

首都圏のヒートアイランド現象に及ぼす植生と海風の 効果に関するリモートセンシングを用いた実態把握

金子大二郎¹

¹正会員 工博 松江工業高等専門学校教授 土木工学科

(〒690-8518 松江市西生馬町14-4)

本研究では、リモートセンシングデータと気象台ルーチンデータを用いて地表面温度の平面分布形を風向条件によって区別し、首都圏の気温と地表面温度に及ぼす植生と海風による温度低下について検討した。具体的には、AMeDAS地点において観測された気温と、気象衛星NOAAから得られる地表面温度とを用い、地表面熱収支の境界条件となる地表面温度が、大気と相互作用している実態を捉えると共に、植生指標NDVIを用いて首都圏における植生と海風が接地層気温に及ぼす緩和効果について季節的実態を抽出した。現実の地表面温度は、日射と土地利用によって一義的に定まるのではなく、風向条件により冷たい海面や都心からの熱の移流を受けて平面分布が変化する。また、植生による気温緩和効果は、植生指標NDVIと共に増大し最大5℃に達した。この値は、著者が Landsat TMデータを用いて島根県域について得た植生による気温緩和の抽出効果である5℃以上の値と一致する。これらの現象は、ヒートアイランドの数値シミュレーションにおける地表面熱収支のモデリングに重要である。

Key Words: Mitigation, Air temperature, Vegetation, Sea Breeze, NDVI, Remote Sensing, Metropolis, AMeDAS, Heat Island, NOAA.

1. はじめに

近年の首都圏では、都市が大規模に発達したことにより、植生域の減少に伴った都市熱環境の問題（ヒートアイランド現象）が顕著になっている^{1), 2)}。この大都市における温熱環境や、微風時のヒートアイランド循環による大気汚染現象の解明を目的とした研究が、既に古くから進められてきた^{3), 4), 5)}。国内では、特に首都圏のヒートアイランド現象が注目され1930代の福井以来、Yamashita⁶⁾ほか多くの研究が報告されている^{7), 8), 9), 10), 11), 12), 13), 14), 15)}。また、よりスケールの大きな現象としての海陸風について、多数のシミュレーションによってメカニズムが研究されている^{16), 17), 18), 19)}。この都市気候の機構の解明や海陸風・大気汚染シミュレーション等の局地循環の分野において、地表面における境界条件としての地表面温度や地表面熱収支は、場の風が弱い場合に大気の流れを支配する重要な境界条件となる。著者は、衛星リモートセンシングデータと気象台ルーチンデータを用い、対象域にMonin-Obukhov相似則を適用することによって、地表面熱収支を広域的に推定してきた

^{20), 21)}。シミュレーションの地表面熱収支をモデル化する際の基礎法則としてのMonin-Obukhov相似則も、都市の粗度スケールと非一様性によって、近年に都市への適用性が吟味されており、適切な熱収支の推定に課題が指摘されている^{22), 23)}。地表面温度の平面分布は、一次元の熱収支として日射を始めとする気象条件や地表条件としてのAlbedo・熱容量・土壌水分等のみによって定まるのではなく、風上からの熱の移流による影響を受けることが、島根県における海風による地表面温度低下の実態²⁴⁾から知られている。従って、都市域においても同様に、熱の移流によって地表面温度の平面分布が変化することが予想される。ところが都市気候の研究分野において、風の影響に視点を置いた大気・陸面相互作用としての地表面温度と風との関係についての実態研究が見当たらない。現在、都市気候のシミュレーションの際に、地表面の熱的境界条件は一般に地表面熱収支式を解く方法^{11), 25), 26), 27)}が採用されている。しかし、海風がもたらす熱の移流効果によって生じる大気・陸面相互作用としての地表面温度分布の変形特性を取り扱った論文は報告されていない。

一方、本論文ではリモートセンシングデータを都市熱環境に応用しているが、この考え方はCarlson²⁸⁾がNOAA AVHRRを用いてLos Angelesを対象とし、リモートセンシングの利用の可能性を指摘した例が最初である。続いてPrice²⁹⁾がHCMMを用いてNew York周辺の人口と地表面温度との関係を抽出している。また、Roth et al.³⁰⁾がヒートアイランド強度と土地利用の関係や、衛星による地表面温度と従来のヒートアイランド強度との相違について報告している例や、Gallo et al.^{31), 32)}が、最低気温と地表面温度の関係を報告した論文がある。我が国についても報告例があり、東京について冬季のヒートアイランドではあるがKawashima³³⁾によるLandsat TMを用いた研究例があり、地表面温度と植生指標NDVIとの関係や地表面温度によるヒートアイランド強度と植生指標との関係や、市街域では植生指標が大きいにも拘わらず地表面温度が下がらないことを報告している。また、関東平野の諸都市における夜間の地表面温度によって定義されたヒートアイランド強度に関する例³⁴⁾や、広島市における都市キャノピー構造と輝度温度との関係の研究がある^{35), 36)}。或いは、建築分野の視点から航空機MSSリモートセンシングによる住宅地についての熱環境を論じている^{37), 38)}。

本論文は上述の研究と異なり、リモートセンシングデータを用いて先に述べた大気陸面相互作用を抽出しようとする目的を持っている。即ち、多数のAMeDAS地点において観測された風データと気象衛星NOAAから得られる地表面温度を用いて、主として海風を念頭に置き、首都圏に吹送する風の風向条件と地表面温度の平面分布形とを広域的視点から検討した。その結果、現実の地表面温度の平面分布は、海風や都心域からの風によって熱の移流効果を受けており、陸面が大気と相互作用している実態を捉えた。その際、地表面温度の変化は風による影響ばかりでなく、従来から良く知られている様に植生域からの蒸発散による潜熱効果を同時に受けている^{31), 39), 24), 40), 41), 42)}。緑地や水辺の周辺が涼しい事は古くから知られており、本篠・高倉^{43), 44)}によるリモートセンシングデータを用いた地表面温度や川又・玉井・河原¹²⁾による河川敷の植生指標と地表面温度の報告例がある。また、現地観測による緑地内での気温緩和の実態が神田・稲垣・日野⁴⁵⁾や浜田・三上⁴⁶⁾によって報告されている。本研究では、著者らが島根県において適用した方法⁴⁷⁾により、広域的視点から衛星リモートセンシングデータと気象台ルーチンデータを用い、植生指標NDVIが首都圏の気温と地表面温度に及ぼす影響の実態を捉えようとするものである。多数のAMeDAS地点において観測された気温と気象衛星NOAAから得られる地表面温度・植生指標

NDVIを用いて、首都圏における植生が接地層気温に及ぼす緩和効果を抽出した。この過程で、海風を念頭に置き首都圏に吹送する風向条件によって地表面温度の平面分布特性を検討した結果、現実の地表面温度の平面分布は、風向によって熱の移流を受け、地表と大気との相互作用によって平面的に変化している実態を捉えており、地表面温度に現れた熱の移流による大気・陸面相互作用と地上気温に及ぼす植生効果の二つの面について実態を報告する。

2. 対象地域と使用データ

(1) 対象地域

対象地域は、首都周辺の関東地方全域である。衛星データの各ピクセル地点の土地利用を抽出するために国土数値情報データの1/10細分区分土地利用データを利用した。各ピクセルに含まれた土地利用種類の中から最多頻度の土地利用種類を代表土地利用とし、図-1に示した。また、接地層気温に及ぼす標高の影響を検討するために、国土数値情報の1kmメッシュの標高データを使用した。これらの土地利用データは、気象衛星NOAAのAVHRRから得られるの植生指標NDVIと、分解能1.1kmの各ピクセル地点の緯経度とを合わせるにより対応づけた。図-1中の横線は、高温となる都心の地表面温度を郊外地点と比較し、植生が地表面温度に及ぼす影響を後節で検討するための横断位置を示している。

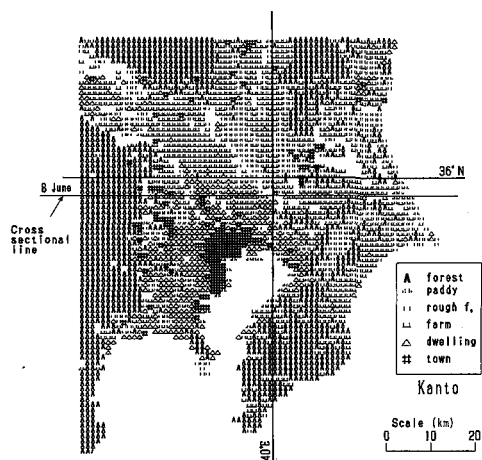


図-1 対象地域の土地利用と断面分布のための横断線位置

使用した衛星データの観測日と対象日における東京気象台の気象条件を表-1に整理して示した。ケースの選択は次のような条件と手順によった。

- 1) まず、土地利用の変化の影響を避けるため、単年度の間に快晴の多い年を選択した。
- 2) 都心を中心に快晴のデータを選び、ヒートアイランド現象と植生による緩和に使用できる季節のシーンを選んだ。
- 3) 熱の移流効果のために風向の異なる気象条件の衛星データを選択した。

気象データの時刻は、気象衛星NOAA11号のデータに合わせて14時である。いずれも首都圏が快晴日でありかつ同一時刻であるため、島根県における植生の気温緩和について報告⁽⁷⁾したように、地表面熱収支の視点から気温を左右する日射がまず重要であり、その日射が面的にほぼ同一な気象条件となつて、雲の有無による日射の変動が気温に及ぼす影響を除くことができ、植生による気温緩和効果を抽出することが期待できる。広域的に快晴であつた1991年6月8日について、NOAA AVHRR のデータから関東周辺を切り出した対象地域の植生指標NDVIの平面分布を図-2に示した。

気象衛星NOAAについての植生指標は次式により定義される.

$$NDVI = \frac{NIR - VIS}{NIR + VIS} \quad (1)$$

ここに、NIR:AVHRRの近赤外帯であるch2

VIS:AVHRRの可視域であるch1

植生の多い地域は、房総半島南部と丹沢・足尾・八溝の山地である。逆に植生の少ない地域は、東京都心部と埼玉県北西部から群馬県南東部にかけてであり、いずれも後述する地表面温度が高い地域となっている。この植生指標の平面分布から、AmeDASと同じ地点の植生指標NDVI値を求めた。使用した気象データは、気温、風向・風速、気圧である。関東地方の一部六県に分布するAmeDASの75地点の中から標高300m以上の山地部と島を除く51地点のデータを使用した。気象台・測候所の位置と共にAmeDAS地点を図-3に示した。

なお、館野高層気象台の気象ゾンデを用いて、放射輝

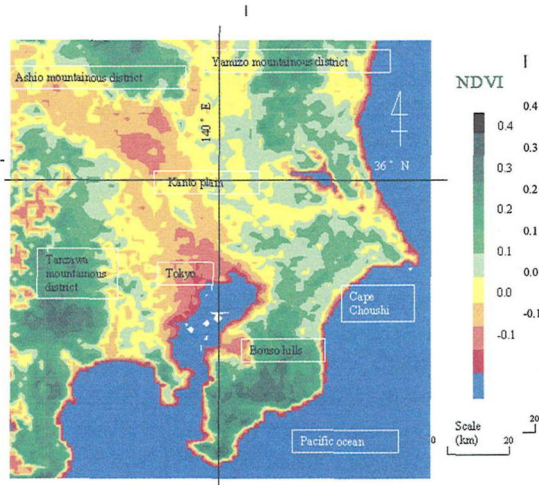


図-2 NOAA AVHRRによる首都圏の
植生指標NDVIの平面分布

表-1 対象日と東京気象台の気象条件

Case	NOAA AVHRR	Wind	Wind speed	Air temp.	Relative humid.	Global solar radiation	Pressure	Vapor
No.	scene	dir.	(ms ⁻¹)	(°C)	(%)	(MJm ⁻² hr ⁻¹)	(hPa)	(hPa)
1	1991.06.08	ESE	2.4	28.3	36	2.85	1014.9	13.9
2	1991.08.16	ENE	4.0	27.5	50	2.84	1008.4	18.4
3	1991.10.15	NNW	8.2	20.9	30	1.94	1006.2	7.5
4	1992.04.28	S	7.5	22.8	54	2.64	1000.5	15.1

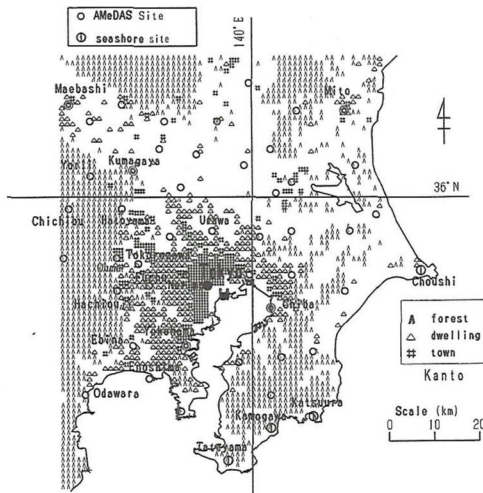


図-3 首都圏周辺のAMeDAS地点の分布

度温度に及ぼす水蒸気等による赤外吸収の影響と、都心部の人工構造物の多い土地利用による放射率の減少が地表面温度に及ぼす影響についてWVS(Water Vapor Scaling)法により別途に検討している⁴⁸⁾。

3. 地上気温の平面分布の特性

(1) 都市の平均気温と人口密度の関係

都市規模の拡大と共にヒートアイランド現象が一般に顕著となることが知られており、都市気温と人口との関係について古くから多くの研究例^{34), 49)}がある。そこで最初に、衛星によって地表面温度が得られている日の地上気温と都市の人口密度との関係を確認する。人口データは自治省行政局編集の平成三年版全国市町村要覧に依った。関東地方のAMeDAS地点において観測された14時の気温と人口密度との関係を図-4に示した。図中の気温と人口との関係が、従来から指摘されるような人口密度と共に気温が単調増加するような単純な関係ではないことを示している。現地データであるAMeDAS地点の気温は、人口密度ばかりでなく、多数の要因の影響を同時に混在して受けている。即ち、都心域地点の気温(図-4中の三角印)は確かに高温となっているが、都市開発の指標である人口密度の影響ばかりでなく、後に述べる標高・植生量・海風等の影響を受ける。その結果、気温は横軸の人口密度ばかりに支配されず、観測値がかなりバラついている。しかし、人口密度の増加と共に気温の下限値が増大している事が分かる(図-4中の下限の斜線)。青木ら⁴⁹⁾による都市気温上昇と人口との関係によれば、各地の日最高気温についての都市気温上昇が、平野・海岸・

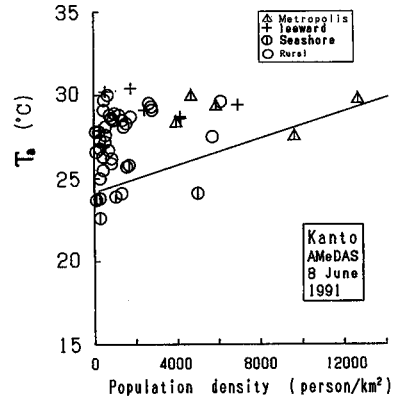


図-4 AMeDAS地点の気温と人口密度の関係

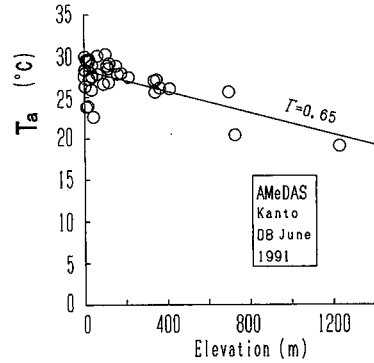
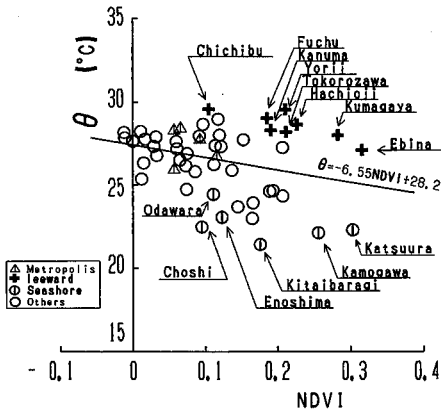
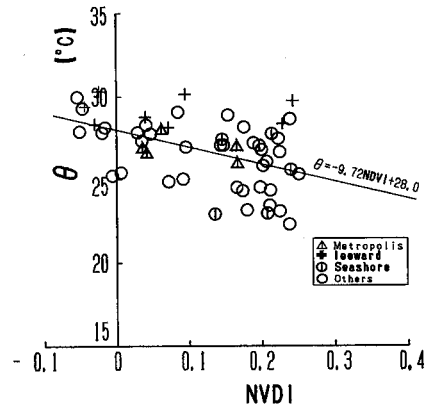


図-5 AMeDAS地点の気温と標高との関係



a) 1991年6月8日



b) 1991年8月16日

図-6 AMeDAS地点の温位 θ と植生指標NDVIの関係

盆地によりバラつきが顕著であった状況と同様である。

(2) 地上気温と標高の関係

AMeDAS地点の観測気温は、標高による気圧変化を受けているはずである。従って、気圧低下による気温低下の影響を除くためには、気圧1000hPaに換算された温位 θ により相互比較をするか、あるいは標高の高いAMeDAS地点を対象から除き、標高の影響を無視できる範囲に留める必要がある。

AMeDAS地点の気温と標高との関係を図-5に示した。気温は標準大気と同様に、気温減率 $\Gamma=0.65^{\circ}\text{C}/(100\text{m})^{-1}$ の割合で低下している。茨城県の館野における高層気象ゾ

ンデデータによるこの日の9時における気温の鉛直分布には、成層等による気温の不規則変化は認められていない。標高の影響を除くために温位 θ に変換し、植生と海風による気温緩和効果を検討した。

(3) 植生指標NDVIと気温の関係

標高の影響を除けば、快晴日におけるAMeDASの気温に及ぼす影響の主たる要因は、近年、Grimmond and Oke⁵⁰⁾らによって都市域においても潜熱が無視できない量であることが知られて来ているものの、植生域からの蒸発散による潜熱効果と一般的に考えることができる。そこで、1991年6月8日におけるAMeDAS地点の温位 θ と植生指標

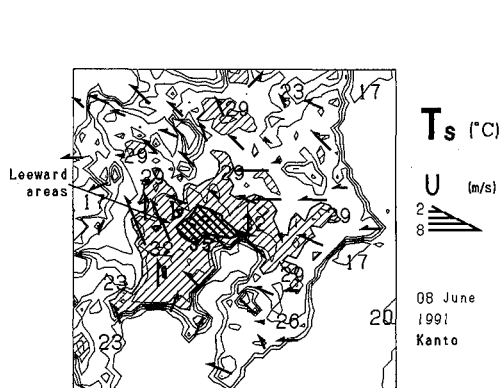


図-7 地表面温度と風の平面分布
初夏における海風のある条件のケース (1991年6月8日 ; ENE, $U=2.1\text{m/s}$ at Tokyo)

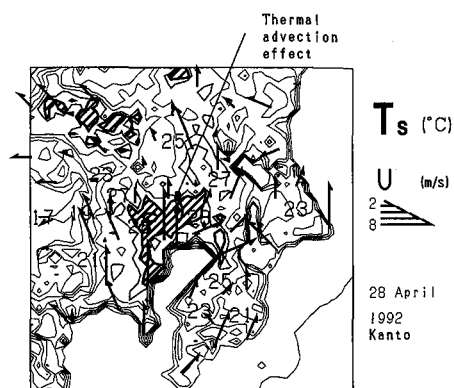


図-9 地表面温度と風の平面分布
春季の南風条件のケース (1992年4月28日 ; S, $U=7.5\text{m/s}$)

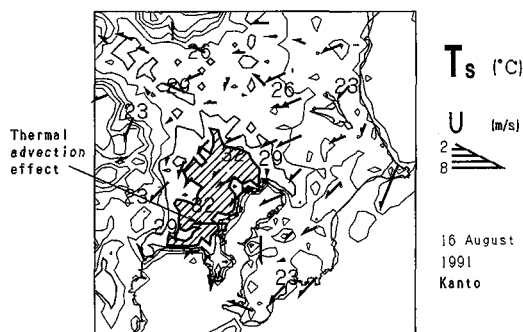


図-8 地表面温度と風の平面分布
夏季の北東風条件のケース (1991年8月16日 ; ENE, $U=4.0\text{m/s}$)

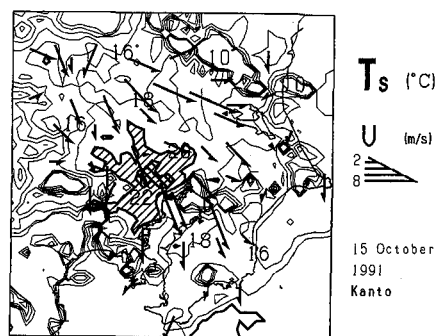


図-10 地表面温度の平面分布
秋季の陸方向からの強風条件におけるケース (1991年10月15日 ; NNW, $U=8.2\text{m/s}$)

NDVIとの関係を図-6 a) に示した。AMeDAS地点の温位 θ は、バラつきはあるが植生指標NDVIの増大と共に低下している。しかし、温位の観測値の分布とAMeDAS地点の地形関係に注目すると、海岸地点の温位 θ が低く、海風による気温緩和効果が大きいことが分かる。次に、風向がNEである1991年8月16日のケースを図-6 b) に示した。NE風向のために神奈川・千葉方面に位置するAMeDASの海岸地点が風下となることから、図-6 a) と異なり水温の低い海からの移流効果がこれらの地点では認められず、温位 θ は低くなっていない。また、図-6 a) の1991年6月8日に風下であった地点 (+印) の温位 θ も、図-6 b) 中では都心の風下では無くなったために、都心域からの熱の移流効果が消えている。従って、植生指標と共に温位 θ が一様に低下し、主として植生の気温緩和効果を受けていることが分かる。

(4) 海風による熱の移流効果

海風の影響であることを確認するために、AMeDAS地点の風向・風速と地表面温度の平面分布を図-7に示した。関東地方全域に南東風向の風が吹いており、海岸付近のAMeDAS地点の気温がいずれも低い原因は、海風による熱の移流効果を受けていることによる。海岸地点における気温緩和効果は、植生指標NDVIの増大と共にわずかに低下するものの、ほぼ一定である。その気温緩和量は、植生指標 (NDVI) がゼロに近いマイナスである都市部の高い気温と海岸地点の低い気温との差によって気温緩和を表すと、約7℃に達している。次に、植生指標が大きいにも拘わらず、気温が高いAMeDAS 7 地点 (図-6中の+印) は、八王子・府中・寄居・熊谷・秩父・所沢・海老名等である。これらの地点は地形と風向から見て、東京の風下に当たる内陸の地点であった。これらの内陸地点の気温も植生による気温緩和効果を受けており、植生指標NDVIの増大と共に低下している。AMeDASの気温分布と同時刻に観測されたNOAA AVHRRによる関東地方の地表面温度の平面分布を図-7によって観察すると、南東からの風を受け、熱の移流効果によって風下である東京の北西部と神奈川県の内陸部一帯に地表面温度の高温域が広がっている。この傾向は、島根県においてLandsat TMによって得られた地表面温度低下と海風の関係の場合と同様である²⁰⁾。また、池田・河原・玉井⁵¹⁾ らによる東京圏の気温推定の際に現れた内陸部の気温実測値が推定値より高く、沿岸部では逆に推定値が過大な高温となった原因を、上述した都心からの熱の移流と海風による気温緩和によって説明することができる。熱の移流効果の影響を確認するために、風向条件の異なる1991年8月16日の地表面温度と風速の平面分布を合成図によって図-8に示した。地

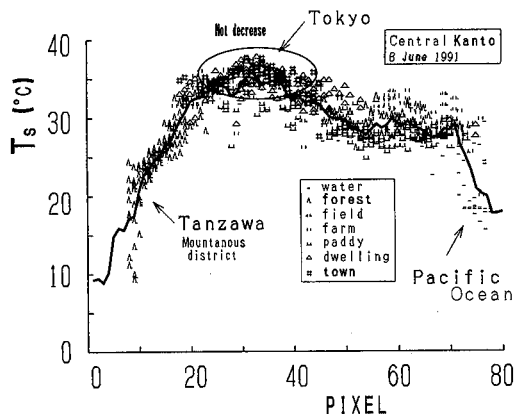


図-11 図-1の断面位置における地表面温度の横断分布

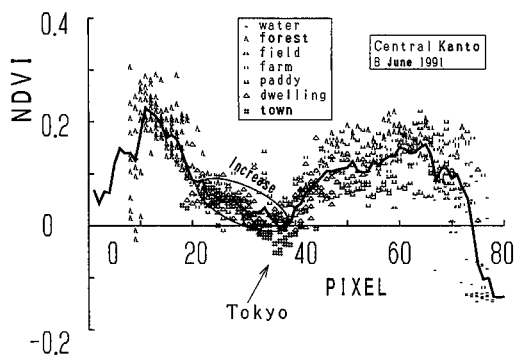


図-12 植生指標NDVIの横断分布

表面温度の平面分布は、北東からの風によって都心から風下である江ノ島方面に高温域が尾を引くように広がっている。同様に、南風向の条件である1992年4月28日の地表面温度と風の合成図を図-9に示した。南風の影響を受け、風下である浦和から内陸側の所沢にかけて地表面温度の高温域が分布している。この実態は、埼玉県南東部において、夏場の最高気温が南からの海風時に観測されている事実と一致し、都心部からの熱の移流効果があることが既に報告されている¹⁴⁾。この様に、いずれのケースも都心の風下側へ地表面温度の高温域が特徴的に広がっており、都心域において熱せられた高温大気が、風によって風下に流されて熱の移流を引き起こし、大気との相互作用によって地表面温度が都心の風下側で高温となっている実態を知ることができる。この現象は、首都

圏の都市環境を解析する場合に、地表面における熱的境界条件の性質として重要である。

地表面温度の平面分布形が風の吹送に伴う熱の移流効果に影響されていることを裏付けるために、風による熱の移流効果が無いと予想される陸方向からの風条件、すなわち北西方向からの風条件の場合を分析する。風向NNW、風速8.2m/sと強い1991年10月15日における地表面温度と風の合成図を図-10に示した。但し、10月中旬であるので、全天日射量が1.94 MJm⁻²hr⁻¹と既に弱くなっている。このケースでは、北西の風のため風上側の北関東に高温となった市街域が無く、移流効果は無視できる程に小さい。その結果、地表面温度の高温域は、通常の形状を持っている。即ち、植生が少ないことによって潜熱フラックスの小さな中央線・高崎線の鉄道に沿った市街域と同様な分布形になっている。

(5) 植生による気温緩和効果

次に、首都圏の気温に及ぼす植生による緩和効果に注目する。1991年6月8日におけるAMeDAS地点の気温と植生指標NDVIとの関係を前掲した図-6 a)の中で、海風の影響を強く受けている内陸地点(図中の+印)を除いたAMeDAS地点の気温データ群が、植生による気温緩和効果を示している。植生による気温緩和量を求める基準として、植生効果が全くない地域を定義する。NOAA AVHRRからの植生指標NDVIが雲のない陸域で最も小さな値と見なせる前述のようにNDVI=0(負値は多くの場合、水面。)の地域を植生量が近似的にゼロとし、その地点における気温を植生による気温緩和効果が全くない場合の基準の気温とする。この植生指標NDVI=0の高温地点と植生指標の大きな低温地点を比較すると、両者の気温差によって表される植生の気温緩和効果は、約4~5℃あった。この気温の緩和量は、島根県における日最高気温の植生による緩和効果の5℃以上⁴⁷⁾や気温推定法⁵²⁾の推定値6℃とほぼ一致している。参考値としてGallo³¹⁾のSeattleにおける報告例があり、シアトルについて最低気温が3~4℃下がっている結果を図によって示している。

(6) 首都圏における地表面温度の横断分布

気温上昇の源となる地表面温度について、都心域を横切る地表面温度の横断分布によって、郊外に比較してどのようなになっているかを調べた。調査対象範囲と共に図

表-2 AMeDASによる気温の平面分布

Name of AMeDAS site	land use	Surface air temperature T _a (°C)							
		8-Jun		16-Aug		15-Oct		28-Apr	
		T _a	ΔT	T _a	ΔT	T _a	ΔT	T _a	ΔT
Tokyo	Metro	28.3	4.6	27.5	4.0	20.9	2.3	22.8	1.9
Nerima	Metro	Leeward 29.7	6.0	28.3	4.8	20.5	1.9	Leeward 25.1	4.2
Fuchu	Urban	Leeward 29.4	5.7	28.3	4.8	21.0	2.4	23.2	2.3
Tokorozawa	rural	Leeward 28.7	5.0	27.9	4.4	20.3	1.7	23.0	2.1
Hachioji	Urban	Leeward 29.1	5.4	28.3	4.8	21.0	2.4	23.3	2.4
Yokohama	Metro	27.5	3.8	28.1	4.6	21.0	2.4	22.6	1.7
Ebina	rural	28.6	4.9	Leeward 30.7	7.2	22.0	3.4	22.9	2.0
Urawa	Urban	29.3	5.6	27.6	4.1	19.9	1.3	Leeward 24.7	3.8
Kosigaya	rural	29.9	6.2	26.6	3.1	20.7	2.1	Leeward 24.6	3.7
Katsuura	seashore	seabreeze 23.8	0.1	26.2	2.7	21.2	2.6	seabreeze 22.0	1.1
Kuki	rural (paddy)	29.5	5.8	27.4	3.9	19.9	1.3	Leeward 25.1	4.2
Choushi	seashore	seabreeze 23.9	0.2	23.5	0.0	18.6	0.0	seabreeze 21.7	0.8
Kamogawa	seashore	seabreeze 23.7	0.0	28.1	4.6	20.9	2.3	seabreeze 21.6	0.7
Shinkiba (near Tokyo)	seashore	27.5	3.8	27.2	3.7	20.6	2.0	20.9	0.0

-1に示した横断線の位置について、1991年6月8日の地表面温度の横断分布を図-11に示した。図中の太い線は地表面温度の平均値である。太平洋岸から東京にかけた茨城県側には、森林と水田の土地利用が多く、地表面温度が相対的に低い28℃前後となっている。都心に向かうに従い市街域が増し、地表面温度は36℃程度の高温になっている。さらに西へ向かうと森林となり地表面温度が下がる。なお、横断面図左端域では極めて低温となっているのは、丹沢山地に雲があるためであって、地表面温度ではない。次に、同じ横断線位置について、植生指標NDVIの横断分布を図-12に示した。水田と森林の多い茨城県側と森林が卓越する丹沢山地側の植生指標NDVIが大きく、地表面温度が両地域ともに低くなっている。逆に都心域では植生指標NDVIがほぼゼロとなっており、都心域の地表面温度が高い原因は、植生が少なく、蒸発散が乏しいためである事が分かる。

(7) 地上気温の平面分布と熱の移流

植生による緩和効果の他に、都市中心部からの熱のブルーム⁵³⁾が気温に影響している事を確認するために、AMeDASによって観測された気温の平面分布を表-2に示した。AMeDAS観測地点の中で最低気温を示す地点を基準にし、この基準気温と各地点の地上気温との差ΔTを比較すると、海岸地点の気温は海風の効果により低く(記号seabreeze)、都心の風下地点(leeward)では、熱の移流によって高温化していることを確認できる。これらの現象は藤野・浅枝・和気ら¹⁴⁾によって指摘されて来たが、本論文のように衛星による地表面温度データと

AMeDASの気象データとを併用することにより、首都圏規模で実態を確認することができる。なお、海風の気温緩和効果は顕著であるが、図-8の8月16日のケースに示される様に、常に海風の効果が存在する訳ではない。同様に、植生効果も蒸散の活発な季節と日中に制約される。

4. おわりに

本研究では、AMeDAS地点の気温とNOAA AVHRRからの植生指標NDVI・地表面温度との関係から、関東地方における植生と海風による気温緩和効果の季節的な実態を抽出・検討した。また、風に伴う熱の移流による大気・陸面相互作用の実態を捉えた。主な結論は次の通りである。

- 1) 現地データであるAMeDAS地点の気温は、標高・植生（蒸散）・海風による緩和の影響を同時に受けている。
- 3) 風による熱の移流によって風下に地表面温度の高い地域を生じており、大気・陸面相互作用が捉えられた。
- 3) 海岸地点の気温は、海風と植生域による蒸発散との影響を同時に受け、最も気温が緩和されている。植生の乏しい都市域に比較した気温の緩和効果は、約7℃に達する。
- 4) 海風の影響と都心からの熱の移流が少ないAMeDAS地点群における気温と植生指標NDVIとの関係から、植生による気温緩和効果が抽出された。緩和効果は最大4～5℃であり、島根における報告⁴⁰⁾の結果とほぼ一致する。

熱の移流による大気・陸面の相互作用の現象は、首都圏の都市環境の解析に熱的境界条件の性質として重要である。都市域における温熱環境の研究には、植生による潜熱と熱収支の正確なモデリングが必要であり、それに伴う気温の推定が重要である。正確には大気陸面相互作用としての地表面温度分布の変形を表しうるモデルが必要であり、その際に衛星データがモデルによる結果との比較に有用である。

参考文献

- 1) 藤部文昭：関東内陸域における猛暑日数増加の実態と都市化の影響についての検討，天気，45(8)，pp. 644-653，1998。
- 2) 日下博幸・西森貴貴・安成哲三：最高・最低気温偏差の季節性を利用した都市化に伴う気温上昇率の推定，天気，45(5)，pp. 369-379，1998。
- 3) Oke, T. R., and East, C.: The urban boundary layer in Montreal, Boundary-Layer Meteorology, 1, pp. 411-437, 1970。
- 4) Clarke, J. F.: Nocturnal urban boundary layer over Cincinnati, Ohio, Monthly Weather Review, 97(8), pp. 582-589, 1971。
- 5) Kimura, R.: Effects of general flows on a heat island convection - Part 1: Linear theory for the uniform flow, Journal of the Meteorological Society of Japan, 54(5), pp. 308-321, 1976。
- 6) Yamashita, S.: Some studies of heat island in Japan-with special emphasis of the climatological aspects, Geographical Review of Japan, 61B(1), 1-13, 1988。
- 7) Yoshikado, H. and Kondo, H.: Inland penetration of the sea breeze over the suburban area of Tokyo, Boundary-Layer Meteorology, 48, pp. 389-407, 1989。
- 8) Yoshikado, H.: Vertical structure of the sea breezes penetrating through a large urban complex, Journal of Applied Meteorology, 29, pp. 878-891, 1990。
- 9) Yoshikado, H.: Numerical study of the daytime urban effect and its interaction with the sea breeze, Journal of Applied Meteorology, 31, pp. 1146-1165, 1992。
- 10) Kimura, F. and S. Takahashi: The effects of land-use and anthropogenic heating on the surface temperature in the Tokyo Metropolitan area: A numerical experiment, Atmospheric Environment, 25B(2), pp. 155-164, 1991。
- 11) Kondo, H.: A numerical experiment of the "Extended sea breeze" over the Kanto Plain, Journal of the Meteorological Society of Japan, 68(4), pp. 419-435, 1990。
- 12) 川又孝太郎・玉井信行・河原能久：熱収支モデルによる東京圏の熱環境解析，土木学会年次学術講演会，II，pp. 378-379, 1992。
- 13) 神田学・日野幹雄・稲垣聡・安部智久：道路網（熱の帯）上の熱帯流渦合層のLarge Eddy Simulation—大手町・皇居周辺を例に，水工学論文集，第37巻，pp. 177-182, 1993。
- 14) 藤野毅・浅枝隆・和気亜紀夫・孟岩：埼玉県南地域を対象とした郊外型ヒートアイランドの特徴について—都市地熱の埼玉県南地域への拡散—，水工学論文集，37，pp. 361-366, 1993。
- 15) 一ノ瀬俊明・下堂園和宏・鶴野伊津志・花木啓祐：細密地理情報にもとづく都市気候数値シミュレーション地表面境界条件の高精度化，天気，44(11)，

- pp. 23-34, 1997.
- 16) Pielke, R. A.: A comparison of three-dimensional and two-dimensional numerical predictions of sea breezes, *Journal of the Atmospheric Sciences*, 31, pp. 1577-1585, 1974.
 - 17) 木村富士男: 局地風モデルを利用した光化学大気汚染の数値シミュレーション, 気象研究所報告, 局地風と大気汚染物質の輸送に関する研究, 第11号, pp. 217-295, 1984.
 - 18) 鵜野伊津支: 4次元データ同化手法による関東地域の局地循環シミュレーションと評価, 大気環境学会誌, 30(6), pp. 351-366, 1995.
 - 19) 村上周三・持田灯・Kim S.・大岡龍三: 関東地方における土地利用状況の変化と流れ場・温度場の関係, 日本建築学会計画系論文集, 491, pp. 31-39, 1997.
 - 20) Kaneko D., and Hino, M.: Proposal and investigation of method for estimating surface energy balance in regional forests using TM derived vegetation index and observatory routine data, *International Journal of Remote Sensing*, Vol. 17, No. 6, pp. 1129-1148, 1996.
 - 21) 金子大二郎・日野幹雄: 首都圏の気温に及ぼす植生と海風による緩和効果の実態, 土木学会第52回年次学術講演会講演概要集, II-374, pp. 748-749, 1997.
 - 22) 渡邊倫樹・森脇 亮・神田学・松永和章: 都市域におけるコンスタント・フラックス層の存在条件について, 水工学論文集, 第46巻, pp. 79-84, 2001.
 - 23) Rotach, M. W.: On the influence of the urban roughness sublayer on turbulence and dispersion, *Atmospheric Environment*, 33(24), 1999.
 - 24) 金子大二郎・日野幹雄: TMと国土数値情報を用いた海風による地表面温度低下効果の解析, 日本リモートセンシング学会誌, 13(3), pp. 1-14, 1993.
 - 25) Kimura, F. and S. Takahashi: The effects of land-use and anthropogenic heating on the surface temperature in the Tokyo Metropolitan area: A numerical experiment, *Atmospheric Environment*, 25B(2), pp. 155-164, 1991.
 - 26) 中辻啓二・佐藤歩・重光泰宗・村岡浩爾: 沿岸都市域の土地利用の変化が大気環境に与える影響評価, 水工学論文集, 40, pp. 255-260, 1996.
 - 27) 藤野毅・浅枝隆・中北英一: 市街地スケール都市気象モデルによる風・熱環境評価の検討, 水工学論文集, 40, pp. 231-236, 1996.
 - 28) Carlson, T. N., J. A. Augustine and F. E. Boland: Potential application of satellite temperature measurements in the analysis of land use over urban areas, *Bulletin of American Meteorological Society*, 96, pp. 91-114, 1977.
 - 29) Price, J. C.: Assessment of the urban heat island effect through the use of satellite data, *Monthly Weather Review*, 107, pp. 1554-1557, 1979.
 - 30) Roth, M., Oke, T. R., and Emery, W. R.: Satellite-derived urban heat islands from three cities and the utilization of such data in urban climatology, *International Journal of Remote Sensing*, 10(11), pp. 1699-1720, 1989.
 - 31) Gallo, K. P., McNab, A. L., Karl, T. R., Brown, J. F., Hood, J. J., and Tarpley, J. D.: The use of a vegetation index for assessment of the urban heat island effect, *International Journal of Remote Sensing*, 14, pp. 2223-2230, 1993a.
 - 32) Gallo, K. P., McNab, A. L., Karl, T. R., Brown, J. F., Hood, J. J., and Tarpley, J. D.: The use of NOAA AVHRR data for assessment of the urban heat island effect, *Journal of Applied Meteorology*, 32, pp. 899-908, 1993b. The use of NOAA AVHRR data for assessment of the urban heat island effect, *Journal of Applied Meteorology*, 32, pp. 899-908.
 - 33) Kawashima, S.: Relation between vegetation, surface composition in the Tokyo region during winter, *Remote Sensing of Environment*, 50, pp. 52-60, 1994.
 - 34) 近藤昭彦・栗原昭子・三上岳彦: ランドサットデータによる関東平野の諸都市のヒートアイランド強度の解析, 日本リモートセンシング学会誌, 13(2), pp. 32-42, 1993.
 - 35) 近藤昭彦・開発一郎: 広島市市街地におけるランドサットデータによる輝度温度と気温および都市キャノピー層の構造との対応関係, 地学雑誌, 104(2), pp. 225-238, 1995.
 - 36) 近藤昭彦・宝馨・立川康人: 航空機MSSリモートセンシングによるヒートアイランド現象の解析—気温と地表面温度の同時観測による検討—, 地学雑誌, 106(3), pp. 377-385, 1997.
 - 37) 梅干野晃・浦野良美・小田建一・浜口典茂: 住宅地における夏季・冬季の熱環境実態および土地被覆率との関係—リモートセンシングによる住宅地の熱環境解析 III—, 日本建築学会論文報告集, 331, pp. 38-45, 1983.
 - 38) 梅干野晃・飯野秋成・古賀和博・佐野仁美: サイドルッキング航空機MSSデータを用いた丘陵開発地域の

- ヒートアイランドポテンシャルの計量及び土地被覆との関係の検討, 日本建築学会計画系論文集, 471, pp. 29-37, 1995.
- 39) 渡辺浩文・依田浩敏・尾島俊雄: リモートセンシングデータと数値情報利用による広域都市の地表面温度分布図の作成に関する研究, 日本建築学会計画系論文報告集, 443, pp. 21-29, 1993.
- 40) 金子大二郎・日野幹雄: NOAAデータによる大気安定度の広域的推定, 土木学会第51回年次学術講演会講演概要集, 共通, pp. 336-337, 1996.
- 41) 金子大二郎・日野幹雄: 首都圏の気温に及ぼす植生と海風による緩和効果の実態, 土木学会第52回年次学術講演会講演概要集, II-374, pp. 748-749, 1997b.
- 42) Owen, T. W., Carlson, T. N., and Gillies, R. R.: An assessment of satellite remotely-sensed land cover parameters in quantitatively describing the climatic effect of urbanization, *International Journal of Remote Sensing*, 19(9), pp. 1663-1681, 1998.
- 43) 本篠 毅・高倉 直: リモートセンシングによる都市内緑地の温度分布の解析, 造園雑誌, 49(5), pp. 299-304, 1986.
- 44) 本篠 毅・高倉 直: リモートセンシングによる都市内熱環境に及ぼす影響(2) リモートセンシングによる緑地の抽出と表面温度の解析, 農業気象, Vol. 43, No. 1, pp. 31-36, 1987.
- 45) 神田学・稲垣聡・日野幹雄: 夏期に森林・水面が果たす気温緩和効果に関する実測とその周辺域への影響伝達機構に関する数値解析による検討, 土木学会水工学論文集, 35: pp. 585-590, 1991.
- 46) 浜田・三上: 都市内緑地のクールアイランド現象—明治神宮・代々木公園を事例として—, 地理学評論, 67A, 518-529, 1994.
- 47) 金子大二郎・日野幹雄: 植生指標NDVIと快晴日の日最高気温との関係—気温に及ぼす植生の緩和効果に関するNDVIを用いた推定法の検証—, 水文・水資源学会誌, 9(3), pp. 271-279, 1996.
- 48) 金子大二郎・外岡秀行: 首都圏における大気補正された地表面温度の高温域分布と土地利用, 土木学会第57回年次学術講演会講演概要集, VII, 投稿中, 2002.
- 49) 青木正敏・堀口郁夫・谷宏・田中夕美子・杉村俊郎・元木敏博: NOAA-TMデータによる都市温度上昇の解析, 日本リモートセンシング学会, 第9会学術講演会論文集, pp. 5-6, 1989.
- 50) Grimmond, C. S. B., and T. R. Oke: Comparison of heat fluxes from summertime observation in the suburbs of four north American cities, *Journal of Applied Meteorology*, 34, 873-889, 1995.
- 51) 池田典之・河原能久・玉井信行: 都市化が海陸風に及ぼす影響, 土木学会第50回年次学術講演会, pp. 508-509, 1995.
- 52) 金子大二郎: 広域熱収支植生モデルによる接地層気温の推定と地上実測, 土木学会水工学論文集, 38: pp. 375-388, 1994.
- 53) Shea, D. M., and A. H. Auer, Jr.: Thermodynamics properties and aerosol patterns in the plume downwind of St Louis, *Journal of Applied Meteorology*, 17, 689-698, 1978.

EFFECTS OF VEGETATION AND SEA BREEZES ON THE METROPOLITAN HEAT ISLAND USING REMOTELY SENSED DATA

Daijiro KANEKO

This paper discusses vegetation effects and sea breezes on the surface air temperature in the Tokyo metropolitan area using remotely sensed and regional meteorological routine data. Series of NOAA AVHRR images and seasonal meteorological data have revealed the interaction between land surface and atmosphere by sea breezes due to effects of energy advection from cool sea surface and high temperature in urbanized areas of Tokyo, detecting modification of the horizontal distribution of surface temperature in the Metropolitan area. The relation between NDVI obtained by AVHRR and air temperature observed by AMeDAS extracted mitigation effects of about 5°C by vegetation transpiration on the Metropolitan air temperature.