

1994年2月22日の低気圧による北日本の強風災害について

光田 寧・桂 順治・松本 勝・石川 裕彦・
林 泰一・杉政 和光

ON THE WIND DISASTERS IN NORTHERN JAPAN CAUSED BY AN EXTRATROPICAL CYCLONE ON FEBRUARY, 1994

By Yasushi MITSUTA, Junji KATSURA, Masaru MATSUMOTO, Hirohiko ISHIKAWA,
Taiichi HAYASHI and Kazumitsu SUGIMASA

Synopsis

On February 22, 1994 a strong extratropical cyclone passed over the Pacific Ocean along the east coast of Tohoku and Hokkaido districts of Japan. During the passage of this cyclone, three accidents were caused in transport facilities by high winds. A field survey was conducted just after the accidents to collect data of the accidents and of weather conditions. These data were analyzed to deduce the wind speed at the site of accident. Two wind tunnel experiments were performed associated with the accident of JR Nemuro line. It is revealed that the critical wind speed to cause the derailment of the train is lower than expected when the wind blows diagonally to the train. By the inspection of surface weather charts it was revealed that the high wind area distributed widely around the center of the extratropical cyclone.

1. は じ め に

1994年2月22日に、東北地方と北海道の東海上を北上した発達した温帯低気圧に伴う強風により、北海道、東北地方の各地で交通機関を中心に強風被害が発生した。主な強風被害は、北海道後志支庁寿都町の弁慶岬付近で発生したバス転落事故（13時45分頃）、岩手県三陸町で発生した三陸鉄道脱線事故（15時22分頃）、北海道十勝支庁新得町で発生したJR根室本線特急脱線事故（17時45分頃）である。これらの事故での人的被害は、寿都町のバス転落事故では3名の重軽傷、三陸鉄道脱線事故では軽傷者5名、JR根室本線脱線事故では軽傷者6名である。交通機関に大きな被害が発生した一方で、建物に対する被害は比較的少なく、例えば東北6県の家屋の被害は、住家の全壊が1、半壊が13、一部破損が434、非住家被害は128棟と報告されている。各地で観測された最大風速をTable 1に示すが、いずれの場所でも特に大きな値は見られない。東北各県での人的及び建物の被害はTable 2に示したとおりである。

この強風は、台風並に発達した温帯低気圧によりもたらされたが、その風速は建物を破壊するところまでには至らなかったけれども、交通機関に脱線事故が生じる程度には強かった特殊な場合であると言える。防災対策上非常に興味ある問題を含んでいるので、事故発生直後に現地調査、及び気象等データの収集を行い、解析した。また、根室本線の脱線事故に関しては、現場付近の風が事故発生の原因として有効であったかどうかを調べるための風洞実験、走行中の列車に対する風の影響を調べる風洞実験を実施した。これらの調査研究の成果について報告する。

Table 1. Maximum wind speed observed at Meteorological observatories in Tohoku and Hokkaido districts during the passage of the extratropical cyclone (Feb. 21 to Feb. 24).

Place	Maximum of 10 minutes mean wind			Peak gust		
	m/s	dir.	day, hour, min.	m/s	dir.	day, hour, min.
Fukushima	10.8	W	22 15 40	25.3	W	22 18 01
Yamagata	7.6	WNW	22 15 30	20.2	WNW	22 15 21
Sendai	16.8	WNW	21 23 50	35.7	WNW	21 23 45
Oofunato	16.9	NW	22 05 20	38.1	NW	22 05 20
Akita	18.2	W	21 23 00	30.1	WNW	22 17 26
Aomori	15.1	WNW	22 23 20	27.6	WNW	22 20 26
Hakodate	14.9	WNW	22 15 40	26.6	WNW	22 15 35
Urakawa	25.5	WNW	22 18 20	37.2	WNW	22 18 18
Muroran	18.9	WNW	22 09 50	33.1	WNW	22 09 43
Obihiro	9.8	W	22 16 30	21.2	W	22 16 25
Kushiro	14.3	E	22 00 00	27.5	ESE	21 22 45
Abashiri	14.4	WNW	22 16 10	27.0	NW	22 16 09
Suttsu	16.0	NW	22 09 20	34.5	NW	22 08 21
Asahikawa	6.5	WSW	23 01 50	17.3	WSW	23 01 17
Wakkanai	14.0	NE	24 06 50	21.2	NNE	22 14 15

Table 2. Personal injury and damages to building

	Personal injury		Damages to buildings			
	Seriously	Slightly	Dwelling Houses			(Others)
			Destroyed	Damaged	Partly damaged	
Aomori	0	0	0	0	24	36
Iwate	1	5	0	0	78	31
Miyagi	0	0	0	2	28	18
Akita	0	0	0	0	5	4
Yamagata	0	0	0	1	14	3
Fukushima	0	1	1	10	285	36
Total	1	6	1	13	434	128

2. 全般的気象状況

Fig. 1 に 1994 年 2 月 22 日の 03, 09, 15 および 21 時 (JST) の気象庁の地上解析天気図を示す。また 1994 年 2 月 20 日 21 時から 2 月 22 日 21 時までの低気圧の経路と中心気圧, 事故発生地点とその時の低気圧中心の推定位置の関係を Fig. 2 に示す。低気圧は本州の太平洋岸に沿って本州南岸から三陸沖, 北海道東海上に進んだ。この間, 20 日 21 時から 21 日 21 時までの 24 時間には中心気圧が 32 hPa 低下するという急激な発達を遂げ, 22 日 03 時には 958 hPa, 09 時には 954 hPa, 15 時には 950 hPa と, 深い中心気圧を維持した。その後オホーツク海に達した低気圧は, しばらく停滞しながら徐々に中心気圧を上げていった。この低気圧に伴い, 根室では 2 月 22 日 12 時 09 分に 948.7 hPa の最低気圧を記録しており, 光田¹⁾の過去 23 年間の統計に基づく評価によれば, 北海道東部海上では再現期間 50 年以上に相当する中心気圧であるといえる。しかし, この低気圧によって生じた最大風速は必ずしも珍しいものでなかったことは Table 1 から明らかである。また被害の発生した地点の低気圧中心からの方位と距離は, 寿都が西南西 490 km, 三陸鉄道事故が南南西 650 km, JR 根室本線事故が南西 270 km であり, いずれの事故も低気圧の中心から数百 km 離れた地点で発生している。この低気圧の構造がどのようなものであったかは第 6 章で述べる。

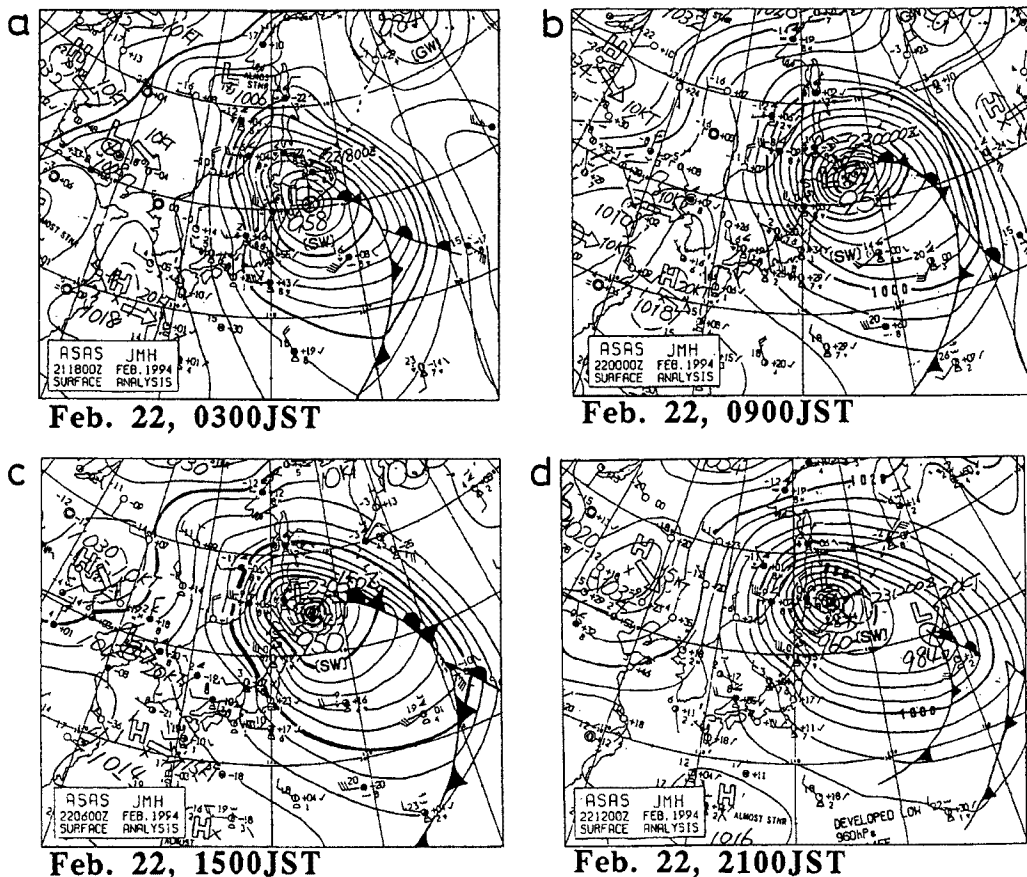


Fig. 1. Surface weather charts at 0300, 0900, 1200, and 1500 JST on Feb. 22, 1994 analyzed by Japan Meteorological Agency.

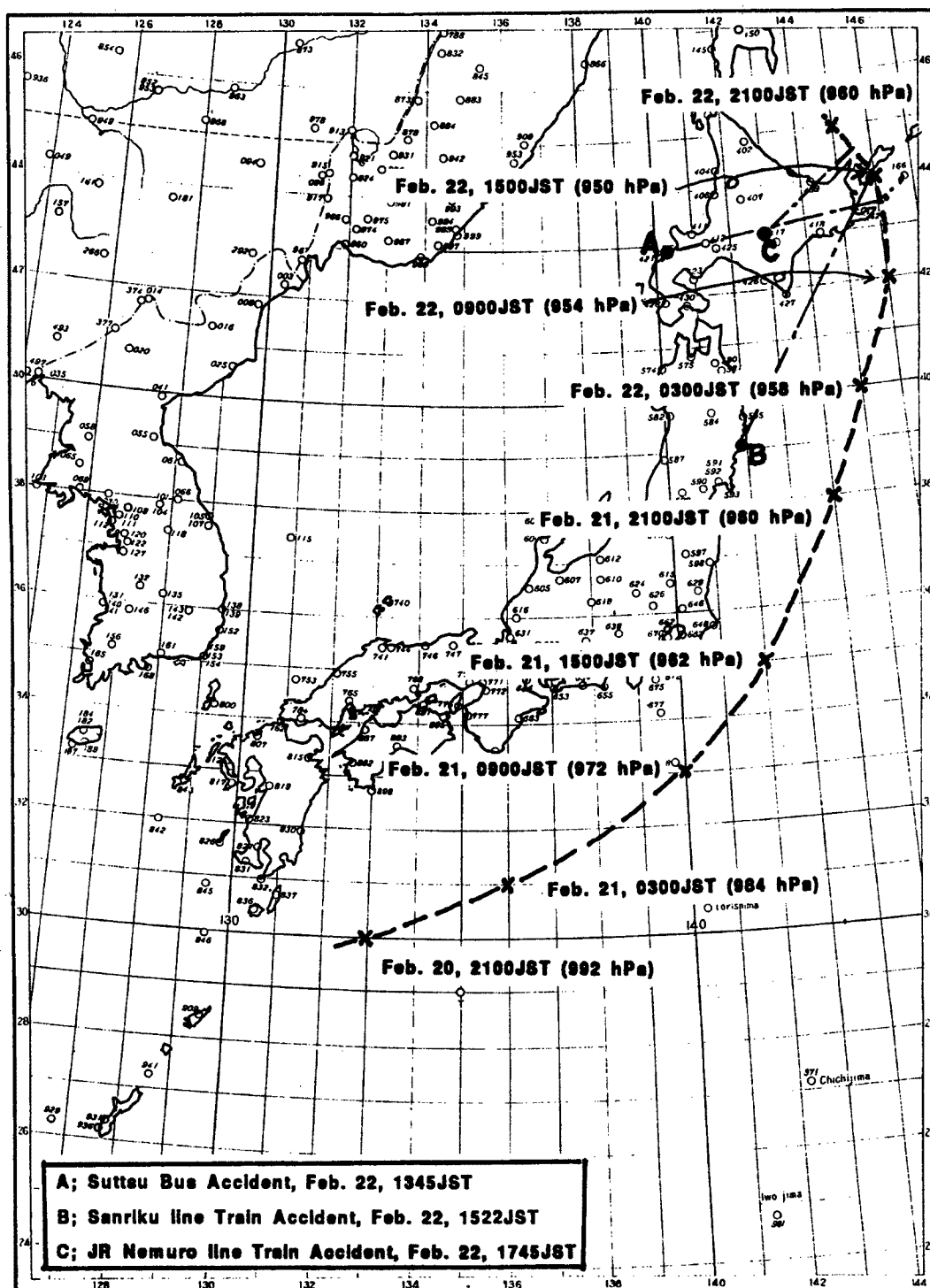


Fig. 2. Path of the extratropical cyclone and the sites of major hazards.

3. 根室本線の列車脱線転覆事故

3.1 事故の概要

2月22日17時45分頃、釧路発札幌行きの上り特急「おおぞら10号」(7両編成、乗客342名)が新得町広内付近を走行中、先頭3両が脱線した。列車の編成は先頭から、キハ183-502、キハ184-11、キハ182-33、キハ182-23、キハ182-7、キハ182-7、キハ183-1557であった。この事故で運転士と乗客あわせて6名が軽傷を負った。事故発生現場付近の地形図をFig. 3に示す。新得町は帯広市の北西約40kmのところにある。東には十勝平野が広がっているが、西は日高山脈が迫っている。事故現場は、日高山脈の一部をなすオダッシュ山(標高1097.7m)から東に延びる山稜の山麓、標高約300mの地点にある。山頂からの水平距離は約4.5kmである。現場の北東側は新得町の中心部に向けて開けており、また南東には標高545.0mの山があり、北北東に稜線が延びている。17時37分に定刻より約4分遅れて新得駅を発車した列車は、広内第1トンネル(Fig. 3のD地点)を抜けて南進し、広内陸橋(図中F地点)を通過後約400mの地点(図中A地点)で脱線した(17時45分頃)。この地点で線路は列車の進行方向(南西方向)に向かって半径500mで右にカーブをしており、12/1000の上り勾配である。運転士の談話によれば「広内第1トンネルを抜けたところから強い風を受けたので60km/hに減速した。鉄橋を渡り切った時点で

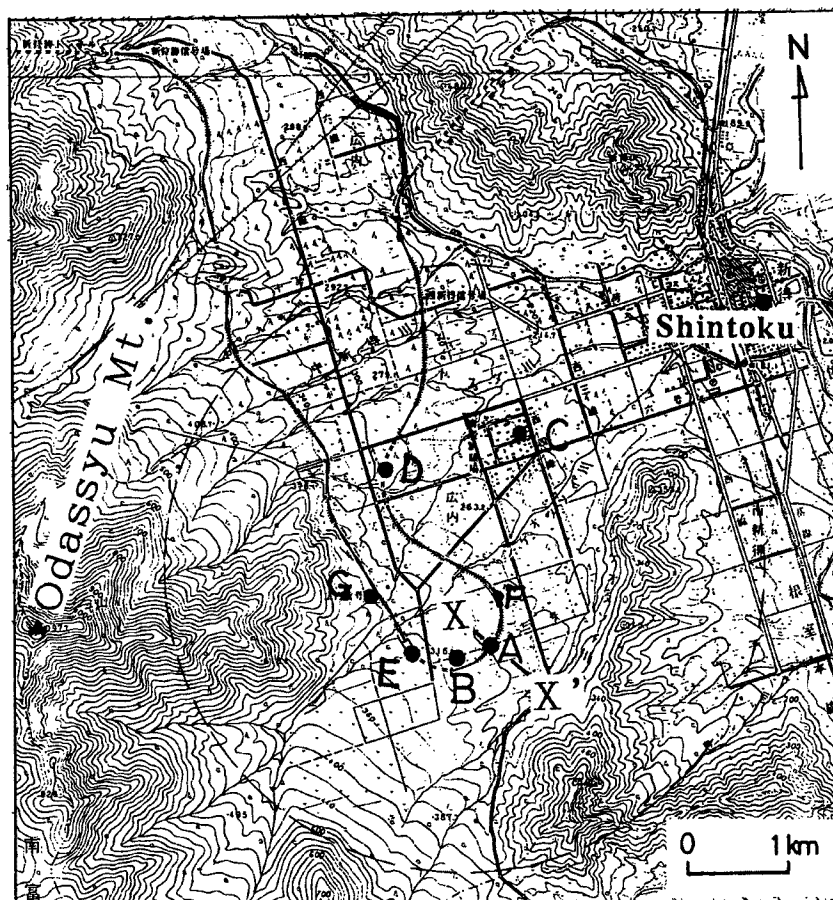


Fig. 3. Topography around the site of accident of JR Nemuro line. The A represents the site of accident. B the cup anemometer of JR, C the Shintoku Tikusan Shiken-jo. D the Hirouchi tunnel 1, E the Hirouchi tunnel 2, F the Hirouchi bridge, and G the Hirouchi signal station.

右横と下からの強い風で列車が浮き上がったようになった。」とのことである。脱線現場の状況を Fig. 4 (a) に示す。図の左側が列車の進行方向である。先頭車両は進行方向左側の土手を滑り落ちて横転し、2両目は 90° 左を向いて土手を滑り落ちて横転して止まり、3両目は右に傾斜した。Fig. 4 (b) には、Fig. 3 中に X-X' で示した断面での軌道の断面図を示す。この土手は左右で高さが異なっているが、当日は列車進行方向右側から風が吹いており、軌道面は平地より約 5.2 m 高くなっている。また軌道面は水平に対して 5.5° のカントを持って傾いている。事故当時は、レール付近に約 0.6 m の積雪があり、天気は吹雪であったと報告されている。

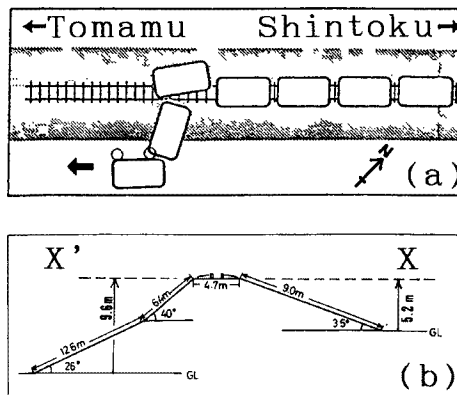


Fig. 4. The situation of the accident of JR Nemuro line (a), and the cross section of the bank along X-X' in Fig. 3.

3.2 事故現場周辺の気象状況

Fig. 5 に 15 時から 21 時までの十勝地方のアメダス地上風を示す。地点名と矢羽の説明も右下図に示してある。また、図中の数字は気温 ($^\circ\text{C}$) である。糠平や陸別など北部を除くと、西ないし西北西の風が吹いており、平均風速は最大で 10 m/s 程度である。これから見る限り列車が脱線したような風が吹いたとは思えない。

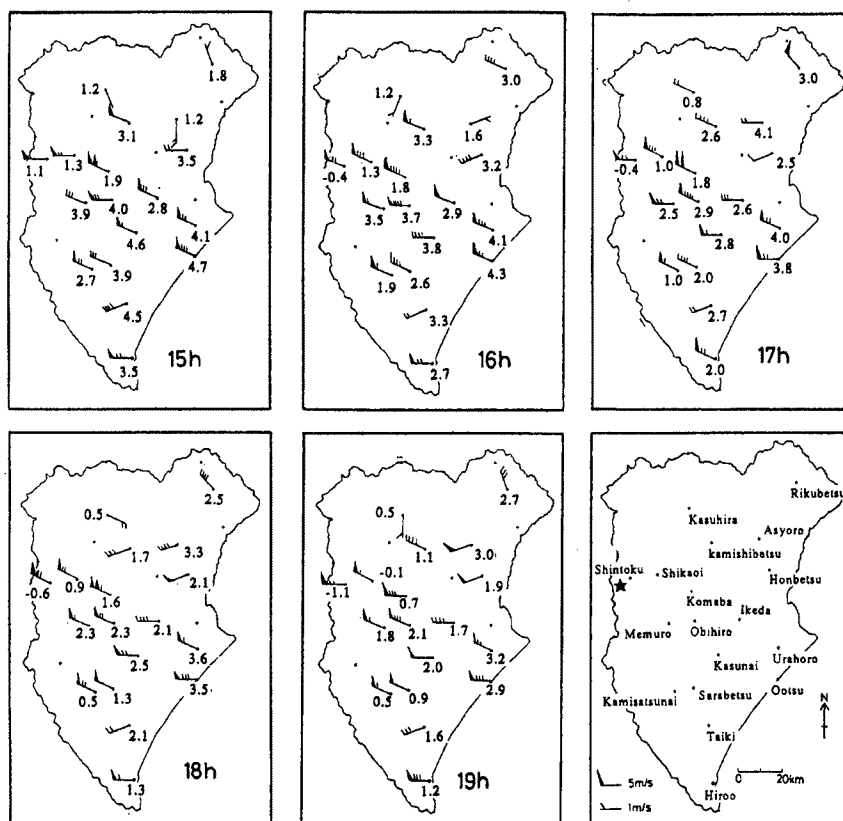


Fig. 5. Distribution of the surface wind and temperature observed by AMeDAS stations in Tokachi district.

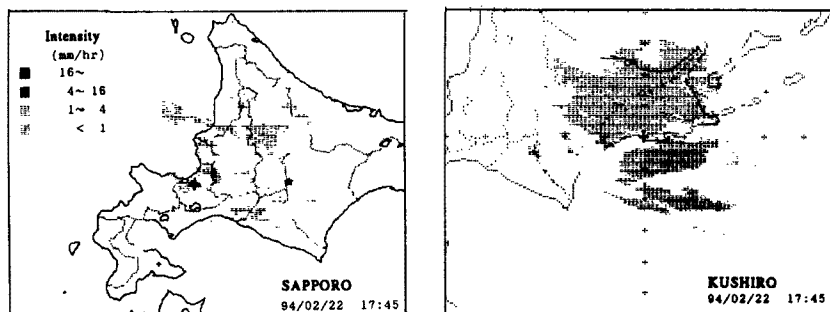


Fig. 6. Radar Echo at the time of the accident (17:45) observed by Sapporo and Kushiro radar. The cross in the figure represents the site of radar and the star represents the site of accident.

Fig. 6 には、札幌レーダーと釧路レーダーで観測された事故発生当時 17 時 45 分のエコーを示す。風上にあたる日高山脈の西側と稜線付近に弱いエコーが見られるが、事故発生地点のある山脈のすぐ東側では顕著な雨雲は存在していない。

Fig. 7 には帯広測候所（事故発生地点の約 40 km 南東）の自記記録を示す。気圧は緩やかに上昇しており、気温は 12～13 時には約 6℃と高めであるが事故発生時刻には約 3℃である。風向は西北西ないし西で 16 時 25 分には最大瞬間風速 21.1 m/s を記録している。

事故現場のトマム寄り約 100 m の地点 (Fig. 3 の B) には 3 杯風速計が設置してあり、広内信号所 (図中 G) で自記記録をとっている。この風速が 20 m/s 以上の場合には JR 北海道釧路支社の集中列車制御 (CTC) 指令室へ自動的にデータを送信する事になっており、また 30 m/s 以上では列車の運行を中止するよう定められていた。しかし事故当時はこのシステムは作動していなかった。そのため減速の指示等とは出されていなかった。また、事故発生の少し前には下りの列車がこの場所を、強風は感じたものの、問題なく通過している。

事故現場に最も近い場所の風の記録は、事故発生現場の約 2 km 北にある北海道立新得畜産試験場の風速計 (高さ 10 m) で得られている。同試験場で観測された 16 時から 19 時までの 10 分毎の平均風速、標準偏差および最大瞬間風速を Fig. 8 (a) に示す。平均風速はこの 3 時間にわたり 20 m/s 前後であり、その最大は 16 時 50 分から 17 時までの 10 分間の 21.4 m/s である。最大瞬間風速は、同じ期間に 30.1 m/s を記録している。Fig. 8 (b), (c) には、乱れの強さ (標準偏差 / 平均風速) と突風率 (最大瞬間風速 / 平均風速) を示してある。乱れの強さは平均的には 0.2 ぐらいの値を示し、突風率は平均で 1.4 程度である。

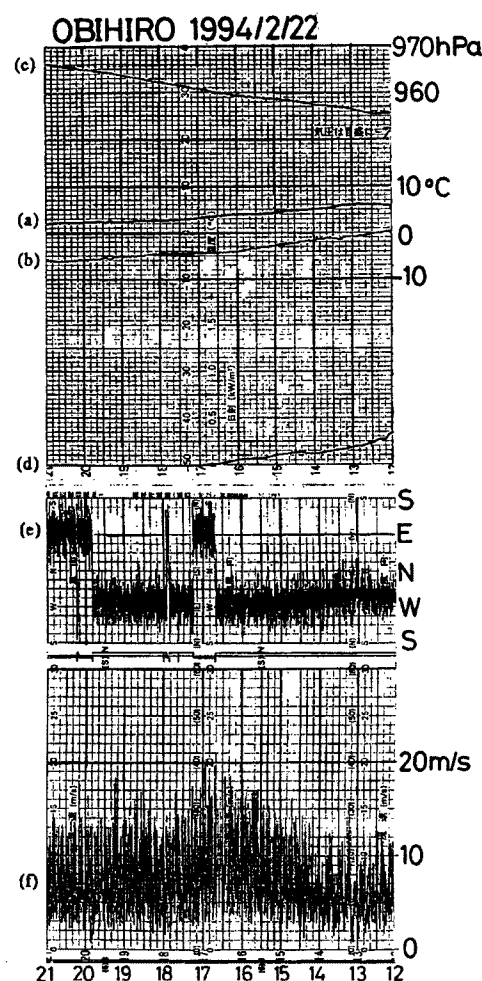


Fig. 7. Records of temperature (a), dew point (b), atmospheric pressure (c), insolation (d), wind direction (e), and wind speed (f) at Obihiro meteorological observatory.

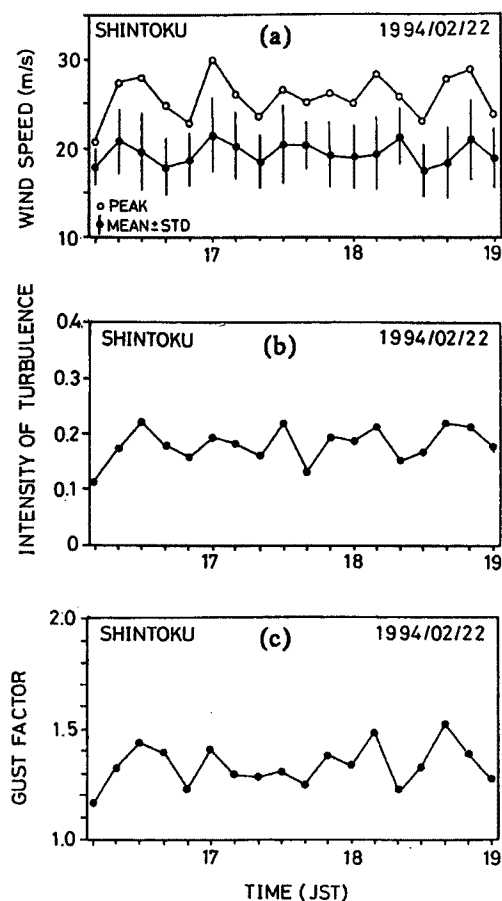


Fig. 8. The wind speed observed at the Shintoku Tikusan Shiken-jo (a). The intensity of turbulence and the gust factor are computed from the data and are shown in (b) and (c), respectively.

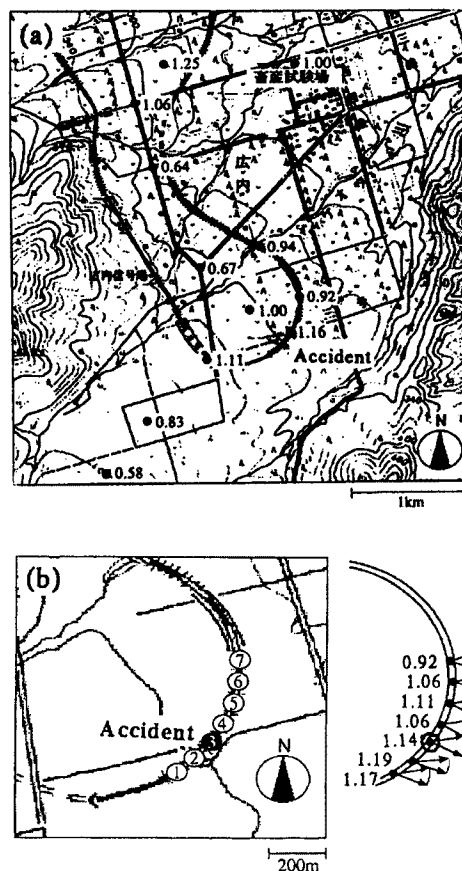


Fig. 9. The strength of surface wind obtained by wind tunnel experiment.

3.3 事故現場付近の風速の推定（風洞実験）

事故現場は日高山脈オダッシュ山の東麓で、日高山脈を越える強風がしばしば吹くところである。広内信号所もそのために設置されたといわれている。そこ

で、事故現場付近の気流性状に対する地形の影響を調べ、この日はどれくらいの風を考えねばならないかを知る目的で、縮尺 1 / 3000 の地形模型を用いた風洞実験を桂が中心となり実施した。

実験に用いた風洞は京都大学防災研究所の境界層風洞で、測定部の断面は幅 2.5 m、高さ 2 m である。地形模型は、Fig. 3 に破線で示した範囲で、オダッシュ山の東麓を含むように作成した。風洞内での模型設置にあたっては、風洞の床面と模型との段差および表面粗度の違いによる急激な変化を防ぐため模型の風上側 2 m 程度にわたり滑らかな勾配をつけた。また、模型の向きは畜産試験場における風速の観測記録より、事故当時の風向と模型上の風向が一致するように設定した。今回の実験では模型の縮尺が小さく地表面の粗度が相対的に小さくなるため、模型の風上側には何も置かず、風上側約 10 m の床面のみで乱流境界層を発達させた。

風速の測定には熱線流速計を用いた。新得畜産試験場の上空 900 m（模型高 0.3 m）を基準点とし、ここでの風洞風速が 4.7 m/s の場合について実験を行った。風向は、毛糸およびタンポポの種子を用いた小型風向計を設置し、ビデオカメラの映像により目視で決定した。

Fig. 9 (a) には、模型上の事故地点付近で測定された地上 15 m における風速を新得畜産試験場の風速

計付近における風速に対する比で示す。Fig. 9 (b) には、事故現場付近を特に詳細に測定した結果を示す。矢印は風向変動の範囲である。事故現場付近で風速が最も大きいのは (b) 図の②地点で畜産試験場の 1.19 倍であるが、事故現場では 1.14 で、風向は西南西から西北西の範囲である。

畜産試験場の事故時前後の風速は 21.4 m/s であるが、これに風洞実験で得られた畜産試験場と事故現場の風速比 1.14 を乗じると、事故現場付近 (b 図の③) では 10 分平均で約 24.4 m/s の風が吹いたと推定される。この地点の突風率が畜産試験場と同じだとして畜産試験場における平均突風率 1.4 を用いれば、事故現場付近では最大瞬間風速は 34 m/s で、風向は進行方向直角から前方に 30 ~ 40° であったと推定される。この風速は列車の運行を停止させる基準となる風速 (30 m/s) 以上であったことは明らかであるが、この場合運転士はこれを知る事が出来なかった。しかし、この風速で脱線転覆に至るかどうかは、これだけでは判断できない。そこで、実際に列車に作用する風力について次の風洞実験が行われた。

3.4 列車に作用する力に関する風洞実験

速度 V で進行中の列車が、進行方向真横から角度 β だけ前方から風速 W の風を受けた時を考える。列車が脱線転覆する危険が生じるのは風上側の車輪にかかる力が零となったとき、すなわち風下側車輪がレールと接する点を中心とした軸に働くモーメントが正になったときだと考えられる (Fig. 10 参照)。このような状態となる危険風速 W_c を今回の列車について風洞実験で求める試みが松本を中心として土木工学教室の 1.0×0.7 m の吹き出し型風洞で行われた。

風洞中に実際の築堤 (Fig. 4 (b) 参照) の $1/150$ の模型をおき、その上に列車の N ゲージ ($1/150$) 模型を実際の編成順に並べ (2 両まで)、先頭車両のみ切り離して 3 分力天秤を用いて、 $\beta = 0, 30, 45^\circ$ のケースについて実験により 3 分力係数を求めた。実験は風洞風速が 8 及び 12 m/s の両方の場合について実施し、両者の平均を求めた。その結果を Table 3 に示す。ただし各係数は以下のように定義した。

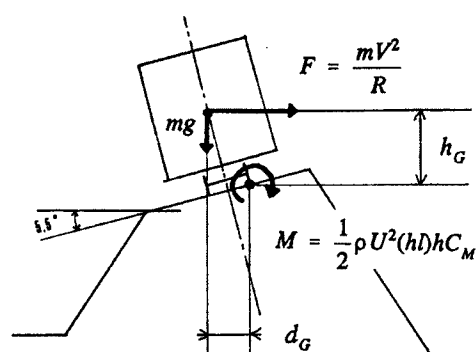


Fig. 10. Various forces acting on the train.

Table 3. Coefficients for three components versus wind direction

β	C_D	C_L	C_M
0°	1.13	0.83	0.98
30°	1.20	0.71	1.02
45°	1.26	0.81	1.11

$$C_L = \frac{\text{Drag Force}}{1/2 \rho U^2 h l}, \quad C_D = \frac{\text{Lift Force}}{1/2 \rho U^2 h l}, \quad C_M = \frac{\text{Pitching Force}}{1/2 \rho U^2 h^2 l} \quad (1)$$

ここで、 ρ は空気密度、 h は車体高さ (実高 3.0 m)、 l は車体長さ (実長 20.4 m) であり、 U は車体に相対的な風の風速である。

列車脱線の条件は、Fig. 10 における転倒モーメントと遠心力モーメントの和が重量のモーメントよりも大きくなる事であるから、

$$\frac{1}{2} C_M \rho U^2 h^2 l + \frac{m V^2}{R} h_G - m g d_G \geq 0 \quad (2)$$

となる。ただし m は車両の質量、 R はこの場所のレールの曲率半径、 h_G は風下側レールから車両重心までの高さ、 d_G は風下側レールから車両重心までの水平距離である。この時の列車に相対的な風速 U_{CR} は、遠心力が風圧力と同じ向きに働く今回の場合は

$$U_{CR} = \sqrt{\frac{mgd_G - mh_G V^2 / R}{1/2 \rho h^2 C_M}} \dots\dots\dots (3)$$

で求められる。実際の条件 (m : 40.9 ton, R : 500 m, カント: 5.5°) を用いて計算するとこの値は **Table 4** のようになる。

ここで示した U_{CR} は列車に相対的な風速であるから、自然の風速 $\vec{W}$ との間には、 $\vec{W} + \vec{V} = \vec{U}$ の関係にある。従って、**Table 4** に示した状況は自然風としてみれば線路直角方向から β_w の方向から W の風が吹いている場合に相当すると考えることができる。(ただし、この場合車両とレールの相対速度を考えていないので地面も一緒に走っているということになる点に問題はあるが、この点はさし当たって無視するとすれば) 危険風速 W_{CR} とこれに対応する風向 β_w は **Table 5** のような値となる。

この結果によれば、列車が高速で走っていると 40 ton もある車両でも予想外に低い風速で危険状態が生じる。風が線路直角方向から 30° ほど前方から吹いている場合、列車が静止していれば 48 m/s の風速まで危険な状態は生じないのに、50 km/h で走っていると自然風の風向 β_w が 29.1° でも相対風の風向 (β) は 45° となり、自然風速 (W) が 35.9 m/s で相対風速 (U) は 44.3 m/s の危険風速に達する結果となる。

すなわち、新得駅を何の警告も受けずに発車した列車は、現場を約 55 km/h、すなわち 15.3 m/s の速度で走行したため、当時の推定風速風向 (β_w : $30 \sim 40^\circ$, W : 34 m/s) でも危険状態に達した可能性があり、脱線しても不思議ではないと言わねばならない。この場合速度を半分にして通過しただけで安全であったとも考えられるだけに、警報システムの正確さが要求されるのではないだろうか。また斜め前方からの風の方が危険であるという結果は、今後の列車の抑止において注意すべき問題であろう。少し前の下り列車が事故現場を無事に通過したのは、風が斜め後ろから吹く事になったためであると考えられる。

Table 4. Critical wind speed relative to the train, U_{CR}

Wind direction relative to the train (β)	Speed of the train (V)		
	0 km/h	50 km/h (13.9 m/s)	80 km/h (22.2 m/s)
0°	48.4	46.5	43.2
30°	48.0	45.4	42.2
45°	45.6	44.3	40.1

Table 5. Natural wind speed and direction in the same condition as Table 4.

Wind direction relative to the train (β)	Speed of the train (V)		
	0 km/h	50 km/h (13.9 m/s)	80 km/h (22.2 m/s)
0°	48.4 ($\beta_w = 0^\circ$)	48.5 ($\beta_w = -16.6^\circ$)	48.6 ($\beta_w = -27.2^\circ$)
30°	48.0 ($\beta_w = 30^\circ$)	40.3 ($\beta_w = 12.6^\circ$)	36.6 ($\beta_w = -1.8^\circ$)
45°	45.6 ($\beta_w = 45^\circ$)	35.9 ($\beta_w = 29.1^\circ$)	29.5 ($\beta_w = 12.8^\circ$)

4. 寿都町のバス転落事故

4.1 事故の概要

2月22日13時45分頃、後志支庁寿都町の弁慶岬付近を走行中のニセコバス(株)の寿都発島牧村行きの路線大型バス(日野自動車製 K-RV 561 P, 乗客乗員4名)が強風を受けて、道路の山側に転落した。この事故で、乗客2名が重傷、運転手が軽傷を負った。バスの大きさは、車長 11.97 m, 車幅 2.47 m, 車高 3.065 m で、空車重量は 10.09 ton である。Fig. 11 (a) に事故発生地点周辺の地形図を示す。また Fig. 11 (b) には Fig. 11 (a) に X-X' で示した地形断面を示す。道路は幅員 9.1 m の舗装道路で、約 6 m の高さの盛土の上にある。道路の西側は約 10 m 幅の荒地があり、その先は高さ 150 m の崖になっている。また、道路の東側は路肩から約 55 m にわたりほぼ平坦な荒地があり、その先は海になっている。事故発生時には路面は凍結していたと見られ、事故現場を弁慶岬に向けて北進していたバスが、路面を横滑りして山側(西側)路肩から道路外へ転落したものである。

4.2 事故の現場周辺気象状況

事故現場に最も近い気象観測点である寿都測候所 (Fig. 11 (a) に B で示す) における気象要素の 09 時から 15 時の自記記録を Fig. 12 に示す。寿都測候所では、この日 09 時 20 分に最大風速 16.0 m/s (NW), 08 時 21 分に最大瞬間風速 34.5 m/s (NW) を記録している。事故発生時刻頃には気圧は緩やかに上昇しており、気温は $-1 \sim -2^{\circ}\text{C}$ である。風速は最大瞬間風速 20 m/s 程度、風向は西北西ないしは北西であった。Fig. 13 には事故発生時の函館レーダーのエコーを示すが、事故現場付近に雨雲は見られない。

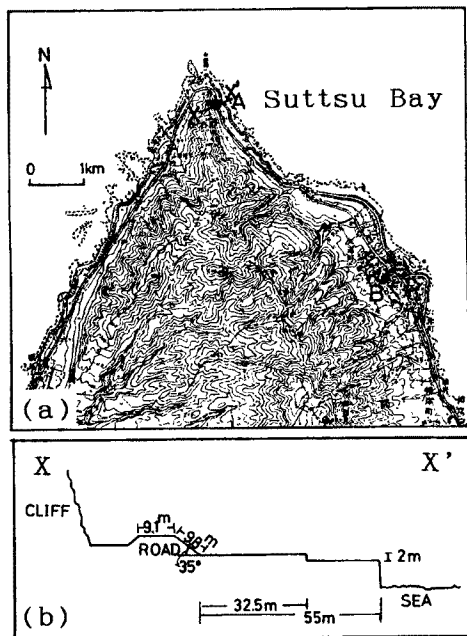


Fig. 11. Topography around the site of accident of Niseko Bus. The A represents the site of accident and B the Suttsu meteorological observatory.

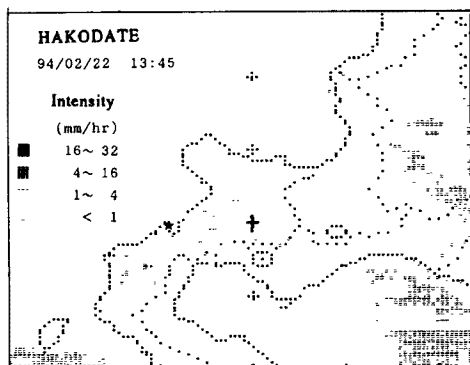


Fig. 13. Radar Echo at the time of the accident (13:45) observed by Hakodate radar. The cross in the figure represents the site of radar and the star represents the site of accident.

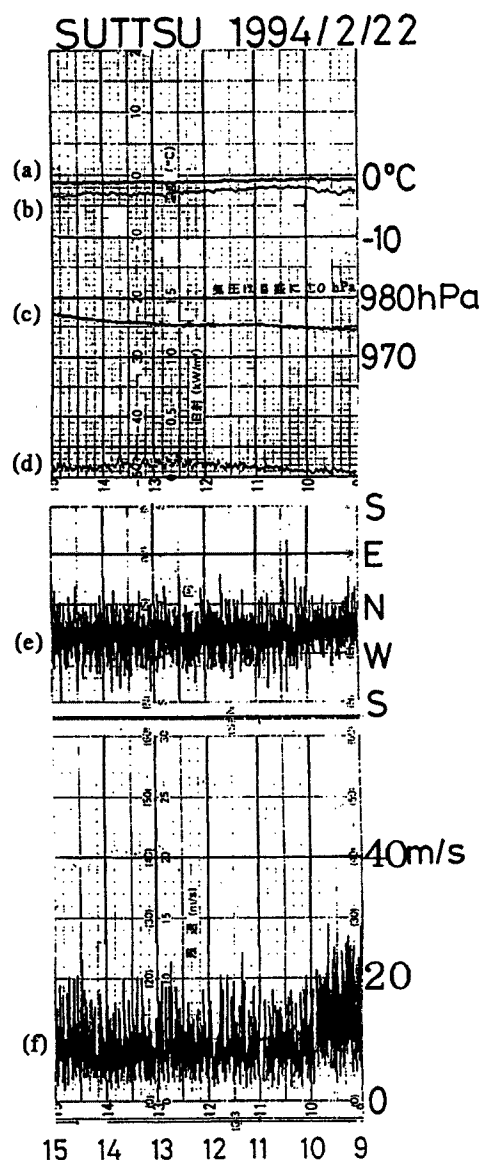


Fig. 12. Same as Fig. 7 but for Suttsu meteorological observatory.

4.3 事故の考察

寿都測候所は現場から 4 km 程離れた丘の上にあるが、そこでの観測データでは、風向は西北西ないし北西、風速は最大瞬間風速で 20 m/s 程度であり、海側からの北ないし北東寄りの風を受けてバスが道路の西側に転落した現場の状況とは異なっている。現場は弁慶岬の近くで、海からの風が強く吹きつける場所である。その意味では海上での風速に近い風が吹いていたと思われる。第 6 章に示した天気図より求めた海上風速は 24 m/s である。

一方、バスにかかる風圧力 F_w は、

$$F_w = C_s \cdot \left(\frac{1}{2} \cdot \rho u^2 \right) \cdot A \cdot l_s \cdots \cdots \cdots (4)$$

で表される。ここで、 C_s は横風の抗力係数、 ρ は空気密度 (1.26 kg/m^3)、 u は風速、 A は風圧作用断面積、 l_s ($= 1.84 \text{ m}$) は風圧作用中心までの高さである。これが、バスのタイヤと路面 (凍結していたと考えられる) との静止摩擦、

$$F_f = \mu Mg \cdots \cdots \cdots (5)$$

よりも大きければ風で滑り出す。ここで、 μ はタイヤと路面の摩擦係数、 M ($= 10,300 \text{ kg}$) はバスの重量 (乗客乗員 4 名分の体重を加算して有る)、 g ($= 9.8 \text{ m/s}^2$) は重力加速度である。風圧により車両が滑るのに必要な風速は、

$$U > (2\mu Mg / C_s \rho A l_s)^{1/2} \cdots \cdots \cdots (6)$$

という条件のときとなる。車両の抗力係数 C_s は車両の形を直方体と仮定して $C_s = 1.4$ とする。現地調査で得られた証言では車両進行方向に対して $30 \sim 45$ 度の角度で風が当たったということなので、実際にはこの値とは異なっているかもしれない。一方、摩擦係数 μ は路面及びタイヤの状態により大きく変化する。タイヤと路面の摩擦については、完全に凍結した路面とタイヤの進行方向の摩擦係数が $0.1 \sim 0.2$ であることは知られているが、タイヤが横滑りする場合に関しては今回調べた限りでは見いだせなかった。ここでは、 $\mu = 0.2$ としたら風速 27 m/s くらいで滑り出す事になる。この付近の天気図から推定した風速は 24 m/s であるが、弁慶岬の地形による増強を考えると、海から事故発生地点に吹きつける風が危険風速より大きかった可能性は充分にある。

5. 三陸鉄道の列車脱線転覆事故

5.1 事故の概要

2 月 22 日 15 時 22 分頃、岩手県気仙郡三陸町越来字甫嶺の三陸鉄道南リアス線甫嶺駅の南約 500 m 付近で盛駅発久慈行きの 5223 D 列車 (2 両編成) が脱線し 5 名の乗客全員が軽傷を負った。列車の型式は 2 両ともキハ 36 である。Fig. 14 に、事故発生現場周辺の地形図を示す。図中 A で示した事故発生現場は、越喜来湾の一番奥まったところにあり、海に面した東側を除き三方向を標高約 500 m の山で囲まれている。事故現場は越喜来湾の中で、さらに小さな入江の奥になるような地形で、この入江の入口の南北は高さ 150 m 程度の山がある。事故現場も含めて、甫嶺駅付近は甫嶺川、矢作川に沿って小さな平野が広がっている。線路の東側は約 150 m にわたって水田あるいは荒地となっており、その先は海である。Fig. 15 (a), (b) には事故現場付近の詳細図と (a) 図の X-X' 断面に沿う軌道の断面図を示す。この図は南から北を眺めた図である。築堤の法面は石で覆われている。列車は (a) 図の左から右へ向かって進行していた。15 時 03 分に盛駅を発車した列車の運転士は、「現場付近は強風のため時速 28 km くらいで徐行していた。トンネルを抜けたとたん猛烈な突風のため先頭車両から海側に傾いて転落した。」と述べている。

事故現場は矢作川の鉄橋を渡り終えたところである。

5.2 事故現場周辺の気象状況

Fig. 16 には、大船渡測候所 (Fig. 14 の B 地点) における 12 時から 18 時までの気象要素の自記記録を示す。気圧は緩やかに上昇しており、事故発生当時の気温は約 0°C である。大船渡では、22 日の 05 時 20 分に、最大瞬間風速の累年極値を更新する 38.1 m/s の北西風が記録されている。事故発生当時の風向は西北西であり、風速は平均的には 14 時～15 時に比べるとやや弱まっている。しかし、15 時 34 分には 30 m/s を越える瞬間風速を記録している。Fig. 17 は陵里にある気象ロケット観測所 (Fig. 14 の C 地点) における自記記録である。風向は西、風速はやはり弱まる傾向にあるが、15 時 30 分過ぎ頃、 30 m/s をこえる瞬間風速が記録されている。この他、宇宙研究所三陸大気球観測所 (Fig. 14 の D 地点) においても風速の自記記録が得られている。記録が不鮮明であるため図には示さないが、14 時以降、風速が弱まっている点は、他の観測点と同じ傾向である。これらの自記記録の

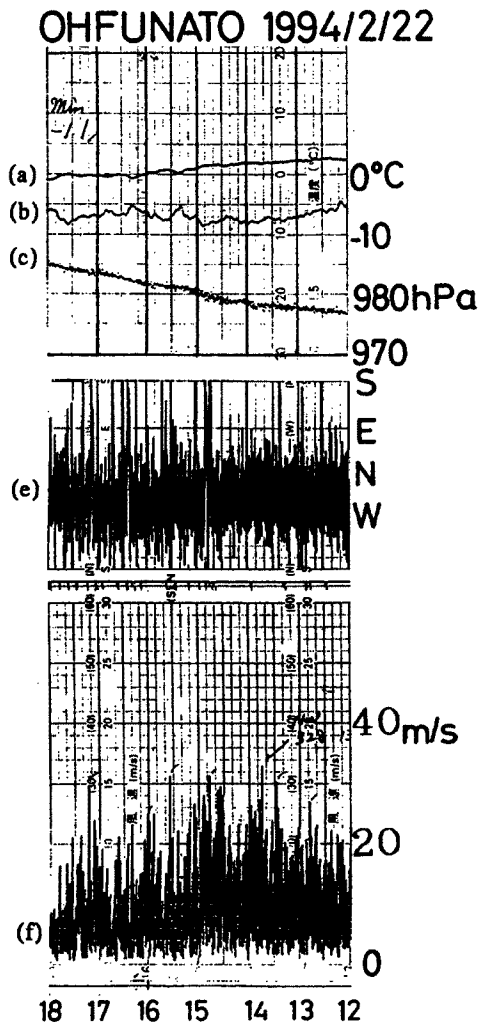


Fig. 16. Same as Fig. 7 but for Oofunato meteorological observatory.

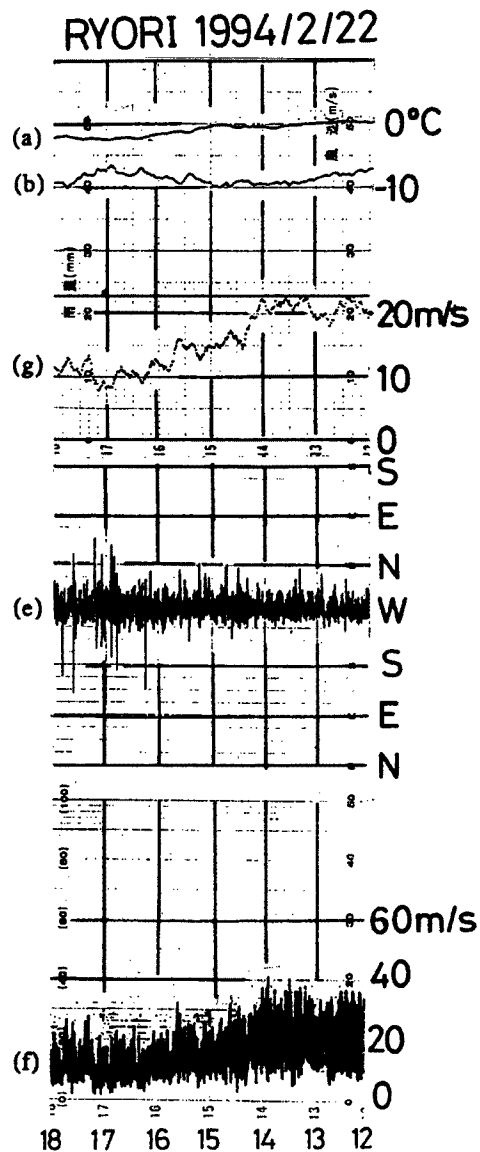


Fig. 17. Same as Fig. 7 but for Ryori. The (g) represents mean wind speed.

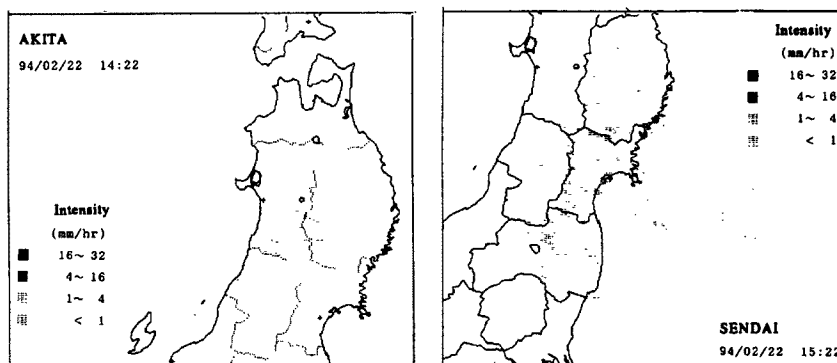


Fig. 18. Radar Echo at the time of the accident (15 : 22) observed by Akita and Sendai radar. The cross in the figure represents the site of radar and the star represents the site of accident.

他、事故現場の約3 km北にある三陸鉄道三陸駅に設置されている三杯風速計の指示は22 m/sであったという報告がある（自記記録は入手できず）。

車両の諸要素がはっきりしないので被害から風速を推定することは出来ないが、東北地方の東海岸で予想外に風の強い場所がいくつか見られる。事故地点もその一つであると考えられ、矢作川の谷の走行と風向が一致したため風が強く、しかも山の切れ目から海に流れ出すような所の築堤の上という地形的にも風速が強化される可能性の大きいところである。しかも車両の重量も根室本線の場合ほど大きくないので危険風速は小さいと考えられる。従ってこの事故の場合も列車を抑止していたら良かったと思われる。Fig. 18には事故発生時刻における秋田レーダーと仙台レーダーのエコーを示す。事故現場付近に雨雲は見られないが、岩手県南部や宮城県では東西に伸びる雨雲が発生していることが特徴的である。地形と比べてみると、JR北上線、陸羽東線、仙山線が東西に奥羽山脈を横切る鞍部や銅越峠など標高の低い場所で雨雲が発生しているように見える。

6. 低気圧の強風の特徴

Fig. 2で強風災害発生地点の低気圧中心位置からの距離をみると、490 km（寿都）、650 km（大船渡）、270 km（新得）となり、台風に伴う強風災害と比較して、低気圧の中心位置から比較的遠いところで強風災害が発生している。このような状況は、台風の場合には考えられないことで、温帯低気圧では気圧傾度の集中が無く、広い範囲に比較的強い気圧傾度が存在しているため、低気圧の中心から離れた地域でも強い風が吹いた為であると考えられる。そこで、この低気圧の構造がどのようなものであるかを調べてみた。

気象庁の地上天気図を参考とし、各気象官署で観測された海面校正気圧値を用いて主観解析により地上天気図（09時、12時、15時、18時、21時）を作成した。気圧の観測値では、本州の日本海側（風上側）で高圧、太平洋側（風下側）で低圧という、西風時の山岳効果を反映した気圧分布が見られるが、等圧線を引く際には、このような地形の影響により生じる擾乱は低気圧固有の構造とは分けて考える事とし、主観的に平滑化した。

このようにして作成した地上天気図から、北緯35度～46.25度、東経135度～147度の範囲で経度方向に0.5度、緯度方向に0.3125度の格子で気圧を読み取った。さらに、読み取り誤差による不自然さを平滑化するため、F. G. Shuman (1957)²⁾の平滑化を2回適用して気圧の格子点値を作成した。この時刻のように低気圧が最盛期に達すると閉塞前線を持つようになり、前線のある南東側を除く方向ではほぼ同心円状

の等圧線を持つようになる。

Fig. 19 は、2月22日15時の気圧分布について各格子点の気圧を低気圧の中心からの距離の関数として方位別にプロットした図である。図中には低気圧の中心から見て、北西(□)、西北西(○)、西(×)、西南西(◇)、南西(□)の方位にある格子点値だけを示してある。また図中の■は観測値を示す。低気圧周辺の気圧分布は軸対象ではないため、方位によりプロファイルは多少異なっている。しかし全体としては中心からの距離の関数として気圧分布を作ることでき、中心から1,000 km くらいまでの間に気圧勾配の変化は大きくない。

Fig. 19 の気圧分布を図中に破線で示したようにモデル化した気圧の分布を、Fig. 20 (a) に示す。この図には同程度の中心気圧を示す台風の気圧分布の例を実線で示してある (Schloemer³⁾ による台風の気圧分布モデルで $P_c = 955$ hPa, $\Delta p = 60$ hPa, $r_m = 100$ km とした)。台風の気圧分布では、台風中心のごく近傍は別としても、台風中心に近づくほど気圧降下が急激であるが、今回の低気圧の気圧分布では半径方向の広い範囲で一様な気圧降下を示していることが特徴である。換言すれば、台風の気圧分布では最大旋衡風半径付近に強い気圧勾配が集中しているのに対して低気圧では半径方向の広い範囲に比較的強い気圧勾配が一様に分布している。

半径方向に Fig. 20 (a) の気圧分布を持ち、かつ等圧線が同心円であるようなモデル低気圧について傾度風速を計算した結果を Fig. 20 (b) に示す。低気圧の中心から半径 300 ~ 400 km の距離まで傾度風速は増加し、半径 800 km 程度までの広い範囲で傾度風速の強い領域が存在する様子が分かる。これは、気圧傾度が半径方向の広い範囲でほぼ一様に分布していることに対応しており、台風による強風が最大旋衡風半径付近の半径方向の比較的狭い範囲に集中して存在している事と大きく異なっている。

このような気圧分布の型が全ての温帯低気圧に共通なものかどうかはこれだけからは言えないが、広い範囲で風が強いのはこのような気圧分布になっているからであり、どうしてこのような分布の形になるのかについて考察が必要である。台風の場合とは大きく異なっている事は確かである。

このような分布から低気圧内の風の分布を求める事ができるが、実際の低気圧は移動しており時間的に発達もする。そのような一般の場合の低気圧内の海上風を求める方式として、Bijvoet^{4, 5)} の方法が提案されている。この方法は、陸上への応用を考えているわけではないが、この低気圧に適用して計算してみた。

Bijvoet の方法は、単位質量の空気塊の単純な運動方程式

$$\frac{dv}{dt} = f\mathbf{v} \times \mathbf{k} + \mathbf{G} + \mathbf{R} \quad (7)$$

を出発点とする。式中で、 $\mathbf{v}$ は地上風速、 t は時間、 f はコリオリ因子、 $\mathbf{k}$ は鉛直上向きの単位ベクトル、 $\mathbf{G}$ 、 $\mathbf{R}$ はそれぞれ気圧傾度力と摩擦力である。この式を右辺のコリオリ因子の項の $\mathbf{v}$ について解いた式を作

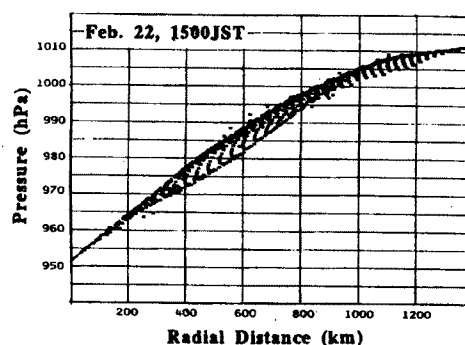


Fig. 19. Radial distribution of sea level pressure around the extratropical cyclone.

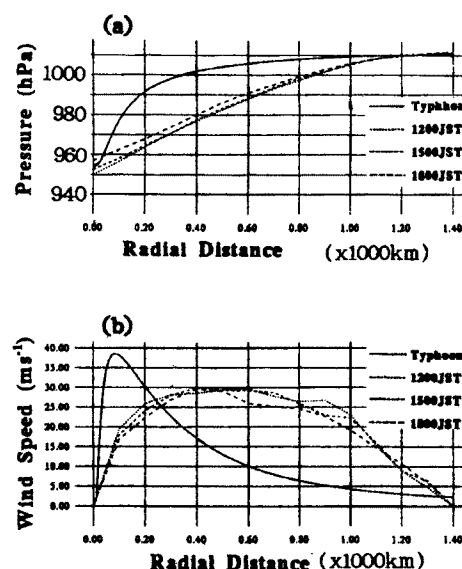


Fig. 20. Comparison of the pressure distribution (a) and the gradient wind (b).

り、それを時間 t で微分した式を (7) 式に代入する。同様の操作を繰り返す事により、 v を級数の形で、

$$v = \frac{1}{f}(G+R) \times k + \frac{1}{f^2} \frac{d}{dt}(G+R) - \frac{1}{f^3} \frac{d^2}{dt^2}(G+R) \times k + \dots \quad (8)$$

と表す事ができる。この式で、時間に関する 2 階以上の微分項を無視すれば、

$$v = \frac{1}{f}(G+R) \times k + \frac{1}{f^2} \frac{d}{dt}(G+R) \quad (9)$$

となる。地衡風と海上風の成す角度 (α)、地衡風と海上風の風速比 (c) について経験的に得られている関係を用いて R を表現して整理すれば、海上風速は

$$v = \frac{\left\{ \frac{a_1}{f} G_y - \frac{a_3}{f^2} \frac{\partial G_y}{\partial t} - \frac{a_4}{f^2} \frac{\partial G_x}{\partial t} \right\} \sec \alpha}{1 + \frac{a_4}{f^2} \frac{\partial G_x}{\partial x} + \frac{a_3}{f^2} \frac{\partial G_y}{\partial y} \tan \alpha + \left(\frac{a_3}{f^2} + \frac{a_4}{f^2} \tan \alpha \right) \frac{\partial G_y}{\partial y}} \quad (10)$$

と表現される。ここで、 y 軸は気圧傾度力の方向にとってあり、係数 $a_i (i=1 \sim 4)$ は、大気の安定度の指標となる海面付近の気温と海面温度の差の関数とし経験的に得られた α 、 c から計算されるものである。連続した天気図から読み取った気圧を用いて、気圧傾度力とその微分項を求め上式に代入すれば、風速を計算することができる。 a_i の値として Bijvoet が求めている北海での値 (Table 6) から、大気の温度成層は中立であると仮定し、地表面 (海面) 温度と気温との差が 0°C の場合を用いた。

Table 6. Coefficients for Eq. (10)

$T_{air} - T_{sea} (^\circ\text{C})$	-4	-2	0	+2
a_1	0.77	0.71	0.64	0.58
a_2	0.16	0.18	0.20	0.21
a_3	0.25	0.26	0.26	0.25
a_4	-0.56	-0.48	-0.38	-0.29

一例として Fig. 21 に、2 月 22 日 15 時の海上風の計算結果を陸上の観測値と共に示す。太いベクトルで示した方が観測値である。計算された風向は観測されたそれと比較的良好な対応を示すが、風速の計算値は、観測値よりもかなり大きめに計算されている。これは、計算値は海面上 10 m の風速を求める事になっているので、陸地よりは大きい場合があっても当然である。試みに、Bijvoet の方法で計算した 3 時間毎の格子点値から時間空間内挿して得た事故発生地点の風速 (風向) を求めると、バス横転事故の発生した弁慶岬では 24 m/s (313°)、三陸鉄道の脱線事故の発生地点では 31 m/s (305°)、根室本線の脱線事故発生地点では 22 m/s (303°) となる。

7. 結 語

この報告では、発達した温帯低気圧により 1994 年 2 月 22 日に東北地方、北海道地方の交通機関に発生した強風災害について、現地調査の結果、風洞実験の結果、低気圧の気圧分布の解析結果を示した。

低気圧の気圧場の解析の結果、この低気圧は中心気圧からみると台風並に発達したものであるが、半径方向の気圧分布は、台風の場合とは異なり、半径方向の広い範囲に渡り強い気圧傾度が存在する構造である事が示された。この気圧分布を反映して、傾度風や、Bijvoet の方法で求めた地上風速は、低気圧の中心から半径 400 km の範囲では中心からの距離とともに増加し、中心から $800 \sim 1,000 \text{ km}$ の付近まで強風域が存在する。すなわち、このような低気圧にともなう強風の特徴として、最大風速は台風の場合に比べ

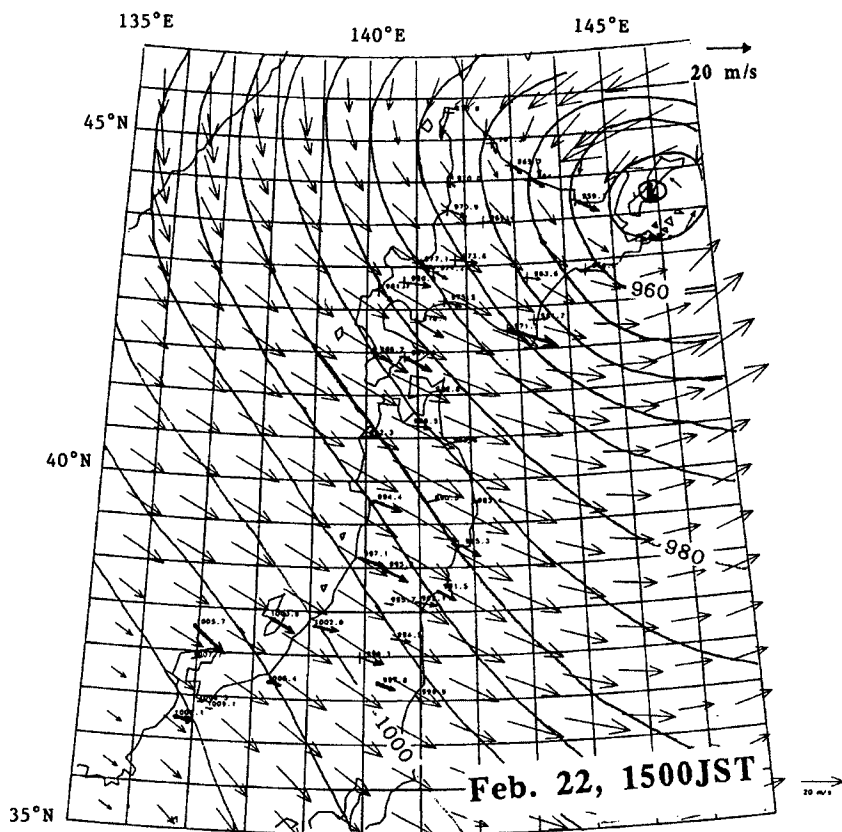


Fig. 21. Surface winds computed by Bijvoet's method (thin vectors) and observed winds (thick vectors).

て小さいが、強風域が広い範囲に存在する事が示された。このことは、低気圧の中心から数百 km 離れた地域でも、強風災害が生じ得ることを示している。今回の低気圧で、交通機関の強風災害が低気圧の中心からかなり離れた地点で発生したことは、このことを裏付けているといえる。しかし風速そのものはあまり大きくないので家屋に大きな被害を生じる程ではなかった。

また、この低気圧は、2月20日21時から24時間に中心示度が32 hPa 降下しており、爆発的に発達する低気圧^{6),7)}として最近注目されている温帯低気圧の一例である。この種の低気圧の発達のメカニズム、成熟期の構造等については、今後さらに詳しい研究を進める必要がある。

また、根室本線脱線事故の発生した新得周辺の地形を用いた風洞実験の結果、この付近では列車を脱線転覆させるだけの風が吹いていた事が考えられる。このように列車に斜めに風が当たった場合は、危険風速は真横に当たった時よりも小さくなることが実験で示された。すなわち列車が走行していると相対風速が働くので、予想外に小さい自然風速でも事故になる危険がある。このことは列車の運行管理において極めて重要であり、今後注意を要する。

寿都のバス転落事故の事例でも三陸鉄道の場合でも、地形の影響が大きく作用していると思われる。低気圧の気圧場の解析により得られる風向風速と、実際に強風災害をもたらす地上付近の風向風速をつなげる為には、地形が存在するときの地上風の性状について今後解明していく必要がある。

今回の強風災害では、建築物に対する被害が殆ど無かったのに対して、交通機関に大きな被害が生じたことが大きな特徴である。この理由として、低気圧の解析でも示されたように、最大風速が比較的小さく、

建築物に被害を与えるほどの強風は吹かなかったことがあげられる。一方で、交通機関にとっては、その安全条件を越える強風が広範囲で吹いた為、低気圧の中心からかなり離れた地点でも交通機関の被害が発生したものと考えられる。発達した温帯低気圧にともなう強風災害の防止については、建築物の被害よりは20～30 m/sの風速での交通機関の安全に関する広範囲での警戒が必要であるといえる。

謝 辞

この調査を行うにあたりお世話になった各地方機関の方々に感謝したい。同時に、風洞実験についてはNHK 釧路放送局のご協力を得た。また現地調査に参加した京都大学防災研究所の玉川一郎、塚原康平の両氏にも感謝する。

参 考 文 献

- 1) 橋と風編集グループ：橋と風，コスミック，1990，pp.122-123.
- 2) Shuman, F. G. : Numerical methods in weather prediction. II Smoothing and filtering, Mon. Wea. Rev., Vol. 85, No. 11, 1957, pp. 357-361.
- 3) Schloemer, R. W. : Analysis and synthesis of hurricane wind patterns over Lake Okeechobee, Florida, Hydrometeorological Report, 31, 1954.
- 4) Bijvoet, H. C. : A new overlay for the determination of the surface wind over sea from surface weather charts, K. N. M. I., mededelingen en Verhandeligen, Vol. 71, 1957, p. 35.
- 5) 光田 寧・藤井 健・塚本 修：日本海における季節風時の波浪予知（1）—海上風の推定—，京都大学防災研究所年報第26号B-2，1983，pp.587-598.
- 6) 小倉義光：冬の海上の「爆弾」低気圧（上），気象，34巻，5号，1990，pp. 4-6.
- 7) 小倉義光：冬の海上の「爆弾」低気圧（下），気象，34巻，6号，1990，pp. 8-10.