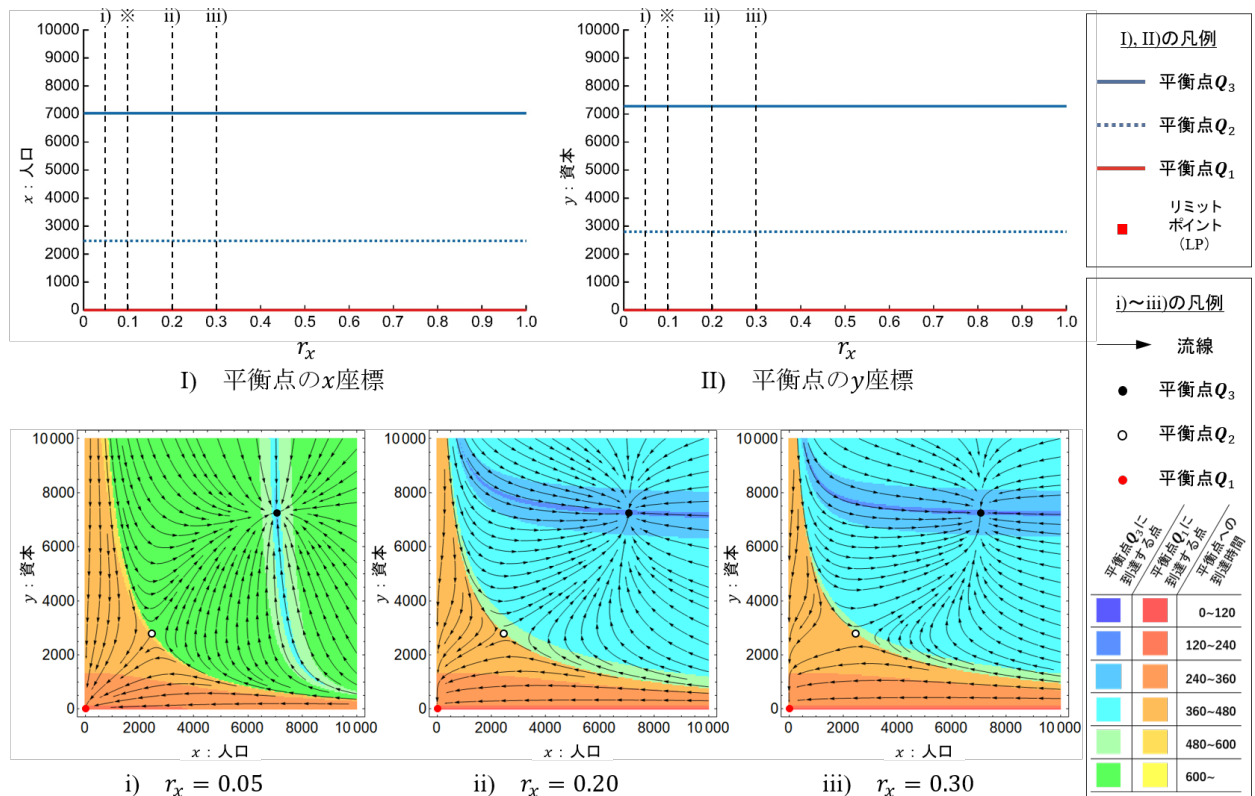


図 3.8: r_x を変化させたとき平衡点の座標, 吸引領域, 到達時間の変化

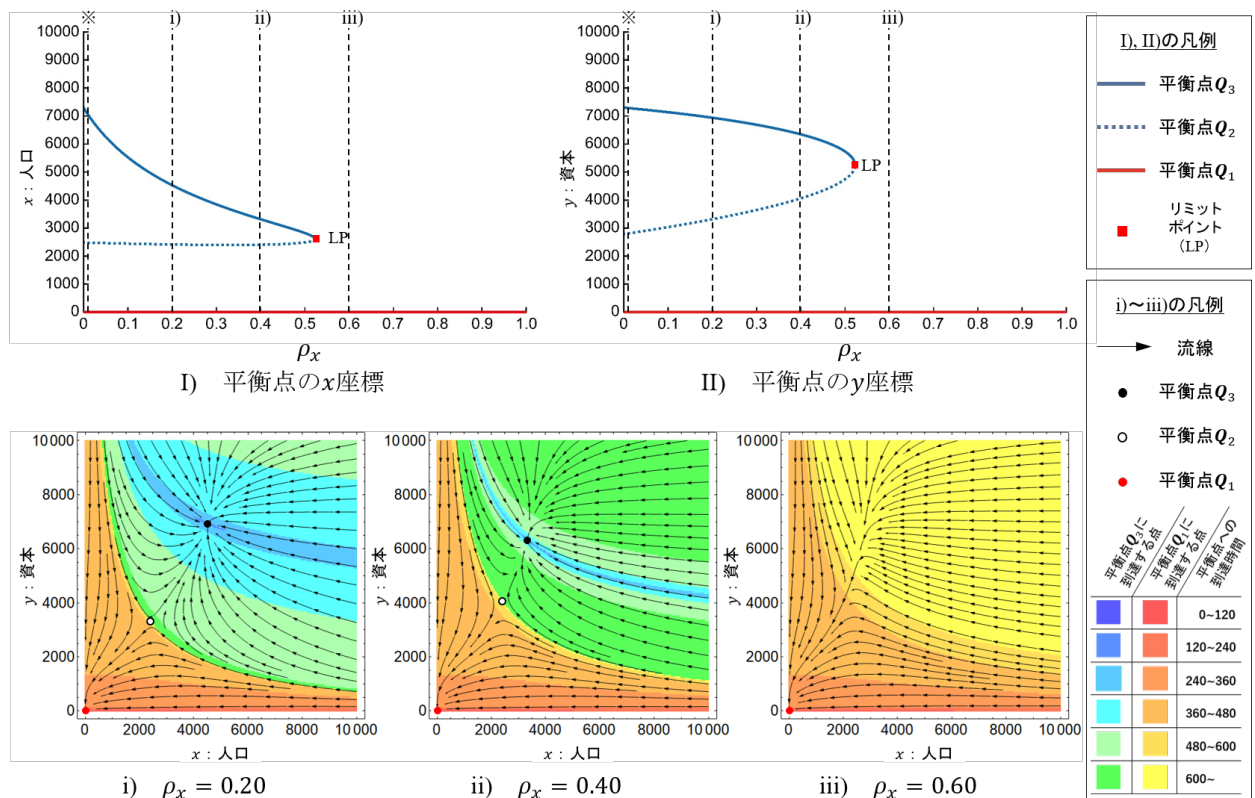


図 3.9: ρ_x を変化させたとき平衡点の座標，吸引領域，到達時間の変化

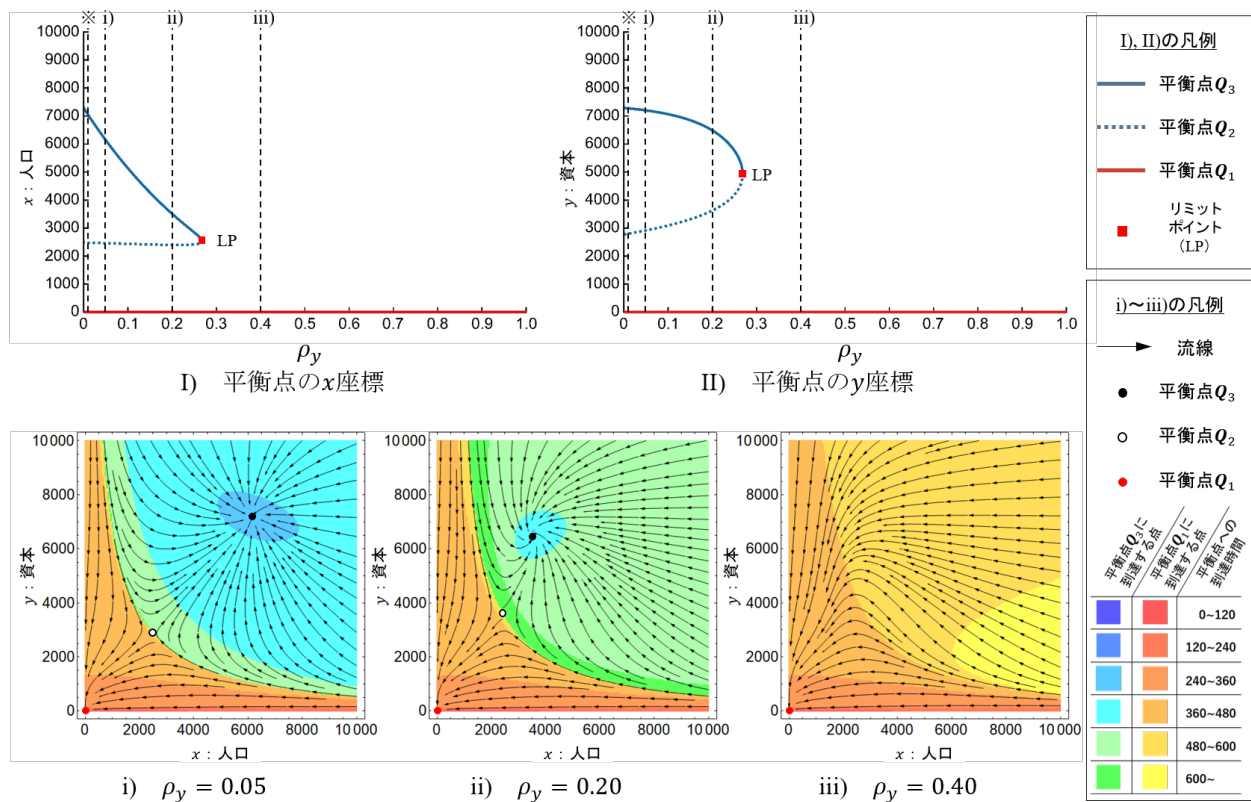


図 3.10: ρ_y を変化させたとき平衡点の座標, 吸引領域, 到達時間の変化

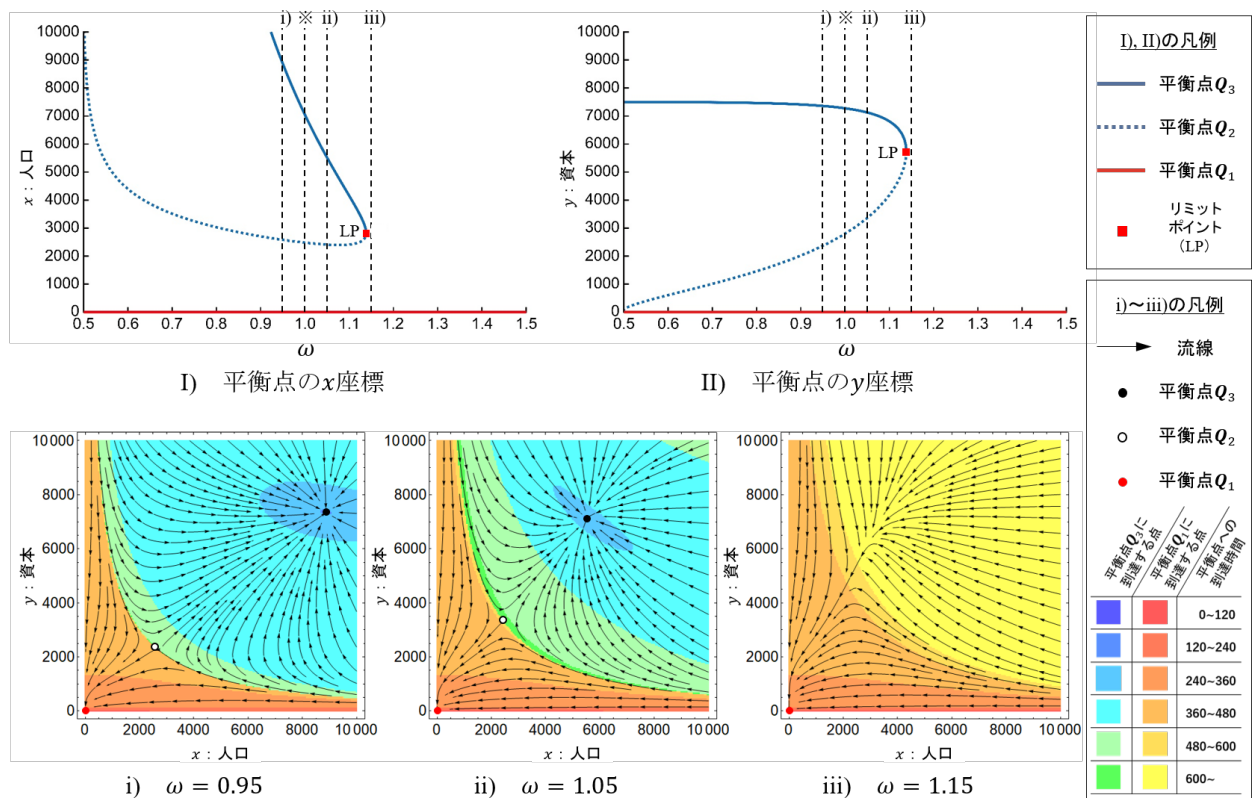


図 3.11: ω を変化させたとき平衡点の座標，吸引領域，到達時間の変化

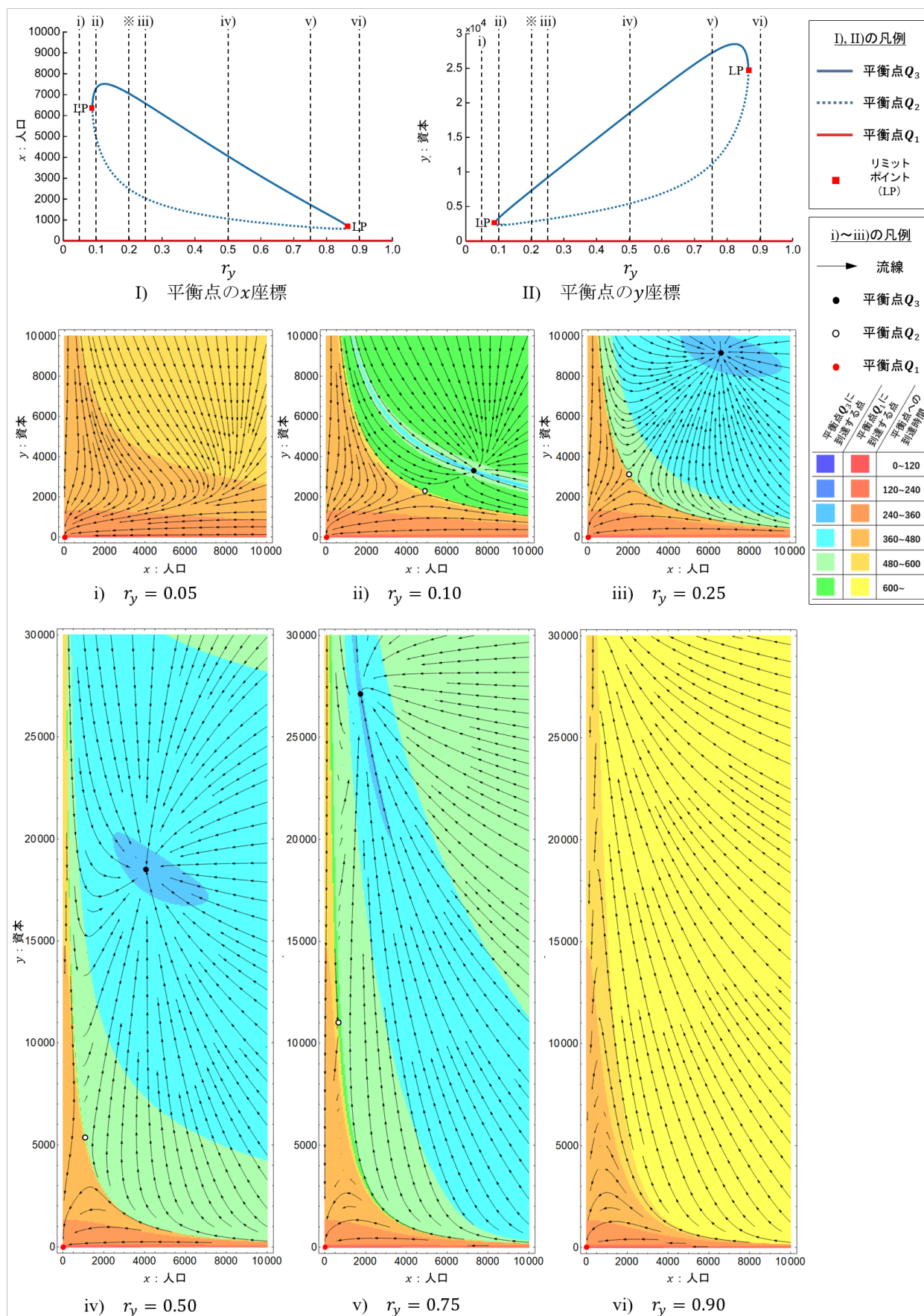


図 3.12: r_y を変化させたとき平衡点の座標, 吸引領域, 到達時間の変化

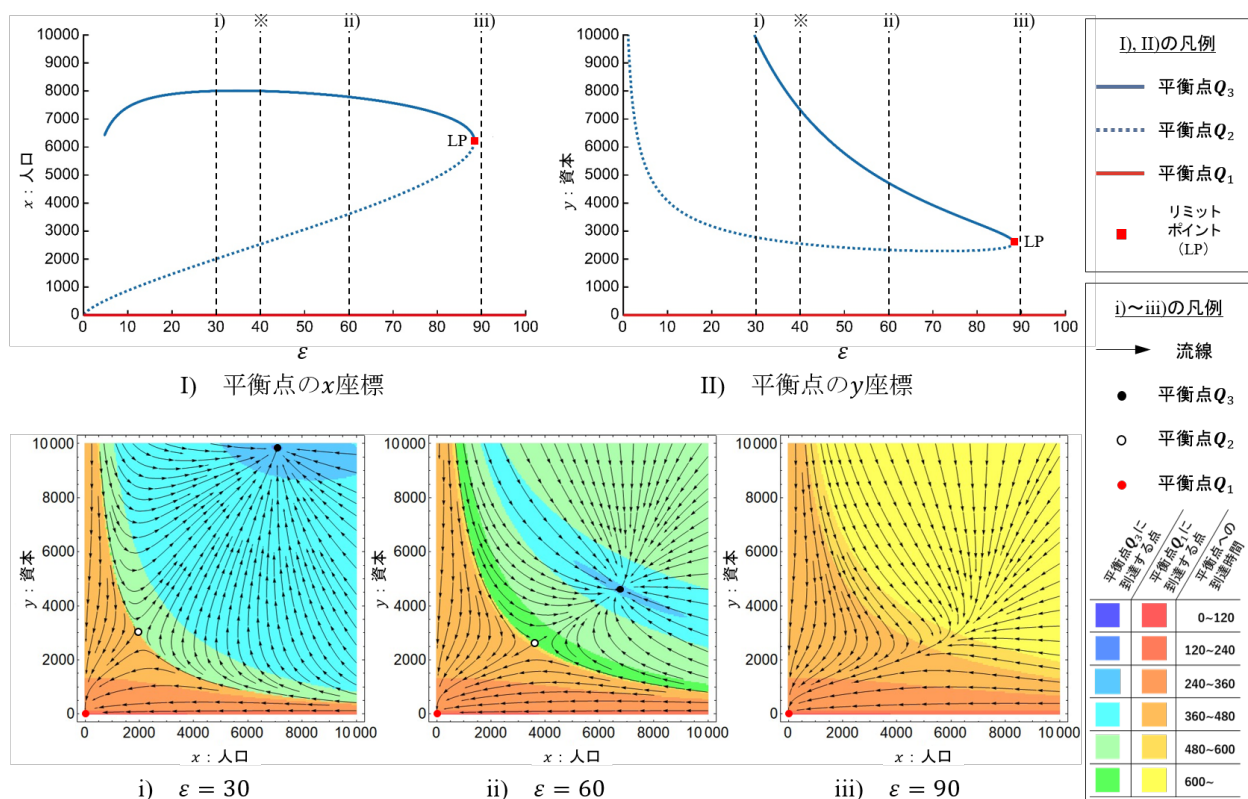


図 3.13: ε を変化させたとき平衡点の座標，吸引領域，到達時間の変化

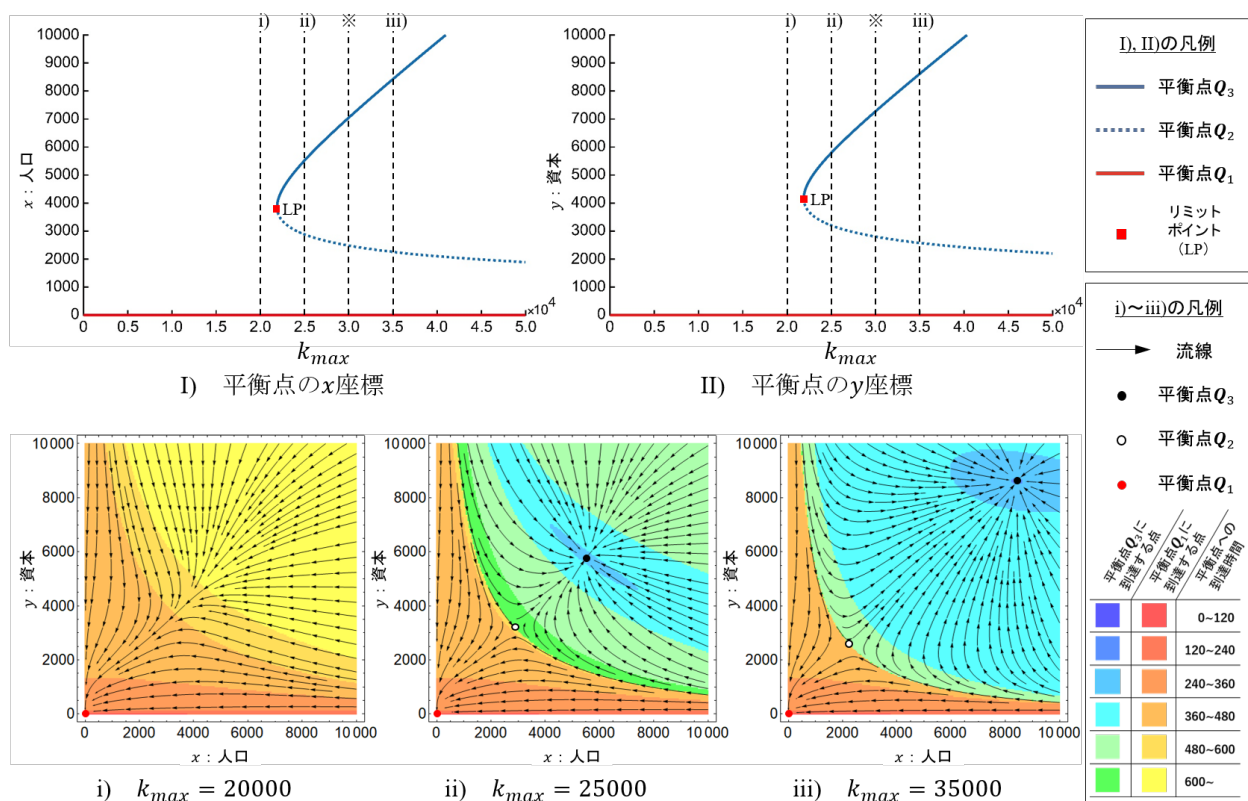


図 3.14: k_{max} を変化させたとき平衡点の座標, 吸引領域, 到達時間の変化

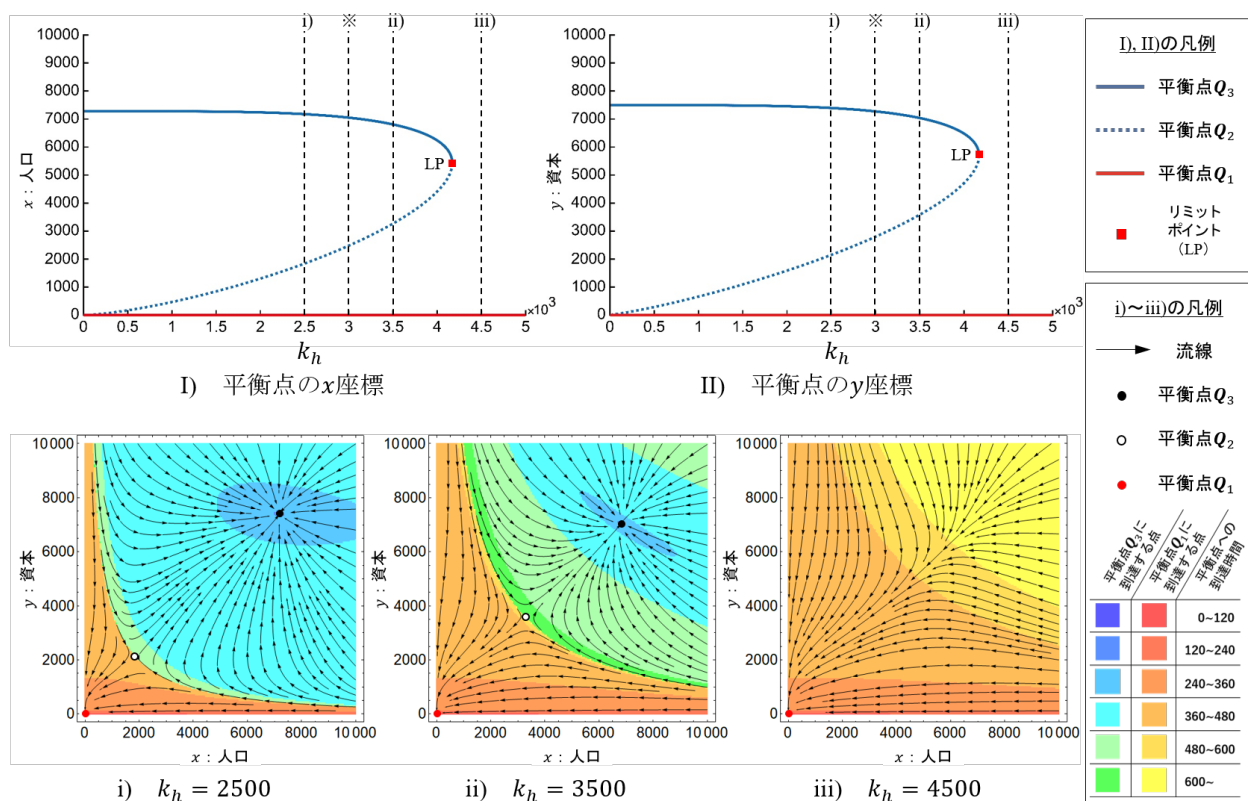


図 3.15: k_h を変化させたとき平衡点の座標，吸引領域，到達時間の変化

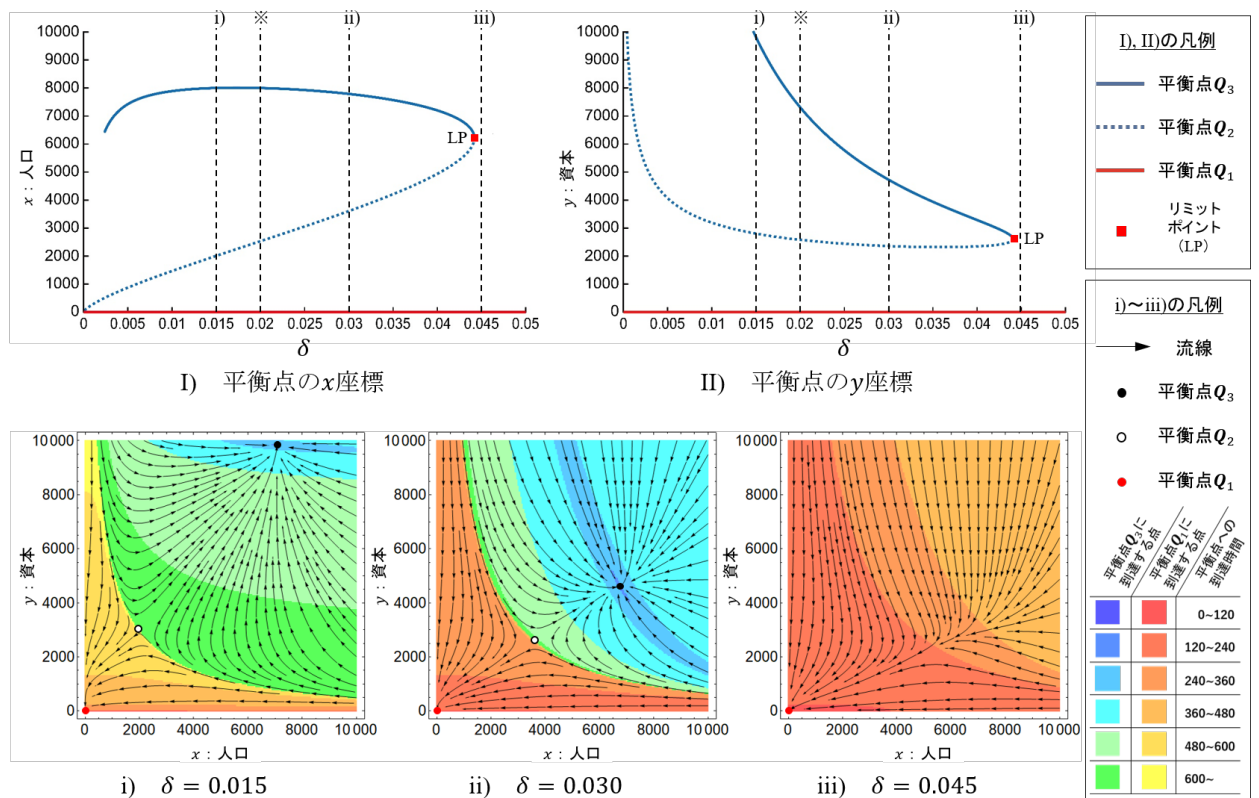


図 3.16: δ を変化させたとき平衡点の座標, 吸引領域, 到達時間の変化

3.4 都市システムの受容力

本章では、まず、3.1 で定義した都市システムの望ましい状態が、微分方程式モデルにおいてどのように表されるかを示す。次に、災害による都市システムへの影響についての前提を説明する。そのうえで、微分方程式モデルによって、都市システムの受容力が説明されることを示す。そして、3.3 の分析結果を基に、都市システムの特徴を表すパラメータの変化がどのように受容力に影響を与えるかを整理する。

3.4.1 微分方程式モデルにおける望ましい状態

微分方程式モデルによって受容力を説明するためには、微分方程式モデルにおいて望ましい状態がどのように表されるかを明確に示す必要がある。

本研究では、3.1 において、都市システムにとって望ましい状態を「都市システムが安定して存続可能な状態であること」と定義した。式 (3.30), (3.31) から成る微分方程式モデルにおいて、この定義による望ましい状態と同等な状態は「都市システムの状態が漸近安定な平衡点 Q_3 にあるとき」である。

3.4.2 都市システムへの被害の影響についての前提

都市システムが災害によって被害を受けたとき、被害の程度に応じて都市システムの状態が変動するものとする。被災直前の都市システムの状態を z_b 、災害の被害による人口および資本への影響を表すベクトルを w とするとき、都市システムの被災直後の状態 z_0 は、

$$z_0 = z_b - w \quad (3.36)$$

と表される。ただし、 $w = (w_x, w_y)$ 、 $w_x \geq 0$ 、 $w_y \geq 0$ であり、 w_x および w_y は、災害の被害による人口 x および資本 y の変動を表す。ここで、災害による人口の変動については、災害によって住宅が損壊し居住不能となった住民は一度都市システムから転出すると仮定を置き、住宅被害による転出と人的被害を合わせた人数を人口の変動とする。資本の変動については、災害により使用不能となった生産設備の分だけ減少するものとする。また、災害による影響によって、パラメータが変動する可能性もあり得る。

3.4.3 微分方程式モデルによる受容力の説明

「都市システムの状態が漸近安定な平衡点 Q_3 にある状態」を望ましい状態とするとき、都市システムの受容力を改めて定義すると、「自然災害による被害を受け容れ、漸近安定な平衡点 Q_3 に到達可能な状態を保持する能力」となる。このとき、都市システムが受容力を有している条件を整理すると、「漸近安定な平衡点 Q_3 が存在していること」が必要条件

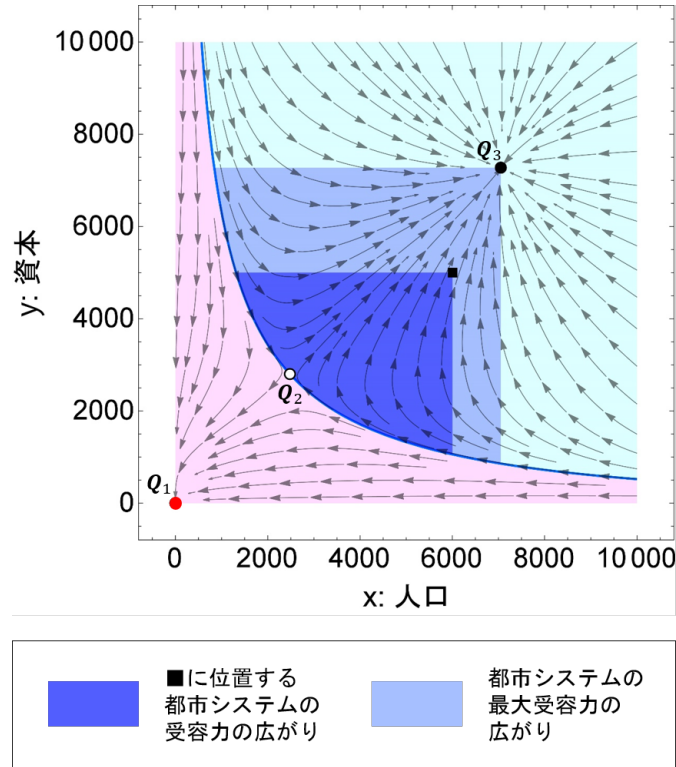


図 3.17: 受容力および最大受容力の広がりイメージ

となり、「都市システムの状態が平衡点 Q_3 の吸引領域に留まっていること」が十分条件となる。

以上の必要条件および十分条件を満たすとき、都市システムの受容力の大きさは、「その被害を受けた場合でも漸近安定な平衡点 Q_3 の吸引領域に留まることができる程度の被害」として表される。受容力の大きさ C を受容可能な被害の程度の集合として表すと、

$$C := \{ w \mid (z - w) \in B_3 \} \quad (3.37)$$

と表される。受容力の大きさは、都市システムの状態 z と吸引領域の境界との相対的な位置関係によって決定される。例として、微分方程式モデルのパラメータが表 3.2, かつ、都市システムの状態が $z = (6000, 5000)$ にあるときの受容力の大きさの広がりを xy 平面上に示すと、図 3.17 のようになる。

漸近安定な平衡点 Q_3 が存在しない場合、あるいは、漸近安定な平衡点 Q_3 は存在しているが都市システムの状態が平衡点 Q_1 の吸引領域にある場合、都市システムは受容力を有していないことになる。この場合、都市システムは平衡点 Q_1 に収束し、消滅する。

都市システムの状態が平衡点 Q_3 の吸引領域内にあるとき、災害による変動がなければ、一定時間経過後に都市システムの状態は平衡点 Q_3 に収束する。本研究では、都市システムの状態が平衡点 Q_3 にあるときの受容力を最大受容力と定義する。最大受容力の大きさ

C_{max} は,

$$C_{max} := \{ w \mid (Q_3 - w) \in B_3 \} \quad (3.38)$$

と表される．最大受容力の大きさは，平衡点 Q_3 と吸引領域の境界との相対的な位置関係によって決定される．例として，微分方程式モデルのパラメータが表 3.2 のときの最大受容力の大きさの広がりを図 3.17 に示す．

都市システムの状態が平衡点 Q_3 の吸引領域内にあるが，災害等の影響によって受容力が最大受容力よりも小さいとき ($C \subset C_{max}$ のとき)，平衡点 Q_3 への到達時間も重要となる．都市システムの受容力が小さいほど，災害の影響によって受容力を失い，消滅する危険性は高まる．平衡点 Q_3 への到達時間が短いほど，受容力が最大受容力まで高まるのに要する時間も短くなり，被災によって都市システムが回復できなくなる危険性を低下させることができる．最大受容力が同じ場合は，平衡点 Q_3 への到達時間が短い都市システムの方が，災害に対して安全であると言える．

3.4.4 パラメータの変化が都市システムの受容力に与える影響

本節では，都市システムの特徴を表すパラメータと受容力の大きさとの定性的な関係構造を明らかにする．都市システムが受容力を有するとき，その受容力は一定時間経過後には最大受容力に帰着するため，ここでは最大受容力に焦点を当てる．3.3 の分析結果（図 3.7～図 3.16）を基に，表 3.1 のうち可変と定めたパラメータをそれぞれ変化させたときの最大受容力への影響について整理した．その結果は表 3.5 に示す通りであるが，特筆すべき点について下記にまとめる．

$\rho_x, \rho_y, \omega, k_h$ については，その値が低い方が人口 x ，資本 y 両方の変動に対して最大受容力が高まるため，受容力の観点からは，これらのパラメータの値が低いことが望ましい．

ε, δ は，一定の値まではその値が低い方が人口 x ，資本 y 両方の変動に対して最大受容力が高まるため，受容力の観点からは，これらのパラメータの値が一定の範囲で低いことが望ましい．

k_{max} については，その値が高い方が人口 x ，資本 y 両方の変動に対して最大受容力が高まるため，受容力の観点からは， k_{max} の値が高いことが望ましい．

α および β, r_x, r_y については，その値を変化させると，人口 x あるいは資本 y の一方の変動に対しては最大受容力が高まるが，もう一方の変動に対しては最大受容力が低まる．これらのパラメータの値の大小については，受容力の観点からどちらが望ましいとは言えない．

表 3.5: 都市システムの特徴を表すパラメータの変化が最大受容力に与える影響

パラメータとその説明		パラメータの値が小さくなることによる 最大受容力への影響	パラメータの値が大きくなることによる 最大受容力への影響
ρ_x	人口密度の居住環境への負の影響の程度	<ul style="list-style-type: none"> ● 人口x, 資本y両方の変動に対して最大受容力が高まっていく。 	<ul style="list-style-type: none"> ● 人口x, 資本y両方の変動に対して最大受容力が低まっていく。 ● サドルノード分岐が起きた時点で受容力は失われる。
ρ_y	資本の密度の居住環境への負の影響の程度		
ω	外部システムの吸引力		
k_h	生産が上限値の半分となる ときの生産要素投入量		
ε	資本1単位当たりのコスト	<ul style="list-style-type: none"> ● 一定の値までは人口x, 資本y両方の変動に対する最大受容力が高まる。 ● パラメータの値が一定以上小さくなると、平衡点Q_3のx座標が減少に転じるため、人口xの変動に対して最大受容力が低まっていく。 	<ul style="list-style-type: none"> ● 人口x, 資本y両方の変動に対して最大受容力が低まっていく。 ● サドルノード分岐が起きた時点で受容力は失われる。
δ	単位時間当たりの資本の減耗率		
k_{max}	都市システムの産業における生産の上限値	<ul style="list-style-type: none"> ● 人口x, 資本y両方の変動に対して最大受容力が低まっていく。 ● サドルノード分岐が起きた時点で受容力は失われる。 	<ul style="list-style-type: none"> ● 人口x, 資本y両方の変動に対して最大受容力が高まっていく。
α	生産における労働の寄与の程度	<ul style="list-style-type: none"> ● 人口xの変動に対する最大受容力が高まるが、資本yの変動に対する最大受容力は低まる。 	<ul style="list-style-type: none"> ● 人口xの変動に対する最大受容力が低まるが、資本yの変動に対する最大受容力は高まる。
r_x	吸引力の差に応じた人口の転出入速度	<ul style="list-style-type: none"> ● 人口xの変動に対する最大受容力が低まるが、資本yの変動に対する最大受容力は高まる。 	<ul style="list-style-type: none"> ● 人口xの変動に対する最大受容力が高まるが、資本yの変動に対する最大受容力は低まる。
β	生産における資本の寄与の程度		
r_y	生産における資本への投資の割合	<ul style="list-style-type: none"> ● 人口xの変動に対する最大受容力が高まるが、資本yの変動に対する最大受容力は低まる。 ● r_yの値がリミットポイント付近になると、人口x, 資本y両方の変動に対して最大受容力が低まっていく。 ● サドルノード分岐が起きた時点で受容力は失われる。 	<ul style="list-style-type: none"> ● 人口xの変動に対する最大受容力が低まるが、資本yの変動に対する最大受容力は高まる。 ● r_yの値がリミットポイント付近になると、人口x, 資本y両方の変動に対して最大受容力が低まっていく。 ● サドルノード分岐が起きた時点で受容力は失われる。

3.5 都市システムの受容力の制御の可能性

都市システムの特徴にかかわるパラメータを操作することができれば都市システムの受容力を制御することが可能となる。ここでは、3.4 までの分析結果を基に、「平時（被災前）における制御」と「被災直後における制御」の視点から、都市システムの受容力の制御の可能性について検討する。

3.5.1 平時（被災前）における受容力の制御

平時（被災前）における受容力の制御の可能性については、「都市システム内部のパラメータの操作」と「外部システムのパラメータの操作」に分けて検討する。

(1) 都市システム内部のパラメータの操作

表 3.1 のうち、 α および β , r_x , ρ_x , ρ_y , r_y , ε , k_{max} , k_h , δ は、都市システム内部にかかわるパラメータである。これらのパラメータのうち、操作可能なパラメータを、可能な範囲で操作することによって、平時（被災前）において都市システムの受容力の維持あるいは拡大を図ることができる。

例えば、人口および資本の密度の居住環境への負の影響の程度 ρ_x および ρ_y については、土地利用の工夫等によって、 ρ_x および ρ_y の値が高まることを防止あるいは低減することができれば、都市システムの最大受容力を維持あるいは拡大することが可能となる。

また、都市システムの生産の上限値 k_{max} については、新規産業の創出等によって、 k_{max} の値を大きくすることができれば、都市システムの最大受容力を拡大することが可能となる。

(2) 外部システムのパラメータの操作

表 3.1 のうち、外部システムの吸引力 ω は外部システムにかかわるパラメータである。外部システムへの人口や産業の集積により ω が高まることで、都市システムの受容力が低下するおそれがある。広域的な土地利用管理等によって外部システムへの人口や産業の過度な集積を抑制し、 ω の値が高まることを防ぐことができれば、都市システムの受容力の低下を防止することが可能となる。

都市システムの受容力を制御する上では、都市システム内部だけでなく、対象とする都市システムに影響のある外部システムにも注意を払っておく必要があり、広域的な視点も求められる。

3.5.2 被災直後における受容力の制御の視点

被災直後における受容力の制御によって，都市システムが望ましくない状態に陥ることを防止できる可能性がある．

ここでは，生産における資本への投資の割合 r_y の操作による受容力の制御の可能性を示す．災害の影響を受けて，パラメータの値が表 3.2 の都市システムの状態が，図 3.18 のように，平衡点 Q_1 の吸引領域まで変動した場合を想定する．このとき， r_y が即時に操作可能なパラメータであるとする， r_y の値を $r_y = 0.20$ から $r_y = 0.75$ まで上昇させれば，平衡点 Q_3 の吸引領域は図 3.18 中の破線の領域まで拡大し，都市システムの状態は再び平衡点 Q_3 の吸引領域に入ることになる．都市システムの状態が， $r_y = 0.20$ の吸引領域に戻った後で， r_y の値を $r_y = 0.20$ に戻せば，都市システムは元の状態に戻ることができる．

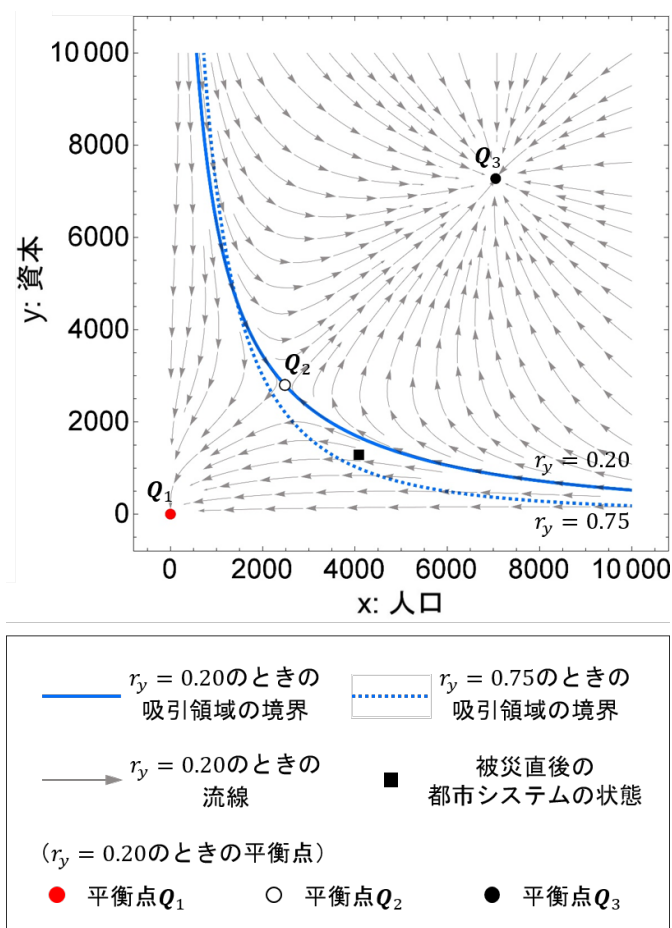


図 3.18: r_y の操作による受容力の制御のイメージ

3.6 まとめ

本章では、「受容力としての再構築力」について、その構造を明らかにするため、まず、人口と資本を変数として、都市システムの状態の動的変化を記述する微分方程式モデルを構築した。次に、受容力が漸近安定な平衡点の吸引領域によって表されることを示した上で、都市システムの特徴が受容力に与える影響について、その構造を明らかにした。

こうして明らかにした内容を基に、都市システムの受容力を制御する上での視点を図 3.19 のように整理し、それぞれの視点から受容力の制御の可能性について検討した。受容力を制御する上では、平時においては都市システム内部のパラメータだけでなく、外部システムの状態も考慮する必要があることが明らかとなった。また、被災直後に都市システムのパラメータを操作して、都市システムの受容力を一時的に高めることで、望ましくない状態に陥ることを防ぐ対策の可能性についても明らかとなった。

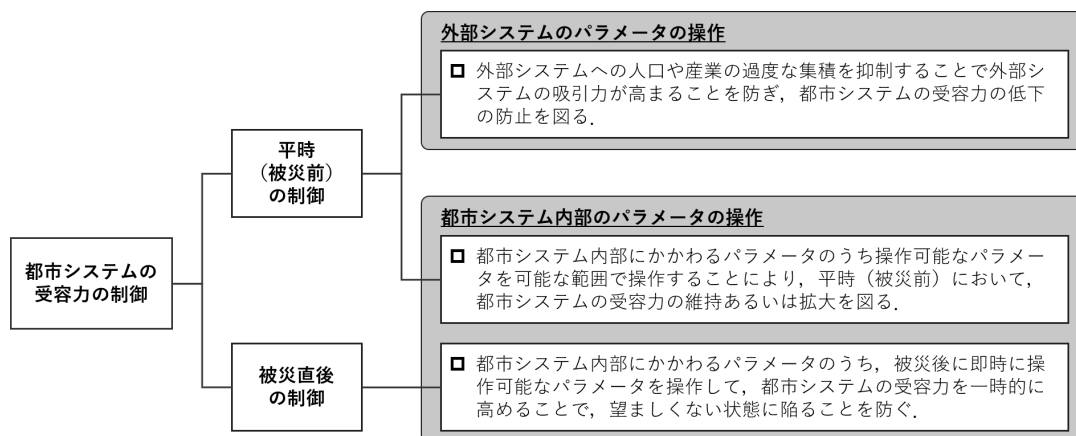


図 3.19: 都市システムの受容力の制御

参考文献

- [1] K.M. de Bruijn. Resilience and flood risk management. *Water Policy*, Vol. 6, No. 1, pp. 53–66, 2004.
- [2] Marjolein J.P. Mens, Frans Klijn, Karin M. de Bruijn, and Eelco van Beek. The meaning of system robustness for flood risk management. *Environmental Science and Policy*, Vol. 14, No. 8, pp. 1121 – 1131, 2011.
- [3] Robert M. Solow. A contribution to the theory of economic growth. *The Quarterly Journal of Economics*, Vol. 70, No. 1, pp. 65–94, 1956.
- [4] D. Lacitignola, I. Petrosillo, M. Cataldi, and G. Zurlini. Modelling socio-ecological tourism-based systems for sustainability. *Ecological Modelling*, Vol. 206, No. 1, pp. 191 – 204, 2007.
- [5] V. Capasso, R. Engbers, and D. La Torre. On a spatial solow model with technological diffusion and nonconcave production function. *Nonlinear Analysis: Real World Applications*, Vol. 11, No. 5, pp. 3858 – 3876, 2010.
- [6] 桑村雅隆. パターン形成と分岐理論－自発的パターン発生の力学系入門－. 共立出版, 2015.
- [7] M. W. Hirsch, S. Smale, and R. L. Devaney. 力学系入門－微分方程式からカオスまで－. 共立出版.
- [8] Wolfram Research Inc. Mathematica 10.3, 2015.
- [9] A. Dhooge, W. Govaerts, Iouri Aleksandrovitsj Kouznetsov, Hil Gatan Ellart Meijer, and B. Sautois. New features of the software matcont for bifurcation analysis of dynamical systems. Vol. 14, No. 1/2, pp. 147–175, 2008. 10.1080/13873950701742754.

第 4 章

都市システムの適応力の構造の解明 と災害による影響

4.1 はじめに

都市システムの適応力としての再構築力については，Norris et al. (2008) [1]，塩崎ら (2015) [2] が，都市システムの置かれている環境が変化している状況下で被災した場合に都市システムに求められる能力として，適応力としての再構築力の概念を提示している．第 1 章において，これらの先行研究を基に，都市システムの適応力としての再構築力を「都市システムが置かれている社会・経済的環境が変化している場合，被災した都市システムが，環境変化にも適応した望ましい状態へと自身を再構築する能力」と定義した．しかし，先行研究では，環境変化が都市システムにもたらす影響や，環境変化に対して適応力に求められる要件，適応力に影響を与える要因については示されていない．

本章では，社会・経済的環境の変化を，都市システムにおける産業の衰退とした上で，産業の衰退に対する都市システムの適応に影響を与える要因，ならびに，災害が都市システムの適応に与える影響について明らかにすることを目的とする．都市システムにとって望ましい状態は，第 3 章と同じく，「都市システムが安定して存続可能な状態であること」と定義する．

本章の構成は次の通りである．まず，第 3 章で構築した基本都市モデルを基に，産業の衰退を組み込んだ都市システムモデルを構築し，産業の衰退が都市システムの状態に及ぼす影響を明らかにする．次に，都市システムが産業の衰退に適応するための必要条件を整理する．そのうえで，基本都市モデルを基に環境変化への適応を組み込んだモデルを構築し，適応の可否に影響を与える要因を明らかにする．最後に，災害が都市システムの適応に与える影響についても分析する．

4.2 産業の衰退による影響

本節では、基本都市モデルを基に、産業の衰退を組み込んだ都市システムモデルを構築し、産業の衰退が都市システムの状態に及ぼす影響について分析する。

ここでは、都市システムの産業の衰退を、基本都市モデルの「産業における生産の上限値 k_{max} 」の減少として表すものとする。このような産業の衰退の事例としては、エネルギー革命時の石炭産業の衰退が考えられる。エネルギー革命によって石炭の価格が下落していく状況では、従来と同等の労働人口と生産設備を投入し、従来と同量の石炭を生産したとしても、従来と同等の利益を上げることはできず、石炭産業を基幹産業とする都市システムでは石炭価格の下落に伴い生産量は減少していくこととなる。

また、産業の衰退という社会・経済的環境の変化は、この都市システムと比べて十分に大きい規模の社会・経済的環境によって決定されていると仮定する。つまり、この都市システムの動向が、生産の上限値 k_{max} が減少していく趨勢に影響を与えることはないものとする。

4.2.1 産業の衰退を組み込んだ都市システムモデルの構築

都市システムの産業の衰退を生産の上限値の減少として表現するものとし、第3章で構築した基本都市モデルを基に、産業衰退下における都市システムの状態の動的変化を表す微分方程式モデルを構築する。

ここでは、都市システムの産業における生産の上限値を変数 $k(t)$ と表し、 $k(t)$ は単位時間当たり一定の割合 r_k で減少していき、最終的には0になると仮定する。このとき、単位時間当たりの $k(t)$ の変動は、

$$\frac{dk}{dt} = -r_k k(t) \quad (4.1)$$

と表される。この微分方程式 (4.1) を解くと、

$$k(t) = k(0)e^{-r_k t} \quad (4.2)$$

が得られる。 $k(0)$ は、 $k(t)$ の初期値 ($t = 0$ のときの $k(t)$ の値) である。

基本都市モデルと上記の式 (4.1) および (4.2) を基に、産業衰退下における都市システムの状態の動的変化を下記の式 (4.3) ~ (4.13) によって表す。

$$\frac{dx}{dt} = r_x(A(x, y, k) - \omega)x \quad (4.3)$$

$$\frac{dy}{dt} = \frac{r_y F(x, y, k)}{\varepsilon} - \delta y \quad (4.4)$$

$$k(t) = k(0)e^{-r_k t} \quad (4.5)$$

$$\text{where } A(x, y, k) = a_I(x, y, k) + a_S(x) + a_C(x, y) \quad (4.6)$$

$$a_I = \mu_I \frac{I(x, y, k)}{I(x, y, k) + \varphi_I} \quad (4.7)$$

$$a_S = \mu_S \frac{S(x)}{S(x) + \varphi_S} \quad (4.8)$$

$$a_C = -C(x, y) \quad (4.9)$$

$$I(x, y, k) = \frac{(1 - r_y)F(x, y, k)}{x + 1} \quad (4.10)$$

$$S(x) = \log_{10}(x + 1) \quad (4.11)$$

$$C(x, y) = \rho_x \frac{x}{\sigma} + \rho_y \frac{y}{\sigma} \quad (4.12)$$

$$F(x, y, k) = k(t) \frac{(x^\alpha y^\beta)^\gamma}{(x^\alpha y^\beta)^\gamma + k_h^\gamma} \quad (4.13)$$

$$(4.14)$$

本研究では、(4.3) ～ (4.13) から成るモデルを「産業衰退モデル」と呼ぶこととする。産業衰退モデルを基本都市モデルと比較すると、産業における生産の上限値 k_{max} が変数 $k(t)$ に置き換えられている点以外は同じである。産業衰退モデルにおいて、 $r_k = 0$ と設定すると、基本都市モデルと等しくなる。

表 4.1: 産業衰退モデルにおける関数

関数	説明
$A(x, y, k)$	都市システムの吸引力
$a_I(x, y, k)$	一人当たり所得に起因する吸引力
$a_S(x)$	生活サービスに起因する吸引力
$a_C(x, y)$	過密度に起因する吸引力
$I(x, y, k)$	一人当たり所得
$S(x)$	生活サービス
$C(x, y)$	過密度
$F(x, y, k)$	産業の生産量（生産関数）

表 4.2: 産業衰退モデルにおけるパラメータ

パラメータ	説明	値あるいは定義域
α	生産における労働の寄与の程度	$\alpha > 0, \alpha + \beta = 1$
β	生産における資本の寄与の程度	$\beta > 0, \alpha + \beta = 1$
γ	生産関数の曲線の形状を決定するパラメータ	$\gamma = 4$
r_x	吸引力の差に応じた人口の転出入速度	$r_x > 0$
μ_I	一人当たり所得に起因する吸引力の上限値	$\mu_I = 1$
φ_I	一人当たり所得に起因する吸引力が上限値の半分となるときの一人当たり所得の水準	$\varphi_I = 3$
μ_S	生活サービスに起因する吸引力の上限値	$\mu_S = 1$
φ_S	生活サービスに起因する吸引力が上限値の半分となるときの生活サービスの水準	$\varphi_S = 4$
ρ_x	人口密度の居住環境への負の影響の程度	$\rho_x > 0$
ρ_y	資本の密度の居住環境への負の影響の程度	$\rho_y > 0$
σ	都市システムの空間的な広がり	σ
ω	外部システムの吸引力	$\omega > 0$
r_y	生産のうち資本への投資の割合	$0 \leq r_y \leq 1$
ε	資本（生産設備）1 単位当りのコスト	$\varepsilon > 0$
k_h	生産が上限値の半分となるときの生産要素投入量	$k_h \geq 0$
δ	単位時間当たりの資本の減耗率	$0 < \delta < 1$
r_k	単位時間当たりの生産の上限値の減少率	$0 \leq r_k \leq 1$

4.2.2 産業の衰退による影響

産業衰退モデルを用いて、産業の衰退が都市システムの状態に及ぼす影響を分析する。ここでは、産業における生産の上限値 $k(t)$ が単位時間当たりに減少する割合 r_k について、(a) $r_k = 0.001$, (b) $r_k = 0.003$, (c) $r_k = 0.005$ の 3 つのケースを設定して、都市システムの状態の動的変化を分析する。 r_k 以外のパラメータは、表 4.3 の通り設定する。

先述の通り、産業衰退モデルにおいて $r_k = 0$ とすると、産業衰退モデルは基本都市モデルと同じ構造となる。さらに、 $k(0) = 30000$ とすると、産業衰退モデルによって xy 平面上に定義される流線は、図 3.4 と等しくなり、表 3.3 と同じ平衡点が得られる。

ここでは、当初、 xy 平面上の流線は図 3.4 と等しく、都市システムの状態は表 3.3 における平衡点 Q_3 にあるものとする。 $t = 0$ のときに産業の衰退がはじまり、その後の都市システムの状態の動的変化は産業衰退モデルによって記述されるものとする。各変数の

初期値を, $x(0) = 7049.2$, $y(0) = 7278.0$, $k(0) = 30000$, r_k の値を, (a) $r_k = 0.001$, (b) $r_k = 0.003$, (c) $r_k = 0.005$ としたとき, 生産の上限値 $k(t)$ および都市システムの状態 $(x(t), y(t))$ の動的变化は, 図 4.1 および図 4.2 の通りとなる. 産業が衰退する速度, つまり r_k の値が大きくなるほど, 都市システムの人口および資本が減少する速度も速くなる.

表 4.3: パラメータの設定

パラメータ	値	パラメータ	値	パラメータ	値
α	0.5	μ_S	1	r_y	0.2
β	0.5	φ_S	4	ε	40
γ	4	ρ_x	0.01	k_h	3000
r_x	0.1	ρ_y	0.01	δ	0.02
μ_I	1	σ	10000		
φ_I	3	ω	1		

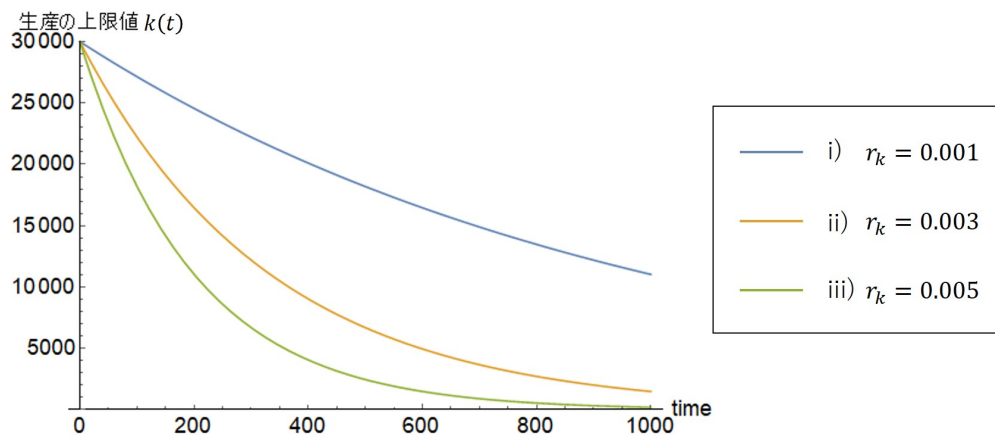
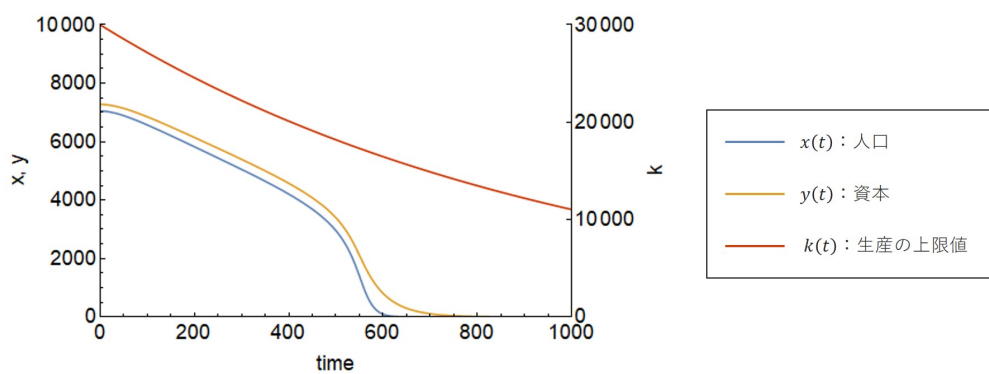
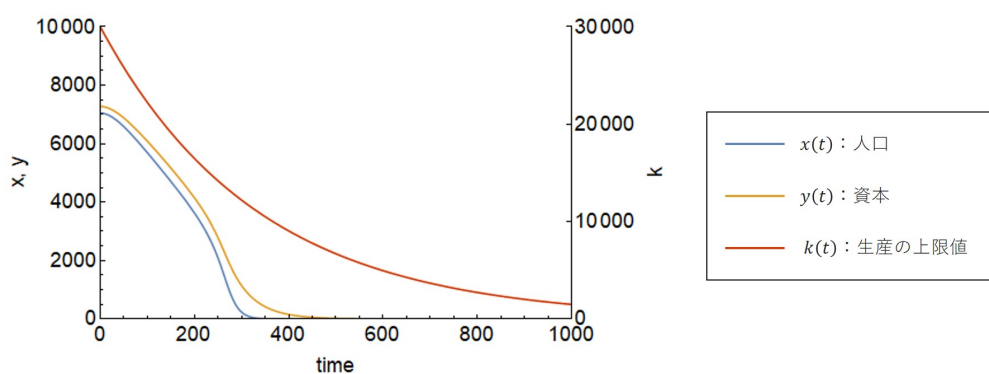


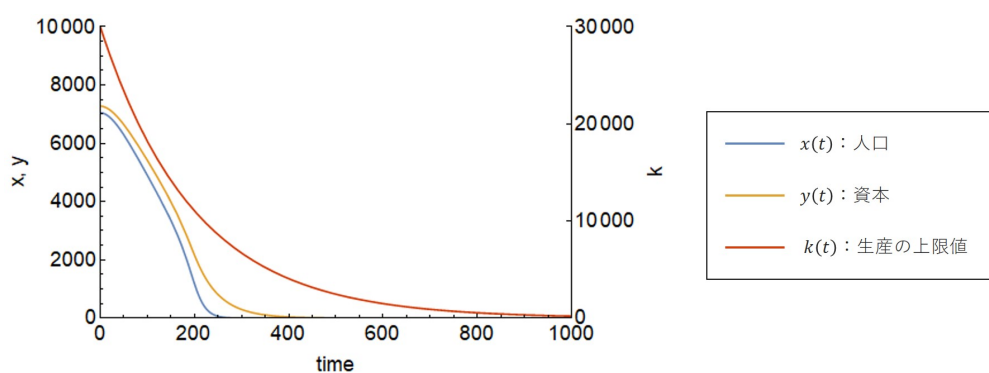
図 4.1: 各ケースにおける生産の上限値の変化



(a) $r_k = 0.001$ のとき



(b) $r_k = 0.003$ のとき



(c) $r_k = 0.005$ のとき

図 4.2: 生産の上限値 $k(t)$ の減少に伴う都市システムの状態の変化

4.3 産業の衰退に対する適応力の構造の分析

本節では、産業の衰退に対して都市システムが適応するための必要条件について整理した上で、産業の衰退への適応を組み込んだ都市システムモデルを構築する。このモデルを用いて、適応の可否に影響を与える要因を分析する。

4.3.1 産業衰退に対する適応の必要条件の整理

産業の衰退が都市システムにおける生産の上限値 k_{max} の減少として表現されると仮定するとき、基本都市モデルおよび産業衰退モデルによる分析結果を基に、産業の衰退に対して都市システムが存続可能であるための必要条件について整理する。

第一の条件としては、十分な規模の「生産の上限値」を持つ新規産業を創出可能であることである。産業の衰退によって既存の産業における生産の上限値が一定の値を下回ると、第3章で示したように都市システムが安定して存続可能となる吸引点（漸近安定な平衡点）が消滅する。産業衰退モデルで仮定しているように、既存産業における生産の上限値が一定の割合で減少していく場合、都市システムはその状態を表す相空間上に都市が安定して存続可能となる吸引点が存在する程度の「生産の上限値」を持つ新規産業を創出する必要がある。

第二の条件としては、都市システムの産業における資本（生産設備）を、既存産業の資本から新規産業の資本に転換することである。都市が十分な規模の生産の上限値を有する新規産業を有していたとしても、さらに新規産業に必要な生産設備を備えている必要がある。

第三の条件としては、労働人口を既存産業から新規産業に転換することである。新規産業における生産に必要な生産設備に加えて、既存産業に従事する労働人口が新規産業における業務に適応し、新規産業の労働人口に転換していく必要がある。

4.3.2 産業衰退への適応を組み込んだ都市システムモデルの構築

以上に整理した、産業の衰退に適応するための3つの必要条件を都市システムが満たしている場合でも、適応の成否は、適応を開始する時点の都市システムの状態、産業の衰退速度や新規産業の生産性等の要因に影響され则认为られる。

適応の成否に影響を与える要因を分析するため、産業衰退モデルを基に、産業衰退への適応を組み込んだ都市システムモデルを構築する。このモデルを「産業適応モデル」とする。

産業適応モデルにおける都市システムの状態は、人口 $x(t)$ 、既存産業の資本 $y_1(t)$ 、新規産業の資本 $y_2(t)$ 、既存産業における生産の上限値 $k_1(t)$ の4つの変数によって表されるものとする。産業適応モデルの構造は図4.3に示す通りである。基本的には、基本都市モデルと同じ構造であるが、異なる点としては、既存産業の生産の上限値が減少していく点、新

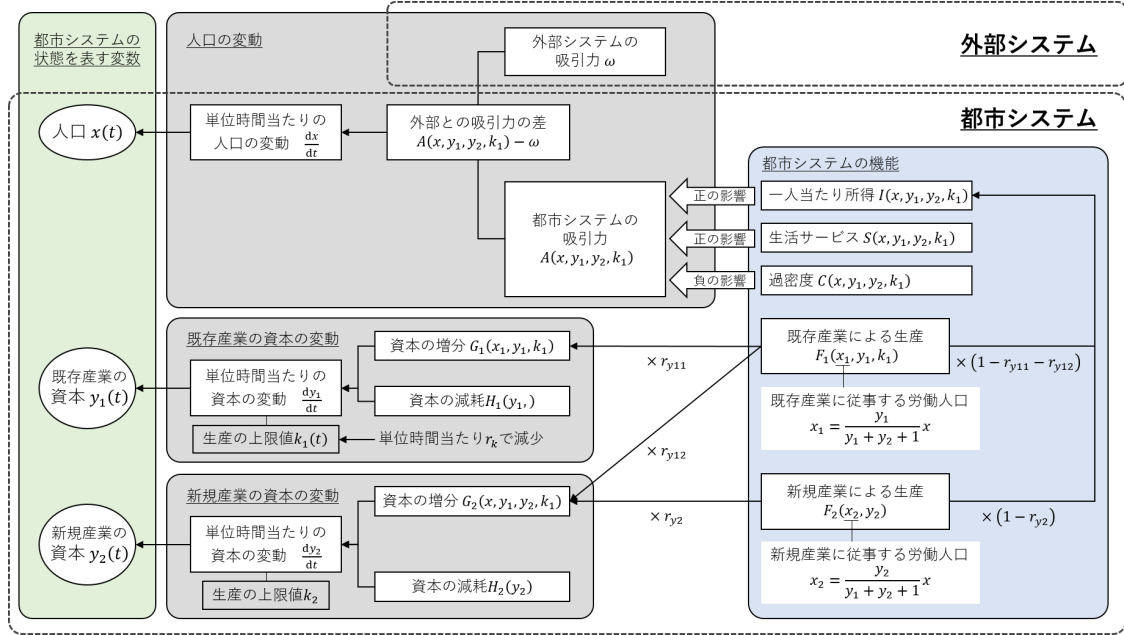


図 4.3: 産業適応モデルの構造

規産業が組み込まれている点があげられる。

産業適応モデルにおける都市システムの状態の動的変化を下記の式 (4.15) ~ (4.29) によって表す。

$$\frac{dx}{dt} = r_x(A(x, y_1, y_2, k_1) - \omega)x \quad (4.15)$$

$$\frac{dy_1}{dt} = \frac{r_{y11}F_1(x, y_1, k_1)}{\varepsilon_1} - \delta_1 y_1 \quad (4.16)$$

$$\frac{dy_2}{dt} = \frac{r_{y12}F_1(x, y_1, k_1) + r_{y2}F_2(x, y_2)}{\varepsilon_2} - \delta_2 y_2 \quad (4.17)$$

$$k_1(t) = k_1(0)e^{-r_k t} \quad (4.18)$$

$$\text{where } A(x, y_1, y_2, k_1) = a_I(x, y_1, y_2, k_1) + a_S(x) + a_C(x, y_1, y_2) \quad (4.19)$$

$$a_I(x, y_1, y_2, k_1) = \mu_I \frac{I(x, y_1, y_2, k_1)}{I(x, y_1, y_2, k_1) + \varphi_I} \quad (4.20)$$

$$a_S(x) = \mu_S \frac{S(x)}{S(x) + \varphi_S} \quad (4.21)$$

$$a_C(x, y_1, y_2) = -C(x, y_1, y_2) \quad (4.22)$$

$$I(x, y_1, y_2, k_1) = \frac{(1 - r_{y11} - r_{y12})F_1(x, y_1, k_1) + (1 - r_{y2})F_2(x, y_2)}{x + 1} \quad (4.23)$$

$$S(x) = \log_{10}(x + 1) \quad (4.24)$$

$$C(x, y_1, y_2) = \rho_x \frac{x}{\sigma} + \frac{\rho_{y1}y_1 + \rho_{y2}y_2}{\sigma} \quad (4.25)$$

$$F_1(x, y_1, k_1) = k_1(t) \frac{(x_1^{\alpha_1} y_1^{\beta_1})^{\gamma_1}}{(x_1^{\alpha_1} y_1^{\beta_1})^{\gamma_1} + k_{h1}^{\gamma_1}} \quad (4.26)$$

$$F_1(x, y_2) = k_2 \frac{(x_2^{\alpha_2} y_2^{\beta_2})^{\gamma_2}}{(x_2^{\alpha_2} y_2^{\beta_2})^{\gamma_2} + k_{h2}^{\gamma_2}} \quad (4.27)$$

$$x_1 = x_1(x, y_1, y_2) = \frac{y_1}{y_1 + y_2 + 1} x \quad (4.28)$$

$$x_2 = x_2(x, y_1, y_2) = \frac{y_2}{y_1 + y_2 + 1} x \quad (4.29)$$

表 4.4: 産業適応モデルにおける関数

関数	説明
$A(x, y_1, y_2, k_1)$	都市システムの吸引力
$a_I(x, y_1, y_2, k_1)$	一人当たり所得に起因する吸引力
$a_S(x)$	生活サービスに起因する吸引力
$a_C(x, y_1, y_2)$	過密度に起因する吸引力
$I(x, y_1, y_2, k_1)$	一人当たり所得
$S(x)$	生活サービス
$C(x, y_1, y_2)$	過密度
$F_1(x, y_1, k_1)$	既存産業の生産量（生産関数）
$F_2(x, y_2)$	新規産業の生産量（生産関数）
$x_1(x, y_1, y_2)$	既存産業の労働人口
$x_2(x, y_1, y_2)$	新規産業の労働人口

表 4.5: 産業適応モデルにおけるパラメータ

パラメータ	説明	値あるいは定義域
α_i	各産業の生産における労働の寄与の程度	$\alpha_i > 0. \alpha_i + \beta_i = 1$
β_i	各産業の生産における資本の寄与の程度	$\beta_i > 0. \alpha_i + \beta_i = 1$
γ_i	各産業の生産関数の曲線の形状を決定するパラメータ	$\gamma_i = 4$
r_x	吸引力の差に応じた人口の転出入速度	$r_x > 0$
μ_I	一人当たり所得に起因する吸引力の上限値	$\mu_I = 1$
φ_I	一人当たり所得に起因する吸引力が上限値の半分となるときの一人当たり所得の水準	$\varphi_I = 3$
μ_S	生活サービスに起因する吸引力の上限値	$\mu_S = 1$
φ_S	生活サービスに起因する吸引力が上限値の半分となるときの生活サービスの水準	$\varphi_S = 4$
ρ_x	人口密度の居住環境への負の影響の程度	$\rho_x > 0$
ρ_y	資本の密度の居住環境への負の影響の程度	$\rho_y > 0$
σ	都市システムの空間的な広がり	σ
ω	外部システムの吸引力	$\omega > 0$
r_{y11}	既存産業の生産のうち既存産業の資本への投資の割合	$0 \leq r_{y11} \leq 1$
r_{y12}	既存産業の生産のうち新規産業の資本への投資の割合	$0 \leq r_{y12} \leq 1$
r_{y2}	新規産業の生産のうち新規産業の資本への投資の割合	$0 \leq r_{y2} \leq 1$
ε_i	各産業の資本（生産設備）1 単位当りのコスト	$\varepsilon_i > 0$
k_2	新規産業における生産の上限値	$k_2 \geq 0$
k_{hi}	各産業における生産が上限値の半分となるときの生産要素投入量	$k_{hi} \geq 0$
δ_i	各産業の単位時間当たりの資本の減耗率	$0 < \delta_i < 1$
r_k	単位時間当たりの既存産業の生産の上限値の減少率	$0 \leq r_k \leq 1$

適応産業モデルでは、 $t = 0$ のとき、都市システムにおける産業は既存産業だけであり、 $x(0) > 0$, $y_1(0) > 0$, $y_2(0) = 0$, $k_1(0) > 0$ とする。

$t = \tau$ ($\tau \geq 0$) を適応開始時点とするが、その時点までは既存産業による生産からの資本への投資は、既存産業の資本に対してのみで、新規産業への投資は 0 であるとする。つまり、 $0 < r_{y11} < 1$, $r_{y12} = 0$ とする。ここで、適応開始とは、都市システムが十分な規模の新規産業を創出可能であり、資本および労働人口の転換が可能な状態であることを意味する。

$t = \tau$ において、適応を開始したとき、都市システムが既存産業における生産のうち一定の割合 r_{12} を新規産業の資本に投資し始めるものとする。つまり、適応開始後、資本の投資に関する係数は、 $0 \leq r_{y11} < 1$, $0 < r_{y12} < 1$, $0 < r_{y2} < 1$ に変化する。労働人口については、既存産業および新規産業における労働人口 x_1 , x_2 は、式 (4.28) および式 (4.28) に示す通り、各産業の資本 $y_1(t)$ および $y_2(t)$ の規模に比例して居住人口 $x(t)$ を割り振る。つまり、新規産業における資本の規模に応じて、既存産業における労働人口が新規産業へと転換していくものとする。

既存産業の資本 $y_1(t)$ は、既存産業における生産 F_1 からの投資による増分と減耗による減分の多寡に応じて変動するものとする。既存産業の生産の上限値 $k_1(t)$ は、産業衰退モデルと同様に、単位時間当たり r_k の割合で減少していくものとする。一方、新規産業の資本 $y_2(t)$ は、既存産業における生産 F_1 および新規産業における生産 F_2 からの投資による増分と減耗による減分の多寡に応じて変動するものとする。新規産業の生産の上限値 k_2 は、既存産業の生産の上限値が $k_1(t) = 0$ となった後も、 $x(t)$, $y_1(t)$, $y_2(t)$ から成る相空間上において、都市システムが安定して存続可能な平衡点が存在する上で十分な規模であると仮定する。

既存産業では、生産のうち r_{y11} の割合を既存産業の資本への投資に、 r_{y12} の割合を新規産業の資本への投資に回し、残りを労働人口への所得に回すものとする。新規産業では、生産のうち r_{y2} の割合を新規産業の資本への投資に回し、残りを労働人口への所得に回すものとする。既存産業および新規産業の資本は、都市システムの居住者の間で平等に所有されているものとし、両方の産業における生産のうち労働人口への所得として回された和を、労働人口によって均等に分配するものとする。

既存産業の生産の上限値 $k_1(t)$ は時間の経過とともに減少し、最終的には $k_1(t) = 0$ となるので、いずれかの時点で $y_1(t) = 0$ となる。このとき、相平面 xy_2 上に都市システムが存続可能となる吸引点（漸近安定な平衡点）が存在し、かつ、その吸引領域の中に都市システムの状態が位置していれば、都市システムは存続可能となり、既存産業の衰退に対して適応したと言える。

4.3.3 産業適応モデルを用いたケーススタディ

ここでは、表 4.6 および表 4.7 の通りパラメータを設定し、初期値を $x(0) = 7049.2$, $y_1(0) = 7276.0$, $k_1(0) = 30000$, $y_2(0) = 0$ とした場合について、産業適応モデルを用いて適応の様子を見ていく。 $t = 100$ のときに適応を開始したとすると、都市システムの状態の動的变化は、適応開始後、図 4.4 の青い実線に示す通りとなり、新規産業によって創出される xy_2 上の存続可能な平衡点に到達する。適応しない場合は、都市システムの状態は、 xy_1 平面上の黒い破線をたどり、原点に到達、つまり、消滅することになる。

適応開始の時間を $t = 100$ から徐々に遅らせていき、どの時点まで適応可能かを探ると、図 4.5 に示す通り、 $t = 252$ までに適応を開始すれば適応可能であるが、 $t = 253$ 以降に適応を開始した場合は適応することができなかった。このように、初期値とパラメータを与えたとき、適応可能な最も遅い時点を「適応可能最遅時点」と呼ぶこととする。

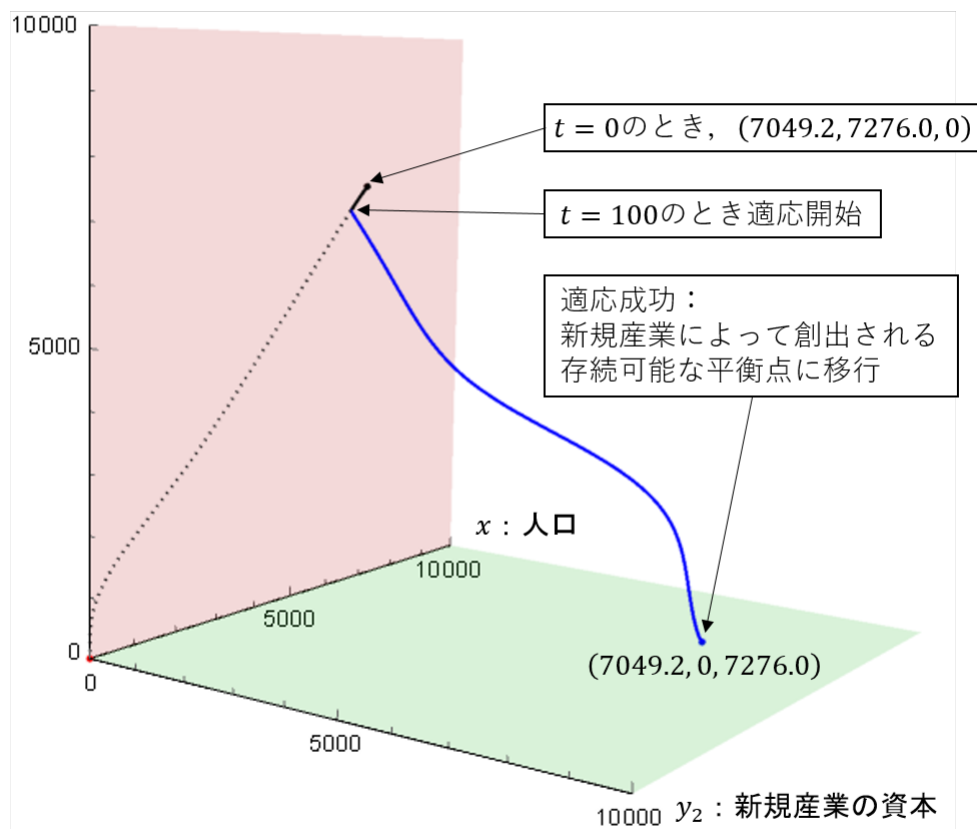
表 4.6: パラメータの設定

パラメータ	値	パラメータ	値
r_x	0.1	α_1, α_2	0.5
μ_I	1	β_1, β_2	0.5
φ_I	3	γ_1, γ_2	4
μ_S	1	k_2	30000
φ_S	4	k_{h1}, k_{h2}	3000
ρ_{x1}, ρ_{x2}	0.01	$\varepsilon_1, \varepsilon_2$	40
rho_y	0.01	δ_1, δ_2	0.02
σ	10000	r_k	0.001
ω	1		

表 4.7: 資本への投資に関するパラメータ

適応開始前		適応開始後
$r_{y11}=0.20$	→	$r_{y11}=0$
$r_{y12}=0$	→	$r_{y12}=0.20$
$r_{y2}=0$	→	$r_{y2}=0.20$

y_1 : 既存産業の資本








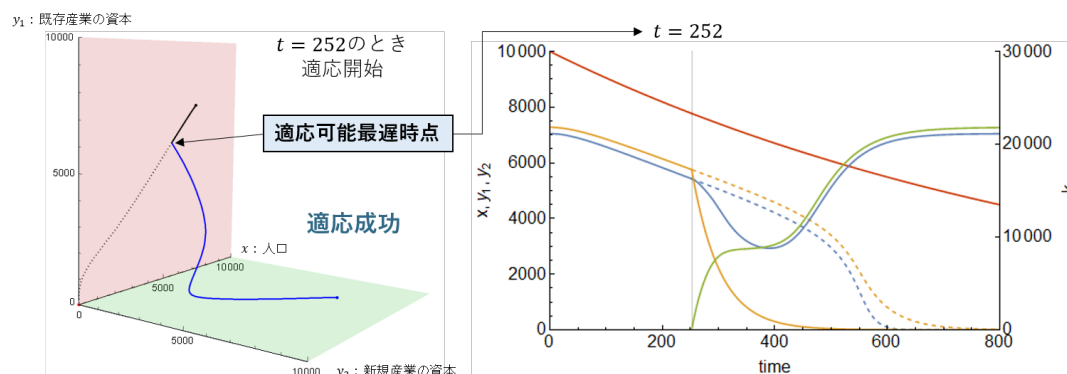
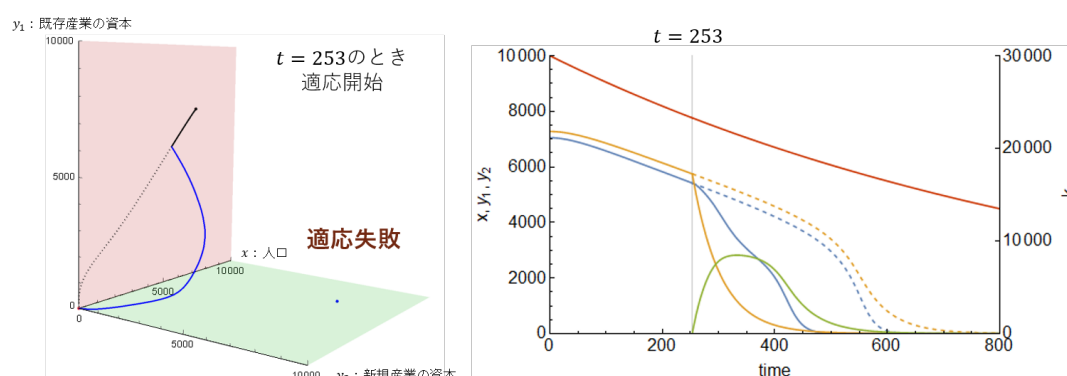
	適応開始前の 状態の推移		適応開始後の 状態の推移		適応しない場合の 状態の推移
	xy_1 平面		xy_2 平面	(x, y_1, y_2) xy_1y_2 平面上の座標	

図 4.4: 産業適応モデルによる適応の様子



(a) $t = 252$ のときに適応開始した場合



(b) $t = 253$ のときに適応開始した場合

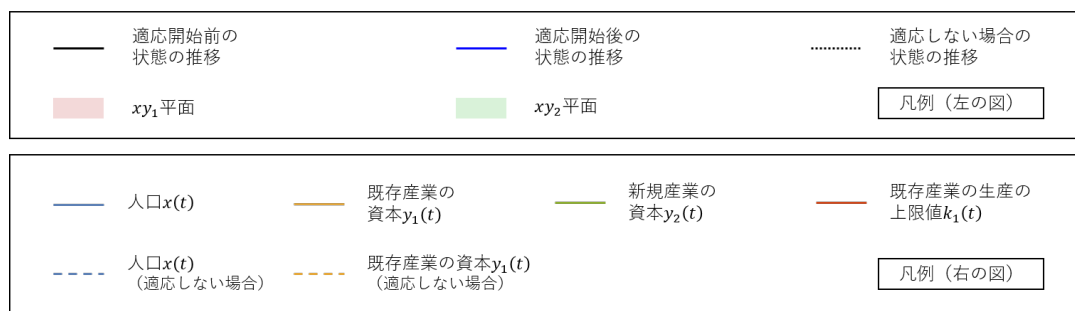


図 4.5: 適応可能最遅時点前後の適応の可否

4.3.4 適応の可否に影響を与える要因の分析

産業適応モデルを用いて、適応の可否に影響を与える要因について分析する。ここでは、まず、パラメータが与えられたとき、適応開始時の都市システムの状態を表す変数 $(x(t), y_1(t), k_1(t))$ について、適応可能な組み合わせを調べ、「適応可能領域」の概念を示す。次に、適応開始のタイミング、既存産業の衰退速度、新規産業の生産性が適応の可否に与える影響について分析する。

(1) xy_1 平面上の適応可能領域

ここでは、パラメータを表 4.6 および表 4.7 の通り設定して、 $k_1(t) = 30000$ としたとき、 xy_1 平面上において適応開始した場合に適応可能な領域（以下、適応可能領域）を図 4.6 に示す。都市システムの状態が青色の領域で適応を開始した場合は、 xy_2 平面上の新たな平衡点に到達することが可能であるが、黄色の領域で適応を開始した場合は、適応することができず、消滅することを表している。つまり、この図 4.6 は都市システムの適応の成否が、適応開始時点の都市システムの状態に影響されることを示している（Wolfram Research Inc., 2015）[3]。

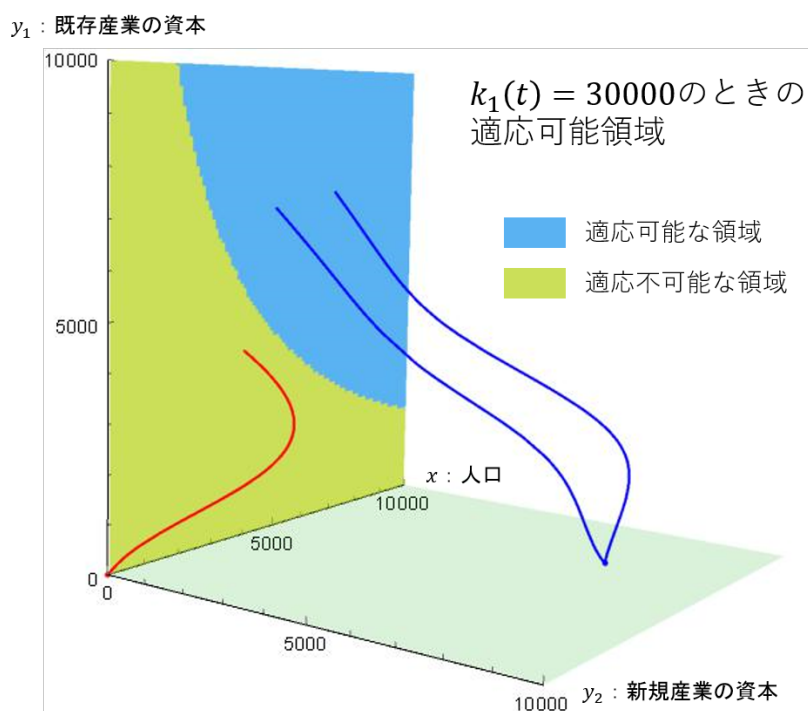


図 4.6: 適応可能領域の様子

(2) 適応開始のタイミング、既存産業の衰退速度による適応への影響

次に、図 4.7 は、図 4.6 の状態から、 $k_1(t)$ の値、および、 r_k の値を変化させたときの xy_1 平面上の適応可能領域の変化を表している。図 4.7 を見ると、 $k_1(t)$ の値が小さくなるほど、つまり、適応開始のタイミングが遅くなるほど、 xy_1 平面上の適応可能領域は小さくなることが読み取れる。また、 r_k の値が大きくなるほど、つまり、既存産業の衰退速度が速くなるほど、 xy_1 平面上の適応可能領域は小さくなることが読み取れる。

さらに，パラメータを表 4.8 および表 4.7 の通り設定し，初期値を $x(0) = 7049.2$, $y_1(0) = 7276.0$, $k_1(0) = 30000$, $y_2(0) = 0$ としたとき， r_k の値を変化させて，適応可能最遅時点を調べると，表 4.9 および図 4.8 のような結果を得られた．図 4.8 は，適応しなかった場合の人口 $x(t)$ および既存産業の資本 $y_1(t)$ の状態の動的变化を表している．図中の背景の色は，水色の時間帯に適応を開始すれば新規産業への適応が可能であり，黄色の時間帯に適応を開始すると適応不可能となることを表している．この結果から，産業の衰退速度が速いほど，適応の時間的猶予が失われることがわかる．

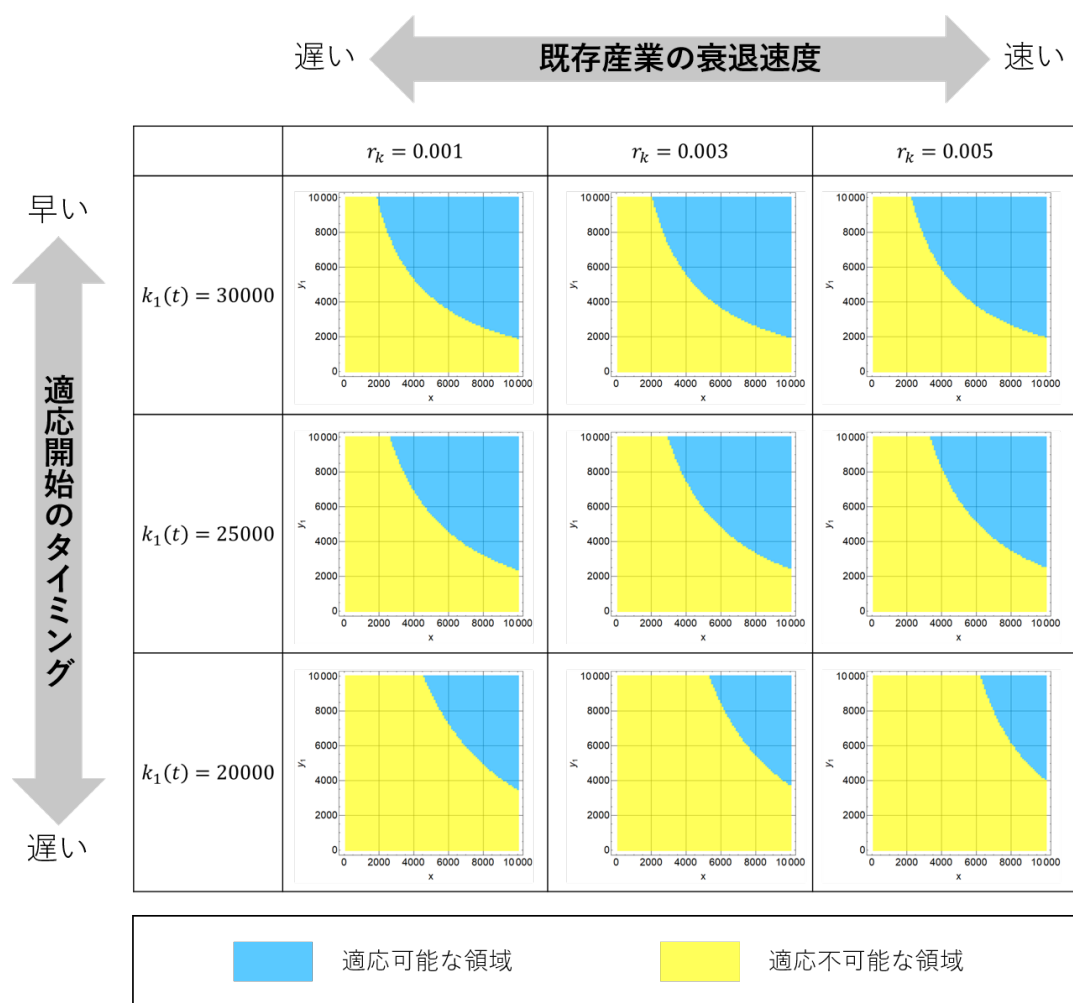


図 4.7: 適応開始のタイミング，既存産業の衰退速度に応じた適応可能領域の変化

表 4.8: パラメータの設定

パラメータ	値	パラメータ	値
r_x	0.1	α_1, α_2	0.5
μ_I	1	β_1, β_2	0.5
φ_I	3	γ_1, γ_2	4
μ_S	1	k_2	30000
φ_S	4	k_{h1}, k_{h2}	3000
ρ_{x1}, ρ_{x2}	0.01	$\varepsilon_1, \varepsilon_2$	40
ρ_{ho_y}	0.01	δ_1, δ_2	0.02
σ	10000		
ω	1		

表 4.9: r_k に応じた適応可能最遅時点

既存産業の衰退速度 r_k	適応可能最遅時点
$r_k=0.001$	252
$r_k=0.003$	96
$r_k=0.005$	57

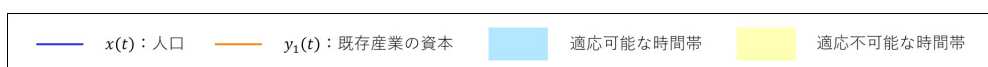
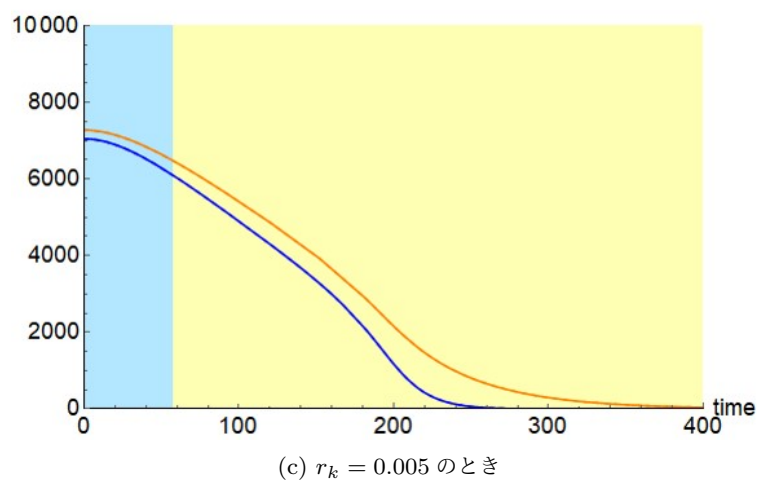
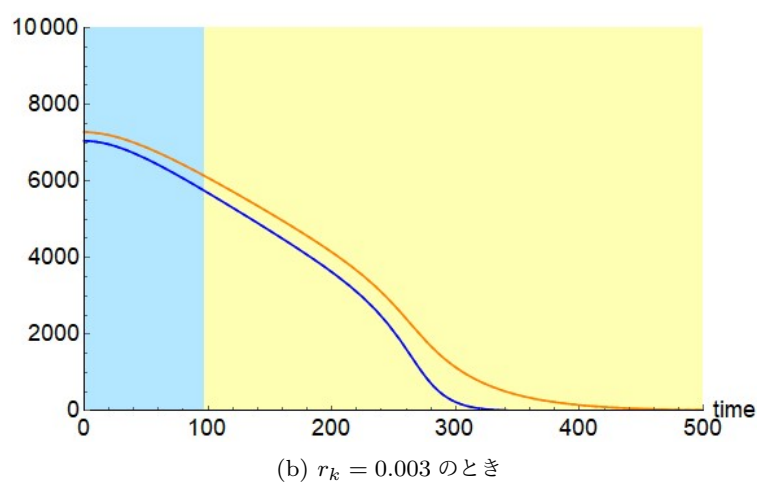
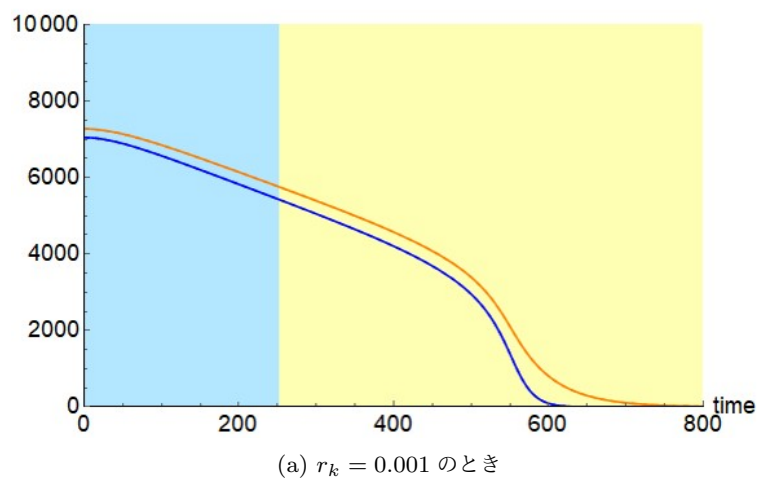


図 4.8: 各ケースの産業衰退モデルに基づく都市システムの状態の変化と適応可能な時間帯

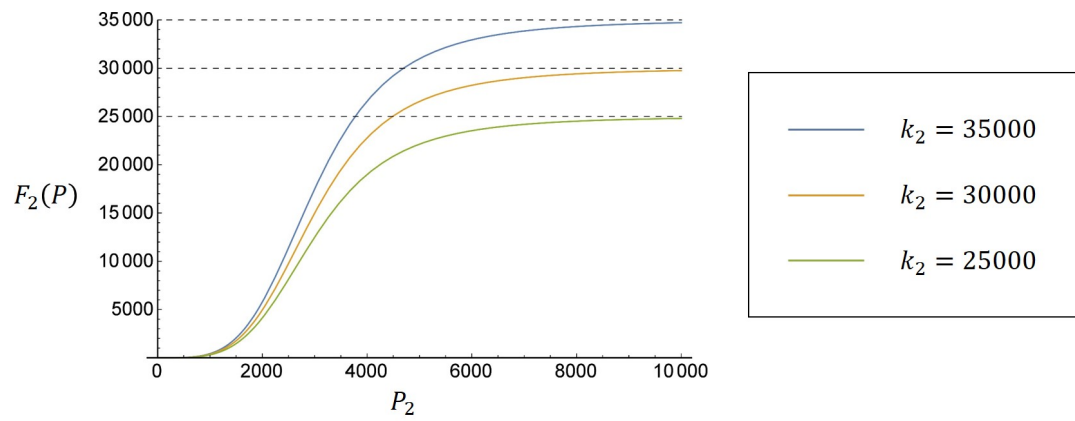
(3) 新規産業の生産性による適応への影響

新規産業の生産性，つまり，新規産業の生産関数 F_2 の形状が適応の可否に与える影響について分析する．生産関数 F_2 の形状は，生産の上限値 k_2 および k_{h2} によって決定されるため， k_2 および k_{h2} をそれぞれ変化させたときの xy_1 平面上の適応可能領域の変化を分析する． k_2 , k_{h2} 以外のパラメータは表 4.10 および表 4.7 の通り設定する． k_2 については，(a) $k_2 = 35000$ ，(b) $k_2 = 30000$ ，(c) $k_2 = 25000$ と変化させる． k_{h2} については，(a) $k_{h2} = 2500$ ，(b) $k_{h2} = 3000$ ，(c) $k_{h2} = 2500$ と変化させる． k_2 を変化させるときは $k_{h2} = 3000$ ， k_{h2} を変化させるときは $k_2 = 30000$ とする．適応開始時の既存産業の生産の上限値は， $k_1(t) = 30000$ とする． k_2 および k_{h2} を上記の通り変化させたときの生産関数 F_2 の形状は，図 4.9a および図 4.9b に示す通りである．図 4.9a および図 4.9b における横軸 P_2 は，新規産業への生産要素投入量を表す関数であり， $P_2 = x_2^{\alpha_2} y_2^{\beta_2}$ である．図 4.9a および図 4.9b から， k_2 の値については大きい方が， k_{h2} の値については小さい方が，新規産業の生産性が高くなることが読み取れる．

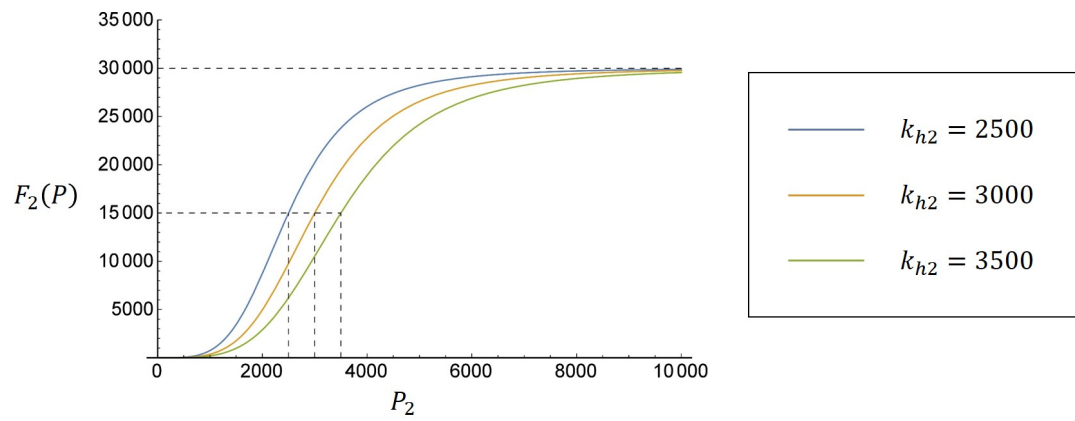
分析の結果は，図 4.10 および図 4.11 の通りである．まず， k_2 が適応可能領域に与える影響を見ていくと，図 4.10 から k_2 の値が大きくなるほど， xy_1 平面上の適応可能領域が大きくなっていくことが読み取れる．次に， k_{h2} が適応可能領域に与える影響を見ていくと，図 4.11 から k_{h2} の値が小さくなるほど， xy_1 平面上の適応可能領域が大きくなっていくことが読み取れる．以上より，新規産業の生産性が高いほど， xy_1 平面上の適応可能領域が大きくなっていくことがわかる．

表 4.10: パラメータの設定

パラメータ	値	パラメータ	値
r_x	0.1	α_1, α_2	0.5
μ_I	1	β_1, β_2	0.5
φ_I	3	γ_1, γ_2	4
μ_S	1	k_{h1}	3000
φ_S	4	$\varepsilon_1, \varepsilon_2$	40
ρ_{x1}, ρ_{x2}	0.01	δ_1, δ_2	0.02
ρ_{ho_y}	0.01	r_k	0.001
σ	10000		
ω	1		



(a) k_2 を変化させたときの生産関数 F_2 の形状



(b) k_{h2} を変化させたときの生産関数 F_2 の形状

図 4.9: 生産関数 F_2 の形状

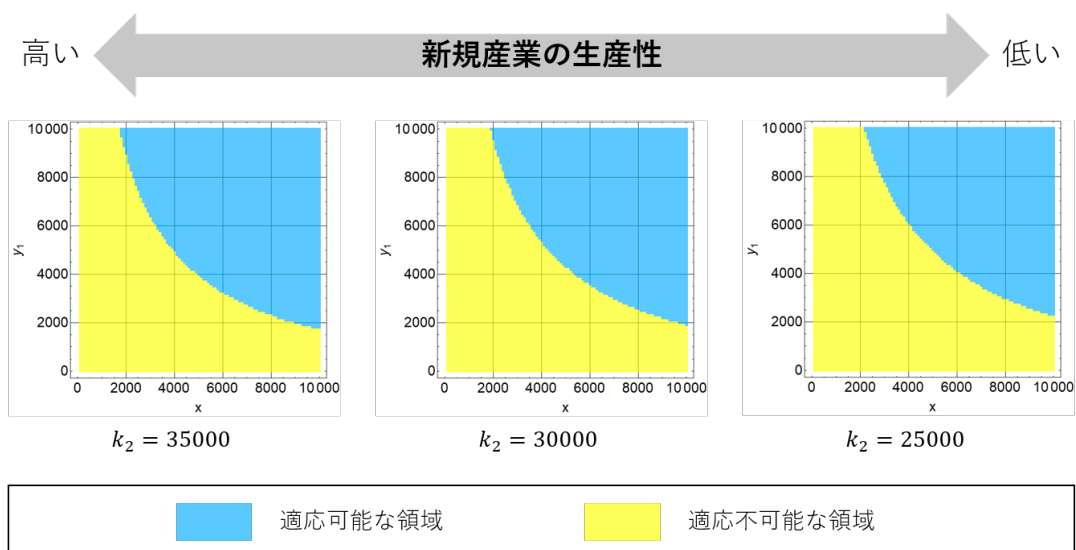


図 4.10: k_2 が適応可能領域に与える影響

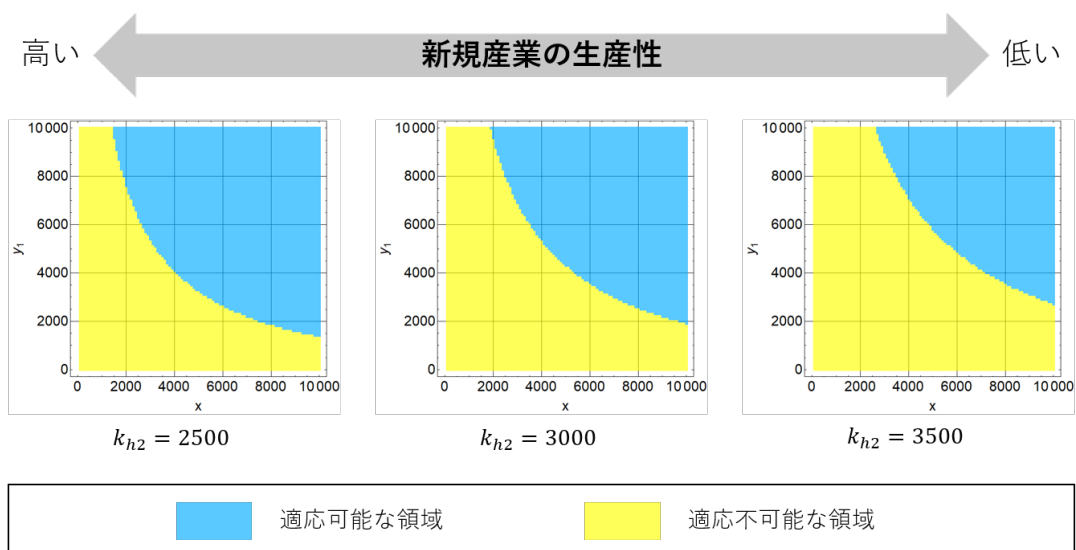


図 4.11: k_{h2} が適応可能領域に与える影響

パラメータを表 4.10 および表 4.7, 初期値を $x(0) = 7049.2$, $y_1(0) = 7276.0$, $k_1(0) = 30000$, $y_2(0) = 0$ として, k_2 および k_{h2} をそれぞれ変化させたときの適応可能最遅時点を分析する. ここでも, k_2 を変化させるときは $k_{h2} = 3000$, k_{h2} を変化させるときは $k_2 = 30000$ とする. 分析の結果は, 表 4.11 の通りである. 創出可能な新規産業の生産性が高いほど, 適応可能最遅時点は遅くなることがわかる. これは, 適応を開始するタイミングが遅くなるほど, 適応に必要な新規産業の生産性が高い必要があり, 適用に向けた条件が厳しくなることを意味している.

表 4.11: k_2, k_{h2} に応じた適応可能最遅時点

k_2	適応可能 最遅時点	k_2	適応可能 最遅時点
23000	185	3500	164
24000	201	3000	252
25000	213	2500	331
30000	252	2000	402
40000	294	1800	426
50000	320	1600	449
100000	382	1400	468
150000	409	1200	485
200000	425	1000	499
300000	444	800	512
1000000	483	600	523
1500000	492	400	533

4.4 災害が産業衰退への適応に及ぼす影響

本節では、災害が適応の可否に及ぼす影響を、(1) 適応開始前に災害が発生した場合、(2) 適応開始後に災害が発生した場合について、産業適応モデルを用いて分析を行う。

(1) 適応開始前に災害が発生した場合

適応開始前に災害が発生した場合について、災害が適応に与える影響を分析する。産業適応モデルのパラメータを表 4.12 および表 4.13、初期値を $x(0) = 7049.2$, $y_1(0) = 7276.0$, $k_1(0) = 30000$, $y_2(0) = 0$ と設定した上で、災害発生タイミングおよび災害の規模が都市システムの適応の可否に与える影響について調べた。産業の衰退速度 r_k については、a) $r_k = 0.001$, b) $r_k = 0.003$, c) $r_k = 0.005$ の3つのケースを設定した。産業の衰退速度 r_k の各ケースについて、災害発生タイミングは、I) $k(t) = 30000$ となったとき、II) $k(t) = 28000$ となったとき、III) $k(t) = 26000$ となったとき、IV) $k(t) = 24000$ となったときの4つのケース、災害の規模は、i) 被害率 20%, ii) 被害率 30%, iii) 被害率 40%, iv) 被害率 50% の4つのケースを設定した。ここで、被害率とは、災害発生時点の人口および資本がその割合だけ減少することを意味する。

分析の結果は、図 4.12～図 4.17 に示す。図中の各線は、適応しなかった場合の人口 $x(t)$ および既存産業の資本 $y_1(t)$ の状態の動的変化を表している。このうち、実線は、災害による影響を受けた場合の人口 $x(t)$ および既存産業の資本 $y_1(t)$ の状態の動的変化を表している。災害の被害を受けた時点で、人口 $x(t)$ および既存産業の資本 $y_1(t)$ の状態が不連続に変化している。一方、破線は、災害被害を受けなかった場合の人口 $x(t)$ および既存産業の資本 $y(t)$ の状態の動的変化を表している。図中の背景の色は、災害による影響を受ける場合（実線の場合）について、水色の時間帯に適応を開始すれば新規産業への適応が可能であり、黄色の時間帯に適応を開始すると適応不可能となることを表している。

災害被害を受けた場合の状態の動的変化（実線）と災害被害を受けなかった場合の状態の動的変化（破線）を比較すると、図 4.12～図 4.17 から、産業の衰退がある程度進行した状態において、大きな被害を受けた場合、都市システムの消滅のタイミングが早まっていることが読み取れる。

災害による適応可能最遅時点への影響については、図 4.8 と比較すると、図 4.12～図 4.17 におけるほとんどのケースでは、災害の影響によって適応可能最遅時点が早まることが読み取れる。災害に影響によって適応のための時間的猶予が失われる可能性があると言える。ただし、 $r_k = 0.001$ 、災害の発生が $k(t) = 30000$ のときのように、産業の衰退速度が遅く、衰退の程度が進行していない場合では、被災しない場合と比較して、適応可能最遅時点に大きな影響はない。図 4.12 の iii) や iv) のように、災害の影響によって都市システムの状態が一時的に適応可能領域の外側に変動するが、再び適応可能領域に戻るケースもある。

災害の発生が $k(t) = 26000$ あるいは $k(t) = 24000$ のときのように、産業の衰退が一定程度進行している場合では、災害の規模が大きいと、災害による影響を受けた時点で適応可能領域の外側に変動し、それ以降、適応が不可能な状態となる。

表 4.12: パラメータの設定

パラメータ	値	パラメータ	値
r_x	0.1	α_1, α_2	0.5
μ_I	1	β_1, β_2	0.5
φ_I	3	γ_1, γ_2	4
μ_S	1	k_2	30000
φ_S	4	k_{h1}, k_{h2}	3000
ρ_{x1}, ρ_{x2}	0.01	$\varepsilon_1, \varepsilon_2$	40
ρ_{y1}, ρ_{y2}	0.01	δ_1, δ_2	0.02
σ	10000		
ω	1		

表 4.13: 資本への投資に関するパラメータ

適応開始前		適応開始後
$r_{y11}=0.20$	→	$r_{y11}=0$
$r_{y12}=0$	→	$r_{y12}=0.20$
$r_{y2}=0$	→	$r_{y2}=0.20$

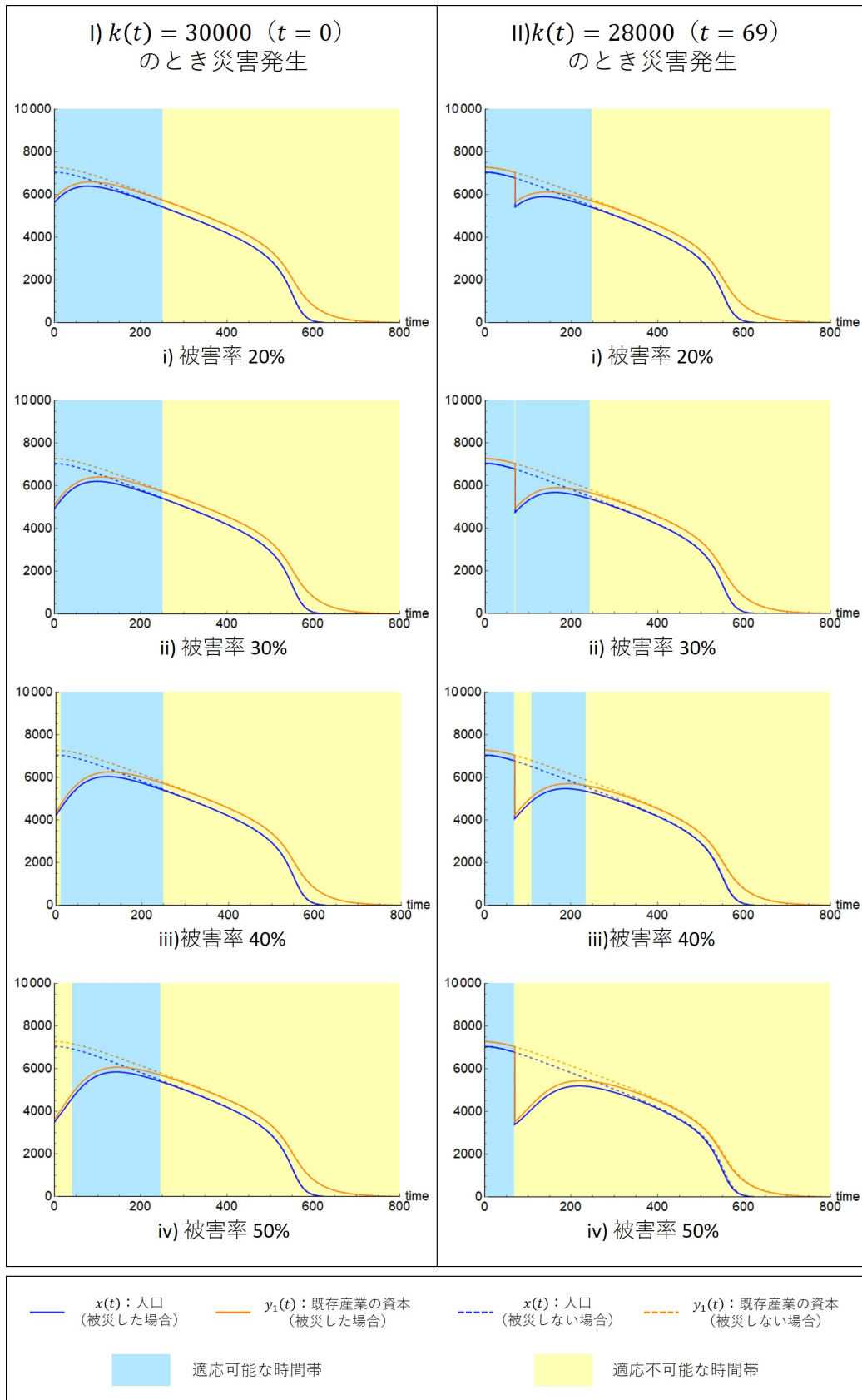


図 4.12: $r_k = 0.001$ のときの適応可能最遅時点と災害の影響 その 1

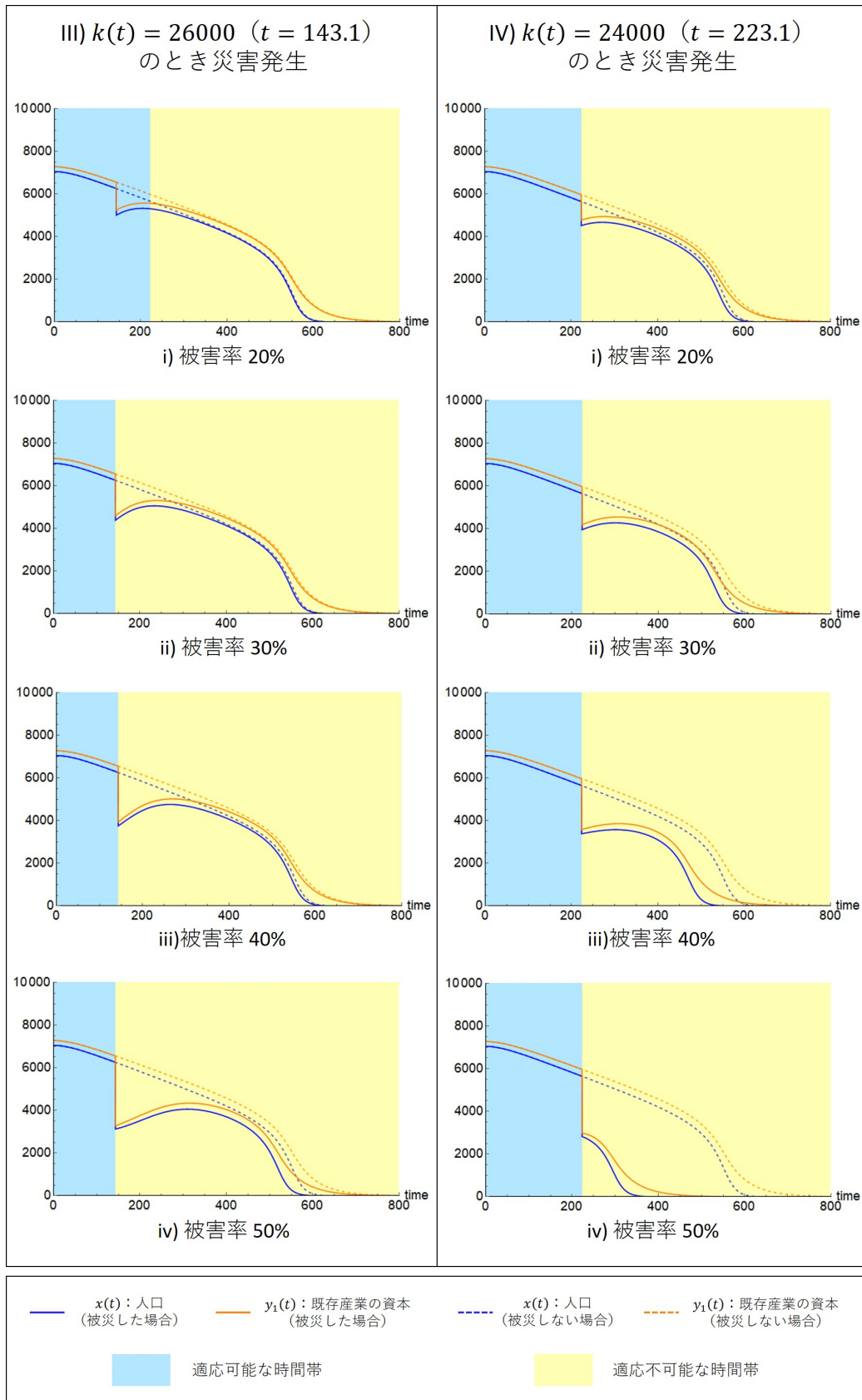


図 4.13: $r_k = 0.001$ のときの適応可能最遅時点と災害の影響 その 2

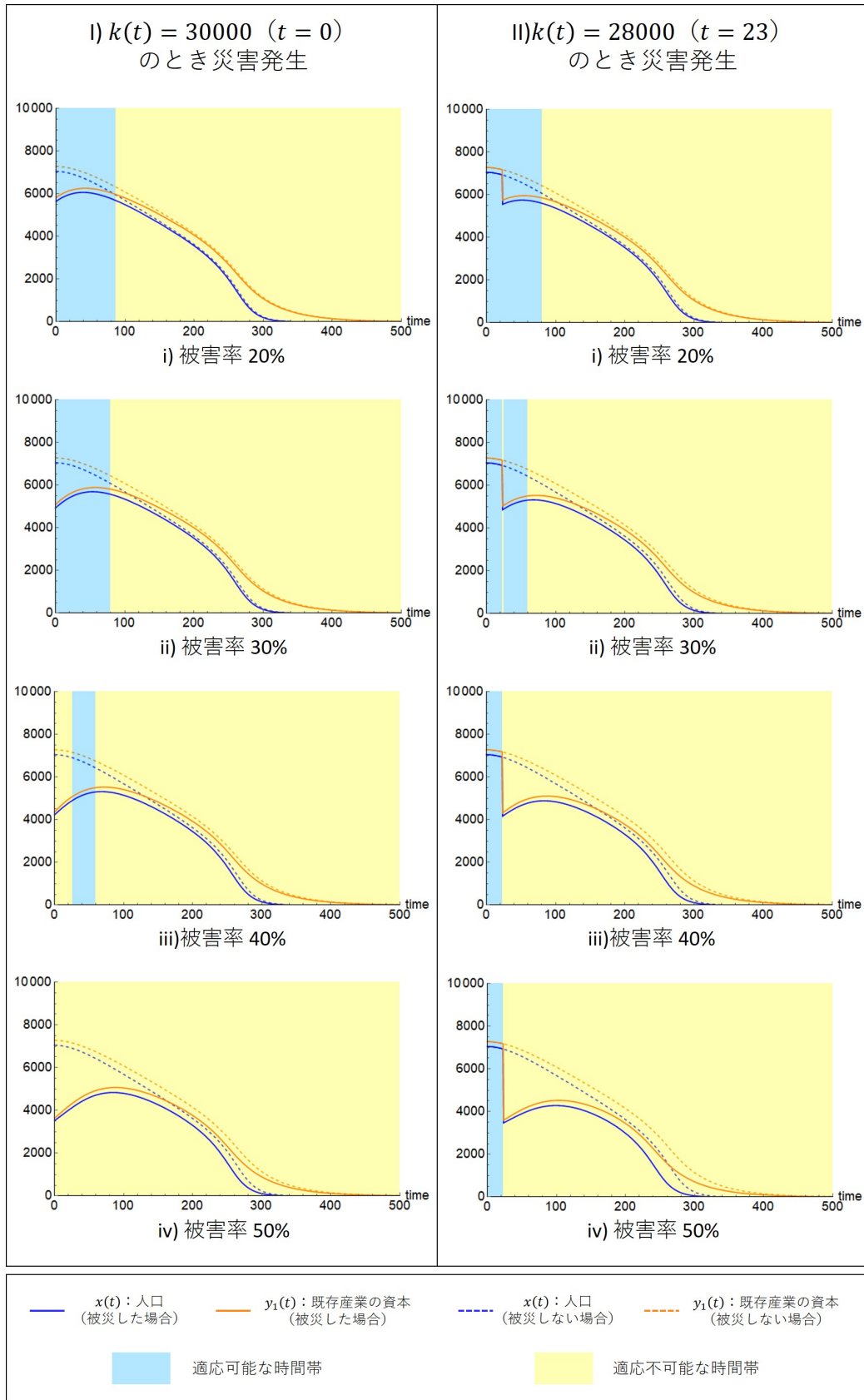


図 4.14: $r_k = 0.003$ のときの適応可能最遅時点と災害の影響 その 1

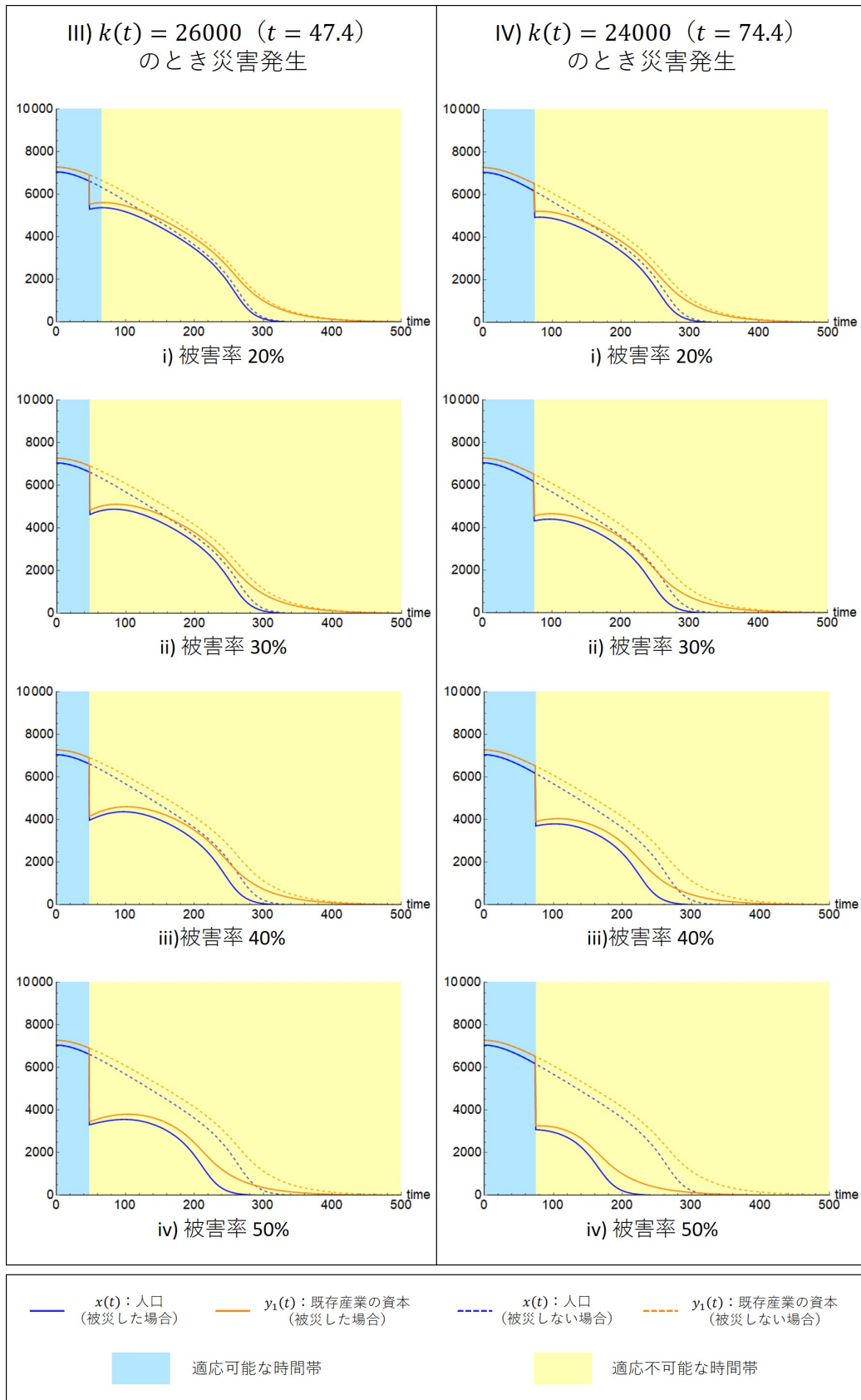


図 4.15: $r_k = 0.003$ のときの適応可能最遅時点と災害の影響 その 2

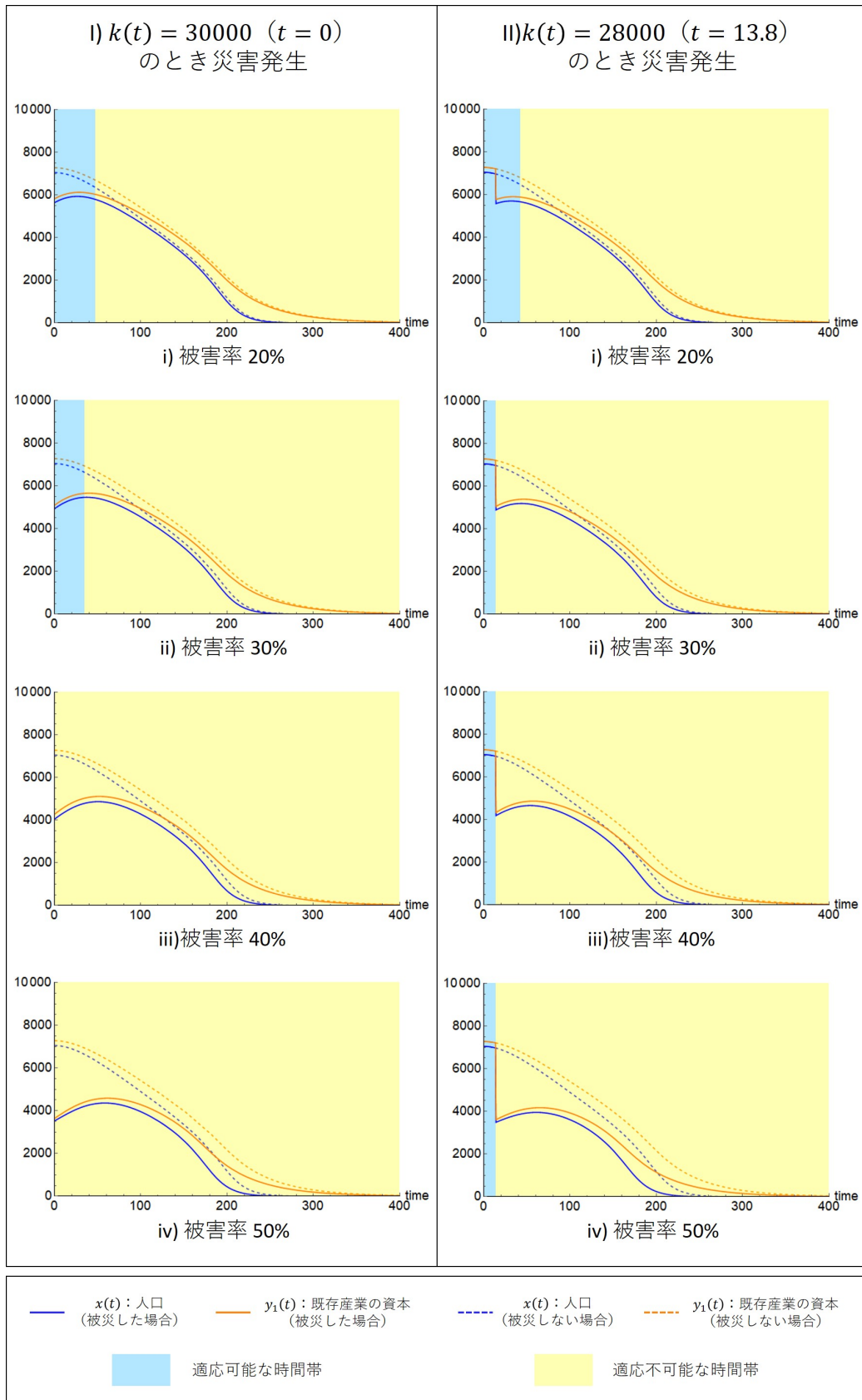


図 4.16: $r_k = 0.005$ のときの適応可能最遅時点と災害の影響 その 1

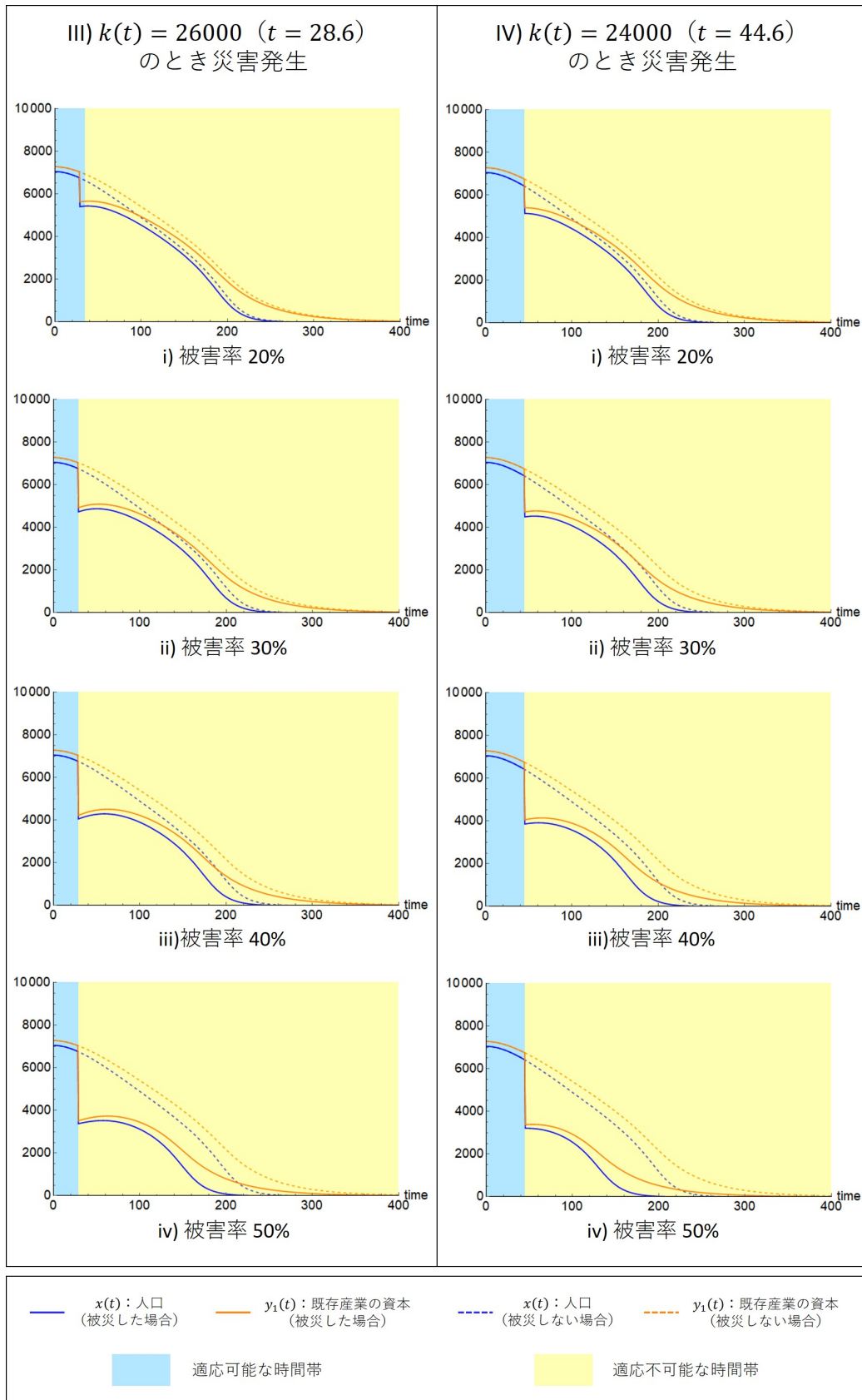


図 4.17: $r_k = 0.005$ のときの適応可能最遅時点と災害の影響 その 2

(2) 適応開始後に災害が発生した場合

適応開始後に災害が発生した場合について、災害が適応に与える影響を分析する。産業適応モデルのパラメータを表 4.12, 表 4.13, $r_k = 0.001$, 初期値を $x(0) = 7049.2$, $y_1(0) = 7276.0$, $k_1(0) = 30000$, $y_2(0) = 0$ と設定した上で、災害発生タイミングが都市システムの適応の可否に与える影響について調べた。ここでは、 $t = 50$ の時に適応を開始するものとして、適応開始後、4通りのタイミングで被害率 30% の災害を与えて、適応の可否を調べた。発災のタイミングは、I) 適応開始直後 ($t = 50$ のとき), II) $t = 60$ のとき, III) $t = 70$ のとき, IV) $t = 80$ のときの4つのケースとした。

分析の結果は、図 4.18～図 4.19 に示す。まず、適応開始直後に被災した場合は、適応可能であるが、 $t = 60$, および、 $t = 70$ で被災した場合は、適応できずに消滅する。そして、 $t = 80$ で被災した場合は、適応可能となっている。この結果から、適応開始後、適応の経過の中で災害に対する受容力が低下する時間帯が生じる可能性があることが分かった。

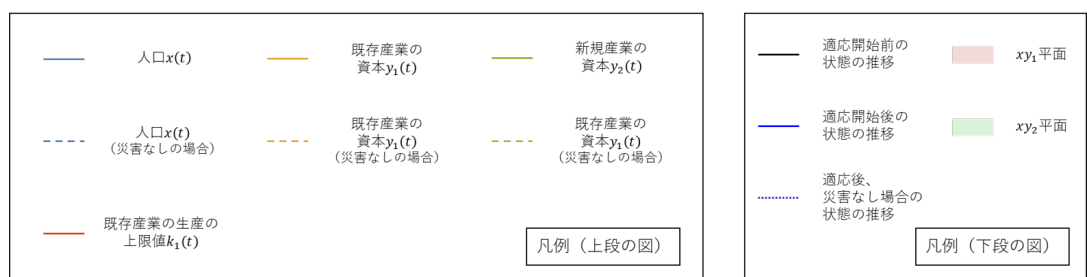
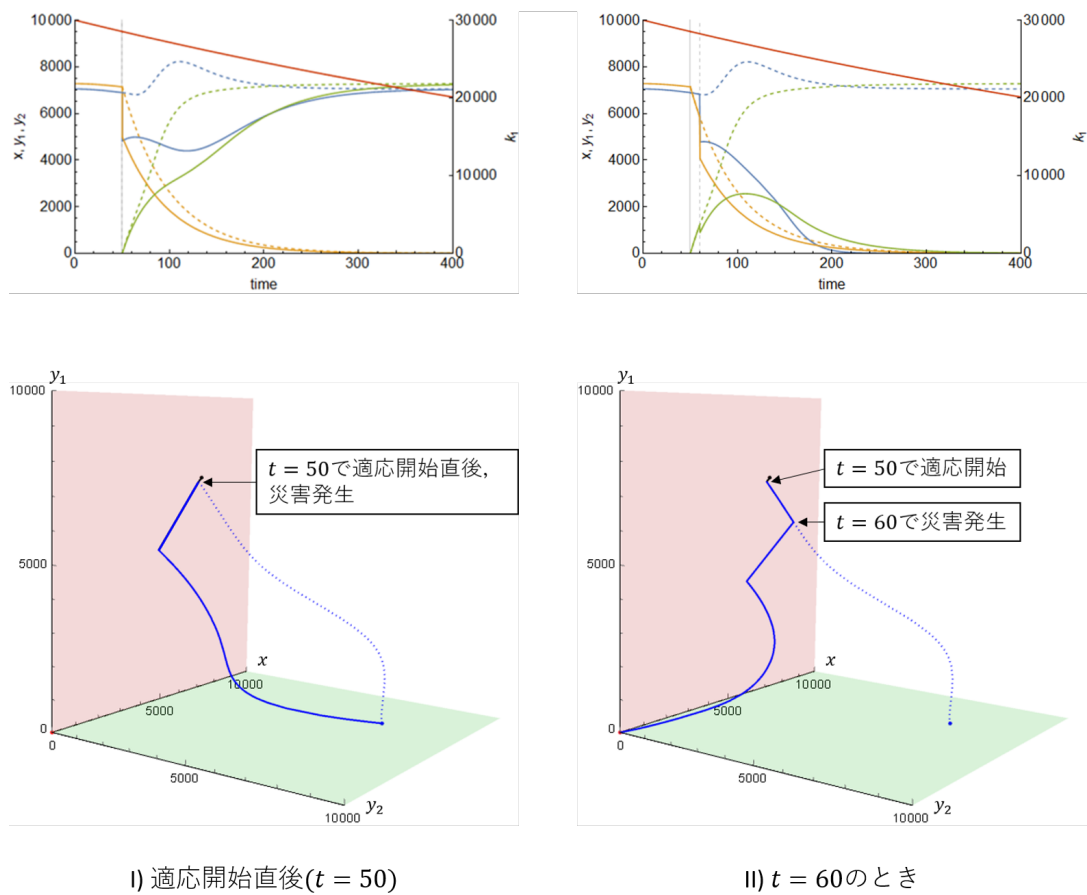
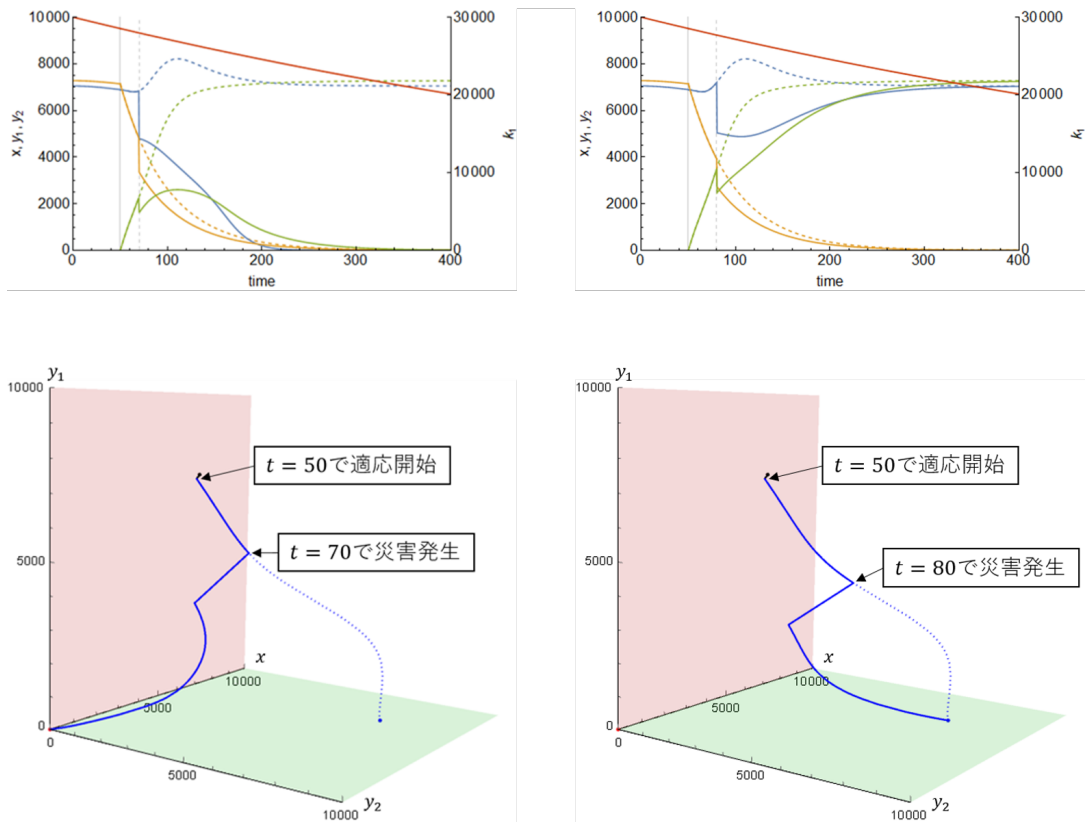


図 4.18: 災害発生のタイミングと適応の可否 その 1



III) $t = 70$ のとき

IV) $t = 80$ のとき

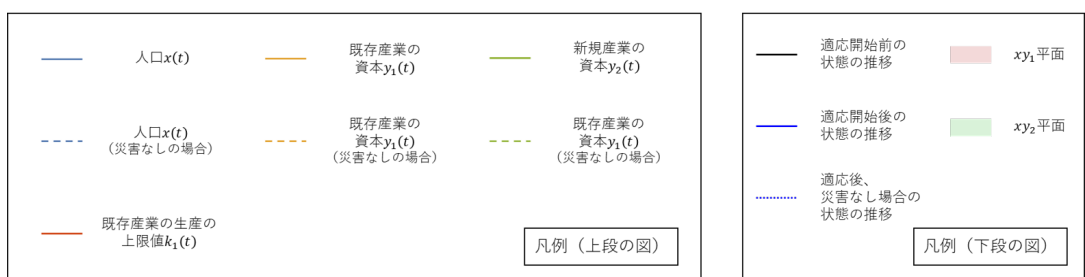


図 4.19: 災害発生のタイミングと適応の可否 その 2

4.5 まとめ

本章では、まず、産業の衰退が基本都市モデルの生産の上限値 k_{max} の減少と表されるものとして、産業衰退モデルを構築した。産業衰退モデルを用いて、産業の衰退が都市システムの状態に与える影響を明らかにした。

次に、産業の衰退への適応に求められる必要条件を整理した上で、産業の衰退に対する適応を組み込んだ産業適応モデルを構築し、都市システムの適応の可否に、既存産業の衰退速度、既存産業に代わる新規産業の生産性が影響を与えることを示した。

災害が産業の衰退への適応に与える影響についても分析した。災害の影響によって、都市システムが既存産業の衰退に適応するための時間的猶予を奪い、都市の衰退傾向を加速させる可能性があることを明らかにした。また、適応開始後、災害に対する受容力が一時的に低下する可能性を示した。

参考文献

- [1] Fran H. Norris, Susan P. Stevens, Betty Pfefferbaum, Karen F. Wyche, and Rose L. Pfefferbaum. Community resilience as a metaphor, theory, set of capacities, and strategy for disaster readiness. *American Journal of Community Psychology*, Vol. 41, No. 1, pp. 127–150, Mar 2008.
- [2] 塩崎由人, 加藤孝明, 菅田寛. 自然災害に対する都市システムのレジリエンスに関する概念整理. 土木学会論文集 D3 (土木計画学), Vol. 71, No. 3, pp. 127–140, 2015.
- [3] Wolfram Research Inc. Mathematica 10.3, 2015.

第 5 章

まとめと今後の展望

5.1 まとめ

本論文は、序論である第 1 章を含め、5 章編成である。下記に第 2 章から第 4 章までの結論をまとめる。

第 2 章では、自然災害に対する都市システムの再構築力の概念について、レジリエンスの概念を中心に先行研究のレビューを行った。その結果、先行研究における再構築力の概念を、i) 安定力としての再構築力の概念、ii) 受容力としての再構築力の概念、iii) 適応力としての再構築力の概念の 3 つに分類した。各概念に関する先行研究の到達点についても整理した。

第 3 章では、「受容力としての再構築力」について、その構造を明らかにするため、まず、人口と資本を変数として、都市システムの状態の動的変化を記述する微分方程式モデルを構築した。次に、受容力が漸近安定な平衡点の吸引領域によって表されることを示した上で、都市システムの特徴が受容力に与える影響について、その構造を明らかにした。こうして明らかにした内容を基に、都市システムの受容力を制御する上での視点を整理し、それぞれの視点から受容力の制御の可能性について検討した。受容力を制御する上では、平時においては都市システム内部のパラメータだけでなく、外部システムの状態も考慮する必要があることが明らかとなった。また、被災直後に都市システムのパラメータを操作して、都市システムの受容力を一時的に高めることで、望ましくない状態に陥ることを防ぐ対策の可能性についても明らかとなった。

第 4 章では、まず、産業の衰退が基本都市モデルの生産の上限値 k_{max} の減少と表されるものとして、産業衰退モデルを構築した。産業衰退モデルを用いて、産業の衰退が都市システムの状態に与える影響を明らかにした。次に、産業の衰退への適応に求められる必要条件を整理した上で、産業の衰退に対する適応を組み込んだ産業適応モデルを構築し、都市システムの適応の可否に、既存産業の衰退速度、既存産業に代わる新規産業の生産性が影響を与えることを示した。災害が産業の衰退への適応に与える影響についても分析した。災害による影響は、都市システムが既存産業の衰退に適応するための時間的猶予を奪

い、都市の衰退傾向を加速させる可能性があることを明らかにした。また、適応開始後、適応の経過の中で災害に対する受容力が一時的に低下する可能性があることを示した。

5.2 今後の展望

本研究の今後の展望を下記に整理する。

一つ目の展望は、派生モデルの構築によりモデルの適用範囲を拡大することである。本研究で提案したモデルの適用範囲は、外部システムの吸引力が対象とする都市システムから影響を受けず、対象とする都市システムが被災しても外部システムは被災しない場合に限定される。対象とする都市システムが外部システムと相互作用がある場合、対象とする都市システムとともに外部システムが被災し、その復興過程が対象とする都市システムに影響を与える場合についても表現が可能となる派生モデルを構築することが考えられる。また、本研究では、人口の変動を社会増減に限定しているため、人口の自然増減も含む派生モデルを構築することも考えられる。以上のような派生モデルを構築することで、適用可能な状況が広がり、より多様な状況下における都市システムの再構築力の構造が明らかになることが期待される。

二つ目の展望は、モデルの説得性・理解度をさらに高めることである。本研究で提案したモデルは抽象性が高いが、本モデルを用いて過去の復興事例を解釈することで、モデルの説得性・理解度を高められると考えられる。また、過去の復興事例において潜在的に取り得た政策の代替案が復興過程に与える影響について検討することによって、次の災害に備えた復興政策の議論に寄与することも期待される。ただし、本モデルにおける変数およびパラメータは無次元量であるため、現実の事例についての普遍的な解釈には課題が残る。

三つ目の展望は、対象とする都市システムの領域のとり方による再構築力への影響を説明することである。例えば、複数の集落から成る都市を想定し、その中の一つの集落を対象とする都市システムと見なすとき、災害の被害によってその集落が消滅すれば、対象とする都市システムの受容力は失われたことになる。一方で、複数の集落から成る都市全体を対象とする都市システムと見なすとき、災害の被害によってそのうちの一つの集落が消滅しても他の集落が存続していれば、都市システムの受容力は保たれていると考えることもできる。今後、派生モデルの構築とあわせて、対象とする都市システムの領域のとり方が再構築力に影響を与える可能性についても考慮し、その影響を明らかにする必要がある。

四つ目の展望は、適応力としての再構築力の概念において、環境の変化に適応した望ましい状態を評価する軸に新たな価値観を加えることである。本研究のモデルでは、適応前においても、適応後においても、都市システムの状態を、一人当たり所得、生活サービス、混雑度の水準によって測っている。これらの評価軸は経済的、物質的な豊かさに基づく評価軸であり、従来型の価値観に基づく評価軸とも言える。これらの評価軸とは異なる、多様な価値観に基づく評価軸をモデルに加えることによって、多様な価値観を組み込んだ適応力の概念が構築されることが期待される。