

# 海上水蒸気交換 (HEXOS) プログラムのインパクト Smith et al. (1996) BLM 78, 121-141

Smith SD, Katsaros KB, Oost WA, Mestayer PG (1996) The impact of the HEXOS programme, Boundary-Layer Meteorology 78, 121-141.

**要旨：**HEXOS は、風洞実験、野外観測、数値実験を協調させる各国のグループが参加した国際プログラムである。本プログラムでは、海からの蒸発測定を広範囲で行い、さらに、飛沫による海水の大気への輸送の効果を調査した。風速 15m/s 以上で急激に蒸発係数が増大するという予測は実証されなかった注<sup>1</sup>が、風速応力と波齢の関係が明らかとなり、本プログラムにおいて、プラットホームによる流れの歪みに対処する新しい手法が開発された。

注 1 : Andreas, E.L. and Decosmo, J. (2002) The signature of sea spray in the HEXOS turbulent heat flux data, Bound.-Layer Meteorol. 103, 303-333. で決着！？と豪語（データのクオリティチェックが大切だよと） A 氏の飛沫モデル(1992)を使って、海面 flux = 界面 flux + 飛沫 flux と表現するのが蒸発推定に良い。

## 1. Introduction

蒸発係数 :  $C_E = \frac{E}{\rho U [0.98q_s(T_s) - q_a]}$  この値がバルク法による蒸発量推定の鍵

風速 15m/s 以上で飛沫効果の存在示唆 Ling & Kao(1976) 実証データがない HEXOS プログラム立案  
サイト : Meetpost Noordwijk (MPN) オランダ沖 9km の水深 18m 北海上の固定式プラットホーム  
1984 HEXPILOT センサー取り付け用 21 ブームを設置

1985 HEXIST 室内実験、Grande Soufflerie (フランス IMST 乱流研究所?)

1986 HEXMAX メイン観測。船舶、航空機、タワー、海岸での同時観測

その後、泡発生器アレイで飛沫実験 (CLUSE) エアロゾル発生実験など

## 2. Surface Fluxes

### 2.1 Coping with flow distortion

MNP の 1/25 模型の風洞実験で流れの歪みを見極め、センサー位置を決定。

### 2.2 Humidity exchange and sensible heat flux

Lyman-alpha 紫外線式水蒸気センサー：飛沫除去のため、フィルター付き通風筒を開発。

渦フラックス測定の風速レンジ : 5 ~ 19m/s

中立時 :  $C_{EN} = (1.12 \pm 0.24) \times 10^{-3}$  顕熱バルク係数とほぼ一致 ( $C_{HN} = (1.14 \pm 0.35) \times 10^{-3}$ )

抵抗係数の変動と高い相関あり。

### 2.3 Wind stress

海面の抵抗係数は、沖合いで小さく、海岸域で大きい。

海岸域 : 風速 > 波の移動速度 摩擦応力が大。MPN 最大波速 =  $\sqrt{gh} = \sqrt{9.8 \times 18} = 13.3 \text{ m/s}$

沖合 : 波の移動速度 ( ) 風速 摩擦応力が小

無次元粗度長 :  $z_{0*} \equiv gz_0 / u_*^2 = 0.48(c/u_*)^{-1}$  の関係が観測された。(c は波速 m/s、c/u\* は波齢)

波齢(c/U<sub>10N</sub>)増大 (沖合の成熟波での抵抗係数からの) 抵抗係数偏差の減少

ただし、水深が浅く、風速 > (最大) 波速では、波が崩れる効果が加わり、上の式は使えない。

### 2.4 Inertial-dissipation estimates of surface fluxes

慣性散逸法 : 最も信頼の高い手法。不安定時、歪んだ流れ場での唯一の手法。

- ・計測機器の進歩、リアルタイムでの処理機器およびアルゴリズムの進歩
- ・流れの歪みとプラットホームの揺れに鈍感 (渦相関法よりも短時間のサンプルで計算可)
- ・手法の正確さ

単一のセンサー スペクトル解析(FFT) 慣性小領域の乱流構造

超音波風速温度計と Lyman-alpha 湿度計を使用

ちなみに、こんな式らしい

$$u_* = \left[ \frac{nS_u(n)}{\alpha_{eff}} \right]^{1/2} \left[ \frac{2\pi n}{U} \frac{kz}{\phi_m - \zeta} \right]^{1/3}$$

Kolmogorov 定数 は 0.52 だが、実際は 0.5 ~ 0.6 ぐらいを使うらしい。普遍関数も必要？.. 辛いのでは？  
風速 6m/s では、沖合 & 海岸域で  $C_{10N} = 1.02 \times 10^{-3}$ 。風速 16m/s では、沖合で 1.92、海岸域で 2.11。

### 3. The Role of Droplets

白波泡 膜滴  $0.1 \sim 10 \mu\text{m}$ 。水力学的泡 噴出滴  $1 \sim 100 \mu\text{m}$  初速  $5 \sim 20 \text{m/s}$ 。表面泡  $40 \mu\text{m}$ 。重要な供給源  
鍵となるパラメタ：水滴源関数 白波泡被覆率と白波生成モデル、飛沫濃度と飛沫蒸発-拡散結合モデル

#### 3.1 Field measurements of droplets

船舶と MPN、エアロゾル収集と光学検知器で観測 水滴の粒径分布  
MPN で、白波泡被覆率測定

#### 3.2 Laboratory simulation experiments

IMST の Grande Soufflerie：奥行き  $40\text{m} \times$  幅  $3\text{m} \times$  高さ  $1.5\text{m}$  + 水深  $0.75\text{m}$  の風波洞 ( HEXIST )  
さらに泡発生器を取り付けて実験 ( CLUSE )

飛沫があると水面直上では、比湿は増大 フラックスは減少。その上は未解明。

#### 3.3 Modelling fluxes and droplets

Lagrangian Monte Carlo モデルで水滴の軌跡を計算。 $50 \mu\text{m}$  は水面に戻るが、 $10 \mu\text{m}$  は遠くまで飛ぶ。  
Eulerian 1 次元渦拡散モデルでプロファイルを計算。

飛沫効果で、フラックスは水面直上では減少し、水滴蒸発層より上では増大。

その他、いろんなモデルなどの成果が紹介されているようだが、大幅に省略。すまん

### 4. Impact of the HEXOS Programme

- 1) 風速  $19\text{m/s}$  までの強風時の水蒸気交換が海上で測定された。
- 2) 応答の速い温度・湿度センサーを水滴から守る吸引シールドを用いて、より広範囲の条件下で熱・水蒸気フラックスが測定可能となった。
- 3) 局地的な流れの歪みへの渦フラックスの補正が考案された。
- 4) 水の交換係数は、従来の水滴蒸発モデルによって予測されたように風速  $15\text{m/s}$  以上で急激に増大するということはなかった。
- 5) 水滴、フラックス、プロファイルの相互作用は室内実験によって究明された。
- 6) 新しいモデルは、水滴の蒸発と、水滴と表面境界層内のフラックスおよびプロファイルの相互作用を計算するように改良されている。
- 7) 慣性散逸法は船舶でのフラックス測定に広く用いることができる。
- 8) 長く理解されなかった表面粗度長の波齢への依存性が説明された。
- 9) HEXOS プログラムで持ち上がった疑問点は、現在の仕事の動機付けとなっている。
  - ・風速応力と海面状態の詳細な関係
  - ・飛沫効果を組み入れた境界層モデルの改善
  - ・風速  $19\text{m/s}$  以上における飛沫の効果
  - ・水滴源関数の決定的な測定法
  - ・熱帯域で重要な弱風時の蒸発
  - ・CO<sub>2</sub> などの気候気体のフラックス測定