

航空写真判読を用いた過去のつくば市における 粗度長変化の推定

Estimation of Variation in Roughness Length in Tsukuba City
Using Areal Photographs

岩田 拓記*・山中 勤**・杉田 倫明***

Hiroki IWATA *, Tsutomu YAMANAKA ** and Michiaki SUGITA ***

I はじめに

土地利用の改変は、地表面における熱収支の変化を通して、その土地の微気象に大きく影響を及ぼす。例えば、農地や森林から住宅地への変化は、顕熱フラックスへの分配割合を大きくし、それがヒートアイランドなどの都市環境問題につながる。土地利用が地表面熱収支に与える影響の定量化は、都市計画を行う上での重要な情報を提供することにつながる。

筑波大学陸域環境研究センター(TERC)では、1981年8月より連続して気象観測を実施している。その結果によると(渡来ほか, 2006), TERCで測定された気温は過去20年間ほどの間に $0.083^{\circ}\text{C年}^{-1}$ の割合で上昇しており、この割合は過去25年の北半球の平均温度上昇である $0.033^{\circ}\text{C年}^{-1}$ (Brohan *et al.*, 2006)を大きく上回る。この原因として、つくば市の都市化が影響していると考えられる。この温度上昇を引き起こしている要因を理解する上で、TERCで長期間測定されている地表面フラックスは貴重なデータである。しかしながら、過去の地表面フラックスの測

定値には問題があることがわかってきている。例えば、福田(1998)、桜ほか(1999)では、1994年から顕熱フラックスが急激に上昇していることが報告された。また、田・杉田(1996)によると、運動量フラックスは、1994年4月以前のデータに過小評価が見られることがわかっており、その原因は観測システム内の信号増幅器の設定エラーによる鉛直風速信号の回路内での飽和である可能性を指摘している。岩田・杉田(2006)は、その鉛直風速信号の飽和が顕熱フラックスの過小評価の原因でもあることを報告しており、その補正方法を提案した。しかし、彼らの補正方法の適用は粗度長が既知であることを前提としている。

粗度長を求める際には、通常、風速プロファイルや運動量・顕熱フラックスの観測データが用いられるが、そのようなデータが無い場合、地表面の粗度の密度や高さから粗度長を推定する方法がある。Hiyama *et al.* (1996)は、そのような複数の方法をつくば市での観測に適用し、Grant and Mason (1990)の方法が比較的パラメータが少なく、有効であることを報告している。よって、本研究でも、Grant and Mason (1990)の方法を

* 筑波大学陸域環境研究センター(現: アラスカ大学国際北極圏研究センター)

** 筑波大学陸域環境研究センター

*** 筑波大学大学院生命環境科学研究科

用いる。また、粗度密度や高さを求める方法として、Hiyama (1995) にならい航空写真判読を用いた。そして、推定した過去の粗度長の値を用いて、岩田・杉田 (2006) の方法より過去のフラックスの推定、補正を行った。

II 方法

1. 粗度密度と高さの決定

本研究では、Hiyama (1995) にならって、航空写真判読から粗度密度と高さを決定した。まず、TERC から東と南に 3 本の測線を決定し、航空写真からその測線上の粗度の高さ h_i を読み取った。そして、それぞれの測線に対する粗度密度 λ_j と平均粗度高度 h_j を以下の式より求めた。

$$\lambda_j = \frac{\sum_{i=1}^{N_j} h_i}{X} \quad (1)$$

$$h_j = \frac{\sum_{i=1}^{N_j} h_i}{N_j} \quad (2)$$

ここで、 X は測線の長さ (8 km, Sugita *et al.*, 1997) で、 N_j は各測線上の粗度の数である。そして、その 3 本の測線に対する粗度密度と平均粗度高度の算術平均値をその風向に対する粗度密度 λ と平均粗度高度 h とした。以上を 1980, 1990, 2001 年に対して行った。

2. 過去の粗度長変化の推定

過去の粗度長 z_0 の値は、上で求めた過去の λ と h を用いて以下の式 (Grant and Mason, 1990) より算出した。

$$\frac{z_0}{h} = \frac{1}{2} \left(\exp \left\langle \frac{k}{\{D_{h/2}\lambda + k^2 [\ln(h/2z_0)]^{-2}\}^{1/2}} \right\rangle \right)^{-1} \quad (3)$$

ここで、 k はカルマン定数、 $D_{h/2}$ は平均粗度高度の半分の高さにおけるドラッグ係数、 z_{0l} は粗度

の構成要素の摩擦抵抗に関係した粗度長である。TERC 周辺の z_{0l} の値は Hiyama *et al.* (1996) で 0.06 m と求められている。Hiyama *et al.* (1996) は、つくば市南部の気象研究所構内のタワーで観測されたデータから求めた $D_{h/2}$ の値を TERC 周辺にも適用できることを示している。しかしながら、航空写真の判読者が異なる場合、 λ と h の値が変化し、それにより、 $D_{h/2}$ の最適値も異なる可能性がある。そこで、1990 年の λ と h ならびに独立した手法で別途推定されている 1992 年の粗度長 z_0 (Hiyama *et al.*, 1996, 第 1 表) を用いて $D_{h/2}$ を推定した。このとき、1990 年と 1992 年の間ではそれぞれ粗度構成要素に変化はないものと仮定した。そして、1992 年以前は $D_{h/2}$ や z_{0l} は風向や年によって変化しないと仮定し、式 (3) を用いて、航空写真判読により得られた λ と h から 1980 年の粗度長 z_0 を推定した。フラックスの補正が必要な期間である 1981 年から 1994 年の間に対しては、1980 年の z_0 と Hiyama *et al.* (1996) によって推定された 1992 年の z_0 を用いて線形内外挿により z_0 を求めた。

3. フラックスの推定、補正

以上より得られた z_0 を用いて運動量フラックスの推定、顕熱フラックスの補正を行った。以下にその手順を述べる。まず、大気安定度を中立とし、1) TERC の観測塔の 29.5 m で測定されている風速を用いて、バルク法により運動量フラックスを推定する。2) 仮の安定度と運動量フラックスの値から接地層相似則より鉛直風速の標準偏差を推定する。3) 鉛直風速の標準偏差と顕熱フラッ

第 1 表 1992 年と 2005 年に同観測地で推定された粗度長 z_0 (単位は m)。東は 45 度から 135 度、南は 135 度から 225 度

年	東	南	出典
1992	0.72	0.80	Hiyama <i>et al.</i> (1996)
2005	0.81	1.01	岩田・杉田 (2006)

クスの過小評価の割合との関係（岩田・杉田，2006）を用いて，顕熱フラックスの補正を行う．
 4) 以上で求めた運動量，顕熱フラックスを用いて，大気安定度を計算し，再び1)に戻る．以上の1)から4)を繰り返し行い，計算が収束した時のフラックスの値を推定値，補正值とした．なお，夜間は接地層の高さが風速の測定高度以下になることが多く，バルク法での運動量フラックスの推定ができないため，フラックスの推定，補正は日中のデータにのみ適用した．

III 結果と考察

1. 粗度密度と高さ

航空写真判読より得られた λ と h の値を第2表に，粗度分布の変化の一例を第1図に示す．粗度の数と粗度密度は年を経るごとに増加しており，観測地周辺の開発が進んでいることを示して

いる．一方，粗度の平均高度は2001年の南を除いては大きくは変化していない．これは，高い樹木が切り倒され，比較的低い建物に変わっていることと，樹木も20年の間に生長していることが影響していると考えられる．

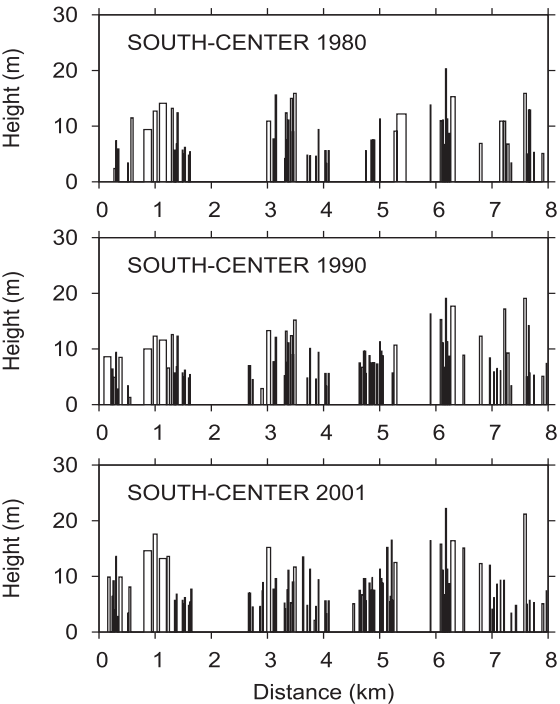
本研究で得られた1990年に対する粗度パラメータの値はHiyama（1995）によって得られた値と異なる．この相違は航空写真の判読者により，測線上の粗度の選択が異なるために生じている．しかし，本研究では同一人物により航空写真判読が行われているため， λ と h の経年変化は正しく評価されていると考えられる．

2. ドラッグ係数の決定と粗度長の経年変化

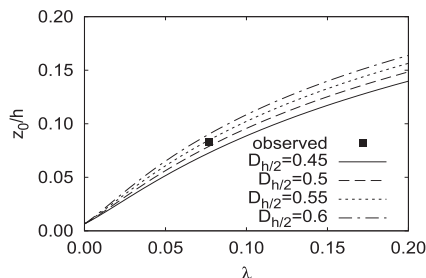
第2図に z_0/h と λ の関係を示す．ポイントは

第2表 航空写真から読み取った粗度の数 N ，平均高さ h ，密度 λ

年	方向	測線	N	h	λ
1980	東	左	81	8.0	0.081
		中央	43	8.7	0.047
		右	41	10.7	0.055
		平均	—	9.1	0.061
	南	左	66	9.3	0.077
1990	東	中央	64	8.6	0.069
		右	34	9.9	0.042
		平均	—	9.3	0.063
	南	左	91	8.0	0.091
		中央	46	8.8	0.051
2001	東	右	50	10.1	0.063
		平均	—	9.0	0.068
	南	左	101	9.4	0.119
		中央	84	8.4	0.088
		右	39	10.3	0.050
2001	東	平均	—	9.4	0.086
	南	左	86	8.4	0.091
		中央	60	8.9	0.067
		右	52	10.2	0.067
		平均	—	9.2	0.075
2001	東	左	117	10.0	0.146
		中央	92	8.6	0.098
		右	43	11.6	0.062
		平均	—	10.1	0.102



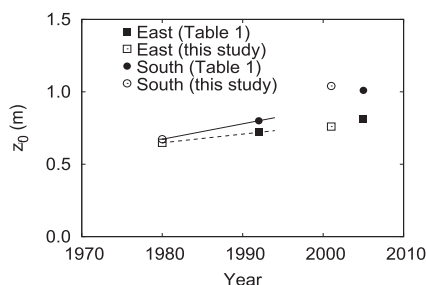
第1図 南側中央測線上の粗度の分布の変化



第2図 粗度密度 λ と z_0/h の関係

1992年の値を、曲線はあるドラッグ係数の値を用いた場合の式(3)を示している。1992年の値は東と南の平均値である。ただし、1992年の粗度パラメータは、1990年の値と等しいと仮定した。第2図より最適の値 $D_{h/2}=0.55$ を選択した。1990年代初期以前はつくば市周辺で大きな開発が行われていないことから、本研究ではこの $D_{h/2}$ の値が1980年に対しても適用できると仮定した。

このように求めたドラッグ係数と式(3)を基に、航空写真判別により得られた粗度パラメータを用いて、1980年の粗度長を推定した。第3図に粗度長の経年変化を示す。1980年の z_0 は東と南で同程度となった。1980年は主要な開発の始まる前であり、東と南の地表面状態が同様であったことを考慮すると、この結果は妥当なものであると考えられる。参考として、 $D_{h/2}=0.55$ を用いて推定した2001年の z_0 も第3図に示す。東の z_0 は1992年と2005年の値の間に位置しており、妥

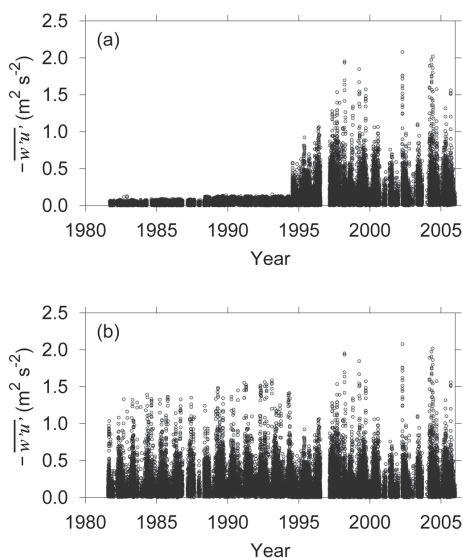


第3図 推定された z_0 の経年変化。実線、破線はそれぞれ、南側と東側の1980年と1992年の z_0 の線形内外挿

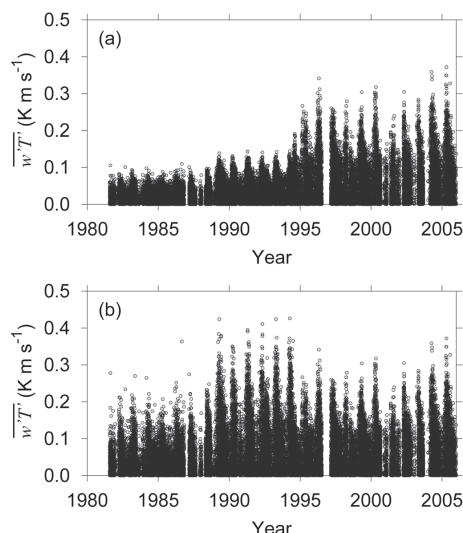
当な結果であると言える。このことから、東に対しては $D_{h/2}$ の値が年によって大きく変化していない可能性がある。一方、2001年の南の z_0 は2005年の値よりも大きくなっており、南に対しては1992年から2001年の間に $D_{h/2}$ の値が変化していることが示唆される。

3. フラックスの補正

以上のように推定した z_0 (第3図)の値を用いて、1981年から1994年間の運動量フラックスの推定、顕熱フラックスの補正(岩田・杉田, 2006)を行った結果を第4,5図に示す。データは1時間平均値である。運動量フラックスは、1981年から1994年を推定値で置き換えることにより、1994年における不自然なフラックスの値の変化がなくなり、 z_0 の増加とともに緩やかな増加傾向が見られる結果となった。一方の顕熱フラックスは、1981年から1994年を補正することにより、1994年以前の明らかな過小評価はなくなったものの、1989年から1994年間のフラックスがそ



第4図 TERCで観測された運動量フラックスの測定値(a)と1981年から1994年間の推定したもので置き換えたフラックス(b)。データは1時間平均値



第5図 TERCで観測された顕熱フラックスの測定値(a)と1981年から1994年の間を補正したフラックス(b)。データは1時間平均値

れ以降よりも大きくなる結果となった。このフラックスが大きくなっている期間の正味放射量や降水量はそれ以降に比べて大きく変わらないこと(渡来ほか, 2006 参照), また, つくば市の開発は徐々に進んでいることを考慮すると, この期間は顕熱フラックスの補正が効きすぎている可能性がある。今後, この原因を調査する必要がある。

IV まとめ

陸域環境研究センターで連続して観測されてきた地表面フラックスの測定値は, 1981年から1994年間に過小評価されていることが先行研究により判明している。岩田・杉田(2006)では, そのフラックスの推定・補正方法が提案されたが, 本研究は彼らの方法において必要な過去の粗度長変化の推定を行い, それに基づいてフラックスの推定・補正を行った。航空写真判読により求めた粗度密度は1980年, 1990年, 2001年と徐々に増加しており, つくば市の開発による地表

面粗度の変化をよく表していると考えられる。また, その粗度密度を用いて推定した粗度長の変化も理にかなった変化をしている。推定した粗度長を用いて過去のフラックスを推定・補正した結果, 運動量フラックスは粗度長の増加にともない, 緩やかな増加傾向が見られた。この運動量フラックスの推定データは, 陸域環境研究センターのウェブページ上(<http://www.suiri.tsukuba.ac.jp>)で公開する予定である。顕熱フラックスは過去の明らかな過小評価はなくなったものの, 1989年から1994年間のフラックスは補正が効きすぎている可能性がある。今後, この原因を調査する必要がある。

文献

- 岩田拓記・杉田倫明(2006): 鉛直風標準偏差の普遍関数を用いた顕熱フラックス測定エラーの補正。筑波大学陸域環境研究センター報告, **7**, 87-97.
- 桜久美子・新村典子・木村富士男(1999): 長期データを用いた草地の熱収支の変動について。筑波大学水理実験センター報告, **24**, 97-106.
- 田少奮・杉田倫明(1996): 熱収支・水収支観測資料－1994年・1995年－。筑波大学水理実験センター報告, **21**, 61-115.
- 福田友紀子(1998): 広域の地表面被覆変化が熱収支に与える影響。筑波大学第一学群自然科学類卒業研究論文, 52p.
- 渡来靖・藪崎志穂・山中勤(2006): TERC熱収支・水収支観測データベース図表集。筑波大学陸域環境研究センター報告, **7** 別冊, 97p.
- Brohan, P., Kennedy, J. J., Harris, I., Tett, S. F. B. and Jones, P. D. (2006): Uncertainty estimates in regional and global observed temperature changes: a new data set from 1850. *Journal*

- of Geophysical Research*, **111**, D12106, doi: 10.1029/2005JD006548.
- Grant, A. L. M. and Mason, P. J. (1990): Observations of boundary-layer structure over complex terrain. *Quarterly Journal of Royal Meteorological Society*, **116**, 159-186.
- Hiyama, T. (1995): A study on the surface fluxes over a heterogeneous land cover. Ph. D dissertation, University of Tsukuba, 191p.
- Hiyama, T., Sugita, M. and Kotoda, K. (1996): Regional roughness parameters and momentum fluxes over a complex area. *Journal of Applied Meteorology*, **35**, 2179-2190.
- Sugita, M., Hiyama, T. and Kayane, I. (1997): How regional are the regional fluxes obtained from lower atmospheric boundary layer data? *Water Resources Research*, **33**, 1437-1445.
- (2009 年 5 月 29 日受付, 2009 年 10 月 28 日受理)