第4章 入力值

オフラインモデルである ATM に入力する大気場は、気象庁の GPV フォーマットである NuSDaS で Table E.4 に示す要素が必要である。ここでは、数値予報 GPV から変換する方法と理想大気を作成する方法を記述する。いずれも ATM 計算を行う前に GPV 前処理で作成する(Figure B.1)。

4.1 数値予報 GPV から変換

気象庁数値予報ルーチンで現在出力されている、GSM の対流圏と成層圏の気圧面 GPV(以下、全球気圧面 GPV)と MSM と LFM の鉛直高解像度 GPV(以下、メソ/局地鉛直高解像度 GPV)の場合を例に、ATM 計算に必要な 各要素へ変換する方法を述べる。元の GPV の諸元を Table 4.1 に示す。これらは、付録 A に示すディレクトリツ

Table 4.1 Specifications of JMA-NWP GPVs used in the ATM calculations (as of October 2020)

NWP-GPV	GSM (upper)	GSM (lower)	MSM	LFM	
Vertical plane	p-level		Vertical high resolution z-level		
Forecast time	132 h (00, 06, 18 UTC)		51 h (03, 06, 09,	10 h (hourly)	
	264 h (12 UTC)		15, 18, 21 UTC)		
			39 h (00, 12 UTC)		
Temporal resolution	6 h	3 h (FT= 0-132)	1 h		
		6 h (FT=138-264)			
Forecast domain	Global		Japan and its surroundings		
Output resolution	2.50°	0.50°	5 km	2 km	
Output levels*	28 + 1	21 +1	76 +1	58 + 1	
Input elements [†]	out elements [†] U, V, OMG, Z, T, RH, CWC [‡] , PHI [§] , P [¶]		U, V, W, P, T, Dens, QV, QC, QI, SMQR,		
			SMQS, SMQG, ZS, S	L [§] , FLAT [§] , FLON [§]	
Vertical plane	Surface				
Forecast time	Same as above				
Temporal resolution	Temporal resolution 3 h (FT= 0-132)				
	6 h (FT=138-264)				
Forecast domain	Global				
Output resolution	0.25°				
Output levels	1				
Input elements [†]	U, V, T, RH, RAIN				

^{*} Each level is shown in Table 4.2.

[†] CWC: Cloud water content (including ice), Dens: Air density, FLAT: Latitude of grid, FLON: Longitude of grid, OMG: Vertical p-velocity, P: Air pressure, PHI: Geopotential, QC: Mixing ratio (cloud water), QI: Mixing ratio (cloud ice), QV: Specific humidity, RAIN: Accumulated precipitation (total), RH: Relative humidity, SL: Land coverage rate, SMQG: Accumulated precipitation (graupel), SMQR: Accumulated precipitation (rain), SMQS: Accumulated precipitation (snow), T: Air temperature, U: x-wind speed, V: y-wind speed, W: Vertical wind speed, Z: Geopotential height, ZS: Terrain height of the model.

[‡] Only lower GPV ($\geq 100 \text{ hPa}$).

[§] Without atmospheric levels (only initial time).

 $[\]P$ Without atmospheric levels.

リーの Ef_lwr1 と Mf_vhrc にあるモジュールにより各々前処理変換される。

4.1.1 座標

(1) 緯度·経度

格子点の緯度(NuSDaS 要素名: FLAT)および経度(FLON)は、単位を度(°)として、地表面(SURF)の格子点のみに格納する。時間変化しないので、格納するのは初期時刻のみである。

全球気圧面 GPV の場合、経緯度座標(NuSDaS 種別 1 の 2 次元座標名:LL)であるので、水平格子点 (i,j) における経度 $0^{\circ} \le \lambda \le 360^{\circ}$ 、緯度 $-90^{\circ} \le \varphi \le 90^{\circ}$ は、x,y 方向の格子間隔 D_x,D_y $[^{\circ}] > 0$ 、基準点の xy-座標(格子番号) (i_0,j_0) およびその経度・緯度 λ_0,φ_0 $[^{\circ}]$ の格子情報から、

$$\lambda = \lambda_0 + (i - i_0)D_x \tag{4.1}$$

$$\varphi = \varphi_0 - (j - j_0)D_y \tag{4.2}$$

で求めて格納する 1 。さらに本初子午線をまたぐ ATM 計算に対応するため、東西格子数は元の GPV より一つ増やして 360° を設け、経度 0° の各要素と同じ値を格納している。

メソ/局地鉛直高解像度 GPV の場合、ランベルト正角円錐図法(LM)であり、各格子点の緯度・経度は元の GPV にあるので、そのまま格納する。

(2) 高度

高度(NuSDaS 要素名: Z)は、SURF にモデル標高を格納し、大気層²に各格子点の値を海抜(単位: m asl)で格納する。元の GPV の鉛直座標が気圧座標の場合は格子点の高度は時間変化するので毎時刻格納するのに対し、元々高度座標の場合は時間変化しないので初期時刻のみ格納する。

全球気圧面 GPV の場合、気圧座標(NuSDaS 種別 1 の 3 次元座標名: PP)であり、各格子点の(ジオポテンシャル)高度が元の GPV にあるので、その値を海抜高度として格納する。

メソ/局地鉛直高解像度 GPV の場合、鉛直ハイブリッド座標(ZS)であるので、鉛直格子点 3k における高度 z [m asl] への変換は次式を用いる(石田, 2008)。

$$z = \zeta_k + z_s f(\zeta_k) \tag{4.3}$$

ここで ζ_k はモデルの鉛直座標値面、 $f(\zeta_k)$ は座標変換関数でいずれも元の GPV の補助管理情報にあり、 z_s は以下で述べるモデル標高である。

モデル標高

全球気圧面 GPV の場合、地表面におけるジオポテンシャル Φ を g で割ったジオポテンシャル高度

$$z_{\rm s} = \frac{\Phi}{g} \tag{4.4}$$

をモデル標高として格納する。

メソ/局地鉛直高解像度 GPV の場合、元の GPV にある標高をそのまま格納する。

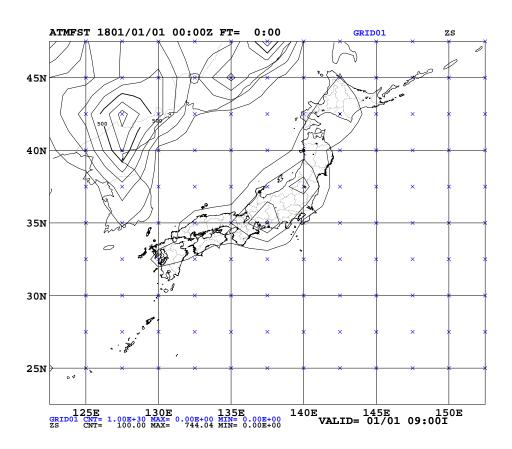
各モデルの水平格子点の分布とモデル標高を Figure 4.1 に、各鉛直面の高度を Table 4.2 に示す。ただし Figure 4.1 (c), (d) のメソ/局地鉛直高解像度 GPV の水平格子点は 10 点ずつ間引いて図示しており、Table 4.2 の全球気圧面 GPV の高度は標準大気を仮定した参考値である。

 $^{^{1}}$ (4.2) 式に負号が付いているのは、NuSDaS は y 軸を北から南向きに取って格納するためである。ATM 計算では、緯度・経度も含め、NuSDaS から読んだ GPV はまず y 軸を南から北向きに入替え($j \to j_{\max} - j + 1$, j_{\max} は南北格子数)してから使用している。

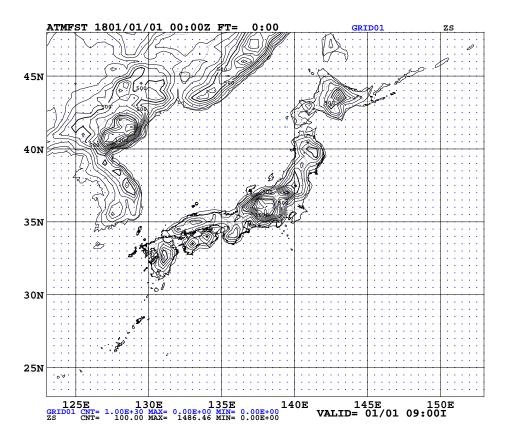
 $^{^2}$ Table 4.2 に示す面の名前が、1(大気最下層)、2、3、...、NZ_GPV の層のこと。NZ_GPV は地表面(SURF)を除く GPV の層数で現在、全球気圧面(成層圏)GPV が 28、全球気圧面(対流圏)GPV が 21、メソ鉛直高解像度 GPV が 76、局地鉛直高解像度 GPV が 58。なお鉛直層数を表す ATM の変数 nz_gpv は、SURF を 1 から数えるため、面の名前とは $nz_gpv = NZ_GPV + 1$ の関係にあることに注意。 3 フルレベル(例えば、原、2008)。

Table 4.2 Standard altitude of vertical planes. Altitudes of GSM is geopotential heights (NOAA et al., 1976) and those of MSM and LFM are full-level heights above sea. (as of October 2020)

Plane	GSM	(upper)	GSM	(lower)	MSM	LFM
name	Pressure [hPa]	Altitude [gpm]	Pressure [hPa]	Altitude [gpm]	Altitude [m asl]	Altitude [m asl]
76		ior 1		ĮO. 1	21475.92	
75					20831.88	
74					20200.05	
73 72					19580.33 18972.61	
71					18376.78	
70					17792.74	
69					17220.39	
68					16659.62	
67					16110.34	
66					15572.42	
65					15045.78 14530.30	
63					14025.88	
62					13532.42	
61					13049.81	
60					12577.95	
59					12116.73	
58					11666.05	19858.75
57 56					11225.81 10795.90	19202.75 18557.75
55					10795.90	17923.75
54					9966.66	17300.75
53					9567.12	16688.75
52					9177.49	16087.75
51					8797.68	15497.75
50					8427.57	14918.75
49					8067.06	14350.75
48 47					7716.04 7374.42	13793.75 13247.75
46					7042.09	13247.75
45					6718.95	12188.75
44					6404.88	11675.75
43					6099.79	11173.75
42					5803.57	10682.75
41					5516.11	10202.75
40					5237.32	9733.75
39					4967.09 4705.32	9275.75 8828.75
37					4451.89	8392.75
36					4206.71	7967.75
35					3969.67	7553.75
34					3740.67	7150.75
33					3519.60	6758.75
32					3306.36 3100.84	6377.75
31 30					2902.94	6007.75 5648.75
29					2712.56	5300.75
28	0.01	79302.63			2529.60	4963.75
27	0.03	72724.69			2353.93	4637.75
26	0.05	69514.94			2185.48	4322.75
25	0.07	67329.92			2024.12	4018.75
24	0.10	64946.95			1869.75	3725.75
23 22	0.20	60111.94 57153.66			1722.28 1581.59	3443.75 3172.75
21	0.50	53283.96	10.00	31054.64	1447.58	2912.75
20	0.70	50645.75	20.00	26481.22	1320.15	2663.75
19	1.00	47820.08	30.00	23848.65	1199.19	2425.75
18	2.00	42439.85	50.00	20576.17	1084.61	2198.75
17	3.00	39429.49	70.00	18441.62	976.28	1982.75
16	5.00	35776.55	100.00	16179.72	874.12	1777.75
15 14	7.00 10.00	33444.40 31054.64	150.00 200.00	13608.42 11784.05	778.01 687.86	1583.75 1400.75
13	20.00	26481.22	250.00	10362.95	603.55	1228.75
12	30.00	23848.65	300.00	9163.96	524.99	1067.75
11	50.00	20576.17	400.00	7185.44	452.06	917.75
10	70.00	18441.62	500.00	5574.44	384.67	778.75
9	100.00	16179.72	600.00	4206.43	322.71	650.75
8	150.00	13608.42	700.00	3012.18	266.07	533.75
7	200.00 250.00	11784.05	800.00	1948.99 1457.30	214.66	427.75
<u>6</u> 5	300.00	10362.95 9163.96	850.00 900.00	988.50	168.36 127.08	332.75 248.75
$\frac{3}{4}$	500.00	5574.44	925.00	761.97	90.71	175.75
3	700.00	3012.18	950.00	540.34	59.14	113.75
2	850.00	1457.30	975.00	323.38	32.27	62.75
1	1000.00	110.88	1000.00	110.88	10.00	20.00
SURF	P(SURF)	PHI/G	P(SURF)	PHI/G	ZS	ZS

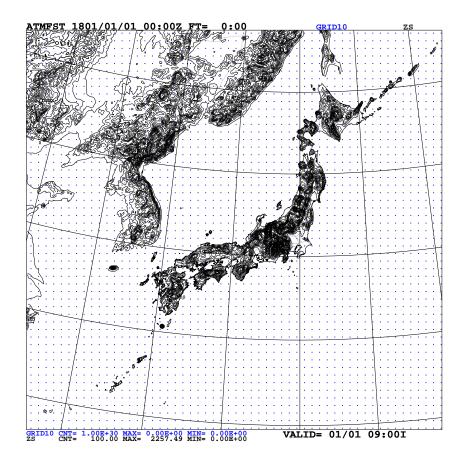


(a) GSM (upper: Ef_UPR1)

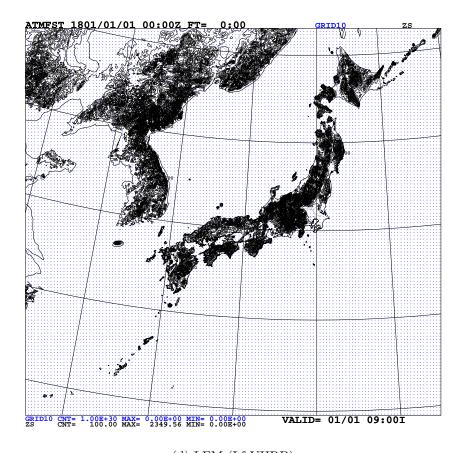


(b) GSM (lower: Ef_LWR1)

Figure 4.1 Horizontal grid points and modeled terrain (Japan and its surrounding area)



(c) MSM (Mf_VHRC)



(d) LFM (Lf_-VHRB)

Figure 4.1 (Continued) The grid points of Figures (c) and (d) are thinning out one-tenth.

4.1.2 風

(1) 水平風

水平風は、東西風(NuSDaS 要素名: UU)と南北風(VV)の2成分を [m/s] 単位で格納する。

変換前の元の数値予報 GPV の水平風は、各数値予報モデルで定義されている水平座標系の x,y 成分である。全球 気圧面 GPV の場合は LL 座標系であり x 成分と東西成分、y 成分と南北成分は一致しているので、東西・南北風をそのまま Table 4.2 の大気層に格納する 4 。

メソ/局地鉛直高解像度 GPV の場合、標準経度 $\lambda_0=140^\circ$ E、標準緯度 $\varphi_1=30^\circ$ N, $\varphi_2=60^\circ$ N の LM 座標系であるので、その風ベクトル (U_x,V_y) を次式で時計回りに回転させた東西・南北風 (U,V) に戻して格納する 5 。

$$\begin{pmatrix} U \\ V \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} U_x \\ V_y \end{pmatrix} \tag{4.5}$$

ただし経度 λ [°E] における回転角は、

$$\theta = \alpha \left(\lambda - \lambda_0\right), \quad \alpha = \frac{\ln \cos \varphi_1 - \ln \cos \varphi_2}{\ln \tan \left(45^\circ - \varphi_1/2\right) - \ln \tan \left(45^\circ - \varphi_2/2\right)} \approx 0.716 \tag{4.6}$$

である。

(2) 鉛直風

鉛直風(NuSDaS 要素名: W)は $[\operatorname{m/s}]$ 単位で大気層に格納する(SURF はゼロ)。

全球気圧面 GPV の場合、元の GPV にある上昇流(鉛直 p 速度) ω から静力学平衡を仮定して求めた鉛直風

$$W = -\frac{\omega}{\rho_{\rm a} g} \tag{4.7}$$

を格納する。ただし $\rho_{\rm a}$ は第 4.1.5 項の空気密度である。

メソ/局地鉛直高解像度 GPV の場合、元の GPV にある鉛直速度をそのまま格納する。

なお、元の GPV の鉛直速度はいずれも瞬時値であり、特に ATM 計算における地表面付近の瞬間的に強い上昇流を緩和するために、前処理変換では水平 9 格子平均や大気最下層は地表に沿う調節機能を設けている(Table D.2)。鉛直調節しない場合と水平 9 格子平均した場合の例を Figure 4.2 に示す。鉛直調節した場合、この事例では極値で約20 % 平滑化されている。

4.1.3 気圧

気圧(NuSDaS 要素名:P)は [hPa] 単位で SURF を含む全層に格納する。ただし元の GPV が気圧座標の場合は、SURF を除く格子点の気圧は時間変化しないので大気層は初期時刻のみ格納する。

全球気圧面 GPV の場合、SURF を除く大気層は等圧面なので、上述のとおり、初期時刻のみ大気各層の水平格子点すべてに同値を格納する(SURF の地上気圧は予報時刻ごとに格納する)。

メソ/局地鉛直高解像度 GPV の場合、元の GPV にある気圧をそのまま格納する。

4.1.4 気温

気温(NuSDaS 要素名:T)は [K] 単位で SURF を含む全層に格納する。

全球気圧面 GPV、メソ/局地鉛直高解像度 GPV のいずれも元の GPV にある気温をそのまま格納する。

^{- 4}地表面(SURF)については、Table 4.1 の地上 GPV の水平風を気圧面 GPV と同じ水平格子に間引いて格納する。気温、空気密度の計算に必要な相対湿度および時間降水量についても同様。

 $^{^5}$ 本章の大気場の各要素は、第 2.1 節の平均場であるが、本章では特に強調しない限り平均を表す $\overline{U},\overline{V}$ などの記号は省略する。

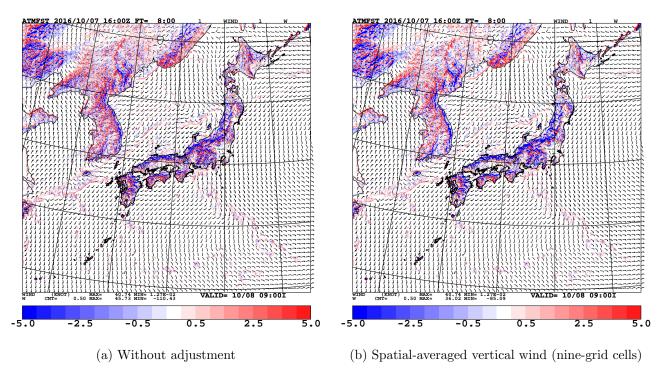


Figure 4.2 Examples of horizontal and vertical wind [cm/s] by LFM-GPV (The lowest atmospheric level at 00 UTC on 08 from initial time of 16 UTC on 07 October 2016).

空気密度 4.1.5

空気密度(NuSDaS 要素名: Dens)は [kg/m³] 単位で SURF を含む全層に格納する。 全球気圧面 GPV の場合、各格子点の相対湿度 r があるので、まず同格子の水蒸気圧

$$e = re_{\rm s} \tag{4.8}$$

を求める。ここで $e_{\rm s}[{
m hPa}]$ は、各格子点の気温 $T'[{
m ^{\circ}C}]\equiv T[{
m K}]-273.15$ から、テテンの式 6

うる。ここで
$$e_{\rm s}[{\rm hPa}]$$
 は、各格子点の気温 $T'[{}^{\circ}{\rm C}] \equiv T[{\rm K}] - 273.15 \, {\it h}$ ら、テテンの式⁶
$$e_{\rm s} = \begin{cases} 6.11 \times 10^{7.5T'/(T'+237.3)} & (T' \geqslant 0.0 \, {}^{\circ}{\rm C}) \\ 6.11 \times \left[10^{7.5T'/(T'+237.3)} \times \frac{15.0 + T'}{15.0} - 10^{9.5T'/(T'+265.5)} \times \frac{T'}{15.0} \right] & (-15.0 < T' < 0.0 \, {}^{\circ}{\rm C}) \\ 6.11 \times 10^{9.5T'/(T'+265.5)} & (T' \leqslant -15 \, {}^{\circ}{\rm C}) \end{cases}$$
 (4.9)

により求めた飽和水蒸気圧である(式中の定数係数の設定は Table C.3)。次に各格子点の気圧 p と (4.8) 式の e から 比湿

$$q_{\rm v} = \frac{\varepsilon e}{p - (1 - \varepsilon)e} \quad \left(\varepsilon \equiv \frac{R_{\rm d}}{R_{\rm v}} \approx 0.622, R_{\rm d} = 287.05 \text{ J/kg.K}, R_{\rm v} = 461.5 \text{ J/kg.K}\right)$$
(4.10)

を求める。さらに気温 T を (4.10) 式の $q_{
m v}$ を用いて仮温度

$$T_{\rm v} = T \left(1 + \frac{1 - \varepsilon}{\varepsilon} q_{\rm v} \right) \approx T \left(1 + 0.608 q_{\rm v} \right)$$
 (4.11)

に変換し、空気密度 ρ_a を状態方程式

$$\rho_{\rm a} = \frac{p}{R_{\rm d}T_{\rm c}} \tag{4.12}$$

から求めて格納する。

メソ/局地鉛直高解像度 GPV の場合、大気層の空気密度は元の GPV にあるのでそのまま格納する。SURF につ いては、大気最下層と同じ値を仮定して格納する。

 $^{^6}$ 数値予報標準ライブラリ libnwp (例えば、原 (2017b), 豊田・他 (2019) で使用)と同様に、液相と固相を按分している。

4.1.6 乱流拡散係数

物質(トレーサー)の乱流拡散係数は、同じスカラー量である熱の乱流拡散係数(NuSDaS 要素名: EDDYKH)と同等と仮定 7 し、鉛直拡散係数(単位: m^2/s)を大気層に格納 8 する(SURF はゼロ)。鉛直拡散係数は、全格子点を定数に設定しない場合、まず地表面からの高さ z' ($\equiv z-z_\mathrm{s}$) における混合距離を

$$l = \frac{\kappa z'}{1 + \kappa z'/l_0} \quad (\kappa : カルマン定数)$$
 (4.13)

で内挿する(Blackadar, 1962)。ただし上空で漸近する混合距離は、さらに自由大気中、大気境界層内の最大混合距離をそれぞれ $l_{\rm FA}, l_{\rm PBL}$ 、大気境界層の高さを $h_{\rm PBL}$ として、

$$l_{0} = \begin{cases} l_{\text{FA}} + (l_{\text{PBL}} - l_{\text{FA}}) \exp\left(1 - \frac{z'}{h_{\text{PBL}}}\right) & (z' > h_{\text{PBL}}) \\ l_{\text{PBL}} & (z' \leq h_{\text{PBL}}) \end{cases}$$
(4.14)

で求める(Holtslag and Boville, 1993)。最大混合距離および大気境界層の高さは、RATM で使用されていた $l_{\rm FA}=30~{\rm m},\,l_{\rm PBL}=100~{\rm m},\,h_{\rm PBL}=1000~{\rm m}$ に設定している(Table D.3)。そして水平風、気圧、気温、比湿 9 または乱流エネルギー(TKE)から下記の乱流モデル(例えば、平岡・田中, 1994)で推定する。

0-方程式モデルから推定する方法

乱流を特徴付ける速度を (4.13) 式の混合距離と水平風(平均風) $\overline{U_{\rm h}} = (\overline{U}, \overline{V})$ の鉛直シアーから推定し、鉛直拡散係数を次式で求める(例えば、Louis, 1979; Louis et~al., 1982)。

$$K_{\rm v} = l^2 \left| \frac{\partial \overline{U_{\rm h}}}{\partial z} \right| F_{\rm v} \left(R_{\rm f} \right)$$
 (4.15)

ここで $F_{\rm v}$ は大気安定度を表すリチャードソン数 10

$$R_f = \frac{Ri}{P_r}$$
 (Pr: 乱流プラントル数) (4.16)

$$Ri \equiv \frac{N^2}{\left|\partial \overline{U_h}/\partial z\right|^2} \quad \left(N \equiv \sqrt{\frac{\partial \ln \overline{\theta_v}}{\partial z}}g\right)$$
(4.17)

の関数であり、Mellor and Yamada (1974, 1982) のレベル 2 モデルにより与える(例えば、原・永戸, 2008; 相川, 2008)。

1-方程式モデルから推定する方法

1-方程式モデルで予報された TKE がある場合は、鉛直拡散係数を次式で求める。

$$K_{\rm v} = C_{\rm h} l \sqrt{\rm TKE}$$
 (4.18)

ここでバルク係数は、

$$C_{\rm h} = \frac{C_{\rm m}}{\rm Pr} \tag{4.19}$$

$$C_{\rm m} = \begin{cases} 0.1 & (z' > h_{\rm PBL}) \\ 0.2 & (z' \le h_{\rm PBL}) \end{cases}$$
 (4.20)

⁷乱流ルイス数が1に等しいとすることに相当する。

 $^{^8}$ 水平拡散係数は GPV 前処理では求めず、ATM 本体で計算する(第 2.2.2 項 (1))。

 $^{^9}$ 比湿 $q_{
m v}$ から仮温位 $\theta_{
m v}$ は、(4.11) 式の仮温度 $T_{
m v}$ を用いて、 $\theta_{
m v}=T_{
m v}/\Pi$ ($\Pi\equiv (p/p_{00})^{R_{
m d}/C_{
m p}},\,R_{
m d}/C_{
m p}=2/7$) で求める。ただし p_{00} (= 1000 hPa) は基準気圧。

 $^{^{10}}$ 水蒸気を考慮するため、温位の代わりに仮温位 $\theta_{\rm v}$ を用いている。また、水平風の鉛直シアに $\min\left|\partial\overline{U_{\rm h}}/\partial z\right|=1\times 10^{-2}~{
m /s}$ を設けている。なお、乱流プラントル数は熱に対する運動量の乱流拡散係数の比を決める((4.19) 式参照)。

を用いる (原・永戸, 2008)。

(4.15) 式または (4.18) 式のいずれかで推定する場合の乱流プラントル数は、GATM で使用されていた $\Pr=1.00$ に設定している 11 。また鉛直拡散係数は、RATM(Kawai, 2002)と同様に $K_{\rm v} \leqslant 50~{\rm m}^2/{\rm s}$ の上限値を設けている (Table D.3)。各方法で推定した鉛直拡散係数の例を Figure 4.3 に示す。

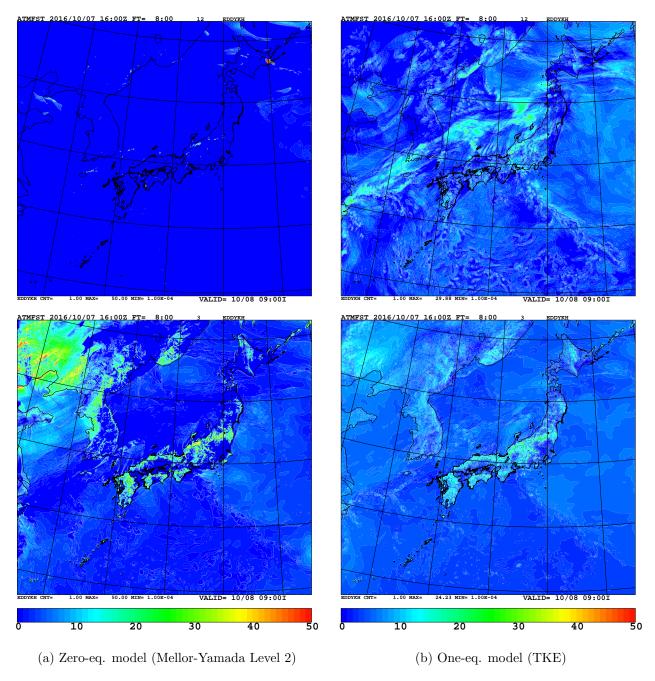


Figure 4.3 Examples of vertical diffusion coefficient [m²/s] by LFM-GPV (The 12th (upper) and 3rd (lower) atmospheric levels at 00 UTC on 08 from initial time of 16 UTC on 07 October 2016).

4.1.7 地表面

(1) 海陸比

海陸比 (NuSDaS 要素名 : SL) は、地表面格子において、完全に海面の状態をゼロとして陸地が占める割合を SURF に格納する。

全球気圧面 GPV の場合、元の GPV に海陸比がないので、(4.4) 式が正の場合を 1、それ以外は 0 の二値を格納 する。

メソ/局地鉛直高解像度 GPV の場合、元の GPV に海陸比があるのでそのまま格納する。

(2) 空気力学的抵抗

地表面に近い接地層における空気力学的抵抗(NuSDaS 要素名: ra)は [s/m] 単位で SURF に格納する。空気力学的抵抗は、全地点を定数に設定しない場合、大気境界層の水平風速 $U_h (\equiv |\overline{U_h}|)$ から接地層の安定度は中立と仮定して

$$r_{\rm a} = \frac{1}{\kappa u_*} \ln \frac{z' - d}{z_0} \tag{4.21}$$

$$u_* = \kappa U_{\rm h} / \ln \frac{z' - d}{z_0} \tag{4.22}$$

で求める(Kitada et~al., 1986)。ただし各地点の粗度長 z_0 とゼロ面変位 d は、海陸比が 0.5 以上の陸上は植生に応じて Table E.1.1 を参照し、海上では海面水温(SST)から海水と海氷で粗度長 12 を変えゼロ面変位はなしに設定している。植生と SST の分布は Tables E.1.2, E.1.3 を参照するが、全球気圧面 GPV、メソ/局地鉛直高解像度 GPV とは座標系が異なるため、数値予報 GPV の初期時刻と同じ月の気候値について、各地点の最近接の値を取る 13 。また空気力学的抵抗の逆数は、RATM で設定されていた乾性沈着速度 $r_a^{-1} \leq 0.3$ m/s の上限を設けている(Table D.4)。

4.1.8 雲

(1) 雲水量

雲水量(NuSDaS 要素名: CWC)は、単位体積あたりの氷相も含む水物質量(単位: kg/m^3)を大気層に格納する。 全球気圧面 GPV の場合、氷相も含む水物質量 q_c [kg/kg] があれば、(4.12) 式で求めた空気密度 ρ_a [kg/m^3] を掛けた

$$CWC = \rho_{a}q_{c} \tag{4.23}$$

を、雲水量 CWC [kg/m³] として格納する。

メソ/局地鉛直高解像度 GPV の場合、湿潤空気(乾燥空気と水蒸気)の密度 $\rho_{\rm d}+\rho_{\rm v}$ (= $\rho_{\rm a}$) に対する雲水、雲氷の密度 LWC, IWC の比 14 $q_{\rm w}\equiv$ LWC/ $(\rho_{\rm d}+\rho_{\rm v})$, $q_{\rm i}\equiv$ IWC/ $(\rho_{\rm d}+\rho_{\rm v})$ があるので、雲水量は (4.23) 式と同様に両形態の和として、

$$CWC = LWC + IWC$$

$$= (\rho_{d} + \rho_{v}) (q_{w} + q_{i})$$

$$= \frac{p}{R_{d}T_{v}} (q_{w} + q_{i})$$

$$(4.24)$$

を格納する。ただし (4.24) 式の右辺第 2 式から第 3 式へは湿潤空気の状態方程式 (4.12) 式を用いた。

 $^{^{12}}$ 海上の場合、 $z_0=1.52\times 10^{-4}$ m (海水:SST > SST $_{\rm i}=271.35$ K), 1.00×10^{-3} m (海氷:SST \leq SST $_{\rm i}$) に設定している。

¹³気候値は、GPV の予報時刻に時間内挿していないことに注意。

 $^{^{14}}$ 水蒸気の場合、比湿 $q_{\rm v} \equiv \rho_{\rm v}/\left(\rho_{\rm d}+\rho_{\rm v}\right)$ が定義される。

(2) 雲頂・雲底高度

雲頂(NuSDaS 要素名: CTOP)および雲底高度(CBASE)は各地点上空にある最も下層の雲について、海抜(単位: m asl)でいずれも SURF に格納する 15 。雲頂・雲底高度は、気圧、相対湿度または雲水量から下記のいずれかの方法で推定する。

気圧から推定する方法

雲頂および雲底高度に対応する気圧 p_t, p_b を設定して、各地点上空の気圧が初めて p_b より低くなった格子点の高度を雲底高度、さらに上空で初めて p_t より低くなった高度を雲頂高度と推定する 16 。

相対湿度から推定する方法

雲頂および雲底高度に対応する相対湿度 RH_t , RH_b を設定して、各地点上空の相対湿度が初めて RH_b に達した格子点の高度を雲底高度、さらに上空で初めて RH_t より下がった高度を雲頂高度と推定する 17 。

雲水量から推定する方法

雲水量のしきい値 CWC_t を設定して、各地点上空の雲水量が初めて CWC_t を超えた格子点の高度を雲底高度、さらに上空で再び CWC_t 以下になった高度を雲頂高度と推定する。

全球気圧面 GPV、メソ/局地鉛直高解像度 GPV ともに気圧から推定する方法をデフォルトとしている。 $p_{\rm t},p_{\rm b}$ などのしきい値は全領域で固定しており、Table D.5 で設定する。相対湿度または雲水量から推定した雲頂・雲底高度の例を Figure 4.4 に示す。

4.1.9 時間降水量

時間降水量(降水強度)は、雨(NuSDaS 要素名: SMQR1H)・雪(SMQS1H)・霰(SMQG1H)の形態に分けて、 $[kg/m^2]$ 単位で格納する。

全球気圧面 GPV の場合、地上 GPV に初期時刻からの積算降水量(単位: kg/m^2)があるので、前回予報時刻との差分を取り 1 時間あたりに平均した値 18 を、雪・霰とは区別せず、雨として格納する(SMQS1H と SMQG1H は格納されない)。

メソ/局地鉛直高解像度 GPV の場合、雨・雪・霰の形態別に積算降水量(単位: kg/m^2)があるので、前回予報時刻との差分を取った値を格納する。

4.2 理想大気の作成

ATM の理想実験を行う場合は、数値予報 GPV は使わずに、仮想的な鉛直 1 次元(水平一様)の理想大気を作成する。この理想大気は、Table 4.3 に例示する設定ファイルから、付録 A に示すディレクトリツリーの Ideal にあるモジュールで ATM に入力するための NuSDaS を作成する。Table 4.3 の各面の高度や要素の値は、実験の目的に応じて任意に設定することができる。

4.3 放出地点の大気プロファイル出力

第 4.1 節や第 4.2 節で変換・作成した大気場の GPV から、ATM で計算するトレーサーの放出地点における上空の

¹⁵雲がない場合、ヌル値として Table C.2 で設定する large_null を用いて、雲頂高度に小さな負値(- large_null)、雲底高度に大きな正値(large_null) を格納している。

¹⁶気圧からの推定方法では、層状性と対流性の雲の違いなどは考慮できず、雲頂・雲底高度はほぼ水平一様になる。

 $^{^{17}}$ 各地点下層から上層への探索方法では、大気中層の雲に対応する相対湿度の極大域を見逃す場合がある。

¹⁸全球地上 GPV の時間間隔は 3 または 6 時間ごと (Table 4.1)。

風、気圧、気温および空気密度を、GPV の鉛直層ごとに時空間内挿して出力する。各層の時空間内挿の方法は、第 2.4.1 項と同様に、放出地点上空で 2 次元空間内挿してから放出時刻に時間内挿する。この大気プロファイルは、付録 A に示すディレクトリツリーの Point にあるモジュールにより付録 F.1.1 に示すフォーマットでテキスト出力される。MSM の初期値を与えるメソ解析(MA)の GPV から出力した大気プロファイルの例を Figure 4.5 に示す。 大気プロファイルは、初期値(第 3 章)を作成するための入力値であるが、ATM 本体には直接入力しない。

4.4 定数データ

第 4.1.7 項 (2) で述べたように、GPV 前処理で空気力学的抵抗を求めるときに植生パラメータ(付録 E.1.1)、植生分布(付録 E.1.2)および SST の気候値(付録 E.1.3)の各定数バイナリデータを入力する。

ATM 本体に直接入力するバイナリデータは、可変データのみで NuSDaS に含まれる定数要素以外の定数データはない。

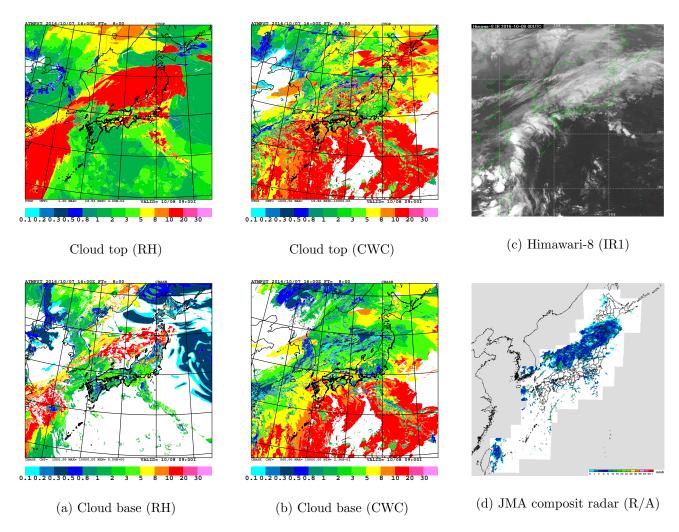


Figure 4.4 Examples of cloud top and base [km asl] by LFM-GPV (00 UTC on 08 from initial time of 16 UTC on 07 October 2016). Thresholds of (a) relative humidity $RH_t = 60 \%$, $RH_b = 80 \%$ and (b) cloud water content CWC_t is zero, respectively. In the case of estimation by atmospheric pressure ($p_t = 100 \text{ hPa}$, $p_b = 700 \text{ hPa}$), the cloud top is 16.14–17.31 km asl and the cloud base is 2.79–3.48 km asl. Observation times of (c) meteorological satellites image and (d) weather radar analysis, shown as a reference, are the same valid time of GPV.

Table 4.3 Setting example of ideal GPV

```
dens
                                                                                    cbase rain
alt
        temp
                                                                             ctop
                                                                                                  snow
    0.0 288.150 1013.25
                                        0.0d+0 0.0d+0 0.0d+0 0.0d+0 1.0d-3 1.0d+4 1.0d+3 0.0d+0 0.0d+0 0.0d+0
                              1.2250
   50.0 287.825 1007.2
                              1.2191
                                        1.0d+1 0.0d+0 0.0d+0 0.0d+0 1.0d-3
  500.0 284.900
                 954.61
                              1.1673
                                        1.0d+1 0.0d+0 0.0d+0 0.0d+0 1.0d-3
 1000.0 281.651
                 898.76
                              1.1117
                                        1.0d+1 0.0d+0 0.0d+0 0.0d+0 1.0d-3
 1500.0 278.402
                 845.59
                              1.0581
                                        1.0d+1 0.0d+0 0.0d+0 0.0d+0 1.0d-3
2000.0 275.154
                 795.01
                              1.0066
                                        1.0d+1 0.0d+0 0.0d+0 0.0d+0 1.0d-3
                              9.5695d-1 1.0d+1 0.0d+0 0.0d+0 0.0d+0 1.0d-3
 2500.0 271.906
                 746.91
3000.0 268.659
                 701.21
                              9.0925d-1 1.0d+1 0.0d+0 0.0d+0 0.0d+0 1.0d-3
3500.0 265.413
                              8.6340d-1 1.0d+1 0.0d+0 0.0d+0 0.0d+0 1.0d-3
                 657.80
                 616.60
 4000.0 262.166
                              8.1935d-1 1.0d+1 0.0d+0 0.0d+0 0.0d+0 1.0d-3
                              7.7704d-1 1.0d+1 0.0d+0 0.0d+0 0.0d+0 1.0d-3
 4500.0 258.921
                 577.52
5000.0 255.676
                              7.3643d-1 1.0d+1 0.0d+0 0.0d+0 0.0d+0 1.0d-3
 5500.0 252.431
                 505.39
                              6.9747d-1 1.0d+1 0.0d+0 0.0d+0 0.0d+0 1.0d-3
 6000.0 249.187
                 472.17
                              6.6011d-1 1.0d+1 0.0d+0 0.0d+0 0.0d+0 1.0d-3
 6500.0 245.943
                              6.2431d-1 1.0d+1 0.0d+0 0.0d+0 0.0d+0 1.0d-3
                 440.75
 7000.0 242.700
                 411.05
                              5.9002d-1 1.0d+1 0.0d+0 0.0d+0 0.0d+0 1.0d-3
7500.0 239.457
                 382.99
                              5.5719d-1 1.0d+1 0.0d+0 0.0d+0 0.0d+0 1.0d-3
8000.0 236.215
                 356.51
                              5.2579d-1 1.0d+1 0.0d+0 0.0d+0 0.0d+0 1.0d-3
8500.0 232.974
                 331.54
                              4.9576d-1 1.0d+1 0.0d+0 0.0d+0 0.0d+0 1.0d-3
9000.0 229.733
                 308.00
                              4.6706d-1 1.0d+1 0.0d+0 0.0d+0 0.0d+0 1.0d-3
9500.0 226.492
                              4.3966d-1 1.0d+1 0.0d+0 0.0d+0 0.0d+0
                 285.84
                                                                     1.0d-3
10000.0 223.252
                 264.99
                              4.1351d-1 1.0d+1 0.0d+0 0.0d+0 0.0d+0 1.0d-3
10500.0 220.013
                 245.40
                              3.8857d-1 1.0d+1 0.0d+0 0.0d+0 0.0d+0
                                                                     1.0d-3
11000.0 216.774
                 226.99
                              3.6480d-1 1.0d+1 0.0d+0 0.0d+0 0.0d+0 1.0d-3
12000.0 216.650
                              3.1194d-1 1.0d+1 0.0d+0 0.0d+0 0.0d+0 1.0d-3
                 193.99
13000.0 216.650
                 165.79
                              2.6660d-1 1.0d+1 0.0d+0 0.0d+0 0.0d+0 1.0d-3
14000.0 216.650
                              2.2786d-1 1.0d+1 0.0d+0 0.0d+0 0.0d+0 1.0d-3
                 141.70
15000.0 216.650
                 121.11
                              1.9476d-1 1.0d+1 0.0d+0 0.0d+0 0.0d+0 1.0d-3
16000.0 216.650
                 103.52
                              1.6647d-1 1.0d+1 0.0d+0 0.0d+0 0.0d+0 1.0d-3
17000.0 216.650
                  88.497
                              1.4230d-1 1.0d+1 0.0d+0 0.0d+0 0.0d+0 1.0d-3
18000.0 216.650
                  75.652
                              1.2165d-1 1.0d+1 0.0d+0 0.0d+0 0.0d+0 1.0d-3
19000.0 216.650
                  64.674
                              1.0400d-1 1.0d+1 0.0d+0 0.0d+0 0.0d+0 1.0d-3
20000.0 216.650
                  55.293
                              8.8910d-2 1.0d+1 0.0d+0 0.0d+0 0.0d+0 1.0d-3
                              7.5715d-2 1.0d+1 0.0d+0 0.0d+0 0.0d+0 1.0d-3
21000.0 217.581
                  47.289
                              6.4510d-2 1.0d+1 0.0d+0 0.0d+0 0.0d+0 1.0d-3
22000.0 218.574
                  40,475
23000.0 219.597
                              5.5006d-2 1.0d+1 0.0d+0 0.0d+0 0.0d+0 1.0d-3
                  34.668
24000.0 220.560
                              4.6938d-2 1.0d+1 0.0d+0 0.0d+0 0.0d+0 1.0d-3
                  29.717
25000.0 221.552
                  25.492
                              4.0084d-2 1.0d+1 0.0d+0 0.0d+0 0.0d+0
                                                                     1.0d-3
26000.0 222.544
                  21.883
                              3.4257d-2 1.0d+1 0.0d+0 0.0d+0 0.0d+0 1.0d-3
27000.0 223.536
                              2.9298d-2 1.0d+1 0.0d+0 0.0d+0 0.0d+0
                  18,799
                              2.5076d-2 1.0d+1 0.0d+0 0.0d+0 0.0d+0 1.0d-3
28000.0 224.527
                  16.161
29000.0 225.518
                  13.904
                              2.1478d-2 1.0d+1 0.0d+0 0.0d+0 0.0d+0 1.0d-3
30000.0 226.509
                  11.970
                              1.8410d-2 1.0d+1 0.0d+0 0.0d+0 0.0d+0 1.0d-3
31000.0 227.500
                  10.312
                              1.5792d-2 1.0d+1 0.0d+0 0.0d+0 0.0d+0 1.0d-3
32000.0 228.490
                   8.8906
                              1.3555d-2 1.0d+1 0.0d+0 0.0d+0 0.0d+0 1.0d-3
34000.0 233.743
                   6.6341
                              9.8874d-3 1.0d+1 0.0d+0 0.0d+0 0.0d+0 1.0d-3
36000.0 239.282
                   4.9852
                              7.2579d-3 1.0d+1 0.0d+0 0.0d+0 0.0d+0 1.0d-3
38000.0 244.818
40000.0 250.350
                   3,7713
                              5.3666d-3 1.0d+1 0.0d+0 0.0d+0 0.0d+0 1.0d-3 3.9957d-3 1.0d+1 0.0d+0 0.0d+0 0.0d+0 1.0d-3
                   2.8714
42000.0 255.878
                   2.1996
                              2.9948d-3 1.0d+1 0.0d+0 0.0d+0 0.0d+0 1.0d-3
44000.0 261.403
                              2.2589d-3 1.0d+1 0.0d+0 0.0d+0 0.0d+0 1.0d-3
                   1.6949
46000.0 266.925
                   1.3134
                              1.7142d-3 1.0d+1 0.0d+0 0.0d+0 0.0d+0 1.0d-3
48000.0 270.650
                              1.3167d-3 1.0d+1 0.0d+0 0.0d+0 0.0d+0 1.0d-3
50000.0 270.650
                   7.9779d-1 1.0269d-3 1.0d+1 0.0d+0 0.0d+0 0.0d+0 1.0d-3
55000.0 260.771
                   4.2525d-1 5.6810d-4 1.0d+1 0.0d+0 0.0d+0 0.0d+0 1.0d-3
60000.0 247.021
                   2.1958d-1 3.0968d-4 1.0d+1 0.0d+0 0.0d+0 0.0d+0 1.0d-3
65000.0 233.292
                   1.0929d-1 1.6321d-4 1.0d+1 0.0d+0 0.0d+0 0.0d+0 1.0d-3
70000.0 219.585
                   5.2209d-2 8.2829d-5 1.0d+1 0.0d+0 0.0d+0 0.0d+0 1.0d-3
75000.0 208.399
                   2.3881d-2 3.9921d-5 1.0d+1 0.0d+0 0.0d+0 0.0d+0 1.0d-3
80000.0 198.639
                   1.0524d-2 1.8458d-5 1.0d+1 0.0d+0 0.0d+0 0.0d+0 1.0d-3
85000.0 188.893
                   4.4568d-3 8.2196d-6 1.0d+1 0.0d+0 0.0d+0 0.0d+0 1.0d-3
```

alt: Plane altitude [m asl], temp: Air temperature [K], pres: Air pressure [hPa], dens: Air density [kg/m³], u: Eastward wind speed [m/s], v: Northward wind speed [m/s], w: Vertical wind speed [m/s], vdf: Vertical diffusion coefficient [m²/s], cwc: Cloud water content [kg/m³], ctop: Cloud top [m asl], cbase: Cloud base [m asl], rain: Precipitation intensity (rain) [mm/h], snow: Precipitation intensity (snow) [mm/h], grpl: Precipitation intensity (graupel) [mm/h]. In this example, temp, pres and dens are given by standard atmosphere (NOAA et al., 1976).

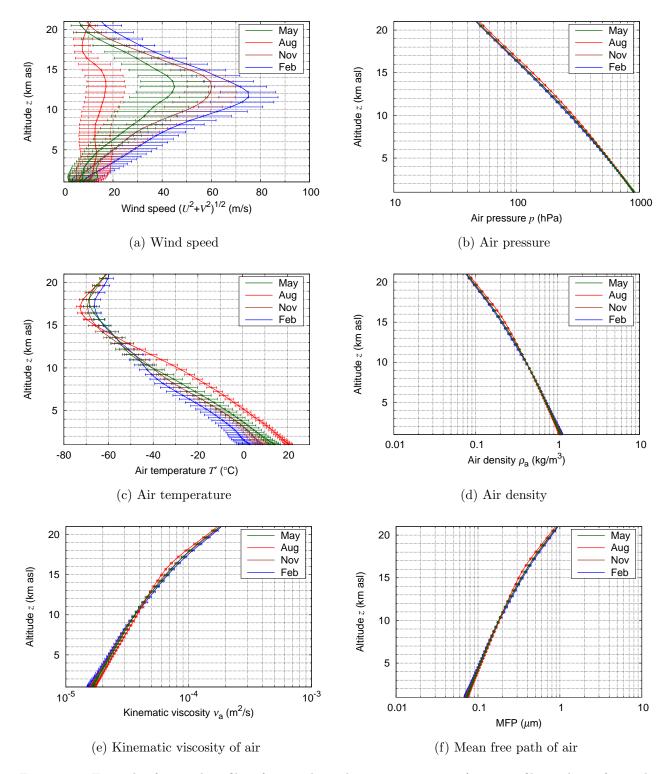


Figure 4.5 Example of vertical profiles of atmosphere above emission point (mean profiles with 1 σ form 1 km to 21 km asl). Input GPVs are three-hourly MA (initial of MSM) during May, August, November 2019 and February 2020. Emission point is set at Asosan (Table 5.3) as an example. (a) Wind speed, (b) air pressure, (c) temperature and (d) density are derived by Sections 4.1.2–4.1.5. (e) Kinematic viscosity and (f) mean free path of air are calculated by Equation (2.19) divided by air density and Equation (2.20), respectively.