中国における地表面熱収支・水収支

(2) 裸地面の顕熱・潜熱輸送量と土壌水分

Heat and Water Balances of the Ground Surface in China

(2) Sensible and Latent Heat Fluxes from the Bare Soil Surface and the Soil Water Content

近藤純正*・徐 健青** (東北大学理学部)

Junsei KONDO・Jianqing XU

Geophysical Institute, Tohoku University

Seasonal variations in the surface heat fluxes and the soil water contents for the four soil types were estimated, with the use of a soil model and the routine meteorological data of 30 stations in China. Tables of the annual mean values of the sensible and latent heat fluxes, annual potential evaporations, annual precipitations, and the soil water contents at the depths of 0.66m and 0.26m on December 31 are presented. It is found that the annual amount of evaporation and the soil water content in dry season depend on the annual amount of precipitation.

A geographic distribution of the annual means of sensible and latent heat fluxes is shown. The net radiation, which is the sum of these fluxes, is large in southern China and the Tibetan Plateau region. The sensible heat flux dominates and the latent heat flux is extremely small in desert region. In general, the net radiation for a loamy soil is larger than that for a sandy soil.

Key words: Evaporation, Heat balance of the bare soil ground, Soil water content

土壌モデルによって、中国の30地点のルーチン気象資料を用い、4種類の裸地面について地表面の熱輸送量と土壌水分の季節変化を計算した。年平均顕熱輸送量、年平均潜熱輸送量、年ポテンシャル蒸発量、年降水量、および12月31日の深さ0.66mと0.26mにおける土壌水分量の表を作成した。年蒸発量と乾期の土壌水分量の大きさは年降水量に依存することが見いだされた。

顕熱輸送量と潜熱輸送量の年平均値の地理的分布図を示した。これら熱輸送量の年平均値の和は正味放射量の年平均値に等しいわけであるが、正味放射量は中国南部とチベット高原で大きい。砂漠域では顕熱輸送量が卓越し、潜熱輸送量は非常に小さい。一般に、正味放射量はローム質土壌面のほうが砂質土壌面より大きい。

キーワード：蒸発量、土壌水分、裸地面熱収支

I. はしがき

「アジアモンスーンエネルギー・水循環研究観測計画」(GEWEX Asian Monsoon Experiment, 略称 GAME)がアジア各地で推進されている。その研究の一環として、筆者らの第1報では中国～日本について月平均放射量を表にまとめ、年平均放射量の分布図を作成した(近藤・徐, 1997a)。

この第2報では、代表的な4種類の土壌面について

中国30地点の日々の顕熱・潜熱輸送量を計算し、月平均値を表にまとめ、年平均値の地理的分布図を作成する。さらに、同時に計算された土壌水分量から、日々の変動が小さくなった12月31日の土壌水分量の一覧表を作成する。本報告は数値資料を示すものである。なお、詳細資料は近藤・徐(1997b)の図表集にあり、ポテンシャル蒸発量、気温や降水量などの気象データのほか、顕熱・潜熱輸送量、正味放射量、地温、土壌水分などの日々変化が掲載されている。

*現在、東北大学名誉教授 〒980 仙台市青葉区角五郎1-12-20

**東北大学理学部地球物理学教室 〒980-77 仙台市青葉区字青葉
Geophysical Institute, Tohoku University, Sendai 980-77, Japan

る。なお、本報告は1981年の気象資料についての計算結果である。

裸地面では、土壌が湿潤なときは水の気化は土壌のごく表面付近で生じ、蒸発量は風速、気温、大気の比湿、日射量などに支配され、土壌内の水分輸送のパラメータにほとんど無関係である。しかし、表層土壌の乾燥化が進むと水の気化は深さ0～0.05mくらいの厚さで生じるようになる。さらに乾燥化が進んだ状態では、表層土壌中の水分輸送は水蒸気によってのみ行われるようになる。この状態では、蒸発量は大気の比湿と土壌水分量に支配され、風速にはほとんど無関係となり、気温、地温、日射量への依存性が小さくなる。また、潜熱輸送量の大きさは $\pm 10 \text{ W m}^{-2}$ 程度であり、従来のいずれの方法でもフラックスは観測誤差と同程度の大きさとなり、測定はできなくなる。

それゆえ、我々は乾燥域にも適用できる新しい方法を開発し、長期の観測によって検証し、さらに熱収支・水収支の特徴を調べてきた(Kondo *et al.*, 1990; 1992; Kondo and Saigusa, 1994; 近藤, 1993a; 1993b; 1994a; 1994b; 近藤・徐, 1995; 近藤・徐・福本, 1995)。裸地面熱収支の計算方法はすでに述べられているので(近藤・徐, 1996a; 1996b; Kondo and Xu, 1997)、本報告のIV章では概要のみ説明する。

II. 記号と用語の説明

E (calculated evaporation from the soil surface) : 土壌面蒸発量の計算値

E_p (potential evaporation) : ポテンシャル蒸発量
概略的には、水深1m未満の広い水面からの蒸発量であるが、筆者らの定義では、土壌表面が熱容量の無視できる程度の薄い水面で覆われているときの日平均熱収支式から計算される蒸発量である。ただし、日々の計算を容易にするため地中伝導熱を無視した熱収支式を用いる。つまり、地表面温度の日変化がないとしたときの水面蒸発量である(近藤, 1994b; Kondo and Xu 1997)。本研究ではSoil 2に対するポテンシャル蒸発量とする。

H (sensible heat flux) : 顕熱輸送量

LE (latent heat flux) : 潜熱輸送量

P_r (corrected precipitation) : 降水量の補正值

雨量計の捕集率を考慮し、さらに降水量 $< 0.1 \text{ mm d}^{-1}$ を 0.1 mm d^{-1} に置き換えたときの補正降水量(近藤・徐, 1996b)

θ (volumetric soil water content) : 土壌の体積含

水率

$\theta_{0.26}$ (calculated soil water content at the depth of 0.26m) : 深さ0.26mにおける含水率

$\theta_{0.66}$ (calculated soil water content at the depth of 0.66m) : 深さ0.66mにおける含水率

θ_f (field capacity of the soil water) : 圃場容水量

概略的には十分な雨が降ってから24時間後の土壌の体積含水率であるが、筆者らの定義では、

$$\rho_w K(\theta_f) = 1 \text{ mm d}^{-1}$$

$$= 1.16 \times 10^{-5} \text{ kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$$

の液体水の流出を生じるような体積含水率である。ただし、 ρ_w は液体水の密度である(近藤, 1993c)。

III. 解析地点と気象データ

計算に用いる気象ルーチンデータは中国国家気象局出版社発行の「中国地面資料月報」の1981年分である。解析地点の位置などの詳細は別報(近藤・徐, 1997a; 1997b)に示されている。

IV. 計算方法

計算は地表面の熱収支過程、積雪・融雪過程、土壌内における熱と水分輸送の詳細な式を多数含んでおり、これまでの報告で詳細を示してきたので、本報告では省略する。

計算に必要なルーチン気象観測資料は、日平均気温、最高・最低気温差、日照時間、日降水量、風速の日平均値、比湿の日平均値である。土壌パラメータとしては、水分ポテンシャルと土壌の体積含水率の関係を表す4つの係数、透水係数と土壌の体積含水率の関係を表す2つの係数である。

気温と日射量の日変化のパターンは計算の中で表される。降水が雨か雪かは判別式で分けられる。雪と判別されたときの降水量は、雨量計による降水粒子の捕集率が日平均風速の関数として補正される。土壌中の水分輸送は液体水による分と、水蒸気による分を考慮する。時間ステップ1～20分ごとの各層の地温、含水率、地表面の熱収支量、アルベード、積雪水当量、ほかの量が計算され、さらに日平均値や月平均値が算出される(近藤・徐, 1996a; 1996b; Kondo and Xu, 1997)。

V. 土壌の種類

以下の代表的な4種類の裸地面を想定した。ローム質土壌として、

Soil 1 (clay loam, Tsukuba) : クロボク土、通称閑

東ローム、つくば市にある農業環境技術研究所の圃場の土、保水性のよい畑地土壌、圃場容水量 = $0.512\text{m}^3\text{m}^{-3}$

Soil 2 (loam, Lanzhou): 中国蘭州の気象台露場の土、飽和含水の状態にしたのち乾燥させると煉瓦のように硬くなる、圃場容水量 = $0.336\text{m}^3\text{m}^{-3}$
砂質土壌として、

Soil 3 (silty sand, Chiba): 千葉市の成田砂、目の細かな細砂、圃場容水量 = $0.250\text{m}^3\text{m}^{-3}$

Soil 4 (sand, Tottori): 砂丘の砂、粗砂、排水がよい土壌、圃場容水量 = $0.086\text{m}^3\text{m}^{-3}$

VI. 顕熱・潜熱輸送量の計算結果

気候学的な熱収支・水収支の関係をみるために、年降水量と年ポテンシャル蒸発量、および4種類の土壌についての年蒸発量を表-1に示した。さらに、年ポテンシャル蒸発量で規格化した年蒸発量と年降水量の関係を表-2にまとめた。年蒸発量は年降水量と密接に関係している。

顕熱輸送量 H と潜熱輸送量 IE の年平均値を求め、表-3に示した。顕熱輸送量 H と潜熱輸送量 IE の年平均値の地域分布図を図-1に示した。大きさの目盛りは図の左下に示してある。棒グラフの全体の高

さが $H + IE$ であり、白い部分が H 、ハッチ部分が IE である。これは年平均値であるので、 $H + IE$ は正味放射量の年平均値 R_n に等しい。各地点ごとに左から**Soil 1, 2, 3, 4**の順に描いてある。地図中の点線は国境を、破線は高地の範囲を示している。主な特徴は、①**Soil 1**は保水性がよく、土壌は湿潤で、蒸発量が多い。**Soil 4**は砂で排水がよく、雨が降ってもすぐ乾燥し蒸発量は少ない。②図の南西部にプロットされたチベット高原では大気が薄く、かつ乾燥していることで日射量が多く、顕熱輸送量が全般に多い。③チベット高原の北方に広がる乾燥域では降水量が少なく、土壌は乾燥し、地表面温度が高温になり、正味放射量は比較的に少ない。その大部分が顕熱輸送量である。④東南部の湿潤域では降水量が多く、土壌は湿った状態のことが多く潜熱輸送量は大きい。

VII. 土壌水分の計算結果

土壌水分は、降水、蒸発、地中の水分移動の速さによって決まる。降雨の多い季節では日々の土壌水分の変動が激しいので、ここでは変動が比較的に少ない乾期の12月31日を代表日に選定した。また、土壌の表面近くでは、日々の風速や湿度などの条件によって土壌水分が激しく変化する。そこで、表-4

図-1 中国における1981年の顕熱輸送量 H と潜熱輸送量 IE の年平均値の地理的分布

表一 1 1981年の降水量 Pr (corrected precipitation), ポテンシャル蒸発量 E_p (potential evaporation), 土壌面蒸発量の計算値 E (calculated evaporation)

No.	Station	Index	Pr	E_p	E (mm y ⁻¹)			
		No.	mm y ⁻¹	mm y ⁻¹	Soil 1	Soil 2	Soil 3	Soil 4
(1)	Hailar	50527	353	835	350	230	304	159
(2)	Bugt	50632	564	843	501	316	404	218
(3)	Harbin	50953	665	1032	583	400	493	207
(4)	Altay	51076	228	1161	226	169	208	112
(5)	Fuyun	51087	175	1259	174	147	172	98
(6)	Urumqi	51463	273	1226	272	223	271	143
(7)	Turpan	51573	14	1635	14	14	14	14
(8)	Hotan	51828	50	1507	50	50	50	50
(9)	Andir	51848	39	1652	39	39	39	39
(10)	Dunhuang	52418	64	1468	64	64	64	64
(11)	Jiuquan	52533	136	1282	136	135	136	111
(12)	Lanzhou	52889	202	1024	201	186	201	134
(13)	Jurh	53276	346	1725	344	244	294	152
(14)	Shenyang	54342	614	1158	608	353	518	204
(15)	Beijing	54511	401	1404	396	261	334	170
(16)	Jinan	54823	399	1752	397	285	365	178
(17)	Xi'an	57036	735	977	529	332	445	185
(18)	Lushi	57067	690	933	595	350	473	188
(19)	Changsha	57679	1458	1011	709	416	541	202
(20)	Boxian	58102	652	1307	619	332	509	174
(21)	Dongtai	58251	927	1127	776	389	589	185
(22)	Hefei	58321	894	1223	784	403	610	212
(23)	Nanping	58834	1570	1007	920	541	720	315
(24)	Guangzhou	59287	2224	1107	942	531	704	301
(25)	Baigoin	55279	470	1476	468	339	462	208
(26)	Xigaze	55578	335	1481	334	256	314	162
(27)	Lhasa	55591	338	1465	337	286	336	186
(28)	Tuotuohe	56004	429	1246	428	317	426	176
(29)	Madoi	56033	425	1111	423	304	396	178
(30)	Degen	56444	554	1292	551	341	478	220
Average		—	541	1258	426	275	362	165

表一2 1981年の無次元降水量(Pr/E_p : non dimensional precipitation)と土壌面の無次元蒸発量(E/E_p : non dimensional evaporation)

No.	Station	Index No.	Pr/E_p	E/E_p			
				Soil 1	Soil 2	Soil 3	Soil 4
(1)Hailar		50527	0.423	0.419	0.275	0.364	0.190
(2)Bugt		50632	0.669	0.594	0.375	0.479	0.259
(3)Harbin		50953	0.644	0.565	0.388	0.478	0.201
(4)Altay		51076	0.196	0.195	0.146	0.179	0.096
(5)Fuyun		51087	0.139	0.138	0.117	0.137	0.078
(6)Urumqi		51463	0.223	0.222	0.182	0.221	0.117
(7)Turpan		51573	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009
(8)Hotan		51828	0.033	0.033	0.033	0.033	0.033
(9)Andir		51848	0.024	0.024	0.024	0.024	0.024
(10)Dunhuang		52418	0.044	0.044	0.044	0.044	0.044
(11)Jiuquan		52533	0.106	0.106	0.105	0.106	0.087
(12)Lanzhou		52889	0.197	0.196	0.182	0.196	0.131
(13)Jurh		53276	0.201	0.199	0.141	0.170	0.088
(14)Shenyang		54342	0.530	0.525	0.305	0.447	0.176
(15)Beijing		54511	0.286	0.282	0.186	0.238	0.121
(16)Jinan		54823	0.228	0.227	0.163	0.208	0.102
(17)Xi'an		57036	0.752	0.541	0.340	0.455	0.189
(18)Lushi		57067	0.740	0.638	0.375	0.507	0.202
(19)Changsha		57679	1.442	0.701	0.411	0.535	0.200
(20)Boxian		58102	0.499	0.474	0.254	0.389	0.133
(21)Dongtai		58251	0.823	0.689	0.345	0.523	0.164
(22)Hefei		58321	0.731	0.641	0.330	0.499	0.173
(23)Nanping		58834	1.559	0.914	0.537	0.715	0.313
(24)Guangzhou		59287	2.009	0.851	0.480	0.636	0.272
(25)Baingoin		55279	0.318	0.317	0.230	0.313	0.141
(26)Xigaze		55578	0.226	0.226	0.173	0.212	0.109
(27)Lhasa		55591	0.231	0.230	0.195	0.229	0.127
(28)Tuotuohe		56004	0.344	0.343	0.254	0.342	0.141
(29)Madoi		56033	0.383	0.381	0.274	0.356	0.160
(30)Deqen		56444	0.429	0.426	0.264	0.370	0.170

表-3 1981年の年平均顕熱輸送量 H (sensible heat flux)と潜熱輸送量 LE (latent heat flux)

No. Station	H ($W m^{-2}$)				LE ($W m^{-2}$)			
	Soil 1	Soil 2	Soil 3	Soil 4	Soil 1	Soil 2	Soil 3	Soil 4
(1)Hailar	10	8	0	9	28	18	24	13
(2)Bugt	17	16	5	15	40	25	32	17
(3)Harbin	8	12	0	14	47	27	39	16
(4)Altay	20	13	7	13	18	13	16	9
(5)Fuyun	24	15	10	15	14	12	14	8
(6)Urumqi	23	14	9	17	22	18	21	11
(7)Turpan	37	22	20	22	1	1	1	1
(8)Hotan	39	25	22	25	4	4	4	4
(9)Andir	49	31	28	31	3	3	3	3
(10)Dunhuang	47	30	26	29	5	5	5	5
(11)Jiuquan	45	29	25	28	11	11	11	9
(12)Lanzhou	38	25	20	25	16	15	16	11
(13)Jurh	40	29	21	30	27	19	23	12
(14)Shenyang	16	18	4	20	48	28	41	16
(15)Beijing	29	21	13	23	31	21	27	13
(16)Jinan	33	24	16	26	31	23	29	14
(17)Xi'an	18	19	10	20	42	26	35	15
(18)Lushi	21	21	12	23	47	28	37	15
(19)Changsha	15	22	12	25	56	33	43	16
(20)Boxian	22	26	12	28	49	26	40	14
(21)Dongtai	18	28	12	30	61	31	47	15
(22)Hefei	15	25	10	28	62	32	48	17
(23)Nanping	10	19	8	22	73	43	57	25
(24)Guangzhou	9	19	7	23	75	42	56	24
(25)Baingoin	57	49	35	49	37	27	37	16
(26)Xigaze	56	41	33	42	27	20	25	13
(27)Lhasa	50	36	29	37	27	23	27	15
(28)Tuotuohe	56	47	34	48	34	25	34	14
(29)Madoi	52	46	33	46	34	24	31	14
(30)Deqen	38	37	24	37	44	27	38	17
Average	30	26	17	27	34	22	29	13

表一4 1981年12月31日の深さ0.66mと0.26mにおける土壌水分の計算値(Calculated soil water content at depths of 0.66m and 0.26m on 31th December)

No. Station	$\theta_{0.66} (\text{m}^3 \text{m}^{-3})$				$\theta_{0.26} (\text{m}^3 \text{m}^{-3})$			
	Soil 1	Soil 2	Soil 3	Soil 4	Soil 1	Soil 2	Soil 3	Soil 4
(1)Hailar	0.360	0.305	0.174	0.067	0.351	0.252	0.168	0.044
(2)Bugt	0.388	0.309	0.187	0.068	0.382	0.260	0.183	0.052
(3)Harbin	0.397	0.325	0.200	0.079	0.390	0.279	0.197	0.064
(4)Altay	0.343	0.282	0.163	0.060	0.350	0.255	0.166	0.067
(5)Fuyun	0.322	0.261	0.153	0.060	0.320	0.230	0.149	0.035
(6)Urumqi	0.343	0.276	0.175	0.095	0.356	0.271	0.189	0.068
(7)Turpan	0.032	0.0096	0.014	0.0033	0.033	0.012	0.016	0.0050
(8)Hotan	0.229	0.140	0.072	0.019	0.224	0.130	0.064	0.017
(9)Andir	0.081	0.025	0.026	0.011	0.081	0.029	0.029	0.0094
(10)Dunhuang	0.241	0.142	0.059	0.021	0.234	0.120	0.054	0.020
(11)Jiuquan	0.310	0.238	0.143	0.067	0.305	0.215	0.140	0.049
(12)Lanzhou	0.328	0.279	0.166	0.066	0.318	0.236	0.161	0.038
(13)Jurh	0.367	0.305	0.181	0.068	0.360	0.253	0.176	0.055
(14)Shenyang	0.377	0.308	0.186	0.071	0.368	0.258	0.180	0.059
(15)Beijing	0.351	0.294	0.172	0.069	0.340	0.245	0.165	0.055
(16)Jinan	0.342	0.281	0.167	0.065	0.330	0.234	0.160	0.048
(17)Xi'an	0.427	0.321	0.197	0.072	0.411	0.262	0.188	0.061
(18)Lushi	0.396	0.320	0.193	0.072	0.379	0.259	0.184	0.055
(19)Changsha	0.471	0.338	0.207	0.076	0.450	0.267	0.195	0.057
(20)Boxian	0.383	0.323	0.192	0.073	0.370	0.268	0.183	0.063
(21)Dongtai	0.437	0.330	0.200	0.076	0.416	0.264	0.189	0.058
(22)Hefei	0.476	0.347	0.218	0.084	0.452	0.277	0.204	0.063
(23)Nanping	0.392	0.324	0.196	0.073	0.372	0.262	0.185	0.059
(24)Guangzhou	0.395	0.316	0.188	0.070	0.379	0.252	0.177	0.057
(25)Baingoin	0.363	0.300	0.186	0.067	0.356	0.254	0.180	0.053
(26)Xigaze	0.335	0.276	0.165	0.065	0.323	0.230	0.158	0.029
(27)Lhasa	0.341	0.286	0.167	0.067	0.336	0.241	0.164	0.033
(28)Tuotuohe	0.362	0.302	0.177	0.068	0.357	0.255	0.173	0.054
(29)Madoi	0.375	0.310	0.194	0.069	0.368	0.258	0.189	0.055
(30)Deqen	0.345	0.286	0.169	0.067	0.336	0.241	0.164	0.046

には深さ0.66mと0.26mにおける日平均体積含水率を示した。

Soil 1は保水性が高いので、体積含水率が大きい。Soil 4は排水のよい粗砂であり、体積含水率は小さい。年降水量との関係は、多雨気候域では近似的に圃場容水量となっているが、砂漠など雨の少ない乾燥域では大気の年平均水蒸気量とバランスするような平衡含水率に近い値になっている。詳しい関係式と図は近藤(1996)またはKondo and Xu(1997)に示されている。

VIII. あとがき

代表的な4つの土壌について1981年のルーチン気象資料に基づき計算した中国30地点の顕熱輸送量と潜熱輸送量の年平均値、および変動の少ない乾期の土壌の体積含水率を表にまとめ、今後の研究資料として役立てることとした。

参考文献

- Kondo, J., N. Saigusa and T. Sato(1990): A parameterization of evaporation from bare soil surfaces. *J. Appl. Meteor.*, **29**(5), 385-389.
- Kondo, J., N. Saigusa and T. Sato (1992): A model and experimental study of evaporation from bare soil surfaces. *J. Appl. Meteor.*, **31**(3), 304-312.
- 近藤純正(1993a): 乾燥域における地表面熱収支の研究指針(1)モデル。水文・水資源学会誌, **6**(3), 223-229.
- 近藤純正(1993b): 乾燥域における地表面熱収支の研究指針(2)計算結果。水文・水資源学会誌, **6**(3), 230-237.
- 近藤純正(1993c): 表層土壌水分予測用の簡単な新パケツモデル。水資源学会誌, **6**(4), 344-349.
- Kondo, J. and N. Saigusa (1994): Modelling the evaporation from bare soil with formulation of vaporization and water vapor diffusion in the soil pores. *J. Meteor. Soc. Jpn.*, **72**(3), 413-421.
- 近藤純正(1994a): 裸地面蒸発の季節変化(1)モデル。水文・水資源学会誌, **7**(5), 378-385.
- 近藤純正(1994b): 裸地面蒸発量の土壌種類と年降水量への依存性。天気, **41**(9), 525-535.
- 近藤純正・徐健青(1995): 火山灰土壌及び砂丘砂の裸地からの蒸発量の計算。農業気象, **51**(3), 219-228.
- 近藤純正・徐健青・福本昌人(1995): 黒色火山性土の圃場からの蒸発量。水文・水資源学会誌, **8**(2), 174-183.
- 近藤純正(1996): わたしの水文水資源学—十和田湖から中国乾燥域まで—。水文・水資源学会誌, **10**(1), 3-13.
- 近藤純正・徐健青(1996a): 中国の乾燥・半乾燥域の裸地面熱収支の計算(1)気候と土壌パラメータと計算方法。水文・水資源学会誌, **9**(2), 162-174.
- 近藤純正・徐健青(1996b): 中国北西部における積雪の裸地面熱収支に及ぼす影響。雪氷, **58**(4), 303-316.
- 近藤純正・徐健青(1997a): 中国における地表面熱収支・水収支(1)中国～日本の放射量分布。水文・水資源学会誌, **10**(1), 66-78.
- 近藤純正・徐健青(1997b): 中国における地表面の熱収支・水収支(3)裸地面資料の図表。東北大学地球物理学教室, pp. 128.
- Kondo, J. and J. Xu, (1997): Seasonal variations in the heat and water balances for non-vegetated surfaces. *J. Appl. Meteor.*, **36**, (in press).

(1996年11月11日受付, 1997年1月28日受理)