

台風9119号による塩害と内陸への塩分侵入量について

田中 正昭・鳥羽 良明*

THE DAMAGE CAUSED BY SALT AND THE TRANSPORT OF SEA-SALT PARTICLES OVER LAND DURING THE TYPHOON 9119

By *Masaaki* TANAKA, *Yoshiaki* TOBA

Synopsis

The typhoon 9119, landed at the north-western part of Kyushu on Sept. 27, 1991, passed through the coast of the Japan Sea and landed again at Hokkaido. The typhoon 9119 recorded the high wind speed and the small amount of rainfall in a large area.

Electric supply facilities such as the power station, the transformer substation, the power line, the power supply line were damaged and electric power failure occurred in Yamaguchi, Hiroshima and Okayama Prefecture which face the Seto Inland Sea. More than 100 samples of impacted sea salt, observed by the Chugoku Electric Company, were analyzed.

The total amount of salt transported from the sea to the land by the typhoon 9119 was estimated as about 0.4 mg/cm^2 in the coastal area of Hiroshima Prefecture. The effect of Kyushu and Shikoku islands on the sea-salt concentration at the coast of these Prefectures were estimated. The concentration would not reach the equilibrium value, unless the strong wind blew on the sea surface over more than 100 km distance, or more than one hour.

1. は し が き

1991年9月27日16時すぎに長崎県に上陸した台風9119号は上陸時の中心気圧 940 hPa, 中心付近の最大風速 50 m/s, 暴風 (25 m/s 以上) 半径 300 km, 強風 (15 m/s) 半径 600 km の大型台風であった。その後, 台風は北九州市付近, 山口県を経て, 20時鳥根県沖を北東に進み, 28日未明, 日本海を北上, 8時前北海道に再上陸した。

台風9119号は中国地方全域に強風をもたらし, 各地の最大瞬間風速の記録を更新 (山口 53.1 m/s, 広島 58.9, 松江 56.5, 岡山 39.4, 鳥取 48.6) した。また, 中国地方では山口県西部, 鳥根県の一部を除き降水が少なかった。このため瀬戸内海に面した山口, 広島, 岡山 3 県では海上から運ばれた空中塩分の付着により塩害が広範囲に発生した。中国電力管内 (山口, 広島, 岡山, 鳥根, 鳥取の 5 県) では, 台風通過直後の 28日午前 1 時に, 中国電力が配電する総戸数の 40%にあたる約 155 万戸が停電した。30日午前 0 時までに停電戸数は 13 万戸にまで回復したが, 広島, 山口両県で 30日未明の降雨により停電が新たに 53 万戸が発生し, 一応台風後, 停電が完全に復旧したのは 10月 4 日で, 最長停電継続時間は 154 時間に達した。その後も 10月

* 東北大学理学部教授

17日未明の降雨により、広島、岡山両県で小規模ながら停電があった（中国新聞）。これは、台風9119号による付着塩分が雨水によって溶け出し、発生したものである。特に、海岸部のみならず山間部にもみられたことが注目に値する。この停電災害は広島市域にライフライン災害を生じせしめ、今後の都市災害を考える上で貴重な事例となった¹⁾²⁾。

Table 1 に最近の台風による全国の停電被害（通産省調べ）と台風9119号のそれとを示した。いかに今回の台風による停電個数、停電時間が大規模なものであったかがわかる。もちろん台風直後の停電は強風による送電、配電線事故が主たる原因であるが、停電が長時間継続した原因には塩害によるものが多い。塩害という現象は、主として海面で風と波の相互作用により生成された海水滴（以下海塩粒子と呼ぶ）が乱れにより大気中に舞い上がり、風と拡散によって陸上に運ばれ、地表物体に捕捉され、付着することにより発生するものである。われわれは海面での海塩粒子生成過程、陸上への輸送過程、地表物体の捕捉過程について基

Table 1. Electric power failure caused by the latest typhoon hited Japan since 1985

Typhoon no.	Electric company	No. of houses (unit:10,000)	Occured date	Resumed date	Maximum failure time
8506	Tokyo	54	June 30	July 2	14 hrs. and 30 mins.
	Chubu	1	June 30	July 1	8 hrs. and 43 mins.
	Kansai	1	June 30	July 1	15 hrs.
8513	Chugoku	3	Aug. 31	Aug. 31	4 hrs. and 43 mins.
	Kyushu	141	Aug. 30	Sept. 3	83 hrs. and 49 mins.
8712	Hokkaido	12	Aug. 31	Sept. 1	13 hrs. and 10 mins.
	Chugoku	19	Aug. 30	Aug. 31	18 hrs. and 47 mins.
	Kyushu	93	Aug. 30	Aug. 1	34 hrs.
	Okinawa	27	Aug. 29	Aug. 31	36 hrs. and 53 mins.
8911	Kyushu	75	July 27	July 29	30 hrs.
9019	Tohoku	2	Sept. 20	Sept. 20	4 hrs. and 46 mins.
	Tokyo	8	Sept. 19	Sept. 20	4 hrs. and 01 mins.
	Chubu	75	Sept. 19	Sept. 21	30 hrs. and 15 mins.
	Hokuriku	4	Sept. 19	Sept. 20	6 hrs. and 07 mins.
	Kansai	22	Sept. 19	Sept. 20	4 hrs.
	Chugoku	5	Sept. 19	Sept. 20	13 hrs. and 57 mins.
	Shikoku	3	Sept. 18	Sept. 20	21 hrs. and 28 mins.
	Kyushu	23	Sept. 18	Sept. 20	59 hrs.
	Okinawa	1	Sept. 17	Sept. 18	unknown
9119	Hokkaido	0.4	Sept. 28	Sept. 28	7 hrs. and 45 mins.
	Tohoku	46.8	Sept. 27	Oct. 2	115 hrs. and 09 mins.
	Tokyo	3.9	Sept. 28	Sept. 28	13 hrs. and 38 mins.
	Chubu	1.0	Sept. 27	Sept. 28	15 hrs. and 42 mins.
	Hokuriku	21.6	Sept. 27	Oct. 1	94 hrs. and 15 mins.
	Kansai	19.6	Sept. 27	Sept. 28	24 hrs. and 48 mins.
	Chugoku	155.2	Sept. 27	Oct. 4	157 hrs. and 42 mins.
	Shikoku	11.7	Sept. 27	Sept. 30	77 hrs. and 07 mins.
	Kyushu	210.2	Sept. 27	Oct. 1	113 hrs. and 55 mins.
	Okinawa	3.9	Sept. 26	Sept. 27	34 hrs. and 55 mins.

礎的研究を行い、冬の季節風のように 1000 km の日本海上を長時間定常的に吹走する現象については、海上での生成量、内陸への輸送量、地表物体の塩分付着量、降水量などを算定できるようにした³⁾⁻⁹⁾。

今回の台風のケースは、海塩の生成、輸送の観点からみれば、水平 100 km スケールを持つ風速数 10 m/s の強風域が、数 100 km スケールの九州、四国、瀬戸内海の複雑な地形上を、数 10 km/h の速度で移動している場合の現象である。このように海陸が複雑に入り混じった問題に、定常状態の塩分輸送過程が、どのていど適用できるか、台風9119号による内陸への塩分侵入量は解明すべき問題を提示してくれた。

本報告では、中国電力株式会社が調査した電気施設被害、塩分付着量の資料（以下中国電力資料とよぶ）を解析し、さらに、みかん園の塩害被害が多かった瀬戸内海にある愛媛県温泉郡中島町の現地調査の結果を加えて、1) 電気施設の被害分布の特性、2) 内陸への塩分侵入量、その地域差、3) 塩分侵入量の鉛直分布、4) 被害地域と塩分侵入量、降水量の関係、5) 塩分侵入量の水平分布と台風9119号の強風域との関係、6) 九州、豊後水道、四国など複雑な地形が海岸での海塩粒子濃度におよぼす影響、などを検討し、非定常過程での塩分輸送メカニズムを考察する。

2. 電気施設の塩害被害分布

台風9119号による中国電力管内、山口、広島、岡山、島根、鳥取、5県の塩害による各種電気施設の被害状況は次のようである（中国電力資料）。

1) 発電所 水島（岡山）、下松（山口）の2箇所、その位置と被害状況を Fig. 1 に示す。

いずれも臨海地域にあり、塩分付着により母線碍子の破損が台風通過時に発生した。

2) 変電所 新徳山（海岸から 9 km）、北広島（8 km）、広島（10 km）、南広島（0 km）、呉（2 km）、竹原（2 km）、知井宮（5 km）の7箇所、その位置と被害状況を Fig. 1 に示す。

塩分付着により母線碍子破損が台風通過時または直後に発生した。被害をうけた変電所は臨海地域だけで

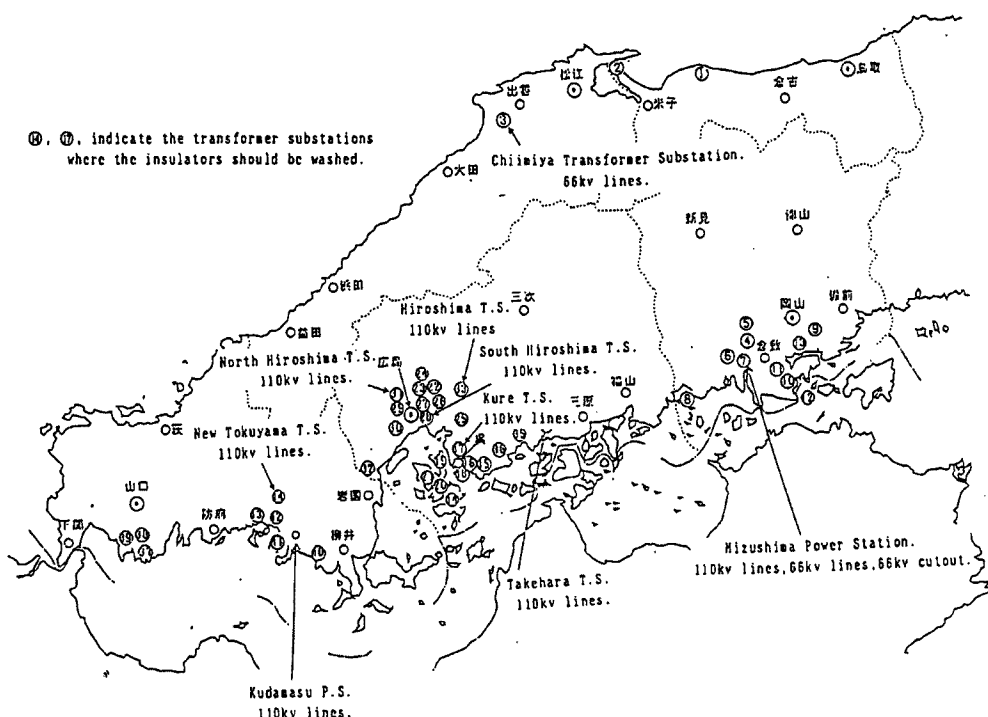


Fig. 1. Distributions of the damaged power station and the transformer substation over the Chuugoku district.

なく海岸から 10 km 離れた内陸地域にまで及んでいる。その分布は広島県に 5 箇所、山口県に 1 箇所、島根県に 1 箇所、塩分侵入量の東西方向の差を示す。破損にまでいたらなかったが台風通過後、碍子に多量の塩分が残ったため、碍子を水洗、清掃した変電所は 44 箇所 (Fig. 1 に位置をしめした) に及び、中国電力管内全変電所 (289 箇所) の 15% にあたる。それを県別にみると、鳥取県 (2 箇所)、島根 (1)、岡山 (10)、広島 (23)、山口 (8) で、それらの変電所の碍子の塩分付着量は 0.1 mg/cm^2 程度と推定される。

3) 送電線路 24 路線、事故箇所 28 である。

県別にみると、島根・鳥取なし、岡山 (2 路線)、広島 (17)、山口 (5) で、南広島線、マツダ中央線 (29 日 05 時 12 分)、笠岡福山線 (28/19/38) の 3 路線を除き、21 路線は台風通過時か直後に発生した。広島県、岡山県では台風通過時に降雨がほとんどなく、塩分付着量が多くても、すぐ事故にならない路線もあった。

4) 配電設備

Table 2 に塩害による機材の被害件数と、その率を県別に示した。中国電力は、今までの経験から、要対策地域として海岸から約 0.5 km 以内を重塩害地域 (塩分侵入量が 0.06 mg/cm^2 を超える地域)、0.5 km ~ 2 km を軽塩害地域 (塩分侵入量 $0.03 \sim 0.06 \text{ mg/cm}^2$ の地域) とし、塩害対策を集中的に行い、海岸より 2 km 離れた地域を要対策地域外としている。配電設備事故は、1), 2), 3) の比較的規模の大きい事故が台風通過時または直後に発生しているのに対して、何日か遅れて発生したものも多い。被害件数は海岸近く要対策地域と、2 km 以上離れた地域外が同程度であるが、被害率は当然海岸近くの方が数倍高い。たとえば「柱上変圧器ブッシング汚損による高圧カットアウトヒューズ切れ」事故は 9 月 27 日 18 時から 10 月 11 日 18 時の期間、合計 14,060 箇所が発生し、その 10% が海岸から 10 km 以上離れた地域である。塩害による碍子・カットアウト等の破損の多い地域を Fig. 2 に示す。

Table 2. Number of the electric supply facilities damaged by salt. Parenthesis shows the rate of damage. "in" means the area within 2 km from the sea. "out" the other area.

Prefecture	Insulator	High voltage cut-out	Transformer on utility pole	Transformer for DM power	Switch on utility pole
Tottori in	0 (0.0)	0 (0.0)	0 (0.0)	0 (0.0)	0 (0.0)
out	0 (0.0)	0 (0.0)	0 (0.0)	0 (0.0)	0 (0.0)
Shimane in	0 (0.0)	32 (0.2)	4 (0.0)	6 (2.7)	1 (0.1)
out	0 (0.0)	33 (0.0)	12 (0.0)	23 (1.6)	1 (0.0)
Okayama in	4 (0.0)	168 (0.4)	39 (0.1)	60 (7.3)	4 (0.1)
out	100 (0.0)	308 (0.1)	119 (0.1)	154 (3.8)	10 (0.0)
Hiroshima in	63 (0.0)	831 (1.4)	108 (0.3)	126 (12.0)	38 (0.5)
out	137 (0.0)	1025 (0.3)	82 (0.0)	63 (1.2)	32 (0.1)
Yamaguchi in	6 (0.0)	432 (0.5)	36 (0.1)	64 (4.1)	50 (0.6)
out	5 (0.0)	64 (0.0)	33 (0.0)	44 (1.7)	11 (0.1)
Total in	73 (0.0)	1463 (0.7)	187 (0.2)	256 (6.5)	93 (0.4)
out	242 (0.0)	1430 (0.1)	236 (0.0)	284 (2.0)	54 (0.1)

5) 停電

停電事故の原因と規模を県別に Table 3 に示す。Fig. 2 に主な停電地域を示した。停電事故は強風による鉄塔の倒壊、飛散物による電線断線なども入っている。正確な統計はなされていないが、広島県は塩害によるものが多く、山口県は強風によるものがかなり入っている (中国電力工務部談)。中国電力管内の停電

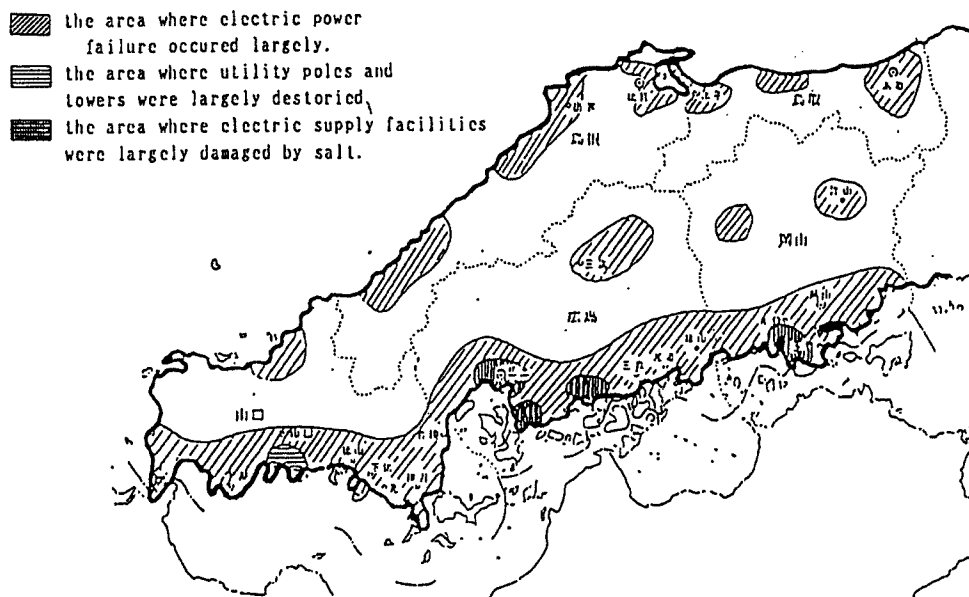


Fig. 2. The large damaged area due to the typhoon 9119.

Table 3. Electric power failure during the typhoon 9119 over Chugoku district.

Prefecture	Damaged facilities	No. of accident lines	Maximum failure lines	Resumed time time
Tottori	Pwer lines		3 mins.	22:49 Sept. 27
	Supply lines	107 (63%)	88 hrs. and 33 mins.	14:26 Oct. 1
Shimane	Power li., Trans. Sub.		7 hrs. and 17 mins.	5:48 Sept. 28
	Supply li.	215 (88%)	97 hrs. and 06 mins.	8:26 Oct. 2
Okinawa	Power li., Trans. Sub.		14 hrs. and 17 mins.	20:11 Sept. 29
	Supply li.	311 (41%)	68 hrs. and 20 mins.	13: 5 Oct. 1
Hiroshima	Power li., Trans. Sub.		12 hrs. and 12mins.	17:25 Sept.29
	Supply li.	803 (72%)	141 hrs.	16:50 Oct.3
Yamaguchi	Power li., Trans. Sub.		95 hrs.	16:45 Oct. 1
	Supply li.	489 (89%)	154 hrs.	3:30 Oct. 4

の時間推移をみると、台風の影響下に入った27日16時頃から、停電戸数は増えはじめ、台風が松江の西の海上を通過している21時、150万戸を超えた。28日01時、戸数はピーク155.2万戸に達した。以後、復旧が進み29日0時27.3万戸、30日0時13.1万戸になった。しかし30日未明から中国地方全域に20mm以上の降水があり、このため付着塩分が溶け出し、配電線事故が発生、停電戸数は30日6時、66.1万戸に増えた。台風通過後、20日経過した10月17日未明からの雨で台風9119号の塩害によるとみられる停電が、広島市、福山市、庄原市、倉敷市、新見市、など6市1町であり、停電戸数は延べ15,300戸余りになった（中国新聞）。

3. 内陸への塩分侵入量、付着塩分による被害と降水の影響

中国電力は台風9119号通過後、内陸への塩分侵入について、次の4つの調査を実施し、貴重な資料を得て

いる (中国電力資料)。

1) パイロット碍子塩分汚損量 (mg/cm^2 , 以下塩分付着量と呼ぶ)

内陸76箇所の変電所にあるパイロット碍子の塩分付着量を10月8日から11日の期間に測定した。

2) 窓ガラス塩分付着量 (mg/cm^2)

1)の変電所12箇所を含む56箇所での窓ガラス塩分付着量を10月8日から11日の期間測定した。

3) 配電線高圧ピン碍子塩分付着量 (mg/cm^2)

瀬戸内海に注ぐ約10河川沿いに90箇所での高圧ピン碍子塩分付着量を10月14日から17日の期間に測定した。

4) 植物被害調査

地上写真及び航空写真による植物の変色, 落葉, 倒伏, 枯死, などの調査から山口県126地点, 広島県118地点, 岡山県60地点での塩分侵入の確認を11月14日から12月1日の期間に実施した。

1), 2), 3)の測定より得られた塩分付着量を県別に, a)山口, b)広島, c)岡山, d)島根県と鳥取県, 最も近い海岸までの距離との相関として Fig. 3 に示した。30 km を超えた地点の測定値は, 三次 (Δ , 50 km, $0.01 \text{ mg}/\text{cm}^2$), 新岡山 (Δ , 36 km, $0.018 \text{ mg}/\text{cm}^2$), 東岡山 (Δ , 34 km, $0.006 \text{ mg}/\text{cm}^2$) 変電所である。○印はパイロット碍子塩分付着量, Δ 印は窓ガラス塩分付着量, +印は高圧ピン碍子塩分付着量, ●印は発電所での自動塩分測定装置による塩分付着率 ($\text{mg}/\text{cm}^2 \cdot 30 \text{ min}$) を台風期間積分したもので次節で述べる。

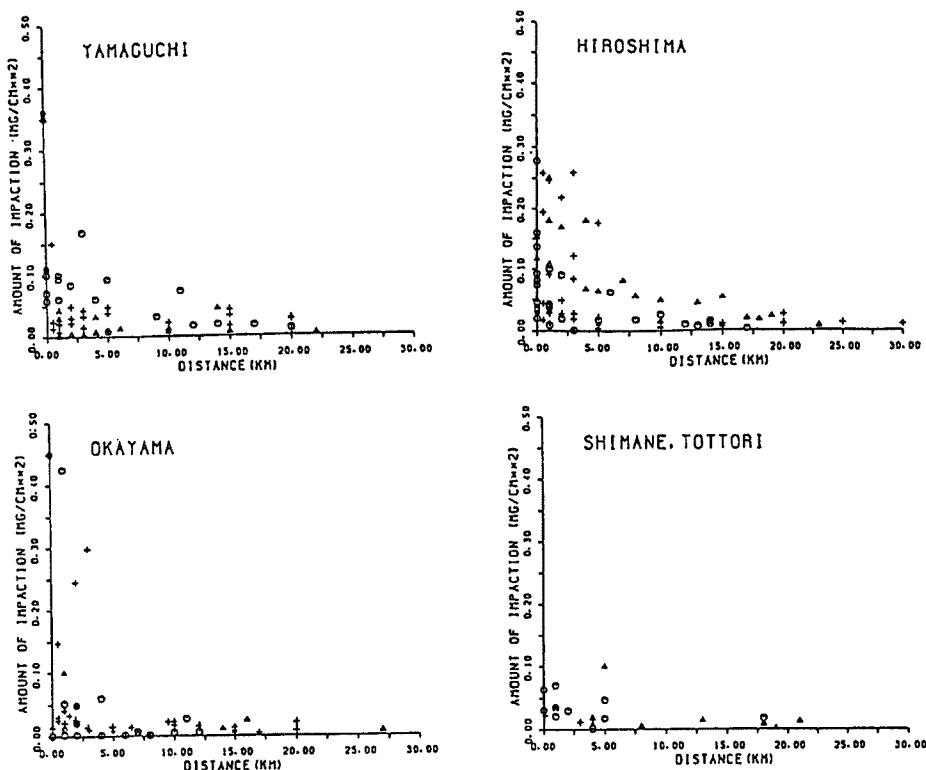


Fig. 3. Relations between the observed amount of impacted salt throughout the typhoon 9119 and the distance from the coast. Each mark indicates the amount impacted by pilot insulator (○), window glass (Δ), high voltage pin insulator (+), total amount measured at the power stations (●).

地表物体への塩分付着量は風速依存性が大きい。したがって台風通過後、何日か経過した後の測定でも、特別に取り去られなければ十分価値がある。ただし今回の場合、場所によっては9月14日近くを通過した台風9117号による塩分が残っている可能性がある。また台風後、降水があると雨洗効果で付着塩分量は減少する。9月27日に山口県、9月30日に中国地方全域、特に広島、山口に50 mm以上の降雨があった。Fig. 3に示した○印パイロット碇子塩分付着量は、降水20 mmで雨洗効果40%、30 mm以上で48%とし、さらに碇子の形状の懸垂補正などを行い、台風直後の懸垂碇子塩分付着量相当値に換算してある（中国電力資料）。△印窓ガラス塩分付着量は台風時、風当たりの良かった窓ガラスで、台風後は雨の当たらなかったものを選び、補正はしていない。+印配電線高圧ピン碇子塩分付着量は補正はせず、測定値をそのまましめしてある。Fig. 3にスケールアウトで記入できなかった測定値は、境港（鳥取、0 km, 0.8 mg/cm²）だけで中国電力は以前の塩分が残っていたためとしている。

高圧ピン碇子塩分付着量は雨洗効果を考慮してないためか、全般に低い値になっているようであるが、広島県の海岸に近いところ（Fig. 3(b)）には高い値がある。パイロット碇子と窓ガラスの塩分付着量は、形状の差による捕捉率、以前の、たとえば台風17号の塩分累積の違いがあり、値が異なる可能性がある。両者の関係を調べるため、同時に2つの方法で測定した12箇所の値についてパイロット碇子（X mg/cm²）、窓ガラス（Y mg/cm²）の塩分付着量の回帰式を求めたところ、海岸近く（0-1 km）の3箇所（境港、水島、忠海）を除く9箇所について相関係数0.89で

$$Y = 0.88X + 0.018$$

となった。したがって両者の測定値は同等に比較できるものとした。

Fig. 3から塩分付着量は海岸から内陸に入るにしたがい減少している状況が、各県(a)(b)(c)(d)ともみられる。各県毎に状況が異なるのは、次節で検討するが主として風速、強風継続時間の違いによる。Fig. 3(c)、岡山の海岸近くの、水島（パイロット碇子、1 km, 0.4249 mg/cm²）、岡山（高圧ピン、2 km, 0.298 mg/cm²）、倉敷（高圧ピン、2 km, 0.245 mg/cm²）での値が他に比べて異常に高い塩分付着量になっている。これも次節で検討し、ここでは除いて考察を続ける。

Fig. 3の実測値から台風9119号によって地表に運びこまれた塩分量（実際には付着の他に落下もあるが、付着によるものが多い）は県毎にTable 4のように推定される。いま仮に付着塩分量0.1 mg/cm²以上の地域を塩害発生高ポテンシャル地域とすれば、山口県は海岸から7 km、広島12 km、岡山2 km、鳥根・鳥取2 km程度であったと推定される。2節で述べた塩害事故数が広島に最も多く、山口、岡山、と続くのは、この結果から理解できる。しかし山口県と岡山県を比べてみると、塩分侵入量は明かに山口県が多いのに、塩害による被害は両県、同程度、ものによっては岡山の方が多い物もある。これは台風時の降水の差によ

Table 4. The observed averaged amount (upper, mg/cm²) of the impacted salt from Fig. 3 and its ratio to the coast one (lower).

Prefecture	Distance from the coast (km)					
	0	5	10	15	20	25
Yamaguchi	0.23	0.13	0.08	0.045	0.025	
	1	0.57	0.35	0.20	0.11	
Hiroshima	0.35	0.20	0.11	0.065	0.035	0.020
	1	0.57	0.31	0.19	0.10	0.06
Okayama	0.13	0.050	0.035	0.025	0.020	0.015
	1	0.38	0.27	0.19	0.15	0.12
Tottori-Shimane	0.12	0.050	0.035	0.025	0.020	0.015
	1	0.42	0.29	0.21	0.16	0.13

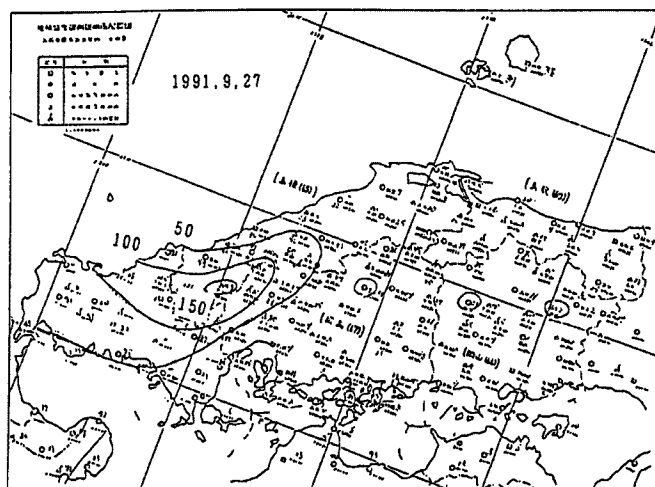


Fig. 4. Daily reinfall amount on Sept. 27. (mm)

る。Fig. 4 に9月27日の降雨分布を示した。これによると山口県のほぼ全域、島根県南部、広島県西部に50 mm以上の降水があり、他の地域は10 mm以下であった。今回の台風は降雨がすくなく、このことが電気施設の塩害被害を多くした原因の一つである。

調査4)の結果、植物の塩害被害の概要は次のようである(中国電力、台風19号による塩害調査報告書)。

1) 海から内陸方向への状況

全般的な傾向として被害は海側において著しいが、山側では少ないとは言えない。被害は脊梁山脈に近い広島県徳佐町、三次市、庄原市、東城町、岡山県新見市にも及んでいる。

2) 東西方向の状況

山口県 瀬戸内海沿岸地域で被害が多い。西部の内陸部は少なく、日本海側から来た塩分によるとと思われる被害もある。

広島県 沿岸地域では竹のみならず針葉樹も葉枯れし、著しい被害があった。海岸から約50 km離れた東城町、庄原市、三次市、高宮町にも大きな被害が見られる地点がある。被害の大きい地点と小さい地点が混在している。風の通り道と思われるところの被害が多い。

岡山県 沿岸地域でも針葉樹の被害は無い。山間部では新見市など飛び火したように被害がある。

植物の生育には複雑な条件があると思われるが、第一近似として植物の被害が塩分付着量によるとすれば、調査4)の結果は、調査1), 2), 3)の結果塩分侵入の量は広島、山口、岡山の順、降水のため山口の被害は少なくなっていることと、矛盾しない。さらに調査4)の結果、1)海塩粒子は脊梁山脈まで運ばれている、2)風の通り道、風速の大きなところに塩分侵入量が多い、3)岡山県の山間部への海塩粒子は岡山の海岸からでなく、広島から入った可能性がある、と言った知見が得られた。

4. 台風の通過と海岸での塩分量 —九州・四国の影響—

半径約300 kmの暴風域をもった台風9119号が16時に長崎に上陸し、北東に進んだ。中国地方は台風の右象限にあり、台風の進行とともに風向きは東から南、さらに西へと回転し、強風域も山口、広島、岡山と東進した。中国地方が暴風域にあった16時から24時までの各地気象台の風向(16方位)、風速(m/s)、県毎の10分当たりの電気事故件数(短絡、地絡、2節の電気施設の事故に入らない)を山口(○印)、広島(△)、岡山(+), 島根(x), 鳥取(◇)でFig. 5に示した。さらに、最下段には臨海地域にある中国電

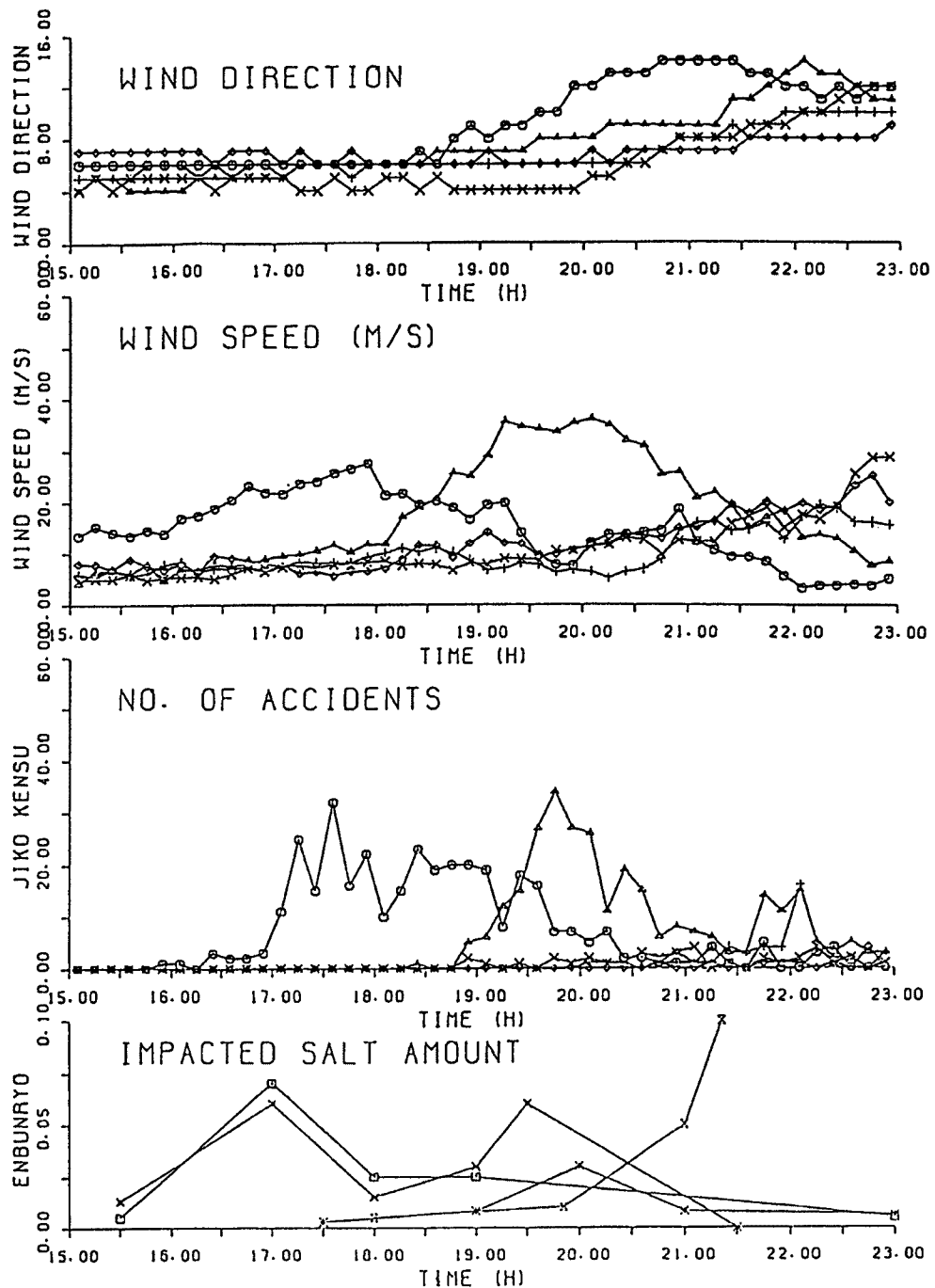


Fig. 5. Time variations of wind direction (numeral (0) shows north, (4) east, (8) south, (12) west), wind speed (m/s), number of electric accidents every 10 minutes (no./10 min.) and the rates of the impacted salt ($mg/cm^2 \cdot 30 min.$). Each mark indicates at Yamaguchi ($\circ$), Hiroshima ($\triangle$), Okayama ($+$), Shimane ($\times$) and Tottori ($\diamond$). The bottom shows the rates of the impacted salt measured at the new Onoda ($\times$), Kudamatsu ($\ast$), Yanai ($\square$), Mizushima ($\times$) power station near the coast.

力の山口新小野田(×印), 下松(*), 柳井(□), 岡山県水島(X), 各発電所において自動塩分測定装置により測定した付着塩分率(mg/cm^2 30 min)を示した。水島の21時30分以後は $0.1 \text{ mg}/\text{cm}^2$ 30 min 以上の値となりスケールオーバーしている。Fig. 5 から次のことが明らかになった。

- 1) 台風の東北進にともない、事故件数のピークが、山口県、広島県、岡山県と東へ移動している。
- 2) 事故件数のピークはその地域の強風時と対応している。
- 3) 事故件数のピークと風向との関係は、山口では南東、広島は南南東ないし南南西、岡山は南西でいずれもその地域で海からの風向に対応することがみられる。これらのことは電気事故が海からの海塩によるものだということを示している。より詳細に風速と事故件数の関係をみると、風速の増大に1時間程度遅れて、事故件数が増える。これは、風速の増大と海塩粒子濃度の増加の間に時間差があるのと、事故が発生する塩分量までの蓄積に時間を要するためである。また山口に比べて、20時すぎの広島の事故件数の低下および岡山の低事故件数は、すでに3節でみたように広島県東部から岡山県は降雨が少なかったため付着塩分が溶解せず事故にまで至らなかったことが関係しているかもしれない。2節の送電線事故で述べた広島・岡山の3路線が直後に事故とならず、28日の朝に発生したものがあつたことはこの推測を支持する。

Fig.5 の最下段に示した塩分付着率(mg/cm^2 30 min)は30分毎に碍子に付着した塩分量を示したもので、風速と海塩粒子個数濃度の積に比例する。

したがって、山口の風速がほぼ等しい16時30分から19時30分の期間、柳井(□), 新小野田(×), 下松(*)の付着率の変化は、各地点の濃度の変化を表しているとみることができる。一方、海岸での海塩粒子濃度は海上で波と風の相互作用によって生成され、風と乱れによって輸送されて来たものが主で、定常状態では、ほとんど風速のみによって決まる。しかし、台風のように、時間的空間的に変動の激しい風速場では濃度は風速に直ちに応答できない。ある場所の濃度は、その時、その場所での風速だけでなく、その気流がどれ程の距離海上を吹送してきたか履歴が問題となる。

そこで、気流が通ってきた経路を調べるために、藤井によって開発された傾度風速の分布を利用して各場所に到達する空気粒子の経路すなわち流跡線を求めた¹⁰⁾。

まず、対象とする場所から後方差分で10分前の位置を決める。例えば、18時00分に対象とした場所に到達する空気粒子は、まずその10分間前の17時50分の位置を18時00分の傾度風から求める。このさい、空気粒子の移動方向は、傾度風向に対して 30° の角度で中心に向かって吹き込む方向とし、また、移動速度は傾度風速の2/3倍とする。これを繰り返して、2時間前の空気粒子の位置(出発点)を推定する。

次に、この点を第一近似点として、前方差分により10分後の位置を求め、これを繰り返していき、2時間後の位置を求める。この位置と対象とする場所との差を求めて出発点の位置を修正し、同様にして2時間後の位置を求める。これが対象とする場所から1.0 km 以内に収束するまで繰り返していく。

対象とした場所は、山口、広島、岡山3県下の沿岸地帯の5か所である。16時00分から18時30分までにおいて、その2時間後に対象とした場所に到達した空気粒子の移動経路を求めて、Fig. 6 に示す。この図において、経路は30分間おきに図示しており、さらに16時00分から1時間30分後に到達する経路も追加した。なお、傾度風速を計算するに当たって、客観解析により得られた気圧分布を用いた。しかし19時40分以降の気圧分布の解析結果は最大旋衡風速半径が増大して200 km を超える、これは非現実的な値で、観測資料が一方方向に偏っていることに起因するものである。ここでは、最大旋衡風速半径は19時30分の解析値が維持されると仮定して計算を行った。また、周辺気圧も高くなっているが、これも19時30分の値が維持されると仮定した。

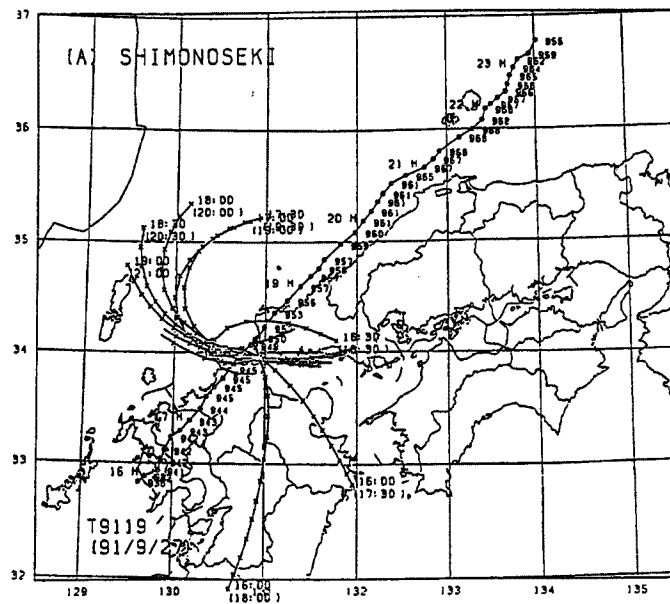
このようにして計算した空気粒子の流跡線と海岸の海塩粒子濃度との間の関係について、前述の観点から県別に検討すると次のようになる。

1) 山口県— Fig. 6(b) の防府に到達する流跡線の方法は、台風の進行とともに東から南へ、さらに西へと変化した。東から南南東は豊後水道を吹走してきた気流が到達した方向で、南は九州を通ってきた方向であり、また西は九州北方の海上を吹走してきた方向である。海上を吹走してきた気流が到達したときは海塩粒

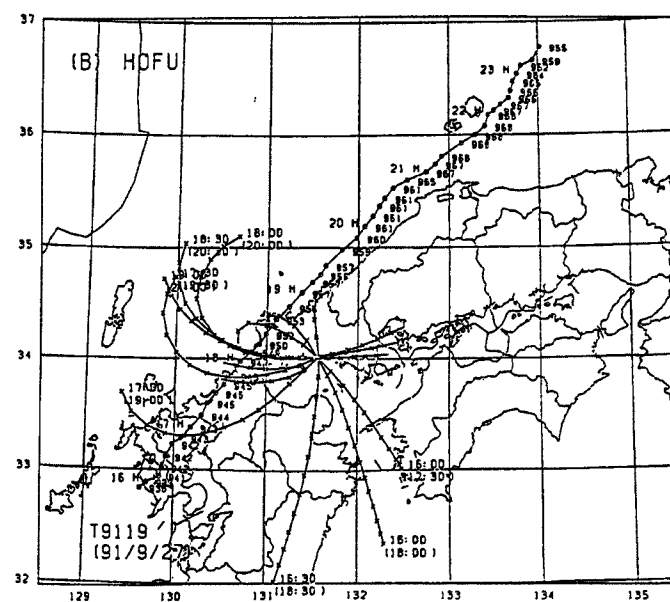
子の濃度は高くなっていて、九州の陸上を1時間以上も吹走してきた気流の到達時には、当然、濃度が低くなっている。これが、柳井と新小野田において17時30分から19時00分の期間に低濃度をもたらした。

2)広島県—広島と福山においては、Fig.6(c)及び(d)の流跡線から判断すると、19時から21時の間に、豊後水道から伊予灘を経て、2時間以上も海上を吹走してきた気流が到達している。塩分付着率測定値は得られていないが、事故件数のピークと時刻が一致している。

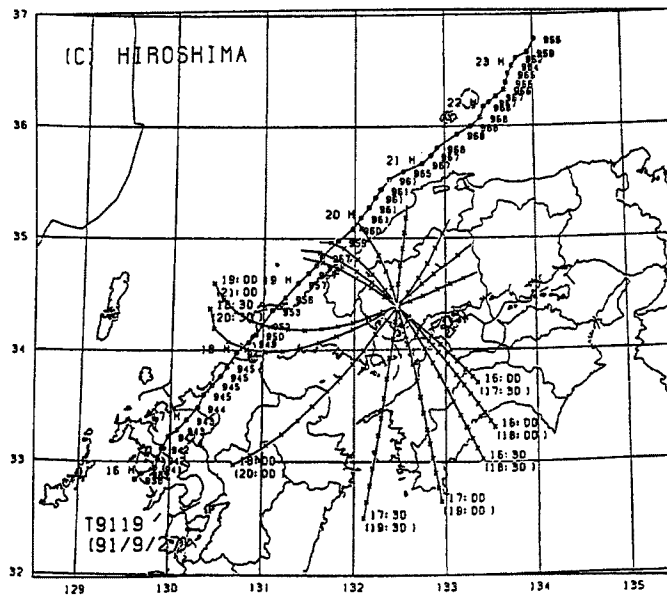
3)岡山県—水島と岡山で、最も風が強かった時間帯の風向はほぼ南であり、これは四国を1時間程度かけて縦断し、瀬戸内海をわずか10分程吹走してきた気流である。したがって海塩粒子濃度は低かったと推定される。むしろ22時以後の瀬戸内海を吹送してきた西風時の気流の方が高濃度であったろう。



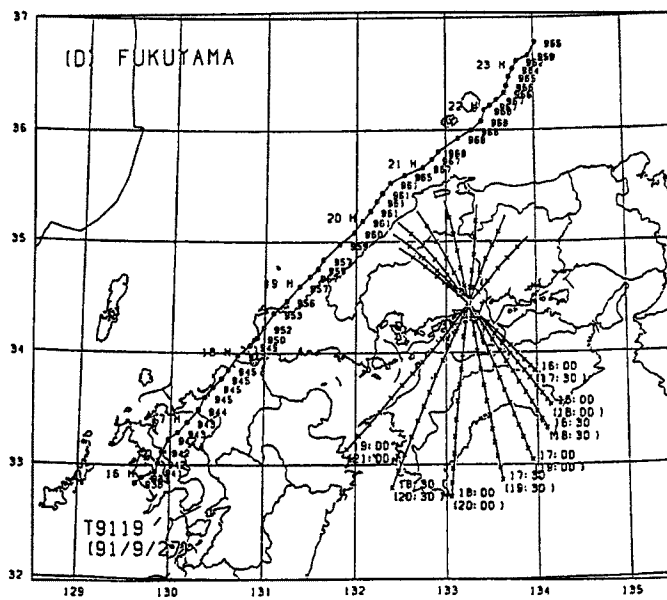
(a)



(b)



(c)



(d)

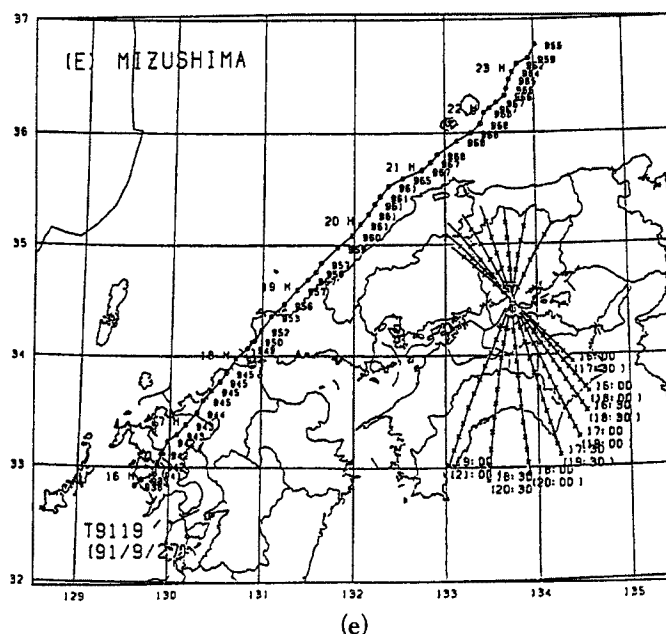


Fig. 6. Air mass trajectories every 30 minutes passing at (a) Shimonoseki, $33^{\circ}57'N$, $130^{\circ}56'E$, (b) Hofu, $34^{\circ}01'N$, $131^{\circ}34'E$, (c) Hiroshima, $34^{\circ}24'N$, $132^{\circ}28'E$, (d) Fukuyama, $34^{\circ}27'N$, $133^{\circ}15'E$, (e) Mizushima, $34^{\circ}30'N$, $133^{\circ}44'E$. The mark (×) shows a position at 10 minutes interval. Numbers indicate starting (upper) and arriving (lower) times.

今までの考え方で説明できず、無視できない事実として、Fig. 5 に示した水島の21時30分以後の $0.1 \text{ mg/cm}^2 \text{ 30 min}$ を越す高塩分付着率がある。台風時の総付着量は、スケールアウトのため正確な値を求めることができないが、 0.45 mg/cm^2 以上である。これを岡山県の塩分付着量を示す Fig. 3(c) にプロット (●印) すると、3節で異常に高い値として除いた水島のパイロット碇子 (○印)、倉敷及び岡山の高圧ビン碇子 (+印) と近い値になっている。そこで、この事実を次のように考えることにする。海塩粒子 (海水滴) の生成機構として、海面で風によって生成され、上空に運ばれる面ソースのものほかに、海岸で構造物と波の直接の作用によって生成される線ソースのものがあ、り、後者は上空は運ばれず、したがって水平方向の影響範囲は小さい。水島付近のケースは、これに相当すると推定される。水島湾の形状、台風による波浪の方向、波高、潮位などが作用しているのであろう。参考のために、この時の水島の満潮は 316 cm (28 日 0 時 49 分)、岡山の最低気圧は 982.6 hPa (27 日 20 時 52 分)、最大風速 (10 分間平均) は南西の風 19.5 m/s (27 日 22 時 20 分) で、塩分付着率が高くなったのは 21 時すぎであった。

5. 塩分の鉛直方向への広がり ―愛媛県中島のみかん園の被害―

愛媛県中島町は松山市沖、北 15 km に南を伊予灘、北を安芸灘に配した 6 島の島からなる。中島本島には海拔 296.2 m の大里山と 289.2 m の泰山の 2 つの山がある。明治の初めからみかん園が開かれ、明治末期には全島に、第 2 次大戦後にはほぼ山頂にまで普及した。台風 9119 号により 6 つの島全部のみかん園が塩害により、開設以来最大の被害を受けた。しかし瀬戸内海に面した中国地方三県で発生し、2 節で述べたような電気施設および停電の事故はなかった。

中島本島、本浦の役場に設置された風速計によれば、16時頃から台風の影響がはじめ、17時東南東、平均風速 4 m/s, 19時南南東 12 m/s, 20時南 15 m/s, 21時30分最大風速南風 20.8 m/s, 瞬間風速 36.9 m/s, 21時南南西 21 m/s, 22時南南西 4 m/s であった。中島本島は台風の最大旋衡風速半径 110 km より 10 km 程外側にあった。この間、ほとんど島に降雨はなかった。

前節と同様な方法で中島を通る気流の流跡線を求め Fig. 7 に示した。19時までの東寄りの風は四国の陸地の影響で塩分濃度はすくないが、19時30分から21時すぎの期間の南西風は豊後水道、伊予等を50分以上吹走してきた気流で、これが多量の塩分を中島へもたらした。事実、中島町の6つの島ともみかん園の被害は、大きかった順に、1)海水が高波により直接侵入したごく海岸近くの平地、2)直接風の当たった西及び南斜面、3)山に至るまでの平地、であった。塩害の被害は海岸付近に比べてその被害の程度は小さいが、海拔 300 m 近い山の上まで、明らかに及んでいる。台風後1年半経過した1993年3月、大里山山頂近くに枯れた杉の木が何本も見られた。

Fig. 7 の中島への流跡線図から、台風9119号は愛媛県佐田岬半島地域にも同様な塩害があったことが予想されるが、事実、愛媛県では中島と佐多岬の海岸部伊方地区、明浜地区のみかん園に多大な被害があったことが報告されている(朝日、読売新聞)。

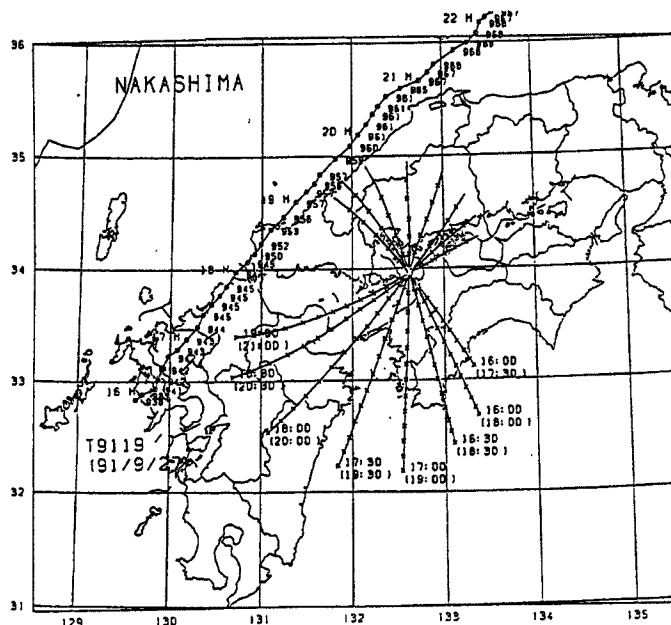


Fig. 7. Same as Fig. 6 but at Nakajima.

6. 考 察

3, 4, 5 節で述べた観測事実、1)海上では 300 m の高度まで杉の木を枯死させる程の海塩粒子が到達していること、2)海岸で海塩粒子濃度が高くなるためには生成域の海上をある程度以上の距離(時間)吹送することが必要であること、3)海岸から内陸にはいるにしたがい急激に付着量が減少していること、について筆者らの海塩粒子輸送理論から考察する⁹⁾。

海塩粒子は風と波の相互作用によって生成され、風、鉛直拡散と粒子落下により輸送される。筆者らの粒子の輸送と分布の研究によると、海上大気の個数濃度 θ は風速 U の方向に x 軸、鉛直上方向に z 軸をとり、鉛直渦拡散係数を D 、粒子の落下速度を W とし、 U, D, W を一定とすると、定常状態における無次

元の粒子個数濃度 $\theta (= \theta / \theta_{0\infty})$ は、無次元の距離 $\xi (= \frac{W^2 x}{4DU})$ ，高度 $\zeta (= \frac{Wz}{2D})$ ，により次のように，

$$\theta = \frac{\theta(\xi, \zeta)}{\theta_{0\infty}} = e^{-2\zeta} - \frac{1}{2} \operatorname{erfc}\left(\sqrt{\xi} - \frac{\zeta}{2\sqrt{\xi}}\right) e^{-2\zeta} - \left(\frac{1}{2} + \zeta + 2\xi\right) \operatorname{erfc}\left(\sqrt{\xi} + \frac{\zeta}{2\sqrt{\xi}}\right) + \frac{2}{\sqrt{\pi}} \sqrt{\xi} e^{-(\sqrt{\xi} + \frac{\zeta}{2\sqrt{\xi}})^2}$$

表わせる。ただし $\theta_{0\infty}$ は平衡状態 ($x = \infty$) における海面 ($z = 0$) の濃度である。海面 ($\zeta = 0$) での濃度 $\theta_0(\xi)$ は，

$$\theta_0 = \frac{\theta_0(\xi)}{\theta_{0\infty}} = 1 - (1 + 2\xi) \operatorname{erfc}(\sqrt{\xi}) + \frac{2}{\sqrt{\pi}} \sqrt{\xi} e^{-\xi}$$

となり， ξ と θ_0 の関係は Table 5 のようになる。

ここで中島での事実から高度 300 m にまで海上付近の10分の1の濃度が到達しているとし， $W/D \times 300 = 2.3$ ，さらに $D = 10 \text{ m}^2/\text{s}$ とすると， $W = 0.08 \text{ m/s}$ となり，核質量 $5 \times 10^{-9} \text{ gm}$ の海水滴の落下終速度に相当する。無次元の距離 ξ と距離 x とは $\xi = W^2 \times x / 4 \times D \times U = 0.0064 \times x / 4 \times 10 \times 25$ ，で吹送距離 10 km，または継続時間 6 分40秒は $\xi = 0.064$ に相当する。Table 5 に示した ξ と θ_0 の関係から平衡状態に比べてまだ約35%の濃度である。継続時間40分または吹送距離 60 km は $\xi = 0.38$ となり， $\theta = 0.80$ で生成域での陸地の影響はかなりの距離にまで及ぶことになる。

Table 5. Relation between the dimensionless distance ξ and the dimensionless sea-salt particle concentration θ_0 .

ξ	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0
θ_0	0.537	0.675	0.756	0.810	0.849	0.878	0.901	0.918	0.932	0.943

台風9119号によって内陸に運ばれてきた塩分付着量が海岸からの距離とともに減少することを Fig. 3 と Table 4 でみた。塩分付着量を決定する要素は，風速，海塩粒子濃度，および強風継続時間である。内陸の地表物体への塩分付着量 M は，海塩粒子の物体への付着が地表付近の物体間を通り抜ける粒子数に比例すると考え，風速 u ，海塩粒子個数濃度 θ ，捕捉率を λ ，海塩粒子塩質量を m ， T を台風継続時間とすれば，

$$M = \int_0^T \lambda u m \theta dt$$

となる。 λ を定数とし，台風の特性 U ， T は県毎に異なるとする。Table 6 に山口・広島・岡山三県の台風の特性と海岸での付着量を示した。

著者らの内陸での粒子輸送の研究によれば内陸での濃度 $\theta = \theta(\xi, \zeta) / \theta_{00}$ は

$$\theta = \frac{1}{2} \operatorname{erfc}\left(\sqrt{\xi} - \frac{\zeta}{2\sqrt{\xi}}\right) e^{-2\zeta} - \frac{1}{2} \left(1 + \frac{1}{\gamma}\right) \operatorname{erfc}\left(\sqrt{\xi} + \frac{\zeta}{2\sqrt{\xi}}\right) + \left(1 + \frac{1}{\gamma}\right) e^{2\gamma(\zeta + 2(1+\gamma)\xi)} \operatorname{erfc}\left\{(1 + 2\gamma) \sqrt{\xi} + \frac{\zeta}{2\sqrt{\xi}}\right\}$$

と表せる。ここで θ_{00} は海岸，海面 ($x = 0$ ， $z = 0$) での濃度， γ は内陸地表面の粒子捕捉作用の大きさを決めるパラメーター捕捉落下比 $\lambda \times U / W$ ，である。捕捉率 λ の値として 3×10^{-2} を用いると $\gamma = 3 \times 10^{-2} \times 20 / 0.08 = 7$ ，すなわち地面に落下する量より地表物体に付着する塩分量の方が7倍多いことになる。観測された海塩粒子濃度の内陸への減少の割合は γ を7とすると理論値より2倍程小さい。

Table 6 の右端の欄の数値 M / UT は，各沿岸での今回の台風時の平均濃度に比例する量で，海上風速と海上吹走距離に関わるものである。今回の台風経路は豊後水道，広島湾周辺を強風域にし広島の風速，強風継続時間，海上吹走距離を大きくした，これが塩分侵入を多くした原因である。山口および岡山の両県では，南よりの風に対して，それぞれ，九州および四国の存在が影響し吹走距離を短くし，その結果山口・岡山の海岸における海塩粒子濃度は豊後水道からの風が入る広島に比べて低くなった。

Table 6. The duration of high wind speed by the typhoon 9119 and averaged amount of the impacted salt observed at the coast.

Prefecture	Duration <i>T</i> (hrs.)	Wind Speed <i>U</i> (m/s)	<i>UT</i> (km)	Amount of salt <i>M</i> (mg/cm ²)	<i>M/UT</i> (×10 ⁻⁸)
Yamaguchi	16:30~19:30	25	270	0.23	8.5
Hiroshima	18:30~19:30	25	306	0.35	11.4
	19:30~20:30	35			
	20:30~21:30	25			
Okayama	21:00~24:00	20	216	0.13	6.0

7. 結 び

今回のように、平均風速 25~35 m/s の台風にもなう強風域が豊後水道から広島湾を時速 10 km 程度で通過すれば、海上からの風により広島県の海岸で 0.3 mg/cm² 程度の塩分が、海岸から 5~10 km 離れた内陸地域では 0.1 mg/cm² 程度の塩分が地上物体に付着する。強風域が豊後水道からはなれば塩分侵入量は減少するだろう。中国地方にとって今回の台風コースは塩分侵入量を多くするコースであった。

台風9119号によって広島にもたらされた総降塩量は実測された付着量 0.3 mg/cm² に落下量をプラスして 0.4 mg/cm² 程度と推定される。これは京都の年間総降塩量の 2 倍の値であり、沿岸地域が内陸地域より通常一桁多いとすれば、広島の間年総降塩量のほぼ 1/5 に当たる量であった¹¹⁾。

塩害発生の多少は、台風通過時の降雨状況の影響が大きい、降雨がある程度あれば、通過時かその直後に電気事故(短絡、地絡)は発生するが、大きな電気事故は少ない。降雨が少なければ付着塩分が蓄積し、ある限界値(0.1 mg/cm²)を超えると電気施設に被害が発生する。場合によっては、その後の降雨のさいに電気施設に塩害が発生し停電になることがある。

最後に、台風後、塩害調査、特に付着塩分測定を実施し、貴重な資料を残した中国電力株式会社に敬意を表すとともに、資料を提供していただいたことに感謝する。また、忙しいなかを担当していただいた工務部の大上善範課長および住谷博之係長に感謝いたします。同様に資料を提供いただいた中国新聞社報道部、山内雅弥記者に感謝いたします。

1993年3月、みかん園現地被害調査に協力いただいた中島町役場小立公司課長、金子与雄課長補佐、現地を御案内いただき有益な御示唆をいただいた中田 忠氏、中田孝志氏に心から感謝いたします。

本研究の一部は平成3年度文部省科学研究費、突発災害調査研究「1991年台風19号による強風災害の研究」(代表者 光田 寧)でなされたものである。有益な助言をいただいた光田 寧教授、また流跡線の作図に協力いただいた京都産業大学藤井 健教授に感謝いたします。

参 考 文 献

- 1) 林 春男：台風9119号によるライフライン災害に対する広島市民の反応，京都大学防災研究所年報，第35号B-1，1992，pp. 259-270.
- 2) 目黒公郎・永田 茂・立川貴重，片山恒雄：台風19号による大規模停電の都市機能への被害波及に関する調査研究—広島地域における大規模停電の影響—，生産研究，44巻4号，1992，pp. 194-201.
- 3) 鳥羽良明・中田正昭：塩害に関する基礎的研究(第1報)，京都大学防災研究所年報，第10号B，1967，pp. 331-342.
- 4) 田中正昭：塩害に関する基礎的研究(第6報)，京都大学防災研究所年報，第15号B，1972，pp. 295-304.

- 5) 鳥羽良明：海面境界過程，海洋科学講座 1，海洋物理 1，1970, pp. 143-263.
- 6) 田中正昭：海塩粒子の輸送・循環，海洋科学，5 巻 5 号，1973, pp. 35-41.
- 7) Tanaka, M.: On the transport and distribution of gaiant sea-salt particles over land (1). Theoretical model, Special Contr., Geoph. Inst., Kyoto Univ., 6, 1966, pp. 47-57.
- 8) 鳥羽良明：海塩粒子—大気と海洋との相互作用の一要素として—，海と空，41，3・4 合併号，1966. 3, pp. 71-118.
- 9) Toba, Y.: Dorp production by air bubbles on the sea surface (3). Study by use of a wind flume, Memori. Coll. Sci. Univ. Kyoto, Ser. A, 29, 1961, pp. 313-344.
- 10) 藤井 健・林 泰一・光田 寧：台風9119号の解析と強風の分布について，京都大学防災研究所年報，第25号 B-1, 1992, pp. 183-191.
- 11) Toba, Y. and M. Tanaka: Dry fallout of sea-salt particles and its seasonal and diurnal variation, Special Contr., Geoph. Inst., Kyoto Univ., 5, 1965, pp. 81-92.