

金華山島の鹿を半減させた1984年1～4月の 異常低温と融雪遅延の熱収支解析*

近藤 純正** 山崎 幸雄**

要旨

宮城県牡鹿半島の東側にある小島「金華山」では、1984年1～4月の異常な低温でシカ（ニホンジカ）が大量に死亡した。今回の異常低温は、金華山島の過去102年間では、1944・45年の2年連続の異常低温に匹敵する。金華山島のように海で囲まれた孤島では、大気異常低温と、それによって生じた海水温度の低下が島の微気候をより寒冷化するとと思われる。シカの大量死をもたらした最大の気象学的原因は、異常低温で島の積雪が4月まで融けずに標高200m以上の地面を覆い、また草木の成長を遅らせたことである。そこで雪面蒸発と融雪状況を熱収支の方法でシミュレートし、春先の島の気候を検討した。

1. はしがき

1984年1～5月は全国的に低温で、特に3～5月中の月平均気温は各地で低温記録を更新したり（小名浜、前橋、甲府、銚子、豊岡、宮古）、タイ記録を出した（函館、高田、浦河、銚子—気象庁予報部発行季節予報資料による）。春先の異常低温は東北地方の各地で杉など、樹木の葉を枯らせ、また、山野の草木の生長・桜の開花を遅らせた。

宮城県沖太平洋上の小島「金華山」では野生のシカ（ニホンジカ、*Cervus nippon nippon*）が春先の寒さ・積雪・それによる食糧不足で309頭も死亡し生息数は半減した（高槻・鈴木、未発表）。この冬の異常寒波は海面から多量の熱を奪い親潮の南下を強め、海面水温を異常に低下させた。海水の異常低温は、さらに金華山島の気温上昇を抑え、融雪を遅延させた。平年なら、風あたりの良い所では、暖かい海面から風が吹けば10cm程度の積雪は1日程度で消失する。しかし、この冬は寒さで降雪が多かったのに加え、海水が低温で、標高200m以上は3月中30cmの根雪となり、雪が深い所は50cm以上で、頂上近くでは4月まで残ったと言う。

金華山島ではこの35年余、好適な気候が続いたことと、1年間に10～30頭程度の捕獲分譲以外は狩猟禁止によってシカは過密状態にあったと考えられる。この状況下に、異常寒波と積雪でシカの生活範囲は限定され、食糧不足で死に至ったのであろう。

本研究の目的は、過去の約1世紀の気象資料から1984年の1～4月は如何に稀な異常低温であったかを示し、それが金華山島のような海洋上の孤島で局地気象環境をどう変化させうるかを示すことである。

2. 金華山島の概況

金華山島は宮城県仙台湾の北東縁に突出する牡鹿半島先端の東側にあり、最長部は東西3.6km南北5.0km、面積960haの小島である。島の大きさの割には急峻な山がそびえ、頂上標高が445mで、斜面の平均傾斜角は約20°である。周囲の海岸は至る所絶壁で、西海岸の港の近くの標高120mの所には黄金山神社がある。この島は原生林の中に野生のシカが生息した自然地域として有名である。島の南東の絶壁の上には灯台があり、標高46.8mの気象観測用露場では1882年（明治15年）6月から現在まで気象観測が行われている。

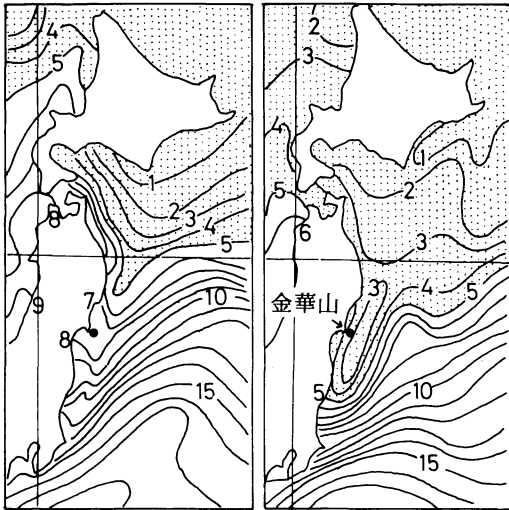
金華山灯台における3月の平均気温の平年値（1971～1980年）は4.7°C、周囲の海面水温平年値は7～8°Cである（第1図左）。ところが、この1984年3月の平均気温は2.2°C、海面水温は3～4°C（第1図右）で平年より4°Cも低温である。

* The unusual cold winter that lost many Japanese deer in Kinkazan island, Miyagi Prefecture.

** Junsei Kondo, Yukio Yamazaki, 東北大学理学部地球物理学教室。

—1984年9月20日受領—

—1984年12月13日受理—

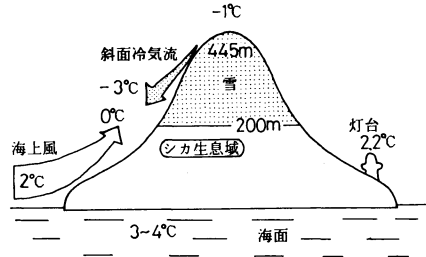


3月 平年値 (°C) 1984年3月 (°C)

第1図 (左) 3月の北日本近海の海面水温平年値, (右) 1984年3月の海面水温 (気象庁全国海況旬報による). 4°C以下の海域に陰をつけた.

金華山灯台で日平均気温が約 2°C 以下の降雪日の降水量を雪によるものとみなせば, 1984年1月の雪の降水量は 17 mm, 2月は 55 mm, 3月は 2 mm である. 灯台の気象資料によれば, 3月1日を中心とする5日間の平均気温は -0.4°C であるので, 標高 200m 付近の山地における平均気温は約 -1.5°C と推定できる. 近藤と山沢 (1983) の式 (29) によれば積雪密度は 0.19 gcm⁻³ と推定できるので, 3月1日前後の山地積雪量は約 38 cm になる. この積雪量は前述した証言とも矛盾しない. この雪が3月じゅう残り, シカにとっては不運な気象環境となったのである.

第2図に模式的に示されるように海水温 3~4°C, 海上気温は, 灯台の気温から推定して 2°C で, この風が海上から金華山に吹き上げたとしても, 標高 200m 以上では 0°C 以下になる. また, 一般風が弱い時は, 特に, 島の北西から北側の谷合い斜面の雪で覆われた草地や落葉樹林では斜面冷気流が発達し, 雪線付近では約 -3°C となり, 冷気層は地形と斜面長からして, 厚い所で約 10m になる (近藤, 1984b; 近藤・佐藤, 1984). この3月の金華山灯台における日照率は61%で平均より20%も多かったが, 低温のために融雪は遅延した. 熱収支の見地からすれば融雪は日射があっても, 気温と湿度が高くなければ盛んにならない (近藤, 1981, p. 126参照).



第2図 金華山島の1984年3月の状況を示す模式図.

第1表 金華山灯台における観測時刻の変更による月平均気温の誤差 (この値を生資料に加えたものを正しい月平均気温とし, 第2表に示す).

気温観測時刻 (時)	補正值 (°C)		期 間 (年/月)
	4~9月	10~3月	
0, 3, 6, . . . (8回)	0.00	0.00	1882 ~1887/5
2, 6, 10, . . . (6回)	0.00	0.00	1887/6~1903/3
2, 12, 22	0.17	-0.02	1903/4~1905
6, 14, 22	-0.01	0.00	1906 ~1952
3, 9, 15, 21	0.00	-0.02	1953 ~現在

融雪遅延の定量的計算は第7章で示される.

3. 金華山灯台における 102 年間気象資料

日本の多くの気象観測所は都市や住宅地あるいは田・畑など周辺環境が時代と共に変化する場所に設置されており, そこでの観測値は必ずしも広い地域を代表するとはかぎらない. それに対して金華山島は昔からほとんど自然のままであるので, 金華山灯台の気象資料はシカの大量死の問題ばかりでなく, グローバルな気候変動を調べる場合の基礎資料としても貴重である.

金華山灯台の気象資料は明治末から大正初期にかけて中央気象台気象年報と月報に印刷公表されたが, その他は公表されていない. そこで石巻航路標識事務所の協力を得て気象観測原簿を転写し, 未整理データは計算し, 各月の平均気温を求めた.

気温観測の時刻は時代によって変更されている. この変更が月平均気温の統計値に生ずる誤差を次の方法で算出した. 明治時代の16年間に1日6回観測のときがあるので, 毎月の気温日変化をグラフ用紙にプロットして滑

	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月
1882						175	218	235	215	175	110	53
1883	26	15	35	83	118	167	218	235	215	175	110	53
1884	26	20	36	80	115	158	202	225	192	152	80	35
1885	08	10	20	70	119	170	188	232	212	168	116	68
1886	23	15	55	98	138	180	238	284	231	177	113	57
1887	22	22	49	95	122	163	214	234	188	168	112	84
1888	13	-05	50	83	119	143	201	238	198	154	83	51
1889					114	152	188	230	197	154	89	47
1890												
1891												
1892	17	30	31	107	147	189	228	244	218	166	95	
1893	09	-01	39	91	121	183	222	225	205	155	108	39
1894	18	22	48	105	142	210	242	250	213	163	126	22
1895	12	20	36	94	133	164	186	218	214	170	99	55
1896	20	24	14	85	122	172	193	220	195	141	93	32
1897												
1898												
1899												
1900	31	28	42	89	136	178	200	234	212	160	101	43
1901	12	18	53	80	122	165	184	205	196	149	104	28
1902	48	33	55	106	128	165	198	226	209	152	96	33
1903	04	31	36	88	125	178	198	224	199	150	90	52
1904	37	-01	33	72	128	158	180	200	201	160	99	67
1905	08	08	43	89	128	145	182	211	189	148	80	58
1906	27	08	38	82	117	177	201	238	198	149	104	28
1907	11	06	28	84	129	167	187	228	184	155	80	41
1908	08	09	22	101	130	166	224	226	201	143	106	37
1909	38	05	29	91	136	185	204	223	198	162	102	26
1910												
1911	18	28	62	106	148	185	212	224	210	158	119	40
1912	21	40	46	96	124	156	190	213	183	144	78	38
1913	11	19	20	88	118	150	174	202	182	140	89	48
1914	42	22	63	80	134	175	214	230	205	154	120	50
1915	08	28	32	77	123	177	201	225	206	157	112	60
1916	38	23	32	77	123	177	201	225	206	157	112	60
1917	26	27	42	90	118	153	215	222	205	165	82	48
1918	08	18	30	70	121	165	200	233	212	154	94	31
1919	11	24	52	88	121	158	189	222	212	163	118	45
1920	40	48	40	83	108	158	228	231	210	161	118	50
1921	32	24	37	112	142	188	218	243	208	156	86	44
1922	-19	40	36	95	120	177	229	261	215	169	106	34
1923	14	07	48	78	120	152	198	245	217	157	111	43
1924	15	21	82	128	141	178	213	242	212	150	105	42
1925	16	07	26	82	118	168	198	243	212	150	105	42
1926	01	26	36	72	111	152	211	221	213	142	85	25
1927	00	-08	32	75	130	164	218	245	187	162	110	44
1928	19	12	38	81	130	158	191	216	226	168	108	34
1929	04	12	38	83	112	150	221	252	165	162	112	70
1930	10	33	62	84	138	180	217	248	204	168	100	45
1931	14	-01	47	82	131	162	183	225	203	158	110	54
1932	46	24	45	82	138	154	217	232	189	159	111	86
1933	13	25	29	66	125	177	229	247	213	153	108	55
1934	16	10	32	78	133	180	188	217	185	144	88	39
1935	22	37	45	87	120	166	199	214	190	169	98	39
1936	-03	07	31	76	118	180	214	228	221	181	105	55
1937	22	37	43	81	160	198	216	249	200	155	108	34
1938	14	13	52	100	148	184	195	238	209	167	112	65
1939	02	09	36	88	124	172	239	245	226	180	120	55
1940	12	25	56	77	132	167	223	221	181	164	122	57
1941	34	24	52	87	131	171	182	207	189	160	112	58
1942	-02	-02	63	106	147	182	234	240	228	176	98	28
1943	07	17	30	60	118	165	210	249	217	161	89	44
1944	05	02	21	60	123	171	208	247	208	156	88	25
1945	-12	-14	25	85	108	148	174	229	198	154	102	35
1946	25	22	33	63	123	162	219	242	213	168	118	37
1947	25	07	37	82	125	161	201	247	217	160	90	22
1948	38	23	43	110	152	190	221	238	215	160	101	68
1949	49	50	35	80	143	153	208	230	206	161	82	48
1950	31	24	47	83	155	176	233	244	218	148	107	48
1951	08	23	47	63	138	175	208	252	198	161	101	71
1952	27	03	41	87	137	172	207	226	206	161	105	37
1953	18	15	61	94	137	157	206	219	198	169	85	66
1954	32	48	58	119	147	158	183	239	217	150	108	55
1955	25	36	53	104	136	189	235	243	200	161	102	67
1956	24	15	47	86	143	172	192	214	204	162	102	32
1957	33	17	38	101	136	163	205	232	194	158	112	67
1958	30	37	47	95	137	179	207	222	201	149	103	74
1959	29	51	64	114	142	167	214	228	212	167	109	61
1960	21	41	55	90	137	178	221	241	217	158	114	55
1961	18	22	53	108	156	183	227	237	200	163	115	60
1962	31	28	47	87	146	173	207	240	212	157	105	64
1963	22	27	48	100	135	163	187	227	188	148	108	67
1964	31	12	47	102	142	175	208	240	196	145	101	59
1965	33	17	32	76	127	165	182	233	207	156	104	58
1966	23	38	61	96	130	157	203	237	207	172	113	38
1967	18	25	63	108	162	200	247	202	157	88	48	
1968	26	15	63	92	127	178	216	235	200	145	119	82
1969	30	05	12	50	109	153	218	248	209	156	111	49
1970	24	28	20	87	140	174	217	225	207	161	103	42
1971	32	28	44	83	133	167	218	229	186	148	106	62
1972	50	38	58	151	185	218	238	207	170	108	102	47
1973	48	42	40	113	143	150	213	253	214	160	102	47
1974	21	21	31	63	141	182	189	228	200	160	89	32
1975	25	18	47	101	139	171	208	243	221	165	121	48
1976	20	38	54	87	140	174	198	215	196	157	80	44
1977	-05	18	50	88	128	167	207	218	218	172	128	67
1978	54	-01	43	85	132	181	218	248	205	156	107	73
1979	44	04	58	95	144	198	209	247	218	180	125	81
1980	35	13	46	88	136	181	182	189	181	156	115	59
1981	13	27	43	91	117	136	201	218	187	157	83	60
1982	31	18	53	82	140	155	188	222	198	148	118	71
1983	32	17	47	113	137	148	177	220	200	147	88	42
1984	07	-05	22	57	107	157	208					

第2表 102年間の金華山気温資料 (0.1℃)

第3表 74年間の江の島水温資料 (0.1℃)

*、#: 本文中の方法で推定した値

	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	
1910						106	169	200	225	208	182	189	139
1911	121	111	123	123	107	167	177	202	216	188	159	163	
1912	131	83	60	81	104	118	139	169	199	164	130	118	
1913	84	57	46	64	85	118	149	183	180	162	134	115	
1914	89	81	78	78	98	146	183	214	209	188	162	141	
1915	75	73	72	82	105	143	176	205	215	193	152	122	
1916	105	83	76	76	96	129	178	226	222	190	157	132	
1917	107	82	76	80	102	131	185	214	207	184	145	112	
1918	88	58	55	68	83	138	175	211	217	183	148	109	
1919	85	70	70	85	113	177	205	206	200	183	157	130	
1920	105	73	68	74	83	129	195	215	216	178	150	123	
1921	107	110	100	109	156	173	193	245	220	187	152	129	
1922	112	81	52	77	113								

らかな曲線で結んで毎時気温を読みとり、24時間平均値を求め、それを真値とする。次に、観測時刻が、たとえば2, 12, 22時の3回の場合はその時刻の気温を読み取り3回平均値を計算する。これと真値との差を誤差と考える。各月の誤差を求めてみると、第1表に示すように、強風の日が多く日射が弱い10～3月と、弱風日が多く日射が強い4～9月の2季で系統的な違いがある。第1表によれば、1日3回観測の1903年4月から1905年までの4～9月のみ実質的な補正が必要である。第2表に補正した毎月の平均気温を示す。気温補正值が小さい理由は、金華山島は海で囲まれ気温日較差が平均 5.5°C と小さく、本土の内陸部におけるその約半分であることによる。

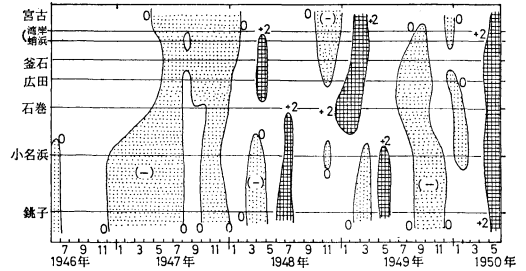
4. 宮城県江の島における74年間水温資料

金華山島から北へ約12 km、牡鹿半島から約7 km離れた所に周囲が岩礁より成る直径約0.6 kmの江の島がある。江の島は小島ながら、古くから多数の漁民が住んでいる。この北岸では宮城県水産試験場の委託で郵便局の沢村家が代々、毎日10時と15時に海水温度を観測している。1910(明治43)年5月から記録があり、わが国沿岸観測の記録としては、北海道高島に次いで古いといわれている。この島は近くの本土から流出する大きな河川がなく、水温観測点としては恵まれており、沖合の水温変化と非常によく相関関係を示すことが確かめられている(畑中, 1952)。

あとで示されるように、江の島における水温は東北方太平洋側の水温をよく代表するので、漁況との関連のみならず気候変動研究の基礎資料としても貴重である。しかし、残念ながら記録原簿は現在、火災・チリ地震津波等の事故により約6年分欠けている。

水温資料消失期間のうち、1923年の4月と5月、および1944年3月～1947年5月の3年5箇月分については次の方法で水温資料を再現した。畑中(1952)の論文の第3図には、この期間を含む江の島の毎月の水温の年偏差の積分値もプロットされている。これをルーペで読みとり差分を求め、年偏差に加えて毎月の水温を算出した。読みとりから生ずる誤差は、各月の水温で $\pm 0.2^{\circ}\text{C}$ 、連続4箇月間の平均水温では $\pm 0.05^{\circ}\text{C}$ である。

さらに、資料消失期間の1947年6月～1950年3月の2年10箇月の毎月の平均水温 T_E は次の方法で推定した。まず、太平洋沿岸に沿って宮古から銚子までの沿岸水温の年偏差値の空間・時間分布図をつくった。その一部



第3図 宮古(湾岸と蛤浜)、釜石、広田、石巻、小名浜、銚子の沿岸水温の年偏差からの偏差の空間・時間変化の例(1946年6月～1950年5月)。

分は第3図に示されるように、偏差は宮古から銚子まで高い相関関係がある。

そこで、

\bar{T}_E : 江の島の月平均水温の年偏差、ただし1936年1月～1947年5月と1950年4月～1951年5月期間、

Δ_E : 江の島の月平均水温の年偏差 \bar{T}_E からの偏差、

Δ_{MKHIO} : 宮古の浜(欠測時は宮古湾岸)、釜石、広田、石巻、小名浜における月平均水温の年偏差(1936年1月～1951年5月期間の平均)からの偏差の5地点平均値、

としたとき、次の相関関係を得た。

$$\Delta_E = 1.34 \Delta_{MKHIO} + 0.1^{\circ}\text{C} \quad (1)$$

ゆえに毎月の水温は次式から推定できる。

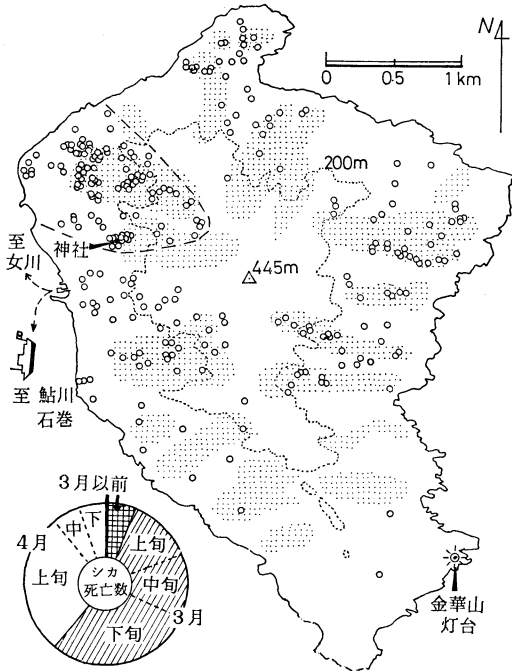
$$T_E = \bar{T}_E + \Delta_E \quad (2)$$

式(1)の右辺第2項は江の島と他の5点の水温年偏差を算出した統計期間が違うことによって生じた値である。なお、相関関係の式(1)のまわりの各観測値の分散から、 T_E の推定誤差を計算してみると $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ 、また、連続4箇月間の平均水温の推定誤差は $\pm 0.29^{\circ}\text{C}$ (標準偏差)である。したがって可能な誤差は $\pm 0.29^{\circ}\text{C}$ とみなされるので、最大誤差は $\pm 1^{\circ}\text{C}$ を超えることはまずないとよい。

以上の方法で欠落資料を穴うめし、第3表を作った。

5. 金華山島のシカの生息数と死亡頭数

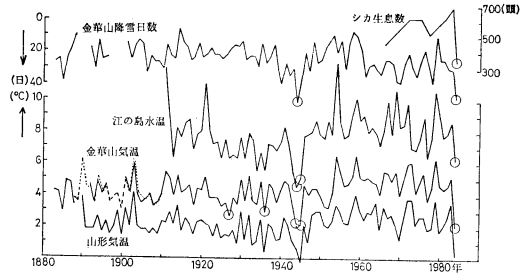
第1図右で示したように、金華山島周辺海域の3月の水温は年より 4°C も低温であるので、この年の金華山島は年偏の北海道沖の洋上にあったことに等しい。この島に生息するシカと同種のシカの生存北限は本土では岩手県の五葉山(金華山島から北へ100 km)といわれている。



第4図 金華山島で1984年春に確認されたニホンシカの死亡地点分布図(高槻と鈴木, 未発表資料にもとづく). 小円は死亡地点, 点刻域は谷地形の場所, 点線は標高 200m, 北西域の太い破線は死亡密集域. 図の左下はシカの死亡数の期間の頻度分布で, 3月下旬と4月上旬に集中している.

東北大学理学部生物学教室の高槻成紀・鈴木和男(未発表)によれば, 金華山島のシカの生息数は1983年11月に688頭, 1984年5月に348頭で, その差340頭は死体確認数309頭とほぼ一致する(誤差は31頭). 死体検査によれば死亡数は3月上旬からしだいに増加し, 3月下旬から4月上旬の間に最多となり, 4月下旬まで続いている. 死亡原因は食糧不足から栄養失調や肺炎にかかったり, 転落によると推定されているが, いずれも, 元をたどれば, 異常低温と消雪の遅れに起因している. 金華山島の過去におけるシカの生息数は山形大学教育学部の伊藤健雄教授らによって調査されている. これらの結果はあとで第5図に示される.

この冬のシカの死体確認地点を第4図に丸印で示した. 島の北西部に破線で囲んだ範囲は全面積の約1/10で, もともとシカの生息密度が大きい場所である. それにしても全死亡数の約40%がここに集中している. この島の地形特徴を示すために, 谷あい地形には点々で陰を



第5図 金華山灯台の1～4月の平均気温と降雪日数. 江の島の1～4月の平均水温, 山形の1～4月の平均気温, 金華山島のシカの生息数の異年変化. 金華山灯台の気温に並べて描いた破線は石巻測候所(1888～1910年)の1～4月平均気温に1.2°C加えた値.

つけた. 谷あい地形で死亡数が多い傾向にある. シカは強風を避けて集まったかも知れないが, 谷あいは冷気の溜まりやすい所である. シカがやむなく密集した所では食糧不足となり大量死をもたらしたであろう. シカはこの島のいたる所に生息するが, 南部の灯台周辺での死亡数は2～3頭である. この付近は日当たりもよく暖かいことと関係しているのかもしれない.

6. 気温と海水温度の相関関係とシカ生息数

金華山灯台の1～4月の平均気温と降雪日数, 江の島の1～4月の平均水温の年々変動を第5図に示した. さらに, ごく最近のシカの生息数もプロットした. 金華山島での異常低温は, 1883年(明治16年)以来5回起こり, その第1回目は1927年(昭和2年), 第2回目は2.26事件があった1936年(昭和11年)である. この2回は今回ほど低温ではない. 第3・4回目は終戦直前の1944～1945年に2年連続して起こっており, これと今回のものが最強の異常低温である.

上記5回の異常低温を第4表で比較した. 表中の3月1日の積雪量とは標高200m付近の積雪量を金華山灯台の気温と降水量と天気から第2章で述べた方法で推定した値, 3月初の平均気温とは3月1日中心5日間の金華山灯台における平均気温である.

第5図からわかるように, 内陸の山形の気温が低い冬は江の島の水温も低く両者には相関関係がみられ, 大気の異常低温が海水温度を下げたと考えられる. 金華山灯台の気温と江の島の水温の相関関係は一層強く, これは一旦下降した海水温度が海で囲まれた孤島の気温に影響を及ぼしたからだと考えられる. ちなみに山形の気温と

第4表 金華山島における過去100年間に起こった1～4月の異常低温の比較、江の島水温以外は金華山における値。

西暦年 (和暦)	1927 (昭2)	1936 (昭11)	1944 (昭19)	1945 (昭20)	1984 (昭59)	
気温 °C	2.7	2.8	2.2	2.1	2.0	
江の島水温 °C	6.4	5.6	4.5	5.0	6.2	
降雪日数	18	27	52	38	49	
3月1日積雪深 cm	21	10	20	22	38	
同上、水換算 mm	32	22	51	52	72	
降水量 (mm)	1月	29	55	20	14	18
	2月	31	58	53	38	55
	3月	202	91	82	88	10
雪の降水量 (mm)	1月	13	4	19	14	17
	2月	25	29	41	38	55
	3月	47	46	54	69	6
3月初の平均気温 °C	-2.7	1.2	1.8	1.4	-0.4	

江の島の水温、および金華山灯台の気温と江の島の水温の相関係数はそれぞれ、 $r=0.62$ と $r=0.79$ である。大気と海洋の相互作用の定量的解析は別報にゆずる。

なお、第1図によれば1984年3月の金華山付近の海水温度は3～4°Cであるのに対し、第4表の江の島の水温は6.2°Cで高い。この違いは、第1図が外洋での観測をもとにえがかれたのに対し、江の島の水温は島の沿岸観測であることによって生じたものである。一般に、島の近くでは水深が浅いために昇温期には外洋より高温になり、秋の降温期には低温になる。しかし第4章で述べたように、江の島の水温の年による平均偏差値は沖合における変化とよい相関関係がある。

7. 異常低温による融雪遅延の熱収支

この節では前節の、3月1日に38cmあった積雪深(水に換算して7.2cm)の消失過程を熱収支の方法でシミュレートする。

地表面(この場合は積雪面)における熱収支式は R を入力放射量とすれば、

$$R = \sigma T_s^4 + H + lE + G_0 \quad (3)$$

ただし、

$$R = (1 - \text{ref})S\downarrow + L\downarrow \quad (4)$$

各項はいずれも単位面積当たりの熱流量で、 σT_s^4 は積雪面温度 T_s に相当する黒体放射エネルギー、 H は雪面から大気への顕熱輸送量、 lE は雪面蒸発によって失う

潜熱輸送量 (E は蒸発量、 l は単位質量当たりの蒸発の潜熱)、 G_0 は雪面下へ流れる熱量、 $S\downarrow$ は水平面日射量、 ref は積雪面アルビード、 $L\downarrow$ は下向き大気放射量である。金華山島では1～2月中0°C前後の気温が長期に続いたので、積雪とその下の土壌との温度差は小さい。

それゆえ、雪の熱伝導率も小さいので、日々の平均熱収支量を対象にすれば、 G_0 は微小項とみなせる。したがって融雪がない時(低温時)の雪面蒸発を求める基本式は、

$$R = \sigma T_s^4 + H + lE \quad (5)$$

雪面上の気温を T としたとき、金華山島での条件は $|T_s - T| \leq 5^\circ\text{C}$ と考えてよい。

ゆえに、

$$\sigma T_s^4 \doteq \sigma T^4 + 4\sigma T^3(T_s - T) \quad (6)$$

$$q_s - q \doteq (1 - h)q_{\text{sat}} + \Delta(T_s - T) \quad (7)$$

ただし、 q_s は雪面温度 T_s に対する飽和比湿、 q_{sat} は気温 T に対する飽和比湿、 h ($0 \leq h \leq 1$) は相対湿度、 q は大気の比湿、 $\Delta = dq_{\text{sat}}/dT$ で気温の関数。 H と lE はバルク式を用いれば、

$$\frac{H}{c_p \rho} = C_H U (T_s - T) \quad (8)$$

$$\frac{lE}{\rho} = C_E U (q_s - q) \quad (9)$$

ただし、 c_p と ρ は空気の定圧比熱と密度、 C_H と C_E は顕熱と潜熱に対する雪面のバルク係数、 U は雪面上の風速である。

式(5)～(9)から次の関係を得る(近藤, 1984a, 式(13)と(15)と(39)と(41)参照)

$$\frac{lE}{R - \sigma T^4} = \frac{\Delta}{\gamma} J (T^+ + q^+ (1 - h)) \quad (10)$$

ただし、

$$T^+ = \frac{1 - J \frac{\Delta}{\gamma} q^+ (1 - h)}{1 + J \left(1 + \frac{\Delta}{\gamma}\right)} \quad (11)$$

$$J = \left(\frac{c_p \rho}{4 \sigma T^3}\right) C_H U \quad (12)$$

$$q^+ = \left(\frac{4 \sigma T^3}{R - \sigma T^4}\right) \frac{q_{\text{sat}}}{\Delta} \quad (13)$$

$\gamma = c_p / l$ 、また T^+ は $(T_s - T)$ の無次元量で次式で定義される。

$$T^+ = \frac{4 \sigma T^3}{R - \sigma T^4} (T_s - T) \quad (14)$$

なお、雪面であるから蒸発能 $i \doteq C_E / C_H = 1$ と仮定してある。雪面上の日々の気象データを式(10)に用いて蒸発量を算出することができる。式(10)は積雪面温度の

資料がない時の蒸発量を求める関係式である。

しかし、式(11)から求めた T^+ を式(14)に代入したとき、 $T_s > 0^\circ\text{C}$ になる条件では融雪が起こるので、その場合は式(3)で G_0 を無視しない式を用いる。さらに融雪が始まると積雪内には液体の水が発生し、熱伝導率を高め、積雪内にはほぼ 0°C の等温($T_s = 0^\circ\text{C}$)の条件になると考えてよい。したがって融雪時における熱収支式は式(3)より

$$G_0 = (R - \sigma T^4) - (\sigma T_s^4 - \sigma T^4) - H - lE \quad (15)$$

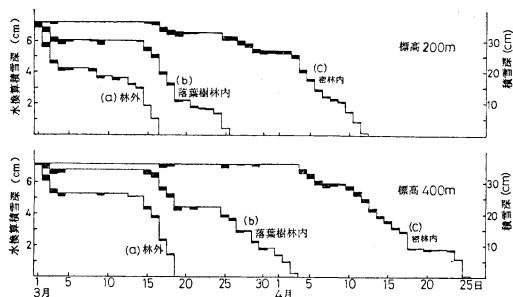
G_0 が融雪エネルギーになる。ただし $T_s = 273.2\text{K}$ である。 l_f を単位質量当りの水の融解の潜熱とすれば、 G_0/l_f は単位時間当りの雪から水になる量(グラム)である。この場合、 q_s は $T_s = 0^\circ\text{C}$ に対する飽和比湿であり、雪面蒸発 E は式(9)から求まる。融雪条件では $E < 0$ 、つまり凝結のことが多いので、凝結量を $C = -E$ とおけば

$$C = \rho C_H U \{ (T - 273.2)\Delta - (1-h)q_s \} \quad (16)$$

具体的な計算を行う対象地点は標高200mおよび400mとし、気温は標高差と日当たりが悪いことを考慮して金華山灯台の気温より、それぞれ 2°C および 3.5°C 低温、 $h = 0.8$ (相対湿度80%)を用いる。放射(日射と大気放射)は金華山島から北西14km、江の島から西8kmの女川町牡鹿半島上で実測した値を用い、日射に対する積雪面のアルビード $ref = 0.5$ を用いる。林内の風速は林外風速の30%程度(Kondo・Akashi, 1976)を考慮し、さらに金華山島の平均傾斜角は約 20° で、雪面上には斜面風が発達するので、落葉樹から成る林内でも雪面上の平均風速は $U = 1\text{m s}^{-1}$ と仮定する(近藤, 1984b, 参照)。ただし曇天(正しくは水平面日射量の日平均値が、 $S \leq 100\text{W m}^{-2}$)で金華山灯台の日平均風速が 3m s^{-1} 以下の日は $U = 0.2\text{m s}^{-1}$ とし、積雪面の $C_H = 10^{-3}$ とする。参考のために開けた場所にある金華山灯台の1984年3月と4月の平均風速はそれぞれ 4.5m s^{-1} と 5.3m s^{-1} であった。

式(9)、(10)、(15)から蒸発量 E と融雪量 G_0/l_f を計算し、積雪の減少を求め第6図に示した。なお、この計算で融雪が起こり始めても翌日凍結条件($G_0 < 0$)になることもあり、また積雪内には若干の液体水も含まるので、最大含水率5%(日平均)を残し他は流出し積雪深は減少するものとした。

放射量の違いによる効果をみるために、大きく3つの場合に分けて計算した。第6図(a)は放射の観測値をそのまま使用したもので、日射・大気放射をさげざる樹



第6図 金華山島の山地積雪の時間変化。上段は標高200m、下段は標高400m。縦軸左側目盛りは積雪を水に換算したときの深さ、右側目盛りは積雪密度を 0.2grcm^{-3} とみなしたときの積雪の深さ。積雪深の黒部分は積雪内に含まれる融水量。

木などのない林外に相当する。この場合、雪は標高200mで3月17日、400mで3月19日に消える。(b)は放射量($R - \sigma T^4$)を(a)の半分にした場合で、落葉樹に被われた地面に近いものである。この場合の消雪日は標高200mで3月26日、400mで4月4日となり、これは地元の人々の証言とも矛盾せず、実際の代表的な融雪過程に近いものと考えられる。(c)は放射量($R - \sigma T^4$)をゼロにしたもので、完全な密林内(実際にはない)を想定した場合で、雪は4月の中旬まで残ったと考えられる。

なお、うえては水平地面を考えた。しかし南斜面(傾斜角 20°)では水平地に比べて直達日射で約10%多いが、正味放射量では約5%多く、(b)の場合で消雪日は1日程度しか早まらない。北斜面は逆に、その程度おくれる。

現地の針葉樹林内は空の透き間具合からして、図の(b)と(c)の中間と考えてよい。金華山島の平均的な(b)の結果に対して、気温と風速の影響を調べた。まず、気温がこの年より 3°C 高いとして計算すれば、消雪は標高200m、400mでそれぞれ12日および17日早まり、この年の低温が消雪を遅延させたことがわかる。一方風速を2倍に変えても消雪日はほとんど不変である。

これは、風速を2倍にしたときの1日の融雪量の増加の最大値が 1.3mm (水換算量)で、1日の最大融雪量 19mm に比べて小さいこと、また 0°C の積雪面に対して気温も 0°C 付近を上下するため、正味顕熱輸送量が小さいことによる。つまり、風速が融雪量に対して支配的になるのは高温(5°C 以上)のときである(近藤, 1981, p. 126参照)。

8. あとがき

金華山島にはシカを食べる天敵がいないうえに保護されているので、島の植物はシカに食いつくされ危機に面していた。異常気象という自然の力がシカを間引きして自然環境のバランスを一時的ではあるが回復させたと考える。

この報告を書き終えて、金華山島をたずねた。ここは恐山、出羽三山と並んで東北の三大霊山の一つで原生林につつまれた自然がそのまま生きた景勝地と聞いていた。しかし、よくみるとこの島の異様に気づいた。夏だというのに林に植物の下生えがほとんど育っていない。シダなどシカの敬遠する植物だけが生え、シバフが、きれいに手入れされた公園のようにシカに食い刈られている。航空写真や対岸の牡鹿半島からの写真では、島のあちこちにハゲが見える。島の所々に柵を設けてシカを立ち入れなくし、植物を保護した場所があった。

しかし、金華山島は過保護されたシカによって、まさに滅びゆく原生林「霊山」の観がある。人間の力はシカと自然の力をしのぎ原生林を保護できるであろうか。大木はつぎつぎと嵐に倒れ、林は保水力を失い、やがて金華山全体は花崗岩を露呈した姿へと変貌していく兆しを想像した。世界の緑野に人間が家畜を放牧しすぎたため、砂漠となった地域もあることを思い出して島を後にした。

この論文は異常気象による鹿の死を取り扱ったものである。鹿の大量死の事件は、高等動物といわれ、しかも文明社会に住む人間がなぜ災害によって死傷するかをわれわれに問いかけている。それゆえ、以下のことを付記しておきたい。実はこの論文を投稿したところ編集委員を通してレフリーから、「島の南のほうは生活環境が良いのに、なぜ鹿はそこに移動しなかったか？」という意外なコメントがあった。その意外性の第1は鹿にとって真の生活環境の良し悪しは気温とか日当り以外の多くの要素で決まるのに、島の南のほうが生活環境がよいとレフリーが判断された点、その第2は鹿は死ぬ前に、なぜ移動しなかったかと著者に問う点である。この回答は鹿に聞いてみないと分からない。しかし、鹿が人間だったら、次のような返答をするかも知れない。すなわち生き残りの親鹿が語るには「今年のような異常な寒さは今までに経験もないし、老鹿から伝え聞いたこともなかった。3月になって、そろそろ草も生えてくると思ったら、寒くてさっぱり生えない。子鹿は腹がへって体力が弱ったとき、カゼをこじらせ肺炎で死んだ。そして老鹿

も空腹でふらふらしながら崖の上へ草を探しに行って、足をすべらし転落し、けがをして歩けなくなり、ついに餓死した。4月になって、自分は南のほうへ行こうと考えたが、そのころは体力も衰えているので、途中の険しい山道を越え、そして縄張りを破って行く自信がなかった」そして鹿は次の問いかけをするに違いない。「人間は災害でなぜ死ぬか？」と。

謝 辞

本研究を行うに当たり、石巻航路標識事務所の菅田益實所長・鷹見哲郎業務課長ほか、宮城県水産試験場の渡辺競場長・加藤信彦漁業科長・霜山まさ子氏、東北電力K.K. 環境技術課、第二管区海上保安部、東北区水産研究所の黒田隆哉部長ほか、金華山黄金山神社禰宣の堀正受氏、石巻農林事務所技術主幹の森弘次氏、仙台管区気象台の瀬良義郎氏、NHK 仙台放送局の大槻悟氏からは情報・資料の入手に御協力を受け、また東北大学生物学教室の高槻成紀博士からは貴重な資料と共にコメントをいただいたので、ここに謝意を表します。

文 献

- 朝日 稔・東 滋・伊藤健雄・林 勝治, 1967: 1966年宮城県金華山島における大型哺乳動物の調査—シカ, JIBP-CTS 昭和41年度研究報告, 189-196.
- 伊藤健雄・阿部真幸・園部刀雄・野島 哲・渡辺邦夫・本田圭一, 1973: 輪切り法による金華山島のシカの個体数調査, JIBP-CTS 昭和47年度研究報告, 197-207.
- 畑中正吉, 1952: 海況の変動に関する漁業生物学的研究, 東北水研研究報告, 1, 88-119.
- 近藤純正, 1981: 地表面の熱収支 (竹内・近藤著: 大気科学講座第1巻の第5章), 東京大学出版会, pp. 107-137.
- 近藤純正, 1984 a: 複雑多様な地表面の熱収支—研究の指針, 天気, 31, 573-581.
- 近藤純正, 1984 b: 地形と地表面性質が夜間の斜面風・山風・盆地大気の冷却に及ぼす効果 (1), 天気, 31, 625-632.
- 近藤純正・佐藤 威, 1984: 同上 (2), 天気, 31, 747-755.
- 近藤純正・山沢弘実, 1983: 夜間の地表面放射冷却と積雪および日本各地の最低気温の極値について, 天気, 30, 295-302.
- Kondo, J., S., Akashi, 1976: Numerical studies on the two-dimensional flow in horizontally homogeneous canopy layers, Boundary-Layer Meteorol., 10, 255-272.
- 高槻成紀・鈴木和男 (未発表), 金華山島における1984年春のニホンシカの大量死 (仮題).