

領域気象モデルWRFを用いた住環境における
自然エネルギー利用可能性の地理空間分析

Geospatial Analysis for the Availability of Natural Energy in Residential Environment
Using WRF Model

高知工科大学 大学院修士課程
工学研究科基盤工学専攻
社会システム工学コース
社会気象工学研究室 1245066
石川恵大

指導教員 赤塚慎
副指導教員 渡辺菊真
論文副審査 高木方隆

2022年1月19日

論文要旨

近年、温室効果ガスの排出量増加に伴い、地球環境負荷の増大が問題視されている。我が国における部門別二酸化炭素排出量推移に着目すると、家庭用のエネルギー消費を含む民間部門におけるそれは長期的な増加傾向にあり環境負荷の低減には一層の努力が求められる。こうした中、自然エネルギーの活用による省エネルギーの推進が地球温暖化への緩和策として極めて重要な対策だと言われている。気象データを用いた住環境における自然エネルギー利用については武政⁴⁾、小玉⁵⁾らの建築設計用気候マップや西川³⁾の自然エネルギー活用のための気象マップ、松本⁶⁾らの東北地方を対象とした環境設計用の地域区分があげられるが、定点観測データの空間補完によるものが多く、土地利用や地形による微気候の再現が困難であるという問題点がある。こうした問題を解決するために、数値計算を用いた地域気候の再現が試みられている。例えば建築分野への適応として竹林⁷⁾の大阪地域における都市環境気候図や飯塚⁸⁾らの名古屋を対象とした温熱環境の現状再現と将来予測が挙げられるが、自然エネルギーの高度利用を主目的とした事例はほとんど見られない。本研究では住環境における省エネルギー推進を見据え、地域ごとの自然エネルギー利用可能性の検討を行った。都市スケールでの自然エネルギーの高度利用検討のため、対象地域の気象データを再現し、そのデータを用いての地域の類型化、比較により、地域ごとの自然エネルギー利用可能性の検討を行った。気象要素の再現は領域気象モデルWRF¹⁰⁾を用いた。対象領域は高知市を中心とした30 km × 30 kmの領域で、2016年8月および2015年1月のそれぞれ1ヶ月間の計算を行った。類型化に際してはK-means++法¹⁹⁾を用いた。使用した気象要素はWRFにより再現された、夏期夜間平均風速、夏期積算日射量、冬期積算日射量、冬期平均気温である。類型結果として4つのクラスターが生成され、クラスターごとの気象的特徴から自然エネルギー利用可能性を解釈した。各気象要素の相互関係によりクラスターごとの気象的特徴を次のように解釈した。ラベル0は対象領域の北部、特に山間部に分布していた。冬期の日射量はやや大きく、昼光利用は期待できるが、気温が低く、日射熱利用のためには蓄熱躯体の採用や適切な断熱等の工夫が必要なエリアだと考えられる。また、夏期の風速が小さく、自然風利用はあまり期待できないエリアである。ラベル1は特に夏期の風速が大きく、自然風利用が大いに期待できるエリアである。一方で冬期の気温、日射量ともに小さく、暖房負荷の低減に対して対策が必要である。ラベル2は冬期において特に日射量が大きく、昼光利用が期待できるエリアである。気温も高いため、日射熱利用、太陽熱給湯等も期待できる。さらに夏期においても日射量が大きいため、太陽光発電が期待でき、風速もそこそこ大きいため、自然風利用に期待できる。ラベル3は冬期において気温が高く暖房負荷は比較的抑えられるが、日射量が小さく、昼光利用はあまり期待できないエリアである。また、夏期においては風速が小さく、自然風利用は難しいと考えられる。次に領域内の市街化区域（高知市、南国市、香美市、いの町）にてクラスターの集計、および各気象要素を比較し、地域ごとの自然エネルギー利用可能性を評価した。高知市市街地では日射、自然風の利用が比較的難しいラベル3がのエリアが特に広く分布していた。一方で昼光利用、日射熱利用、太陽熱給湯、太陽光発電、自然風利用に比較的期待できるとされるラベル2のエリアは地域内の南部および西部に分布していることが確認された。また、南国市市街地では日射、自然風の利用が比較的難しいラベル3のエリアが7割を占めていることが確認された。香美市市街地では南国市と同様に日射、自然風の利用が比較的難しいとされるラベル3のエリアが大半を占めており、ついでラベル1、2の分布が確認された。いの町市街地は、昼光利用、日射熱利用、太陽熱給湯、太陽光発電や自然風利用が期待できるとされるラベル2のエリアが特に多く、ついでラベル1、3が分布しており、ラベル0のエリアは分布していなかった。また、高知市、南国市では夏期における気温が比較的高く、ヒートアイランド現象の傾向が確認された。さらに、香美市、いの町では冬期における風速が大きく、自然風制御の検討も必要であることがわかった。WRFによる数値計算を行うことで地形因子を考慮した気象要素が再現できた。さらにその結果

を用いた気象特徴の類型化により地域ごとの自然エネルギー利用可能性を検討することができた。本稿での成果が今後の住環境整備における自然エネルギーの活用方針を決定する上で有効に活用されることに期待したい。

Abstract

In recent years, the increase in the global environmental burden has become an issue with the increase in greenhouse gas emissions. Looking at the trends of carbon dioxide emissions by sector in Japan, those in the private sector, including household energy consumption, have demonstrated an upward trend, and further efforts are still required to reduce the environmental burden. Under these circumstances, the promotion of energy conservation utilizing natural energy is said to be an extremely important measure to mitigate global warming. Previous studies on the use of natural energy in the living environment using meteorological data include research on climate maps for architectural design by Takemasa⁴⁾ and Kodama,⁵⁾ research on meteorological maps for the use of natural energy by Nishikawa,³⁾ and research on regional divisions for environmental design targeting the Tohoku region by Matsumoto⁶⁾ et al.. However, many of them are based on meteorological data obtained from the spatial interpolation of fixed observation point data, and there is a problem that it is difficult to reproduce the microclimate affected by land use and topography. In order to solve these problems, microclimates are sometimes reproduced using numerical calculations. For example, there is the research on the urban environment and climate map of the Osaka region by Takebayashi⁷⁾ et al., and research on the current state reproduction and future prediction of the thermal environment for Nagoya by Iizuka⁸⁾ et al.. However, few researches have been found aimed at the advanced utilization of renewable energy. In this study, the possibility of using renewable energy in various regions was examined for the purpose of promoting energy conservation in the residential environment. In order to study the advanced utilization of renewable energy on a city scale, meteorological data of the target area was reproduced, the area was classified and compared, and the availability of renewable energy in each area was investigated. The meteorological elements data were reproduced using the Weather Research and Forecasting (WRF) Model,¹⁰⁾ which is mesoscale numerical weather prediction system. The target area is a 30 km × 30 km area centered on Kochi City, and calculations were performed for one month each in August 2016 and January 2015. The K-means++ method¹⁹⁾ was used to classify area using reproduced meteorological elements data. The meteorological elements used to classify area are the mean nighttime wind speed in summer, the total amount of solar radiation in summer, the total amount of solar radiation in winter, and the mean temperature in winter, reproduced by the WRF. As a result of the classification, four clusters were generated, and the potential for renewable energy use was interpreted from the meteorological characteristics of each cluster. Based on the interrelationship of each meteorological element, the meteorological characteristics of each cluster were interpreted as follows. Label 0 is distributed in the northern part of the target area, especially in mountainous areas. In the area of label 0, the amount of solar radiation in winter is rather large, and it can be expected to use daylight harvesting system, but the temperature is low, and it is thought that it is necessary to adopt a heat storage structure and appropriate heat insulation devise to use solar heat. In addition, the wind speed in summer is low, so much use of natural wind harvesting system cannot be expected in this area. In the area of Label 1, the wind speed in summer is a particularly strong, so it can be expected to utilize natural wind harvesting system. On the other hand, both temperature and the amount of solar radiation are low in winter, so appropriate measures are required to reduce the heating load. Label 2 is an area where the amount of solar radiation is particularly large in winter and daylight harvesting system can be expected to be used. Also, because the temperature is high, it can be expected to use solar heat and solar water-heating system. In addition, since the amount

of solar radiation is large in the summer, solar power generation can be expected, and the wind speed is also moderately high, so natural wind harvesting system can be expected to be used. Label 3 is an area where the temperature is high in winter and the heating load is relatively suppressed, but the amount of solar radiation is small and the use of daylight harvesting system cannot be expected so much. In addition, the wind speed is low in summer, and it is considered difficult to use natural wind harvesting system. In the following urbanization promoting areas (Kochi City, Nankoku City, Kami City, and Ino Town), the availability of natural energy in each area was evaluated by comparing the characteristics of clusters and meteorological factors in each area. In the city of Kochi, the area of Label 3 where it is relatively difficult to use sunlight and natural wind harvesting system was particularly widely distributed. On the other hand, it was confirmed that the area of Label 2 where daylight harvesting system, solar heat harvesting system, solar water-heating system, solar power generation system, and natural wind harvesting system can be relatively expected is distributed in the southern and western parts of the area. In addition, it was confirmed that the area of Label 3 where it is relatively difficult to use sunlight and natural wind occupies 70% in the urban area of Nankoku City. As in Nankoku City, the area of Label 3 where it is relatively difficult to use sunlight and natural wind occupies most of the city area of Kami City, and the distribution of Labels 1 and 2 was confirmed following this. In the urban area of Ino Town, there are many areas with label 2 where the utilizations of daylight harvesting system, solar heat harvesting system, solar water-heating system, solar power generation system, and natural wind harvesting system can be expected, and Areas of labels 1 and 3 were distributed following this. Area of Label 0 was not distributed. In Kochi City and Nankoku City, the temperature in summer was relatively high, and the tendency of the heat island phenomenon was confirmed. Furthermore, it was found that the wind speed in Kami City and Ino Town is high in winter, and it is necessary to consider controlling the natural wind. By performing numerical calculations using WRF, it was able to reproduce meteorological factors that take topographical factors into consideration. Furthermore, it was able to examine the availability of renewable energy in each region by categorizing meteorological characteristics using the results. We hope that the results of this paper will be effectively utilized in deciding how to utilize natural energy in the future improvement of living environment.

目次

論文要旨	i
Abstract	iii
1 序論	1
1.1 背景	1
1.2 目的	1
1.3 方法	1
2 WRF を用いた気象要素の再現	3
2.1 領域気象モデル WRF の概要	3
2.2 計算概要	3
2.2.1 計算領域と期間	3
2.2.2 標高と土地利用情報	4
2.2.3 初期値・境界値と物理モデル	6
2.3 再現精度の検証	6
2.3.1 観測値との比較	6
2.3.2 精度評価と考察	15
2.4 領域内の気象要素分布	15
3 気象特徴の類型化	18
3.1 自然エネルギー利用可能性検討のための気象要素	18
3.2 類型化手法	18
3.2.1 K-means++ 法の概要	18
3.2.2 入力する気象要素と前処理	19
3.2.3 クラスタリング結果	20
3.3 結果の解釈	23
4 自然エネルギー利用可能性の検討	24
4.1 対象領域内の市街化区域における検討	25
4.1.1 高知市市街地	28
4.1.2 南国市市街地	31
4.1.3 香美市市街地	34
4.1.4 いの町市街地	37
5 まとめ	40
6 謝辞	42

目次

1	Flowchart of this study	2
2	Computation domain setting	3
3	Elevation	4
4	Landuse parameters	5
5	Location of meteorological stations used for accuracy evaluation	7
6	Monthly variation of each meteorological element during August in Kochi	8
7	Monthly variation of each meteorological element during January in Kochi	8
8	Monthly variation of each meteorological element during August in Gomen	9
9	Monthly variation of each meteorological element during January in Gomen	9
10	Monthly variation of each meteorological element during August in Nankoku	10
11	Monthly variation of each meteorological element during January in Nankoku	10
12	Scatter diagram of each meteorological element from observation and simulation during August in Kochi	11
13	Scatter diagram of each meteorological element from observation and simulation during January in Kochi	11
14	Scatter diagram of each meteorological element from observation and simulation during August in Gomen	12
15	Scatter diagram of each meteorological element from observation and simulation during January in Gomen	12
16	Scatter diagram of each meteorological element from observation and simulation during August in Nankoku	13
17	Scatter diagram of each meteorological element from observation and simulation during January in Nankoku	13
18	Frequency distribution of wind direction from observation and simulation	14
19	Distribution of predicted monthly average of temperature, average of wind speed, and accumulated solar radiation in August	16
20	Distribution of predicted monthly average of temperature, average of wind speed, and accumulated solar radiation in January	16
21	Target area	20
22	Silhouette analysis for KMeans ++ clustering on sample data with 4 clusters	21
23	Variation of silhouette coefficient with number of clusters	21
24	Clustering results geocoded in the target region	22
25	Coordinate value of the cluster centroid	22
26	Urbanized area in the target area	24
27	Spatial distribution of clusters by area	25
28	Cluster aggregation by area	26
29	Comparison of aggregate results for each meteorological element by cluster label among areas in August	27
30	Comparison of aggregate results for each meteorological element by cluster label among areas in January	27
31	Spatial distribution of each meteorological element in the urban area of Kochi City in August	29

32	Spatial distribution of each meteorological element in the urban area of Kochi City in January	30
33	Spatial distribution of each meteorological element in the urban area of Nankoku City in August	32
34	Spatial distribution of each meteorological element in the urban area of Nankoku City in January	33
35	Spatial distribution of each meteorological element in the urban area of Kami City in August	35
36	Spatial distribution of each meteorological element in the urban area of Kami City in January	36
37	Spatial distribution of each meteorological element in the urban area of Ino Town in August	38
38	Spatial distribution of each meteorological element in the urban area of Ino Town in January	39

表 目 次

1	Computational domain and mesh division settings	4
2	Surface parameters of each landuse	5
3	Model options for physical process in the simulation	6
4	Relationship between renewable energy utilization technologies and meteorological factors	18
5	Correspondence between ground surface roughness classification and parameters	19
6	Characteristics of each cluster for renewable energy use	23

1 序論

1.1 背景

近年、温室効果ガスの排出量増加に伴い、地球温暖化などの地球環境負荷の増大が問題視されている。20世紀後半より、石油等の安価かつ大量のエネルギー資源が供給可能となり、冷暖房技術といった人工環境技術が急速に普及してきたが、それに伴ったエネルギー消費の増大は、当の環境問題のトリガーである温室効果ガス排出に大きく寄与していることは周知の事実である。2009年ごろから先進諸国が競って高い二酸化炭素排出量の削減目標を掲げてきており、我が国は2021年4月に、2030年度において、2013年度比で温室効果ガス46%削減を目指し、さらに50%の高みに向けて挑戦を続けることを表明した¹⁾。また同年10月には5年ぶりに地球温暖化対策計画の改訂がなされ、前述の削減目標を踏まえ、二酸化炭素以外も含む温室効果ガスの全てを網羅し、新たな2030年度目標の裏付けとなる対策、政策を記載し、新目標の実現を目指している²⁾。我が国における部門別二酸化炭素排出量推移に着目すると、家庭用のエネルギー消費を含む民生部門（業務用および家庭用のエネルギー消費に起因する部分）におけるそれは2013年時点で、1990年に比して81%の増加を示しており、環境負荷の低減には一層の努力がなお求められると言える。我が国では建築物のエネルギー消費性能向上に関する法律（平成27年法律第53号）において住宅、建築物を対象とした外皮性能と一次エネルギー消費量を主たる評価基準としており、外皮性能基準においては四季や気候により日本全国を8つの区分に分けた「地域区分」が定められている。しかしこれはあくまで法律としての最低基準であること、また、市町村スケールでの区分であり、より高度で積極的な自然エネルギーの利活用を行うためには各地域ごとにスケールを絞ったデータの分析、整備が必要であると考えられる。都市の気象的特徴から建築計画方針を提案する事例として、ドイツの都市気候の専門家が気候の分析や提言をまとめた「クリマアトラス（都市環境気候図）」がよく挙げられる。例えば「風の道」はシュツットガルト市の都市計画で採用されている、これは大気汚染問題を克服するために提案された市街地を囲む丘陵より夜間の斜面冷気流を導入する経路であり、実際に市内の一酸化炭素濃度の大幅な低下や、夏期の気温上昇の緩和に一定の効果が確認されている。我が国における建築分野における気象データの活用に関しては、西川³⁾らの九州地方を対象とした自然エネルギー活用のための気象マップの作成や、武政⁴⁾ら、小玉⁵⁾らによる建築設計用地域気候マップ、また、松本⁶⁾らによる東北地方を対象とした環境設計用の地域区分図の提案が挙げられる。しかし、これらの研究ではAMeDASでの観測データを空間的に補完するといった手法が採られており、従って土地利用や地形等の影響による気温、気流の変化が考慮されない。こうした問題を解決するため、本研究では領域気象モデルによる気象データの数値計算を行う。我が国における気象シミュレーションの建築分野への適応は竹林⁷⁾の大阪地域における都市環境気候地図の作成や飯塚⁸⁾らの名古屋を対象とした温熱環境の現状再現と将来予測などが挙げられるが、その多くが都市熱環境問題への対応であり、気象的特徴の分析から自然エネルギーの利活用への方向性を示した事例は我が国においてほとんど見られない。

1.2 目的

本研究では領域気象モデルを用いて対象領域内の気象要素を再現、分析し、地域ごとの住環境における自然エネルギー利用可能性検討を行うことを目的とする。

1.3 方法

Fig. 1は本研究のフローチャートである。本研究は大きく3つのプロセスを経て目的が達成される。まず一つ目が2章にて気象要素の再現を領域気象モデルWRF¹⁰⁾を用いた数値計算により

行う。さらに気象台における観測データと比較し精度評価とデータの考察を行う。次に3章で対象領域内の気象的特徴の類型化を試みる。WRFにより得られた気象要素から自然エネルギー利用可能性検討に用いる気象指標を算出する。本研究では夏期における月間積算日射量と月間夜間平均風速、また、冬期における月間平均気温と月間積算日射量を気象指標として算出した。これらを非階層クラスタリング分析の一つである K-means++法によりその特徴を類型化する。最後に4章で、得られたカテゴリーごとの気象的特徴、および気象要素の空間的分布を踏まえて地域ごとの相対的な自然エネルギー利用可能性の評価を行う。

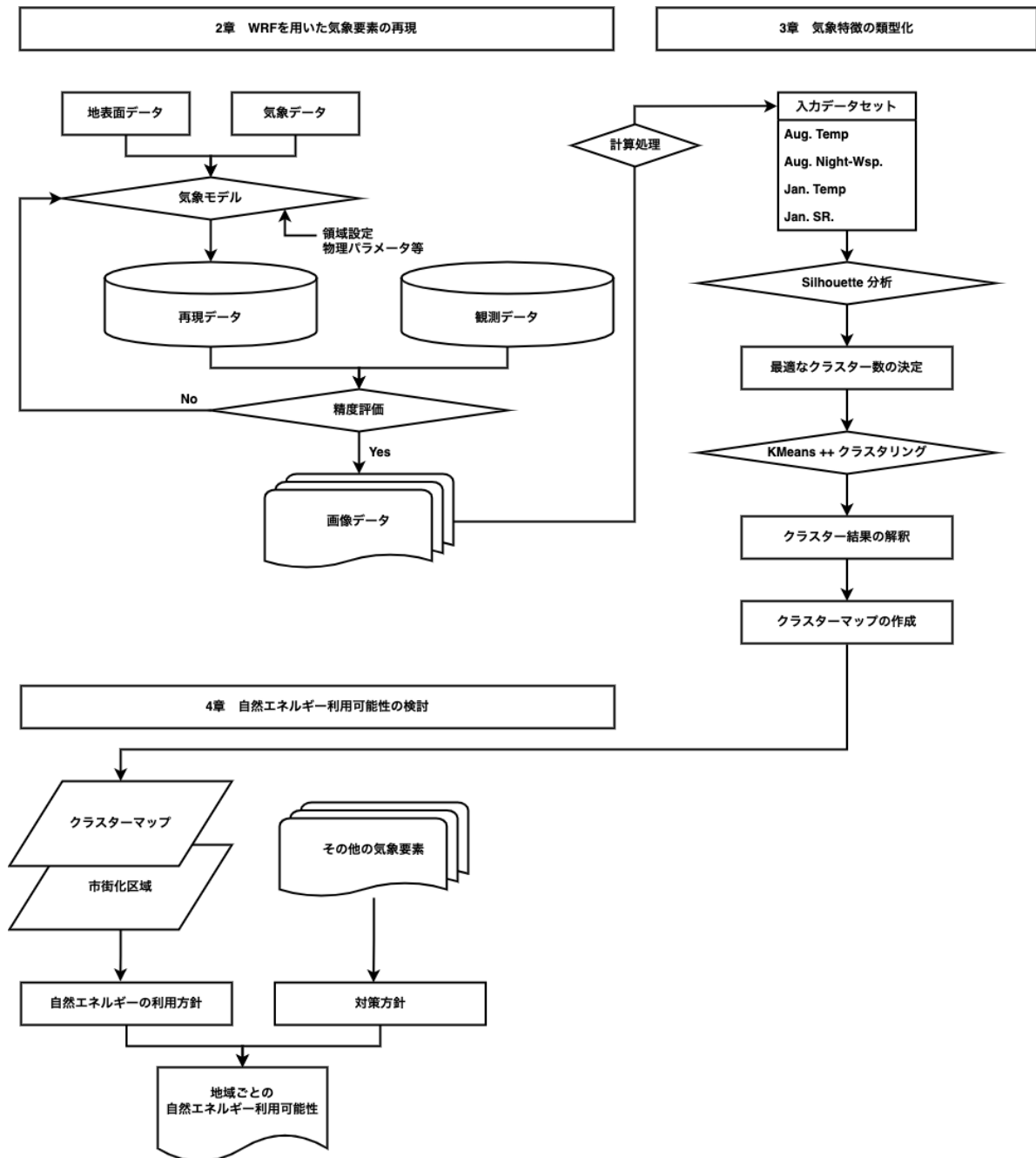


Fig. 1: Flowchart of this study

2 WRF を用いた気象要素の再現

2.1 領域気象モデル WRF の概要

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 Center for Environment Prediction) をはじめとする気象研究機関により共同開発が進められている領域気象モデルである。完全圧縮の非静力学モデルであり、一般的な気象予報をはじめとし、ヒートアイランド現象や集中豪雨、台風など、その活用領域は多岐にわたる。運動方程式、連続の式、状態方程式、スカラー保存式などを基礎方程式として構成されており、乾燥大気の静水圧地形準拠座標 (η 系) が用いられている。WRF では NCEP が中心となり開発を進めている気象予報用の NMM (Nonhydrostatic Mesoscale Model) と、NCAR が中心となり開発が進められている研究用の ARW (Advanced Research WRF) に分かれている。

2.2 計算概要

本研究では WRF-ARW Ver.3.9.1 を使用した。実行環境は Ubuntu Ver.18.04 を使用した。

2.2.1 計算領域と期間

計算領域と領域設定の詳細を以下に示す。Fig. 2 の通り、3段階のネスティングを採用した。Domain 03 が解析対象領域であり、約 $30 \text{ km} \times 30 \text{ km}$ とする。計算期間は夏期を 2016 年 8 月 1 ヶ月、冬期を 2015 年 1 月 1 ヶ月として行った。ただし、助走計算のため、積分開始は夏期において 2016 年 7 月 31 日午前 9 時 (JST) から、冬期において 2014 年 12 月 31 日午前 9 時 (JST) からとした。Table 1 に計算領域の格子数、水平格子間隔を示す。

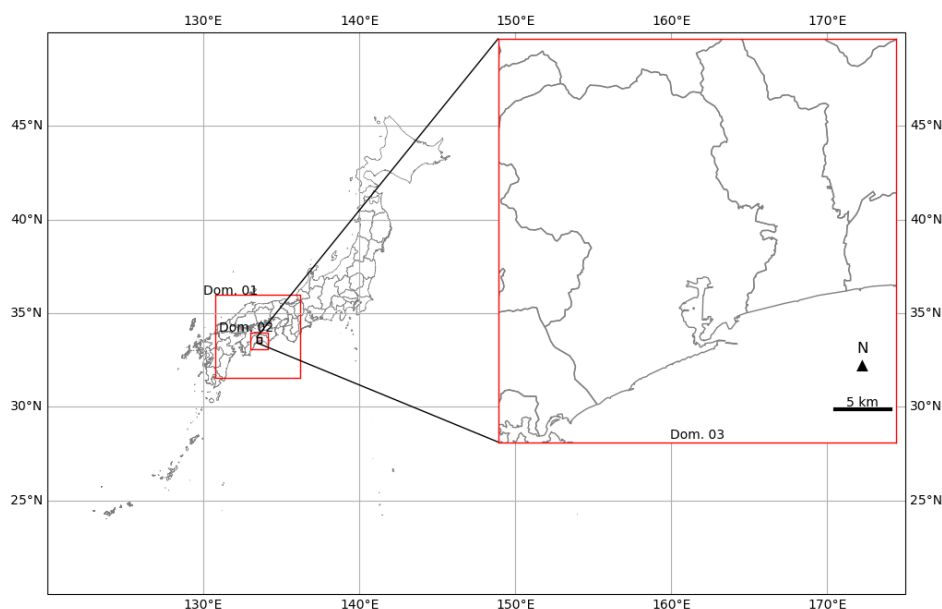


Fig. 2: Computation domain setting

Table 1: Computational domain and mesh division settings

Domain	Number of grid	Grid spacing [km]
Domain 01	100×100	5
Domain 02	100×100	1
Domain 03	150×150	0.2

2.2.2 標高と土地利用情報

標高データは 30 m メッシュ分解能の ASTER 全球 3 次元地形データ (ASTER Global DEM, ASTER GDEM) を与えた. Fig. 3 に Domain 03 における標高データを示す. 土地利用情報は, 5 km メッシュの Domain 03 では 1 km メッシュ分解能の米国地質調査所 (United States Geological Survey, USGS) の土地利用データを使用し, 1 km, 0.2 km メッシュの Domain 02, 03 では 0.1 km メッシュ分解能の土地利用データを用いる. この 0.1 km メッシュ分解能の土地利用データは平成 24 年の国土数値情報・土地利用細分メッシュデータをもとに秋本ら¹¹⁾の研究成果を参考にし, USGS の土地利用区分に再配分し作成したものである. 作成した土地利用データの Domain 03 における分布を 4 に示す. また, Table 2 に, 計算に使用した土地利用のカテゴリーと地表面パラメータの対応を示す.

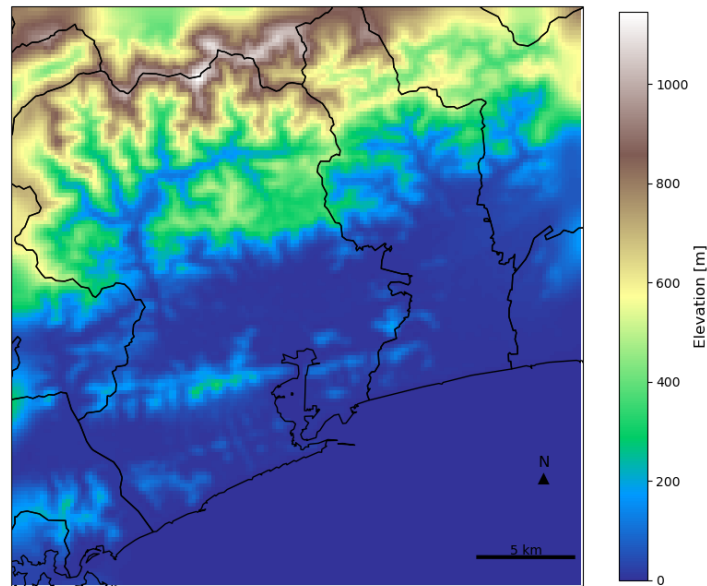


Fig. 3: Elevation

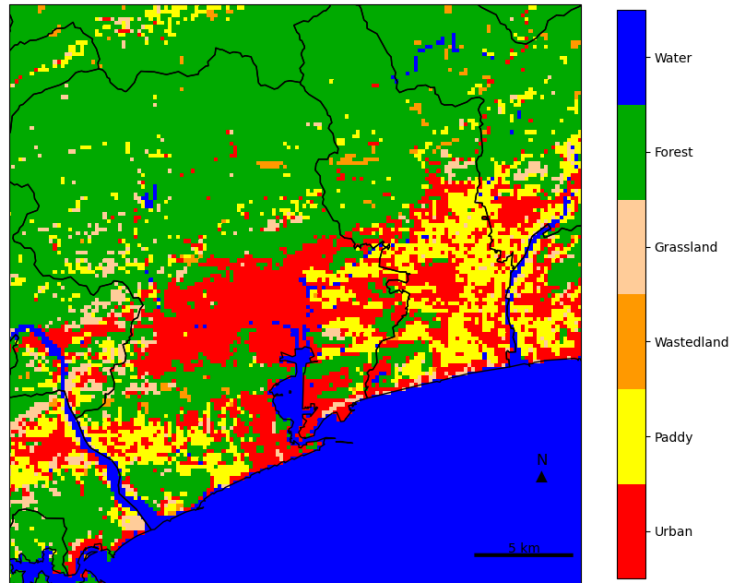


Fig. 4: Landuse parameters

Table 2: Surface parameters of each landuse

Landuse categorieis	Albedo[%]	Surface emission[%]	Surface roughness[cm]
Urban	15	88	80
Paddy	18	98.5	10
Wastedland	18	99	14
Forest	13	98	0.01
Water	8	98	0.01

2.2.3 初期値・境界値と物理モデル

WRF の初期条件，底面・側面境界条件には NCEP による全球最終解析データ FNL(FiNal operational global analysis data) を付与した．使用した物理過程を Table 3 に示す．物理過程は地表面過程，大気境界層過程，放射過程，雲微物理過程，積雲過程を扱い，それぞれが相互に影響を及ぼしあう．乱流モデルには，Mellor-Yamada-Janjic モデル¹²⁾ を，地表面モデルには Noah-LSM¹³⁾ を用いた．また，特に都市部では UCM (Urban Canopy Model)¹⁴⁾ を適用させた．

Table 3: Model options for physical process in the simulation

Surface scheme	Land surface scheme	Noah LSM
	Urban scheme	UCM (Domain 02, Domain 03)
PBL scheme	Mellor-Yamada-Janjic scheme	
Radiation scheme	Long wave radiation	RRTM scheme
	Short wave radiation	Dudhia scheme
Surface-layer scheme	Monin-Cbukhov (Janjic Eta) similarity scheme	
Cumulus scheme	Kain-Fritsh-Scheme (Domain 01, Domain 02)	

2.3 再現精度の検証

2.3.1 観測値との比較

本研究で用いた WRF の解析結果の精度を評価するため，観測データとの比較を行った．対象気象要素は気温，風向・風速，日射量とする．また，観測データは高知市地方気象台，AMeDAS 後免観測所，AMeDAS 南国日章観測所の 3 点を使用する．ただし，AMeDAS では日射量の観測を行っていないため，日射量の精度評価は高知市地方気象台のみで行う．Fig. 5 に使用する気象観測所の位置を示す．

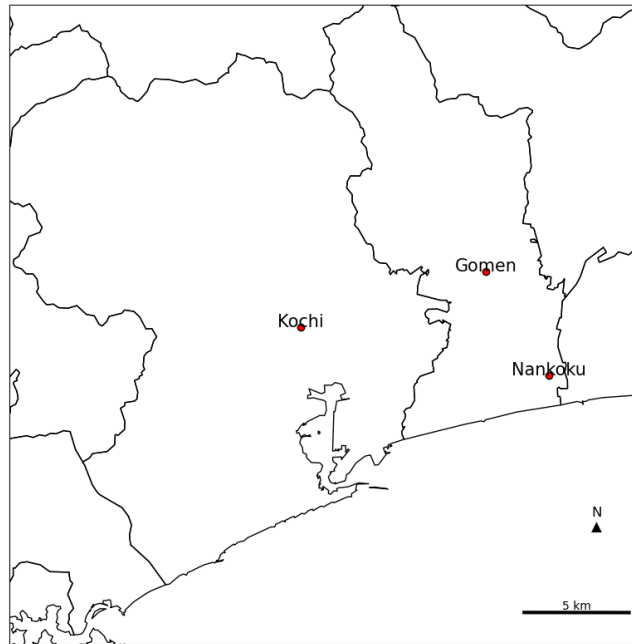


Fig. 5: Location of meteorological stations used for accuracy evaluation

Fig. 6 ~Fig. 11 は各気象観測点における観測値と計算値の時系列変化を示し, Fig. 12 ~ Fig. 17 は相関図を示している. また, 図右下に二乗平均平方根誤差 (Root Mean Square Error, *RMSE*) と相関係数 r を記している. また, Fig. 18 では, 16 方位ごとの風向の頻度を示した風配図を観測点ごとに描画した.

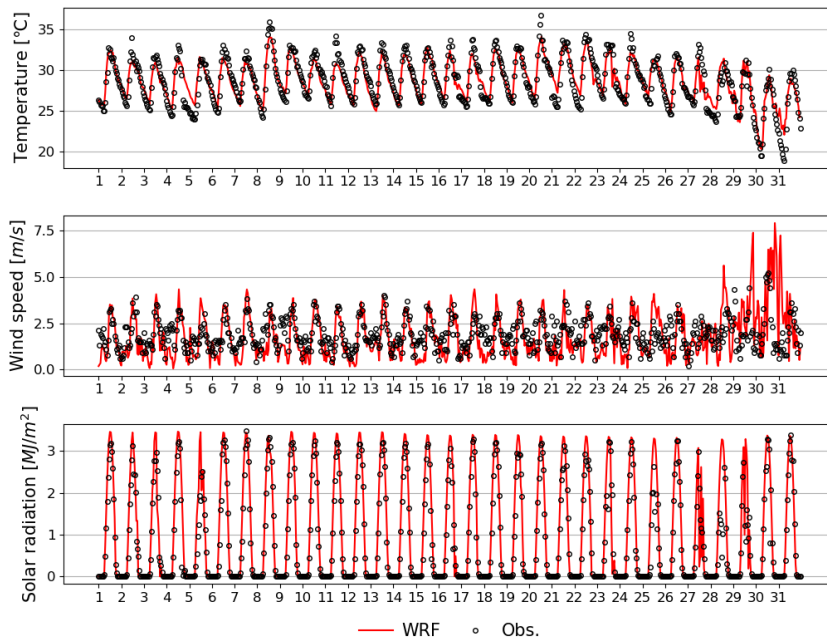


Fig. 6: Monthly variation of each meteorological element during August in Kochi

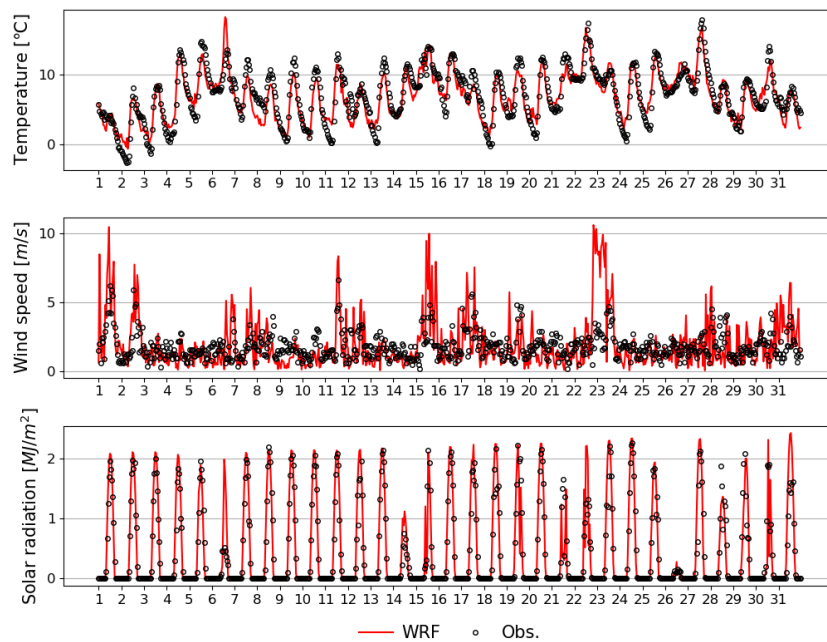


Fig. 7: Monthly variation of each meteorological element during January in Kochi

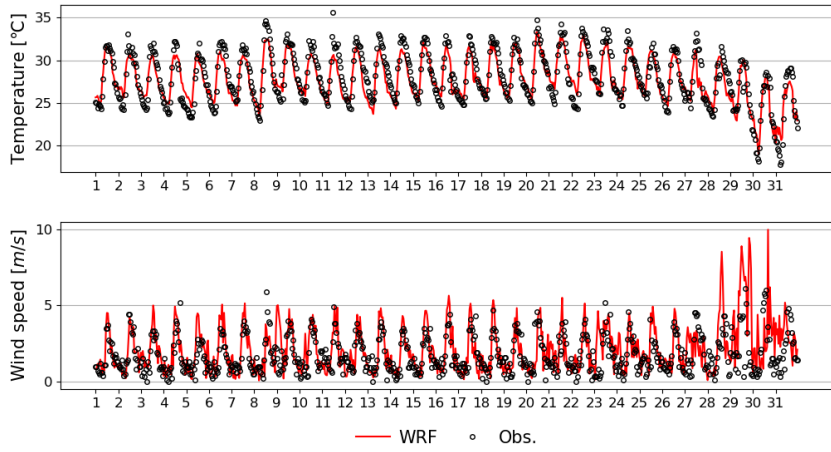


Fig. 8: Monthly variation of each meteorological element during August in Gomen

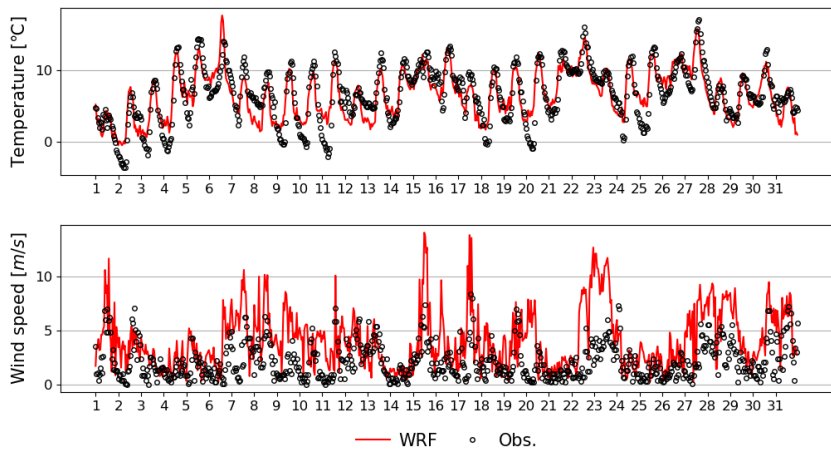


Fig. 9: Monthly variation of each meteorological element during January in Gomen

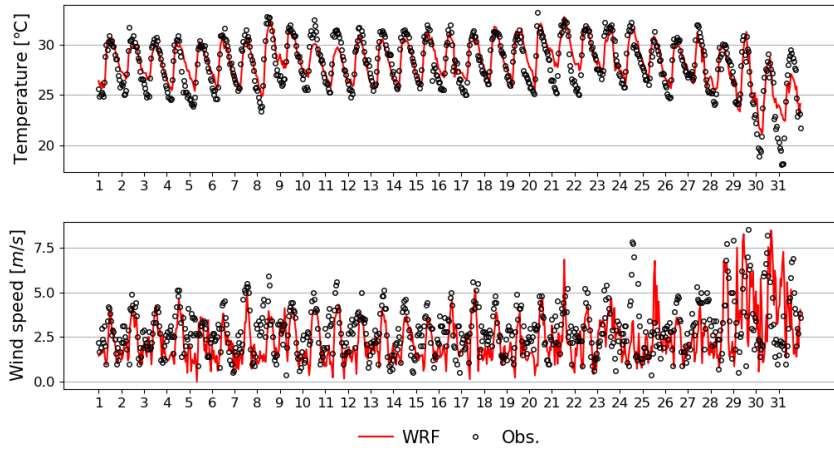


Fig. 10: Monthly variation of each meteorological element during August in Nankoku

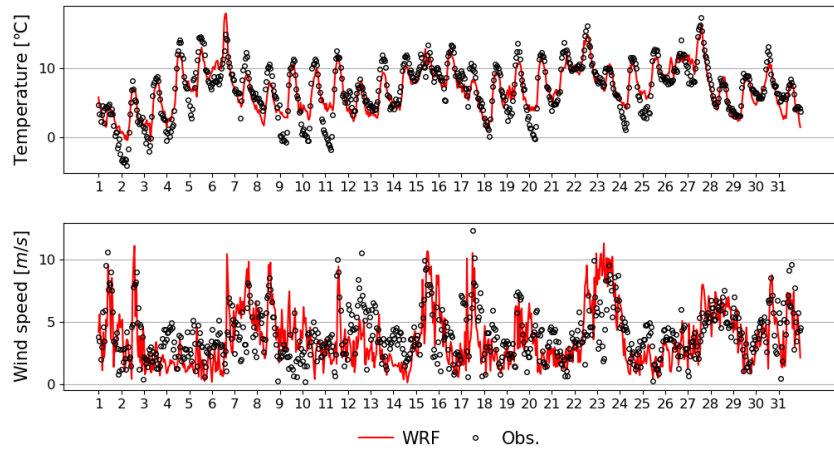


Fig. 11: Monthly variation of each meteorological element during January in Nankoku

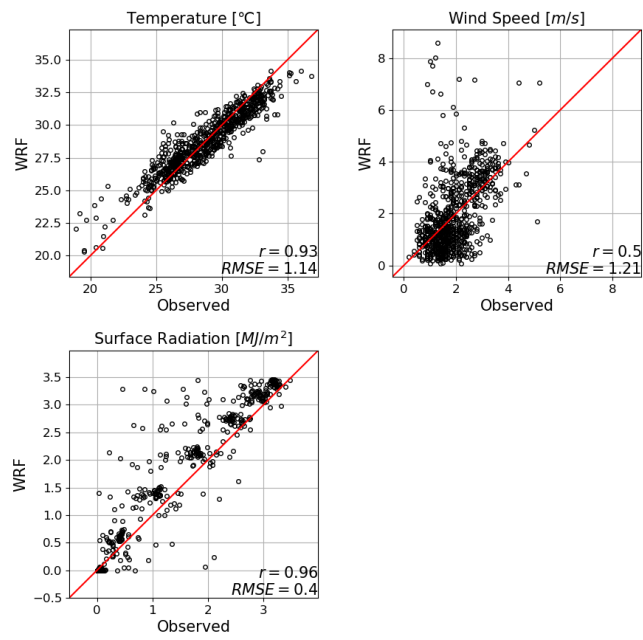


Fig. 12: Scatter diagram of each meteorological element from observation and simulation during August in Kochi

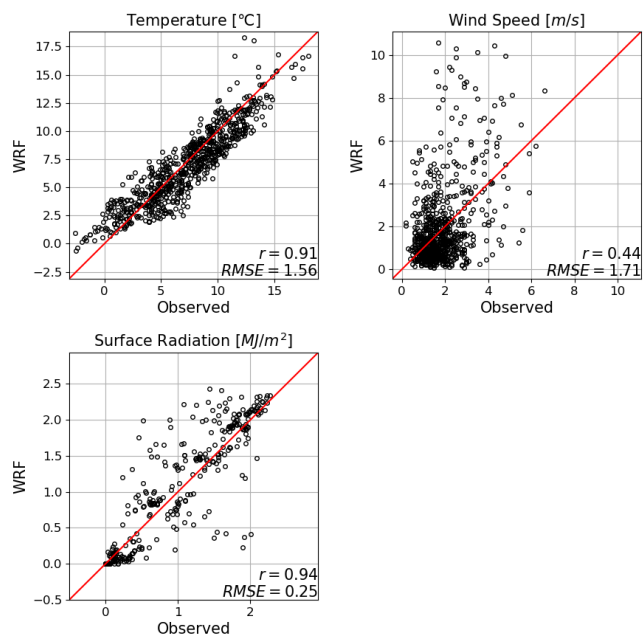


Fig. 13: Scatter diagram of each meteorological element from observation and simulation during January in Kochi

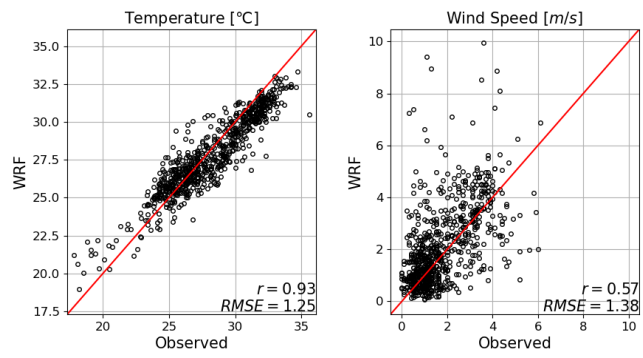


Fig. 14: Scatter diagram of each meteorological element from observation and simulation during August in Gomen

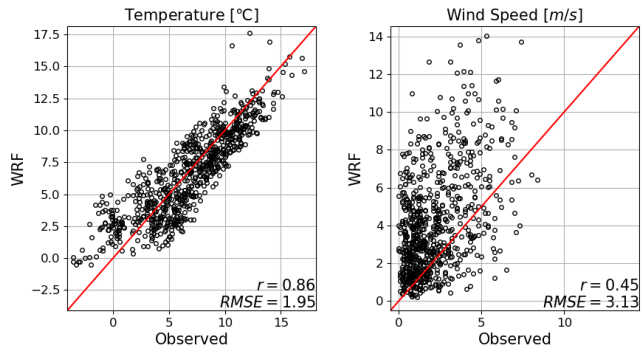


Fig. 15: Scatter diagram of each meteorological element from observation and simulation during January in Gomen

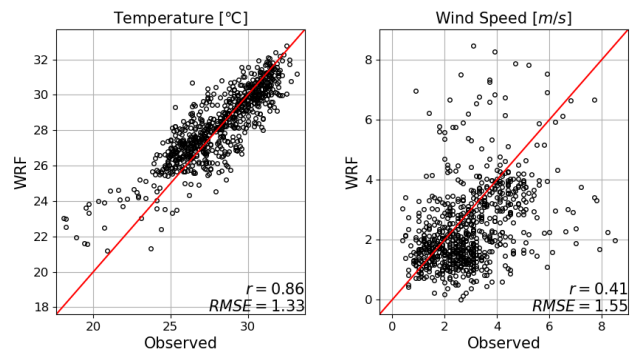


Fig. 16: Scatter diagram of each meteorological element from observation and simulation during August in Nankoku

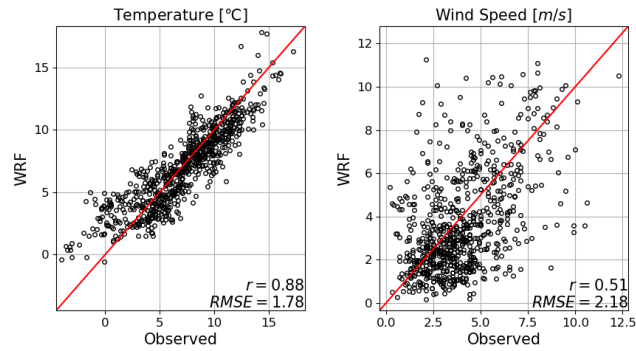


Fig. 17: Scatter diagram of each meteorological element from observation and simulation during January in Nankoku

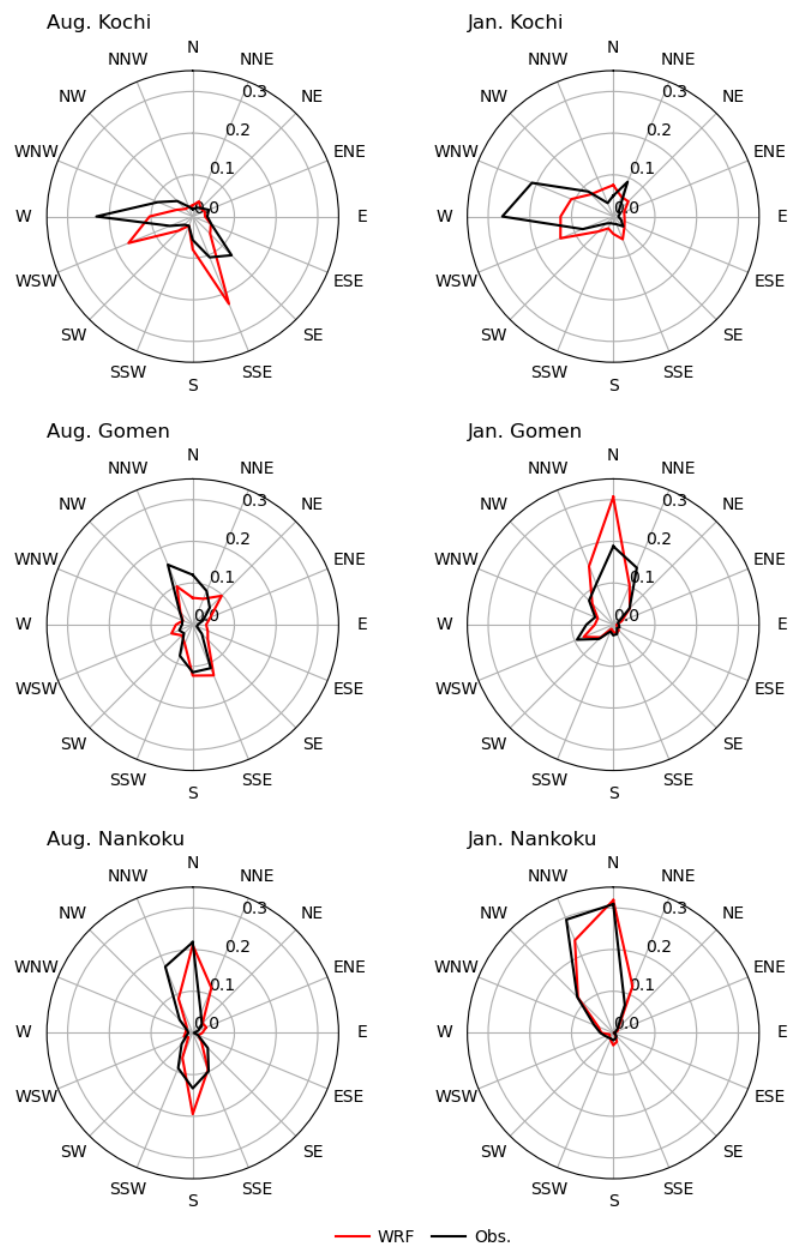


Fig. 18: Frequency distribution of wind direction from observation and simulation

2.3.2 精度評価と考察

予測精度に関して、各気象要素ごとに結果および考察をまとめる。気温（地上 2 m）については両期共によく対応している。それぞれ一部、早朝、日中の極値を再現できていない箇所も見受けられるが、全体的に良い精度だと言える。既往研究⁷⁾⁻⁹⁾と比較しても、RMSE が 1°C前後と、正常な数値である。風速（地上 10 m）は気温と比べると観測値との対応にばらつきが大きくなっている。特に冬期について、観測値よりやや大きく予測されている。風向については南国日章、後免観測所では概ねよく再現されているが、高知市地方気象台にてややその精度が劣っている。これは、気流が周辺建物、樹木等の地物に影響を比較的受けやすいことに対して、予測の際の解析格子幅に限界（今回は 200 m メッシュ）があることが原因だと考えられ、土地利用の差異により精度の違いが現れていると考えられる。次に日射量については気温同様、良い精度と言える。ただし、特に夏期において日射量の数値計算の結果が観測値と比較してやや過大評価であることが視認される。これは WRF の日射量計算における計算条件設定の影響を調べた田村ら¹⁵⁾の研究によれば、設定した全てのケースで計算値が観測値を過大に再現する傾向が確認されており、本研究の数値計算においても同様の傾向が現れたものだと考えられる。

2.4 領域内の気象要素分布

以降の分析では予測した各気象要素を平均化および積算して使用する。Fig. 19 Fig. 20 はそれぞれ対象領域における夏期、冬期の 1ヶ月間における平均気温、平均風速、積算日射量の分布図である。

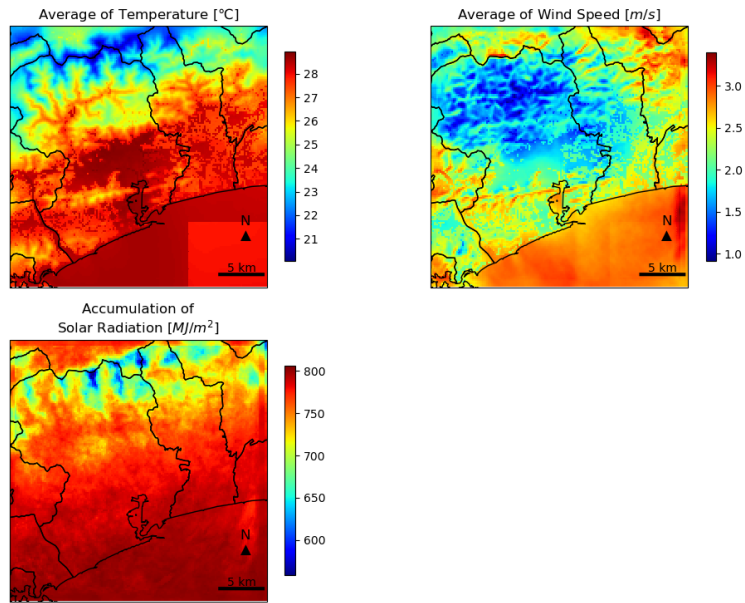


Fig. 19: Distribution of predicted monthly average of temperature, average of wind speed, and accumulated solar radiation in August

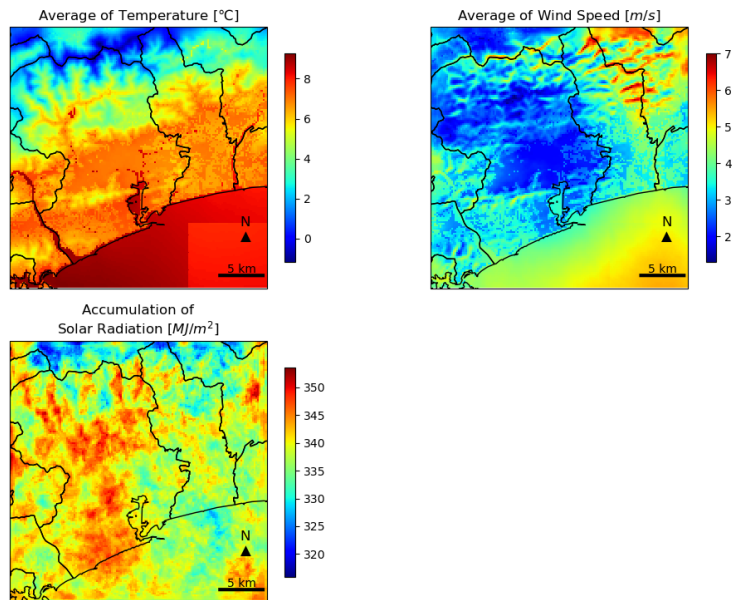


Fig. 20: Distribution of predicted monthly average of temperature, average of wind speed, and accumulated solar radiation in January

気温については夏期，冬期共に標高による影響が強く分布に現れていることがわかる。夏期に着目すると，都市部において極値的な分布を示しており，都市温暖化現象の傾向が現れていると考えられる。風速については特に北東側の山間部において強く，高知平野部において弱まっている。また，冬期においては夏期と比べ強く現れている。日射量は夏期については標高の高い山間部で低く，平野部で高く現れている。冬期においては太陽高度が下がるため，南側斜面にて特に高く，標高の高い山に遮られた地域が低くなるといった傾向が現れている。

3 気象特徴の類型化

本章では WRF により再現された気象要素をもとに領域内でその特徴に基づいた類型化を行う。類型に際しては K-means++ 法を用いる。得られたクラスターごとに各気象要素の特徴について考察し、その地域に特化した自然エネルギー活用方針を提案する。

3.1 自然エネルギー利用可能性検討のための気象要素

ここで、類型化を行うに当たっての目標を整理する。類型化の目的は、領域内の各気象要素に基づいた自然エネルギー利用可能性の検討である。ここまで WRF により各要素の再現が行われたが、自然エネルギーの利用可能性を述べるために各要素の総合的な解釈が必要である。そのため再現された気象要素をインプットした分類器を学習させ、領域内での気象要素のクラスターリングを行い、クラスターごとの気象要素の大小や相互関係をもとに地域間の相対的な自然エネルギー利用可能性検討を行う。Table 4 は自然エネルギー活用技術とその主な気候因子ならびに影響のしかたをまとめた表である。居住環境を対象とした自然エネルギー利用可能性を検討するにあたり、本項では自立循環型住宅の設計ガイドライン¹⁶⁾の内容を踏襲する。本章におけるクラスターリング結果はこの対応関係をもとに解釈、考察されることとする。

Table 4: Relationship between renewable energy utilization technologies and meteorological factors

要素技術	主な影響因子	一般的な影響のしかた
自然風の利用・制御	風速 風向	風速が大きいほど、自然風の利用可能性が高くなる。風向はさまざまに変化するが、日中または夜間に風上となる頻度の高い方位と、開口部の関係に配慮することで、自然風を有効に活かす。
太陽光発電	日射量	日射量が大きいほど、太陽光発電による発電量は大きくなる。
昼光利用	日射量	日射量が大きいほど、太陽光の昼間の照明利用が可能。
日射熱の利用	日射量 気温	冬季における日射量が大きく、気温が高いほど、日射熱の利用可能性は高くなる。
太陽熱給湯 屋根空気集熱式 ソーラーシステム	日射量 気温 降雪・積雪量	日射量が大きく、冬期における気温が高く、降雪・積雪量が少ないほど、太陽熱利用の可能性は高くなる。

以降、Table 4 に基づいて分析を進めるが、太陽熱給湯、屋根空気集熱式ソーラーシステムに関係する気候因子の一つである、降雪・積雪量については対象領域において観測記録が少ないため、無視する。

3.2 類型化手法

3.2.1 K-means++ 法の概要

本研究では K-means++ 法¹⁹⁾を用いた気象要素のクラスターリングを行う。K-means 法¹⁹⁾では、学習の初期段階にてランダムにクラスターセントロイドを設定し、入力値との距離の計算とその距離に基づいたクラスターセントロイドの移動の繰り返しにより、最終的にクラスターメンバが変動しなくなるまで学習させる。問題点として、セントロイドの初期値がランダムであるが故に分類上

不適切な位置になり、結果が不適当なものになることや、収束に多くの時間を要することがある。K-means++ 法は初期のセントロイドを互いに離れた位置に設定することで従来手法（K-means 法）より効率的かつ一貫性のある結果が期待できる。実行には Python Ver. 3.6.13, ライブラリは scikit-learn Ver. 0.24.1 を用いた。

3.2.2 入力する気象要素と前処理

分類器を作成するにあたり、使用する気象要素は次のとおりである。

- 冬期における平均気温 [°C]（略称：Jan. Temp.）
- 夏期夜間（19～翌6時）における平均風速 [m/s]（略称：Aug. Night-Wsp.）
- 冬期における積算日射量 [MJ/m²]（略称：Jan. SR）
- 夏期における積算日射量 [MJ/m²]（略称：Aug. SR）

風速に関しては、自然風利用を目的とするため、特に積極的な外気の取り入れを行いたい夏期の夜間を使用する。また、WRFにより計算された風速は地上10mのものであり、一般的な住居の軒高と比してやや高い。そのため、一般的な2階建住宅の軒高（地上6.5m）の風速に変換する。変換は風速のべき乗則¹⁷⁾にしたがった。また、変換に使用する境界層高さ Z_i (m) 及びべき指数 α は日本建築学会が提案する地表面粗度区分¹⁸⁾をWRFの計算に用いた土地利用区分 (Fig. 4) に紐づけてGISデータ化したものを使用した。Table 5は、日本建築学会の地表面粗度区分とWRFの計算に用いた土地利用区分との対応を示した表である。

Table 5: Correspondence between ground surface roughness classification and parameters

Surface roughness category	Landuse category	Z_i (m)	α
I	Water	250	0.10
II	Paddy	350	0.15
	Grassland		
	Wastedland		
III	Urban	450	0.20
	Forest		
IV	—	550	0.27
V	—	650	0.35

入力値に対して標準化を行い、無次元化したものを用いた。また、海域に関しては陸域と性質の異なるデータとなるため、マスキングを行なった。さらに、標高による気温の逓減も確認されるため、標高150m以下の地域を抽出し、分析に用いた。本研究の対象である高知広域都市計画区域における標高の最大値が146mであることを考慮して設定した。抽出には基盤地図情報の数値標高モデル（5m grids）を解析格子サイズ（ ≈ 200 m grids）にリサイズしたものを用いた。抽出した解析対象領域を Fig. 21 に示す。

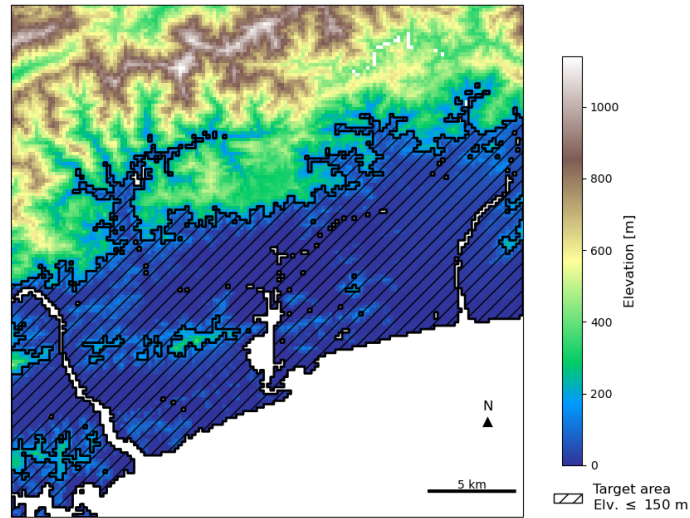


Fig. 21: Target area

3.2.3 クラスタリング結果

本研究ではクラスター数を4クラスターに設定した。設定には Silhouette 分析¹⁹⁾を用いた。Silhouette 分析とは、同じクラスターに属する入力値間の距離が小さく、別のクラスターに属する入力値間の距離が大きいことを良いクラスタリングであると仮定し、これを定量的に評価する指標として Silhouette 係数の比較により適切なクラスター数を割り出す分析である。本研究ではクラスター数を試験的に3~14クラスターで Silhouette 分析を行い、適切なクラスター数として4クラスターを割り出した。Fig. 22 は4クラスターに設定した際の Silhouette 分析の結果である。図中左は全データ点についてクラスターごとの Silhouette 係数を横向き棒グラフとして描画したものであり、図中右は主成分分析 (Principal Component Analysis, PCA)¹⁹⁾を用いて入力データの次元圧縮を行い、3次元空間においてクラスターの分布を描画したものである。左図に着目すると、まず、赤色の波線は4クラスターの平均 Silhouette 係数であり、これは、3~14のクラスターの中で0.30ともっとも高い (Fig. 23 参照)。また、各クラスターごとに概ね半数のデータ点が平均 Silhouette 係数を超過していることから適切なクラスター数として4クラスターを選定した。Fig. 23 は、テストした全クラスター数の平均 Silhouette 係数の推移である。

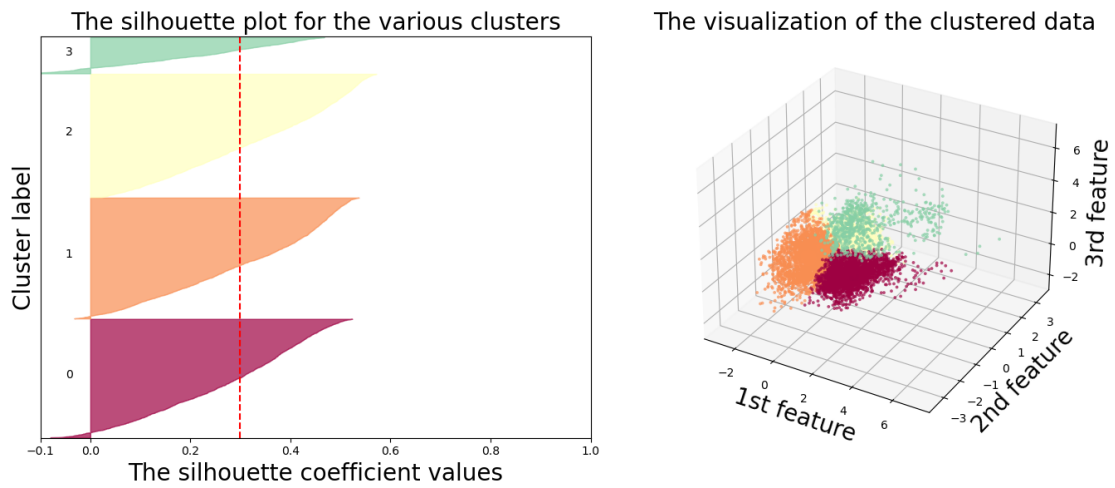


Fig. 22: Silhouette analysis for KMeans ++ clustering on sample data with 4 clusters

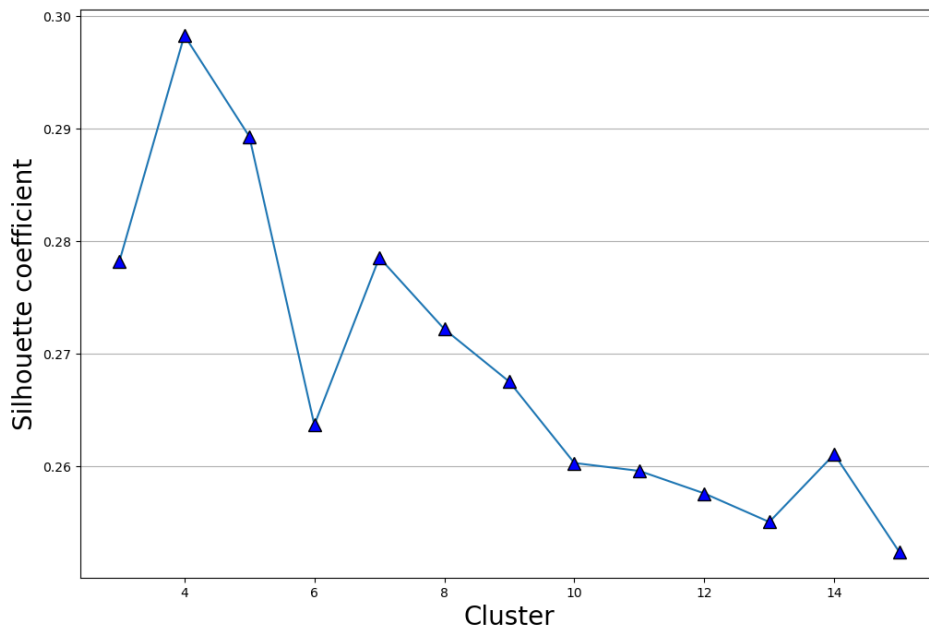


Fig. 23: Variation of silhouette coefficient with number of clusters

Fig. 24 は、クラスタリング結果を地図化したものである。また、Fig. 25 は、クラスタセントロイドの中心座標を示したものである。入力値ごとの座標に着目することで、各クラスタの入力値すなわち気象要素の特徴が解釈される。

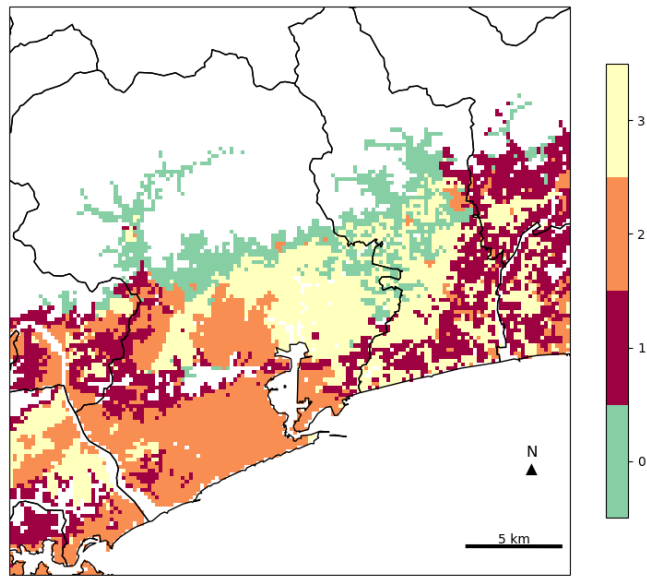


Fig. 24: Clustering results geocoded in the target region

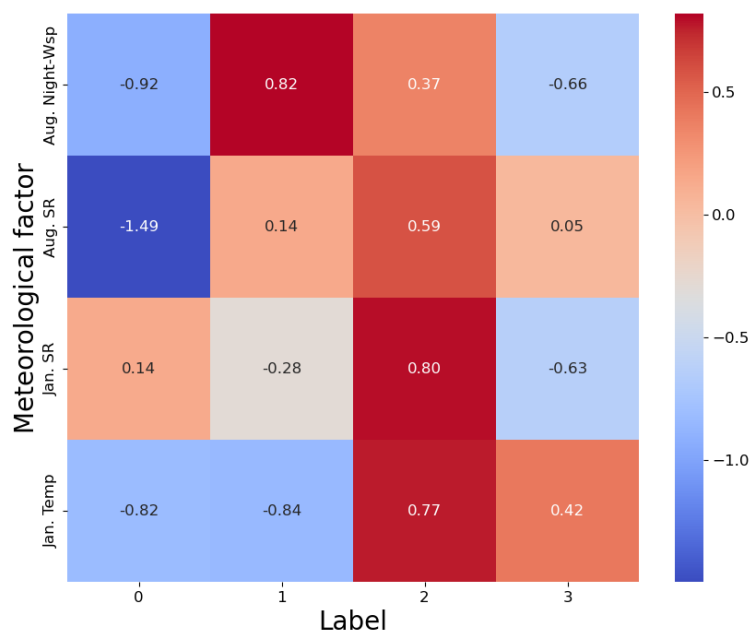


Fig. 25: Coordinate value of the cluster centroid

3.3 結果の解釈

本節では K-means++ 法により得られたクラスタリング結果を 3.1 節であげた、Table 4 をもとに解釈を行う。Fig. 24, Fig. 25 に着目すると、まず、ラベル 0 は対象領域の北部、特に山間部に分布している。冬期の日射量はやや大きく、昼光利用には期待できるが、気温が低く、日射熱利用のためには蓄熱躯体の採用や適切な断熱等の工夫が必要だと考えられる。また、夏期の風速が小さく、自然風利用にはあまり期待できない。ラベル 1 は特に夏期の風速が強く、自然風利用に大いに期待できる。一方で冬期の気温、日射量ともに小さく、暖房負荷の低減に対して対策が必要である。ラベル 2 は冬期において特に日射量が高く、昼光利用に期待できる。また、気温も高く、日射熱利用、太陽熱給湯等に期待できる。さらに夏期においても日射量が高く、太陽光発電にも期待できる。また、風速もそこそこ強く、自然風利用にも期待できる。ラベル 3 は冬期において気温が高く暖房負荷は比較的抑えられるが、日射量が小さく、昼光利用にはあまり期待できない。また、夏期においても風速が小さく、自然風利用は難しいと考えられる。

Table 6: Characteristics of each cluster for renewable energy use

Label	Characteristics
0	昼光利用には期待できるが、日射熱利用のためには工夫が必要だと考えられる。また、自然風利用には比較的、期待できない。
1	自然風利用に大いに期待できる。一方で暖房負荷の低減に対して対策が必要である。
2	昼光利用、日射熱利用、太陽熱給湯、太陽光発電にも期待できる。また、自然風利用にもある程度期待できる。
3	日射、自然風の利用が比較的難しく、対策が必要である。

4 自然エネルギー利用可能性の検討

本研究は都市計画スケールでの気象要素を用いた自然エネルギー利用可能性の検討を行うことを目的としている。そのため本節では対象領域内における市街化区域に対してそれぞれ第3章により求められたクラスターの気象的特徴や個々の気象要素の分布を用いてその可能性を評価する。市街化区域は都市計画法により「すでに市街地を形成している区域およびおおむね10年以内に優先的かつ計画的に市街化を図るべき区域」と定義される。本解析対象領域には高知市、南国市、吾川郡いの町、香美市において市街化区域が設定されており、これを対象に分析、評価を進めることとする。なお、市街化区域は国土数値情報の都市地域データより抽出し使用した。これら4つの都市は地形や土地利用などの自然的条件、交通施設の設置状況、日常生活の繋がりなどにおける都市の一体性から高知広域都市計画区域に指定されている。従って当市街地は今後計画的な市街地形成を行なっていくこと、また住宅地においては良好な住環境の形成が一層求められることから、都市計画的観点からも自然エネルギーの利用可能性を検討することに意義があると考えられる。Fig. 26 に本章で扱う市街化区域の分布を示す。



Fig. 26: Urbanized area in the target area

4.1 対象領域内の市街化区域における検討

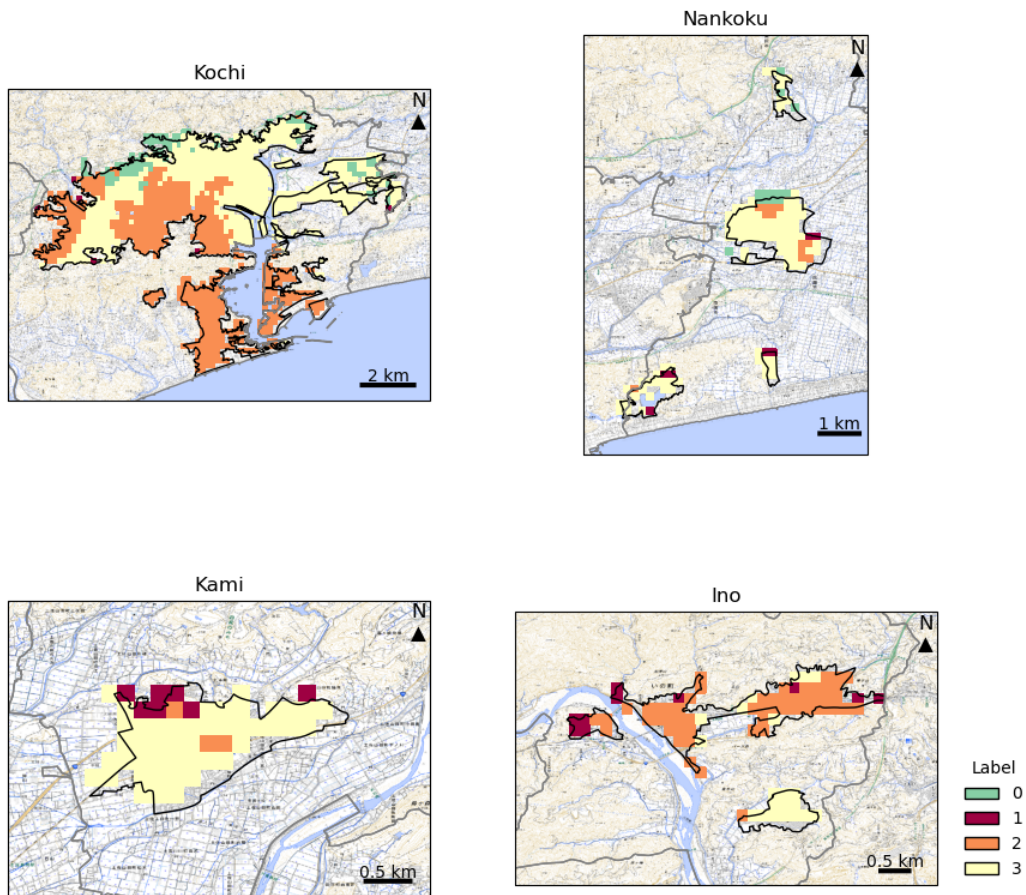


Fig. 27: Spatial distribution of clusters by area

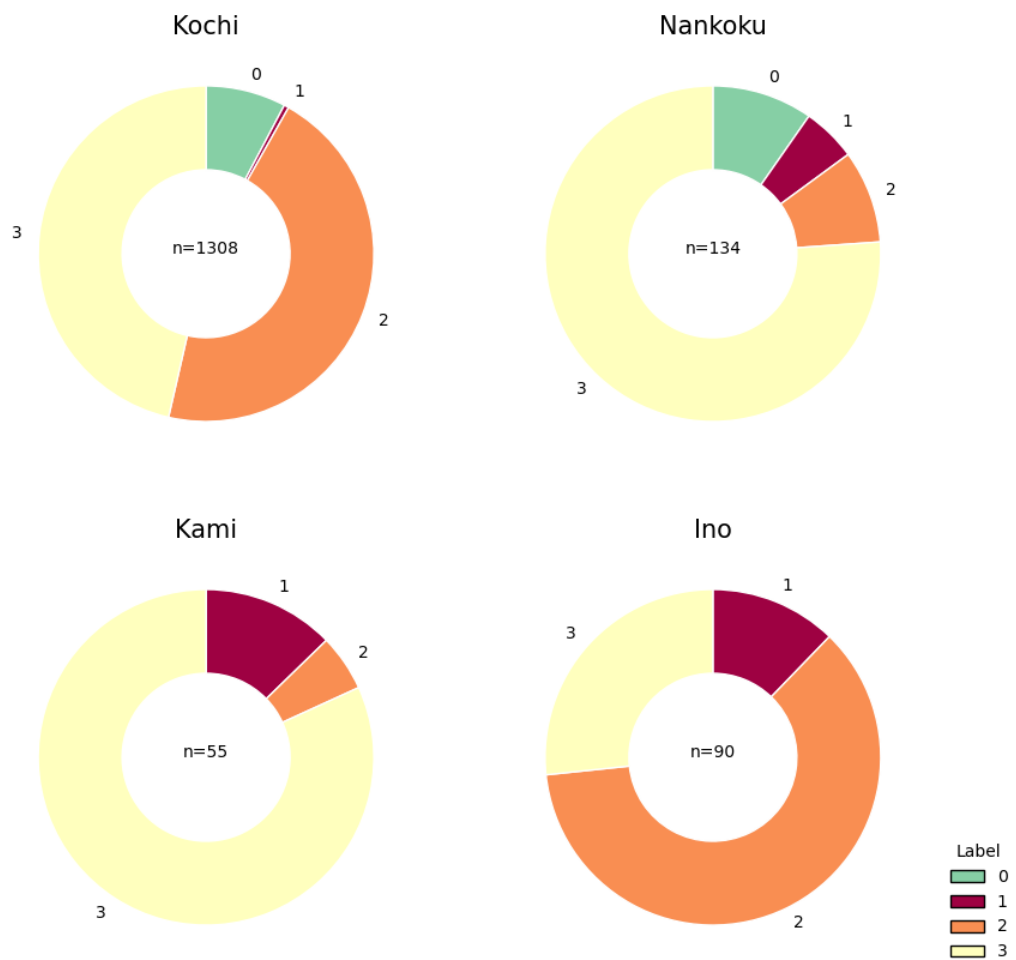


Fig. 28: Cluster aggregation by area

次に、地域間のクラスタリング結果、気象要素の違いを比較する。対象となる気象要素は夏期冬期それぞれ、月間積算日射量、月平均気温、月昼間平均風速、月夜間平均風速である。Fig. 29, Fig. 30 はクラスタリングの入力値に加えて、他の気象要素を地域ごと、クラスターラベルごとに集計した箱ひげ図である。グラフ上に示す赤色の波線は解析対象領域内 (Fig. 21) における各気象要素の平均値である。加えて、Fig. 33~Fig. 38 には、両月の各気象要素の地域ごとの空間的分布を示した。本節では、以降、地域ごとに各クラスターラベルにおける気象的特徴を比較し、その特徴から考えられる自然エネルギー利用方針可能性についてまとめる。

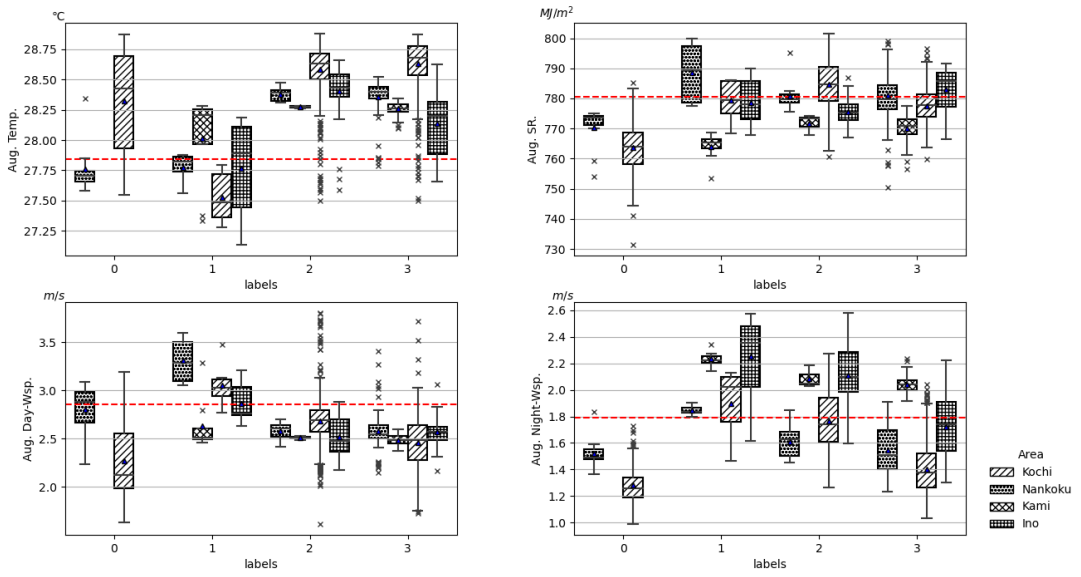


Fig. 29: Comparison of aggregate results for each meteorological element by cluster label among areas in August

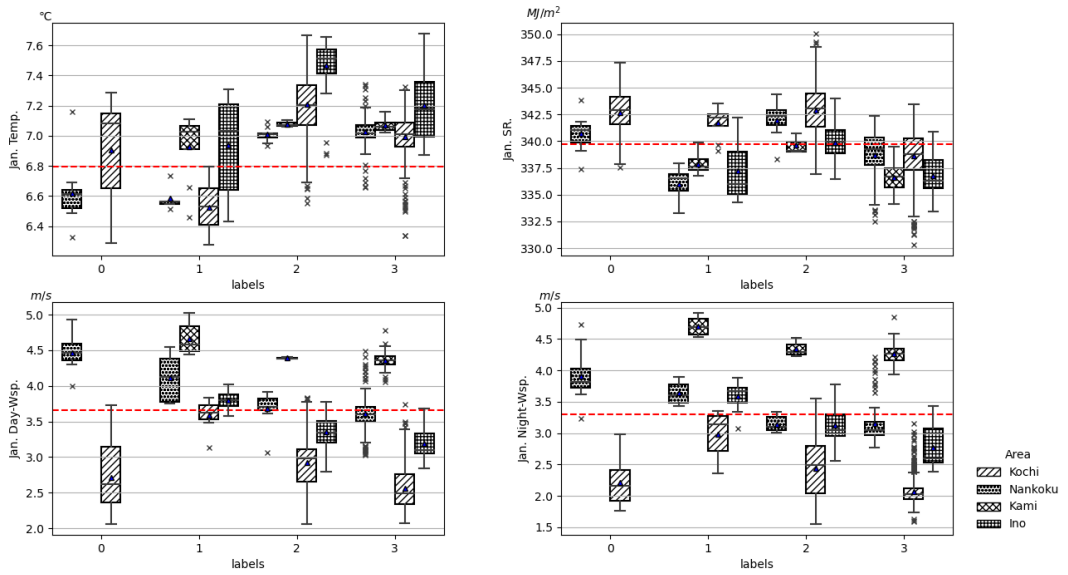


Fig. 30: Comparison of aggregate results for each meteorological element by cluster label among areas in January

4.1.1 高知市市街地

高知市市街地ではその大半をラベル2, 3が占め, 北部にラベル0, 残りのラベル1は局所的に点在している。日射, 自然風の利用が比較的難しいラベル3が特に高知市北部の地域に分布している。一方で昼光利用, 日射熱利用, 太陽熱給湯, 太陽光発電, 自然風利用に比較的期待できるとされるラベル2は地域内の南部および西部に分布している。ただし, 高知市市街地における気象特徴として, ラベル2, 3が分布する地域はともに夏期においても気温が高く, 都市温暖化の傾向が確認される。両ラベルともに自然風の利用のほか, 日射遮蔽, 躯体による蓄冷などの対策, 工夫が必要である。

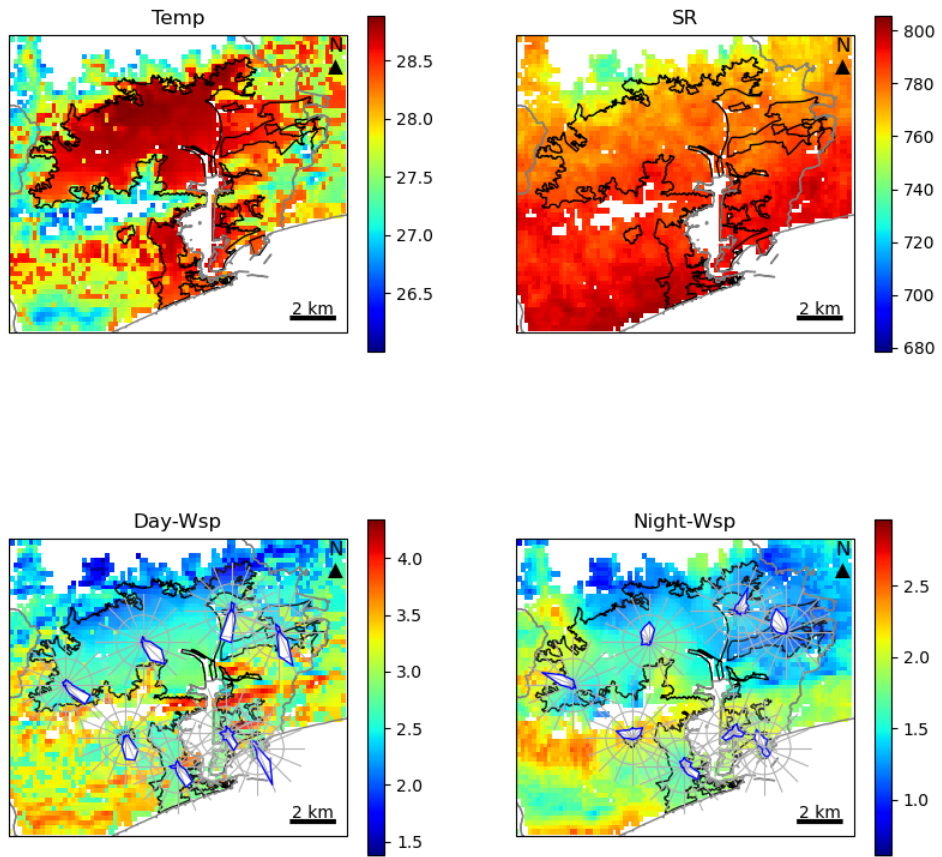


Fig. 31: Spatial distribution of each meteorological element in the urban area of Kochi City in August

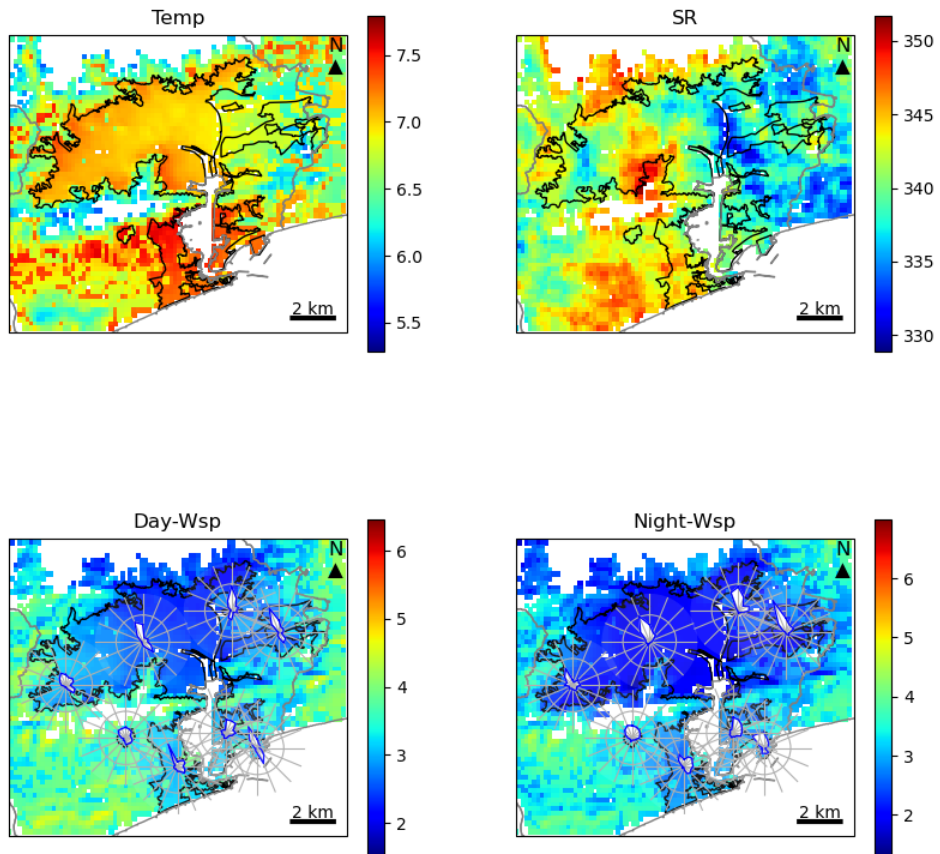


Fig. 32: Spatial distribution of each meteorological element in the urban area of Kochi City in January

4.1.2 南国市市街地

南国市市街地では日射、自然風の利用が比較的難しいラベル3が7割を占めており南国市街地全体に分布している。その他のラベルは局所的に点在している。南国市街地は高知市に次いで夏の気温も比較的高い傾向にあるため、高知市市街地と同様に冷房負荷の低減に十分に配慮する必要がある。

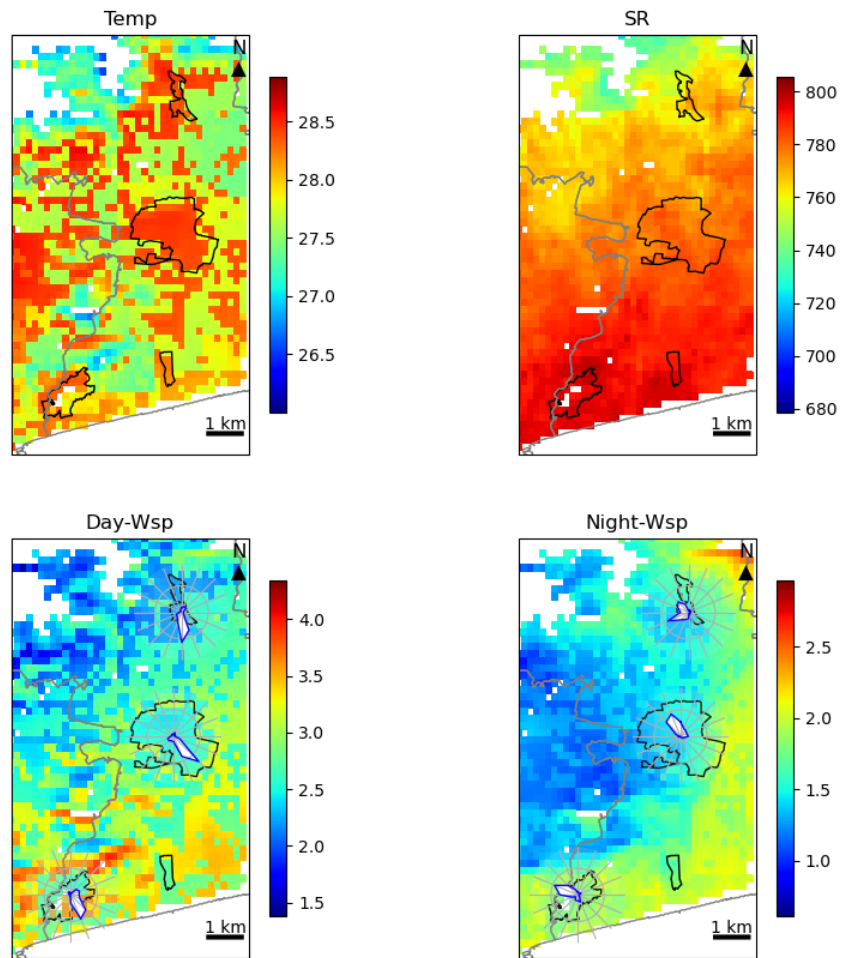


Fig. 33: Spatial distribution of each meteorological element in the urban area of Nankoku City in August

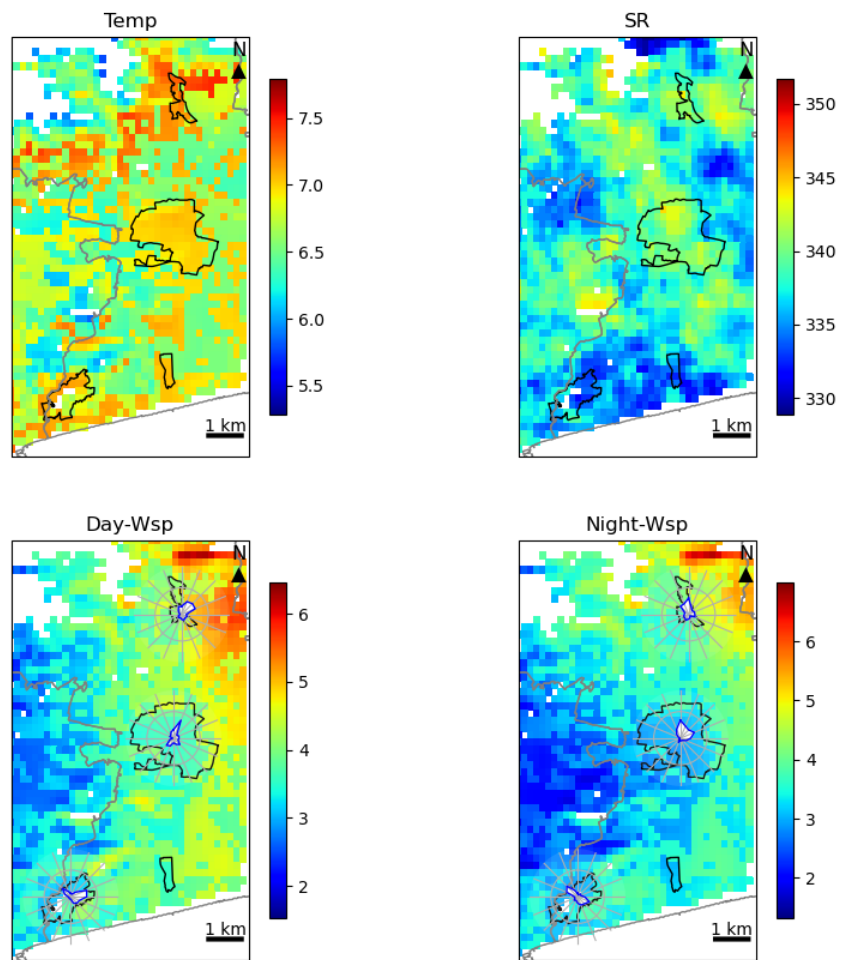


Fig. 34: Spatial distribution of each meteorological element in the urban area of Nankoku City in January

4.1.3 香美市市街地

香美市市街地では南国市と同様に日射，自然風の利用が比較的難しいとされる，ラベル3が大半を占めており，ついでラベル1，2が分布している．ラベル0は含まれない．ただし，香美市市街地の気象特性として，ラベル3の中では比較的，夏期夜間の風速が大きく，ラベル2の香美市市街地の風速と同程度となっている．そのため，香美市市街地では夏期における自然風利用に一定の程度期待できると言って良い．一方で冬期においても風速が大きくなる傾向が香美市市街地の全体で確認されるため，漏気などによる暖房負荷の増大が懸念されることから，住宅の気密性能を十分に確保するとともに，自然風制御の計画，外構の工夫が必要であると考えられる．

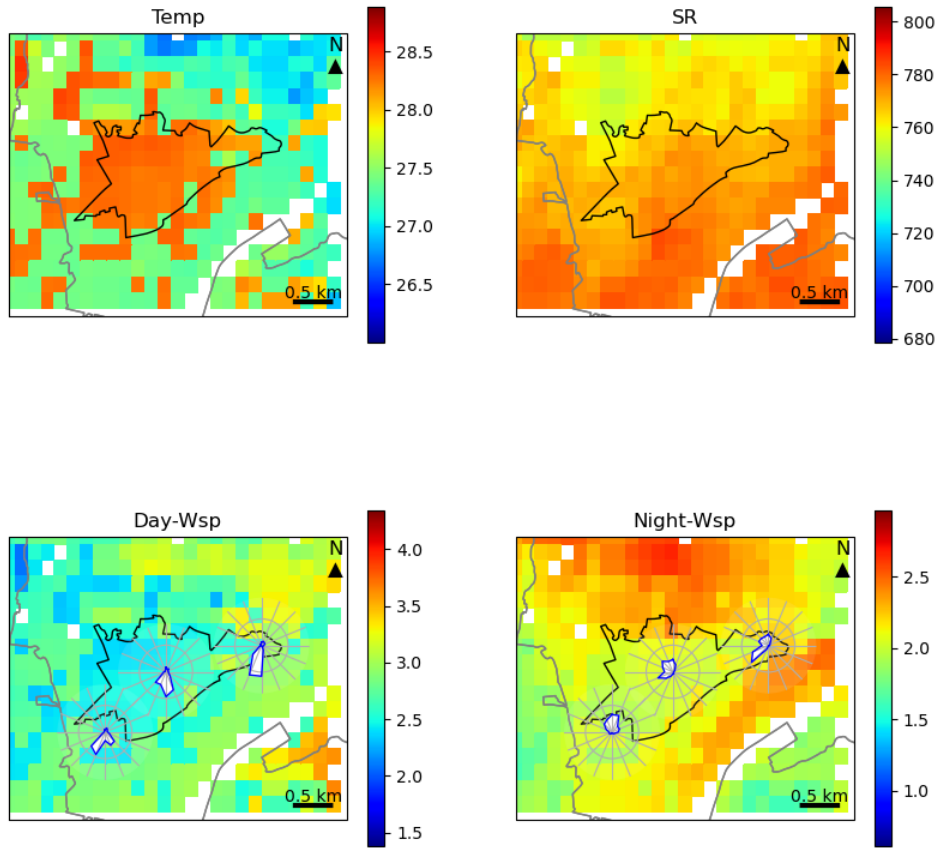


Fig. 35: Spatial distribution of each meteorological element in the urban area of Kami City in August

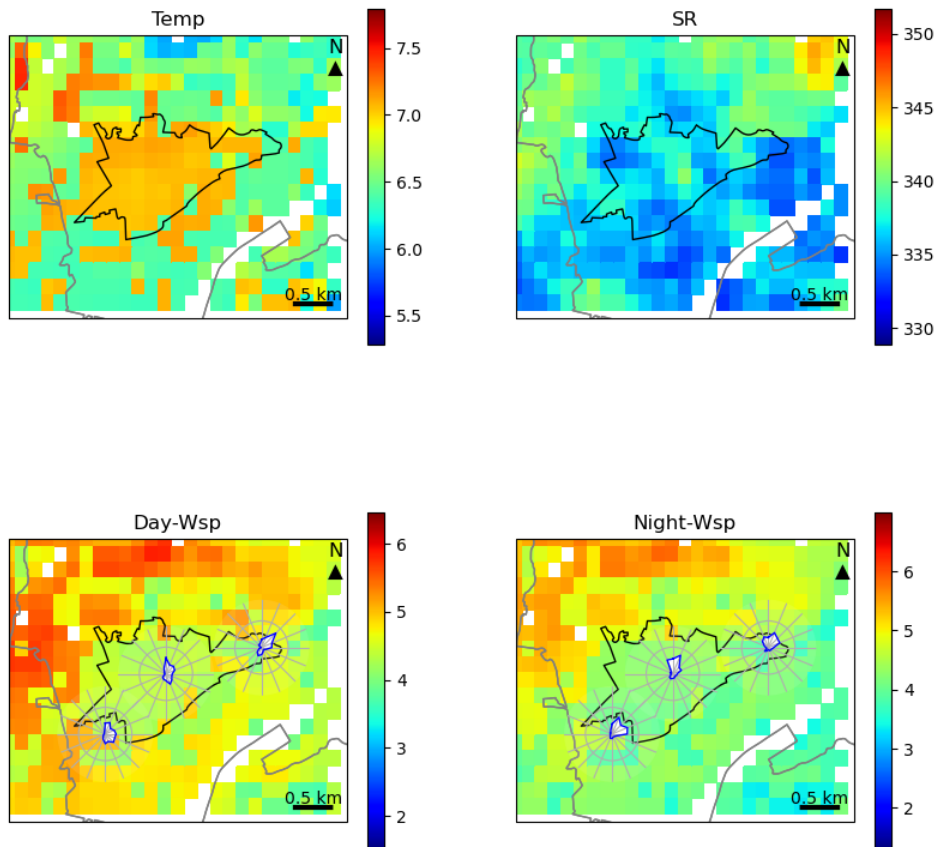


Fig. 36: Spatial distribution of each meteorological element in the urban area of Kami City in January

4.1.4 いの町市街地

最後にいの町は、昼光利用、日射熱利用、太陽熱給湯、太陽光発電や自然風利用に期待できるとされるラベル2が特に多く、ついでラベル1、3が分布しており、ラベル0は含まない。ただし、いの町市街地の気象特徴として、夏期においても高温であることから、冷房負荷が大きくなることが懸念されるため、自然風の利用のほか、日射遮蔽、躯体による蓄冷などの対策、工夫が必要である。また、冬期における風速が香美市市街地に次いで大きいことから、漏気などによる暖房負荷の増大が懸念され、住宅の気密性能を十分に確保するとともに、自然風制御の計画、外構の工夫が必要であると考えられる。

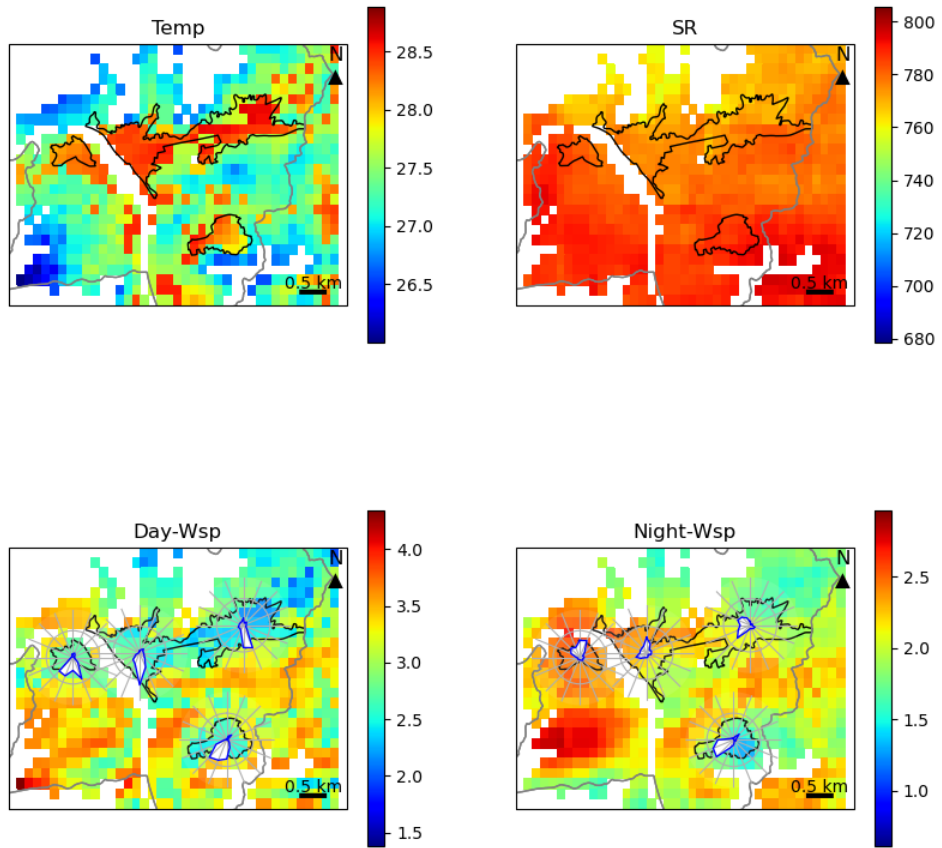


Fig. 37: Spatial distribution of each meteorological element in the urban area of Ino Town in August

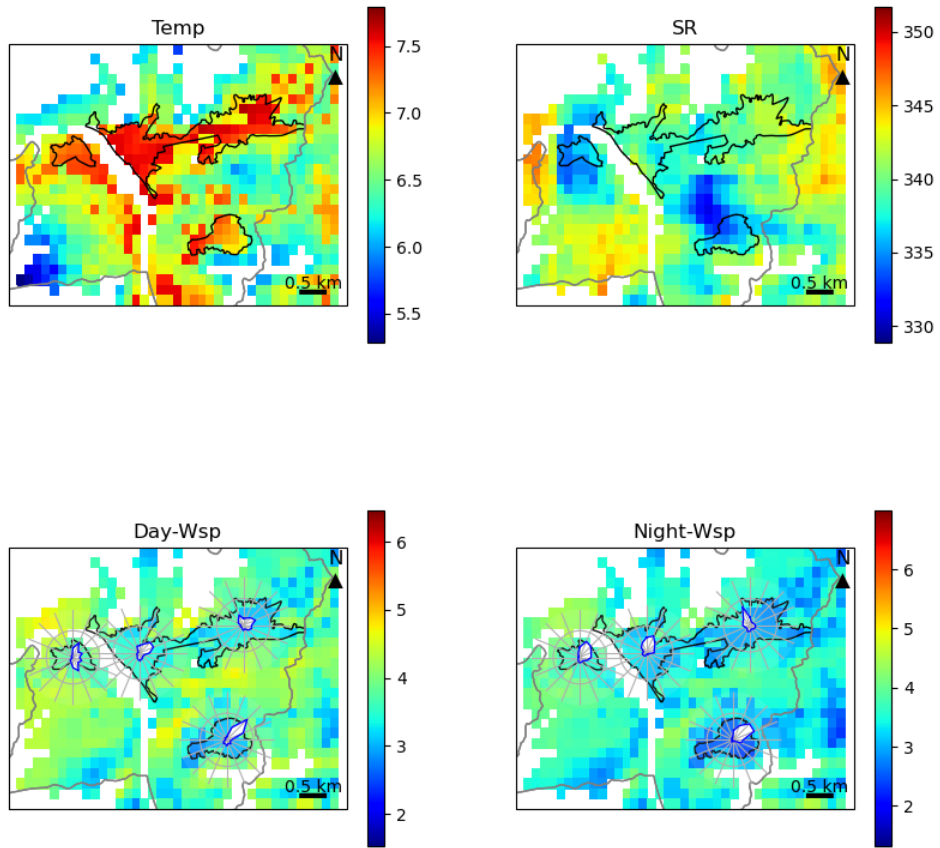


Fig. 38: Spatial distribution of each meteorological element in the urban area of Ino Town in January

5 まとめ

本稿では、2章において、領域気象モデルWRFの概要、ならびに使用した物理パラメータ、計算条件を整理したのちに、高知広域都市計画区域を対象とした夏期冬期における気象要素の再現を行い、地方気象台での観測データと計算結果との比較により再現精度の確認を行なった。また、計算結果の気温、風速、日射量の再現精度、空間的分布についての特徴を考察した。さらに3章では、自然エネルギー利用可能性の検討を行うにあたり、活用技術と気象要素の影響の仕方を整理したのちに、統計的手法を用いた気象的特徴の類型化を行なった。その後、類型結果の解釈を行い、自然エネルギー利用可能性検討のための基礎的なデータの整備を行なった。4章では前章で求められたクラスターを用いて高知広域都市計画区域を対象に地域ごとの自然エネルギー利用の方向性の検討を行なった。また、類型化に用いた入力値以外の気象要素も含めた評価を行い、地域別の方針を考察した。気象データの類型ならびに総合的な気象要素の分析を踏まえた各市街地での自然エネルギー利用可能性に関する考察を以下にまとめる。

(1) 高知市市街地では日射、自然風の利用が比較的難しいラベル3が特に広く分布している。一方で昼光利用、日射熱利用、太陽熱給湯、太陽光発電、自然風利用に比較的期待できるとされるラベル2は地域内の南部および西部に分布している。ただし、高知市市街地における気象特徴として、ラベル2、3が分布する地域はともに夏期においても気温が高く、都市温暖化の傾向が確認される。両ラベルともに自然風の利用のほか、日射遮蔽、躯体による蓄冷などの対策、工夫が必要である。

(2) 南国市市街地では日射、自然風の利用が比較的難しいラベル3が7割を占めており南国市街地全体に分布している。その他のラベルは局所的に点在している。南国市街地は高知市に次いで夏期の気温も比較的高い傾向にあるため、高知市市街地と同様に冷房負荷の低減に十分に配慮する必要がある。

(3) 香美市市街地では南国市と同様に日射、自然風の利用が比較的難しいとされる、ラベル3が大半を占めており、ついでラベル1、2が分布している。ラベル0は含まれない。ただし、香美市市街地の気象特性として、ラベル3の中では比較的、夏期夜間の風速が大きく、ラベル2の香美市市街地の風速と同程度となっている。そのため、香美市市街地では夏期における自然風利用にある程度期待できると言って良い。一方で冬期においても風速が大きくなる傾向が香美市市街地の全体で確認されるため、漏気などによる暖房負荷の増大が懸念されることから、住宅の気密性能を十分に確保するとともに、自然風制御の計画、外構の工夫が必要であると考えられる。

(4) いの町市街地は、昼光利用、日射熱利用、太陽熱給湯、太陽光発電や自然風利用に期待できるとされるラベル2が特に多く、ついでラベル1、3が分布しており、ラベル0は含まない。ただし、いの町市街地の気象特徴として、夏期においても高温であることから、冷房負荷が大きくなることが懸念されるため、自然風の利用のほか、日射遮蔽、躯体による蓄冷などの対策、工夫が必要である。また、冬期における風速が香美市市街地に次いで大きいことから、漏気などによる暖房負荷の増大が懸念され、住宅の気密性能を十分に確保するとともに、自然風制御の計画、外構の工夫が必要であると考えられる。

このように、WRFによって再現された気象要素の分布を用いて気象的特徴の類型化並びに地域別の自然エネルギー活用方針をまとめたが、WRFによる数値計算を行なったことで一定の土地利用、標高といった地形因子によって引き起こされる地域気候特性が反映され、地域別での自然エネルギー活用の最適化を図るための資料整備を行うことができた。本稿での成果が今後の居住環境整備における自然エネルギーの活用方針を決定する上で有効に活用されることに期待したい。

参考文献

- [1] 「菅総理大臣の米国主催気候サミットの出席について（結果概要）」、外務省ホームページ、令和3年4月22日
- [2] 「地球温暖化対策計画 令和3年10月22日閣議決定」、環境省ホームページ
- [3] 西川邦彦, 斎藤郁雄, 石原修: 自然エネルギーの活用のための気象データの整備と気候マップの作成, 日本建築学会計画系論文報告書 第509号, pp.15-20, 1998
- [4] 武政孝治, 小玉裕一郎: AMeDAS データに基づく建築設計用地域気候マップの作成 (1) 気温, 日射量, 暖房度日による地域気候特性の表示, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.1017-1018, 1992
- [5] 小玉裕一郎, 武政孝治: AMeDAS データに基づく建築設計用地域気候マップの作成 (2) PSP (パッシブ地域係数) による地域気候特性の表示, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.1019-1020, 1992
- [6] 松本真一, 長谷川兼一: 東日本大震災復興住宅の熱環境設計のための気候区分の提案 第1章 東北地方における気候特性. 2012年. 日本建築学会大会学術講演梗概集 (環境工学)
- [7] 竹林英樹: 大阪地域を対象とした都市環境気候地図の作成方法に関する研究, 平成22年度国土政策関係研究支援事業 成果報告書
- [8] 飯塚悟, 金原和矢, 日下博幸, 原政之, 秋本裕子: 夏季の名古屋の温熱環境を対象とした現状再現の精度検証と擬似温暖化手法を併用した将来予測の試み 領域気象モデル WRF による名古屋都市圏の温熱環境シミュレーション (その1), 日本建築学会環境系論文 第75巻, 第647号, pp87-93, 2010年
- [9] 富永禎秀, 鈴木匠: 領域気象モデル WRF を用いた新潟市の温熱・風環境の解析とマップ化, 新潟工科大学研究紀要 第19号, 2018年
- [10] Skamarock, W. C., Klemp, J. B., Dudhia, J., Gill, D. O., Barker, D., Duda, M. G., ... Powers, J. G. (2008). A Description of the Advanced Research WRF Version 3 (No. NCAR/TN-475+STR).
- [11] 秋本裕子, 日下博幸: 入力データおよび地表パラメータの変化に対する領域気象モデル WRF の感度実験. 2010年. 地理学評論 88-3, 324-340
- [12] Janjic, Zavisla I., 1994: The Step-Mountain Eta Coordinate Model: Further developments of the convection, viscous sublayer, and turbulence closure schemes. Mon. Wea. Rev., 122, 927-945.
- [13] Tewari, M., F. Chen, W. Wang, J. Dudhia, M. A. LeMone, K. Mitchell, M. Ek, G. Gayno, J. Wegiel, and R. H. Cuenca, 2004: Implementation and verification of the unified NOAA land surface model in the WRF model. 20th conference on weather analysis and forecasting/16th conference on numerical weather prediction, pp. 11-15.
- [14] 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, pp.329-358, 2001.
- [15] 田村英寿, 平口博丸, 橋本篤: 気象モデル WRF による翌日の日射量予測特性の評価. 太陽 / 風力エネルギー講演論文集. p. 335-338. 2010年
- [16] 国立研究開発法人 建築研究所: 温暖地版 自立循環型住宅への設計ガイドライン エネルギー消費50%削減を目指す住宅設計. 国土交通省. 2015年
- [17] 小林壽太郎: 気象をはかる, 日本規格協会, 1988年
- [18] 日本建築学会: 建築物荷重指針・同解説第4版, 2004年
- [19] Chris Albon: Python 機械学習クックブック, 田中秀基訳, オライリー・ジャパン, 2019年

6 謝辞

高知工科大学の赤塚慎准教授には本研究のご機会をはじめ、リモートセンシング合宿や四国 GIS シンポジウムでの発表、ゼミでの後輩指導など様々な活動機会を与えてくださるとともに、有益なご指導をいただきました。ここに深くお礼申し上げます。また、副指導教員の渡辺菊真准教授、副査の高木方隆教授には研究に対し、様々なアドバイスをいただきました。この場をお借りして感謝申し上げます。同研究室メンバーであり同級生である山崎将滉君には研究において互いに刺激しあい、また研究室 1 期生として様々な活動とともにチャレンジでき、自身の大きな力になりました。最後に、高知工科大学大学院への進学を後押し、支えてくれた家族に深謝の意をここに表します。