

MÔ HÌNH SỐ TRỊ DỰ BÁO BIẾN ĐỔI KHÍ HẬU QUY MÔ VỪA

TS. Vũ Thanh Ca

Trung tâm Nghiên cứu Ứng dụng Công nghệ mới

Viện Khí tượng Thủy văn

Bài báo này trình bày một mô hình số trị dự báo biến đổi khí hậu quy mô vừa do tác giả xây dựng. Mô hình mô phỏng các quá trình vận chuyển động lượng, nhiệt, ẩm trong lớp biên khí quyển có xét tới ảnh hưởng của các hoạt động của con người như tốc độ đô thị hoá, tốc độ phát thải nhiệt vào khí quyển. Đặc biệt, hệ phương trình của mô hình được rút ra bằng cách lấy trung bình không gian và thời gian hệ phương trình Navier-Stokes, phương trình liên tục, phương trình vận chuyển nhiệt, ẩm để thể tính đến ảnh hưởng của thể tích các công trình trong lớp biên gần mặt đất và tương tác giữa các công trình với các quá trình trao đổi động năng, nhiệt, ẩm giữa bề mặt và lớp biên khí quyển. Mô hình k-e cải tiến được sử dụng có tính đến sự bất đẳng hướng của trường rối khi có phân tầng mật độ. Trong mô hình k-e cải tiến, quá trình vận chuyển động lượng, nhiệt và ẩm theo phương thẳng đứng trong điều kiện phân tầng mật độ được tính toán dựa trên giả thiết về chuẩn cân bằng của dòng chảy cắt khi mà có thể bỏ qua ảnh hưởng của quá trình vận chuyển lên ứng suất và thông lượng nhiệt. Quá trình đốt nóng tại bề mặt các công trình và bề mặt đất cũng được mô hình hoá. Việc so sánh các kết quả tính toán bằng hệ thống dự báo khí hậu với các số liệu quan trắc cho thấy rằng mô hình có khả năng tính toán khá chính xác các điều kiện khí tượng trong lớp sát đất như vận tốc gió, nhiệt độ, độ ẩm không khí, các đặc trưng của trường rối. Kết quả tính toán của mô hình có thể phục vụ cho việc dự báo sự biến đổi của khí hậu, nhất là khí hậu đô thị do có sự phát triển và mở rộng thành phố, phục vụ cho việc lập quy hoạch sử dụng đất và quy hoạch đô thị.

1. Giới thiệu chung

Xu hướng tập trung phát triển các đô thị lớn, dù muốn hay không muốn, vẫn là rất phổ biến trên thế giới. Hiện nay, tại các quốc gia phát triển, một phần lớn dân cư sống trong một số thành phố khổng lồ. Cùng với sự phát triển, rất nhiều vấn đề về môi trường đã phát sinh như: Ô nhiễm nguồn nước, ô nhiễm khí quyển, tiếng ồn v.v. Một

trong những vấn đề liên quan tới môi trường không khí tại các đô thị lớn là sự tăng nhiệt độ của nội đô thị so với vùng xung quanh.

Mặt đất tại các đô thị bị bao phủ bởi nhựa đường hoặc bê tông, không có khả năng bốc hơi do vậy toàn bộ lượng nhiệt được hấp thụ sẽ được giải phóng ra dưới dạng nhiệt cảm và bức xạ nhiệt. Nhiệt cảm sẽ trực tiếp đốt nóng không

khí trong khi đó bức xạ nhiệt sẽ hoặc là được hấp thụ và đốt nóng không khí, hoặc là trực tiếp tấn công và ảnh hưởng tới sức khoẻ của dân cư thành phố. Hiện tượng thành phố nóng hơn vùng xung quanh được gọi là đảo nhiệt và đã được nhiều tác giả nghiên cứu (Oke, 1982, 1988; Oke và Cleugh, 1987; Stull, 1988; Asaeda and Vu, 1993, Vu et al, 1994).

Hiện tượng đảo nhiệt không những gây cảm giác nóng nực khó chịu và ảnh hưởng tới sức khoẻ của dân cư thành phố mà còn gây nhiều thiệt hại kinh tế (như tăng lượng điện sử dụng chạy điều hoà nhiệt độ, tăng lượng nước sử dụng v.v.). Bởi vậy, cần phải có những nghiên cứu phục vụ quy hoạch thành phố một cách chuẩn xác để giảm thiểu ảnh hưởng của hiện tượng đảo nhiệt này.

Mô hình của chúng tôi được phát triển với mục đích phục vụ dự báo sự biến đổi khí hậu quy mô vừa có tính đến những hoạt động của con người, trên cơ sở đó tính toán tìm giải pháp tối ưu cho sự phát triển để có thể giảm thiểu ảnh hưởng của sự phát triển tới khí hậu và môi trường nhiệt đô thị.

Xuất phát từ đó, mục đích của nghiên cứu này là xây dựng một phần mềm dự báo khí hậu quy mô vừa để phục vụ nghiên cứu biến đổi khí hậu khi có tác động của con người. Đặc biệt là mô hình này có thể được sử dụng phục vụ nghiên cứu quy hoạch các khu đô thị cũng như để tìm các giải pháp tốt nhất để cải thiện môi trường nhiệt tại các thành phố.

2. Cơ sở khoa học của mô hình

a. Các phương trình cơ bản của mô hình

Thông thường, đối với các mô hình dự báo khí hậu, cần phải biết được các đặc trưng như nhiệt độ không khí, độ ẩm, vận tốc gió, bức xạ v.v. tại độ cao khoảng vài ba mét trên mặt đất vì đó là độ cao mà con người sinh hoạt nhiều nhất. Tại các đô thị, vì có rất nhiều công trình xây dựng nên một phần không gian tại các độ cao này bị chiếm bởi công trình. Do vậy, các quá trình vận chuyển động năng, nhiệt ẩm cũng như các quá trình nhiệt động lực học chỉ xảy ra trong phần không gian không bị công trình chiếm dụng.

Rõ ràng là nếu như không tính tới việc này thì ta không thể dự báo chính xác các quá trình khí tượng và khí hậu. Vì vậy, trong nghiên cứu này, chúng tôi đã rút ra các phương trình cơ bản bằng cách áp dụng phép trung bình hoá không gian để tính đến phần thể tích không chứa công trình trong mỗi mắt lưới. Đồng thời, phép trung bình hoá thời gian với giả thiết khép kín rồi đã được áp dụng để rút ra các phương trình trung bình thời gian.

Các phương trình cơ bản của mô hình được rút ra bằng cách áp dụng phép trung bình hoá không gian do Crapsite et al (1986) đề xuất vào hệ phương trình Navier-Stokes và phương trình vận chuyển nhiệt ẩm, năng lượng rối và tốc độ tiêu tán năng lượng rối. Các chi tiết của phép biến đổi để rút ra các phương trình cơ bản của mô hình được trình bày trong bài báo của tác giả Vũ Thanh Ca và cộng sự (2002). Các phương trình được rút ra có dạng như sau:

Phương trình liên tục

$$\frac{1}{G} \frac{\partial G \langle \bar{u}_j \rangle}{\partial x_j} = 0 \quad (1)$$

Phương trình động lượng:

$$\frac{\partial \langle \bar{u}_i \rangle}{\partial t} + \frac{1}{G} \frac{\partial G \langle \bar{u}_i \rangle \langle \bar{u}_j \rangle}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho_a} \frac{\partial \langle \bar{p} \rangle}{\partial x_i} + \frac{1}{G} \frac{\partial}{\partial x_j} \left(G \nu_t \frac{\partial \langle \bar{u}_i \rangle}{\partial x_j} \right) - \beta g_i \left(\langle \bar{\theta}_v \rangle - \theta_{v0} \right) - \varepsilon_{ijk} \Omega_j \bar{u}_k - a C_{\beta} \left(\langle \bar{u}_j \rangle \langle \bar{u}_j \rangle \right)^{0.5} \bar{u}_i. \quad (2)$$

Phương trình vận chuyển và khuếch tán nhiệt:

$$\frac{\partial \langle \bar{\theta} \rangle}{\partial t} + \frac{1}{G} \frac{\partial G \langle \bar{u}_j \rangle \langle \bar{\theta} \rangle}{\partial x_j} = \frac{1}{G} \frac{\partial}{\partial x_j} \left(G \frac{\nu_t}{P_r} \frac{\partial \langle \bar{\theta} \rangle}{\partial x_j} \right) + \frac{\langle \bar{H}_a \rangle + \langle \bar{H}_s \rangle}{G C_p \rho_a} \quad (3)$$

Phương trình vận chuyển và khuếch tán ẩm:

$$\frac{\partial \langle \bar{q} \rangle}{\partial t} + \frac{1}{G} \frac{\partial G \langle \bar{u}_j \rangle \langle \bar{q} \rangle}{\partial x_j} = \frac{1}{G} \frac{\partial}{\partial x_j} \left(G \frac{\nu_t}{P_r} \frac{\partial \langle \bar{q} \rangle}{\partial x_j} \right) + \frac{\langle \bar{Q}_a \rangle + \langle \bar{Q}_s \rangle}{G \rho_a} \quad (4)$$

Phương trình vận chuyển và khuếch tán năng lượng rối (TKE):

$$\frac{\partial \langle k \rangle}{\partial t} + \frac{1}{G} \frac{\partial G \langle \bar{u}_j \rangle \langle k \rangle}{\partial x_j} = D_k + P_k - \varepsilon + G_k + F_k \quad (5)$$

Và phương trình vận chuyển và khuếch tán tốc độ tiêu tán năng lượng rối:

$$\frac{\partial \langle \varepsilon \rangle}{\partial t} + \frac{1}{G} \frac{\partial G \langle \bar{u}_j \rangle \langle \varepsilon \rangle}{\partial x_j} = D_\varepsilon + \frac{\langle \varepsilon \rangle}{\langle k \rangle} (C_{1\varepsilon} P_k - C_{2\varepsilon} \langle \varepsilon \rangle + C_{3\varepsilon} G_k + C_{p\varepsilon} F_\varepsilon) \quad (6)$$

Với dấu $\langle \rangle$ và gạch trên lần lượt ký hiệu trung bình theo không gian và thời gian. Ngoài ra, trong các phương trình sử dụng các ký hiệu sau đây:

G : Thể tích hiệu dụng, được định nghĩa là tỷ số giữa phần không gian chứa không khí trong mỗi mắt lưới và thể tích tổng cộng của mắt lưới, u_i : Thành phần vận tốc gió theo hướng trục x_i , Q_s : Mật độ không khí, p : áp suất, ν_t : Độ nhớt rối, g_i : Thành phần gia tốc trọng trường theo phương trục x_i , β : Hệ số dẫn nở

nhiệt của không khí, θ_v : Nhiệt độ thế vị ảo, θ_{v0} : Nhiệt độ thế vị ảo trung bình trên mặt nằm ngang, ε_{ijk} : Edington Epsilon, Ω_j : Thông số Coriolis, a : Mật độ diện tích bề mặt (mặt cứng cũng như lá cây), C_{β} : Hệ số trở kháng, θ_i : Nhiệt độ thế vị, P_r : Số Prandtl, H_a : Nguồn nhiệt do hấp thụ sóng dài hoặc tạo ra do các hoạt động của con người, H_s : Nguồn nhiệt do trao đổi nhiệt với các bề mặt rắn ở bên trong lưới, cũng tương tự như thế, Q_a và Q_s lần lượt là nguồn ẩm

tạo ra do các hoạt động của con người và nguồn ẩm do bốc hơi hoặc ngưng tụ tại các bề mặt rắn ở bên trong lưới; k : Năng lượng rối; ε : Tốc độ tiêu tán năng lượng rối. Các số hạng bên vế phải của các phương trình (5) và (6) được cho như sau:

$$D_\varepsilon = \frac{1}{G} \frac{\partial}{\partial x_j} \left(G \frac{\nu_t}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \langle \varepsilon \rangle}{\partial x_j} \right) \quad (7)$$

$$P_k = \nu_t \left(\frac{\partial \langle u_i \rangle}{\partial x_j} + \frac{\partial \langle u_j \rangle}{\partial x_i} \right) \frac{\partial \langle u_i \rangle}{\partial x_j} \quad (8)$$

$$G_k = g_i \beta \frac{\nu_t}{P_\pi} \frac{\partial \langle \theta_v \rangle}{\partial x_i} \quad (9)$$

$$F_k = a C_\beta \left(\langle u_j \rangle \langle u_j \rangle \right)^{3/2} \quad (10)$$

$$D_\varepsilon = \frac{1}{G} \frac{\partial}{\partial x_j} \left(G \frac{\nu_t}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \langle \varepsilon \rangle}{\partial x_j} \right) \quad (11)$$

$$F_\varepsilon = \frac{\langle k \rangle^{3/2}}{L_0} \quad (12)$$

với $C_{1\varepsilon}(=1,44)$, $C_{2\varepsilon}(=1,92)$, $C_{3\varepsilon}$ (tương ứng $=C_{1\varepsilon}$ và $=0$ trong các điều kiện ổn định và không ổn định), $Cp_\varepsilon(=0,5)$

trong phương trình (6), $\sigma_k(=1)$ trong phương trình (7), và $\sigma_\varepsilon(=1,3)$ trong phương trình (11) là các hệ số khép kín rối. L_0 trong phương trình (12) là độ dài đặc trưng của miền xoáy rối sau công trình. Giá trị này được xác định theo Hiraoka (1989) là bằng với mật độ bề mặt rắn trong một mắt lưới. Hệ số nhớt rối được tính như sau:

$$\nu_t = C_\mu \frac{\langle k \rangle^2}{\langle \varepsilon \rangle} \quad (13)$$

Như vậy, bằng cách lấy trung bình thời gian cũng như không gian và bằng cách đưa ra khái niệm thể tích hiệu dụng, ta đã có thể tính được phần không gian thực sự có các quá trình vận chuyển động năng, nhiệt và ẩm trong mỗi mắt lưới. Đối với vùng ngoài khu vực đô thị ít có công trình xây dựng (với thể tích hiệu dụng G xấp xỉ 1) thì việc tính đến G cũng không nâng được độ chính xác một cách đáng kể. Tuy nhiên, đối với vùng đô thị, đặc biệt là nơi có mật độ xây dựng cao (với thể tích hiệu dụng G nhỏ hơn 1 tương đối nhiều) thì việc tính đến G sẽ giúp nâng được độ chính xác tính toán đáng kể đối với những mắt lưới nằm thấp hơn nóc nhà.

Để tính toán ảnh hưởng của sự phân tầng mật độ đến các hệ số trao đổi rối theo phương thẳng đứng, nghiên cứu này đã sử dụng số Richardson thông lượng R_f được định nghĩa như sau:

$$R_f = \frac{\beta g R_{\theta 3}}{R_{13} \left(\partial \langle u_1 \rangle / \partial x_3 \right)} \quad (14)$$

Bằng cách sử dụng số Richardson thông lượng, hệ số C_μ trong phương trình (13) và số Prandtl được biểu thị như sau:

$$C_\mu = \frac{0.8\phi\gamma - 0.5\gamma(\phi_\theta - \gamma)}{0.8\gamma + \phi(\phi_\theta - \gamma)} \frac{0.53 - 0.94 R_f}{1 - R_f}$$

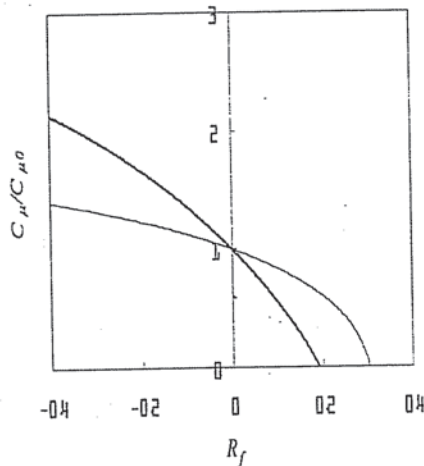
$$P_\pi = P_{\pi 0} \frac{1.59 - R_f(1.5\phi_\theta + 2.82)}{1.59 + R_f(3\phi - 5.22)} \quad (16)$$

$$P_\pi = P_{\pi 0} \frac{1.59 - R_f(1.5\phi_\theta + 2.82)}{1.59 + R_f(3\phi - 5.22)} \quad (17)$$

$$\gamma = \phi_\theta \frac{1.59 - 5.22 R_f}{1.59 - 2.82 R_f}$$

Theo Launder (1975), các hệ số ϕ và Q_s được cho tương ứng là 0,20 và 1/3,2. Theo phương nằm ngang, các giá trị của các hệ số dùng cho mô hình $k-\varepsilon$ tiêu chuẩn được sử dụng, tức là $C_{\mu 0}=0,09$ và $Pr_{t0}=0,68$.

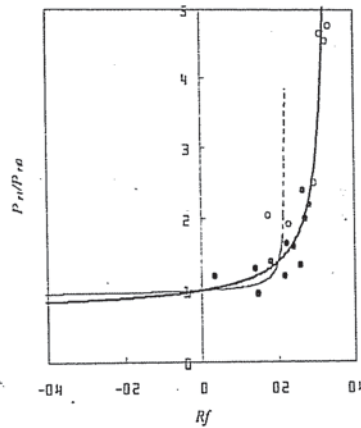
Hình 1 cho thấy phụ thuộc của C_{μ} vào số Richardson thông lượng. Trên hình cũng cho kết quả tính toán dựa theo mô hình cấp 2,5 của Yamada (1975, 1983). Có thể thấy rằng hai hệ số này có giá trị chính xác bằng nhau đối với trường hợp không phân tầng. Tuy nhiên, với mức độ phân tầng càng cao thì sự khác biệt của hai mô hình càng lớn, cũng cho thấy số Richardson thông lượng tới hạn của mô hình cấp 2,5 là 0,195, trong khi đó đối với mô hình của chúng tôi, giá trị này là 0,29. Như vậy, giới hạn áp dụng của mô hình này là rộng hơn mô hình cấp 2,5.



Hình 1. Sự phụ thuộc của C_{μ} vào số Richardson thông lượng

Hình 2 cho thấy sự phụ thuộc của số Prandtl Pr_t vào số Richardson thông lượng, xác định theo mô hình cấp 2,5 và mô hình trình bày ở đây cùng với các số liệu thực nghiệm của Webster (1964) và Kondo và cộng sự (1978). Có thể thấy rằng khi phân tầng mạnh, sơ đồ

khép kín rồi của chúng tôi cho kết quả tốt hơn.



Hình 2. Sự phụ thuộc của số Prandtl Pr_t vào số Richardson thông lượng

b. Điều kiện biên và sơ đồ số trị

Trong mô hình này có tính đến một cách chi tiết các quá trình trao đổi tại bề mặt đất và tương tác của lớp canopy với khí quyển. Thông lượng động năng, nhiệt cảm và nhiệt ẩn tại mặt đất được tính như sau:

$$\tau_0 = \rho_a u_*^2 \quad (18)$$

$$H_s = -\rho_a C_p u_* \theta_* \quad (19)$$

$$l_e e = -\rho_a l_e u_* q_* \quad (20)$$

Với τ_0 , H_s và $l_e e$ lần lượt là thông lượng động năng, nhiệt cảm và nhiệt ẩn tại bề mặt.

Vận tốc ma sát, quy mô nhiệt độ và hơi nước được cho theo Garratt và Hicks (1973) và Yamada và Bunker (1988).

$$u_* = \kappa (U_1^2 + V_1^2)^{1/2} [\ln\{(z_1 + z_0)/z_0\} - \Psi_m]^{-1} \quad (21)$$

$$\theta_* = \frac{\kappa}{P_{rt}} [\theta(z_1) - \theta_{gs}] [\ln\{(z_1 + z_{0t})/z_0\} + \ln(z_0/z_{0t}) - \Psi_h]^{-1} \quad (22)$$

$$q_* = \frac{\kappa}{P_{rt}} [q(z_1) - q_{gs}] [\ln\{(z_1 + z_{0v})/z_0\} + \ln(z_0/z_{0v}) - \Psi_h]^{-1} \quad (23)$$

Với U_1 , V_1 , $\theta(z_1)$ và $q(z_1)$ là các giá trị cho tại độ cao z_1 . Chỉ số gs chỉ giá trị được cho tại mặt đất. Các giá trị của các hàm hiệu chỉnh độ phân tầng được cho theo Dyer và Hicks (1970) như sau:

$$\Psi_m = (1 - 15\zeta)^{-1/2} \quad \zeta < 0 \quad (24)$$

$$\Psi_m = 1 + 5\zeta \quad \zeta < 0$$

$$\Psi_m = (1 - 15\zeta)^{-1/2} \quad \zeta < 0$$

$$\Psi_m = 1 + 5\zeta \quad \zeta < 0$$

Với $\zeta = z/L$

L là độ dài Monin-Obukhov.

Quá trình trao đổi nhiệt giữa lớp canopy và lớp khí quyển sát đất được tính bằng cách tính chi tiết quá trình lan truyền bức xạ sóng dài và sóng ngắn trong lớp canopy, quá trình đốt nóng tường và mái của các toà nhà, quá trình trao đổi nhiệt cảm và hơi nước giữa mặt tường cũng như mái và không khí, quá trình hoạt động của điều hoà nhiệt độ (nếu sử dụng) và nhiệt lượng cũng như lượng ẩm xả ra khí quyển do hoạt động của con người. Bằng cách tính toán chi tiết như trên, mô hình có khả năng mô phỏng biến đổi của khí hậu liên quan tới các quá trình phát triển của vùng nghiên cứu.

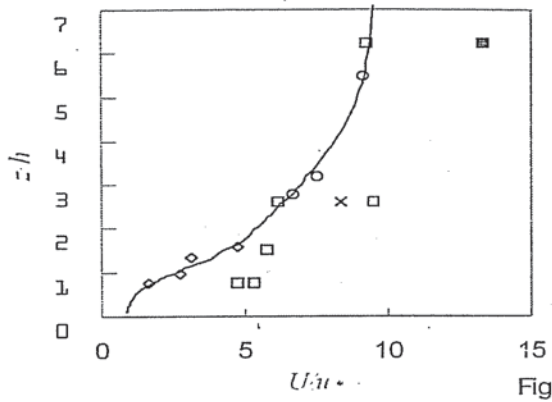
Các phương trình của mô hình được biến đổi theo tọa độ và sau đó được rời rạc hoá bằng phương pháp thể tích hữu hạn. Trong sơ đồ sai phân, ba thành phần vận tốc được tính tại các mặt của một thể tích kiểm tra có dạng một khối lập phương trong khi đó áp suất, nhiệt độ thế vị và tỷ lệ xáo trộn hơi nước được tính tại trung tâm của thể tích kiểm tra.

Mô hình đã sử dụng giả thiết áp suất thuỷ tĩnh. Về sai phân thời gian, sơ đồ bán ẩn ADI đã được sử dụng. Vì rằng các đặc tính của trường gió, nhiệt độ, độ ẩm biến đổi rất nhanh gần bề mặt nên một lưới rất tinh đã được sử dụng gần bề mặt. Càng lên cao, lưới càng trở nên thô hơn.

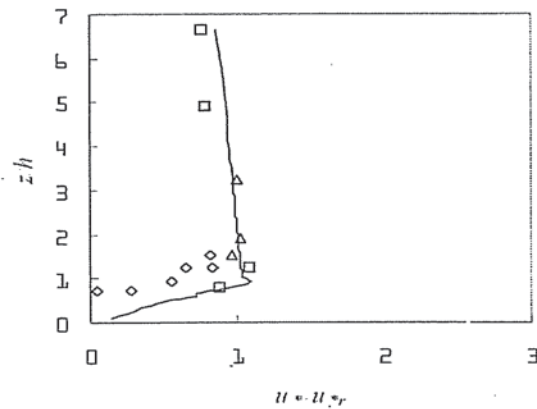
c. Kết quả kiểm chứng mô hình

Để kiểm chứng mô hình, các số liệu quan trắc hiện trường về trường tốc độ gió và các đặc trưng trao đổi rối do Clarke và cộng sự (1982), Hogstrom (1982), Rotach (1991, 1993a, 1993b), Roth (1993) và Roth và Oke (1993), Oikawa và Meng (1995) đã được sử dụng.

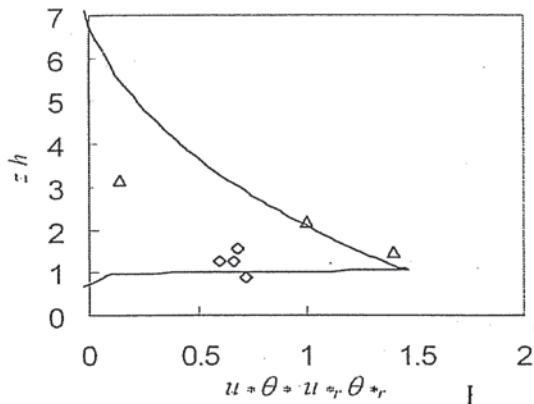
Hình 3 trình bày kết quả tính vận tốc gió trung bình (đường liền) so với các số liệu đo đạc. Ta có thể thấy kết quả tính toán của mô hình khá phù hợp với kết quả quan trắc.



Hình 3. So sánh vận tốc gió trung bình quan trắc và tính toán



Hình 4. So sánh vận tốc ma sát quan trắc và tính toán

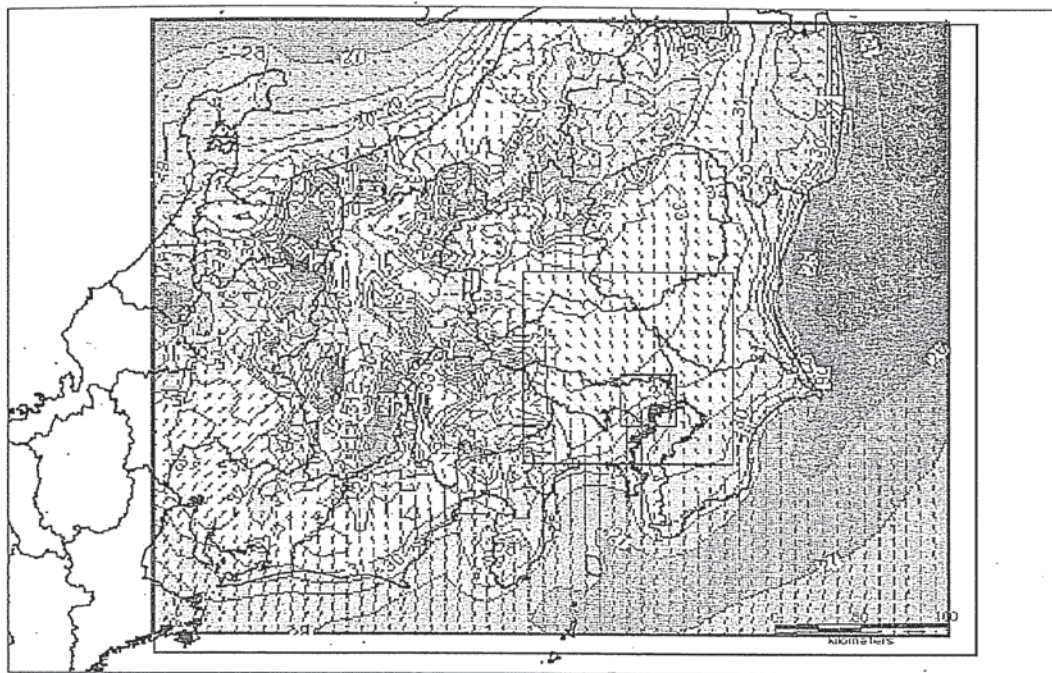


Hình 5. So sánh dòng thông lượng nhiệt quan trắc và tính toán

Các hình 4 và 5 cho ta so sánh kết quả dòng thông lượng động năng quan trắc và tính toán. Ta có thể thấy kết quả tính toán khá phù hợp với quan trắc.

Mô hình đã được áp dụng để tính toán mô phỏng cho một ngày nắng nóng tại miền Đông Nhật Bản.

Kết quả tính toán cho thấy mô hình đã mô phỏng được hiện tượng dịch chuyển của tâm nóng từ thủ đô Tokyo lên miền phía bắc thủ đô (Saitama, Gunma và Chiba) vào buổi trưa và hiện tượng đảo nhiệt tại trung tâm thủ đô vào nửa đêm thể hiện trên các hình 6 và 7. Kết quả này rất phù hợp với số liệu quan trắc.



Hình 6. Sự dịch chuyển tâm nóng lên phía bắc Thủ đô Tokyo vào buổi trưa



Hình 7. Đảo nhiệt tại Tokyo vào nửa đêm

Các kết quả kiểm chứng của mô hình cho thấy với điều kiện số liệu đầy đủ như ở Nhật bản, kết quả dự báo trường nhiệt độ không khí cho những ngày đẹp trời có sai số trong khoảng

1,5°C. Vì tính tới rất nhiều yếu tố ảnh hưởng nên mô hình có thể được áp dụng để dự báo sự thay đổi khí hậu quy mô vừa do ảnh hưởng của hoạt động của con người.

Tài liệu tham khảo

1. Asaeda, T. and Vu, T. C. , 'The Subsurface Transport of Heat and Moisture and its Effects on the Environment: a Numerical Model', *Boundary-Layer Meteorol.*, 65, 159-179, 1993. Ashie, Y., Vu, T.C. and Asaeda T.: 'Building Canopy Model for the Analysis of Urban Climate', *J. Wind Eng. Indust. Aero.*, 81, 237-248.
3. Craspite, G.H., Rotstein, E. and Whitaker, S. 'A General Closure Scheme for the Method of Volume Averaging', *Chem. Eng. Sci.*, 41 (2), pp.227-235, 1986
4. Dyer, A.J. and Hicks, B.B. 'Flux-Gradient Relationships in the Constant Flux Layer', *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 96, 715-721, 1970.
5. Garrat, J.R. and Hicks, B.B. 'Momentum, Heat and Water Vapor Transfer to and from Natural and Artificial Surfaces', *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 99, 680-687, 1973.
6. Hiraoka, H., Maruyama, T., Nakamura, Y. and Katsura, J. 'A Study on Modelling of Turbulent Flows within Plant and Urban Canopies. Formalization of Turbulence Model (Part 1)', *J. Archit. Plann. Eng.*, AIJ, No. 406, 1-9, 1989.
7. Hiraoka, H. 'An Examination of Reproducibility of Leipzig Wind Profile by Means of Turbulence Model with ϵ Equation'. *J. Archit. Plann. Eng.*, AIJ, No. 525, 53-58, 1999.
8. Hogstrom, U., Taesler, R., Karlsson, S. Enger, L. and Smedman-Hogstrom A-S. 'The Uppsala Urban Meteorology Project'. *Boundary Layer Meteorol.*, 15, 69-80, 1978.
9. Hogstrom, U., Berstrom, H. and Alexanderson, H. 'Turbulence Characteristics in a Near Neutral Stratified Urban Atmosphere'. *Boundary Layer Meteorol.*, 23, 449-472.
10. Kimura, F. and Arakawa, S. 'A Numerical Experiment in the Nocturnal Low Level Jet over the Kanto Plain', *J. Meteorol. Soc. Japan*, 61 (6), 848-86, 1982, 1983.
11. Launder, B. E. 'On the Effects of a Gravitational Field on the Turbulent Transport of Heat and Momentum', *J. Fluid Mech.*, 67, pp.569-581, 1975.
12. Oikawa, S., and Meng, Y. 'Turbulence Characteristics and Organized Motion in a Suburban Roughness Sublayer', *Boundary-Layer Meteorol.*, 74, 289-312, 1995.
13. Oke, T.R. 'The Energetic Basis of Urban Heat Island', *Quart. J. Roy. Met. Soc.*, 108, 1-24, 1982.
14. Oke, T.R.: 'The Urban Energy Balance'. *Progress in Physical Geography*, 12, 471-508, 1988.
15. Oke, T.R., Johnson, G.T., D.G. Steyn, and Watson I.D. Simulation of Surface Urban Heat Islands under 'Ideal' Conditions at Night. Part 2: Diagnosis of Causation'. *Boundary-Layer Meteorol.*, 56, 339-358, 1991.

16. Rotach M.W.: 'Turbulence within and above an Urban Canopy', ETH Diss. 9439, 240pp., Published as ZGS, Heft 45, Verlag vdf, Zurich 1991.
17. Rotach M.W. 'Turbulence Close to a Rough Urban Surface. Part I: Reynolds Stress'. *Boundary-Layer Meteorol.*, 65, 1-28, 1993a.
18. Rotach, M.W. 'Turbulence Close to a Rough Urban Surface. Part II: Variances and Gradients'. *Boundary-Layer Meteorol.*, 65, 1-28, 1993b.
19. Rotach, M.W. Profiles of Turbulence Statistics in and above an Urban Street Canyon *Atmos. Env.*, 29, 1473-1486, 1995.
20. Roth, M. 'Turbulent Transfer Characteristics over a Suburban Surface', PhD Thesis, The University of British Columbia, Vancouver, Canada, 1991.
21. Roth, M. 'Turbulent Transfer Relationships over an Urban Surface. II: Integral Characteristics', *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, 119, 1071-1104, 1993.
22. Roth, M. 'Review of Atmospheric Turbulence over Cities', *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, 126, 941-990, 2000.
23. Roth, M. and Oke, T. 'Turbulent Transfer Relationships over an Urban Surface. I: Spectral Statistics'. *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, 119, 1071-1104, 1993.
24. Vu, T. C., Asaeda, T. and Ashie, Y. 'Development of a Numerical Model for the Evaluation of the Urban Thermal Environment', *J. Wind Eng. and Industr. Aero.*, 81, 181-196, 1999.
25. Yamada, T. 'The Critical Richardson Number and the Ratio of the Eddy Transport Coefficients Obtained from a Turbulence Closure Model', *J. Atmos. Sci.*, 32, 926-933, 1975.
26. Yamada, T. 'Simulations of Nocturnal Drainage Flows by a q2l Turbulence Closure Model', *J. Atmos. Sci.*, 40, pp.91-106, 1983.
27. Yamada, T. and Bunker, S. 'Development of a Nested Grid, Second-moment Turbulence Closure Model and Application to the 1982 ASCOT Brush Creek Simulation', *J. Appl. Meteorol.*, 27, 562-578, 1988.
28. Yamada, T. and Bunker, S. 'A Numerical Study of Nocturnal Drainage Flows with Strong Wind and Temperature Gradients', *J. Appl. Meteorol.*, 28, 545-554, 1989.