

有明海干潟上における二酸化炭素フラックス観測

田中健路¹・滝川 清²

干潟域における土壌・海水から大気への二酸化炭素 (CO_2) の排出・吸収量の定量化を目的として、熊本港北側の干潟域で実施中の乱流フラックス観測で取得されたデータを用いて解析を行った。日変化を調べると、晴天日の昼間では森林や水田などの数分の 1 から 10 分の 1 程度の CO_2 吸収が行われることが明らかとなった。5 月中旬から 6 月前半にかけて大気から干潟側へ吸収され、それ以外では主に呼吸による排出が上回ることが分かった。本研究の観測により、 CO_2 フラックスの日変化規模から季節変化までの短・中期的な変化が明らかとなった。

1. はじめに

二酸化炭素 (CO_2) は、温室効果気体として最も重要な気体の一つであり、地上観測や航空機観測などによる吸収・排出量測定、および濃度上昇に伴う地球温暖化予測など、様々なアプローチに基づいて研究が行われている。また、様々な規模で排出量削減に向けた取り組みが実施されてきている。 CO_2 増大に伴う温暖化への寄与に関しては、CMIP (=Coupled Model Intercomparison Project) などによって、十数種類の大気・海洋結合型大循環モデルを用いて相互比較が行われている。Covey ら (2003) によれば、 CO_2 排出量を毎年 1% ずつ増大した場合、 CO_2 濃度が約 2 倍となる 70 年後には、地上の平均気温が約 $1.7 \pm 0.5^\circ\text{C}$ 上昇するという計算結果が得られている。降水量については、増加傾向を示すものと同程度で推移するものと計算結果が分かれ、今後の研究の進展が望まれる。

CO_2 フラックス観測は、森林や農地などの陸域や海洋での観測が世界各地で活発に行われ、近年では、アジア (AsiaFlux)、アメリカ (AmeriFlux)、ヨーロッパ (CarboEurope) などのネットワークが急速に整備されてきている。Janssens ら (2003) は、CarboEurope で取得された森林・農地での観測結果とトレーサ解析による数値実験結果より、ヨーロッパの陸域の生物圏は人為的な排出量の 7-12% を吸収する能力があることを示した。海洋上の CO_2 フラックス観測は、海洋観測船や民間の貨物船の協力の下多数行われてきており (例えば、Murphy ら (2001))、排出源・吸収源の領域の季節変化を捉えられるようになってきている。

冠水と干出を周期的に繰り返す干潟域では、主に潮汐によって支配される干出開始時刻の変動に、大気側へのエネルギーフラックスが強く支配されることを、成松ら (2005) が明らかにした。干潟域での CO_2 フラックスも

エネルギーフラックスと同様の議論がある程度可能であると期待されるが、直接観測による研究例が殆どない。

そこで、本研究では、干潟上の土壌・海面から大気への CO_2 フラックスの日変化および季節変化特性を解明することを目的として、熊本港北側の干潟域で観測を実施し、解析を行った。

2. 観測概要

干潟域の大気・海水・土壌の熱・物質循環メカニズムの解明を目的として、2003 年 3 月に熊本港北東端から北へ 170 m の干潟域 (図-1) に干潟環境観測塔 (図-2) を設置した。気温・湿度・降水量などの気象要素および放射フラックスを 2003 年 7 月に設置し、測定を開始した。気象要素は、サンプリング間隔 5 秒で毎 10 分値として、データロガー (CR-10X, Campbell 製) に記録し、携帯電話回線を利用して 1 日 1 回熊本大学に自動転送している (田中ら, 2004)。

観測塔では、2004 年 7 月より乱流フラックス観測を実施している。測器は、超音波式風速温度計 (model 81000, YOUNG 製) と赤外線式 $\text{H}_2\text{O}/\text{CO}_2$ ガスアナライザ (LI-7500, Li-Cor 製) を用いている (図-3)。サンプリング間隔は 10 Hz で、風速 3 成分・音波温度 (超音波風速計で測定される気温)・水蒸気密度・ CO_2 密度・気圧の各サンプルデータ、地温・水温は 10 分平均

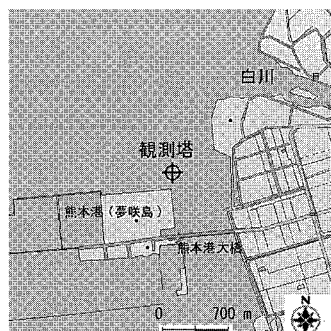


図-1 有明海干潟環境観測塔の位置

1 正 会 員 博(理学) 熊本大学助手 大学院自然科学研究科
2 フェロー 工博 熊本大学教授 沿岸環境科学教育研究センター

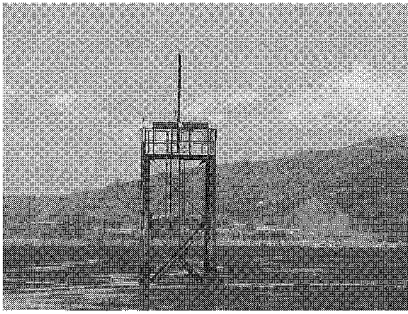
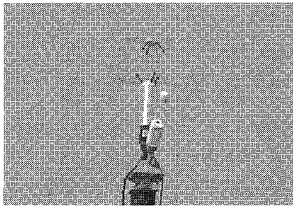


図-2 有明海干潟環境観測塔

図-3 超音波風速温度計と H₂O/CO₂ ガスアナライザ

値データをコンパクトフラッシュカード（容量1GB）に収め、月に1回の頻度でカード交換によるデータ回収を行っている。

3. CO₂フラックスの定量化

(1) LI-7500 の測定原理

赤外線式ガスアナライザ LI-7500 では、水蒸気、CO₂ の吸収帯（2.59 μm, 4.25 μm）とそれぞれの参照用の近赤外線（波長：2.35 μm, 3.95 μm）を照射し、空気中の一定距離（スパン長：12.5 cm）を通過させたときの透過率を測定し、ガス濃度に変換している。吸収帯 i の赤外線に対する透過率を A_i 、参照用の波長帯 i_0 の透過率を A_{i_0} とすると、波長帯 i のガスの吸光度 α_i は

$$\alpha_i = \left(1 - \frac{A_i}{A_{i_0}}\right) \dots \dots \dots (1)$$

と表される。

互いに異なる吸収帯域を持つ2種類の気体 i, j に対して、受光側の応答特性によって、微量の相互干渉が生じる。その影響は次式を用いて除去する。

$$\alpha_i = \left(1 - \left[\frac{A_i}{A_{i_0}} + X_{ij} \left[1 - \frac{A_j}{A_{j_0}}\right] z_i\right)\right) \dots \dots \dots (2)$$

ここで、 X_{ij} は、気体 i に対する気体 j の干渉係数で、製造時の検定により与えられる。 z_i は、ゼロドリフトに関する係数である。

CO₂ のモル密度 (mmol m⁻²) を、式 (2) に CO₂

(i) と水蒸気 (j) の値を代入した場合に求められる吸光度 (α_c) の関数として、次式を用いて求める。

$$C = P_g \psi \left(W_f / 1000 \right) f_c \left(\frac{\alpha_c S_c}{P_g \psi \left(\frac{W_f}{1000} \right)} \right) \dots \dots \dots (3)$$

ただし、

$$\Psi = 1 + (a_w - 1) W_f \dots \dots \dots (4)$$

$$W_f = \frac{WR(T_g + 273.15)}{1000P_g} \dots \dots \dots (5)$$

であり、 $a_w = 1.15$ 、 W は水蒸気のモル密度 (mmol m⁻³)、 R は気体定数、 T_g は測定気体の温度、 P_g は測定気体の全圧である。モル密度 C を分子量 (44 mg mmol⁻¹) 倍にして、絶対密度 ρ_c (mg m⁻³) が得られる。

(2) フラックス計算

地表面から大気への CO₂ フラックス F_c は、CO₂ の絶対密度 ρ_c と鉛直風速 w を用いて、次式で定義される。

$$F_c = \overline{\rho_c w} \\ = \overline{\rho'_c w'} + \overline{\rho_c w} \dots \dots \dots (6)$$

横棒は平均を表し、プライム (') は平均からの変動成分を表す。第1項は渦相関項で、第2項が平均流を伴う輸送成分を表す。

渦相関法でフラックスを算出する際に、温度や水蒸気の変動に伴う空気密度変動の影響を補正する必要がある (Webb, 1980)。本研究では、Webb 補正項を含んだ CO₂ フラックスの式 (岩田ら, 2001)

$$F_{CO_2} = \overline{w' \rho'_c} + \overline{w' \rho'_q} \left(\mu \frac{\rho_c}{\rho_a} \right) + \overline{\rho_c} (1 + \mu \sigma) \left(\frac{w' T'}{T} \right) \dots (7)$$

を用いた。ここで、 ρ_a 、 ρ_q は、乾燥空気・水蒸気の絶対密度 (kg m⁻³)、 μ は乾燥空気の平均分子量と水蒸気の分子量の比、 σ は乾燥空気と水蒸気の密度の比である。辺第1項は、センサーによって直接求められる生のフラックスである。右辺第2項・第3項は Webb 補正項であり、顕熱フラックス (H) と潜熱フラックス (λE) より計算することができる。

(3) データ処理

乱流観測によって得られる、温度・水蒸気・CO₂ の生の時系列データから、乱流統計量を算出する上で、以下の手順でデータ処理を行い、統計量計算を行った (成松ら 2005)。

1. 連続した時系列データを30分毎(18,000サンプル)に分割
2. 座標系の変換(主流方向を水平第1軸、吹き上げ角を鉛直軸とする3次元直交座標系に変換)

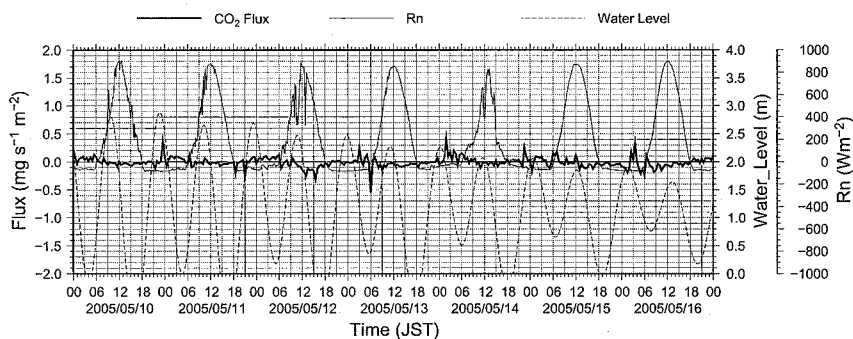


図-4 春季における大気側への CO_2 フラックス、水位、正味放射フラックスの日変化

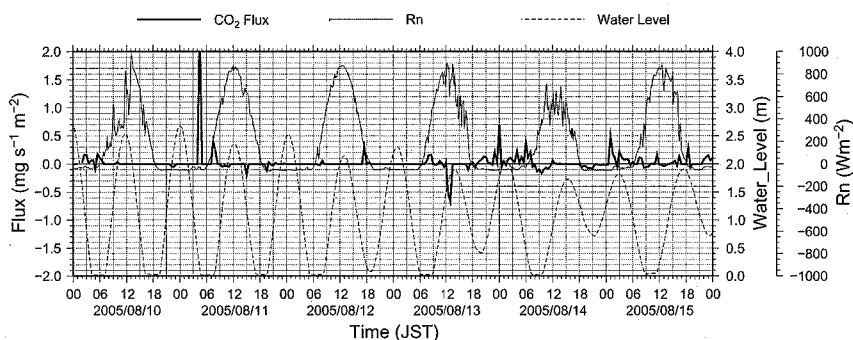


図-5 夏季における CO_2 フラックス、水位、正味放射フラックスの日変化

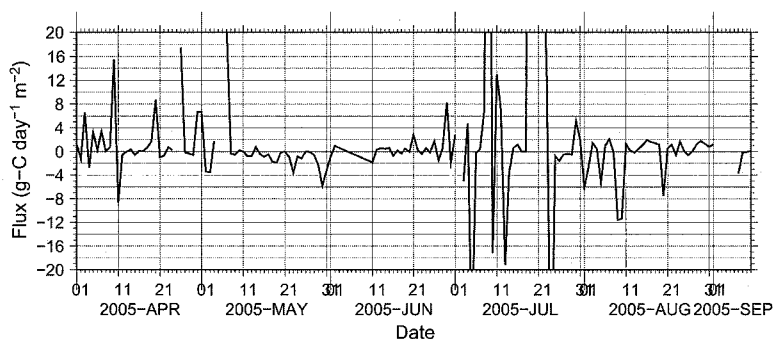


図-6 2005 年春季から夏季の CO_2 フラックスの日平均値の変動

3. 音波温度に対する横風補正
4. 温度に対する水蒸気補正
5. 1 次トレンド除去 (最小自乗法)

有明海干潟域で測定を行う場合、潮位変動に起因する海面での平均鉛直風速の影響を評価する必要がある。ところが、潮位変動による鉛直速度 (熊本港の大潮時で最大約 0.25 mm s^{-1}) は超音波風速計の分解能 (1 cm s^{-1}) 以下であり、スケールアナリシスによる議論が必要である。

4. CO_2 フラックスの変化

(1) 日 変 化

CO_2 フラックスの日変化の例として、図-4 に春季の例を図-5 に夏季の例をそれぞれ示す。4 成分放射計で測定された正味放射フラックス (Rn) と水圧式水位計で測定した水位の日変化を示している。干潟土壌および海面から大気側へ排出されるフラックスを正の値として表している。晴天日の安定した天候の下では、 $-0.3 \sim 0.5 \text{ mg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ の範囲で変化する。水田や森林などの植生上

での CO_2 フラックスは昼間で $-1.0 \sim -2.0 \text{ mg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ 、夜間で $0 \sim 0.5 \text{ mg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ 程度の値をとることから、それと比較すると数分の 1~10 分の 1 程度の日較差で変動する。

2005 年 5 月の事例では、昼間に CO_2 の吸収が観測されており、植物プランクトンの光合成活動が呼吸に伴う排出量を上回っている。この期間では、干出時でも $-0.1 \sim -0.3 \text{ mg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ の負のフラックスが観測されており、砂連や巣穴などの微地形によって、パッチ状に分布するたまり水や表層土壌の間隙水中にトラップされた植物性プランクトンの活動が非常に活発であった可能性が示唆される。一方、夏季の例では、日射に伴って CO_2 が必ずしも増大するとは限らず、光合成による吸収と比べ、底生生物の活動の活性化による大気側への排出が大きくなる結果となった。

(2) 季節変化

CO_2 フラックスの日積算値の季節変化を炭素換算量で表したものを図-6 に示す。降水による影響を受け、測定値が不安定になりやすい時期を除いて考えると、4 月は 1 m^2 あたり $1 \sim 10 \text{ g-C day}^{-1}$ の CO_2 が大気側への排出され、5 月から 6 月前半にかけて、 1 m^2 あたり $1 \sim 5 \text{ g-C day}^{-1}$ の CO_2 が干潟側へ吸収されることが分かる。8 月は突発的に負の値を示す日が表れるが、それ以外では 2 g-C day^{-1} 前後の排出が見られ、全体的には排出傾向にある。

5. 干潟上の CO_2 密度の乱流変動成分の特性

(1) Monin-Obukhov の相似則の検討

Monin-Obukhov 相似則によれば、一様かつ定常な地表面条件上での乱流統計量は、長さスケール

$$L = Tu_*^2 / \kappa g T_v^* \dots \dots \dots (8)$$

の関数関係が成り立つ。ここで、 $u_*^2 = -\overline{u'w'}$ は摩擦速度、 $T_v^* = \overline{T'w'}$ は温度スケール、 $\kappa (=0.40)$ はカルマン定数、 g は重力加速度である。

図-7 は、鉛直風速、比湿 (q)、 CO_2 濃度を無次元化したものを、干潟底面からの測器の高さ ($z=10 \text{ m}$) と平均水位 (η) と長さスケール L を用いて定義した安定度パラメータ $\zeta = (z-\eta)/L$ との関係プロットしたものである。ただし、 σ は標準偏差を表し、 $q_* = \overline{q'w'}$ 、 $c_* = \overline{c'w'}$ である。鉛直風速と水蒸気 (比湿) の標準偏差は、 $\zeta < 0$ で、鉛直風速については $|\zeta|$ の $1/3$ 乗、水蒸気については $|\zeta|$ の $-1/3$ 乗に比例する関係が見られる。Tanaka ら (2005) は、鉛直風速、比湿と安定度パラメータとに次式の関係式が最もよく適することを提唱した。これらの式で表される曲線を図中の実線で示している。

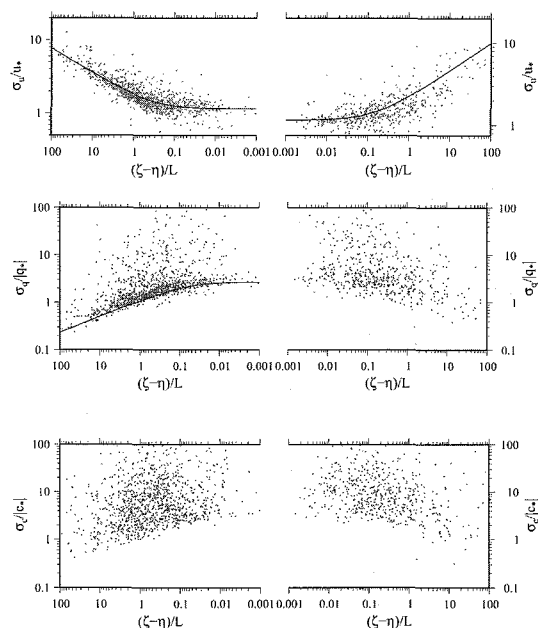


図-7 上から、鉛直風速・比湿・ CO_2 密度の無次元標準偏差と安定度パラメータとの関係

$$\frac{\sigma_w}{u_*} = \begin{cases} 1.15(1-3\zeta)^{1/3} & (\zeta < 0) \\ 1.15(1+6.5\zeta)^{1/3} & (\zeta > 0) \end{cases} \dots \dots \dots (9)$$

$$\frac{\sigma_q}{q_*} = 2.7(1-15.5\zeta)^{-1/3} \dots \dots \dots (10)$$

一方、 CO_2 密度の標準偏差は、他の物理値の標準偏差と比べ、プロットのばらつきが大きく、安定度パラメータとの関数関係がほとんど見られない結果となった。これは、熊本港・熊本平野の陸域と干潟上の CO_2 の排出、吸収サイクルの不均質性が強く、 σ_c の移流・拡散が無視されないことを示唆していると考えられる。

(2) CO_2 の乱流スペクトル～水蒸気との比較～

LI-7500 で計測された、水蒸気密度、 CO_2 密度の乱流変動成分の規格化したパワースペクトルを図-8 に示す。水蒸気・ CO_2 ピーク周波数帯 ($0.01 \sim 0.1 \text{ Hz}$) より高周波側では、スペクトル強度は周波数の $-2/3$ 乗に比例している。全体的な傾向として、水蒸気と CO_2 のパワースペクトルは、 $0.01 \sim 1.0 \text{ Hz}$ の周波数帯域で非常に強い正の相関が取れているものの、2005 年 8 月 11 日 4 時の例 (図-8 上段) のように、低周波側の成分が水蒸気のスペクトルと比べて強く出る傾向にある。平均風速 3 m s^{-1} の場合、周波数 $0.001 \sim 0.01 \text{ Hz}$ の変動は、水平方向に $300 \sim 3,000 \text{ m}$ 規模の現象に相当し、熊本港・熊本平野からの CO_2 の変動成分も干潟上の CO_2 の変動に一部寄与していると考えられる。

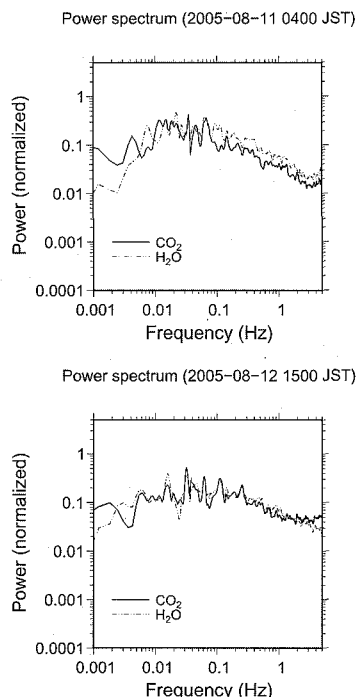


図-8 CO₂と水蒸気の規格化したパワースペクトルの例

6. 議 論

第3節で述べた、潮汐規模の水面変動がCO₂フラックス評価に与える影響について、スケールアナリシスを行い検討する。Lee (1998) は、森林でのCO₂フラックス観測データを基に、測器の高さから地表面までの物質交換の効果を導入した輸送項 (NEE=Net Ecosystem Exchange)

$$NEE = \int_0^{z_r} \frac{\partial \bar{\rho}_c}{\partial t} dz + F_c + \bar{w}_r (\bar{\rho}_{cr} - [\bar{\rho}_c]) \dots \dots (11)$$

を導き、森林上で夜間のCO₂フラックスが過少評価される可能性を指摘した。添え字 r は、測器の高度での値を表し、 $[\bar{\rho}_c]$ は、 ρ_c の地表面(海面)から測定高度までの鉛直平均を表す。式(11)の右辺第1項は濃度のトレンド成分、第2項は式(7)で計算されるフラックス、第3項は平均鉛直流と濃度の鉛直勾配によって生じる鉛直移流項である。Lee (1998)によると、高度2mで $\bar{w}_r = 0.25 \text{ cm s}^{-1}$ のときに、 $0.0025 \sim 0.025 \text{ mg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ のCO₂フラックスへの寄与を持つ。干潟の場合には、 $\bar{w} \sim 0.25 \text{ mm s}^{-1}$ と1桁小さく、渦相関フラックスに対して数%未満と考えられる。しかしながら、 ρ_c の鉛直プロファイルに大きく依存することから、今後観測を展開して明らかにする必要がある。

7. 結 語

本研究で得られた結論は以下の通りである。

- 5月から6月前半の昼間の干出時では、正味として干潟土壌側にCO₂が吸収されることが観測結果より明らかとなった。
- 季節規模の変動を調べると、5月中旬から6月前半にかけて大気から干潟側へ吸収され、それ以外では呼吸による排出が上回ることが明らかとなった。
- 昼間に見られるCO₂の海水および干潟土壌への吸収量は、森林や水田などの植生による吸収量の数分の1から10分の1程度であることが分かった。

以上、従来の研究ではほとんど解明されなかった、干潟上の大気・海水・底泥間のCO₂フラックスについて貴重な結果が得られた。

参 考 文 献

- 岩田徹・大滝英治・宮田明・原蘭芳信・青木正敏・三枝信子・文字信貴・平野高司(2001): 微量気体のフラックス, 気象研究ノート第199号(塚本修・文字信貴・編), 日本気象学会, pp. 105-140.
- 田中健路・滝川清・成松明(2004): 有明海干潟上における大気-海面-陸面間の地表面エネルギーフラックスに関する観測, 海岸工学論文集, 第51巻, pp. 1131-1135.
- 成松明・田中健路・滝川清・森本剣太郎(2005): 乱流渦相関法を用いた有明海干潟上の地表面フラックス直接観測, 海岸工学論文集, 第52巻, pp. 1081-1085.
- Covey, C. K. M. AchutaRao, U. Cubasch, P. Jones, S. J. Lambert, M. E. Mann, T. J. Phillips and K. E. Taylor(2003): An overview of results from the coupled model intercomparison project, *Global and Planet Change*, 37, pp. 103-133.
- Janssens, I. A., A. Freibauer, P. Ciais, P. Smith, G.-J. Nabuurs, G. Folberth, B. Schlamadinger, R. W. A. Hutjes, R. Ceulemans, E.-D. Schulze, R. Valentini, and A. J. Dolman, 2003: Europe's Terrestrial Biosphere Absorbs 7 to 12 % of European Anthropogenic CO₂ Emissions, *Science*, 300, pp. 1538-1542.
- Lee, X. (1998): On micrometeorological observations of surface-air exchange over tall vegetation, *Agric. and Forest Meteorol.*, 91, pp. 39-49.
- Murphey, P. P., Y. Nojiri, Y. Fujinuma, C. S. Wong, J. Zeng, T. Kimoto, and H. Kimoto, (2001): Measurements of Surface Seawater fCO₂ from Volunteer Commercial Ships: Techniques and Experiences from Skaugran, *J. Atmos. Ocean Tech.*, 18, pp. 1719-1734.
- Tanaka, K. A. Narimatsu, K. Morimoto and K. Takikawa, (2005): Turbulent characteristics of the atmospheric surface layer in the inter-tidal zone of the Ariake Sea, *Asian and Pacific Coasts, 2005, Sep. 4-8, 2005*, Jeju, Korea, pp. 1816-1829.
- Webb, E.K., Pearman G.J. and Leuning R. (1980): Correction of flux measurements for density effects due to heat and water vapor transport, *Quart. J. Royal Meteor. Soc.*, 106, pp. 85-100.