集約型都市構造シナリオの概要と温熱環境評価の導入

将来の人口縮退下における集約型都市構造シナリオの設定とその評価 その1

IMPACT OF FUTURE COMPACT CITY SCENARIOS ON THERMAL ENVIRONMENT

Evaluation of compact city scenarios under future population decline Part 1

高取 千佳*, 五十嵐 千寛**, 中浦 寛介***, 玄 英 麗*

*Chika TAKATORI, Chihiro IKARASHI, Hirosuke NAKAURA
and Yingli XUAN*

Towards a population decline society along with the progress of low birthrate and longevity, the concept of a compact city is gathering attention for urban sustainability and a higher quality of life. However, there are no guidelines available for the specific population size and density. Several compact city scenarios for Aichi Prefecture were developed by considering population structure, disaster prevention/mitigation and infrastructure condition. This study is particularly to evaluate the impacts of urban compactification from the viewpoint of urban thermal environment in the summer of the 2050s by using a regional atmospheric model, WRF.

Keywords : *Population Decline, Hierarchical Urban Core, Compact City, Thermal Environment*

人口縮退, 階層的都市核, 集約型都市構造, 暑熱環境

1. はじめに

わが国は急激な人口減少時代に突入し、市街地密度の低下に伴う都市経営の効率性の低下や環境負荷の増大、生活環境の悪化等が課題として注目されている。こうした状況に対し、近年都市機能の集積により市街地の密度を高め、公共交通でつなぐ「コンパクト＋ネットワーク」による集約型都市構造が推進されている¹⁾。国土交通省は、都市計画区域を対象に、居住誘導区域と都市機能誘導区域を設定し、集約型都市構造へ転換していく立地適正化計画制度を平成26年度に策定し推進している。また集落地域に対しては、平成25年度より日常生活に不可欠な施設・機能や地域活動を行う場所を歩いて動ける範囲に集め、周辺集落とコミュニティバス等の交通ネットワークで結び集落地域の再生を目指す「小さな拠点づくり」を推進している。多くの市町村等の基礎自治体においても、総合計画や都市計画マスタープランにおいて将来人口フレームを基盤とした多核ネットワーク型の都市構造が目標とされている。しかしながら、(1) 人口フレームが市町村ごとに想定され、都道府県等の広域レベルでの人口密度増減の想定が不十分である点、(2) 人口密度や交通・下水道等のインフラ整備状況のみならず、緑地環境保全や災害危険度等の多面的評価に基づく都市構造の設定が十分に行われていない点、(3) こうした都市構造の実現に伴って、将来の広域的な環境影響評価等の検証は未だ十分になされていない点等の課題がある。

これまで、集約型都市構造への計画手法を提示した研究として、災害危険性と人口減少を考慮し土地利用対策を検討した研究²⁾や、

インフラ維持管理コスト、公共交通利便性等を合わせ、撤退・再集結地区特定法を行った研究³⁾等が見られるが、いずれも市町村レベルでの特定であり、県レベルでの人口密度の階層性を踏まえた設定は行われていない。また、坪井ら^{4,5)}は、広域都市圏を対象に、行政計画での方針をデータベース化し、集約化ルールを設定する手法を提案しているが、人口階層性と様々な評価軸の統合による代替シナリオの検討は行われていない。

一方、近年、地球温暖化やヒートアイランド現象⁶⁾による都市の温熱環境の悪化に対し、その緩和が可能な土地利用への知見が必要とされている。これまで、人口縮退下での将来温暖化が進行した場合の都市構造シナリオを設定し、その暑熱環境に与える影響に関して比較した研究としては、中部圏を対象に、将来2030・2050・2070年代における地球温暖化が進行した場合の津波や内水氾濫等の減災型都市構造シナリオを設定し暑熱環境の比較評価を行った研究⁷⁾、また、神奈川県を対象に将来コンパクト化シナリオを設定し気温と風の評価を行った研究⁸⁾等があるが、将来の人口減少を踏まえ大都市圏都心部から農村部までの人口の階層構造を詳細に分析した上で、多面的な評価に基づく集約型シナリオに対し、その温熱環境への影響について評価を行ったものは見られない。

そこで、本研究では、将来の人口縮退下における広域的な集約型都市構造の策定手法の提案とその暑熱環境評価を行うことを目的とし、下記三点を行う。第一に、県レベルでの人口密度の階層性について、市町村レベルでの現行の都市計画マスタープランにおいて示

* 名古屋大学大学院環境学研究科 助教・博士(工学)

** 大林新星和不動産㈱ 修士(工学)

*** 名古屋大学大学院環境学研究科 大学院生

Assist. Prof., Graduate School of Environmental Studies, Nagoya University, Dr. Eng.
Obayashi-Shinseiwa Real Estate Co, LTD., M. Eng.

Grad. Student, Graduate School of Environmental Studies, Nagoya University

された都市核との比較分析、考察を行う。第二に、人口密度の階層性を基準として 1) インフラ整備状況（交通・下水道・公共施設）、2) 緑地保全度、3) 災害危険度の三つの評価軸を踏まえた上で、将来 2050 年代を対象として人口集約型の複数のシナリオを設定する。第三に、以上で設定した各シナリオの都市構造が、将来温暖化の進行に伴う広域的な暑熱環境にいかに関与するかを、領域気象モデル WRF を用いた数値シミュレーションにより解析・評価を行う。

2. 対象地

本研究では愛知県全域を対象地とした（図 1）。愛知県は伊勢湾と三河湾に接し、県の東部で山岳地帯が多い一方、西部は平坦地で人口が集中している。太平洋側気候のため、夏は高温多湿の気候の特徴を有しており、将来の温暖化に伴う都市高温化に対する緩和・適応策が求められている⁸⁾。また、名古屋市は中部地方で最大の人口を擁する都市であり、愛知県には名古屋大都市圏都心部から地方都市中心部、農村部から中山間部までを含む 38 市 7 郡 14 町 2 村の自治体がある。県全体としては 2020 年に 7495 万人と人口のピークを迎え⁹⁾、2050 年には 6856 万人へと人口減少に転換することが予想され、現在既に人口減少に転じている市町村が存在し、人口減少に対して持続可能な都市構造への転換が求められている。

Fig. 1 Topography of Aichi prefecture

3. 人口密度の階層構造と都市核の比較分析

はじめに、県レベルでの人口密度の階層性と、各市町村の現行都市計画マスタープランにおいて設定されている都市核との比較分析を図 2 の手順において行った。愛知県では、2016 年度 6 月時点において 38 市 12 町 1 村において都市計画区域マスタープランが策定されており、その中で将来目標である「将来都市構造図」内において都市整備の拠点となる都市核(都市拠点)が示されている。

Fig. 2 Flowchart of comparative analysis between urban core and population density

Table 1 Hierarchical classification of urban core

Urban Core	Introduce the complex functions such as residential, commercial, office, culture and inter change, and administrative functions/ Induce the intensive use of land Other expressions : Symbol Core (Nagakute City)・Central Base (Mihama Cho・Matsukuwa Cho)・Central Core (Konan City・Togo Cho)・Central Commercial Base (Higashi-Ura Cho・Akuhi Cho)・Urban Zone (Okazaki City)・Urban Interchange Base (Kasugai City)・Central Residential Zone (Ofu City)・Central Residential Base (Ama City)・Vitality Base (Owari Asahi City)・Turnout Base (Iwakura City)・Turnout Interchange Base (Yatomi City)・Area Service District (Oguchi Cho)・Lide Base (Seto City)
District Core	Complement of urban cores/ main station and commercial facilities are located/ the functions such as medical care, welfare, and commerce which are necessary for citizen's daily life are promoted/ Induce the intensive use of land Other expressions : Associate City Base and City Area Base (Tahara City)・Base Area Core (Toyota City)・Turnout Base (Nagakute City・Nissin City)・Secondary Urban Base (Chita City・Ichinomiya City)・District Base (Tokai City・Inuyama City)・Sub Core (Konan City)・Local Commercial Base (Higashi Ura Cho)・Local Service Base (Ama City)・Citizen Information Service Vase (Miyoshi City),etc
Community Core	Complement of District Cores/ functions such as the local self-government, welfare, interchange, and administrative facilities are promoted which is the center of the communities Other expressions : Area Base (Okazaki City)・Area Core (Toyota City)・Life Interchange Base (Nagakute City・Inasawa City)・Community Base (Toyoyama Cho), etc

Fig. 3 Histogram of urban cores and population density

Table 2 Number of urban cores in each population density

	Population Density (People/ha)					
	0-10	10-40	40-50	50-100	100-	Sum
Urban Core	2(2.0%)	11(11.2%)	13(13.3%)	56(57.1%)	16(16.1%)	98(100%)
District Core	2(2.7%)	27(36.0%)	17(22.7%)	28(37.3%)	1(1.3%)	75(100%)
Community Core	12(14.6%)	45(54.9%)	14(17.1%)	11(13.4%)	0(0%)	82(100%)

Fig. 4 Distribution of urban cores and population density

まず、全市町村について、「将来都市構造図」の画像データを取り込み、拠点として示されている地点を抽出した上で、三段階の階層的都市核（都市拠点・地域拠点・地域生活拠点）の分類を行った。尚、一部市町村ごとに拠点名が異なっていたが、表 1 に該当する内容で各拠点についての説明がなされているかを分類の判断基準とした。こうして分類された都市核のポイントデータを、ArcGIS 上において変換を行った。

次に、このように市町村レベルにおいて設定された三段階の都市核と人口密度との比較分析を行った。具体的には、3 次メッシュ（1 km）内に、国土数値情報¹⁰⁾より 2010 年人口密度と、上記でデータ化した階層的都市核の有無を属性データとして与えた。人口密度の階級設定の上では、愛知県全域における人口密度別の都市核の出現頻度分布(図 3、表 2)と、図面上での人口密度と都市核の比較(図 4)により分類を行った。

図 3、表 2 を見ると、地域生活拠点は 10~40 人/ha のメッシュに 54.9 %と過半数が分布していた。これは主に、地域生活拠点は 40 人/ha 以上である DID 外の農村部や中山間部において、比較的人口が集中している地区に設定されるためと考えられる。また、都市拠点は 50-100 人/ha のメッシュに 57.1 %と過半数が分布し、100 人/ha 以上のメッシュに 16.1 %が分布していた（表 2）。図 4 を見ると、100 人/ha 以上の都市拠点は大都市圏中心部として人口規模の大きい名古屋市、50~100 人/ha の都市拠点は豊橋市や豊田市等の地方都市中心部等に分布していた。一方、地域拠点は 40 人/ha のメッシュで頻度のピークが見られ（図 3）、40-100 人/ha のメッシュに 60 %と過半数が、10-40 人/ha のメッシュ 36.0 %が分布していた(表 2)。これは、市町村の相対的な人口規模に応じて、都市拠点到次ぐ拠点として地域拠点が設定されるためと考えられる。人口規模の大きい(DID 面積が広い)市町村では、40-100 人/ha のメッシュにも地域拠点が多く設定される一方、人口規模の小さい(DID 面積が狭い)市町村では、10-40 人/ha のメッシュにも地域拠点が設定されていた（図 3）。

このように、各市町村の人口規模に応じて、設定された都市核の人口密度にはばらつきが見られたが、本研究では、県レベルで統合的に、人口密度の階層区分域を設定する。そこで、表 3 のように、10-40 人/ha を地域生活拠点、40-100 人/ha を地方都市中心とし 40-50 人/ha を地域拠点、50-100 人/ha を都市拠点、100~人/ha を大都市圏中心と分類した。以降ではこの区分域を基盤とし、階層的な集約化シナリオとして例えば人口密度 1~10 人/ha の区域を地域生活拠点以上の区域へ集約、1~40 人/ha の区域を地域拠点以上の区域へ集約等と設定する。

Table 3 Population density classification

Types		Density (people/ha)
—		1~10
Community Core		10~40
Center of Local City	District Core	40~50
	Urban Core	50~100
Center of Metropolitan Area		100~

Fig. 5 Number of stations in each mesh

Fig. 6 Number of interchanges in each mesh

Fig. 7 Number of bus stops in each mesh

Fig. 8 Area ratio of sewage system in each mesh

Fig. 9 Number of public facilities in each mesh

Fig. 10 Level of green preservation in each mesh

Fig. 11 Max immersion depth of Tsunami in each mesh

Fig. 12 Area ratio of landslide danger zone in each mesh

Fig. 13 Max seismic intensity in each mesh

4. 集約型都市構造シナリオの設定

4.1 評価軸のデータ整備と分類

将来の集約型都市構造シナリオを設定する上で、ArcGIS 上で三つの評価軸について、それぞれ3次メッシュ内に各種データ整備を行い、下記のように閾値設定を行った。

(1) インフラ整備状況

- ・交通：国土数値情報¹¹⁾より入手した鉄道駅数(図5)とバス停数(図6)、高速道路インターチェンジ数(図7)を各メッシュで整備
- ・下水道：愛知県水利事業概要図における下水道供給範囲のデータを ArcGIS 上においてポリゴン化を行い、各メッシュ内の面積割合50%を閾値として設定(図8)

- ・公共施設：国土数値情報¹¹⁾より入手した公共施設数を整備し、各メッシュ内の施設数1を閾値として設定(図9)

(2) 緑地保全度

- ・緑地保全度：国土数値情報¹¹⁾より入手した森林地域と自然公園を整備し、各メッシュ内の(保全度2:自然公園面積割合50%以上、保全度1:森林地域面積50%以上)を閾値として設定(図10)

(3) 災害危険度

- ・津波：平成23年度～平成25年度愛知県東海地震・東南海地震・南海地震等被害予測調査結果より、津波最大浸水深データを入手し、(危険度3:3.0m / 危険度2:1.7-3.0m / 危険度1:0.3-1.7m / 危険度0:-0.3m)として各メッシュで閾値を設定(図11)
- ・土砂災害：国土数値情報¹¹⁾より土砂災害危険区域の面積割合を整備し、各メッシュで50%を閾値として設定(図12)
- ・地震：平成23年度～平成25年度愛知県東海地震・東南海地震・南海地震等被害予測調査結果想定最大震度(危険度3:7- / 危険度2:6-7 / 危険度1:5-6 / 危険度0:5)を各メッシュで閾値を設定(図13)

4.2 将来集約型都市構造シナリオの設定

(1) 人口移動方法

将来の集約型都市構造シナリオとして、現状土地利用(Case 1)と、人口移動に伴う都市集約化を図った4つのシナリオ(Case 2～Case 5)を作成した。まず、人口に関しては、国土数値情報将来人口推計メッシュ(2050年)¹⁰⁾を用い、(Case 1)を設定した。表1を見ると、1~10人/haの人口低密度のメッシュが都市周縁部に広く分布していた。次に将来人口推計の総人口を一定とした上で、各シナリオ(Case 2～Case 5)において、集約・縮退の人口配分を行った。人口移動方法としては、3章で設定した人口密度の階層的な区分域と、4.1で設定した評価軸に基づき、下記の通り3段階の誘導元・誘導先のメッシュを設定し、2050年の人口配分・人口移動を行う(図14)。

Fig. 14 Methodology of population induction

- ① 積極的人口撤退地域(Active Population Withdrawal Mesh (以下ではAW))の設定：人口を移動させるメッシュの設定
- ② 消極的人口撤退地域(Passive Population Withdrawal Mesh (以下ではPW))の設定：人口移動先から外すメッシュの設定
- ③ 人口誘導地域(Population Induction Mesh (以下ではPI))の設定：AWとPWを除く全メッシュは、PI(人口移動の対象先となるメッシュ)とした。
- ④ 2050年予測人口をもとに、AWメッシュ内の人口を、PIメッシュへと移動・等配分を行う。

(2) 各CaseにおけるAW、PW、PIの条件

地域生活拠点以上への集約化シナリオ(Case 2)は、市民の日常生活圏域の中心となり、行政施設を中心に地域自治・福祉・交流等の機能が整備されコミュニティづくりが可能となる地域へと人口誘導し、その内生活利便性やインフラ状況が悪いあるいは緑地保全度や災害危険度が高い地域は誘導先から外す(但し、既に人口が分布している場合は積極的な撤退は行わない)ことを目的としている。そこでまず、2050年人口予測において、人口密度1~10人/haの地域(AW)から、10~40人/haの地域生活拠点レベル以上(PI)へと集約化を行った。さらにその際、住環境の利便性・快適性を踏まえ日常生活において不可欠なバス停や高速道路のインターチェンジが0の地域、公共下水道が整備されていない地域、公共施設数が0の地域については、地域生活拠点以上のレベルであったとしても人口誘導先から外す地域(PW)とした。尚、一部人口密度1~10人/haであったとしても、上記インフラが整備されている地域については、積極的人口撤退(AW)無しとしている。さらに、住環境としての安全性を踏まえ、災害危険度が津波浸水深・土砂災害危険区域・想定最大震度のいずれかが3以上の地域、また緑地保全度2以上の地域についても、人口誘導先から外す地域(PW)とした。

地域拠点以上への集約化シナリオ(Case 3)では、地域生活拠点レベル以下の地域に対し、主要な駅や商業施設が立地し、市民の日常生活において不可欠な医療・福祉・商業機能が整備された地域へと人口誘導し、その上で交通利便性やインフラ状況が悪いあるいは災害危険度が高い地域は誘導先から外すことを目的としている。そこでまず、2050年人口予測において、人口密度1~40人/haの地域(AW)から40~100人/haの地域拠点レベル以上(PI)への集約化を行った。Case 3もCase 2と同様に、市民の日常生活における交通利便性・快適性を踏まえ主要な駅が0の地域、公共下水道が整備されていない地域については、地域拠点以上のレベルであったとしても人口誘導先から外す地域(PW)とした。さらに、住環境としての安全性を踏まえ、災害危険度が津波浸水深・土砂災害危険区域・想定最大震度のいずれかが3以上の地域、また緑地保全度2以上の地域についても、人口誘導先から外す地域(PW)とした。

減災・防災重視シナリオ(Case 4)では、災害(特に津波災害)上危険度の高い地域から、危険度の低い地域へ積極的に人口を誘導し、その内生活利便性やインフラ状況が悪いあるいは緑地保全度が高い地域は誘導先から外すことを目的としている。そこでまず、2050年人口予測において、災害危険度・津波浸水深が2以上の地域については、積極的人口撤退区域(AW)を設定し、また土砂災害危険区域・想定最大震度2以上の地域についても、消極的人口撤退区域(PW)

Table 4 Urban Compact Scenarios in Each Case

		1~10 (people/ha)	10~40 (people/ha)	40~50 (people/ha)	50~100 (people/ha)	100~ (people/ha)
Future Scenarios						
		(Case 1) Present land use	(Case 2) Aggregation of people more than in community core level	(Case 3) Aggregation of people more than in district core level	(Case 4) Disaster prevention/ mitigation	(Case 5) Prioritization of infrastructure and green conservation
Viewpoints of aggregation		Population predicted value in 2050	People in the area of 1~10 people/ha in 2050 are aggregated more than in the community core level	People in the area of 1~40 people/ha in 2050 are aggregated more than in the district core level	People in the disaster danger area are aggregated in the safe area	In addition to Case2, people in the lack of infrastructure and green preservation area are moved
(1) Infrastructure Development Situation Level	Stations	—	—	If the number of the train stations is 0, mesh is not selected as the population destination (PW)	If the number of the train stations is 0, mesh is not selected as the population destination (PW)	If the number of the train stations is 0, population in the mesh are moved (AW)
	Inter-changes	—	If the number of the bus stops or interchanges is 0, mesh is not selected as the population destination (PW)	—	—	—
	Sewage System	—	If the sewage system is not developed, mesh is not selected as the population destination (PW)	If the sewage system is not developed, mesh is not selected as the population destination (PW)	If the sewage system is not developed, mesh is not selected as the population destination (PW)	If the sewage system is not developed, population in the mesh are moved (AW)
	Public Facilities	—	If the number of public facilities is 0, mesh is not selected as the population destination (PW)	—	—	If the number of public facilities is 0, population in the mesh are moved (AW)
(2) Green Conservation Level	Forest and Natural Park	—	If the green conservation level is more than 2, the mesh is not selected as the population destination (PW)	If the green conservation level is more than 2, the mesh is not selected as the population destination (PW)	If the green conservation level is more than 2, the mesh is not selected as the population destination (PW)	If the green conservation level is more than 1, population in the mesh are moved (AW)
(3) Danger level of Disasters	Tsunami	—	If the danger level is more than 3, the mesh is not selected as the population destination (PW)	If the danger level is more than 3, the mesh is not selected as the population destination (PW)	If the danger level is more than 2, population in the mesh are moved (AW)	If the danger level is more than 2, the mesh is not selected as the population destination (PW)
	Landslide	—	If the danger level is more than 3, the mesh is not selected as the population destination (PW)	If the danger level is more than 3, the mesh is not selected as the population destination (PW)	If the danger level is more than 2, the mesh is not selected as the population destination (PW)	If the danger level is more than 3, the mesh is not selected as the population destination (PW)
	Earthquake	—	If the danger level is more than 3, the mesh is not selected as the population destination (PW)	If the danger level is more than 3, the mesh is not selected as the population destination (PW)	If the danger level is more than 2, the mesh is not selected as the population destination (PW)	If the danger level is more than 2, the mesh is not selected as the population destination (PW)
Number of Wasteland Meshes (Conversion Ratio from Urban Meshes to Wasteland Meshes)		659	1472 (10 %)	2938 (52 %)	1466 (31 %)	2683 (36 %)

として設定し、危険度の低い地域へと集約化を行った。さらに、市民の日常生活における交通利便性や快適性を踏まえ、主要な駅が 0 の地域、公共下水道が整備されていない地域、また緑地保全度 2 以上の地域についても人口誘導から外す地域(PW)とした。

地域生活拠点以上への集約化+インフラ・緑地保全重視シナリオ (Case 5)では、Case 2 に加え、インフラ整備状況が悪い地域、あるいは緑地保全度の高い地域については、積極的に撤退を行い、さらに危険度の高い地域についても比較的重要視し、消極的撤退を行うバランス型のシナリオを作成することを目的としている。そこでまず、2050 年人口予測において、人口密度 1~10 人/ha の地域 (AW) から、10~40 人/ha の地域生活拠点レベル以上 (PI)へと集約化を行った。さらに、住環境の利便性・快適性を踏まえ主要な駅が 0 な地域、公共下水道が整備されていない地域、公共施設数が 0 の地域については、地域生活拠点以上のレベルであったとしても積極的に撤退を行う地域 (AW)とした。災害危険度が津波浸水深 2 以上、土砂災害危険区域 3 以上、想定最大震度 2 以上の地域についても、人口誘導先から外す地域 (PW)とした。以上より、Case 別人口密度別のメッシュ数は、図 15 となった。

Fig. 15 Number of meshes in population density

5. 温熱環境予測

愛知県の将来 2050 年代夏季を対象とし、その温熱環境予測は、領域気象モデル WRF (Weather Research and Forecasting)により行った。WRF は米国大気研究センター(NCAR : National Center for Atmospheric Research)と米国環境予測センター(NCEP : National Centers for Environment Projection)を中心として開発され、天気予報 (NMM: Nonhydrostatic Mesoscale Model)と学術研究 (ARW: Advanced Research WRF) の両方に対応できる¹²⁾。近年では、気候・気象学の分野だけでなく、建築分野を始めとする様々な学問分野で利用されてきている。本研究では、WRF ver. 3.0.1.1 の ARW を使用した。

5.1 シミュレーションの概要

図 16 にシミュレーションのフローチャートを示す。本研究では 2050 年代夏季(8 月)を対象期間としている。その将来予測を実施するために、対象年代の地球温暖化の影響を考慮することが可能となる Kimura ら¹³⁾の擬似温暖化手法を導入した。擬似温暖化手法は、全球気候モデル(地球全体の気候予測を行うシミュレーションモデル)の結果をより小さなスケールのシミュレーション(ここでは

WRF)へダウンスケール(空間詳細化)を行う力学的ダウンスケーリング手法の 1 つである。ここで、全球気候モデルの結果は、温室効果ガス排出シナリオとして RCP (Representative Concentration Pathways : 代表的濃度経路) 8.5 シナリオ¹⁴⁾を適用した GFDL-CM3 の結果を用いている。RCP シナリオは IPCC 第 5 次評価報告書¹⁵⁾から新しく採用された温室効果ガス排出シナリオで、RCP2.6、RCP4.5、RCP6.0、RCP8.5 の 4 つがある。このうち、RCP8.5 シナリオは将来的に最も地球温暖化が進むシナリオとなっている。全球気候モデルは世界各国で様々なモデルが存在するが、どのような温室効果ガス排出シナリオを選択し、どのような全球気候モデルを用いるかによっても、将来予測結果は異なってくることに注意が必要である。

上述した擬似温暖化手法を用いて全球気候モデルの結果が WRF へダウンスケールされることになるが、具体的には、全球気候モデルの結果として得られる①水平方向風速、②温位、③ジオポテンシャル高度、④海面水温度、⑤地表面温度の 5 つの物理量を WRF の 3 段階ネスティング領域(図 17)の初期条件(第 1 領域~第 3 領域)と境界条件(第 1 領域のみ)に受け渡している(実際には、将来気候値と現在気候値の気候差分を受け渡しているが、詳細は文献^{7), 13)}を参照)。WRF の主となる解析領域は、愛知県全域を含む水平 120 km × 120 km の範囲の第 3 領域(水平格子解像度は 1 km × 1 km)である。また、WRF では、都市における運動量輸送・熱輸送・湿気輸送などを模擬するための都市キャノピーモデルを導入しており、都市のヒートアイランドの影響をより正しく再現することが可能となる。本研究では、都市キャノピーモデルとして、Kusaka ら¹⁶⁾の単層都市キャノピーモデルを用いた。

Fig. 16 Flowchart of future projections

Fig. 17 Computational domains

5.2 解析ケースの初期条件

人口移動による都市メッシュでの人口増加は、人工排熱量の増加・建物の高層化によって表現した。具体的には、国土数値情報細分メッシュデータ¹¹⁾を使用し、都市メッシュについて、まず愛知県の人口密度が100人/ha未満と100人/ha以上、愛知県外の3区分を行った。次に、各都市メッシュにおいて、現状土地利用(Case 1)の全都市メッシュ平均の人口密度(36.6人/ha)に対する平均人口密度の増加率を求めた。その値を現状土地利用(Case 1)における全都市メッシュ平均の人工排熱量(15 W/m²)と平均建物高さ(9 m)に乗じることで、人口密度の増加に伴う人工排熱量の増加・建物の高層化を考慮した。現状土地利用(Case 1)における全都市メッシュ平均の人工排熱量(15 W/m²)は、萱場ら¹⁷⁾の手法に基づいて保刈ら¹⁸⁾が作成したデータを用いて同領域内全都市メッシュで平均した値を用いた。愛知県外の都市メッシュについては、上述した人口密度を設定していないため、現状土地利用の平均値(人工排熱量15 W/m²、平均建物高さ9 m)と同じとした。人口撤退後、人のいなくなった都市メッシュは、その土地利用を荒地(蒸発効率0.15、アルベド0.19、放射率0.96、熱慣性0.03 cal/cm² K s^{1/2})へ置換し、都市を縮小した。また、都市メッシュ以外においても人口撤退が起きた場合、その土地利用を荒地へ置換した。荒地は緑地(蒸発効率0.3、アルベド0.2、放射率0.95)に比べ、蒸発効率は小さくアルベドや放射率は同程度である。対象とする将来2050年代の地球温暖化による影響を明らかにするため、現状土地利用を用いた2010年8月1ヶ月(Case 0)の解析も行った。

5.3 シミュレーションの結果と考察

(1) 現在気候の再現性(WRFの予測精度検証)

図18は、8月1ヶ月時刻別平均した気温の日変化について、名古屋地方気象台におけるアメダス観測値と同気象台を含むメッシュのWRFのシミュレーション結果(Case 0)を比較したものである。アメダス観測値は地上1.5m、WRFによるシミュレーション結果は地上2.0mにおけるものである。WRFのシミュレーション結果は、アメダス観測値に見られる気温の日変化の特徴を精度良く再現している。アメダス観測値に対する誤差は、最大2.72%である。

Fig. 18 Comparison of the diurnal variation in the monthly averaged air temperature at Nagoya between observation and WRF simulation

(2) 地球温暖化が愛知県の温熱環境に及ぼす影響

図19は、愛知県の陸域全メッシュの空間平均+8月1ヶ月時刻別平均した気温(地上2 m)に関して、Case 0 (2010年、現状土地利用)

とCase 1 (2050年代、現状土地利用)を比較したものである。1日を通じて、Case 1はCase 0に比べ、2.5℃～2.8℃気温が高くなっている。この気温差が2050年代の地球温暖化による気温上昇を示している。

Fig. 19 Diurnal variations of the space and monthly averaged air temperature in Aichi at 2 m height

(3) 愛知県の温熱環境への影響

図20は、愛知県の陸域全メッシュの空間平均+8月1ヶ月時刻別平均した気温(地上2 m)に関して、Case 2～Case 5 (2050年代、各都市集約化シナリオ)とCase 1 (2050年代、現状土地利用)との差の日変化を示している。全てのケースでCase 1より気温が低下していることが確認できる。全時間帯(すなわち8月1ヶ月平均)の平均気温低下と最大の気温低下は、Case 2 (2050年代、地域生活拠点以上への集約)が0.08℃と0.11℃、Case 3 (2050年代、地域拠点以上への集約)が0.33℃と0.42℃、Case 4 (2050年代、減災・防災重視)が0.15℃と0.20℃、Case 5 (2050年代、インフラ・緑地環境重視)が0.23℃と0.29℃である。これらの気温低下量はCase 2、Case 4、Case 5、Case 3の順に大きくなっている。これは、都市メッシュが荒地へ置換された比率の大きい順となっている(表4参照)。愛知県全体の温熱環境においては、人口を移動させたことによって都市メッシュが荒地へ置換され、都市が縮小したことによる影響が大きい。

Fig. 20 Diurnal variations of the differences in the space and monthly averaged air temperature in Aichi at 2 m height from Case 1

(4) 名古屋市の温熱環境への影響

図21は、名古屋市内の全都市メッシュの空間平均で8月1ヶ月時刻別平均した気温(地上2 m)に関して、Case 2～Case 5とCase 1の差の日変化を示したものである。Case 2では顕著な気温差は見られ

Fig. 21 Diurnal variations of the differences in the space and monthly averaged air temperature in Nagoya at 2 m height from Case 1

ないが、Case 3、Case 4、Case 5 においては比較的大きな気温差が生じている。全時間帯平均すると、それぞれ -0.26°C 、 -0.17°C 、 -0.17°C となっている。これは、5.3(2)でも述べたように、Case 3～Case 5 では都市域が荒地に多く置換されているため、日中午後の伊勢湾からの海風(南風)と夜間の南東風が都心部に進入しやすくなり、気温低下をもたらしたと考えられる(図 22、図 23 参照)。特に、Case

Fig. 22 Differences in the monthly averaged air temperature at 2 m height from Case 1

3 では、名古屋の南部・南東部において都市メッシュを荒地に置換している領域が最も多いため、気温低下が最も顕著となっている(表 4、図 22 図 23 参照)。Case 4 と Case 5 は、都市メッシュから荒地への置換率はそれぞれ 31% と 36% であるが、気温低下量は同程度である。

(5) 人口密度に対する温熱環境評価

図 24 は、人口密度分類ごとに Case 1～Case 5 それぞれの 8 月の 1 ヶ月間で平均した気温(地上 2 m)別のメッシュ数の割合を示したものである。尚、図中の人口密度分類は、都市区分域(表 3)と対応している。結果、人口密度 10-40 人/ha の地域生活拠点レベルでは、Case 1 は $31\sim 32^{\circ}\text{C}$ のメッシュ割合が 41.4 % と最も大きい。次に、 $30\sim 31^{\circ}\text{C}$ のメッシュ割合が 30.9% である。以上のメッシュ割合の順は、Case 2 と Case 5 も同様である。Case 4 のみが $30\sim 31^{\circ}\text{C}$ のメッシュ割合が 48.5% と最も大きく、ついで $31\sim 32^{\circ}\text{C}$ が 38.2% と比較的低温化している(Case 3 は該当メッシュ無し)。地方都市中心部(40-50 人/ha の地域拠点レベル、50-100 人/ha の都市拠点レベル)では、Case 1 と Case 2 において 32°C 以上の高温のメッシュ割合が多い。Case 3～Case 5 では 32°C 未満の比較的低温のメッシュ割合が増加している。特に、Case 4 では 32°C 以上のメッシュ割合が最も減

Fig. 23 Differences in the monthly averaged wind velocity at 2 m height from Case 1

Fig. 24 Frequency percentage of meshes by temperature at 2 m height

Fig. 25 Histogram of population corresponding to air temperature at 2 m height

っている一方、31~32 °Cのメッシュ割合は最大、Case 3~Case 5 は 31°C未満の比較的低温のメッシュ割合が増加している。100~人/ha の大都市圏中心部レベルでは、Case 1 の結果は、31~32 °Cのメッシュ割合が 51.5 %と最も大きく、ついで 32~33 °Cのメッシュ割合が 48.5 %ある。Case 2~Case 5 では、いずれも Case 1 より低温化している。Case 3 は 31~32 °C以上のメッシュ割合が 50 %である一方、30~31 °Cのメッシュ割合が 22 %、32-33 °Cのメッシュ割合が 26.4 %と顕著に低温化している。これは、5.3 で述べた名古屋の気温上昇緩和によるものと考えられる。

以上より、地域生活拠点レベルでは Case 4 が、大都市圏中心部レベルでは Case 3 が最も低温化することが明らかとなった。これは、横山ら⁸⁾による既往研究と一致しており、市街地の密度増加による気温上昇よりも、周囲が自然関連地被に変化することで、温度境界層の分断によるヒートアイランドの低減の影響が大きいと考えられる。地方都市中心部では、Case 3~Case 5 が低温化するものの、Case 4 は 32~33°Cの比較的高温なメッシュ割合が最も減り、Case 3 と Case 5 では 29~31 °Cの比較的低温なメッシュ割合が増加する等、それぞれの気温低下の傾向が異なっている。

Case 1~Case 5 の 8 月の 1 ヶ月間で平均した気温(地上 2m) 別の人口(図 25)を見ると、Case 3 と Case 4 が Case 1、Case 2、Case 5 よりも低温を享受する人口が多く、また Case 4 が 32~33°Cの人口が最も少ない。減災・防災のみならず暑熱環境改善の点からも、Case 4 シナリオは効果があることが示唆される。

6. 結論

本研究では、1) 県レベルでの人口密度の階層性について分類を行い、2) 多面的評価軸と合わせて複数都市集約化シナリオを導入し、3) 各シナリオが将来 2050 年代の夏季の暑熱環境に及ぼす影響を、領域気象モデル WRF を用いて予測・評価したものである。本研究により得られた知見を以下に示す。

- (1) 市町村の現行都市計画マスタープランにおいて示された都市核との比較分析から、県レベルにおいて階層的な人口密度設定が得られた。これに基づき、県レベルにおいて統合的な集約型都市構造の人口移動シナリオ設定が可能となった。
- (2) 将来 2050 年人口減少に対し、階層的な人口密度による都市集約化を基盤とし、さらに 1) インフラ整備状況(交通・下水道・公共

施設)、2) 緑地保全度、3) 災害危険度の三つの評価軸に基づき、①積極的人口撤退地域、②消極的人口撤退地域、③人口誘導地域の設定により、将来複数シナリオを描く方法論について示した。今後の課題としては、評価軸の更なる改善（産業構造や農地保全度等を考慮する）や、人口誘導地域の設定の上での評価軸間の重みづけの検討が必要である。

(3) 各シナリオの将来 2050 年における暑熱環境を領域気象モデル WRF を用い温暖化の影響を考慮した上で予測・評価した結果、Case 2~Case 5 のいずれのシナリオにおいても、現状土地利用に比べ気温上昇緩和が見込めるが、依然として将来の気温上昇に占める地球温暖化の影響は大きいことが確認された。より集約度の高い Case 3 地域拠点以上への集約化シナリオが、大都市圏中心部メッシュで最も現状土地利用よりも低温化する傾向を示した。これは名古屋周辺への海風の影響であることが示唆された。一方で、Case 4 減災・防災重視シナリオが全体人口や、地域生活拠点~地方都市中心部メッシュでは、現状土地利用よりも低温化する割合が高く、減災・防災のみならず暑熱環境改善の点からも効果があることが示唆された。

7. 展望

このように、人口密度との比較の観点から、都市集約型シナリオの広域的な環境影響評価を行うことが可能となった。今後は、夜間・昼間人口の分布による詳細な人工排熱等初期条件の設定や、解像度の高い生活環境の暑熱環境影響評価、暑熱環境以外の住環境における多面的な影響評価を行い、集約型都市構造への更なる知見を得ることが課題である。

参考文献

- 1) Ministry of Land, Infrastructure and Transport, City Bureau, City planning section : Towards the formation of the compact city, 2015.
- 2) 境 駿介, 辛島 一樹, 齋藤 結, 大貝 彰: 災害危険性と人口減少を考慮した都市計画マスタープラン土地利用方針検討支援手法の試験的開発, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 都市計画, pp.1007-1008, 2015.
- 3) 真田 健助, 加知 範康, 高木 拓実, 林 良嗣, 加藤 博和: 都市空間コンパクト化のための撤退・再集結地区特定に関する基礎的研究, 土木計画学研究・講演集, No. 29, CD-ROM, 2004.
- 4) 坪井 志朗, 鵜 心治, 小林 剛士: 広域都市圏を対象とした集約型都市構造モデルの構築とその評価に関する研究, 日本建築学会中国支部研究報告集, 37, pp.637-640, 2016.
- 5) 坪井 志朗, 鵜 心治, 小林 剛士, 西村 祥: エキスパートシステムによる集約型都市構造の可視化と評価手法に関する研究, 日本建築学会計画系論文集, 82, 731, pp.105-114, 2017.1.
- 6) 環境省: ヒートアイランド対策大綱, 2013.
- 7) Kuroki, M., Iizuka, S., Ito, S., Kusaka, H., Hara, M.: Comparison of future projections of thermal and wind environments in the Nagoya metropolitan area in the summers of the 2030s, the 2050s, the 2070s, and the 2090s based on two IPCC SRES scenarios- Numerical study on thermal environment in the Nagoya metropolitan area by using WRF (Part3), Journal of Architectural Institute of Japan, 77, 678, pp.689-697, 2012, 8.
- 8) Yokoyama, M., Matsuo, K., Tanaka, T., Sadohara, S.: A study on the urban climate under the compact city scenario by using meso-scale meteorological model -Scenario evaluation in Kanagawa Prefecture -, Journal of the City Planning Institute of Japan, 49(3), pp.915-920, 2014.
- 9) Iizuka, S., Xuan, Y., Kondo, Y.: Impacts of disaster mitigation/prevention urban structure models on future urban thermal environment, Sustainable Cities and Society, 19, pp.414-420, 2015.
- 10) National Institute of Population and Social Security Research: National census, 2015.
- 11) National Land Information Division, National Spatial Planning and Regional Policy Bureau, 2016.
- 12) <http://www.wrf-model.org/index.php>.
- 13) Kimura, F., Kitoh, A.: The Final Report of the ICCAP, Research Institute for Human and Nature (RIHN), Kyoto, Japan, 2007.
- 14) Van Vuuren, D. P., Edmonds, J., Kainuma, M., Riahi, K., Thomson, A., Hibbard, K., Hurtt, G. C., Kram, T., Krey, V., Lamarque, J.-F., Masui, T., Meinshausen, M., Nakicenovic, N., Smith, S. J., Rose, S. K.: The representative concentration pathways: An overview, Climatic Change, 109, 1-2, pp.5-31, 2011.11.
- 15) IPCC : Climate Change 2014: Synthesis Report, IPCC Fifth Assessment Report, 2014.11.
- 16) Kusaka, H., Kondo, H., Kikegawa, Y., Kimura, F.: A simple single-layer urban canopy model for atmospheric models: Comparison with multi-layer and slab models, Boundary-Layer Meteorology, 101(3), pp.329-358, 2001.
- 17) 萱場 互起, 青柳 暁典, 高橋 俊二: 重回帰分析による人工排熱量の推定, 測候時報, 77(4-6), pp.137-153, 2010.
- 18) Hokari, K., Kondo, H., Kikegawa, Y., Ihara, T.: Estimation and sensitivity check of the anthropogenic heat in Nagoya city, Journal of Heat Island Institute International, 10, pp.6-15, 2015.

IMPACT OF FUTURE COMPACT CITY SCENARIOS ON THERMAL ENVIRONMENT

Evaluation of compact city scenarios under future population decline Part 1

*Chika TAKATORI**, *Chihiro IKARASHI***, *Hirosuke NAKAURA****
and *Yingli XUAN**

* Assist. Prof., Graduate School of Environmental Studies, Nagoya University, Dr. Eng.

** Obayashi-Shinseiwa Real Estate Co, LTD., M. Eng.

*** Grad. Student, Graduate School of Environmental Studies, Nagoya University

Towards a population decline society along with the progress of low birthrate and longevity, the concept of a compact city is gathering attention for urban sustainability and a higher quality of life. However, there are some problems: there are no guidelines available for the specific population size and density. And various evaluation points such as infrastructure development, green conservation, and disaster mitigation/prevention are not considered enough in the policy level. And the regional environmental impact of the compact city policy is not thoroughly verified. In this study, the following three points were conducted.

First, the hierarchical population density in prefecture level was examined by comparing to urban cores shown in the city planning master plans made in the local government of municipalities. The focused site is Aichi prefecture. The urban cores in the master plans had different scales from each other according to the scale of municipalities in the prefecture. As a result, four hierarchical population densities were obtained (10-40 people/ha: Community Core, 40-50: District Core, 50-100: Urban Core, and 100+: Center of Metropolitan area). According to this classification, to make the compact scenarios in prefecture level was enabled.

Secondly, the methodology of setting several compact city scenarios for Aichi Prefecture were developed by considering evaluation indexes: population hierarchical structure, infrastructure condition, green conservation situation, and disaster prevention/mitigation. According to them, all meshes in Aichi prefecture were classified into Active Population Withdrawal Meshes (AW), Passive Population Withdrawal Meshes (PW), and Population Induction Meshes (PI) and the population was moved from AW to PI on condition that the total number of population in 2050 was constant. As a result, five scenarios were set: (Case 1) Present land use, (Case 2) Aggregation of people more than in community core level, (Case 3) Aggregation of people more than in district core level, (Case 4) Disaster prevention/mitigation, and (Case 5) Prioritization of infrastructure and green conservation. In the next phase of this study, the improvement of evaluation indexes such as industrial structure, farmland conservation, and preservation of historic city and the weighting processing between the evaluation indexes should be considered.

Thirdly, the impacts of five urban compact scenarios were evaluated from the viewpoint of urban thermal environment in the summer of the 2050s by using a regional atmospheric model, WRF. As a result, the space and monthly averaged air temperature in Aichi at 2m height was lower in case 2~5 than case 1. However, the global warming impact was still stronger impact on thermal environment than that of compact scenarios. The meshes which have 100-people/ha: Center of Metropolitan area Level had the lowest air temperature in (Case 3) Aggregation of people more than in district core level scenario, in which the sea breeze from Ise bay had a cool effect on Nagoya city because the southern area of Nagoya city was set as grassland in case3. On the other hands, the meshes which had 10-40 people/ha: Community Core Level or 40-100 people/ha: Center of Local City Level had the lowest air temperature in (Case 4) Disaster prevention/ mitigation scenario and the ratio of population also had the lowest air temperature in Case 4. This showed that the scenario for disaster prevention and mitigation also had the effect of the improvement of hot environment. In the next phase of this study, the more integrated evaluation of regional environmental impact of compact city scenarios should be conducted.

(2016年9月10日原稿受理, 2017年4月4日採用決定)