水文・水資源学会誌
J. Japan Soc. Hydrol. & Water Resour.
Vol. 10, No. 5 (1997) pp. 450-457

日本の水文気象(5): ポテンシャル蒸発量と気候湿潤度

Hydrological climate in Japan (5): Potential evaporation and wetness index

近藤純正* (東北大学名誉教授)

Junsei KONDO

Emeritus Professor of Tohoku University

Potential evaporation and wetness index were estimated at 66 meteorological stations in Japan. The annual amount of potential evaporation is 700-900mm in northern Japan and 1,000-1,200mm in southern Japan. The wetness index (WI), which is a ratio of the annual precipitation (P) to the annual potential evaporation (E_p), is estimated at 1 to 2. As an application of normalization by the potential evaporation, the definite relation was found between the normalized forest evapotranspiration (E/E_p) and the wetness index ($WI=P/E_p$). For a humid climate, i.e. in a region of $WI>1$, it was shown that E/E_p ranges from 0.8 to 0.9.

Key word: Hydrological climate, Evaporation, Wetness index, Heat balance

全国66箇所の気象官署のデータを用いて、ポテンシャル蒸発量を計算した。年ポテンシャル蒸発量は、北日本では700～900mm、南日本では1,000～1,200mmである。年降水量(P)と年ポテンシャル蒸発量(E_p)の比を表す「気候湿潤度」(WI)は1～2と算定された。ポテンシャル蒸発量の応用例として、無次元森林蒸発散量(E/E_p)と気候湿潤度($WI=P/E_p$)の間には明確な関係が見いだされた。気候湿潤度 $WI>1$ の地域では、無次元森林蒸発散量 E/E_p は0.8～0.9の範囲内にある。

キーワード: 水文気象, 蒸発, 気候湿潤度, 熱収支

I. はじめに

日本の国土は森林、草地、裸地、水面など多種多様な地表面からなっている。筆者らはこれまで日本各地の放射量の分布や、浅い水面、芝生地、舗装地、典型的な森林からの蒸発散量の季節的地理的分布を熱収支的な方法で調べてきた(近藤・桑形, 1992; 近藤・中園・渡辺, 1992; 近藤・中園・渡辺・桑形, 1992; 近藤・中園, 1993)。また、土壌面については水収支の気候学的な関係を調べ、年蒸発量と年降水量を年ポテンシャル蒸発量で無次元化すると、年蒸発量は年降水量とともに1本の曲線に沿って増加し、ある降水量以上の湿潤気候では土壌の種類によって決まる最大値を越えることができないことがわかった(近藤, 1994; 近藤, 1997; Kondo and Xu, 1997)。したがって、年降水量と年蒸発量およびそれらの差、つまり、

年流出量(水資源量)の3つの水文量の関係はポテンシャル蒸発量と密接な関係がある。高緯度でポテンシャル蒸発量の少ない地域では、降水量が少なくても流出量(水資源量)は多くなり、逆に降水量が多くてもポテンシャル蒸発量が多ければ、流出量は少なくなる。そうして、降水量とポテンシャル蒸発量の比を「気候湿潤度」とよび、水文気候の区分に使うことを提案した(近藤・徐, 1997b)。

本報告では、日本の気象官署66箇所について毎月のポテンシャル蒸発量 E_p と気候湿潤度 WI を求め、表と図に示す。その応用例として、日本の森林からの蒸発散量と降水量をポテンシャル蒸発量で無次元化して図示し、3つの水文量の関係を説明する。

II. ポテンシャル蒸発量の定義

従来のポテンシャル蒸発量は、例えば「水の供給

*東北大学名誉教授 〒980 仙台市青葉区角五郎1-12-20
Tsunogoro 1-12-20, Aobaku, Sendai 980, Japan

が十分に行われているときの蒸発量」と定義されている。この定義はあいまいで、具体的にはいろいろな量がポテンシャル蒸発量として代用されてきた(近藤, 1989)。近年は熱収支的な計算法が用いられるようになり、水面からの蒸発量を計算するPenman式(1948; 1956)などがある。主として外国や日本の農学関係者が使用しているPenman式その他では、正味放射量(純放射量と呼ぶこともある)が気象条件として用いられている。正味放射量は同じ地域であっても地表面の種類によって数十%の差がある(例えば、近藤・徐, 1997a)。そのため、ポテンシャル蒸発量はその比率だけ違ってくる。

そこで、近藤・徐(1997b)は気候学的あるいは水資源的な観点から、ポテンシャル蒸発量は地表面の種類によらず、各地域の気候に固有の値であることが望ましいと考え、次のように定義した。すなわち、ポテンシャル蒸発量は「いつも湿っていて地中伝導熱がゼロの仮想面(定義は下記)を想定し、その表面温度が毎日の日平均熱収支で決まる『熱収支の平衡値』にあるとしたときの蒸発量」である。つまり、ポテンシャル蒸発量は風速や気温など実測の日平均気象要素を用いて計算される量である。この仮想面は、顕熱の交換速度($C_H U$)が以下の式で定義されるものとした。

$$C_H U = a + b \times U_1 \quad (1)$$

$a(=0.0027\text{ms}^{-1})$ と $b(=0.0031)$ は係数、 U_1 は仮想面上の高度1mの風速(単位: ms^{-1})である。風速が弱く仮想面温度 T_s が気温 T に比べて高くなり($\Delta T > 0.5^\circ\text{C}$)、自然対流の状態では、

$$C_H U = c \times \Delta T^{1/3} \quad (2)$$

とする。ただし、 $c(=0.0036\text{ms}^{-1}\text{K}^{-1/3})$ は係数、 ΔT (単位: $^\circ\text{C}$)は地表面温度と気温の差(正確には仮温位差)である。式(1)と(2)を比べて大きいほうを用いる。係数 a , b , c の数値は空気力学的にやや粗な地表面(空気力学的粗度: $z_0=0.005\text{m}$, 温度分布に対する粗度: $z_r=0.0003\text{m}$)に相当する。さらに、仮想面はアルベード $\text{ref}=0.06$, 赤外放射に対する射出率 $\epsilon=0.98$, 蒸発効率 $\beta=1$ とする。

III. 計算方法とデータ

上記の仮想面に対する熱収支式は(3), バルク式は(4)と(5)で表される。

$$R^{\downarrow} = \epsilon \sigma T_s^4 + H + \epsilon E \quad (3)$$

$$H = c_p \rho C_H U_1 (T_s - T) \quad (4)$$

$$\epsilon E = \epsilon \rho \beta C_H U_1 (q_s - q) \quad (5)$$

ただし、式(3)の左辺は既知の入力放射量

$$R^{\downarrow} = (1 - \text{ref}) S^{\downarrow} + \epsilon L^{\downarrow} \quad (6)$$

である。ここに H は顕熱輸送量、 E は蒸発量、 ϵ は気化の潜熱、 $S^{\downarrow}$ は日射量(全天日射量)、 $L^{\downarrow}$ は大気放射量(下向きの長波放射量)、 q は大気の比湿、 q_s は温度 T_s に対する飽和比湿である。式(3)~(5)を同時に満たすように、逐次近似法によって T_s と H と E を同時に求める。そのときの蒸発量 E がポテンシャル蒸発量 E_p である。具体的な計算法は近藤・徐(1997)に説明されている。

(注) Penman式(1948; 1956)との違い:

①各種地表面の $C_H U$ について比較した図(近藤, 1996a, 図1~図5)を参照すると、当初、式(1)は裸地を想定して作られたものである。Penman式に用いられる $C_H U$ は大まかに見ると、式(1)に近い値であるので、微風時を除くと、この違いから生じる蒸発量の違いは小さい。しかし、微風で日射が強い条件では、 $C_H U$ は式(2)となるので、蒸発量はPenman式による値より大きくなる(近藤, 1996a, 図6参照)。②前述のようにPenman式では正味放射量を与える(間接的には地表面温度が与えられている)ようになっているので、 $C_H U$ が同じであっても、蒸発量は地表面の種類によって変わる。日々の値では大きな違いは目立たないが、年ポテンシャル蒸発量では数十%の違いが生じることがある。正味放射量は個々の地表面について観測しなければならず、しかも一般には正確に測れない(近藤, 1996b)。近年、熱収支量をより正確に知りたい要求もあり、熱収支の計算は式(6)で定義される入力放射量を用いる方向に向かっている。③Penman法では式(3)~(5)の近似解に相当する。そのため、とくに風速の弱い条件では、熱収支式は満足されない。要約すると、Penman法によるポテンシャル蒸発量と本論文で計算されるポテンシャル蒸発量の違いは、気候条件と地表面の種類によって、ほぼ同じになる場合もあるが、数十%の違いが生じる場合もある。今回は、従来のあいまいさを除き、明確に定義される「仮想面」からの蒸発量としたものである。

ポテンシャル蒸発量は、日々の気温、水蒸気圧、風速、日射量、大気放射量の日平均値を用いて計算される。しかし近藤・徐(1997b)によれば、これらの気象要素の日平均値の代わりに月平均値を用いても、

表—11 ポンデシタル蒸発量の月合計値と年合計値 (単位はmm) ただし、地域代表風速 U_B を使用した場合。

	No.	Stn.	Sum	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	Sum											
401 Wakanai	9	15	40	64	91	94	99	86	77	54	24	13	668	655 Omaezaki	60	59	90	108	120	118	127	152	107	84	61	58	1146
402 Kitamiesashi	5	12	40	76	104	85	93	87	74	50	17	6	649	656 Shizuoka	56	57	85	113	122	124	125	152	106	84	57	48	1128
406 Rumoi	8	16	42	70	92	105	118	104	77	50	26	15	723	662 Tokyo	56	56	88	113	128	124	117	146	94	81	59	55	1115
407 Asahikawa	1	10	42	78	116	130	135	110	70	38	15	2	747	675 Oshima	44	41	65	85	96	93	92	117	73	60	46	40	854
409 Abashiri	8	15	42	74	100	90	110	92	74	56	25	14	700	678 Hachiojima	54	54	78	101	109	106	115	139	107	80	59	54	1054
412 Sapporo	10	20	50	86	114	124	127	119	84	55	28	12	830	744 Yonago	31	36	62	96	119	125	128	147	88	68	41	35	977
417 Obihiro	7	20	52	84	119	106	92	88	62	53	27	13	725	750 Maizuru	22	29	55	92	119	138	101	138	80	57	32	23	883
420 Nemuro	9	19	42	63	89	81	77	78	59	52	27	15	611	755 Hamada	41	45	66	97	113	111	122	142	86	70	50	48	991
421 Sutsu	15	43	48	77	102	112	116	103	76	49	25	17	782	761 Hikone	31	37	63	94	114	121	126	147	99	72	41	29	975
423 Muroran	17	25	47	75	99	98	89	87	74	61	32	22	726	762 Shimonoseki	43	47	72	105	118	121	134	151	101	83	55	44	1074
426 Urawaka	18	27	48	65	87	82	81	88	67	57	33	22	675	765 Hiroshima	37	47	74	109	124	135	139	157	111	91	53	40	1117
430 Hakodate	12	23	51	82	104	110	107	104	74	54	27	16	764	772 Osaka	45	48	77	108	130	144	153	171	115	84	53	43	1171
575 Aomori	15	24	54	86	116	117	116	115	78	54	32	21	828	778 Shionomisaki	53	58	90	109	118	118	132	155	112	92	64	55	1156
581 Hachinohe	21	30	60	96	120	108	105	107	71	58	35	27	839	789 Nara	35	39	69	104	117	126	132	148	92	62	38	31	995
582 Akita	22	29	56	85	110	122	124	136	83	59	33	25	884	800 Izuwara	40	49	72	106	124	126	139	156	106	86	53	42	1094
584 Morioka	17	26	56	89	121	123	110	113	69	47	27	20	819	807 Fukuoka	40	49	72	106	124	126	139	156	106	86	53	42	1094
585 Miyako	32	38	64	97	114	102	96	106	68	57	40	36	849	813 Saga	33	45	70	101	121	128	144	158	108	83	47	31	1067
587 Sakata	30	33	59	90	114	127	130	144	90	66	38	31	952	815 Oita	45	49	70	96	109	120	128	138	91	78	52	46	1024
588 Yaeagata	16	26	60	101	135	135	128	134	82	53	27	22	918	819 Nagasaki	39	49	74	101	117	114	141	154	107	89	52	38	1075
590 Sendai	33	39	73	100	121	105	89	110	80	70	45	37	903	817 Kumamoto	34	47	73	106	122	127	150	159	108	89	47	33	1095
595 Fukushima	32	41	74	112	139	125	109	131	77	58	39	35	971	827 Kagoshima	44	54	79	104	120	120	157	156	120	100	57	44	1156
598 Onahama	44	48	79	99	111	105	107	128	88	72	48	43	972	830 Miyazaki	47	54	77	100	113	123	150	149	96	84	51	46	1090
600 Wajima	25	28	54	91	115	113	120	139	87	62	35	27	895	881 Matsuyama	43	49	75	111	125	134	151	159	102	87	54	45	1133
604 Niigata	29	34	60	92	117	127	137	149	97	66	41	32	983	897 Takamatsu	45	49	74	107	123	138	146	154	94	76	49	42	1095
607 Toyama	19	28	54	98	118	117	116	138	87	58	35	26	894	893 Kochi	47	56	87	111	122	126	138	155	108	94	59	49	1152
612 Takada	24	29	58	96	116	119	123	134	83	58	36	31	907	898 Shimizu	55	59	94	111	119	122	145	155	112	101	70	60	1204
615 Utsunomiya	37	43	78	104	117	107	95	125	83	68	39	32	929	908 Naze	56	56	79	88	110	117	164	139	112	94	64	60	1140
616 Fukui	20	29	55	103	125	127	127	150	89	60	34	23	942	918 Ishigaki-jima	63	61	80	93	114	147	179	164	132	110	78	71	1292
618 Matsumoto	34	36	65	117	138	137	140	158	92	57	40	29	1042	927 Miyakojima	62	60	81	95	113	142	169	159	125	113	77	71	1266
624 Maebashi	53	54	89	120	136	116	109	131	80	77	56	51	1070	936 Naha	63	61	84	96	116	133	180	154	132	115	80	75	1290
636 Nagoya	41	53	87	120	132	132	132	162	107	83	53	42	1143	945 Minamidaitojima	66	71	100	111	128	140	178	157	144	113	83	72	1364
638 Kofu	45	51	90	128	138	138	139	161	98	72	45	37	1143	971 Chichijima	81	81	110	114	133	129	163	148	132	107	84	72	1355
648 Choshi	44	47	75	96	107	106	109	134	94	77	50	41	982	991 Minamitorishima	91	98	131	139	169	169	177	155	154	136	113	86	1618

表-2 表-1に同じ ただし、準実測風速 U_A を使用した場合。

No.	Stn.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	Sum	No.	Stn.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	Sum
401	Wakkanai	14	19	48	73	101	102	106	94	88	67	33	20	763	655	Omaezaki	90	83	119	132	141	135	143	172	127	108	85	88	1425
402	Kitamiesashi	5	12	40	77	105	86	93	88	75	51	18	6	656	656	Shizuoka	55	56	84	112	121	124	125	151	105	83	56	48	1121
406	Rumoi	14	23	53	86	108	117	131	117	91	68	42	27	877	662	Tokyo	56	56	87	112	127	123	116	146	94	81	59	55	1111
407	Asahikawa	1	10	39	73	109	124	130	106	66	35	13	1	708	675	Oshima	73	64	94	111	120	112	108	137	90	82	70	67	1129
409	Abashiri	10	17	45	80	107	94	114	96	79	62	30	17	752	678	Hachijojima	93	88	116	134	138	129	137	166	135	114	91	92	1433
412	Sapporo	9	19	49	84	112	122	126	117	83	54	27	12	813	744	Yonago	35	39	66	102	125	130	133	153	92	73	45	39	1032
417	Obihiro	7	19	50	81	115	104	90	86	60	51	25	12	699	750	Maizuru	20	26	51	90	106	116	114	132	76	53	30	21	835
420	Nemuro	16	24	53	75	102	89	84	86	69	69	42	28	737	755	Hamada	58	60	81	113	127	123	134	157	97	83	66	68	1167
421	Suttsu	27	56	67	99	124	130	135	121	93	67	41	31	991	761	Hikone	33	39	66	97	116	124	128	150	101	74	43	31	1000
423	Muroran	29	34	60	91	116	110	99	98	88	81	50	38	893	762	Shimonoseki	52	55	82	116	129	131	144	163	110	93	64	53	1191
426	Urakawa	28	37	59	76	98	89	88	96	78	74	50	37	809	765	Hiroshima	41	51	79	115	129	141	144	164	116	97	58	45	1179
430	Hakodate	13	25	55	86	108	114	110	108	78	57	30	18	800	772	Osaka	48	50	80	111	134	147	156	176	118	87	56	45	1207
575	Aomori	18	27	60	94	125	123	122	120	84	59	37	26	896	778	Shionomisaki	71	73	111	128	134	131	145	172	128	111	81	73	1358
581	Hachinohe	28	36	71	110	134	117	113	116	79	68	44	36	951	789	Nara	33	37	65	99	112	122	128	143	89	60	36	29	950
582	Akita	29	36	67	98	122	135	137	149	92	69	42	34	1010	800	Izuhara	50	53	81	106	122	110	116	131	93	88	62	51	1064
584	Morioka	20	29	63	98	132	132	117	120	74	52	31	25	891	807	Fukuoka	46	54	79	114	132	134	147	165	113	94	60	48	1186
585	Miyako	31	37	63	96	113	102	95	106	67	56	39	35	842	813	Saga	34	46	72	103	123	130	146	161	110	85	48	32	1089
587	Sakata	41	43	72	104	128	140	143	158	102	79	50	43	1102	815	Oita	48	52	73	100	113	123	131	142	94	81	55	49	1063
588	Yamagata	14	24	56	94	127	128	122	128	78	49	24	20	864	817	Nagasaki	40	49	74	101	118	115	142	155	107	89	52	38	1081
590	Sendai	34	40	74	101	122	105	90	111	81	71	46	38	912	819	Kumamoto	34	47	73	106	122	127	150	159	108	89	47	33	1094
595	Fukushima	30	39	70	107	134	121	107	127	74	56	37	33	934	827	Kagoshima	47	57	83	108	125	124	162	161	124	105	61	47	1206
598	Onahama	48	51	84	103	114	108	110	132	91	76	52	47	1017	830	Miyazaki	51	58	82	106	119	129	157	155	100	89	55	50	1150
600	Wajima	31	34	62	102	127	122	129	150	96	71	42	34	999	887	Matsuyama	40	46	72	107	121	130	147	155	99	83	52	42	1095
604	Niigata	39	43	73	107	132	142	152	166	111	79	52	44	1140	891	Takamatsu	46	48	76	109	125	140	148	156	96	77	50	44	1114
607	Toyama	22	31	58	105	125	123	122	144	91	63	39	29	952	893	Kochi	44	54	83	107	119	122	134	151	105	90	56	46	1112
612	Takada	24	29	57	96	116	119	123	134	83	58	35	31	906	898	Shimizu	68	70	109	126	132	133	155	167	124	116	84	74	1359
615	Utsunomiya	35	41	75	100	114	104	93	122	81	65	37	30	896	909	Naze	58	57	81	90	112	119	166	141	114	95	66	62	1161
616	Fukui	21	29	56	105	127	129	128	153	91	62	35	24	961	918	Ishigakijima	88	81	100	113	133	170	210	194	158	140	105	100	1590
618	Matsumoto	34	36	66	117	138	137	141	159	92	57	40	29	1046	927	Miyakojima	92	83	106	117	134	165	199	191	152	150	110	108	1606
624	Maebashi	58	59	95	127	142	121	113	136	83	82	61	56	1134	936	Naha	87	81	108	116	137	153	208	181	157	146	109	105	1588
636	Nagoya	48	60	98	133	144	143	141	174	116	91	60	49	1257	945	Minamidaitojima	86	88	120	128	144	155	200	178	164	136	107	96	1602
638	Kofu	39	45	81	117	128	130	132	152	92	66	41	32	1055	971	Chichijima	97	94	125	127	144	137	174	161	143	119	96	85	1503
648	Choshi	66	67	102	118	127	122	122	151	113	103	71	62	1223	991	Minamitorishima	136	139	171	176	209	204	219	193	199	178	162	125	2111

表-3 降水量とポテンシャル蒸発量の年間値と暖候期4～9月の合計(単位はmm) 地域代表風速 U_B と準実測風速 U_A の場合の比較.
 P :年降水量, E_P :年ポテンシャル蒸発量, $P(S)$:暖候期降水量, $E_P(S)$:暖候期ポテンシャル蒸発量, $WI=P/E_P$, $WI(S)=P(S)/E_P(S)$.

No.	Stn.	Wind speed U_B							Wind speed U_A							No.	Stn.	Wind speed U_B							Wind speed U_A																										
		P	$P(S)$	$P(S)/P$	E_P	$E_P(S)$	WI	$WI(S)$	E_P	$E_P(S)$	WI	$WI(S)$	E_P	$E_P(S)$	WI			$WI(S)$	E_P	$E_P(S)$	WI	$WI(S)$	E_P	$E_P(S)$	WI	$WI(S)$	E_P	$E_P(S)$	WI	$WI(S)$																					
401	Wakkanai	958	453	0.47	668	512	1.44	0.88	763	564	1.26	0.80	655	Omaezaki	2109	1383	0.66	1146	733	1.84	1.89	1425	850	1.48	1.63	402	Kitamiesashi	1172	580	0.50	649	519	1.81	1.12	656	524	1.79	1.11	656	Shizuoka	2364	1641	0.69	1128	742	2.10	2.21	1121	738	2.11	2.22
406	Rumoi	1200	565	0.47	723	565	1.66	1.00	877	651	1.37	0.87	662	Tokyo	1503	1000	0.67	1115	720	1.35	1.39	1111	718	1.35	1.39	407	Asahikawa	1041	569	0.55	747	639	1.39	0.89	708	608	1.47	0.94	675	Oshima	2919	1682	0.58	854	557	3.42	3.02	1129	679	2.59	2.48
409	Abashiri	765	419	0.55	700	541	1.09	0.78	752	570	1.02	0.74	678	Hachijojima	3215	1588	0.49	1054	676	3.05	2.35	1433	839	2.24	1.89	412	Sapporo	1062	476	0.45	830	654	1.28	0.73	813	643	1.31	0.74	744	Yonago	1854	1013	0.55	977	703	1.90	1.44	1032	734	1.80	1.38
417	Obihiro	928	619	0.67	725	551	1.28	1.12	699	535	1.33	1.16	750	Maizuru	1865	1041	0.56	883	665	2.11	1.57	835	634	2.23	1.64	420	Nemuro	1098	707	0.64	611	445	1.80	1.58	737	505	1.49	1.40	755	Hamada	1760	1113	0.63	991	671	1.78	1.66	1167	752	1.51	1.48
421	Suttsu	1098	494	0.45	782	585	1.40	0.84	991	703	1.11	0.70	761	Hikone	1565	1006	0.64	975	701	1.61	1.43	1000	715	1.57	1.41	423	Muroran	1176	792	0.67	726	522	1.62	1.52	893	601	1.32	1.32	762	Shimonoseki	1630	1161	0.71	1074	730	1.52	1.59	1191	792	1.37	1.47
426	Urakawa	1109	743	0.67	675	469	1.64	1.58	809	524	1.37	1.42	765	Hiroshima	1625	1192	0.73	1117	774	1.45	1.54	1179	808	1.38	1.47	430	Hakodate	1128	664	0.59	764	581	1.48	1.14	800	603	1.41	1.10	772	Osaka	1381	956	0.69	1171	821	1.18	1.17	1207	842	1.14	1.14
575	Aomori	1166	508	0.44	828	628	1.41	0.81	896	668	1.30	0.76	778	Shionomisaki	2537	1703	0.67	1156	744	2.19	2.29	1358	837	1.87	2.03	581	Hachinohe	1002	697	0.70	839	608	1.20	1.15	951	669	1.05	1.04	789	Nara	1352	903	0.67	995	719	1.36	1.26	950	692	1.42	1.31
582	Akita	1654	896	0.54	884	661	1.87	1.36	1010	733	1.64	1.22	800	Izuhara	2149	1583	0.74	944	621	2.28	2.55	1064	679	2.02	2.33	584	Morioka	1273	868	0.68	819	625	1.56	1.39	891	672	1.43	1.29	807	Fukuoka	1520	1073	0.71	1099	756	1.38	1.42	1186	805	1.28	1.33
585	Miyako	1332	880	0.66	849	584	1.57	1.51	842	580	1.58	1.52	813	Saga	1978	1503	0.76	1067	759	1.85	1.98	1089	772	1.82	1.95	587	Sakata	1745	839	0.48	952	695	1.83	1.21	1102	775	1.58	1.08	815	Oita	1687	1230	0.73	1024	684	1.65	1.80	1063	704	1.59	1.75
588	Yamagata	1092	676	0.62	918	714	1.19	0.95	864	677	1.27	1.00	817	Nagasaki	1933	1430	0.74	1075	734	1.80	1.95	1081	738	1.79	1.94	590	Sendai	1255	946	0.75	903	605	1.39	1.56	912	610	1.38	1.55	819	Kumamoto	2163	1640	0.76	1095	773	1.98	2.12	1094	772	1.98	2.12
595	Fukushima	1092	736	0.67	971	692	1.13	1.07	934	670	1.17	1.10	827	Kagoshima	2255	1589	0.71	1156	777	1.95	2.05	1206	805	1.87	1.97	598	Onahama	1423	912	0.64	972	638	1.46	1.43	1017	659	1.40	1.39	830	Miyazaki	2527	1877	0.74	1090	731	2.32	2.57	1150	765	2.20	2.46
600	Wajima	2003	975	0.49	895	665	2.24	1.47	999	725	2.01	1.36	887	Matsuyama	1380	939	0.68	1133	781	1.22	1.20	1095	760	1.26	1.24	604	Niigata	1657	705	0.43	983	720	1.69	0.98	1140	810	1.45	0.87	891	Takamatsu	1236	842	0.68	1095	762	1.13	1.10	1114	773	1.11	1.09
607	Toyama	2073	991	0.48	894	674	2.32	1.47	951	710	2.18	1.40	893	Kochi	2674	2042	0.76	1152	760	2.32	2.69	1112	739	2.41	2.77	612	Takada	2364	768	0.33	907	671	2.61	1.15	906	670	2.61	1.15	898	Shimizu	2596	1708	0.66	1204	765	2.16	2.23	1359	837	1.91	2.04
615	Utsunomiya	1590	1210	0.76	929	632	1.71	1.92	896	613	1.77	1.97	909	Naze	2718	1614	0.59	1140	732	2.38	2.21	1161	742	2.34	2.18	616	Fukui	2098	980	0.47	942	721	2.23	1.36	961	733	2.18	1.34	918	Ishigakijima	2095	1316	0.63	1292	829	1.62	1.59	1590	977	1.32	1.35
618	Matsumoto	934	626	0.67	1042	782	0.90	0.80	1046	784	0.89	0.80	927	Miyakojima	2001	1135	0.57	1266	802	1.58	1.42	1606	957	1.25	1.19	624	Maebashi	1329	1031	0.78	1070	691	1.24	1.49	1134	723	1.17	1.43	936	Naha	1941	1234	0.64	1290	811	1.50	1.53	1588	952	1.22	1.30
636	Nagoya	1544	1089	0.71	1143	786	1.35	1.39	1257	851	1.23	1.28	945	Minamidaitojima	1439	771	0.54	1364	858	1.06	0.90	1602	968	0.90	0.80	638	Kofu	1041	696	0.67	1143	804	0.91	0.87	1055	750	0.99	0.93	971	Chichijima	1361	745	0.55	1355	818	1.01	0.91	1503	887	0.91	0.84
648	Choshi	1784	984	0.55	982	648	1.82	1.52	1223	753	1.46	1.31	991	Minamitorishima	1059	670	0.63	1618	963	0.66	0.70	2111	1201	0.50	0.56																										

年ポテンシャル蒸発量は約2%(最大5%)以内の精度で、月ポテンシャル蒸発量は3mm程度(中国の低温域の冬などでは最大15mm)の誤差で近似値が得られることが確認された。それゆえ、本報告では気象要素の月平均値を用いて計算する。

ポテンシャル蒸発量の計算は、日射量の観測が行われている日本の66個所の気象官署について行う。気象資料は1986年～1990年の5か年間の月別平均値を用いる。ただし、風速はローカルな地形の影響を含むので、近藤・中国(1993)が算定した「地域代表風速 U_B 」を用いる。地域代表風速 U_B とは高度50mにおける風速で、日本全域で平滑化されたような値で、各気象官署周辺の水平スケール100km程度の範囲を代表する。したがって、実際の風速は、岬などでは U_B よりも強く、内陸盆地の谷間などでは弱い。ポテンシャル蒸発量を定義する仮想面上の高度1mの風速は次式で計算する。

$$U_1 = 0.58 \times U_B \quad (7)$$

係数0.58は、粗度 $z_0 = 0.005\text{m}$ の仮想面上で風速の対数分布を仮定したときの、高度1mと50mにおける

風速の比である。

本報告では、参考のために準実測風速 U_A の場合も計算し表-2に示す。準実測風速とは、風速計の設置高度と周辺の地表面粗度がばらばらであるため、気象官署の実測風速を地上50mの高度に変換した風速のことである。実測風速から準実測風速へは換算係数を使って計算される(近藤・桑形・中国, 1991)。 U_A から U_1 への換算は、式(7)の U_B の代わりに U_A を用いる。

IV. ポテンシャル蒸発量の計算値

気象官署66個所について地域代表風速 U_B 、及び準実測風速 U_A を使用して計算された月ポテンシャル蒸発量を表-1と表-2に示した。前者は水平スケール100km程度の広域の平均状態に利用する。後者は各気象官署の近く、または風速の条件が気象官署のそれに似ている場所に利用する。表-3には、年降水量 P 、暖候期4～9月の半年間の降水量 $P(S)$ 、および地域代表風速 U_B と準実測風速 U_A を用いた場合の年ポテンシャル蒸発量 E_P 、暖候期ポテン

図-1 地域代表風速 U_B を用いた場合の年ポテンシャル蒸発量 E_P (左上)、年気候湿度 WI (左下)、暖候期4～9月半年間のポテンシャル蒸発量 $E_P(S)$ (右上)、暖候期気候湿度 $WI(S)$ (右下)

シャル蒸発量 E_p (S), 年気候湿潤度WI, 暖候期気候湿潤度WI(S)を比較した。

図-1は地域代表風速 U_B を用いた場合の地理的分布である。左上は年ポテンシャル蒸発量 E_p である。北海道では700mm前後, 関東以西では1,000mm以上であり太平洋側では多い。地図の範囲外の南西諸島と父島, 南鳥島では1,200~1,600mmである。

左下は年気候湿潤度WIの分布図である。本州の一部(松本と甲府)では $WI < 1$ であるが, 他の日本の大部分では $WI = 1 \sim 2$ である。

図-1の右半分は暖候期4~9月についての同じ分布図である。右上の図に示すポテンシャル蒸発量は, 北海道では500~600mm, 関東以西の南日本では700mm以上である。右下図の気候湿潤度を見ると, 北海道の一部と本州の一部で1以下のところがある。このような地域は, 本来なら水資源的には豊かではない。水資源の不足分は何によって補われているのだろうか? 本研究で示したのは, ほとんど平地に配置された気象官署の値であることに注意すべきで, その周辺の山地では, 特に冬の雪による降水量が平地より多く, しかも積雪のかたちで暖候期まで蓄えられている。これが平地における暖候期の水不足を補っていると考えられるべきだろう。「山ある国は豊か」と言えるのはこのことにある(近藤, 1997)。

V. 森林の無次元蒸発散量

本研究と同じ1986~1990年の5か年間の気象資料を用いて, 日本各地の森林からの蒸発散量 E が求られている(近藤・中園・渡辺・桑形, 1992)。この E の

図-2 ポテンシャル蒸発量で無次元化された森林からの無次元蒸発散量(縦軸)と気候湿潤度(横軸)との関係 白丸プロット: 年間値, 小プロット: 暖候期4~9月半年間の合計。

年間値と暖候期半年値のそれぞれをポテンシャル蒸発量 E_p で無次元化し, 気候湿潤度 P/E_p との関係を図-2に示した。白丸プロットは年間値, 小さいプロットは半年値である。66地点の値はまとまっていることがわかる。横軸が0.6~1の範囲では縦軸は0.6~0.8に分布し, 横軸が増加するにしたがって縦軸は0.8~0.9に収束している。特に暖候期のプロットはばらつきが小さい。図中の45度の直線と縦軸の差が無次元流出量(無次元水資源量)である。

図に示す無次元森林蒸発散量と, 裸地面に対する同様な関係(近藤, 1997, 図-7; Kondo and Xu, 1997, Fig. 16)を比較してみよう。保水性のよい裸地(関東ローム)に対する関係は, この森林に対する関係とほぼ同じである。しかし, 排水のよい粗砂では縦軸の値は約0.3に収束する, つまり粗砂面からの年蒸発量は森林からの年蒸発散量の約1/3である。その代わり, 森林では流出量は $P/E_p > 0.6$ で生じるが, 粗砂からなる地域では $P/E_p > 0.05$ でも生じる。

VI. まとめ

日本各地66個所についてポテンシャル蒸発量の月間値と年間値を1986~1990年の気象資料に基づいて計算し, 表と図に示した。降水量とポテンシャル蒸発量の比「気候湿潤度」の分布図も示した。主な結果は次のとおりである。

(1) 年ポテンシャル蒸発量は北日本では700~900mm, 南日本では1,000~1,200mmである。暖候期4~9月の半年間のポテンシャル蒸発量は北日本で500~700mm, 南日本では700mm以上である。

(2) 年気候湿潤度はほとんどの地点で1~2である。暖候期のみを見ると, 北海道の一部と本州の一部で気候湿潤度が1以下のところもあるが, 他では1~2である。

(3) 森林からの蒸発散量と降水量をポテンシャル蒸発量で無次元化して表示すると, 両者の間にはある関係が見られる。気候湿潤度が1以上の湿潤気候では, 無次元蒸発散量は0.8~0.9の間に分布する。特に暖候期のみについて見ると, ばらつきは小さい。

参考文献

- 近藤純正(1989): 平衡蒸発量と地表面蒸発。水文・水資源学会誌, 2(2), 25-32。
- 近藤純正(1994): 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(1996a): ペンマン式と蒸発計による蒸発

- 量。農業気象, 52(2), 175-179.
- 近藤純正(1996b): 放射量の観測。農業気象, 52(2), 171-174.
- 近藤純正(1997): 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・桑形恒男(1992): 日本の水文気象(1)放射量と水面蒸発。水文・水資源学会誌, 5(2), 13-27.
- 近藤純正・桑形恒男・中園 信(1991): 地域代表風速の推定法。自然災害科学, 10(3), 171-185.
- 近藤純正・中園 信(1993): 日本の水文気象(4)地域代表風速, 熱収支の季節変化, 舗装地と芝生地の蒸発散量。水文・水資源学会誌, 6(1), 9-18.
- 近藤純正・中園 信・渡辺 力(1992): 日本の水文気象(2) 森林における降雨の遮断蒸発量。水文・水資源学会誌, 5(2), 29-36.
- 近藤純正・中園 信・渡辺力・桑形恒男(1992): 日本の水文気象(3) 森林における蒸発散量。水文・水資源学会誌, 5(3), 8-18.
- 近藤純正・徐 健育(1997a): 中国における地表面熱収支・水収支, (1)放射量。水文・水資源学会誌, 10(1), 66-78.
- 近藤純正, 徐 健育(1997b): ポテンシャル蒸発量の定義と気候湿潤度。天気, 44, (印刷中)
- Kondo J. and J. Xu (1997): Seasonal variations in heat and water balances for non-vegetated surfaces. J. Appl. Meteor. (in press)
- Penman, H. L. (1948): Natural evaporation from open water, bare soil, and grass. Proc. Roy. Soc. London, A193, 120-146.
- Penman, H. L. (1956): Evaporation: an introductory survey. Neth. J. Agric. Sci., 4, 9-29.

(受付: 1997年5月7日, 受理: 1997年6月26日)