

地域の自然が保有する気候緩和効果を活かした 都市環境の再生手法

東北大学大学院工学研究科 都市・建築学専攻
教授 持田 灯

概要：

本研究では、気象観測データと気候数値解析技術を利用し、各地域の自然が持つ環境改善効果（環境ポテンシャル）の定量評価を行い、これに基づき、この環境ポテンシャルを最大限に有効活用するための新たな都市環境気候図を試作した。さらに、屋外実測、アンケート調査から得られる緑陰の有無が人間の温冷感へ与える影響と河川の冷却効果およびその影響範囲をこの都市環境気候図に加味し、都市化により損なわれた都市環境を再生するための提案を行った。

キーワード：気候数値解析 屋外実測 アンケート調査 海風 緑陰 河川の冷却効果

1. はじめに

近年、人口減少や低炭素化の流れを受け、コンパクトシティへの転換が叫ばれている。また都市部においてはヒートアイランド現象が深刻化しており、緑化をはじめとする多くの対策が検討されている。その対策の1つとして河川の冷却効果の利用が挙げられる。河川水が冷熱源として、また沿岸都市では河川空間が海風の道として周辺環境に対する冷却効果を持っている。これらの冷却効果は、その都市内の各地域の街路幅や建物配置、風向などにより影響範囲が変化するとされる¹⁾。このような

各地域の自然が持つ環境改善効果（環境ポテンシャル）の実態を把握し、有効に利用することにより自然の持つ気候緩和効果を最大限に活用した自然と都市空間が融合する都市構造への転換が可能となる。

本研究では気象観測データと気候数値解析技術を利用し、各地域の自然が持つ環境ポテンシャルを定量的に評価した。また、実測と被験者アンケート調査から緑陰や河川が人間の温冷感に及ぼす影響を明らかにすると同時に広瀬川周辺市街地において屋外温熱環境測定を実施し、河川の冷却効果を定量的に評価した。そして、最後に海風、河川風と緑陰の適切な利用という観点からの提案を行った。

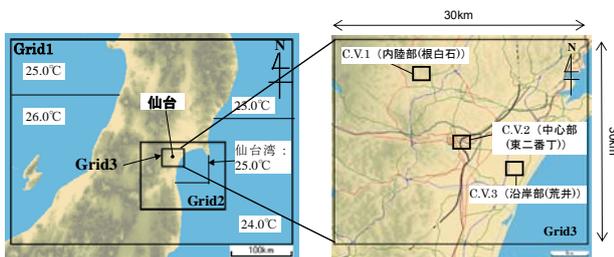


図1 解析領域

表1 解析領域、メッシュ分割数、メッシュ幅

	領域 (X×Y×Z) [km]	メッシュ分割数	水平方向 メッシュ幅[km]
Grid1	400×360×9.6	50×45×49	8
Grid2	120×120×9.6	60×60×49	2
Grid3	32.82×27.25×9.6	60×60×49	0.547×0.4625

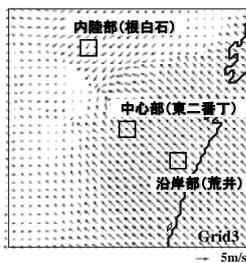
2. 仙台を対象とした気候数値解析に基づく海風の気候緩和ポテンシャルの定量化

(1) 解析概要

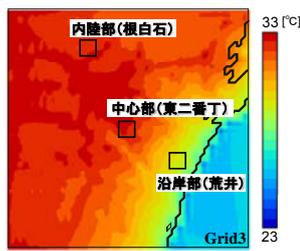
本解析の解析領域を図1に示す。また、それぞれの解析領域の広さ、メッシュ分割数および水平方向のメッシュ幅を表1に示す。本解析では3段階ネスティング手法を用いており、最小 Grid (Grid3) で仙台市をクローズアップして解析を行っている。解析モデルは複雑地形に適用可能な形に拡張された Mellor-Yamada モデルのレベル 2.5^{2)~4)}を利用した。解析は夏季については2000年8月3日午前6時、冬季については2000年1月12日午前6時からスタートし、その後42時間の時間積分を行っている。解析領域側面の境界条件については、Grid1に

表2 気象条件、初期条件

項目	夏季	冬季
解析対象日	2000年8月上旬	2000年1月中旬
温位分布	地表面高さにおいて25°C (298.15K)とし、鉛直温位勾配には0.005K/mを与えた。	地表面高さにおいて0°C (273.15K)とし、鉛直温位勾配には0.0044K/mを与えた。
上空風・風速分布	上端(9600m)において南東の風4.0m/sとし、地上高さ500mまで一定値を与えた。500m以下では、ベキ指数0.3のベキ乗則により鉛直方向に分布を与えた。水平方向には一様とした。	上端(9600m)において北西の風10.0m/sとし、地上高さ500mまで一定値を与えた。500m以下では、ベキ指数0.3のベキ乗則により鉛直方向に分布を与えた。水平方向には一様とした。
水蒸気分布	地表面での相対湿度を70%とし、地上高さ3kmまではMcClatcheyの大気モデルに従い、それ以上では相対湿度を0とした。	地表面での相対湿度を60%とし、地上高さ3kmまではMcClatcheyの大気モデルに従い、それ以上では相対湿度を0とした。
雲量	0.15 (快晴を想定)	0.527
海水面温度	図1参照	文献5)参照



(1) 風速ベクトル



(2) 気温

図2 典型的夏季晴天日の仙台の気流分布、気温分布 (13時、地上高さ10m)

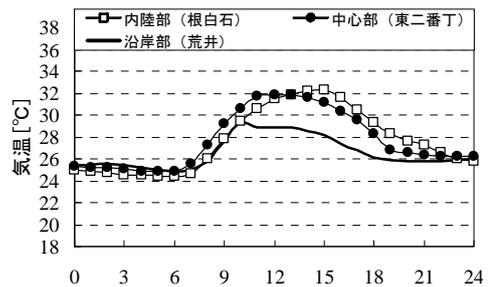


図3 各地域の気温変化(地上高さ10m)

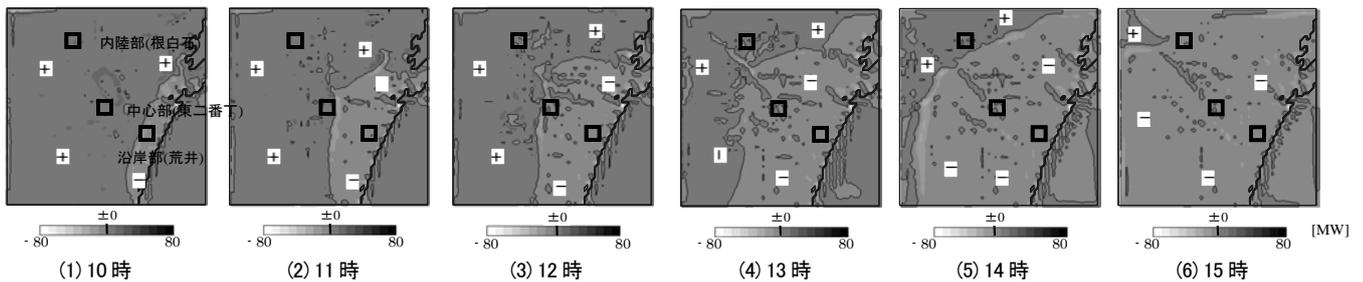


図4 時刻別顕熱収支MAP[MW](全顕熱収支(移流+乱流拡散+人工排熱)の空間分布特性、典型的夏季晴天日(8月上旬)、10時~15時、+が各C.V.内の気温の増加を示す。)

おいては水平方向微分項0で計算した結果を用い、Grid2、Grid3についてはその一つ上のメジャーグリッドの値で固定とした。各段階における、初期条件を表2に示す。境界条件については文献5)を参照されたい。

(2) 仙台市内で形成される気候の特性

図2に数値解析より得られた、典型的夏季晴天日、地上高さ10mにおける風速ベクトルと気温分布を示す。日中海風が卓越し、中心部と内陸部で気温が高い様子が分かる。また、図1に示した仙台市内(Grid3)の3地域に評価領域(Control Volume) (以降C.V.と表記、C.V.1(内陸部(根白石))、C.V.2(仙台中心部(東二番丁))、C.V.3(沿岸部(荒井)) : C.V.1~3のサイズはそれぞれ東西約2km、南北約2km、鉛直80m)を設定し、各地域の気温変化について解析を行った。各地域の気温変化に関する数値解析結果を図3に示す。沿岸部(荒井)では海風の影響により他の地域に比べて日中の気温が抑制されている。

また海風が内陸へ進入するにつれて中心部、内陸部の順に気温上昇が緩和されており、海風の冷却効果の高さが示されている。

(3) 熱収支構造の空間分布特性のMAP化

仙台市内約30km×30kmの範囲の解析領域全体(Grid3)を60×60のC.V.で分割し、それぞれのC.V.において熱収支分析を行い、都市内の熱収支構造の地域特性を定量的に示す「熱収支MAP」を作成した。顕熱収支構造の時刻変化を図4に示す。図4中の負値を示す領域は地表面発熱・人工排熱による気温上昇効果よりも、海風による気温低減効果が大きい地域を示している。10時頃には、地表面からの発熱の影響が大きいため、解析領域のほぼ全域で正值(顕熱の増加)となっているが、時間経過とともに海風の影響が大きい領域(図中の負値を示す領域)は内陸部へと拡大していき、12時頃に仙台中心部(東二番丁)、15時頃に内陸部(根白石)に到達する。

3. 緑陰が人間の温冷感に与える影響の定量化

(1) 実測概要

東北大学川内キャンパス内の日向と緑陰の2点(図5中のPoint A、Point B)で屋外温熱環境実測と人体生理量測定を行った。実測期間は2010年8月2,3日9:00~16:00, 4日9:00~13:00、測定項目を表3に示す。アンケート調査では条件を制御した被験者に対するアンケート調査と不特定多数の通行人へのアンケート調査の2種類を実施した。それぞれのアンケート回答数および生理量測定者数を表4に示す。条件を制御したアンケート調査は、図6に示すように、Point B(緑陰)に30分滞在し、その後Point A(日向)に30分滞在してそれぞれ滞在の初めと終わりの計4回、快適感等の心理量を申告する場合をCase①、Point A(日向)の後、Point B(緑陰)に移動する場合をCase②として、延べ46名に対して調査を行った。さらに、この調査の被験者のうち18名に対して人体生理量測定を行った。通行人へのアンケート調査は、測定領域付近の通行人に環境の感じ方を申告させ、測定点での滞在時間は設けず行った。

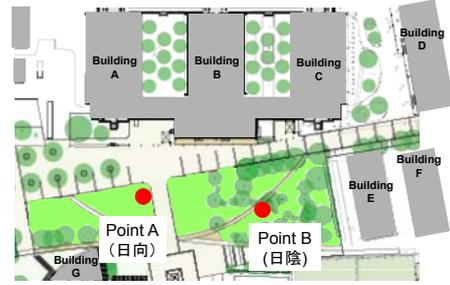


図5 実測・アンケート調査地点

表3 測定項目

測定項目	測定点	測定装置	測定間隔	測定高さ
気温・湿度	Point A, Point B	温湿度センサー付小型データロガー(T&D, TR-72)+日射遮蔽付二重通風管	1分	1.5m
風向・風速		3次元超音波風速計(RM Young, CYG-81000)	0.1秒	
グローブ温度	Point A	グローブ温度・熱電対	1秒	0m
全天日射量		全天日射計(要弘機機MS-801)	1分	
長短波放射量	Point A	長短波放射計(要弘機機MR-50, MR-40)	1分	1.1m
体重減少量		電子天秤(A&D GK-100K)	30分	
発汗量	控え室, Point A	発汗計(西澤電機計測製作所 SKN-2000)	1秒	/
鼓膜温	Point A, Point B	耳式体温計(オムロン MC-581)	5分	
皮膚温		熱電対	1分	

表4 被験者数

		Point A	Point B	合計
通行人	8/2	130	153	529
	8/3	86	86	
	8/4	28	46	
人体生理量測定+アンケート被験者	8/2	8		18
	8/3	7		
	8/4	3		
人体側の条件を制御した被験者(アンケートのみ)	8/2	17		28
	8/3	10		
	8/4	1		
アンケート回答数合計				575

(2) 条件を制御したアンケート調査の結果

a) 各測定点に30分滞在したときの心理量

図7(1)に各測定点において30分滞在した後の快適感と各被験者の滞在期間中のMRTの時間平均値の関係を示す。快適感とMRTには強い相関がみられる。長短波放射量を計測したPoint A(日向)のみの回答について、短波、長波放射量と快適感の関係(図7(2))を見てみると、快適感との短波成分の関係と、快適感とMRTの関係の不快側はよく似ていることがわかる。長波放射量は増減があっても500W/m²前後で推移しているが、短波放射量は0~200W/m²と大きく変動しており、短波放射量の増減により放射量の総量が決まる。そのため、夏期の屋外環境では短波成分の増減が快適感の変化に大きく影響を与えていると考えられる。このとき、人間側の状態を見てみると、短波放射量と皮膚温の30分平均値、有効発汗量には相関がみられ、放射が生理量に大きく影響を与えていることが確認された(図8)。

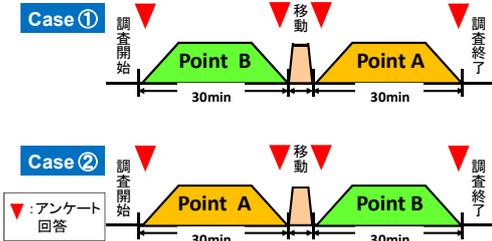
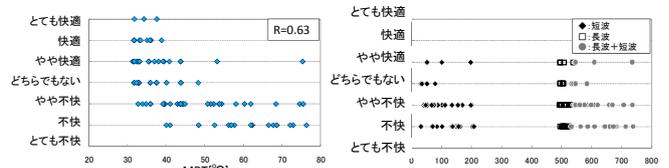


図6 調査スケジュール

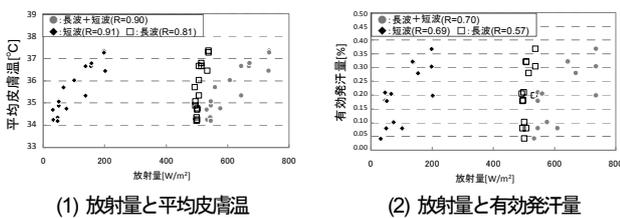
(3) 通行人へのアンケート調査の結果(図9)

物理環境要素と快適感の申告の比較で、最も相関がみられたのはMRTであった(図9(1))。また、汗のかき具合と快適感にも弱い相関がみられる(図9(2))。どちらも条



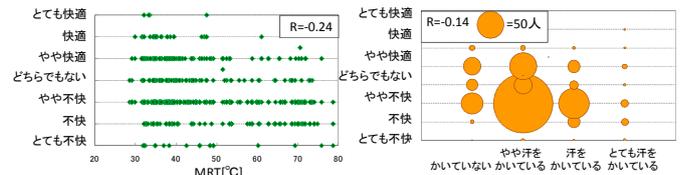
(1) MRT と快適感 (2) 放射量と快適感

図7 アンケート調査結果(条件を制御した被験者)



(1) 放射量と平均皮膚温 (2) 放射量と有効発汗量

図8 生理量と放射環境



(1) MRT と快適感 (2) 汗のかき具合と快適感

図9 アンケート調査結果(通行人)

件を制御した調査の結果と同様の傾向があるが、通行人アンケートの方が相関が弱まっている。これは、通行人の直前の行動の履歴、着衣量によっても快適性に強く影響を及ぼす因子が変化するためと考えられる。

4. 河川が保有する冷却効果の把握

(1) 実測概要

a) 河川敷における温熱快適性アンケート調査

調査は2010年9月25日の10:00~12:00に、広瀬川上流から下流にかけて5地点(折立、澱橋、米ヶ袋、宮沢橋、閑上)で行った(図10)。折立は市街地の中心部を抜けた上流、澱橋、米ヶ袋、宮沢橋は市街地中心部、閑上は河口に位置する。このうち、折立、米ヶ袋、閑上の3地点でアンケート調査と同時に温熱環境実測を行った。アンケート回収数を表5に、アンケート調査、温熱環境実測の様子を写真1に示す。アンケートは寒暑感、快適感を7段階尺度で申告させ、温熱環境測定では、SET*算出のために必要な風速、気温、相対湿度、グローブ温度を計測した。

b) 米ヶ袋周辺地域における温熱環境実測

測定は2010年9月26日の9:00~16:00に、仙台駅(市街地中心部)より南西に約1km、海岸線からは北西に約10km離れた米ヶ袋地区にて行った(図11(1))。川を挟んで米ヶ袋地区側の岸は河川敷で、対岸は崖になっており、高低差は約30mである。図11(2)に米ヶ袋地区での測定点の分布を示す。測定点は河川敷(測定点1)と米ヶ袋地区の道路軸に沿って50~100m間隔に設置した(測定点2~16)。また、河川上の気温として、米ヶ袋地区の下流に位置する愛宕大橋の河川面上約10mの位置で計測を行った(測定点17)。測定項目を表6に示す。温湿度は全測定点で計測し、河川敷では、これに加えて風速、グローブ温度、水中温度を計測した。水中温度は米ヶ袋地区側の岸の近くで計測し、測定点での水深は38cmであった。水面、川底と水面の中間の位置、川底の3点で計測を行った。

(2) 実測結果

a) 河川敷におけるアンケート調査とSET*の対応

図12に折立、米ヶ袋、閑上におけるSET*と、SET*に対応する温熱感覚を示す⁶⁾。アンケートの寒暑感に関して

の回答は全調査点で「やや寒い」がもっとも多く、閑上では「寒い」「とても寒い」の回答も、各々、25%と20%程度あった。一方、温熱環境測定の結果から求めたSET*の値は、米ヶ袋では20℃前後、折立では18~20℃程度であったのに対して、閑上では15~17℃程度であり、アンケート結果とSET*の算出結果はよく対応していた。



図10 アンケート調査測定点

表5 アンケート回収数

アンケート調査点	アンケート回収数
折立	28
澱橋	51
米ヶ袋	42
宮沢橋	69
閑上	41
合計	231



(1) アンケート調査

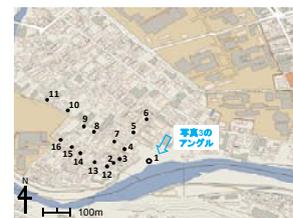


(2) 温熱環境実測

写真1 調査の様子(9月25日)



(1) 測定領域(米ヶ袋地区)



(2) 各測定点の位置

図11 米ヶ袋周辺の温熱環境実測(9月26日)の測定領域

表6 測定項目

測定項目	測定機材	測定高さ	測定間隔	測定点
温湿度	温湿度センサー付 小型データロガー (T&D, TR-72)、 日射遮蔽付二重通風管	地上1.2m	2分	全測定点
グローブ温度	グローブ球+T型熱電対		2分	
風速	3次元超音波風速計 (R.M.Young, CYG-81000)		0.1秒	測定点1
水中温度	T型熱電対	水面付近、 中間、川底	2分	

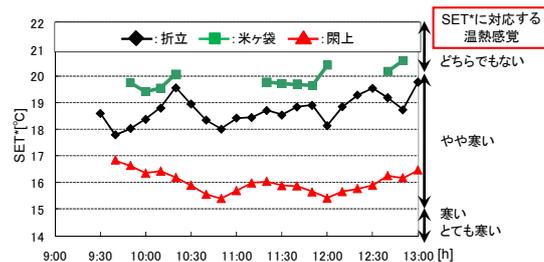


図12 SET*の時間変化(9月25日, 10分間平均値)

b) 熱画像

図13にサーモカメラで撮影した熱画像と、同じアングルの写真を示す。図13(1)は河川敷から広瀬川を撮影したもので、図13(2)は測定点12近くの住宅街を撮影したものである。川の表面は、建物壁面や土壌と比較して低温に保たれていることがわかる(図13(1))。住宅地では、日射が当たる部分の道路やブロック塀等の人工被覆の表面温度がとて高くなっている(図13(2))。

c) 風向・風速

図14に仙台管区気象台(測定高さ52m)と河川敷(測定点1, 測定高さ1.2m)における風向・風速の経時変化を示す。仙台管区気象台での風向は9時から10時にかけてはほぼ北西で、その後11時頃からは風向は南から南東に変化する(図14(1))。南東風は仙台市における夏季日中の卓越風向であり、風向が南東になった11時過ぎには風速が大きくなっていることから、海風が仙台中心部に到達したものと推定される。一方、米ヶ袋の河川敷(測定点1)の風向は、9時から10時にかけてはほぼ南西であるが、11時頃からは南東から東に変化する(図14(2))。仙台管区気象台の風向と河川敷の風向を比較すると(図15)、上空風が北から南よりに変化しても河川敷では川筋の蛇行に沿った風向になっており、河川上を吹く風が地形により影響を受けていることが確認された。

d) 水中温度

図16に水中温度と河川敷の気温経時変化を示す。図16の14時10分から15時10分の水温はデータ欠損である。川底、川底と水面の中間の位置、水面付近で水温はほぼ同じであった(図16)。水面の温度と河川敷での気温差をみると、計測時間帯では、水面の温度が気温を下回り、最大で5.4℃の差があり、最小でも1.7℃であった。このことから、広瀬川が冷源としての機能を有することが確認された。

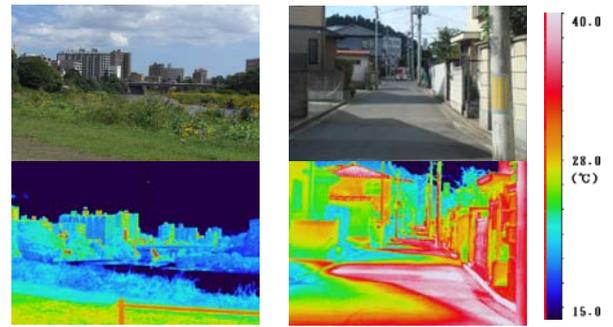
e) 気温

図17に、河川敷(測定点1、河川敷からの距離は約10m)、今回の測定点の中で川から最も距離のある測定点11、河川上10m(愛宕大橋、測定点17)の気温の時間変化を示す。測定期間を通して、測定点11、河川敷、河川上の順で気温が高い。河川上10mの気温は、他の測定点と比べ海風が仙台市中心部に到達したと推定される11時前後に温度上昇が抑えられており、河口から10km程度離れた米ヶ袋地区でも海風の冷却効果は失われていないといえる。

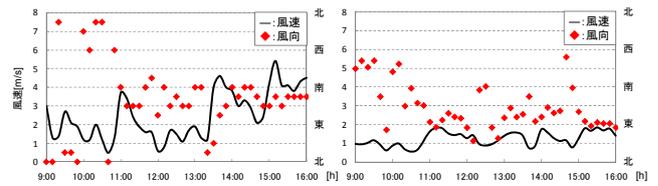
14時前後から河川敷と河川上10mの気温差が小さくなっているが、このとき上空の風速が大きくなっている(図14(2))。風速が大きくなると、河川上の気温の鉛直分布が均一化するという報告があり¹⁾、今回の測定でもその傾向が認められた。

5. まとめ

1) 数値解析技術により各地域の気候特性を把握した。ま



(1) 広瀬川(12:30頃撮影) (2) 住宅地(13:30頃撮影)
図13 熱画像



(1) 仙台管区気象台 (2) 米ヶ袋
図14 風向・風速の経時変化(10分間平均値)

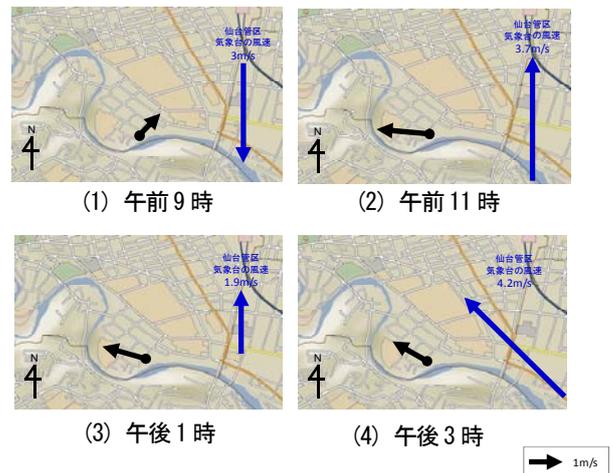


図15 各時刻の風速ベクトル(10分間平均値)

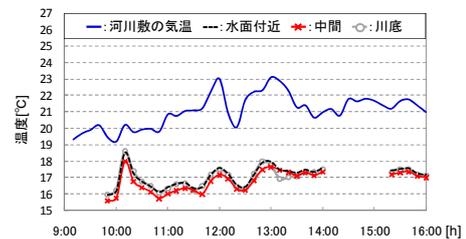


図16 水中温度の時間変化(10分間平均値)

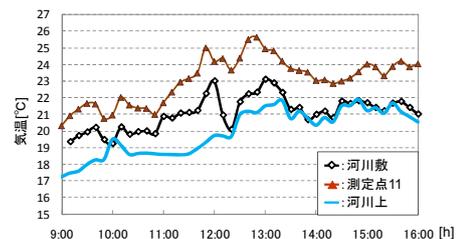


図17 気温の時間変化(10分間平均値)

た、熱収支 MAP を作成し、各時刻の海風の進入過程および影響範囲を明らかにするとともに、海風による気温低減効果を示した。

- 2) 日向、緑陰における屋外実測とアンケート調査から物理環境要素と快適感の関係性に関するデータを収集し、人間の快適感には放射が強く関係していることを示した。
- 3) 広瀬川流域において屋外実測とアンケート調査を行い、河川の冷却効果および海風の道としての機能を有するという結果を得た。
- 4) 以上の結果から、都市化により損なわれた都市環境再生のための提案として、仙台市における「低木・高木による緑化推奨地区 MAP」(図 18)を作成した。この MAP は以下の手順で作成されたものである。
 - ①まず、熱収支分析により、夏季の日中に海風による気温低下が期待できる地域(図 19(1))、冬季の日中に季節風による気温低下が懸念される地域(図 19(2))を算出した。
 - ②次に、この2つの領域を重ね合わせ、重なった領域を図 19(1)から除外し、残った領域を海風の有効利用が推奨される地区とした(図 20)。
 - ③これに仙台市の土地利用図(図 21(1))において緑地が少ない地域(図 21(2))を重ね、図 20 と重なる地域では海風の効果を遮らないように低木による緑化を、図 19(2)と重なる地域では夏季の緑陰による日射遮蔽効果、冬季には季節風の影響を和らげる効果を得るために高木による緑化を推奨する。
 - ④また、河川空間における緑化では、風の道としての機能を損なわない緑化計画(芝、低木等の選定、樹木の配置等)が推奨される。

参考文献

- 1) 成田他：都市内河川が周辺の温熱環境に及ぼす効果に関する研究，日本建築学会計画系論文集，第 393 号，1988.11
- 2) Mellor G.L., and Yamada T. : 1974, A Hierarchy of Turbulence Closure Models for Planetary Boundary layer, J of Applied Meteorology, Vol.13, No.7, pp.1791-1806、1974
- 3) Mellor G.L., and Yamada T. : 1982, Development of a Turbulence Closure Model for Geophysical Fluid Problem, Rev. Geophys. Space Phys., Vol.20, No.4, pp.851-875、1982
- 4) Tetsuji Yamada and Susan Bunker : 1989, A Numerical Model Study of Nocturnal Drainage Flows with Strong Wind and Temperature Gradients, Journal of Applied Meteorology, Vol.28, pp.545-554、1989
- 5) 大場拓、吉田知弘、持田灯、吉野博、渡辺浩文：仙台におけるヒートアイランド対策検討のための都市気候のゾーニング手法の提案、第 19 回風工学シンポジウム論文集、pp.55-60、2006.11
- 6) 中山昭雄編：温熱生理学、理工学社

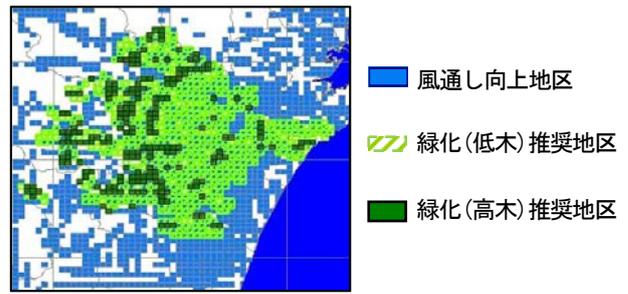
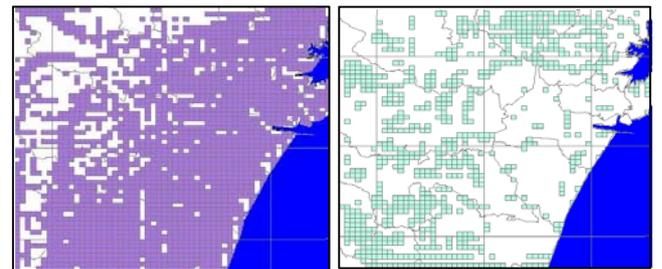


図 18 低木・高木による緑化推奨地区 MAP



(1) 夏季の日中に海風による気温低下が期待できる地域 (2) 冬季の日中に季節風による気温低下が懸念される地域

図 19 海風・季節風の影響が強い地区の抽出

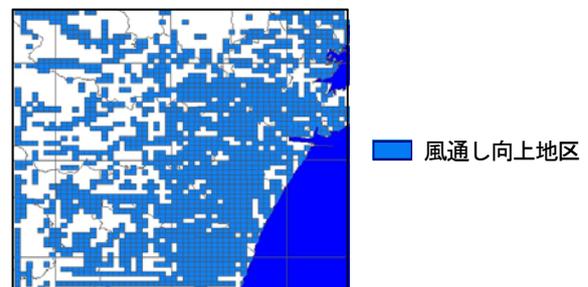
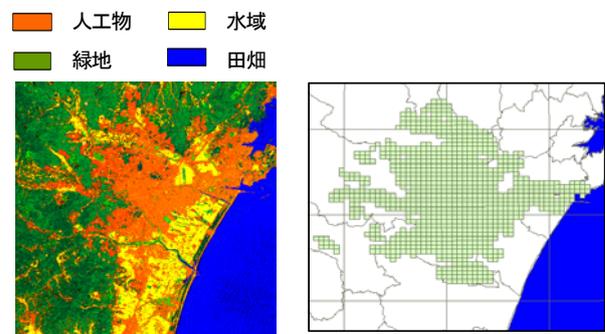


図 20 海風の有効利用が推奨される地区



(1) 土地利用図 (2) 緑地が少ない地域

図 21 仙台市の土地被覆