

海岸埋立が沿岸都市の気象に及ぼす影響

武 若 聡*・草 場 智 哉**・入 江 功***

1. 緒 言

人工島の建設あるいは沿岸部の埋立が実施される場合には、周辺水域の水質、海浜、景観等に生じる変化が環境アセスメントとして綿密に予測・評価される。これに対して、人工島・埋立地が隣接する都市域の気象に及ぼす影響が検討された例は少ない。人工島・埋立地が建設されることにより、背後の都市域は海岸線までの距離が遠退くことになり、風速の低下、気温の上昇といった臨海都市のヒートアイランド形成を強化する気象変化が生じることが予想される。本研究では福岡市西部地区の埋立事業を具体的な事例として取り上げ、気象データ解析と数値解析を行い、沿岸部の埋立が隣接する都市部の気象に与えた影響について検討する。

沿岸部の埋立、あるいは人工島の建設が隣接する都市の気象に及ぼす影響についてはこれまでにいくつかの研究で検討されている。例えば、一ノ瀬・松尾(1990)は東京湾周辺のアメダスデータを統計解析し、東京湾に固有の風系成分を抽出した。次に、東京湾内に巨大人工島が建設された場合を想定し、東京湾に固有の風系が消滅した場合の気象を統計的に予測することを試みている。また、河原ら(1994)、大濱ら(1995)は大規模な埋立が沿岸部に実施された場合の気象変化を数値的に評価している。ここに紹介した研究事例はいずれもスケールの大きい現象を扱っており、沿岸部の改変と海陸風スケールの気象変化が主に論じられている。これに対して、本研究で対象とするのはより小さいスケールの現象であり、微気象学的な変化に着目する。

2. 福岡市の気象と埋立の変遷

福岡市は北部が博多湾・玄海灘に面している(図-1)。福岡市では年間を通じて北方からの風(以降北風と呼ぶ)が卓越しており、晴天日の日中には海風(北風)が発達し、夜間に陸風(南東風)に転じる(堤ら, 1988)。福岡市の西部地区では1984年から1987年にかけて約140

haにおよぶ埋立が行われた(図-2)。埋立地は「よかたびあ博覧会(1989年開催)」の会場として利用され、博覧会終了後、住居、商業、文教地として利用されて現在に至っている。埋立が行われたことにより背後の市街地は北系の風が吹く時に風上に位置する海岸線から約1km程後退したことになる。また、埋立地は博覧会終了後は通常の住宅・市街地へと転用されており、埋立地の気象学的な効果はこの間に変化していたことが予想される。

3. 気象データ解析

福岡市西部地区の埋立に伴って市街地が海岸線から遠のいたこと、あるいは、埋立後の土地利用状況が変化し

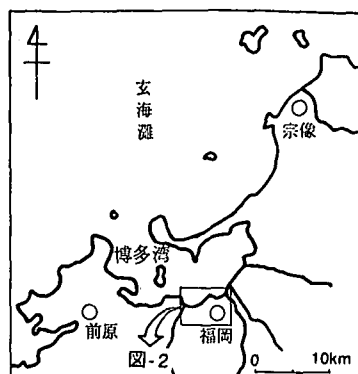


図-1 福岡市とその周辺地

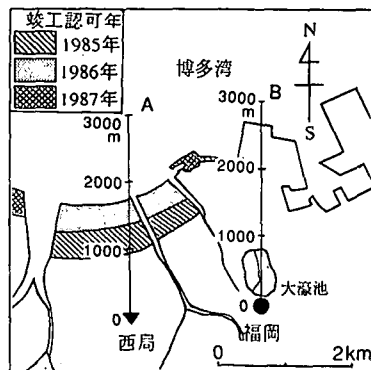


図-2 福岡市西部地区の埋立事業

* 正 会 員 工 博 九州大学助手 建設都市工学科

** 学生会員 九州大学大学院

*** 正 会 員 工 博 九州大学教授 建設都市工学科

たこと、によって生じた福岡市街地の気象変化を気象データ解析により抽出する事を試みた。

(1) 気象データ

解析には気象庁(アメダス)および福岡市環境局(西局)が観測した気象データを用いた。図-1、図-2にアメダスの観測所(福岡、前原、宗像)および西局の位置を示す。

アメダスデータは、気温、風向、風速、日照率、雨量を1時間毎に測定したものであり、福岡、宗像、前原の3地点において1977年から1994年までの間に取得されたデータを用いた。風向は16方位で表されており、以降では北(N)、北北東(NNE) ... 北北西(NNW)のように表記する。日照率は1時間中に観測された日照時間を1時間で除した値(0~10に換算)であり、その時間帯の晴れた度合いを示す指標として用いる。

福岡市環境局のデータは気温、風向、風速、湿度を1時間毎に測定したものであり、西局において1985年から1993年までの間に取得されたデータを用いた。

(2) 解析方法

北風が吹き、大気が博多湾から埋立地上を吹送して市街地に流入する晴天時に着目する。福岡(アメダス)の気温の経年変化を調べ、これと周辺地域(前原、宗像)の気温、あるいは隣接する市街地(西局)の気温を比較した。以下に解析方法を説明する。

[解析I] 福岡と周辺地域(前原、宗像)の気温差の比較

この解析は、福岡の気温が周辺地域と比較して相対的にどのように変化したか、ということ調べるために行なった。解析手順を記す。

- (i) 全てのアメダスデータの中から、福岡、前原、宗像の3地点が晴天(日中)であった時のデータを選び出す。ここで、3地点の内2地点以上の日照率が7以上、かつ、3地点とも雨量が0mmであった時を晴天とした。
- (ii) 次にこのデータの中から、
 - (Ia) 福岡の風向がWNW, NW, NNWのいずれか(埋立地を通過する海風)である、
 - (Ib) 福岡の風向がE, ESE, SE, SSE, S, SSW, SW, WSWのいずれか(陸風)であるか、または無風である、
 - (Ic) 全てのデータ(=晴天日)、の条件を満たす時間帯のデータをそれぞれ選び出す。
- (iii) 各条件の下に選び出されたデータから福岡と前原、福岡と宗像、前原と宗像の気温差の月平均値 ΔT (福-前)、 ΔT (福-宗)、 ΔT (前-宗)をそれぞれを求める。

なお、上記の条件の他に、埋立地上を通過しない海風

(NNE, NE, ENE)が吹くという条件の解析を試みたが、条件を満たすデータの数が、(Ia)、(Ib)、(Ic)の条件時に比べて非常に少なかったため解析をとりやめた。

[解析II] アメダス(福岡)と西局の気温差の比較

この解析は埋立後の土地利用の変化に伴う隣接市街地の気温変化を調べるために行なった。解析手順を記す。

- (i) 全てのデータの中から、福岡の日照率が7以上であり、
 - (IIa) 福岡、西局ともに風向がN, NNEのいずれか(海風)である、
 - (IIb) 福岡、西局ともに風向がESE, SE, SSE, S, SSW, SW, WSWのいずれか(陸風)であるか、または無風である、
 - (IIc) 全てのデータ(=晴天日)、の条件を満たす時間帯のデータをそれぞれ選び出す。
- (ii) 各条件の下に選び出されたデータから西局と福岡の気温差の月平均値 ΔT (西-福)を求める。

(IIa)の条件時には、福岡に埋立地上を通過しない海風が、西局には埋立地上を通過した海風がそれぞれ到達していたと考えられる。

(3) 解析結果

[解析I] 各気象条件(Ia, Ib, Ic)の下で求められた ΔT (福-前)、 ΔT (福-宗)、 ΔT (前-宗)の経年変化をそれぞれ図-3(1)、(2)、(3)に示す。いずれも移動平均幅12カ月で移動平均したものを表示した。各条件の下で選びだされたデータ数は、それぞれ、(Ia):11,781、(Ib):8,150、(Ic):31,369個である。

図-3(1)、図-3(2)には、福岡の気温が宗像、前原の気温より平均的に高く、気温差 ΔT (福-前)、 ΔT (福-宗)が長期的な増加傾向にあることが示されている。これに対して図-3(3)には、 ΔT (前-宗)がいずれの条件時にも一貫した増加あるいは減少傾向にないことが示されており、宗像と前原の気温の長期的な変動はほぼ同じ傾向にあったとみなせる。ここで、前原、宗像の気温が都市化、土地利用の変化等により常に上昇傾向にあったと仮定するならば、福岡の気温も上昇傾向にあり、上昇量はいずれの気象条件時にも前原、宗像と比較して相対的に大きかったと考えられる。

次に ΔT (福-前)と ΔT (福-宗)の変動経過について検討する。 ΔT (福-前)と ΔT (福-宗)は、条件(Ia)時に1984年から1985年にかけて一旦増加し、これ以降の変動が少なくなっているように見受けられる。これに対して、条件(Ib)時には ΔT (福-前)と ΔT (福-宗)は徐々に増加している。条件(Ia)時に ΔT (福-前)あるいは ΔT (福-宗)が増加に転じた時期は埋立が完了した時期と一致しており、この前後の期間の気温差の平均

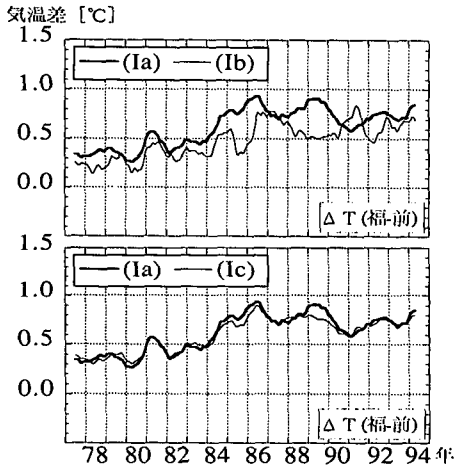


図-3(1) 月平均気温差の経年変化 (福岡-前原)

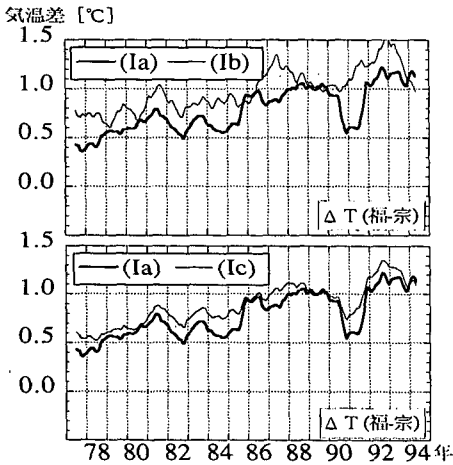


図-3(2) 月平均気温差の経年変化 (福岡-宗像)

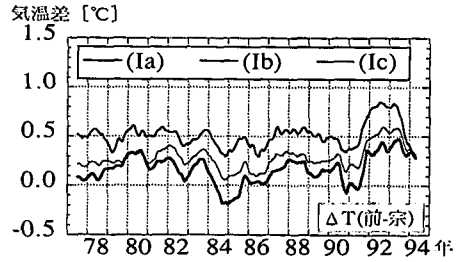


図-3(3) 月平均気温差の経年変化 (前原-宗像)

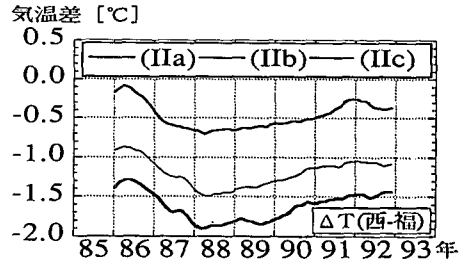


図-4 月平均気温差の経年変化 (西局-福岡)

値を求めたところ、増加量はおおよそ0.3℃程度と見積られた。なお、図-3(1)、図-3(2)において、条件(Ia)と(Ic)の結果が類似しているのは、晴天時に北方の風となることが多いことによる。

以上に見出された気温差の増加の原因には埋立の影響の他に福岡市の都市化、エネルギー消費量の増大等の影響を考慮することができる。そこで、福岡県、福岡市が発行する統計資料から、対象地域の人口、世帯数、道路総延長、電力供給量等の年々の変化を調べた。その結果、いずれの量も緩やかな増加傾向にあり、このことに関する明確な結論は得られなかった。

〔解析II〕図-4は ΔT (西-福)を移動平均幅12カ月で移動平均して図示したものである。いずれの条件下((IIa),(IIb),(IIc))でも気温差は一度低くなった後に、1988年以降上昇に転じている。これは西局の気温が徐々に上昇した可能性を示唆するものである。しかしながら、

条件による差異はほとんどみられず、埋立地の土地利用の変化に伴う局所的な気象変化を示すのは困難であった。

4. 沿岸大気境界層の数値計算

沿岸部に発達する大気境界層を計算し、埋立が行われたことによりどの程度気温上昇が見込まれるかを検討した。北風が吹いた晴天日を対象にして解析を進めた。計算の際にはLANDSAT衛星熱画像(TM, Band 6)から推定した海表面と地表面の温度を用い、大気が多摩湾から市街地にかけて吹走する間の加熱状況を調べた。表-1に解析の対象として選んだ日時と福岡の気象(10:00)を示す。1987年の時点で埋立地は裸地である。

(1) 計算方法

数値計算に用いた方程式系は武若ら(1993)が用いたものとはほぼ同一であり、連続式、静水圧近似された運動方程式、熱輸送方程式から成る。乱流拡散係数はMellor and Yamada(1982)の乱流モデル(Level 2)により評価されている。

今回の計算ではLANDSAT衛星熱画像(TM, Band 6)から表面温度を推定し、これを熱輸送方程式の地表境界条件として用いたので、熱収支式は方程式系に含まな

表-1 解析日時と福岡の気象(10:00)

日時	衛星撮影時間	風速	風向	気温	天候
1987/5/15	10:07	5 m/s	N	17.8℃	晴
1991/8/14	10:07	5 m/s	N	27.3℃	晴

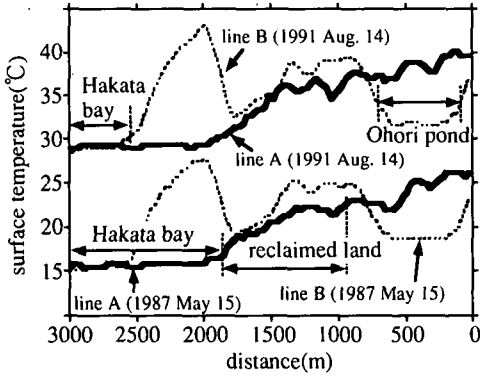


図-5 LANDSAT (TM, Band 6) から推定した表面温度

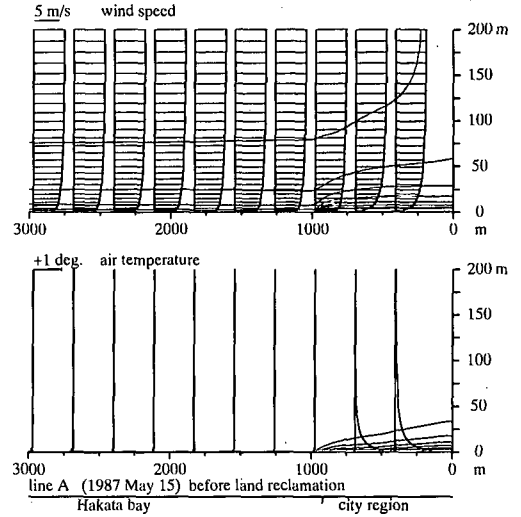


図-7 埋立前を想定した線 A 上の計算結果
風速分布 (上段), 気温上昇量と気温分布 (下段)

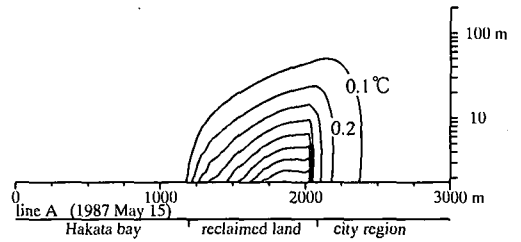


図-8 埋立後の線 A 上の気温上昇量 (等温線間隔: 0.1°C)

図-6 線 A 上の計算結果 (1987 年 5 月 15 日)
風速分布 (上段), 気温上昇量と気温分布 (下段)

かった。表面温度は宇宙開発事業団 (1990) の提案する算定式を用いて推定した。この算定式を用いる場合、水表面 (海、池) 温度の推定精度はある程度保証されるが、陸域では表面を構成する素材により射出率が異なるので、その推定精度は劣る。市街地の粗度高さは桑形・近藤 (1991) の研究結果を参考にし、一律 0.65 m とした。裸地の状態の埋立地の粗度高さは 0.3 m とした。水表面の粗度高さは一律 10^{-4} m とした (近藤, 1994)。

海上の大気風速分布は福岡管区気象台で行われた午前 8:30 の高層気象観測データを参考にして対数分布で与えた。また、気温分布は中立状態にあると判断されたので海表面の温度を与えた。

計算は図-2 に示した線 A と B に沿って行った。水平方向の計算格子間隔は LANDSAT 衛星画像の 1 画素の幅と同一の 28.5 m とした。鉛直方向は不等間隔の計算格子を設定し、高度 200 m までの領域を 26 点に分割し

て計算した。

(2) 計算結果

図-5 に線 A と B 上の表面温度分布を示す。線 B に沿っての表面温度は大濠池が存在する箇所では低下している。

1987 年 5 月 15 日の線 A 上の計算結果を図-6 に示す。風速の図 (上段) にはその鉛直分布と等値線をあわせて図示した。気温の図 (下段) には気温上昇量 (海上気温と比較) の鉛直分布と気温の等値線をあわせて示した。海上から侵入してきた大気は、埋立地と市街地上を吹走する間に直ちに加熱される。ここには計算結果を示していないが、線 B 上の福岡観測局がある地点の計算結果は表-1 に示した値にほぼ一致していた。

次に、線 A 上の埋立地を海面で置き換え、埋立前の状況を想定した計算を行った。ここでは海表面の温度と粗度高さを埋立地の計算点にて与えた。図-7 に計算結果を示す。海と陸の接点近傍の境界層の発達を図-6 に示した計算結果に類似している。埋立後の計算結果から埋立前の計算結果を差し引いた気温変化を等値線形で

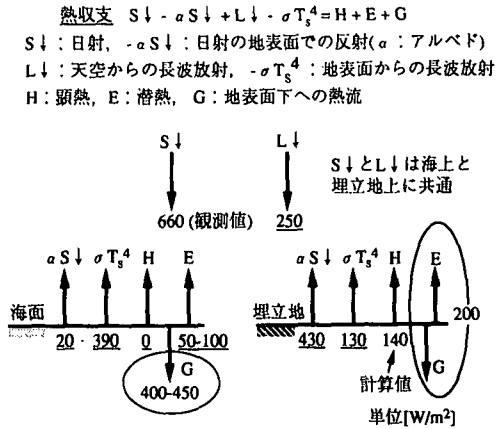


図-9 海面上と埋立地上の熱収支 (1987年5月15日)

図-8に示す。埋立により気温が上昇した領域は海岸線から約1 kmの地点にまで及び、0.25 km地点で0.2°C程度、0.5 km地点で0.1°C程度気温が上昇している。埋立てにより風速が低減した領域は気温上昇が認められた領域とほぼ一致していた。ここで得られた計算結果では、埋立地の幅(約1 km)の1/3~1/2の範囲にまでその影響が及んでいた。

計算された気温上昇量は前章のデータ解析[解析I]にて得られた値よりも小さい。これには、データ解析時に想定した状況と計算条件が完全に一致しないこと、気温上昇には埋立の効果に加えて計算には考慮されていない都市化の効果が含まれていたこと、等がその原因として挙げられるが、現時点ではこれを特定することはできない。

海面上と埋立地上の熱収支を推定し、海水塊と埋立地の熱的特性の評価を試みる。熱収支では地表面に到達する日射エネルギーと大気放射熱エネルギーのフラックスがどのような項目の熱エネルギーフラックスに分配されるかを調べ、その地表の熱的な特性を調べる(近藤, 1994)。図-9に熱収支式と各項目を示す。図中で下線部をつけた値は気象観測結果と衛星画像のデータを用いて推測した値である。また、楕円で囲んだ値は熱収支式の残差として求めた値である。大気加熱に係る量は顕熱フラックス H であり、これの大きさに比例して大気が加熱される割合が増す。海水塊では海中へ伝わる熱流(貯熱)の割合が大きく H は0である。これに対して埋立地では $H=140 \text{ W/m}^2$ という値が計算されており、埋立てられたことにより大気に加えられる熱量が大幅に増加した。

5. 結 語

本研究では福岡市西部地区の埋立事業を具体的な事例

として取り上げ、気象データ解析と数値解析を行い、沿岸部の埋立が隣接する都市域の気象に与えた影響について検討した。気象データの解析からは、福岡市の気温が周辺都市の気温に比較して上昇していたことを示した。この間に上昇傾向が強まった時期が存在し、これは福岡市で埋立が開始された時期に一致していた。沿岸大気境界層の計算を行い、埋立によりどの程度気温が上昇し得るかを見積り、埋立の影響が及ぶ範囲と気温上昇量を推定した。その結果、埋立地の幅(約1 km)の1/3~1/2の範囲にその気象学的影响が及んでいた。

本研究は埋立を行うことにより背後地の気温が上昇し、ヒートアイランド形成強化の一因となり得るのではないかと、というやや否定的な観点から検討を始めた。この一方では、気温上昇は冬の暖房エネルギー消費の削減、風速低減は風害(飛砂、塩害等)の低減につながることも十分に予想され、埋立の実施により享受し得る利益も存在する。今後はより多面的な観点からの検討を行い、埋立がもたらす気象学的环境変化の評価を行う必要がある。

謝辞: 本研究は文部省科学研究費(奨励研究(A), 課題番号06750550)の援助のもとに行われた。福岡市環境局環境保全部大気課には気象データを提供して頂いた。ここに記して謝意を表します。

参 考 文 献

- 一ノ瀬俊明・松尾友矩(1990): 東京湾埋立計画の大気環境アセスメント—出現風系の統計学的推定を用いて—, 衛生工学論文集, 第26巻, pp. 79-90.
- 宇宙開発事業団地球観測センター(1990): 地球観測データ利用ハンドブック—ランドサット編—改訂版一, 財団法人リモートセンシング技術センター.
- 大濱隆司・金子慎治・井村秀文・上野賢仁(1995): 三次元クロージャーマデルによる都市熱環境構造の解析—福岡市周辺地域への適用—, 環境システム研究, Vol. 23, 印刷中.
- 河原能久・川又孝太郎・玉井信行(1994): 臨海部の開発が海風と都市熱環境に及ぼす影響に関する数値実験, 環境システム研究, Vol. 22, pp. 274-279.
- 桑形恒男・近藤純正(1991): 西日本メダス地点における地表面粗度の推定, 天気, Vol. 38, pp. 15-18.
- 近藤純正編(1994): 水環境の気象学—地表面の水収支・熱収支—, 朝倉書店, 348 p.
- 武若 聡・池田駿介・平山孝浩(1993): 数値モデルによる都市内河川の大気冷却効果のシミュレーション, 土木学会論文集, No. 479/II-25, pp. 21-30.
- 堤純一郎・片山忠久・石井昭夫・西田 勝・北山広樹(1988): 夏季の海陸風を対象とする気象データの統計解析, 日本建築学会計画系論文報告集, 第389号, pp. 28-36.
- Mellor, G. L. and T. Yamada (1982): Development of a turbulence closure model for geophysical fluid problems, Rev. Geophys. Space Phys., Vol. 20, pp. 851-875.