



Title	尾瀬地域内外における降水量の空間相関
Author(s)	岩熊, 敏夫; Iwakuma, Toshio; 野原, 精一 他
Description	電子資料追加
Citation	低温科学, 80, 549-570
Issue Date	2022-03-31
DOI	https://doi.org/10.14943/lowtemsci.80.549
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/84900
Type	departmental bulletin paper
File Information	42_p549-570_LT80.pdf, 本文



尾瀬地域内外における降水量の空間相関

岩熊 敏夫¹⁾, 野原 精一²⁾

2022年1月25日受付, 2022年2月16日受理

尾瀬内外の地上観測所で観測された降水量の月別・季節別の空間相関を調べた。1981年から2010年までの30年間の日降水量データを月別にまとめ、2変量混合対数正規分布に基づいて尾瀬の観測所との相関を推定し、比較のためピアソン積率相関も検討した。尾瀬内外の気象観測所の類似性を距離、標高差、方位との関係により評価し、高地生態系である尾瀬の降水現象を代表しうる観測所の特定を試みた。

Spatial correlations of precipitation amounts for Oze and surrounding area

Toshio Iwakuma¹, Seiichi Nohara²

Monthly and seasonal spatial correlations of precipitation amounts were studied for Oze and surrounding area. Daily precipitation amounts measured at ground-based observation stations for 30 years were grouped by month to estimate correlations between the station either Yamanohana or Ozenuma in the Oze area and each of other stations based on the bivariate mixed lognormal distribution as well as Pearson's product-moment. Similarities of surrounding stations to stations in the Oze area were examined in terms of distance, difference of altitudes, and direction for each month and season to identify observation stations proxies for the precipitation at the high-altitude Oze ecosystem.

キーワード：尾瀬, 日降水量, 空間相関, 2変量混合対数正規分布, 地上観測所

Oze area, daily precipitation amount, spatial correlation, bivariate mixed lognormal distribution, ground-based observation stations

1. はじめに

尾瀬ヶ原は阿賀野川水系只見川の源流域に位置する高地湿原(標高約1,400 m, 面積6.5 km²)である。尾瀬ヶ原と湿原東方の尾瀬沼(標高1,665 m, 面積1.8 km²)を囲む、只見川流出口(三条ノ滝)までの流域面積は88.8 km²である。この流域を尾瀬地域(以下「尾瀬」と表記)と呼び、国立公園の指定区域とは異なる。尾瀬は東日本太平洋側(群馬県)、北日本日本海側(福島県会津地方)、東日本日本海側(新潟県)の地域区分(または全般季節予報区分, 気象庁, 2020)の境界に位置するため、尾瀬の気象を類型化するのは容易ではない。菊地(2002)は尾瀬山の鼻気象観測所(標高1,405 m, 所在地は尾瀬山の鼻ビジターセンタ, 以下観測所名を「山の鼻」と表記

責任著者

岩熊 敏夫

連絡先

東京都港区

e-mail: toshio.iwakuma@nifty.com

1) 北海道大学

2) 国立環境研究所 生物多様性領域

1 Hokkaido University, Sapporo, Japan

2 Biodiversity Division, National Institute for Environmental Studies, Tsukuba, Japan

して地区名の「山ノ鼻」と区別する)の1月, 4月, 7月, 11月の月別降水量を新潟および前橋の降水量と比較し, 尾瀬の降水型は新潟の降水パターンとの類似から日本海型気候であると指摘した。

尾瀬地域では上記山の鼻に加え, 尾瀬ヶ原気象観測所(「温泉小屋」), 尾瀬沼観測所(以下「尾瀬沼」と表記)の3カ所で気象観測が行われている(表1)。気象データの取りまとめは, 菊地(1999, 2000, 2001), 西村・吉弘(2008), 野原(2012)により行なわれている。西村・吉弘(2008)は山の鼻における1977~2006年の気温, 湿度, 降水量, 風速, 積雪深および地中温度の観測値から気象平年値を算出した。年降水量(1,968.6 mm)および夏期(6~10月)降水量(909.6 mm)の平年値は, 前述平地観測所の新潟および前橋のいずれにおける平年値よりも高い。ただし, 山の鼻も通年観測の期間が限られていることから, 年値または冬期値(12~3月)の統計年数は夏期値の年数の約半分であった(西村・吉弘, 2008)。

一般に月降水量または年降水量は標高に従って増加し(Budyko, 1974)山頂部では減少する傾向が見られる(松野, 1954)。降水量を標高の一次式または二次曲線式, さらには標高に土地の傾斜を加味した式などで表すことが試みられているが(吉野, 1975), 地域や地形により様々である(松野, 1954; 吉野, 1975)。また降水量の地点間の(空間)相関はその距離の増加と共に減少する(Huff and Shipp, 1969; 葛葉ほか, 2002)。尾瀬の気象を表すために, 近隣の松枝岐(標高973 m)や藤原(標高700 m)などのアメダス(AMeDAS)データがしばしば用いられるが, 尾瀬外の観測所のデータから尾瀬の降水現象を推定する上で, 尾瀬からの距離, 標高差および地形的な差異を考慮する必要がある。約17 km間隔に設置されたアメダス観測網は, 尾瀬から10 km圏内にはゼロで, 30 km圏内で4カ所, 最も近い地方気象台である前橋気象台は約63 kmに位置する。一方国土交通省や水資源機構などの水文観測所は, 様々な水系で尾瀬ヶ原よりも標高の高い地点でも降水量の観測を行っている。全ての観測所で通年・長期間観測が実施されていないが, 尾瀬から10 km圏内に7カ所, 30 km圏内で17カ所配置されているなど, 観測密度は高い。

本研究は尾瀬と尾瀬外の気象・水文観測所における日降水量データの空間相関を調べ, 尾瀬の気象観測所との類似性を距離, 標高差, 方位との関係により評価することを目的とした。空間相関解析にはピアソン積率相関または線形回帰係数が広く使われている(葛葉ほか, 2002; De Vera and Terra, 2018)。降水量データの空間相関

解析においては累乗根や対数などの変換による特段の改善は見られていない(Huff and Shipp, 1969)。ゼロを多く含む降水量の頻度分布はこれらの変換により正規化はされない。清水・寒河江(1990)とShimizu(1993)はゼロを含む連続な正実数値をとる2変量混合対数正規分布モデルを提唱し, 同時に2地点で測定されたアメダスデータの解析を行った(「混合」はゼロ点での離散分布と連続分布の混合モデルを意味する)。本研究では, 2変量混合対数正規分布に加えてピアソン積率相関により, 尾瀬と隣接地域における降水量データの空間相関解析を行った。長期間の月別の降水量を比較することで, 欠測を含む山の鼻の測定値を有効に活用することを目指し, 高地生態系である尾瀬の降水特性を代表できる観測地点の特定を試みた。

2. 方法

2.1 対象気象・水文観測所

尾瀬地区では山の鼻気象観測所および尾瀬沼観測所を対象とした。さらに, 尾瀬地域が位置する福島, 群馬, 新潟3県に加え, 東北, 関東, 中部の観測所の情報を収集した。そのうち, 尾瀬ヶ原中田代中央から150 kmまでに位置する766観測所の諸元を電子資料1表1に示した(以下, 距離順の観測所番号を観測所名に併記する)。気象庁気象観測所(アメダス)の種類, 所在地緯度・経度, 標高, 観測開始時期などの情報は気象庁(2018, 2021a)に基づき, 国土交通省水文観測所の水系名, 河川名, 種別, 所在地緯度・経度, 標高, 観測開始時期などの情報は国土交通省(2016, 2021b)に基づいた。緯度・経度は世界測地系に統一した。観測所位置情報が日本測地系のみで与えられている場合は, TKY2JGD Ver.1.3.80(国土地理院, 2021d)により世界測地系に一括計算・変換した。標高が公開されていない観測所については, 緯度・経度からサーバサイドで標高を取得した(国土地理院, 2021b)。尾瀬ヶ原中田代中央(36°55'57.64"N, 139°13'42.7"E), 山の鼻気象観測所および尾瀬沼観測所それぞれから他の観測所までの距離と方位角は, GRS80楕円体に準拠した地球の長半径(6,378,137 m), 扁平率(1/298.257222101)および2地点の緯度・経度から計算される値をサーバから一括取得した(国土地理院, 2021a)。さらに, 5 m DEM(数値標高モデル)標高タイルデータ(国土地理院, 2021c), および行政区域データ(国土交通省, 2021a)を用いた。

中田代中央から半径10 kmごとの円内に分布する気象・水文観測所数とアメダス(内数)は, 10観測所(ア

表1：尾瀬地域および150 km圏の気象・水文観測所の諸元（中田代中央 [36°55'57.64N, 139°13'42.7"E] からの距離順）。a: 県番号 7= 福島県, 9= 栃木県, 10= 群馬県, 15= 新潟県。b: 管理主体 1= 気象庁アメダス観測所, 2= 国土交通省水文水質観測所, 3= 水資源機構水文水質観測所, 4= 尾瀬保護財団山の鼻気象観測所, 5= 東京電力ホールディングス尾瀬沼観測所, 6= 電源開発尾瀬ヶ原気象観測所。c: 稼働状況 1= 観測中, 0= 廃止または稼働停止, 空欄は不明（稼働停止と判断する）を示す。d: 緯度・経度を ddmsss.ss または dddmsss.ss で表す。e: 緯度・経度から5 m 数値標高モデルにより求めた標高。

番号	観測所名	県番号 ^a	管理 ^b	稼働 ^c	水系	位置		標高 (m)		中田代からの		観測開始 時期	ウェブ公開		備考	
						緯度 ^d	経度 ^d	公称	DEM ^e	距離 (km)	方位 (度)		期間	年数		
	中田代中央	Nakatashiro	10													起点
1	温泉小屋	Onsengoya	7	6	1	阿賀野川	3655715.84	1391507.08	1420	1423.8	3.19	41	1961/6	1961 ~	60	夏期のみ観測（菊池, 2002）
2	山の鼻	Yamanohana	10	4	1	阿賀野川	365454.66	1391151.34	1405	1411	3.37	235	1966/6	1977 ~	44	
8	尾瀬沼	Ozenuma	10	5	1	阿賀野川	365510.41	1391824.01	1667	1666.9	7.11	102	1949/12	1950 ~	71	東京電力ホールディングス
3	鳩待峠	Hatomachitoge	10	2	0	利根川	365320.45	1391206	1615	1608.7	5.28	207	1969/6/25	1969 ~ 2009	41	廃止
4	鳩待峠	Hatomachitoge	10	2	1	利根川	365324	1391205	1590	1601.5	5.32	207	1989/11/19	1989 ~ 2019	32	
5	三平峠	Sanpeitoge	10	2	1	利根川	365440	1391755	1670	1675.6	6.69	111	1976/7/22	2002 ~ 2019	19	
6	悪沢	Warusawa	10	3		利根川	365329	1391020	2042	2036.7	6.79	228		2002 ~ 2009	8	
7	戸倉	Tokura	10	2	1	利根川	365216	1391447	1300	1350.7	7.02	167	1965/10/17	1965 ~ 2019	56	
9	矢種	Yadane	10	3		利根川	365525	1390827	1337	1331.2	7.88	263		2002 ~ 2009	8	
10	坤六峠	Konrokutoge	10	2	1	利根川	365132	1391112	1625	1628.9	9	205	1974/6/1	1974 ~ 2019	47	
11	根羽沢	Nebasawa	10	2	1	利根川	365219	1391942	1300	1285	11.16	127	1972/6/1	2002 ~ 2019	19	
12	タキガ沢	Takigasawa	10	3		利根川	365026	1391000	1502	1500	11.62	208		2002 ~ 2009	8	
13	小穂口	Obokuchi	10	3		利根川	365831	1390626	954	964	11.79	294		2002 ~ 2009	8	
14	土出	Tsuchiide	10	2	1	利根川	364859	1391422	870	862	12.94	176	2002/5/1	2002 ~ 2019	19	
15	奈良俣	Naramata	10	3		利根川	365257	1390512	931	930	13.81	246		2002 ~ 2010	8	
16	木の根沢	Kinonesawa	10	3		利根川	365118	1390623	914	914	13.89	232		2002 ~ 2009	8	
17	湯ノ小屋	Yunokoya	10	2	1	利根川	365220	1390524	850	801	14.05	242	1958/9/1	1958 ~ 2019	63	
18	丸沼	Marunuma	10	2	0	利根川	364832	1391837	1180	1175	15.55	152	2004/5/1	2004 ~ 2008	4	廃止
19	桜枝岐	Hinoemata	7	1	1	阿賀野川	370036	1392230	973	999	15.61	57	1978/10/31	1978 ~ 2020	43	
20	丸沼ダム	Marunuma dam	10	2	1	利根川	364922	1392022	1750	1445	15.7	141	1965/10/17	1965 ~ 2019	56	丸沼標高 1425m
21	矢木沢	Yagisawa	10	3		利根川	365442	1390314	870	855	15.73	262		2002 ~ 2010	8	
22	加仁湯	Kaniyu	9	2	1	利根川	365207	1392351	1410	1406	16.65	115	1966/5/28	1966 ~ 2019	55	
23	藤原	Fujiwara	10	1	1	利根川	365200	1390330	700	696	16.85	244	1977/11/11	1977 ~ 2020	44	
24	越後沢山	Egigawayama	15	2	1	信濃川	370119	1390359	1297	1293	17.51	305	1899/12/31	2008 ~ 2013	13	
25	小川	Ogawa	10	2	0	利根川	364623	1391345	804	801	17.71	180	1959/4/1	2002 ~ 2009	8	廃止
26	奈良沢	Narasawa	10	3		利根川	365713	1390149	869	885	17.81	278		2002 ~ 2009	8	
27	片品	Katashina	10	1	1	利根川	364618	1391418	860	862	17.89	177	1977/7/19	1977 ~	44	
28	鎌田	Kamata	10	2	1	利根川	364607	1391324	760	774	18.21	181	1965/10/17	1965 ~ 2019	56	
29	宝川	Takaragawa	10	2	1	利根川	365048	1390258	735	732	18.6	239	1958/9/1	1958 ~ 2019	63	
30	前武尊	Maehotaka	10	1	0	利根川	364606	1390948	1530	1276	19.14	198	1976/5/27	1976 ~ 1981	5	
31	内膳落合	Naizenochiai	15	2	1	信濃川	370229	1390340	610	603	19.18	309	1991/9/1	2011 ~ 2019	10	
32	針山	Hariyama	10	2	1	利根川	364536	1391043	1020	1025	19.67	193	2004/5/1	2004 ~ 2019	17	
33	花咲	Hanasaku	10	2	1	利根川	364506	1391122	890	886	20.39	190	1958/2/1	1958 ~ 2019	63	
34	日向山	Hinatayama	15	2	1	信濃川	370414	1390331	1554	1556	21.51	315	1989/12/31	2008 ~ 2013	13	
35	武尊高原	Hotakakogen	10	2	1	利根川	364548	1390605	1371	1303	21.95	211	1980/10/1	1980 ~ 2019	41	
36	湯元	Yumoto	9	2	1	利根川	364827	1392510	1500	1506	21.97	129	1993/5/1	2002 ~ 2019	19	
37	下津川	Shimotsugawa	15	2	1	信濃川	370100	1390016	1043	1045	22.02	295	1899/12/31	2008 ~	13	
38	藤原	Fujiwara	10	2	1	利根川	364822	1390216	667	661	22.06	231	1958/9/1	1952 ~ 2019	69	
39	玉原	Tanbara	10	5		利根川	364634	1390330		1196	23.07	221		2002 ~ 2010	9	
40	田代山	Tashiroyama	7	1	0	阿賀野川	365848	1392854	1920	1904	23.15	77	1976/6/29	1976 ~ 2009	33	
41	高手山	Takateyama	10	1	0	利根川	364500	1390554	1115	1079	23.36	210	1981/7/30	1981 ~ 2009	28	
42	平滝	Hirataki	10	2	1	利根川	364343	1391836	950	953	23.78	162	1972/6/1	2002 ~ 2019	19	
43	奈良	Naro	10	2	1	利根川	364307	1391553	1090	937	23.97	172	1965/10/17	1965 ~ 2019	56	
44	山王帽子	Sannoboshi	9	2	1	利根川	364848	1392717	1780	1712	24.13	123	1962/10/1	2002 ~ 2019	19	
45	三國川ダム	Sagurigawa_dam	15	2	1	信濃川	370319	1390009	440	412	24.29	304	1991/9/1	2011 ~ 2019	10	
46	五十沢	Ikasawa	15	2	1	信濃川	370315	1385930	300	304	25.03	303	1974/5/1	2002 ~ 2020	19	
47	白窪	Usukubo	9	2	1	利根川	365400	1393049	1110	1106	25.66	98	1966/5/27	1966 ~ 2019	55	
48	みなかみ	Minakami	10	1	1	利根川	364800	1385930	531	529	25.75	235	1975/5/20	1975 ~ 2020	46	
49	枝折峠	Shioritoge	15	1	0	信濃川	370918	1390748	1060	1051	26.18	340	1976/6/30	1976 ~ 1980	5	
50	上馬坂	Kamiumasaka	9	2	1	利根川	365635	1393137	1480	1267	26.61	87	1983/8/20	1983 ~ 2019	38	
51	川俣	Kawamata	9	2	1	利根川	365238	1393112	998	979	26.7	103	1964/10/10	1966 ~ 2019	55	
52	白倉沢	Shirakurasawa	10	2	1	利根川	364129	1391408	850	852	26.78	179	1983/6/1	2002 ~ 2019	19	
53	戦場ヶ原	Senjogahara	9	2	1	利根川	364610	1392720	1395	1392	27.17	132	1993/5/1	2002 ~ 2019	19	
54	清水	Shimizu	15	2	1	信濃川	365710	1385517	590	585	27.45	275	1957/9/1	2002 ~ 2020	19	
55	八海	Hakkai	15	2	1	信濃川	370748	1390226	446	452	27.55	323	1975/7/10	2009 ~ 2020	12	
56	野門	Nokado	9	2	1	利根川	365139	1393134	853	965	27.7	107	1959/4/1	2002 ~ 2019	19	
57	黒檜岳	Kurobidake	9	2	1	利根川	364330	1392433	1965	1960	28.12	145	1968/5/1	2002 ~ 2019	19	
58	宮村	Miyamura	15	2	1	信濃川	370328	1385651	220	297	28.61	299	1948/7/11	2009 ~ 2020	12	
59	栗原	Kurihara	10	2	1	利根川	364035	1391831	1398	1399	29.33	166	1985/4/1	1985 ~ 2019	36	
60	湯原	Yubara	10	2	1	利根川	364559	1385806	500	489	29.65	232	1936/6/1	1936 ~ 2020	85	
61	発知	Hocchi	10	2	1	利根川	364136	1390332	510	513	30.57	210	1955/10/1	1955 ~ 2019	66	
62	土呂部	Dorobu	9	1	1	利根川	365330	1393406	925	920	30.62	98	1977/11/10	1977 ~	44	
63	唐沢小屋	Karasawagoya	9	2	1	利根川	364831	1393219	2242	2251	30.89	116	1987/7/24	2002 ~ 2019	19	
64	野州原	Yashubara	9	2	1	利根川	364651	1393124	1580	1587	31.23	123	1987/7/24	2002 ~ 2019	19	
65	大倉	Okura	15	2	1	信濃川	370846	1385945		240	31.46	139	2017/12/13	2017 ~ 2020	4	
66	社山	Shazan	9	2	1	利根川	364307	1392740	1540	1338	31.54	319	1961/6/1	2002 ~ 2019	19	
67	庚申山	Koshinzan	9	2	1	利根川	364012	1392207	1490	1486	31.72	157	1953/6/1	2002 ~ 2019	19	
68	松木川一号	Matsukigawaichigo	9	2	1	利根川	364128	1392511	845	831	31.78	147	1968/6/1	2002 ~ 2019	19	
69	館岩	Tateiwa	7	1	1	阿賀野川										

番号	観測所名		県番号 ^a	管理 ^b	稼働 ^c	水系	位置		標高 (m)		中田代からの		観測開始 時期	ウェブ公開		備考
							緯度 ^d	経度 ^d	公称	DEM ^e	距離 (km)	方位 (度)		期間	年数	
72	奥日光	Okunikko	9	1	1	利根川	364418	1393000	1292	1279	32.43	132	1974/11/1	1974 ~ 2020	47	日光特別地域気象観測所
73	東明神	Higashimyojin	9	2	1	利根川	365427	1393532	1233	1113	32.53	95	1981/8/12	1981 ~ 2019	40	
74	久蔵	Kuzo	9	3	0	利根川	364134	1392618		1012	32.55	145		2002 ~ 2010	9	
75	倉見川	Kuramigawa	10	2	1	利根川	363828	1391718	1285	1284	32.79	171	1953/7/1	2002 ~ 2019	19	
76	蘭原	Sonohara	10	2	1	利根川	363816	1391031	582	564	33.07	188	1964/11/1	1963 ~ 2019	58	
77	土樽	Tsuchitaru	15	2	1	信濃川	365240	1385148	546	588	33.11	260	1965/5/13	2009 ~ 2020	12	
78	女峰	Nyoho	9	2	1	利根川	364749	1393340	1368	1352	33.26	117	1956/5/1	2002 ~ 2019	19	
79	大湯	Oyu	15	2	1	信濃川	371219	1390420	275	262	33.29	335	1954/6/11	1993 ~ 2020	28	
80	茶ノ木平	Chanokidaira	9	2	1	利根川	364334	1393002	1610	1615	33.38	133	1993/5/1	2002 ~ 2019	19	
81	唐沢	Karasawa	9	2	1	利根川	365157	1393546	1032	719	33.59	103	1981/8/12	1981 ~ 2019	40	
82	大湯	Oyu	15	1	1	信濃川	371218	1390342	240	246	33.67	334	1981/5/22	1981 ~ 2020	40	
83	モッコ平	Mokkodaira	9	2	1	利根川	364656	1393326	1301	1372	33.73	120	1987/7/24	2002 ~ 2019	19	
84	六日町	Muikamachi	15	2	1	信濃川	370342	1385253	164	162	34.06	295	1979/12/1	2002 ~ 2020	19	
85	南郷	Nango	10	2	0	利根川	363737	1391121	589	576	34.11	186	1954/7/1	2002 ~ 2009	8	廃止
86	初音	Hatsune	9	2	1	利根川	364602	1393305	1186	1168	34.15	122	1987/7/24	2002 ~ 2019	19	
87	日向	Hinata	9	2	1	利根川	364721	1393417	1172	1175	34.47	117	1987/7/24	2002 ~ 2019	19	
88	丹勢山	Tanzeyama	9	2	1	利根川	364458	1393230	1301	1307	34.55	126	1987/7/24	2002 ~ 2019	19	
89	銀山平	Ginzandaira	9	3	0	利根川	363921	1392424		849	34.59	153		2002 ~ 2010	9	
90	茗ノ沢	Myogasaki	15	2	1	信濃川	370947	1385758	144	174	34.62	318	1948/8/1	2009 ~ 2020	12	
91	五日町	Itsukamachi	15	2	1	信濃川	370558	1385353	155	155	34.75	302	1957/9/1	2002 ~ 2020	19	
92	餅ノ瀬	Mochigase	9	2	0	利根川	363809	1392142	1060	1060	35.02	160		2002 ~ 2010	9	
93	細尾	Hosoo	9	3	0	利根川	364245	1393050		1233	35.29	134		2002 ~ 2010	9	
94	深沢	Fukazawa	9	2	1	利根川	364033	1392759	1025	1014	35.54	143	1985/4/1	2002 ~ 2019	19	
95	白糸	Shiraito	9	2	1	利根川	364649	1393456	942	943	35.79	118	1987/7/24	2002 ~ 2019	19	
96	塩沢	Shiozawa	15	1	1	信濃川	370218	1385048	195	184	35.96	289	1983/6/14	1983 ~ 2020	38	
97	久次良	Kujira	9	2	1	利根川	364523	1393415	1005	1006	36.26	123	1987/7/24	2002 ~ 2019	19	
98	川古	Kawafuru	10	2	1	利根川	364459	1385322	661	663	36.43	236	1960/4/1	1960 ~ 2019	61	
99	袈裟丸山	Kesamaruyama	10	2	1	利根川	363700	1392102	1595	1601	36.72	163	1955/6/1	2002 ~ 2019	19	
100	新地川	Shinchigawa	10	2	1	利根川	363607	1391618	955	947	36.9	174	1953/7/1	2002 ~ 2019	19	
101	湯沢	Yuzawa	15	2	1	信濃川	365616	1384851	340	340	36.92	271	1938/7/7	1993 ~ 2020	28	
102	沼田	Numata	10	1	1	利根川	363818	1390159	390	385	37.03	208	1974/11/1	1974 ~ 2020	47	
103	沼田	Numata	10	2	1	利根川	363818	1390159	316	316	37.03	208	1949/6/1	1949 ~ 2019	72	
104	湯沢	Yuzawa	15	1	1	信濃川	365630	1384836	340	330	37.3	272	1974/11/1	1976 ~ 2020	45	
105	足尾	Ashio	9	1	1	利根川	363848	1392654	650	680	37.31	148	1975/5/20	1976 ~ 2020	45	
106	鷹の巣	Takanosu	10	2	1	利根川	363555	1391037	900	888	37.36	187	2004/5/1	2004 ~ 2019	17	
107	霧降	Kirifuri	9	2	1	利根川	364717	1393634	912	917	37.57	115	1987/7/24	2002 ~ 2019	19	
108	足尾	Ashio	9	2	1	利根川	363820	1392646	634	627	37.95	149	1899/1/1	1989 ~ 2019	32	
109	三村界	Sansonkai	10	2	1	利根川	363536	1391804	1250	1248	38.21	170	1973/7/6	2002 ~ 2019	19	
110	相模	Aimata	10	2	1	利根川	364250	1385340	572	572	38.44	231	1959/4/1	1959 ~ 2019	62	
111	湯西川ダム	Yunishigawa_dam	9	2	1	利根川	365604	1393947	690	740	38.71	90		2011 ~ 2019	10	
112	宮ノ下	Miyanoshita	15	2	1	信濃川	365944	1384748		305	39.09	280	1966/6/1	2009 ~ 2020	12	
113	大峰	Omine	15	2	1	信濃川	365556	1384719	960	972	39.19	270	1974/7/1	2002 ~ 2020	28	
114	古峰ヶ原	Kominegahara	9	2	1	利根川	363901	1392950	1195	1196	39.46	142	1957/5/15	2002 ~ 2019	19	
115	日光	Nikko	9	2	1	利根川	364512	1393655		561	39.83	120	1936/4/15	2002 ~ 2019	19	
116	小出	Koide	15	1	1	信濃川	371336	1385748	98	97	40.26	324	1974/11/1	1976 ~ 2020	45	
117	破間川出張所	Aburumagawa	15	2	1	信濃川	371359	1385805	108	108	40.59	325	1989/10/1	2009 ~ 2020	12	
118	永井	Nagai	10	2	1	利根川	364434	1385003	947	949	41.01	239	1950/5/16	1959 ~ 2019	62	
119	大沢峠	Osawatoge	15	1	0	信濃川	370218	1384712	673	623	41.05	287	1976/6/20	1976 ~ 1982	7	
120	花見ヶ原	Hanamigahara	10	2	1	利根川	363345	1391404	1015	1024	41.08	179	1956/7/1	2002 ~ 2019	19	
121	地蔵	Jizo	9	3	0	利根川	363644	1392734		1055	41.11	150		2002 ~ 2010	9	
122	六十里越	Rokujurigo	7	1	0	阿賀野川	371812	1391300	860	886	41.15	359	1980/6/19	1980 ~ 2009	29	
123	二居	Futai	15	2	1	信濃川	365048	1384645	832	835	41.18	257	1948/7/21	2002 ~ 2019	19	
124	小中	Konaka	10	2	1	利根川	363402	1391949	514	532	41.56	167	1957/5/17	1989 ~ 2019	32	
125	五十里	Ikari	9	1	1	利根川	365518	1394142	620	624	41.58	92	1975/5/20	1976 ~ 2020	45	
126	川治	Kawaji	9	2	1	利根川	365359	1394141	634	619	41.7	95	1981/8/12	1981 ~ 2019	40	
127	中三依	Nakamiyori	9	2	1	利根川	365907	1394133	632	631	41.73	82	1951/1/1	1956 ~ 2019	65	
128	方塞山	Hosaizan	9	1	0	利根川	363748	1393030	1385	1364	41.86	143	1976/4/30	1976 ~ 2004	28	
129	滝ヶ原	Takigahara	9	2	1	利根川	364134	1393527	500	474	41.88	129	1993/5/1	2002 ~ 2019	19	
130	雨見山	Amamiyama	10	1	0	利根川	364124	1385148	825	836	42.27	231	1976/5/14	1976 ~ 2009	33	
131	浅貝	Asakai	15	2	1	信濃川	364725	1384710	947	909	42.5	248	1977/7/1	2009 ~ 2019	12	
132	五十里	Ikari	9	2	1	利根川	365413	1394215	610	600	42.51	94	1955/1/1	1957 ~ 2019	64	
133	楡沢	Niresawa	10	2	1	利根川	363251	1391456	720	719	42.78	178	1978/2/21	2002 ~ 2019	19	
134	高百	Takabayaku	9	2	1	利根川	364530	1393930	472	470	42.94	117	1984/4/19	1984 ~ 2019	37	
135	堀之内	Horinouchi	15	2	1	信濃川	371431	1385552	87	84	43.33	322	1979/10/1	2002 ~ 2020	19	
136	明神	Myojin	15	2	1	信濃川	371216	1385227	180	177	43.62	314	1955/12/16	2002 ~ 2019	28	
137	赤城山	Akagiyama	10	1	0	利根川	363224	1391030	1660	1646	43.84	186	1976/5/7	1976 ~ 2009	33	
138	赤城山	Akagiyama	10	2	1	利根川	363223	1391035	1686	1669	43.86	186	1987/2/20	1987 ~ 2019	34	
139	黒坂石川	Kurosakaishikawa	10	2	1	利根川	363510	1392840	1025	1026	44.43	150	1957/5/14	2002 ~ 2019	19	
140	神戸	Godo	10	2	1	利根川	363214	1392024	327.5	321	45	167	1959/4/1	1989 ~ 2019	32	
141	鳥居川	Torigawa	10	2	1	利根川	363123	1391404	635	642	45.45	179	1976/5/7	2002 ~ 2019	19	
142	浅草岳	Asakusadake	7	1	0	阿賀野川	372036	1391412	1520	1481	45.58	1	1976/6/18	1976 ~ 1977	2	
143	南郷	Nango	7	1	1	阿賀野川	371554	1393212	494	490	45.94	37	1974/11/1	1976 ~ 2020	45	
144	駒止峠	Komadometoge	7	1	0	阿賀野川	371236	1393648	1145	1124	46.02	48	1976/6/21	1976 ~ 2009	35	
145	藤原	Fujihara	9	2	1	利根川	365105	1394406	416	428	46.04	101	1959/4/1	2002 ~ 2019	19	
146	今市	Imaichi	9	1	1	利根川	364336	1394036	414	414	46.05	120	1978/12/21	1978 ~ 2020	43	
147	小栗川	Okorogawa	9	2	1	利根川	363951	1393723	345	348	46.13	130	1993/5/1	2002 ~ 2019	19	
148	滝の原	Takinohara	7	2	1	阿賀野川	370542	1394223	695	708	46.19	67	1952/11/1	1993 ~ 2019	28	

番号	観測所名	県番号 ^a	管理 ^b	稼働 ^c	水系	位置		標高 (m)		中田代からの		観測開始 時期	ウェブ公開		備考	
						緯度 ^d	経度 ^d	公称	DEM ^e	距離 (km)	方位 (度)		期間	年数		
149	只見	Tadami	7	1	1	阿賀野川	372036	1391848	377	375	46.19	9	1976/7/20	1976～2020	45	
150	七ツ釜	Nanatsugama	15	2	1	信濃川	365845	1384240		398	46.38	277	1899/12/31	2009～2020	12	
151	五味沢	Gomisawa	15	2	1	信濃川	372101	1391021	462	447	46.61	354	1970/6/1	2009～2020	12	
152	草久	Kusakyu	9	2	1	利根川	363824	1393622	340	327	46.81	134	1923/8/1	1989～2019	32	
153	入粟野	Iriawano	9	2	1	利根川	363601	1393308	490	478	46.86	142	1982/4/1	2002～2019	19	
154	高原	Takahara	9	2	1	利根川	365347	1394510	1370	1364	46.89	95	1984/5/11	1984～2019	37	
155	赤湯	Akayu	15	2	1	信濃川	364846	1384319	1060	1138	47.09	254	1964/7/1	2009～2020	12	
156	山王峠	Sannotoge	7	1	0	阿賀野川	370406	1394354	1080	1009	47.25	71	1976/6/7	1976～2009	34	
157	針生	Hariu	7	2	1	阿賀野川	371109	1393922	740	745	47.28	53	1983/8/1	2002～2020	19	
158	小野子	Onoko	10	2	1	利根川	363338	1385805	508	509	47.4	209	1985/4/1	1985～2019	35	
159	十日町	Tokamachi	15	2	1	信濃川	370828	1384534	168	140	47.72	299	1999/4/1	2002～2020	19	
160	黒保根	Kurohone	10	1	1	利根川	363006	1391700	285	287	48.08	174	1978/6/16	1978～2020	43	
161	倉俣	Kuramata	15	2	1	信濃川	370054	1384150	256	365	48.18	281	1970/6/19	2009～2020	12	
162	小平川	Kodairagawa	10	2	1	利根川	363024	1392126	975	975	48.65	166	1972/6/15	2002～2019	19	
163	守門	Sumon	15	1	1	信濃川	372048	1390236	222	220	48.8	340	1975/5/21	1976～2020	45	
164	十日町(姿)	Tokamachi-Sugata	15	2	1	信濃川	370545	1384306	152	144	48.88	292	1986/11/28	2002～2020	19	
165	津南	Tsunan	15	1	1	信濃川	365948	1384100	452	457	49.07	278	1974/11/1	1976～2020	45	
166	津久原	Tsukuhara	10	2	1	利根川	363043	1392500	361	360	49.62	160	1965/5/1	2002～2019	19	
167	上条	Kamijo	15	2	1	信濃川	372127	1390313	230	226	49.64	342	1952/7/24	1993～2020	28	
168	四方	Shima	10	2	1	利根川	364111	1384546	710	706	49.74	237	1985/4/1	1985～2019	36	
169	十日町	Tokamachi	15	1	1	信濃川	370836	1384336	170	187	50.4	298	1974/11/1	1976～2020	45	
170	中之条	Nakanajo	10	2	1	利根川	363517	1385105	350	353	50.96	221	1936/6/17	1936～2019	85	
171	下塩原	Shimoshibara	9	2	1	那珂川	365737	1394805	890	887	51.12	86	1962/6/1	2002～2018	19	
172	中之条	Nakanajo	10	1	1	利根川	363512	1385100	354	344	51.15	221	1975/5/20	1976～2020	45	
209	前橋	Maebashi	10	1	1	利根川	362418	1390336	112	111	60.46	194	1896/12/1	1896～2020	125	前橋地方気象台
269	宇都宮	Utsunomiya	9	1	1	利根川	363254	1395206	119	118	71.31	127	1989/12/20	1890～2020	131	宇都宮地方気象台
354	若松	Wakamutsu	7	1	1	阿賀野川	372918	1395436	212	211	86.38	44	1953/8/13	1953～2020	68	若松特別地域気象観測所
361	熊谷	Kumagaya	11	1	1	荒川	360900	1392248	30	30	87.91	171	1975/3/3	1896～2020	125	熊谷地方気象台
367	軽井沢	Karuizawa	20	1	1	信濃川	362006	1383348	950	946	89.1	222	1925/1/1	1925～2020	96	軽井沢特別地域気象観測所
373	高田	Takada	15	1	1	関川	370624	1381448	13	12	89.48	283	1922/1/10	1922～2020	99	高田特別地域気象観測所
377	白河	Shirakawa	7	1	1	阿武隈川	370754	1401254	355	355	90.51	76	1940/1/1	1940～2020	81	白河特別地域気象観測所
418	長野	Nagano	20	1	1	信濃川	363942	1381130	418	419		252	1889/1/1	1889～2020	132	長野地方気象台
459	秩父	Chichibu	11	1	1	荒川	355924	1390424	232	231	105.53	188	1975/11/28	1926～2020	95	秩父特別地域気象観測所
472	新潟	Niigata	15	1	1	信濃川	375336	1390106	4	4	108.23	350	1881/7/1	1881～2020	140	新潟地方気象台
586	つくば	Tsukuba	8	1	1	利根川	360324	1400730	25	23	126.1	140	1990/3/9	1921～2020	100	高層気象台
591	水戸	Mito	8	1	1	那珂川	362248	1402800	29	28	126.56	119	1975/3/3	1897～2020	124	水戸地方気象台
659	松本	Matsumoto	20	1	1	信濃川	361448	1375812	610	611	135.94	236	1898/1/1	1898～2020	123	松本特別地域気象観測所
690	諏訪	Suwa	20	1	1	天竜川	360242	1380630	760	762	140.63	226	1945/1/1	1945～2020	76	諏訪特別地域気象観測所
709	福島	Fukushima	7	1	1	阿武隈川	374530	1402812	67	67	143.17	50	1889/5/1	1889～2020	132	福島地方気象台
728	東京	Tokyo	13	1	1		354130	1394500	25	22	145.45	161	2007/11/1	1875～2020	146	東京管区気象台
759	小名浜	Onahama	7	1	1	鮫川	365648	1405412	3	1	149.2	89	1910/5/1	1910～2020	111	小名浜特別地域気象観測所

メダス 0 ; 10 km), 32 (3 ; 20 km), 60 (4 ; 30 km), 115 (12 ; 40 km), 168 (20 ; 50 km), 204 (26 ; 60 km), 260 (40 ; 70 km), 324 (56 ; 80 km) である。アメダスは 10 km 圏内にはゼロで、30 km 圏内で 4 カ所である。最も近い地方気象台は前橋(観測所番号と距離、以下同じ、209 ; 62.93 km)で、宇都宮(269 ; 71.31 km)、熊谷(361 ; 87.91 km)、長野(418 ; 97.30 km)、新潟(472 ; 108.23 km)、つくば(586 ; 高層気象台、126.42 km)、水戸(591 ; 126.56 km)、福島(709 ; 143.17 km)、東京(管区気象台、728 ; 145.45 km)と続く。特別地域気象観測所は若松(354 ; 86.38 km)、軽井沢(367 ; 89.10 km)、高田(373 ; 89.48 km)、白河(377 ; 96.61 km)、秩父(459 ; 105.53 km)、松本(659 ; 135.94 km)、諏訪(690 ; 140.63 km)、小名浜(759 ; 149.20 km)である(図 1, 電子資料 1 表 1)。

本研究では、電子資料 1 表 1 に示す気象・水文観測所のうち、中田代中央から半径 51.2 km の範囲内の観測所(表 1, 1 ~ 172, 以下この範囲を「50 km 圏」と呼ぶ)およびその外側で中田代中央から半径 150 km の範囲内

の 17 の地方・管区気象台、特別地域気象観測所(表 1, 209 ~ 759, 以下この範囲を「150 km 圏」と呼ぶ)を対象とした。

2.2 日降水量データ

2.2.1 尾瀬における降水量地上観測

山の鼻(3 ; 3.37 km)については、1977 年から 1988 年までは夏期(5 ~ 10 月または 4 ~ 11 月)、1988 年 11 月から 2011 年 3 月までは通年、2011 年から 2015 年までは夏期(5, 6 月 ~ 10, 11 月)の日降水量データが公開されている。1987 年および 2016 ~ 2018 年の間は降水量観測が行われていない(尾瀬保護財団, 2021)。使用する雨量計の違いにより、降水ゼロとする閾の降水量が異なり、0.5 mm (1977 年 ~ 1992 年の夏期)、0.1 mm (1988 ~ 1993 年 5 月の冬期)、0.5 mm (1993 年 ~ 2011 年 3 月)そして 0.2 mm (2011 年 6 月以後)である。尾瀬沼(8 ; 7.11 km)では 1949 年 12 月から日降水量が記録され、1969 年までは 0.1 mm 単位で、それ以後は 1 mm 単位

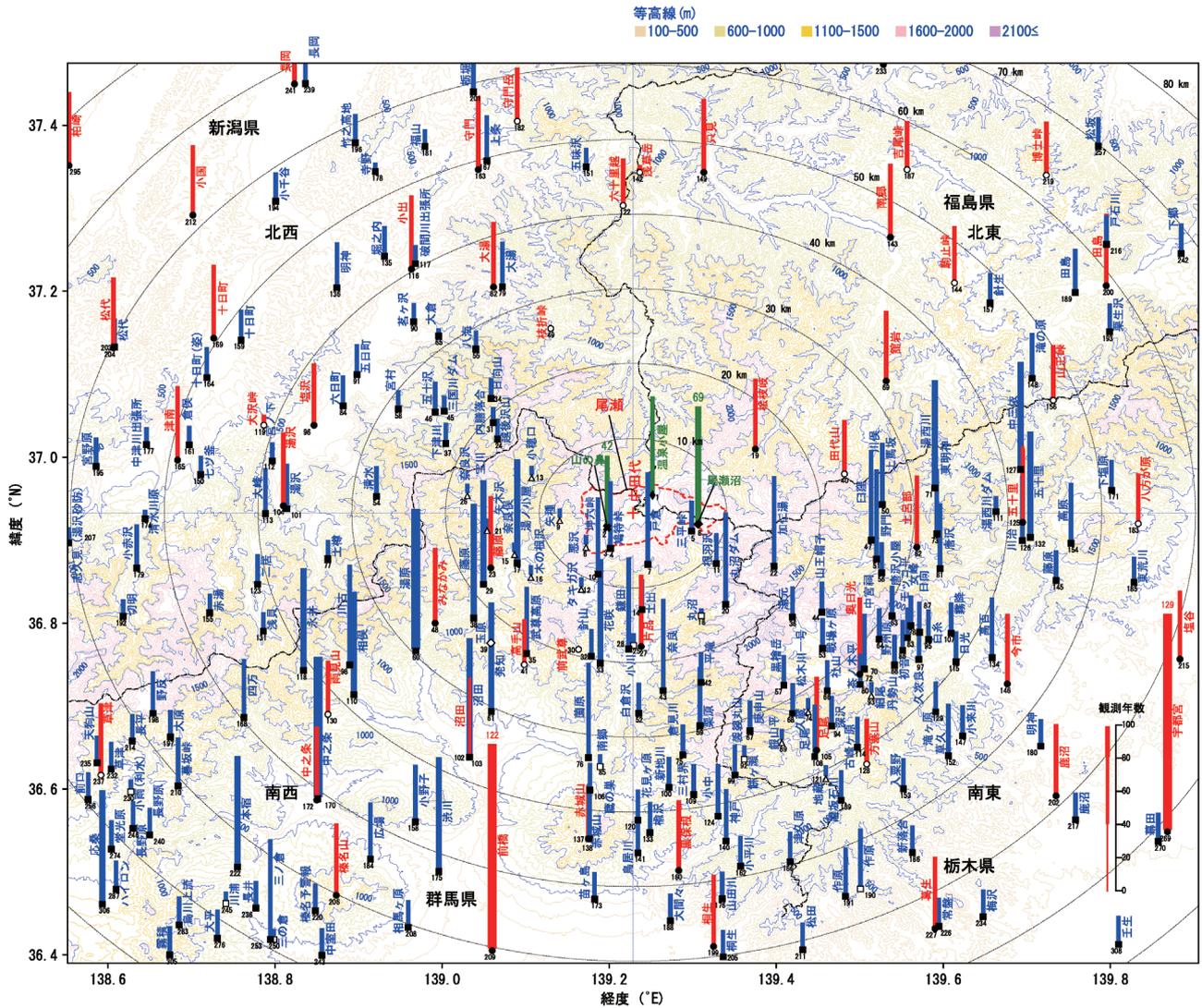


図1：尾瀬地域および周辺の気象・水文観測所の分布。赤破線で稜線が囲まれた部分は尾瀬地域。中田代中央（36°55'57.64"N, 139°13'42.7"E, +印）からの距離順に記号と観測所番号を付し、2020年時の観測継続年数を棒グラフで示した。いくつかの観測所には棒グラフの上に観測継続年数をイタリック体数字で示した。破線の円は中田代中央からの距離を示す。記号および主な観測所名・標高は下記のとおり。（観測所の詳細は電子資料1表1を参照）。

●○：気象庁アメダス・地域気象観測所・特別地域気象観測所（19= 桧枝岐, 973 m, 23= 藤原, 700 m, 27= 片品, 860 m, 48= みなかみ, 531 m, 209= 前橋, 112 m, 269= 宇都宮, 119 m）；■□：国土交通省水文水質観測所（4= 鳩待峠, 1,590 m, 5= 三平峠, 1,670 m, 7= 戸倉, 1,300 m, 17= 湯ノ小屋, 850 m, 22= 加仁湯, 1,410 m, 60= 湯原, 500 m, 103= 沼田, 316 m）；◆◇：東京電力観測所（8= 尾瀬沼, 1,667 m）；×：尾瀬保護財団気象観測所（2= 山の鼻, 1,411 m）；◆：電源開発気象観測所（1= 尾瀬ヶ原, 1,424 m）；▲△：水資源機構観測所（6= 悪沢, 2,042 m, 9= 矢種, 1,337 m, 12= タキガ沢, 1,502 m）。塗りつぶしの記号は観測中、白抜きの記号は廃止または稼働停止の観測所を示す。

で記録されている。

2.2.2 尾瀬外の地域における降水量地上観測

気象庁アメダスにおける日降水量データ（気象庁, 2021b）は0.5 mm単位で記録されている。

国土交通省水文水質観測所における日降水量は各観測所の雨量年表（国土交通省, 2021b）に1.0 mm単位で公開されている確定値を用いた。水資源機構および東京電力の水文水質観測所の降水量観測データは、時間雨量月表（国土交通省, 2021b）に1.0 mm単位の時間降水量暫

定値のみが公開されている。そのため奈良俣（15）、木の根沢（16）、矢木沢（21）、久蔵（74）、銀山平（89）、餅ヶ瀬（92）、細尾（93）、地蔵（121）および東京電力玉原（39）の9観測所は解析対象から除外した。ただし、尾瀬近隣の悪沢（観測所番号6）、矢種（9）、タキガ沢（12）、小穂口（13）の水資源機構4観測所については、時間降水量を積算し日降水量を求めた。欠測又は入力のない時間帯を含む日については日降水量を欠測とした。

2.3 相関係数

2.3.1 解析期間・データセット

178の観測所別に1936年から2020年までの日降水量データを整理した(データセットAと呼ぶ)。観測所および観測時期により降水ゼロとする閾の降水量が異なるため、日降水量1mm未満の0.2mmや0.5mmなどの計測値は全て0mmとした。

次に、できるだけ多くの観測所の観測データが重なり合う期間を探り、平年値算出期間に相当する1981～2010年の30年間を解析期間とした。期間選定の条件は、(1)1970年代後半に整備されたアメダスの観測期間、(2)2000年代からウェブ公開された水文水質観測所データの観測期間、(3)2009年秋頃に休止された比較的高地(標高1,000m以上)に位置する観測所のデータを含む期間、(4)山の鼻における通年観測データ(1989～2010)が長く得られる期間、(5)尾瀬沼の通年観測期間、および(6)観測所間で相互に冬期の欠測データが少ない組合せが得られること、の6つである。観測所によっては観測期間が短く(表1)、例えば、2010年までの観測データがない内膳落合(31)、三国川ダム(45)、大倉(65)、湯西川ダム(111)、休止アメダスの前武尊(30)、枝折峠(49)、浅草岳(142)は除外された(電子資料2図1)。

データセットAから1月から12月ごとに30年分を抽出し、月別に日付ごとの降水量のデータセットを作成した(データセットB1～B12と呼ぶ)。サイズは1, 3, 5, 7, 8, 10, 12月(B1, B3, B5, B7, B8, B10, B12)が930日、2月(B2)が847日、その他の月(B4, B6, B9, B11)が900日で観測所数は178である。冬期間欠測の観測所もあるため参照可能な観測所数は月ごとに異なる。山の鼻と他の観測所あるいは尾瀬沼と他の観測所間の組合せごとに対データの相関係数を計算した。少なくとも4年分(31日×4)の対データを計算の条件とし、対の数が122日以下の場合には相関係数の計算を行わなかった。

2.3.2 空間相関

日本の日降水量1.0mm以上の年間日数は1900～

2020年の間で減少を続け、1981～2010年の期間では113～123日(5年移動平均値)である(気象庁, 2020)。すなわち、ある期間中の無降水の割合はおおむね0.66～0.69であり、観測所間の降水量の比較を行う場合、多くのゼロ値を考慮しなくてはならない。時間降水量、日降水量の頻度分布はゼロを最大頻度とする凹型単調減少を示し(電子資料2図2)、正規分布を前提とした統計解析手法を適用するときは注意が必要である。Huff and Shipp (1969)は1分降水量、10分平均降水量の空間相関解析のために平方根変換、1/4乗変換、対数変換を試みたが、空間相関パターンや距離による相関の低下などの解析には変数変換が優れていたわけではなかった。ピアソン相関係数または線形回帰に基づく相関係数を用いた降水データの空間相関解析は広く行われている(葛葉ほか, 2002)。前後の無降水を除いた期間の集中的な降水イベントの時間-降水量図(ハイエトグラフ)は流出解析に用いられているが、降水現象の時空間相関特性の解析にも用いられている(米勢ほか, 2017)。正実数値のみの場合は対数正規分布が広く使われている。本研究では、ゼロもしくは連続な正実数値をとる確率分布の扱いについて清水・寒河江(1990)の提唱したモデルにしたがって解析を行った。次節にShimizu (1993)の記法に従いモデルの概略を示す。

2.3.3 2変数混合対数正規分布(Shimizu, 1993)

地点Aの日降水量を X 、地点Bの日降水量を Y とするとき、 X は0(無降水)または x ($x > 0$, 降水)、 Y は0(無降水)または y ($y > 0$, 降水)の値を取る。負でない値をとる2つの確率変数の組 $(X, Y)'$ には $(0, 0)'$ 、 $(x^*, 0)'$ 、 $(0, y^*)'$ 、 $(x, y)'$ の4つの組合せがあり(記号 $()'$ はベクトルの転置を示す)、それぞれのサイズを n_0, n_1, n_2, n_3 ($n_0 + n_1 + n_2 + n_3 = n$) とすると2変量の組合せは以下のとおりである。

2地点における日降水量の観測値をそれぞれ x_i (地点1)、 y_i (地点2) ($i=1, 2, \dots, N$) とする。この降水量はそれぞれ、確率分布 X および Y に従うとする。観測値 x_i と y_i には $(0, 0)$ 、 $(x^*, 0)$ 、 $(0, y^*)$ 、 (x, y) の4つの組合せがある(電子資料2図3参照)。 x^* 、 y^* 、 x 、 y は正の数値である。 n_0, n_1, n_2, n_3 は場合の数($N = \sum_{i=0}^3 n_i$)

	n_0	n_1	n_2	n_3
地点1	0, ..., 0	$x_1^*, \dots, x_{n_1}^*$	0, ..., 0	x_1, \dots, x_{n_3}
地点2	0, ..., 0	0, ..., 0	$y_1^*, \dots, y_{n_2}^*$	y_1, \dots, y_{n_3}
平均, 分散		μ_1^*, σ_1^{*2}	μ_2^*, σ_2^{*2}	$\mu_1, \sigma_1^2 \quad \mu_2, \sigma_2^2$

$(X, Y)'$ の場合ごとの確率は、4つの事象の確率で表される

$$Pr (X = 0, Y = 0) = \delta_0 \quad (1)$$

$$Pr (0 < X \leq x, Y = 0) = \delta_1 F(x), \quad x > 0 \quad (2)$$

$$Pr (X = 0, 0 < Y \leq y) = \delta_2 G(y), \quad y > 0 \quad (3)$$

$$Pr (0 < X \leq x, 0 < Y \leq y) = \delta_3 H(x, y), \quad x, y > 0 \quad (4)$$

ここで (1) は離散分布, (2)~(4) は連続分布で, $\delta_i (0 \leq \delta_i < 1, i = 0, 1, 2, \delta_3 = 1 - \delta_0 - \delta_1 - \delta_2 > 0)$ である. $F(x), G(y), H(x, y)$ の確率分布は対数正規分布やガンマ分布などから選べるが, 扱いやすさから対数正規関数を選んでいる. すなわち, $F(x) = \Lambda(x | \mu_1^*, \sigma_1^{*2}), G(y) = \Lambda(y | \mu_2^*, \sigma_2^{*2})$ は対数正規分布の分布関数を, $H(x, y) = \Lambda_2(x, y | \mu_1, \mu_2; \sigma_1^2, \sigma_2^2; \rho)$ は 2 変量対数正規分布の同時分布関数を表す. ここで, ρ は相関係数で, 期待値と分散などの母数の範囲は, $-\infty < \mu_1^*, \mu_2^*, \mu_1, \mu_2 < \infty, \sigma_1^{*2}, \sigma_2^{*2}, \sigma_1^2, \sigma_2^2 > 0, -1 < \rho < 1$ であ

る. これらの確率分布をまとめて 2 変量混合対数正規分布 (または 2 変量デルタ対数正規分布), $\Delta_2 (\delta_0, \delta_1, \delta_2; \mu_1^*, \mu_2^*, \mu_1, \mu_2; \sigma_1^{*2}, \sigma_2^{*2}, \sigma_1^2, \sigma_2^2, \rho)$ と呼び (Δ_2 と略す), 12 個の母数 (パラメータ) をもつ. このパラメータの最尤推定値を求めることで, ρ が求められる.

$\delta_i (i = 0, \dots, 3)$ は 4 項分布に従うことから最尤推定値はそれぞれ n_i / n である. 清水・寒河江 (1990) は全てのパラメータが未知であると仮定し, 期待値と分散に関する組合せのうち 6 つの場合 (モデル M1 ~ M6) を検討した.

M1: $\mu_1^* \neq \mu_1, \mu_2^* \neq \mu_2, \sigma_1^{*2} \neq \sigma_1^2, \sigma_2^{*2} \neq \sigma_2^2$ (一般モデル)	パラメータ数 $P = 9$
M2: $\mu_1^* \neq \mu_1, \mu_2^* \neq \mu_2, \sigma_1^{*2} = \sigma_1^2, \sigma_2^{*2} \neq \sigma_2^2$	$P = 8$
M3: $\mu_1^* \neq \mu_1, \mu_2^* \neq \mu_2, \sigma_1^{*2} = \sigma_1^2 = \sigma_2^{*2} = \sigma_2^2 (= \sigma_2^2)$	$P = 6$
M4: $\mu_1^* \neq \mu_1, \mu_2^* \neq \mu_2, \sigma_1^{*2} = \sigma_1^2, \sigma_2^{*2} = \sigma_2^2$	$P = 7$
M5: $\mu_1^* = \mu_1, \mu_2^* = \mu_2, \sigma_1^{*2} = \sigma_1^2 = \sigma_2^{*2} = \sigma_2^2 (= \sigma_2^2)$	$P = 4$
M6: $\mu_1^* = \mu_1, \mu_2^* = \mu_2, \sigma_1^{*2} = \sigma_1^2, \sigma_2^{*2} = \sigma_2^2$	$P = 5$

これらの 6 つのモデルに対してそれぞれ母数の最尤推定値を求める.

2.3.4 モデル選択

清水・寒河江 (1990) による検討の手順は, まず標本 (日降水量) の対数変換後の歪度, 尖度, 正規性による対数正規性検定を行い, 正規性が棄却されない場合に等分散性と等平均性の検定を行う. 等分散性と等平均性の棄却の組合せにより, M1 から M4 のいずれかが選択される. 等分散性と等平均性のいずれもが棄却されない場合には M5 か M6 のいずれかが選択される. 各モデルでは標本平均, 標本偏差平方和, 偏差積和の情報から期待値, 分散および相関係数 ρ 等のパラメータの最尤推定値を求める. Shimizu (1993) は赤池情報量基準 (AIC, $AIC = 2 \times \text{モデルパラメータ数} - 2 \times \log [\text{尤度関数の}$

最大値]) により M1 ~ M6 のモデル選択を行い, 清水・寒河江 (1990) によるモデル選択法との比較を行い, AIC 選択時の差が 2 未満の場合は清水・寒河江 (1990) の方法と一致することを示した. この結果が尾瀬内外の観測値についても適用できるとして, AIC によるモデル選択を行った. 各モデルのパラメータ最尤推定値および AIC を求める式の導出は Shimizu (1993) に詳述されている.

2.3.5 2 変量混合対数正規分布相関係数, R_{biv}

2.3.3 の各モデルについて, 2 変量混合対数正規分布 Δ_2 の分布モーメントは

$$E(X) = \delta_1 \exp(\mu_1^* + \sigma_1^{*2} / 2) + \delta_3 \exp(\mu_1 + \sigma_1^2 / 2) \quad (5)$$

$$E(Y) = \delta_2 \exp(\mu_2^* + \sigma_2^{*2} / 2) + \delta_3 \exp(\mu_2 + \sigma_2^2 / 2) \quad (6)$$

$$E(X^2) = \delta_1 \exp(2\mu_1^* + 2\sigma_1^{*2}) + \delta_3 \exp(2\mu_1 + 2\sigma_1^2) \quad (7)$$

$$E(Y^2) = \delta_2 \exp(2\mu_2^* + 2\sigma_2^{*2}) + \delta_3 \exp(2\mu_2 + 2\sigma_2^2) \quad (8)$$

$$E(XY) = \delta_3 \exp[\mu_1 + \mu_2 + (\sigma_1^2 + 2\sigma_1\sigma_2 + \sigma_2^2) / 2] \quad (9)$$

で表される (Shimizu, 1993). Δ_2 の分散および共分散は

$$\text{Var}(X) = E(X^2) - E(X)^2 \quad (10)$$

$$\text{Var}(Y) = E(Y^2) - E(Y)^2 \quad (11)$$

$$\text{Cov}(XY) = E(XY) - E(X)E(Y) \quad (12)$$

となり、これらを用いて Δ^2 の相関係数 Corr は次式より求まる。

$$\text{Corr} = \text{Cov}(XY) / [\text{Var}(X) \text{Var}(Y)]^{1/2} \quad (13)$$

本研究ではこうして求められた2変量混合対数正規分布相関係数 Corr を「相関係数 R_{biv} 」または「 R_{biv} 」と表記する。

2.3.6 ピアソン積率相関係数, R_p

本研究ではピアソン積率相関係数 R_p をピアソン相関係数または「 R_p 」と表記する。

2.4 統計解析

前節で求められた相関係数 R_{biv} およびピアソン相関係数 R_p の150 km圏までの観測所との空間相関について、山の鼻または尾瀬沼からの方位、すなわち北から90度ごとに区切った4象限(北東, 南東, 南西, 北西)別に差がみられるかのKruskal-Wallis検定を行った。観測所間の相関係数決定要因を明らかにするため、山の鼻または尾瀬沼から50 km圏の観測所までの距離、標高差および交互作用項を説明変数としてステップワイズ重回帰分析を行い、選択された説明変数の自由度調節済み決定係数(寄与率)を分散分析により求めた。

相関係数 R_{biv} の計算および統計解析にはRStudio上のR3.5.2(R Core Team, 2020)を、国土地理院サーバとのデータ送受信およびデータ処理にはJupyterLab上でPython3.8.5によるプログラムを使用した。

3. 結果

3.1 相関係数 R_{biv} および R_p の空間相関

鳩待峠(廃止観測所, 3)については、ウェブ公開期間が限られていることから(2002~2008年の5月~10月)、以後の解析では除外し、現在も継続して通年観測されている鳩待峠(4)のデータを解析に用いた。なお、鳩待峠(3)と鳩待峠(4)との相関係数 R_{biv} は0.825~0.987(平均0.936)であった。

3.1.1 相関係数 R_{biv} の空間相関

図2a, 2bに山の鼻および尾瀬沼の観測所と150 km圏の観測所との日降水量相関係数 R_{biv} に基づく空間相

関の月変化を示す。

山の鼻では年間を通して尾瀬の西南西から東北東を結ぶ帯状の領域と相関があり($R_{\text{biv}} > 0.4$)、季節によって多少変化した。より相関の高い $R_{\text{biv}} > 0.6$ の領域に着目すると、冬期の1~2月は西から北西の新潟県側に、3~4月および9~12月には尾瀬近傍の群馬県側から東北東の福島県側にみられた。5~6月には東北東に加えて南~南西まで広がった。夏期の7~8月は尾瀬近傍(山の鼻からおおよそ20 km以内)に集中した(図2a)。

尾瀬沼では年間を通して尾瀬の南西から北東を結ぶ帯状の領域と相関があり($R_{\text{biv}} > 0.4$)、帯状の領域の向きは山の鼻と較べるとやや北向きに回転していた。相関係数 $R_{\text{biv}} > 0.4$ の領域に着目すると、1~2月には北東の福島県側に(一部 $R_{\text{biv}} > 0.3$)、3~5月には北東の福島県側だけでなく南東及び南の群馬県側にみられた。6月には南東及び南の群馬県側に分布し、7~8月には尾瀬沼から30 km以内のごく近傍に集中していた。9月には6月と同様に南東及び南の群馬県側に、10~11月には南西及び北東の栃木・福島県側にも $R_{\text{biv}} > 0.4$ の領域が広がった(図2b)。

3.1.2 相関係数 R_p の空間相関

図2c, 2dに山の鼻および尾瀬沼の観測所と150 km圏の観測所との日降水量相関係数 R_p に基づく空間相関の月変化を示す。

山の鼻と相関のみられた $R_p > 0.6$ の領域は R_{biv} に基づく結果($R_{\text{biv}} > 0.4$)に類似したが、範囲はより広く値も高かった。そこで、 $R_p > 0.7$ の領域に着目すると、冬期の1~2月は西から北西の新潟県側から群馬県側に、3~4月はこれらに加えて東北東の福島県側、5月には南西から西に、6~7月には東と西に分布した。9, 11, 12月は西南西~東北等にかけての領域に分布したが、8月と10月には尾瀬の南から周辺の広範な地域に分布した(図2c)。

尾瀬沼と相関のみられた領域($R_p > 0.4$)は R_{biv} に基づく結果($R_{\text{biv}} > 0.4$)に概ね類似した。1, 3月には北東の福島県側と、4~5月および11~12月には北東の福

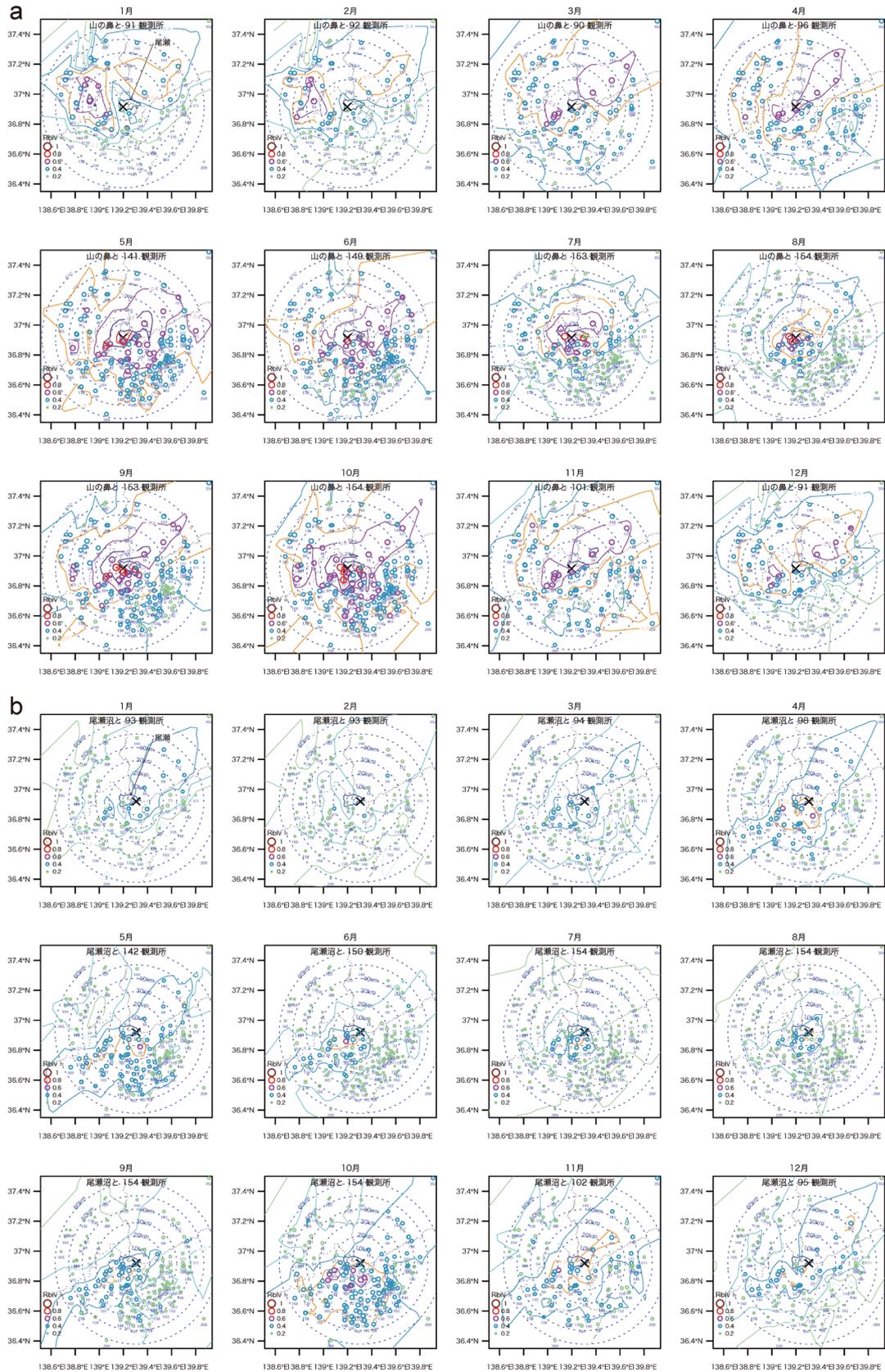
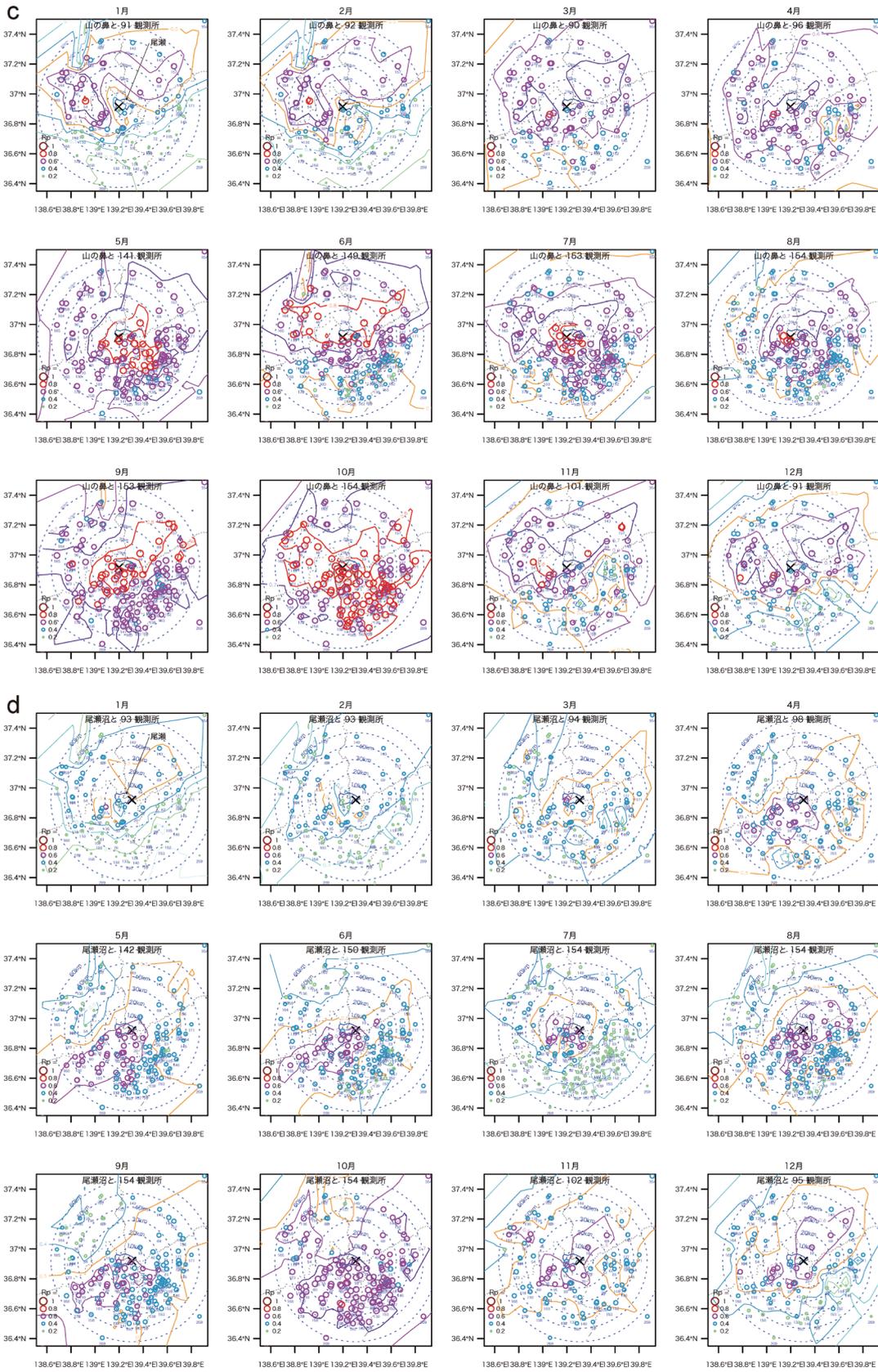


図 2 : 山の鼻観測所または尾瀬沼観測所と 150 km 圏の観測所の月別日降水量 (1981 年～2010 年) に基づく空間相関。(a) 山の鼻からの相関係数 R_{div} 分布, (b) 尾瀬沼からの R_{div} 分布, (c) 山の鼻からのピアソン相関係数 R_p 分布, (d) 尾瀬沼からの R_p 分布. 相関係数の大きさは, ○印のサイズと等高線で示す. 青実線で囲まれた領域は尾瀬地域, 灰色鎖線は県境界を, 青色破線同心円は山の鼻 (×印, a, b) または尾瀬沼 (×印, c, d) からの距離 (10, 20, …, 60 km) を示す. 図中の数字は観測所番号を示す. 等高線は, 赤: 0.8; 茶: 0.7; 紫: 0.6; 橙: 0.5; 濃青: 0.4; 青: 0.3; 緑: 0.2.



鳥島側だけでなく南東及び南の群馬県側と、6月及び9月には南東及び南の群馬県、7～8月には尾瀬沼から30 km以内のごく近傍に分布した。10月には尾瀬の南の地域に分布した(図2d)。

3.2 相関係数 R_{biv} および R_p の方位別分布

3.2.1 相関係数 R_{biv} の方位別分布

3.1.1で検討した R_{biv} の空間相関を4方位別に差が見られるかについてKruskal-Wallis検定を行った(図3a～3d)。50 km圏内を対象にした場合と150 km圏を対象にした場合では山の鼻の8月を除いて全て同じ結果となり、尾瀬沼でも50 km圏と150 km圏で、全ての月で方位に有意差があった。そのため両観測所とも、50 km圏の観測所について(図3b, 3d)検討を行った。

山の鼻で有意差の見られた月について相関係数の中央値の高い方位は、1～2月は北西・北東、3～4月は北東・北西、7月は北西・北東、8月は北東・北西、12月は北東であった。9月は南東のみが低かった(図3b)。尾瀬沼で相関係数の中央値の高い方位は、1～2月は北東、3月は南西・北東、4～7月と9～10月は南西、8月と11～12月は南西・北東であった(図3d)。3.1.2の空間相関(図2c, 2d)から読み取られた結果と概ね整合するものであった。

3.2.2 相関係数 R_p の4象限方位別分布

Kruskal-Wallis検定結果は50 km圏を対象にした場合と150 km圏を対象にした場合では山の鼻の4月を除いて全て同じ結果となり、尾瀬沼では50 km圏と150 km圏で同じ検定結果が得られた。したがって、両観測所とも、50 km圏の観測所について(図3f, 3h)検討を行った。

山の鼻で有意差の見られた月について相関係数の中央値の高い方位は、1～2月は北西・北東、3月は北東、5月は南東、11～12月は北西であった(図3f)。尾瀬沼で相関係数の中央値の高い方位は、1～2月は北東、3月は北東・南西、4～6月と9～10月は南西、7月は北西、12月は南西・北東であった(図3d)。3.1.1の空間相関(図2a, 2b)から読み取られた結果に定量的な解釈が与えられた。

相関係数 R_{biv} と R_p の方位別分布パターンを比較すると、山の鼻(図3b, 3f)では7月と11月で異なっていたが、これらの月は R_p では有意差がみられたものの R_{biv} とでは有意差となっていなかったことから、この違いは無視して良いと考えられる。尾瀬沼では7月に方位

別に違いがみられたが、その原因は不明である。

3.3 相関係数と観測所間の距離および標高差との関係

3.3.1 周辺観測所までの距離と標高の関係

山地の尾瀬と比較すれば、周辺の多くの水文・気象観測所の標高は相対的に低い。そのため、山の鼻観測所および尾瀬沼観測所からそれぞれ50 km以内の観測所について距離と標高差の関係を調べると、明らかに負の相関がみられた。山の鼻よりも高地に位置する尾瀬沼の方が周辺の観測所までの傾斜が急であった。この傾向は、どの方位で比較しても同じであった(電子資料2図4)。

3.3.2 相関係数と観測所間の距離および標高差との関係

山の鼻および尾瀬沼のそれぞれから50 km圏の観測所までの距離と標高差および交互作用項を説明変数にとり、相関係数 (R_{biv} または R_p) を従属変数とするステップワイズ重回帰分析を月別に行った。選択された説明変数の自由度調節済み決定係数(寄与率)を分散分析により求めた(電子資料1表2a, b, c, d)。

山の鼻では相関係数 R_{biv} の自由度調節済み決定係数は7～9月に0.53～0.70と高く、1月～4月および11月～12月には0.2～0.4の間を示した。冬期に観測を行わない、又は欠測のある観測所が多いことや、山の鼻の冬期観測期間が限られていたことを反映している可能性がある。6月を除く5月～10月には全ての変数が選択されたが、距離の寄与率が高かった。他の月は距離と標高差の両方が寄与していた。年間でプールした解析では全ての変数が選択され、自由度調節済み決定係数は0.25であった(電子資料1表2a)。ピアソン相関係数 R_p の結果は相関係数 R_{biv} に類似していたが、自由度調節済み決定係数は8月の0.61以外は0.22～0.45と低かった(電子資料1表2c)。

尾瀬沼では相関係数 R_{biv} の自由度調節済み決定係数は7～8月に0.50～0.56であったが他の月では0.1～0.3であった。3月～5月、11月、12月および年間でプールした解析では距離のみが選択された(電子資料1表2b)。ピアソン相関係数 R_p の結果は相関係数 R_{biv} に類似していたが、自由度調節済み決定係数は7月、8月の0.40～0.44以外は0.03～0.26で、 R_{biv} よりも低かった(電子資料1表2d)。

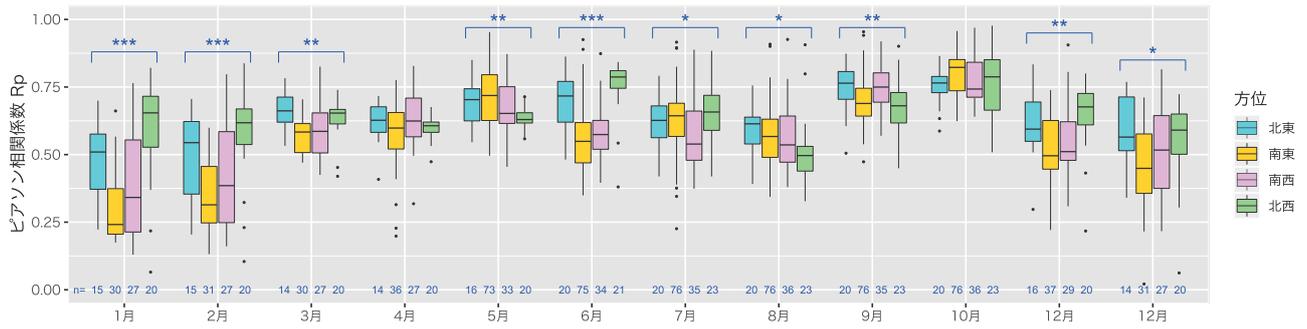
3.3.3 相関係数と観測所間の距離との関係

山の鼻および尾瀬沼のいずれも、相関係数は距離によ

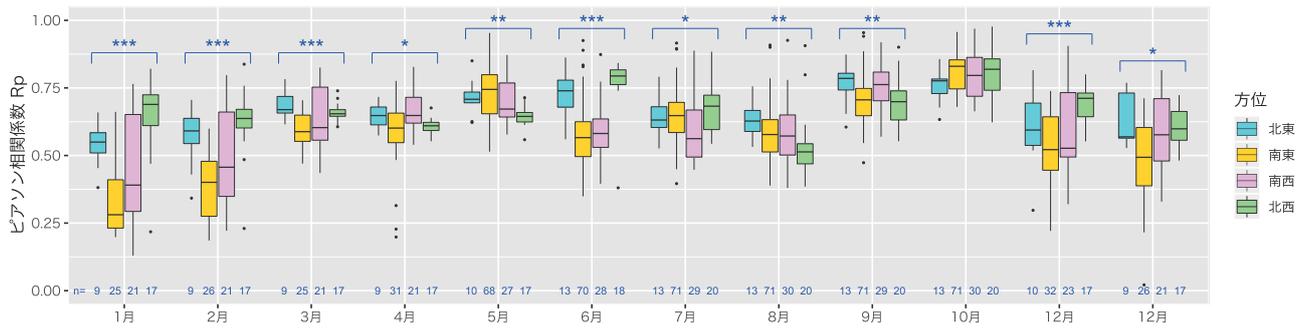


図3：山ノ鼻観測所および尾瀬沼観測所から150 km圏までの観測所との月別日降水量（1981年～2010年）に基づく相関係数の4象限方位別（北東，南東，南西，北西）分布。(a)山ノ鼻：150 km圏の観測所，相関係数 R_{biv} ，(b)山ノ鼻：50 km圏の観測所， R_{biv} ，(c)尾瀬沼：150 km圏 R_{biv} ，(d)尾瀬沼：50 km圏 R_{biv} ，(e)山ノ鼻：150 km圏ピアソン相関係数 R_p ，(f)山ノ鼻：50 km圏 R_p ，(g)尾瀬沼：150 km圏 R_p ，(h)尾瀬沼150 km圏 R_p 。箱ひげ図は0，25，50，75，100%を示し，下の数値はサンプル数を示す。月ごとのKruskal-Wallis検定結果を*** ($p < 0.001$)，** ($p < 0.01$)，* ($p < 0.05$)で示す。

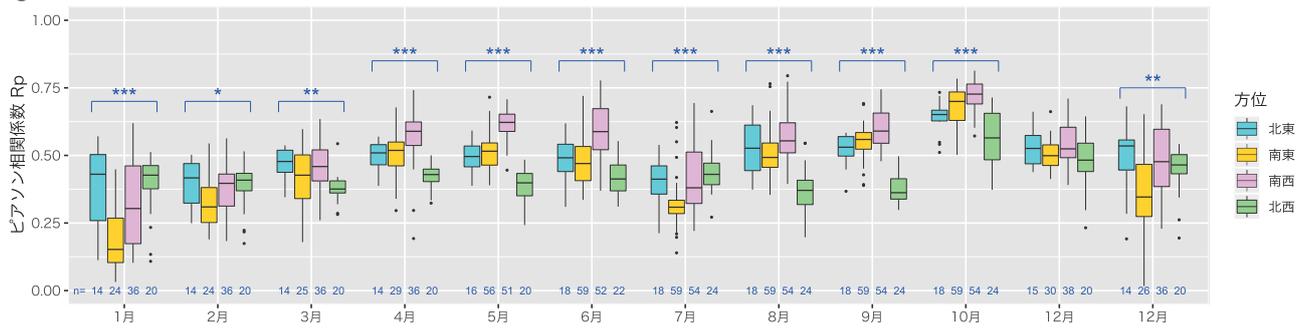
e 山の鼻観測所 (~ 150 km)



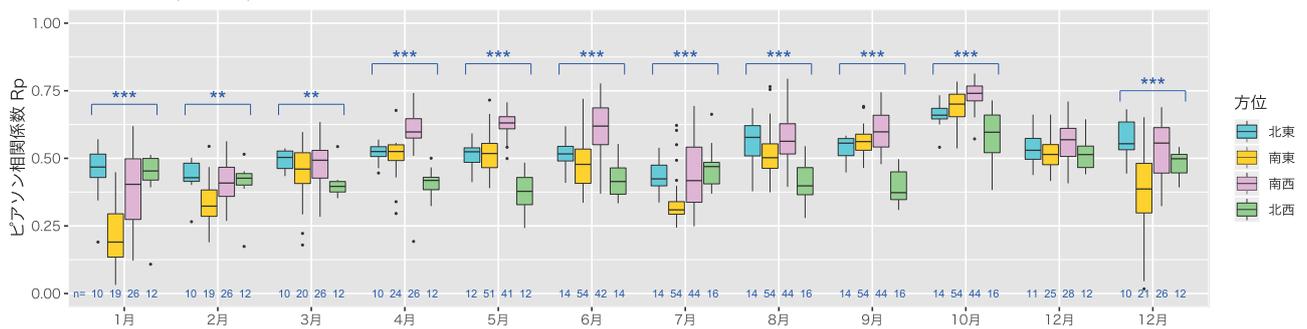
f 山の鼻観測所 (~ 50 km)



g 尾瀬沼観測所 (~ 150 km)



h 尾瀬沼観測所 (~ 50 km)



り一義的に決定される傾向がみられた。150 km 圏の観測所までの距離と相関係数 R_{biv} の関係は、山の鼻および尾瀬沼についていずれの月も距離との間に有意な負の相関がみられた (図 4a)。ピアソン相関係数 R_p は R_{biv} よりも高い値を示し、山の鼻および尾瀬沼についていずれの月も距離と負の相関がみられた (図 4b)。

3. 3. 4 相関係数と観測所間の標高差との関係

山の鼻と 150 km 圏の気象・水文観測所との間の相関

係数 R_{biv} は、5月～10月の間のみ、標高差との間に有意な正の相関がみられた (図 5a)。重回帰分析 (電子資料 1 表 2a) からは5月および7月～10月の説明変数・標高差の偏回帰係数は正值であった。一方、他の月の標高差の偏回帰係数は負値であった。尾瀬沼と 150 km 圏の気象・水文観測所との間の相関係数 R_{biv} は、全ての月で標高差との間に有意な正の相関を示した (図 5a)。重回帰分析 (電子資料 1 表 2 b) からは1月、2月および6月～10月は説明変数・距離と標高差が選択され、

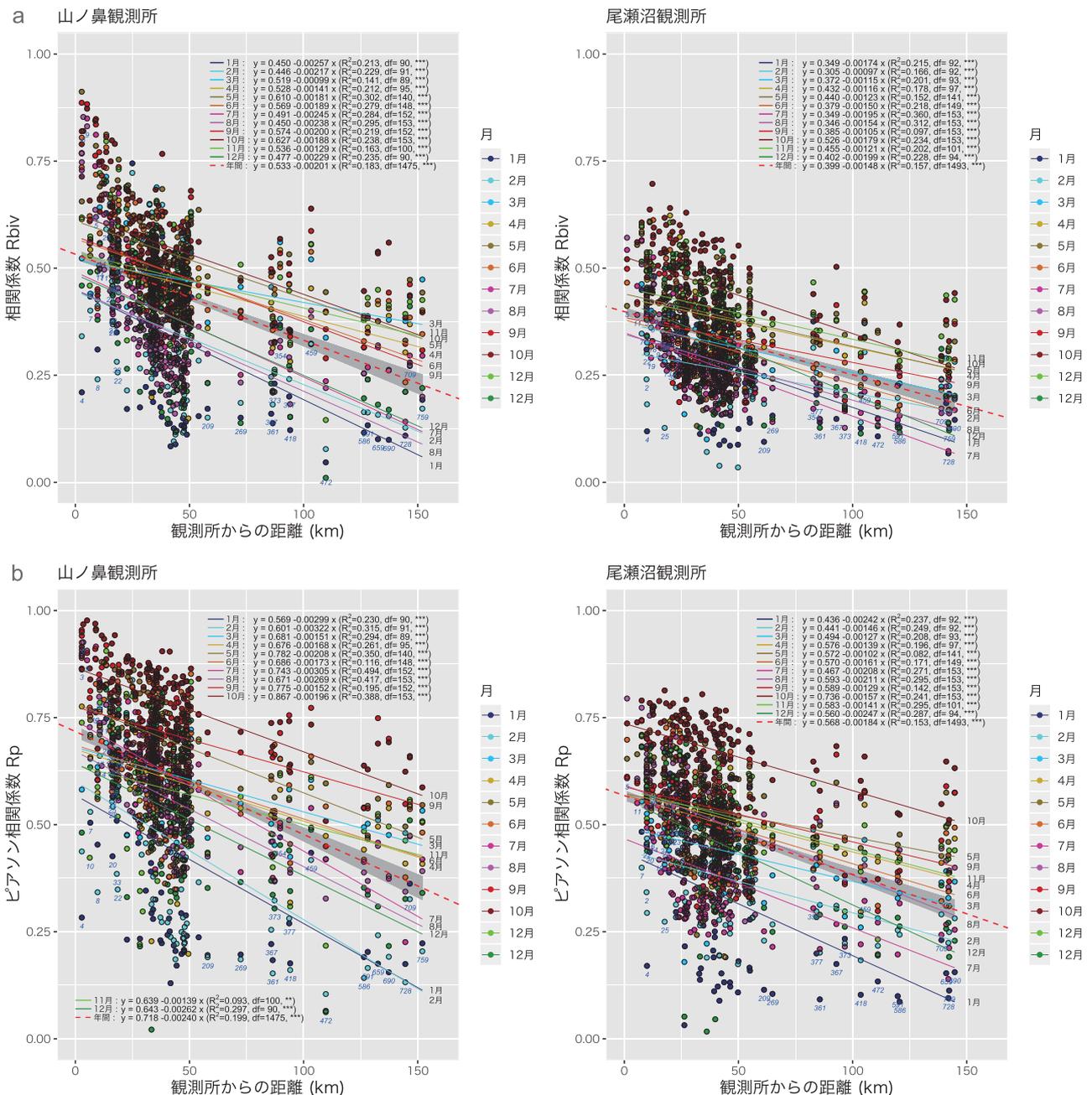


図 4：山の鼻観測所および尾瀬沼観測所から 150 km 圏の観測所までの距離と月別日降水量 (1981年～2010年) に基づく (a) 相関係数 R_{biv} 、および (b) ピアソン相関係数 R_p の関係。全ての月のデータについての線型回帰直線 (赤破線) は 95% 信頼区間 (灰色部分) と共に示す。山の鼻気象観測所からの距離と R_{biv} の線形回帰直線は、有意な相関関係の得られた月のみを示し、それらの月をまとめたデータについての線形回帰直線 (青破線) と共に示す (図 6a 左)。

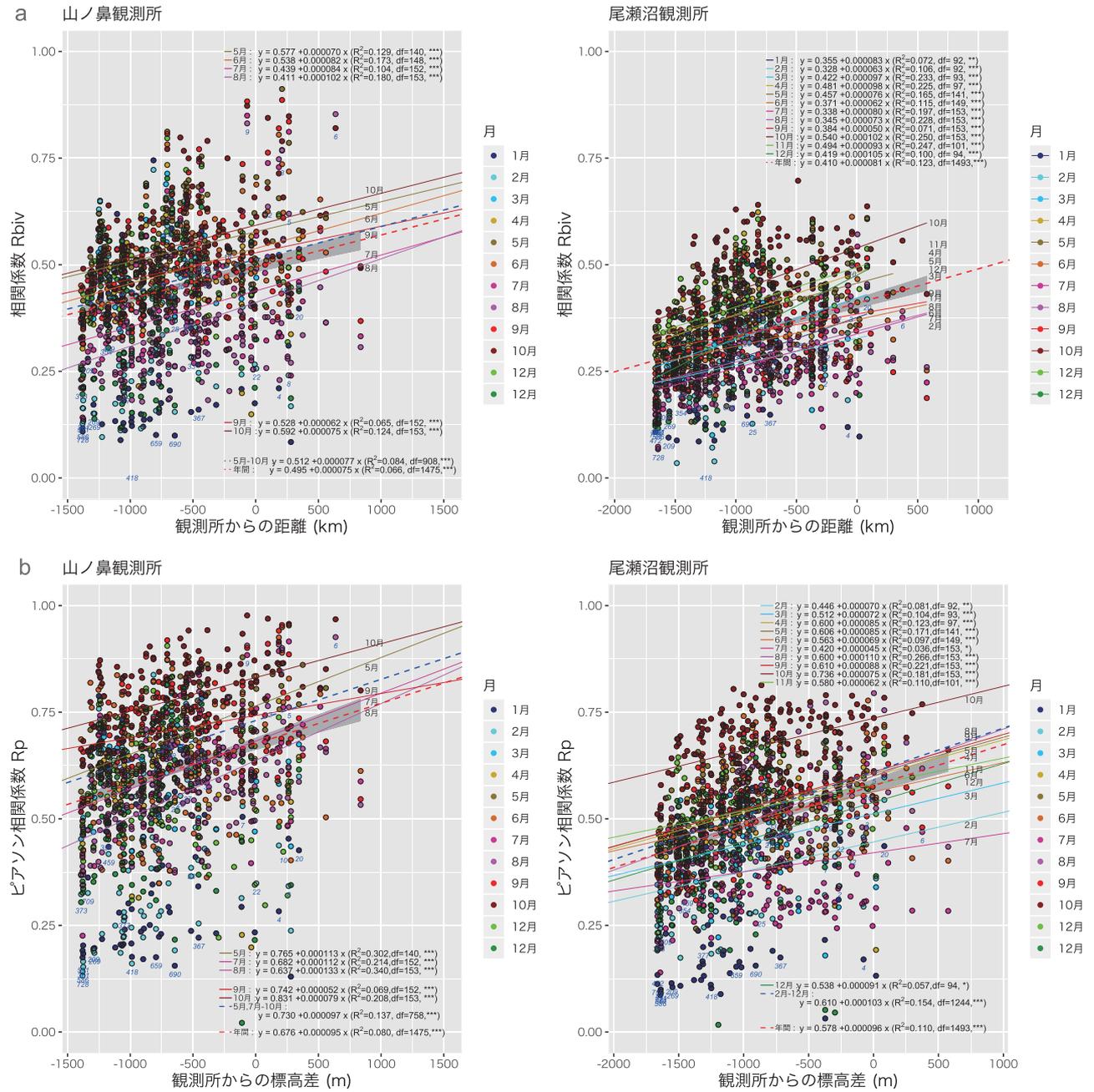


図5：山の鼻観測所および尾瀬沼観測所と150 km圏の観測所との標高差と、月別降水量(1981年~2010年)に基づく(a)相関係数 R_{biv} 、および(b)ピアソン相関係数 R_p の関係。有意な関係の得られた月のみの線形回帰直線とそれらの月をまとめたデータについての線形回帰直線(青破線)を示す。また、全ての月のデータについての線型回帰直線(赤破線)を95%信頼区間(灰色部分)と共に示す。

標高差の偏回帰係数は負値であった。山の鼻および尾瀬沼と150 km圏の気象・水文観測所との間のピアソン相関係数 R_p は、標高差に対して、 R_{biv} と同様の結果を示した(図5b)。また、重回帰分析結果も標高差の偏回帰係数が負値を取ることが多かった(電子資料1表2c, d)。重回帰分析結果から、標高差単独では相関係数 R_{biv} を説明することはできないことが示された。

4. 考察

4.1 2種類の相関係数の比較

本研究では2変量混合対数正規分布相関係数 R_{biv} とピアソン相関係数 R_p を用いて空間相関特性を検討した。空間相関特性では両係数で得られた結果(図2a-d, 図3a-h, 図4a, b, 図5a, b)は概ね一致していた。同一の地点組合せ、時期で比較すると R_{biv} に比べて R_p が高い値を示したが、 R_p には日降水量のゼロ値とピーク値の

影響が強く出るためであって、両係数の絶対値の比較に意味はない。

2種類の相関係数 R_{biv} と R_p について、観測所間の距離および標高差を説明変数とした重回帰分析と分散分析を行った結果は (3. 3. 2, 電子資料1表2), R_{biv} の自由度調節済み決定係数が R_p に比べて高く、降水量の空間相関のモデル化には R_p よりも適切な係数であることが示唆された。以下, R_{biv} の結果に基づいて議論を行う。

4. 2 空間相関の季節性

相関係数 R_{biv} は2地点の降水パターンの類似性を示す尺度で、降水量の類似性を測る尺度ではない。逆に、地点間の降水量が異なっても降水パターンが相似形であれば R_{biv} は変わらない。月または年の降水量が標高に伴い増加する (松野, 1954; Budyko, 1974) ことは、相関係数 R_{biv} が標高差に依存することの直接の説明にはならない。むしろ、降水量が地形にも依存する (松野, 1954; 吉野, 1975) ことを考慮せねばならない。尾瀬における冬期の積雪相当水量は、尾瀬ヶ原地域では分水嶺に向かって8合目付近で最大値を示すが、低い分水嶺に囲まれた尾瀬沼地域で明瞭な高度分布を示していない

(東京管区気象台・東京電力株式会社, 1960)。この地形要因が、山の鼻と尾瀬沼の観測所間の R_{biv} の低さや 50 km 圏観測所との空間相関の違いをもたらしていると考えられる。

山の鼻および尾瀬沼と他の観測所との相関係数 R_{biv} の空間相関は、山の鼻では年間を通して尾瀬の西南西から東北東を結ぶ帯状の領域と、尾瀬沼では年間を通して尾瀬の南西から北東を結ぶ帯状の領域と、より相関が高かった。山の鼻および尾瀬沼とも7月～8月には尾瀬から30 km 以内の観測所 (9矢種, 5三平峠など) との相関が高くなった。これらの多くは標高1,500 m 以上の観測所で、冬期には観測を行っていない (表1参照, 電子資料2図1), あるいは冬期に欠測が多く解析対象から除外されていたため11月～4月までの期間は空間相関には反映されていない。11月～4月の解析対象観測所数は約90で、他の期間の約150よりも少ない。

山の鼻と他の観測所との相関係数 R_{biv} についての距離及び標高差の重回帰分析結果 (3.3.2, 電子資料1表2) は、11月～4月の期間と5月～10月の期間で異なっていた。11月～4月の期間に比べて5月～10月の期間では、標高差よりも距離がより大きく回帰に寄与し、自由度調

表2: 尾瀬の降水現象を推定可能な気象・水文観測所。山の鼻観測所 (a) と尾瀬沼観測所 (b) について、期間別に相関係数 R_{biv} 値の順に列挙した。観測所名の前の3桁の数字は中田代中央からの距離順に付した観測所番号を、観測所名の後のAは気象庁アメダス観測地点を示す。山の鼻および尾瀬沼それぞれからの4象限方位と距離 (km) を観測所名の後に示す。a: 1月～2月, b: 参考までに示す, c: 9～10月。

a. 山の鼻観測所

R_{biv}	冬期 (12月～2月)		夏期 (6月～10月)		通年	
	観測所名	方位距離	観測所名	方位距離	観測所名	方位距離
0.7～0.8	054 清水 ^a	NW 25	005 三平峠 004 鳩待峠 023 藤原 A	SE 9 SE 3 SW 14	023 藤原 A	SW 14
0.6～0.7	054 清水 023 藤原 A 123 二居 084 六日町 091 五日町 029 宝川	NW 25 SW 14 NW 38 NW 33 NW 34 SW 15	014 土出 019 桧枝岐 A 011 根羽沢 048 みなかみ A 032 針山 010 坤六峠	SE 12 NE 19 SE 13 SW 22 SW 17 SW 6	019 桧枝岐 A 048 みなかみ A 017 湯ノ小屋	NE 19 SW 22 SW 10
0.4～0.5			008 尾瀬沼 ^b	NE 10	008 尾瀬沼 ^b	NE 10
0.3～0.4	008 尾瀬沼 ^b	NE 10				

b. 尾瀬沼観測所

R_{biv}	冬期 (12月～2月)		夏期 (6月～10月)		通年	
	観測所名	方位距離	観測所名	方位距離	観測所名	方位距離
0.6～0.7			017 湯ノ小屋 ^c 007 戸倉 ^c	SW 20 SW 8		
0.5～0.6	017 湯ノ小屋 020 丸沼ダム	SW 20 SE 11	007 戸倉 010 坤六峠 017 湯ノ小屋 020 丸沼ダム 005 三平峠 038 藤原 028 鎌田 029 宝川	SW 8 SW 13 SW 20 SE 11 SW 1 SW 27 SW 18 SW 24	007 戸倉 017 湯ノ小屋 020 丸沼ダム	SW 8 SW 20 SE 11

節済み決定係数も大きかった。11月～4月の観測データの吟味は今後の課題であろう。

4.3 尾瀬の降水現象を代表しうる気象・水文観測所

図6に150 km圏の気象・水文観測所の観測年数と相関係数 R_{biv} の関係を時期別に示した。1～2月, 3～4月, 5～6月, 7～8月, 9～10月, 11～12月の6グループに分けて示し, さらに12月の相関係数空間相関が1～2月に類似していたことから(図2a, b), 12月～2月を冬期とした。また, 6月は7月に類似していたので(図2a, b), 6月～10月を夏期とした。山の鼻では多くの年で, この期間に観測が実施されている。

一般に相関係数の自乗が決定係数であることから, 2変量混合対数正規分布相関係数 R_{biv} においても R_{biv}^2 を決定係数と考える。そこで本研究では, 決定係数が0.5以上, すなわち相関係数が0.7以上であることが尾瀬の降水現象の代表性の基準とするが, 尾瀬沼については R_{biv} が0.5(決定係数0.25)も判定基準とし, 尾瀬の降水現象を推定可能な気象・水文観測所を抽出した(表2)。

山の鼻気象観測所では, R_{biv} が0.7～0.8の観測所(括弧内に観測所番号を記す)は, 夏期に三平峠(5), 鳩待峠(4), 藤原(23), 通年では藤原(23)であった。いずれも山の鼻から15 km以内の群馬県側の観測所である。 R_{biv} が0.6～0.7の観測所は冬期に清水(54)など6カ所, 夏期に土出など6カ所, 通年で松枝岐(19)とみなかみ(48)の2カ所であった。なお, 新潟県の清水観測所は1月～2月の期間では R_{biv} が0.7～0.8であった。表2aに示した観測所の多くは山ノ鼻から20 km以内に位置し, 冬期に $R_{biv} > 0.6$ となった新潟県の4観測所は山ノ鼻から25～38 km離れていた。山の鼻と尾瀬沼間の R_{biv} はいずれの期間も0.5未満であった。

尾瀬沼観測所では, R_{biv} が0.5～0.6の観測所は, 冬期に2カ所, 夏期に戸倉(7)など8カ所, 通年で戸倉など3カ所であった。いずれも水文水質観測所でアメダスは含まれていなかった。湯ノ小屋(17)と戸倉は9～10月には R_{biv} が0.7を超えていた。湯ノ小屋と丸沼ダム(20)は全ての期間で $R_{biv} > 0.5$ で, 2観測所ともダム湖に隣接していることから湖畔の尾瀬沼観測所との類似性が高くなったと考えられる。尾瀬ヶ原湿原の縁辺部に位置する山の鼻観測所との立地環境の違いが, 尾瀬沼観測所との相関が低い結果に繋がったのであろう。

4.4 尾瀬の降水量の長期変動の推定

山の鼻気象観測所では降水量の欠測値が多いため時系列解析は難しい。吉井ほか(2014)は山の鼻の6月～9

月に観測された1時間最大降水量10 mm以上を記録した日の降水量合計をその日数で除した値を短時間強雨の指標とした。1977年から2011年までの期間での指標の回帰直線に増加傾向があるとした(吉井ほか, 2014)。山の鼻では2016年以後は降水量が欠測となっているため, 無降雨日数, 無降雨期間, 短時間強雨発生回数などの降水現象パラメータの長期変動は他の複数の観測所のデータから推定し検討する必要がある。

地上観測所は観測期間期間が長い順に以下の4グループに分けられる。A(130～150年):管区气象台・地方气象台, B(50～100年):第二次大戦前後から観測を行っている特別地域気象観測所(秩父, 若松など)および国土交通省水文観測所(湯原, 湯ノ小屋など), C(30～40年):1970年代後半に整備されたアメダス観測所(藤原など)および水源地観測網として設置された国土交通省水文観測所(鳩待峠, 三平峠など), D(～20年):既に観測を停止した比較的高地の国土交通省水文観測所, の4つに大別される。この順番はアクセスの良い順でもあり, AおよびBは山地環境とは異なる市街地に隣接して設置されている。Cは観測計画に従ってメッシュ状にまたは水源の降水量観測のために設置されている。Dはアクセスの悪い山地に多く, 冬期には観測が行われていない例が多い(悪沢, 矢種, タキガ沢など)。この設置環境の違いが尾瀬の降水量との空間相関に反映され, DからAの逆順に相関係数 R_{biv} が低下する結果となった(図6a)。

通年観測が行われているグループBの観測所で, 山の鼻と相関が高かったのは, 藤原アメダス(23)であった。高地湿原の尾瀬ヶ原の降水現象を推定・再現するためには, 藤原アメダスの他, 山の鼻との相関は少し劣るが, 松枝岐(19)およびみなかみ(48)のデータも重み付けしながら解析に加えるべきであろう。夏期の降水, 特に集中豪雨を検出する目的では, アメダスよりも相関の高かった三平峠(5)および鳩待峠(4)のデータが利用可能である。鳩待峠およびアメダスは約40年のデータが蓄積されている。

より観測期間の長いグループB(50年～100年)の観測所では, 湯ノ小屋(17)または宝川(29)が比較的相関が高かった(63年間, 年および季節の R_{biv} は0.5～0.65)。尾瀬沼では1950年から観測が行われているが, 山の鼻との相関は低く(表2a), 尾瀬ヶ原の湿原環境の代表性は低かった。

130年～150年に及ぶ長期の観測データはグループAの管区・地方气象台で取得されているが, 山の鼻と最も相関の高かった福島(709)で R_{biv} は0.3～0.5であった

ので、尾瀬の降水現象を推定する場合には注意が必要である。新潟県側には冬期に山の鼻との相関が高いグループDの観測所がみられたが（清水など）、グループAの新潟地方気象台（472）との相関は低かった（冬期は $R_{biv} < 0.1$ ）。冬期の尾瀬の気象の長期変化を推定するためには、地方気象台の半分以下の観測期間ではあるが、宝川または湯ノ小屋のデータが適切と考えられる。

尾瀬沼では約70年の観測が行われており、グループBの観測所に分類される。グループAの管区・地方気象台との相関の傾向は山の鼻と類似していたが、前橋（209）との相関も比較的高かった（図6b）。

4.5 地上観測体制の変遷

林ほか（2017）は地上雨量観測所の観測体制の地理的検討を行い、2008年から2014年の7年間に全国的に観測所数が減少したことを指摘した。福島、栃木、群馬、新潟の4県では、2000年以前に稼働を停止したアメダスは13、2001年以後に稼働を停止したアメダスは27、新設は7で、2001年以降、4県で差し引き20観測所が削減された。2009年に福島県で阿賀野川水系を中心に11観測所が削減されるなど、4県合計で20観測所が削減された（気象庁、2021a, bに基づき算出）。2022年1月に稼働中のアメダスは福島県38、栃木県19、群馬県18、新潟県44である。

夏期の観測に限って稼働されていた気象・水文観測所は、現在稼働を停止しているものが多い（電子資料1図1）。尾瀬50km圏では、2001年以後に稼働を停止したアメダスは、福島県では田代山（40）など4カ所、栃木県1、群馬県3、新潟県0の合計8カ所、稼働中のアメダスは福島県4、栃木県5、群馬県9、新潟県7の合計22カ所である。稼働中のアメダス（平均標高512m）に比べ、稼働を停止したアメダス（平均標高1,219m）の標高は高い。稼働停止アメダスはいずれも稼働中のアメダスより遠方に位置しており、桧枝岐や藤原よりも山の鼻との相関は低く（図8a）、標高の高いことの寄与は小さかった。

水文観測所では鳩待峠（3）（鳩待峠（4）とは異なる）、悪沢（6）、矢種（9）、タキガ沢（12）などが2009年に稼働を停止している。アメダスよりも尾瀬の近傍に位置しており、夏期の山の鼻との相関が高く、 $R_{biv} > 0.8$ の地点もあった。福島県側の阿賀野川水系上流には水文観測所の配置が少なく、50km圏には滝の原（148）と針生（157）の2観測所のみで、いずれも尾瀬から40km以上離れている。

4.6 地上観測の課題

現在は観測機器の維持にコストがかかり、限られた原資を他に振り向ける必要が常に生じる。アメダスは廃止により大震災後のモニタリングや激甚豪雨など災害に対応するための観測体制整備に振り向けられた（林ほか、2017）。例えば、福島の臨時観測所2カ所は2011年から2021年末まで稼働した。

今後、地上観測のレーダーや衛星観測への置き換わり（林ほか、2017）は必至である。解析雨量（レーダーアメダス）などの高精度化により集中豪雨の範囲と強度の予測が可能になるなど、2,000m級の稜線に囲まれた高地の尾瀬生態系の降水をレーダー観測で推定・予測するには限界があるものの、遠隔観測技術は確実に進展するであろう。

地上観測機器は、コストをかけなければ欠測を生じ、その場合、完全性を求められる項目には適用できなくなる。欠測値のないデータはアメダスに頼らざるを得ず、50年未満の蓄積データしか解析に供することができない。本研究では都道府県が設置する観測施設は対象にできなかった。気象庁、国土交通省および都道府県の観測施設を合わせた観測所設置割合は、福島県は全国でも少なく、0.015カ所/km²であった（林ほか、2017）。50km圏の福島県側にアメダスおよび水文観測所が少ないことはすでに指摘した。今後の技術革新で、低コストながら冬期にも豪雨時にも、メンテナンスフリーで高精度観測が行える降水量観測機器が開発される可能性がある。その場合には、現在の観測網の更なる縮小ではなく、高地生態系においても充実した地上観測網が構築されることが期待される。また地上観測はレーダー、衛星など遠隔計測のキャリブレーションに必要不可欠であることから、高性能かつ低コストの観測機器の開発が望まれる。

謝辞

この調査研究は、第4次尾瀬総合学術調査（2017～2019年度）の一環として行われた。東京電力ホールディングス（株）には尾瀬沼観測所における社内観測データを解析のために閲覧させていただいた。記して謝意を表す。

引用文献

Budyko, M. I. (1974) *Climate and Life*. Academic Press, New York-San Francisco-London (English edition edited by D. H. Miller) .

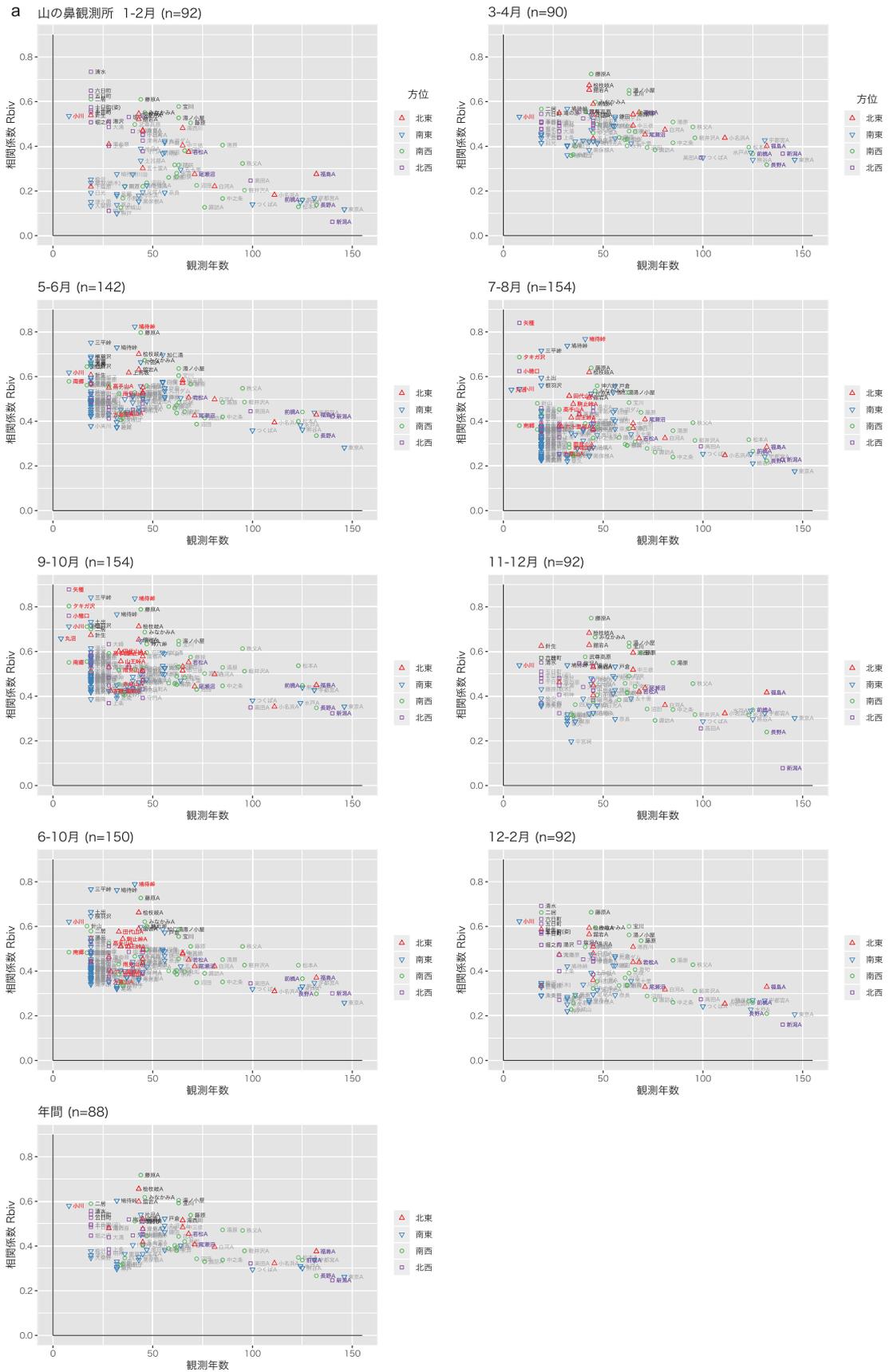
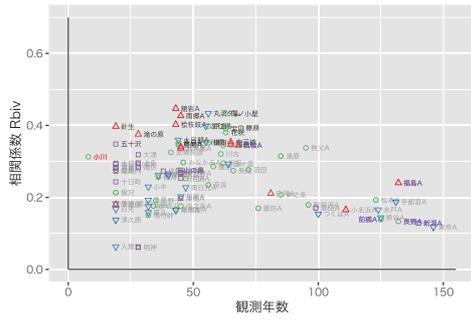
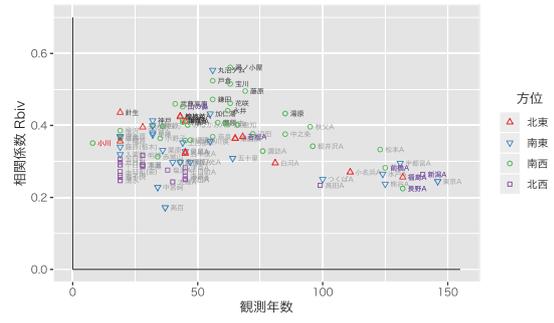


図 6: 150 km 圏の気象・水文観測所の観測年数と (a) 山の鼻観測所および (b) 尾瀬沼観測所との月別日降水量 (1981 年～ 2010 年) に基づく相関係数 R_{biv} の季節別分布。4 象限方位別 (北東, 南東, 南西, 北西) に記号で区別し, 相関係数が上位 20 番目までの観測所名を黒字で, 下位の観測所名を青字で, 若松, 前橋, 福島, 新潟, 長野および尾瀬沼または山の鼻の観測所名を紫色で表す。現在観測を行っていない観測所を赤字で示す。

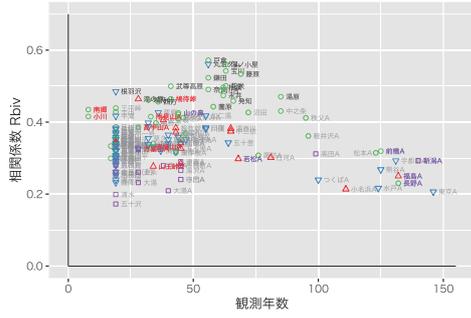
b 尾瀬沼観測所 1-2月 (n=93)



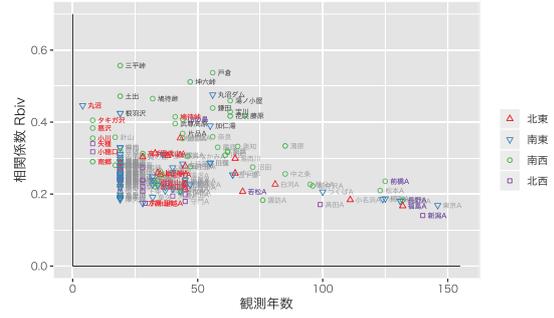
3-4月 (n=95)



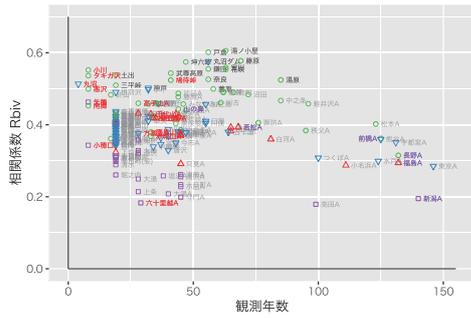
5-6月 (n=143)



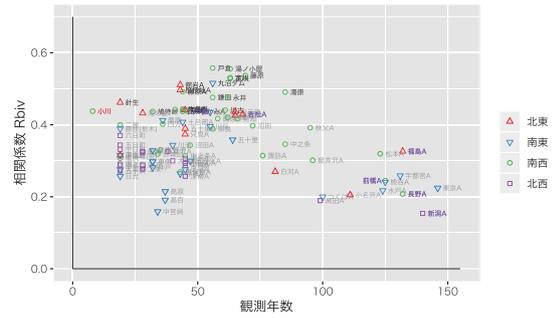
7-8月 (n=155)



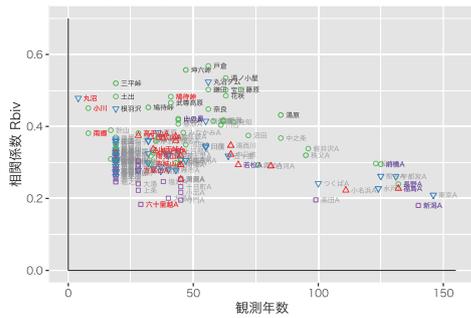
9-10月 (n=155)



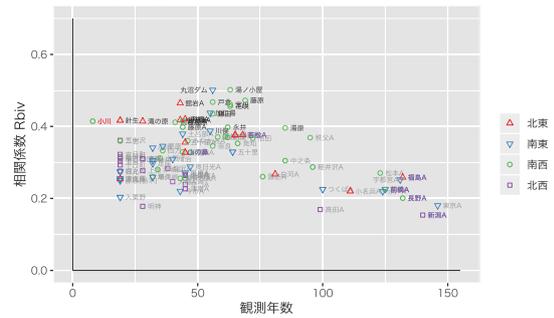
11-12月 (n=96)



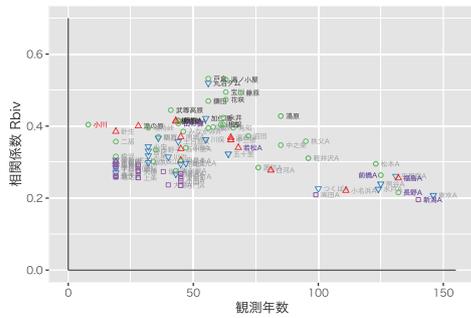
6-10月 (n=151)



12-2月 (n=93)



年間 (n=93)



方位
 ▲ 北東
 ▼ 南東
 ○ 南西
 □ 北西

方位
 ▲ 北東
 ▼ 南東
 ○ 南西
 □ 北西

方位
 ▲ 北東
 ▼ 南東
 ○ 南西
 □ 北西

方位
 ▲ 北東
 ▼ 南東
 ○ 南西
 □ 北西

方位
 ▲ 北東
 ▼ 南東
 ○ 南西
 □ 北西

方位
 ▲ 北東
 ▼ 南東
 ○ 南西
 □ 北西

方位
 ▲ 北東
 ▼ 南東
 ○ 南西
 □ 北西

方位
 ▲ 北東
 ▼ 南東
 ○ 南西
 □ 北西

方位
 ▲ 北東
 ▼ 南東
 ○ 南西
 □ 北西

方位
 ▲ 北東
 ▼ 南東
 ○ 南西
 □ 北西

- De Vera, A. and R. Terra (2018) A stochastic precipitation generator conditioned by a climate index. *J. Appl. Meteorol., Climat.*, **57**, 2585-2603.
- 林 義晃, 手計太一, 山崎惟義 (2017) 我が国の地上雨量観測所における観測体制と蓄積データの時空間特性に関する研究. *水文・水資源学会誌*, **30**(1), 43-53.
- Huff, F. A. and W. L. Shipp (1969) Spatial correlations of storm, monthly and seasonal precipitation. *J. Appl. Meteor.*, **8**(4), 542-550.
- 菊地慶四郎 (1999) 尾瀬の気候解析 気温, 降水量, 積雪深について. *尾瀬の自然保護*, **22**, 8-24.
- 菊地慶四郎 (2000) 尾瀬の気象解析 2. 風速・風向, 地中温度, 日射量について. *尾瀬の自然保護*, **23**, 12-36.
- 菊地慶四郎 (2001) 尾瀬の気象解析 3. 湿度・大気中の水分量について, *尾瀬の自然保護*, **24**, 25-34.
- 菊地慶四郎 (2002) 尾瀬の気候. 上毛新聞社, 前橋.
- 気象庁 (2018) 地域気象観測所一覧 (平成 30 年 9 月 27 日現在). URL: <https://www.jma.go.jp/jma/kishou/known/amedas/kaisetsu.html> (2018.10.7 参照)
- 気象庁 (2020) 気候変動監視レポート 2019 - 世界と日本の気候変動および温室効果ガスとオゾン層等の状況. URL: https://www.data.jma.go.jp/cpdinfo/monitor/2019/pdf/ccmr2019_all.pdf (2020.10.4 参照)
- 気象庁 (2021a) 地域気象観測所一覧 (令和 3 年 10 月 5 日現在). URL: https://www.jma.go.jp/jma/kishou/known/amedas/ame_master.pdf (2021.11.13 参照)
- 気象庁 (2021b) 過去の気象データ検索. URL: <http://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/index.php> (2021.11.14 最終参照)
- 葛葉泰久, 友杉邦雄, 岸井徳雄 (2002) 降水量の空間相関構造. *水工学論文集*, **46**, 127-132.
- 国土交通省 (2016) 水文観測業務規程. URL: http://www1.river.go.jp/kitei_sosoku.pdf (2016.5.31 参照)
- 国土交通省 (2021a) 国土数値情報 行政区域データ. URL: <https://nlftp.mlit.go.jp/ksj/jpgis/datalist/KsjTmplt-N03.html/> (2021.1.25 参照)
- 国土交通省 (2021b) 水文水質データベース. URL: <http://www1.river.go.jp/> (2021.11.20 最終参照)
- 国土地理院 (2021a) 距離と方位角の計算. URL: <https://vldb.gsi.go.jp/sokuchi/surveycalc/surveycalc/bl2stf.html> (2021.11.24 最終参照)
- 国土地理院 (2021b) サーバサイドで経緯度から標高を求めるプログラム. URL: https://maps.gsi.go.jp/development/elevation_s.html (2021.11.20 最終参照)
- 国土地理院 (2021c) 地理院タイル一覧. URL: <https://maps.gsi.go.jp/development/ichiran.html> (2021.1.24 参照)
- 国土地理院 (2021d) Web 版 TKY2JGD Ver.1.3.80. URL: <https://vldb.gsi.go.jp/sokuchi/surveycalc/ky2jgd/main.html> (2021.11.20 最終参照)
- 松野満寿巳 (1954) 山岳地帯の雨量. *日本生態学会誌*, **4**(2), 63-65.
- 西村 満, 吉弘雅士 (2008) 尾瀬山ノ鼻地区の気象 30 年 1977 ~ 2006 年の気象観測結果による平年値と変動傾向の算出. *尾瀬の自然保護 尾瀬国立公園誕生記念号*, 187-199.
- 野原精一 (2012) 尾瀬の自然環境の概要. *低温科学*, **70**, 9-20.
- 尾瀬保護財団 (2021) 尾瀬山ノ鼻地区気象観測資料, 尾瀬山ノ鼻地区および鳩待峠気象観測資料 (「尾瀬の自然保護」資料). 尾瀬生物多様性情報システム, URL: <https://www.oze-fnd.or.jp/ozc/sjs/> (2021.4.11 最終参照)
- R Core Team (2020) R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL: <https://www.R-project.org/>.
- Shimizu, K. (1993) A bivariate mixed lognormal distribution with an analysis of rainfall data. *J. Appl. Meteorol.*, **32**(2), 161-171.
- 清水邦夫, 寒河江雅彦 (1990) ゼロを含む 2 変量データのモデル化と日降水量データの解析. *応用統計学*, **19**(1), 19-31.
- 東京管区气象台, 東京電力株式会社 編 (1960) 尾瀬地区水文気象調査総合報告. 1953-1957 年, 東京管区气象台, 東京.
- 米勢嘉智, 河村明, 天口英雄, 戸野塚章宏 (2017) 雨域移動に着目した都市流域における XバンドMPレーダ雨量の時空間相関特性. *土木学会論文集 B1*, **73**(4), I217-I222.
- 吉井広始, 鈴木伸一, 片野光一, 大森威宏 (2014) 2011 年 7 月豪雨とケルミ - シュレンケ複合体について. *尾瀬の自然保護*, **36**, 1-14.
- 吉野正敏 (1975) 小気候 (第 9 版). 地人書館, 東京.

電子資料 1 表

電子資料 2 図

電子資料 3 図高解像度版

電子資料は本文 pdf とともに北海道大学学術成果コレクション HUSCAP で閲覧可能.

(<https://eprints.lib.hokudai.ac.jp/journals/index.php?jname=173>)