

衛星画像から見た低層乱気流等の発生時の雲の特徴

Cloud Features Suggesting Low Level Wind Shear and Turbulence

伊藤 秀喜*、用貝 敏郎*、今泉 孝男*
Hideki Itoh, Toshiroh Yogai and Takao Imaizumi

Abstract

The authors have investigated the Geostationary Meteorological Satellite (GMS) images in order to find out whether low level (lower than 2000 feet high) wind shear (LLWS) and turbulence are accompanied by characteristic cloud features. Our investigation shows moderate to severe LLWS and turbulence are accompanied by some characteristic cloud features, such as convective cloud line, southern edge of major cloud system of depression, wave cloud, cu cloud lines in cold air advection and small cloud vortex. Some characteristic cloud features only appear near some specific airports. It suggests that GMS imagery is helpful in detecting LLWS and turbulence.

1. はじめに

衛星画像が低層(2000 feet 以下)の乱気流及びウィンドシアー等(以下乱気流等と呼ぶ)の監視・予測に有効であるかどうかを明らかにするため、乱気流等の発生時刻前後の衛星画像の雲に特徴があるかどうかを

調査した。その際表1に示した点に着目した。調査対象とした空港は千歳、函館、仙台、新潟、羽田、及び福岡の6空港である。乱気流等の発生日時については昭和62年度と昭和63年度の航空気象予報技術検討会資料及び当該航空気象官署から提供されたものを用いた。乱気流等の発生記録に強度の記載がないものは弱いものとして扱った。衛星画像は、主として3時間毎のHR-FAXの画像を用いた。1987年3月以降については、毎時の画像が取得されているので、1時間毎のWEFAXの画像を補助的に用いた。又一部オリジナルの分解能でラインプリンターに出力した画像も用いた。

表1 衛星画像の着目点

衛星画像の着目点	対応すると思われる現象
雲バンド、対流雲列	前線、シアーライン、対流
雲域の縁	風のシアー
対流雲、特にCb	対流
波状雲	山岳波
小雲渦	小渦
?	海陸風
雲域との相対的位置	総観的状况

2. 低層乱気流等の発生時の各空港に共通な雲の特徴

乱気流等の発生時の雲の特徴には、全ての空港又はいくつかの空港に共通して見られるものと、特定の空港にのみ見られるものがあった。ここでは全ての空港又はいくつかの空港に共通して見られた雲の特徴について述べる。代表的な実例を写真1から12に示す。写真1から7までは低気圧の中心及び前線に対応する雲域付近、写真8と9は波状雲付近、写真10は筋状雲域、写真11は寒気場内での太平洋側のCuライン付近、写真12は小雲渦付近で、それぞれ乱気流等が発生した例である。

* 気象衛星センター

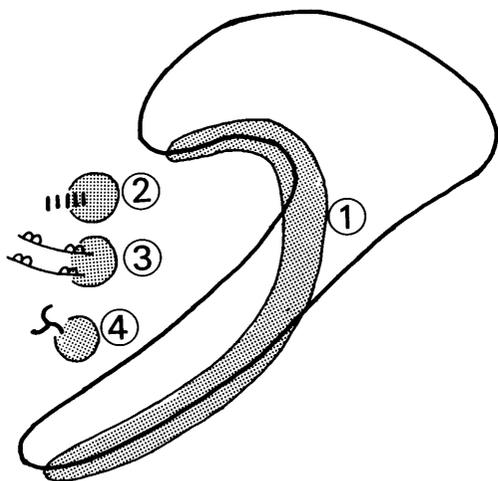


図1 各空港に共通な乱気流等の発生位置の模式図。
太線は低気圧に伴う雲域を示す。点彩は乱気流等の発生位置を示す。①は低気圧に伴う雲域の南縁及び対流雲列、②は波状雲、③は寒気場の対流雲列、④は寒気場の小雲渦を示す。

乱気流等の発生位置を上記の例に他の例も加えて模式化したものを図1に示す。図1の太線で囲んだ領域は発達した低気圧に対応した雲域をパターン化したものであるが、実際にはこの雲パターンの発達程度はまちまちであり、また地上天気図で低気圧や前線が解析されているとは限らない。図1の①は一般的には閉塞前線及び寒冷前線に対応する位置であり、雲の特徴としては対流雲列である。ただし①の位置以外にある対流雲列、例えば寒冷前線に対応する雲バンドの北縁に対流雲列がある場合(写真4)もこれに含めた。また低気圧に対応する雲域の北西部の南縁及び西南部の雲バンドの南縁が明瞭である場合にも①に含めた。②は波状雲を示し、寒気場で発生する 경우가大多数であるが、温暖前線付近に発生するものや寒冷前線に対応する雲バンドから波状雲に変化するものもある。③は寒気場の対流雲列を示し、日本海側では筋状雲となっているが、太平洋側では1本又は数本の対流雲列である。④は寒気場に発生した小雲渦を示す。

図1の①(低気圧に対応する雲域の対流雲列または南縁)では、全ての空港で乱気流等の発生があった。特に千歳空港では並み以上の乱気流の40%が発生していた。函館及び新潟でも多かったが、並み以上の乱気流はそれぞれ1例のみであった。福岡空港や羽田空港では低気圧に対応する雲域や雲バンドで発生している

乱気流等は多かったが、そのほとんどが弱いものであった。並み以上の強度のものは羽田空港で4例、福岡空港で3例発生し、その内①で発生しているものはそれぞれ2例であった。その外に、低気圧の東又は北東側で南から伸びるCb域のすぐ北側で発生していたものが1例づつあった。弱い乱気流等は、雲パターンそのものが明瞭でない場合が多く、①での発生と特定できるものは少なかった。仙台空港では寒冷前線に対応する対流雲バンドの通過時に発生した弱い乱気流の1例のみであった。

②(波状雲)での乱気流等の発生は仙台空港で非常に多く、仙台空港での全乱気流の85%、並みの乱気流の90%を占めた。羽田空港でも波状雲域周辺での発生がやや多かった(強の乱気流等2例を含む)。その他の各空港でも数例の発生があった。

③(寒気場内の対流雲列)での乱気流等の発生は福岡空港で多かったが強度は全て弱いものであった。筋状雲が頻繁にかかる千歳空港、函館空港及び新潟空港ではそれぞれ1例、3例、1例と少なかった。太平洋側の空港では羽田空港で多く、そのうちの2例は強いものであった。仙台空港でも3例の発生があった。

④(小雲渦)では千歳空港で並みの乱気流1例、新潟空港で弱い乱気流1例の発生があった。

低気圧に伴う雲域の北縁付近や北東部及び雲バンドの北縁付近では千歳空港、函館空港、新潟空港及び福岡空港で数例づつの発生があったが、各空港によって様相が異なるので、これらについては3章の各空港毎の項で述べる。

台風周辺での乱気流等の発生は福岡空港で多く、そのうち並み以上の強度のものが多かった。羽田空港でも1例の発生があった。これらについては3章の各空港毎の項で述べるとともに、実例を福岡の項で示す。

3. 各空港毎の乱気流等の発生した雲の特徴

ここでは乱気流等の発生時の雲の特徴について各空港毎に分けて述べる。2章で各空港に共通する雲の特徴についての実例は既に示したので、それ以外の代表的な実例を各空港について2例づつ示す。又各空港毎に乱気流等の発生位置の模式図を示す。各模式図の中の数字符号(①~④)は図1で示した各空港に共通な雲の特徴を示し、英字符号(a~c)はそれ以外の雲の特徴を示す。ただし羽田空港及び福岡空港の項での①については、低気圧に伴う雲域や雲バンド等という広い雲域を示す。

3. 1 千歳空港

千歳における乱気流発生時の雲の特徴を表2に、乱気流発生位置の模式図を図2に示す。全乱気流17例のうち強い乱気流が1例、並みの乱気流が14例とほとんどが並み以上の強度のものであった。

表2及び図2の①（雲バンドの南縁及び対流雲列付近）での乱気流発生は7例と最も多かった。②（波状雲域）では1例のみ発生していた。頻繁に観測される③（筋状雲）では1例のみの発生と少なかった。その時の筋状雲は、その走向の直角方向に波状となっており、この波状であることが乱気流発生時の筋状雲の特徴である可能性が考えられる。④（小雲渦）では1例の乱気流が発生していた。その時の小雲渦は極弱いものであった。

④（コンマ状雲の厚い雲域の前面の上層雲域）では4例の乱気流が発生していた。その内の3例は沿海州南端付近又は日本海中西部の低気圧に対応する発達したコンマ状雲の厚い雲域の東側の上層雲域（写真13）で発生していた。ここでの乱気流の発生は千歳空港の特徴と考えられる。これらは3例とも乱気流発生時頃

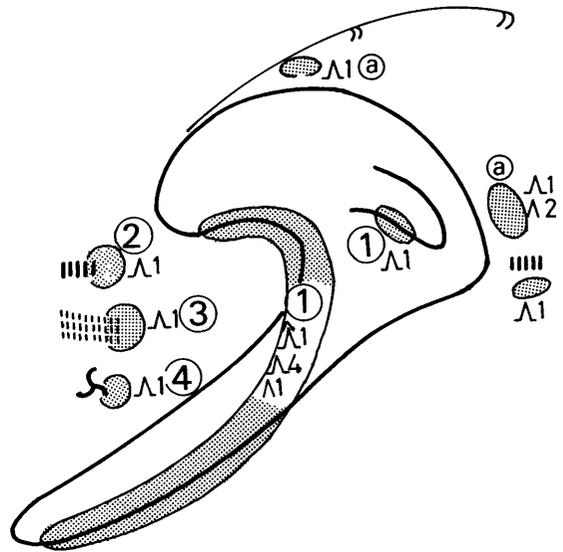


図2 千歳空港における乱気流等の発生位置の模式図。ただしΛは強い乱気流、Λは並みの乱気流、Λは弱い乱気流を示す。それらの後の数字は発生数を示す。その他の記号等は図1に同じ。

表2 千歳空港における低層乱気流発生時の特徴
1986年4月～1987年6月

低層乱気流発生時の雲の特徴		低層乱気流の発生数			
		SEV	MOD	LGT	計
①	対流雲列		2		7
	フック付近の不明瞭な対流雲列	1			
	雲バンドの南縁		3	1	5
②	波状雲		1		1
③	筋状雲がその走向の直角方向に波状		1		1
④	小雲渦		1		1
④	コンマ状雲前面の上層雲域		3	1	4
	その他		3		3
	計	1	14	2	17

①～④及び④は図2の①～④及び④に対応する

の札幌の下層で南南西の強風（900mbで22～29m/S）が吹いていた。もう1例は関東南岸の低気圧に対応する発達した厚い雲域の北側の上層雲域で発生していた（写真14）。

その他の雲域では、弱い冬型の時の空港付近のCuで1例、温暖前線に対応する雲バンドが弱まりながら波状雲化した雲域の南側の晴天域で1例、晴天域で1例が発生していた。

3. 2 函館空港

函館空港における乱気流等の発生時の雲の特徴を表3に、発生位置の模式図を図3に示す。全乱気流等の31例中並み以上のものは7例と少なかった。

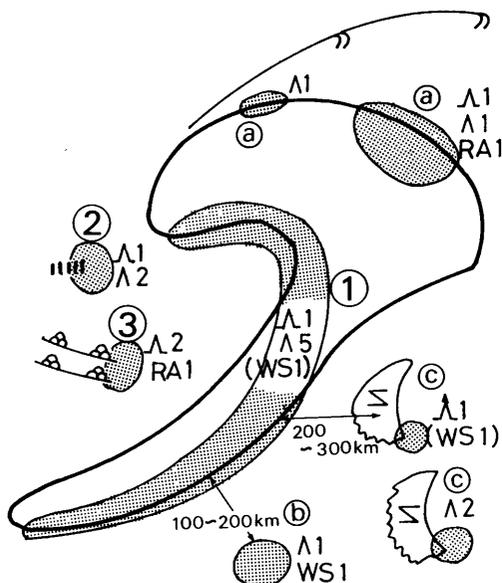


図3 函館空港における乱気流等の発生位置の模式図。
WSはウィンドシアア、RAはラファア、()は乱気流と同時に観測されたことを示す。その他の記号等は図2に同じ。

表3及び図3の①(雲バンドの南縁及び対流雲列付近)での乱気流等の発生は千歳空港と同様に6例と最も多かったが、並の乱気流は1例と少なく、残りの5例は弱い乱気流等であった。並の乱気流の例(写真6)はCbバンドの南縁付近で発生していた。②(波状雲域)では3例の乱気流が発生し、その内1例は並の乱気流であった。③(筋状雲)では3例の低層乱気流が発生していた。その内2例は並の低層乱気流であった。

④(低気圧に伴う雲域の北東部、北東縁及び北縁付近)では4例の発生があったが、並の低層乱気流は1例のみで残りの3例は弱い乱気流等であった。これらの雲域の発達程度はまちまちであった。並の低層乱気流の例は、あまり組織的でない下層雲域の北東縁で発生していた(写真15)。

⑤(雲バンド南東約100~200kmの晴天域)で弱い乱気流等が2例発生していた。⑥(霧域の明瞭な境界付近)で3例の乱気流等が発生し、その内の強い乱気流の発生した例では北北東~南南西に伸びる雲バンドの東約200~300kmで、⑥と⑦の特徴が重なったところで発生していた(写真16)。霧域の明瞭な境から推定される下層風のシアアと雲バンドの前面の強い南西風が重要であると推測される。残りの2例は弱い乱気流であった。⑥及び⑦での乱気流等の発生は函館空港の特徴と考えられる。ただし⑥及び⑦単独では弱い乱気流等しか発生していない。

特徴がない雲域又は晴天域での低層乱気流発生は10例と多かったが、弱いものが多く並の低層乱気流は1例のみであった。その並の低層乱気流の例では渡島半島の陸地とその東海上のやや厚い下層雲域と津軽海峡の晴天域との境界付近で発生していた。

乱気流発生時の筋状雲の特徴

前述したように筋状雲では乱気流が3例(その内2例は並の乱気流)発生していたが、冬期には筋状雲が頻繁に発生するので、それだけでは低層乱気流等の指標とはならない。そこで並の乱気流発生時の筋状雲に特徴がないかどうか調べた。

1987年12月11日の例(写真10)では、北側の筋状雲と南側の弱い筋状雲の間の東西に伸びる相対的に太く活発な対流雲列が南下しながら渡島半島を通過した。この対流雲列の通過時に乱気流が発生した。古屋(1989)によると、乱気流発生時頃の空港の地上風は風向の変動及び風速の変動が大きく、一方レーダー観測では渡島半島中部に対流性エコーが散在しているが、線状とは認識されていない。

もう1例の1988年2月7日の例では、日本海側は典型的な強い筋状雲パターンになっていた。又活発な対流雲列が渡島半島南東端から東南東に伸びていた。図4に乱気流の発生時前後の函館及び奥尻島を通る西北西から東南東の方向(筋状雲の走向の方向)のTBBの変化を示す。山の風下に当る奥尻島の東南東海上及び渡島半島の山の風下に当る函館付近でのTBBの変化を見ると、乱気流発生直前及び直後の17時40分及び18時40分では奥尻島の風下のTBBがやや高く、又函館付近はTBBが高く晴天となっている。それ以前の時刻ではこれらの所のTBBは相対的に低い。このTBBの変化と乱気流が関連している可能性が考えられる。

表3 函館空港における低層乱気流の発生時の雲の特徴
1986年7月～1988年8月

	低層乱気流等の発生時の雲の特徴	低層乱気流等の発生数					計	
		TURBULENCE			WIND SHEAR	LGT RA		
		SEV	MOD	LGT				
①	対流雲列または対流雲バンド		1	4	* 1		5	6
	雲バンドの南縁			1			1	
②	波状雲		1	2				3
③	筋状雲	渡島半島から東南東に活発な筋状雲が伸びる	1			1		3
		北側の弱い筋状雲と南側の極く弱い筋状雲の境界のやや活発な筋状雲の通過時	1					
④	低気圧に伴う雲域	まとまった雲域の北東部、又は北縁		2		1		4
		下層雲域の北東縁		1				
⑤	雲バンドの南東100～200km			1	1			2
⑥	霧域の明瞭な境界	雲バンドの東200～300km	1			* 1		3
		霧域の境界の延長上			2			
	特徴のない雲域又は晴天		1	7	* 1	2		10
	計	1	6	19	* 4	4		31

*印は turbulence と重複して観測されている事を示す。
①～③及び④～⑥は図3の①～③及び④～⑥に対応する。

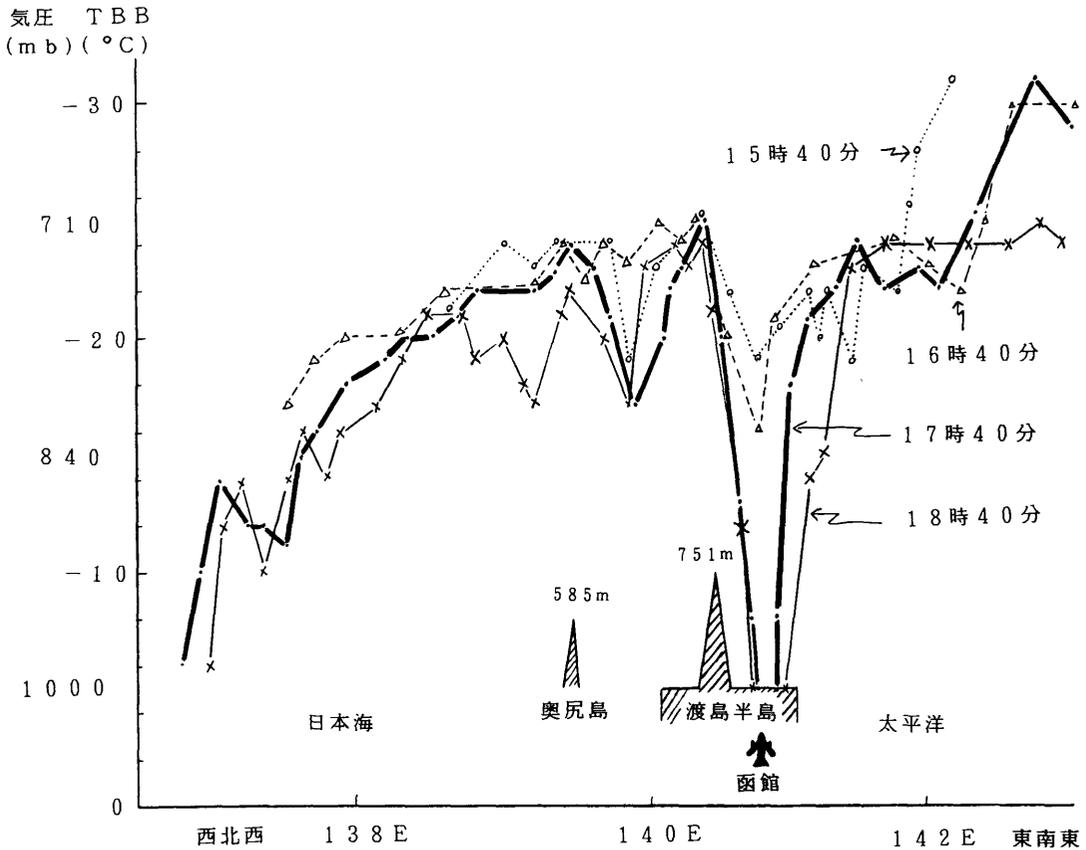


図4 奥尻島及び函館を通る西北西～東南東方向のTBBの時間変化。函館空港で並みの乱気流が18時03分に発生した。札幌の高層観測データでTBBと同じ気温を示す高度を気圧で示した。

3.3 仙台空港

仙台空港における乱気流発生時の雲の特徴を表4に模式図を図5に示す。鈴木・加藤(1989)によると乱気流は10月から4月にかけての期間にほとんどが発生し、又1987年6月から8月には乱気流は全く発生していない。従って表4及び図5は冬季についてのみの調査結果だが、ほぼ年間についての統計と見なせる。強い乱気流の発生はないが、1冬季期間に並みの乱気流が31例発生しており、他の空港での並み以上の乱気流等の発生数に比べ非常に多い。

表4及び図5の①(対流雲バンド)で弱い乱気流1例、③(寒気場のCuライン)で並の乱気流2例と弱い

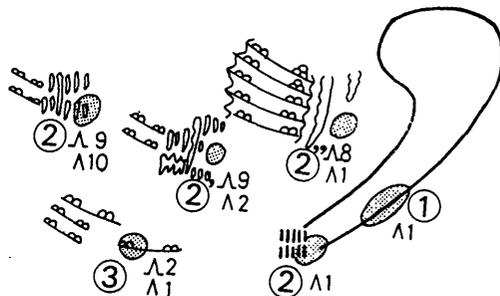


図5 仙台空港における乱気流等の発生位置の模式図。記号等は図3に同じ。

表4 仙台空港における低層乱気流発生時の雲の特徴
1987年11月1日～1988年3月31日

低層乱気流発生時の雲の特徴			低層乱気流の発生日数 (発 生 日 数)						
			並の低層乱気流			弱い低層乱気流			
①	対流雲バンド					1(1)			
②	波 状 雲 等	波状雲	日本海筋状雲	7(5)	9(6)	28(12)	10(2)	11(3)	16(3)
			対流雲バンド が波状雲化				1(1)		
			コンマ状雲の 頭の南西部	2(1)					
	②'	西側波状パターン		9(5)			2		
②''	山脈に沿う雲		8(2)		1				
	不 明*		2(1)		2				
③	寒気場の Cu ライン		2(7)			1(1)			
	特徴なし		1(1)			3(3)			
	合 計		31(15)			21(8)			

注1 ①～③は図5の①～③に対応するもの。

注2 乱気流の発生記録に強度のないものは、備考の内容で強度を分類した。「強い上下動」、「強い下降気流」及び「6000feet以下でLIG～MOD」は並の低層乱気流に分類した。又高度が2000feet以上のものは除外した。

注3 *印は低層乱気流発生時前後の衛星画像から「山脈に沿う雲」、「西側波状パターン」又は「波状雲」と推定されるが、低層乱気流の発生時に衛星の観測がなかった例。

注4 弱と並の低層乱気流が同じ日に発生した場合、並の低層乱気流の発生日数とした。

乱気流1例が発生していた。山岳波に関連すると思われる波状雲等(②、②'及び②'')の雲域で並の乱気流が28例、弱い乱気流が16例発生し、この雲パターンで全乱気流の85%、並みの乱気流の90%が発生していた。

波状雲等の雲域で乱気流の大部分が発生していたので、詳しく見るために波状雲等を次の3つに細分した。蔵王山より東側に波状雲がある場合を「波状雲」とする(②、写真8)。蔵王山以西で波状の形状をしており、蔵王山より東側に波状雲がない場合を「西側波状パターン」とする(②'、写真18)。その場合波状のパターンは不明瞭な場合が多く、又蔵王山の東側以外の太平洋側に波状雲がある場合が多い。奥羽山脈に沿って厚い雲がかかり、その直ぐ西側の山形盆地から米沢盆地

付近に晴天域が広がり、蔵王山より東側に波状雲がない場合を「山脈に沿う雲」とする(②'、写真17)。これらの3つの雲の推移は、擾乱通過後冬型になり、「山脈に沿う雲」、「西側波状パターン」、次に「波状雲」となる場合が多い。ただし明瞭な「山脈に沿う雲」のパターンになることは少ない。

「波状雲」、「西側波状パターン」及び「山脈に沿う雲」での並の乱気流の発生はそれぞれ9回、9回及び8回でほぼ同数であった。弱い乱気流は「波状雲」で多かった。発生日数は「波状雲」で最も多く9日、「西側波状パターン」で5日、「山脈に沿う雲」で2日であった。「山脈に沿う雲」での発生日2日の内の1日は、明瞭な「山脈に沿う雲」の出現時の1987年11月24日12

は1例で、その他は全て弱いものであった。強い低層乱気流が発生した例(写真5)では、不活発な雲バンドの南縁付近で、乱気流発生時の1.5時間前に南西から新潟の沿岸に細い対流雲列が伸びており、乱気流発生時の1.5時間後でもこの対流雲列は弱まったがほぼ同じ位置にあった。Down draftが発生した例では寒冷前線に対応する雲バンドの後面のCbラインの通過時に発生していた。雲バンドの南縁及び雲バンド内の下層雲域で4例の弱い乱気流等が発生していた。そのうち空港付近に対流雲列又はCbがない3例では、活発な対流雲列が佐渡島付近にあり、その南西50~100kmで発生していた。前線はその対流雲列付近に解析されている。残りの1例では佐渡島と新潟の間にCbらしき雲があった。

②(波状雲)では並みの乱気流が1例と弱い乱気流が1例発生していた。③(筋状雲)では並みの乱気流が1例のみの発生していた。その時の筋状雲はオープンセル状で、これが乱気流発生時の筋状雲の特徴である可能性が考えられる。④(小雲渦)で弱い乱気流1例が発生していた。

④(西北西~東南東に伸びる厚い雲バンドの北縁)では4例の乱気流が発生していた。そのうち強いものが1例(写真19)、並みのものが1例であった。この雲域では他の空港でも乱気流等が発生しているが、新潟空港での発生が最も顕著である。⑤(関東南岸の小規模な擾乱に伴う雲域の北西縁付近)では並みの乱気流が1例及び弱い乱気流が3例発生していた。並みの乱気流の例(写真20)では、前線上の関東南岸を東進する弱い低気圧に対応する上層雲のバルジとその南東側に積乱雲を持つ雲域があり、その後面に残された下層雲の北西縁付近で発生した。弱い乱気流の3例は、北上中の関東南岸の弱い熱帯低気圧に対応する雲域(同じ日に2例発生した)とその前日の同じ様な雲域(天気図では解析されていない)の北西縁付近で発生した。関東南岸の小規模な擾乱に伴う雲域の北西縁付近はその擾乱の影響範囲にあり、下層での東よりの風が推定される。関谷・渡辺(1989)は上記のうちの関東南岸の低気圧と関東南岸の弱い熱帯低気圧の時の2例を解析し、地上風は共に東よりの風である事を示し、又乱気流と「ダシ風」の関連を示唆している。④及び⑤での乱気流の発生は新潟空港の特徴と考えられる。

その他には、ボツ海湾付近の低気圧に対応する南北に立った発達したコマ状雲前面の晴天域で、弱い乱気流が1例発生していた。

3.5 羽田空港

羽田空港における乱気流等の発生時の雲の特徴を表6に、発生位置の模式図を図7に示す。3年間に発生した乱気流等は154例と非常に多いが、そのうち強いものは10例、並みのものは7例と並み以上の強度のものは少ない。

表6及び図7の①(低気圧に伴う雲域及び雲バンド)では36例の発生があった。それらのうち強度が強いものは3例、並みのものは1例であった。強いウィンドシャーの2例は雲バンドの北縁付近の対流雲列付近(写真4)及び低気圧中心付近にある南西から伸びるCb域のすぐ北側でそれぞれ発生していた。強いダウンウォッシュの例では、南岸付近を南西から北東に伸びる雲バンドが覆っており、東北地方の太平洋岸のややまとまった雲域から関東に下層雲が伸びているが、可視画像がないので詳細は不明である。並みの乱気流の例は雲バンドの中の対流雲列付近で発生したと推測できる(乱気流発生時の2時間前の画像では西南西から東北東に伸びる雲バンドが九州から東北中部を覆っていたが、関東平野は雲のない隙間になっていた。その隙間の中に明瞭な対流雲列が西南西から東北東に伸びていた。乱気流発生時の1時間後には可視画像がないので不確かであるがこの対流雲列は南岸まで南下したようである)。その他32例の弱いものがあつた。それらは低気圧に伴う雲域及び雲バンド内で発生したが、多くは明瞭な雲の特徴は認められなかった。

②(波状雲)では乱気流等が16例発生し、そのうち強度が強いものが2例、並みのものが1例であった。強いウィンドシャーの例では富士山付近から東京湾にかけて明瞭な波状雲が見られた(写真9)。その他の15

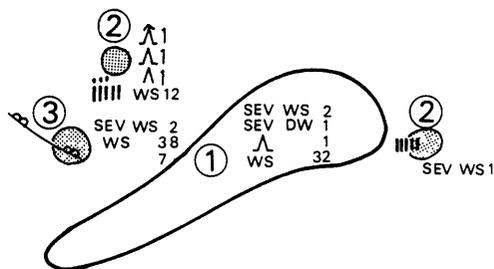


図7 羽田空港における乱気流等の発生位置の模式図。DWはダウンウォッシュを示す。その他の記号等は図3と同じ。

表6 羽田空港における低層乱気流等の発生時の雲の特徴
1984年4月～1987年3月

低層乱気流等の発生時の雲の特徴	TURBULENCE SEV MOD LGT	WIND SHEAR SEV MOD LGT *	UP DOWN DRAFT	DOWN WASH	TAIL WIND	MICRO BURST	DOWN BURST	ROUGH AIR	計
① 低気圧に伴う雲域 走 W-E 行 SE-NE		1	8						9(6)
	1	1	19	SEV 1					20(17) 7(7)
② 波状雲付近	1 1 1	1	12						16(15)
③ 寒気場の W-E Cuライン 走 WSW-ESE 行 WNW-ESE NW-SE		1	15	1		1	1		20(19)
		1	11						11(9)
		1	9	1	1				11(9)
		3	3	2					5(1)
Cb 周辺		1	7					3	11(0)
その他 下層雲域 (の Cu ライン) 晴天域 不明	1	1	5	1	1			1	9(7)
	2 2	1 1	25	1				1	1(0) 32(18) 2(2)
合計	3 5 2	6 2 1	119	3	5	1	1	5	154(111)

注1 ①～③は図7の①～③に対応する。

注2 例えば、1000ZにTURBULENCE 1010ZにWIND SHEARを観測した場合、同じ雲パターンでTURBULENCEが1例、WIND SHEARが1例と数えられている。乱気流等が観測された日数は98日である。

注3 「計」の欄の()内の数字は、地上風解析でシアラインが解析された例数。

注4 WIND SHEARの欄の*印は強度の報告(SEV MOD LGT)がなかった事例である。

例では伊豆半島から房総半島付近にかけて波状雲があったもので乱気流発生域とは離れている。それらの中で強い乱気流が発生した時の例を写真21に示す。これらの波状雲はほとんどが冬型のときに発生している。

③(寒気場のCbライン)では47例の乱気流等が発生していた。その内強いウィンドシアアは2例で、残りの45例は弱い乱気流等であった。強いウィンドシアアの2例の内の1例では東京湾を雲頂温度の比較的低いWNW-ESE走行の対流雲列が横切り(写真11)、もう1例では東京付近から東に述べる1部途切れた極弱く細い対流雲列があった(写真22)。

Cb周辺では11例発生していたが並みのウィンドシアアが1例で残りは全て弱いものであった。

下層雲域で並みのウィンドシアアが1例と弱い乱気流等が8例発生していた。その並みのウィンドシアアの例については可視画像がないので詳細は不明である。その他の弱い乱気流等については雲パターンに特徴が見られなかった。

台風周辺のCuライン付近で発生したと思われる並みの乱気流が1例あった。乱気流発生時の2時間前の画像では日本海中部に台風があり、南西海上から房総半島に長さ1000km以上のCuラインが伸びていた。その後乱気流発生時の4時間後まで衛星の観測がないので詳細は不明である。

晴天域での乱気流等の発生は32例と多かった。強度が強いものは3例で残りのものは弱いものであった。強い3例のうち2例は日本海に筋状雲があって、筋状雲の走行が西北西-東南東及び南南西-東北東の時に発生しており、2例の筋状雲の走行は異なっていた。もう1例は日本海の低気圧に対応する雲域前面で、関東北部の沿岸から南に伸びる下層雲域(下層雲域の西縁は対流雲列)の後面の晴天域で発生していた。その他の弱いものの大部分は冬型の気圧配置の時の晴天域で発生していた。

雲パターン不明の2例の並みの乱気流の内の1例は乱気流発生時頃の衛星画像がないものである。もう1例は寒気場内で、乱気流発生時の1時間40分前には晴天だったが、発生時の1時間20分後には東京湾を東西に横切る対流雲列があったものである。

並み以上の強度の乱気流等の発生時の雲の特徴をまとめると、17例の内10例は雲バンド内の対流雲列(2例)、低気圧の中心付近で南西から伸びるCb域のすぐ北(1例)、波状雲域の風下(1例)、波状雲域の北側(2例)、寒気場のCuライン(2例)、台風に入り込む

Cuライン(1例)及びCb周辺(1例)等の特徴ある雲域で発生していた。その他の7例は冬型時の晴天域で発生した3例及び画像がない等のため不明な4例である。

ここで扱った154例の乱気流等のうち111例は地上風の解析でシアアラインが解析されている(荒井(1987)。ここで分類した雲とシアアラインがどのように関連しているか、毎時観測がなされている1987年3月以降のデータについての詳細な解析によって明らかにする必要がある。

3.6 福岡空港

福岡空港における低層乱気流等の発生時の雲の特徴を表7に、発生位置の模式図を図8に示す。4年間に発生した全乱気流等の114例中並み以上のものは13例と少なく、ここで扱った乱気流はほとんどが弱いものである。

表7及び図8の①(低気圧に対応する雲域の中心付近又は南西部、東西に伸びる雲バンド内のCb付近、雲バンドの南縁及び雲バンドの延長上のCuライン)での乱気流等の発生は36例と最も多かったが、並みの乱気流等は3例と少なく、弱いものがほとんどであった。並みの乱気流はテイパリングクラウド(写真7)、不明瞭な対流雲列、及びコマ状の雲域の中の南から伸びるCb域のすぐ北側でそれぞれ発生していた。①で発生した弱い乱気流等については対流雲列等の特徴的な雲は認められないことが多かった。

②(波状雲)で並みの乱気流が1例発生していた。

③(筋状雲)では乱気流等が21例発生していたが全て弱いものであった。

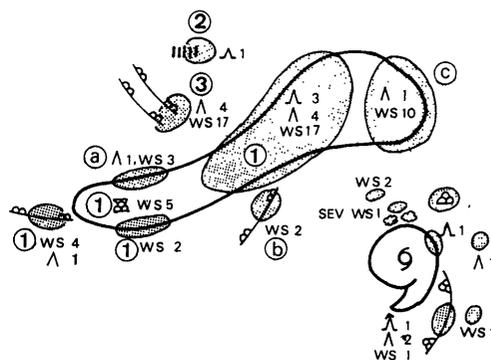


図8 福岡空港における乱気流等の発生位置の模式図。記号等は図3に同じ。

表7 福岡空港における低層乱気流等の発生時の雲の特徴
1984年9月～1988年8月

低層乱気流等の発生時の雲の特徴		TURBULENCE			WIND SHEAR			DOWN DRAFT	計	
		SEV	MOD	LGT	SEV	MOD	*			
①	低気圧に伴う雲域の中心付近又は南西部		3	4			17		24	36
	東西に伸びる雲バンド内のCb付近						5		5	
	東西に伸びる雲バンドの南縁付近						2		2	
	雲バンドの延長上のCuライン			1			4		5	
②	波状雲		1							1
③	筋状雲			4			17			21
a	東西に伸びる雲バンドの北縁		1				3			4
b	雲バンドに南から入り込むCuライン						2			2
c	低気圧に対応する雲域の東部又は南東部			1			10			11
台風	孤立したCb付近	1		1	1	1	7			11
	台風を取り囲むCb域の東縁		1						1	11
	台風周辺の対流雲列	1	2				2		5	
	台風周辺のCu又は晴天域			1	1		3		5	
	特徴なし			6			11	1		18
	計	2	8	18	2	1	84	1		114

注1 ①～③及びa～cは図8の①～③及びa～cに対応する。

注2 乱気流等の報告で高度が2000FT以上のもの、1000～7000FTのようなもの及び高度がないものは除外した。

注3 乱気流等のデータは可視画像のある08:00～16:00のみを対象とした。ただし、孤立したCbはIR画像だけで判断がつくので、全て対象にした(1985年1例、1986年3例)。

注4 表中のWIND SHEARにはDOWN WIND SHEAR及びTAIL WIND SHEARを含めた。*は強度の報告がなかったものを示す。

①(東西に伸びる雲バンドの北縁付近)では4例の発生があり、その内の1例は並みの乱気流で、残りの3例は弱いウィンドシアアであった。並みの乱気流の例では薄い雲バンドの北縁付近で発生しており、特徴的ではなかった。②(雲バンドに南西から入り込むCuライン)では2例の弱いウィンドシアアが発生してい

た。③(低気圧に伴う雲域の東部又は南東部)での発生も11例と少なくなかったが、全て弱いものであった。孤立したCb周辺では低層乱気流等が11例発生していた。そのうち強い低層乱気流が1例、強いウィンドシアアが1例、並みのウィンドシアアが1例、及び弱い乱気流等が8例であった。

台風周辺での乱気流等の発生は11例であった。その内強いもの2例、及び並みのもの3例で、並み以上の強度のものが多かった。強い乱気流の例は台風の南東象限の対流雲列付近(写真23)で発生していた。強いウィンドシアーの例(写真24)では台風の北側に曲線状に飛び飛びに並んだCbの北約20kmの晴天域で発生していた。この飛び飛びに並んだCbが強いウィンドシアーに関連しているように見える。並みの乱気流は台風を取り囲む活発な対流雲域の東縁付近で発生していた。

そのほか特徴のない雲域又は晴天域で18例の低層乱気流等の発生があったが、全て弱いものであった。

並み以上の強度の乱気流等の発生時の雲の特徴をまとめると、12例の内9例はテイパリングクラウド(1例)、南から伸びるCb域のすぐ北(1例)、波状雲域(1例)、台風を取り囲むCb域の縁(1例)、台風周辺の対流雲列(3例)及び孤立したCb周辺(2例)等の特徴ある雲域で発生していた。その他の3例は雲バンド内の不明瞭な対流雲列(1例)、台風の北側に曲線上に並んだCbの北西の晴天域(1例)および東西に伸びる雲バンドの北縁付近(1例)で発生していた。

4. まとめ

低層乱気流がどのような雲域で発生しているかを調べた。その結果並み以上の強度のものについては特徴ある雲域で発生している場合が多かった。それらは対流雲列、低気圧に伴う雲域の南縁、波状雲、筋状雲及び小雲渦等であった。千歳、函館、及び新潟の各空港では、乱気流等の発生時の雲の特徴がその空港に固有なもの又は顕著に見られるものがあつた。それらは、千歳空港では発達したコマ状雲の東側の上層雲域、函館空港では霧域の明瞭な境界付近及び雲バンドの前面100km~300km、新潟空港では西北西から東南東に伸びる雲バンドの北縁及び関東南岸の小規模な擾乱に対応する雲域の北西縁等であった。羽田空港では衛星画像から情報の得られない晴天域で全乱気流等の20%が発生していた。

以上のように各空港について低層乱気流等の発生時の雲の特徴がある程度明らかになった。従って低層乱気流等の監視及び予測の1つの資料として衛星画像は有効であると言える。ただし例数が少ないこと、1987年3月以前の乱気流等については衛星観測が3時間毎であるために低層乱気流等の発生時刻前後の詳細な解析がなされていないこと、又例えば頻繁にかかる筋状

雲での乱気流等の発生が数例しかないこと等から、ここで分類した雲の特徴には、低層乱気流等と関係のないものが含まれている可能性もある。今後例数を増やすと共に詳細な解析(例えばCuラインとシャーラインとの関係等)をすることによって低層乱気流等と雲の特徴との関係をより明確にする必要がある。

5. 謝辞

千歳、函館、新潟、仙台、羽田及び福岡の各航空気象官署から乱気流等の観測データを提供して頂いた。気象衛星センターの萩原武士解析課長、木場博之調査官、麻生正調査官から適切な助言を頂いた。深く感謝します。

参考文献

- 荒井 浄(1988):低層乱気流等・ウィンドシアー。昭和62年度航空気象予報技術検討会資料、187-202
 鈴木、加藤(1989):低層乱気流等・ウィンドシアー予測の可能性の検討。昭和63年度航空気象予報技術検討会資料、209-213
 関谷 亨、渡辺文弥(1989):低層乱気流等・ウィンドシアーについて。昭和63年度航空気象予報技術検討会資料、258-260
 古屋勝美(1989):低層乱気流等・ウィンドシアーについて。昭和63年度航空気象予報技術検討会資料、201-206

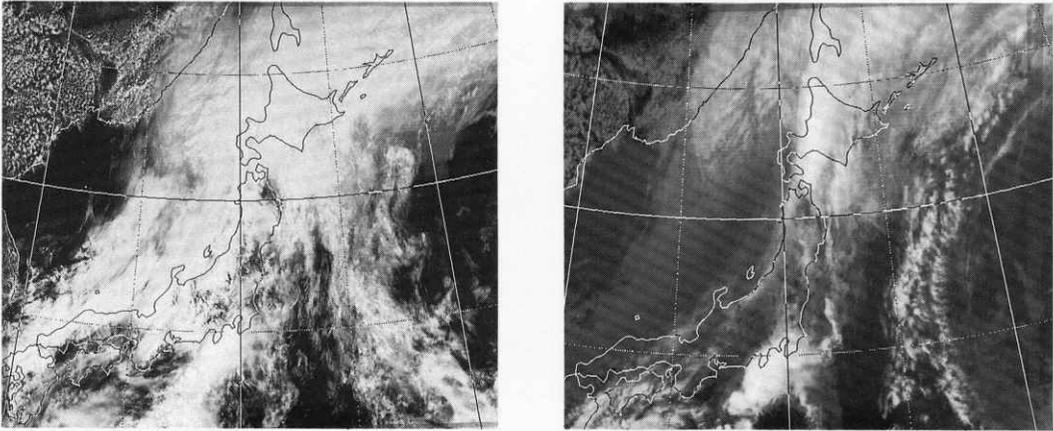


写真1 1987年5月3日11時40分の可視画像(左側)と赤外画像(右側)。雲の特徴の分類はフック付近の対流雲列(低気圧の中心付近)。

画像の観測時刻は日本付近の撮影時刻を示す。千歳空港で11時50分に強の乱気流が発生した。地上天気図では低気圧が発達しながら北北東ないし北東進し、09時には秋田付近、15時には浦河付近を通過した。写真では、この低気圧に対応する雲域のフックが渡島半島のすぐ西海上にあり、不明瞭だが対流雲列が東北の日本海側から北海道南部に伸びている。この対流雲列付近で乱気流が発生した。

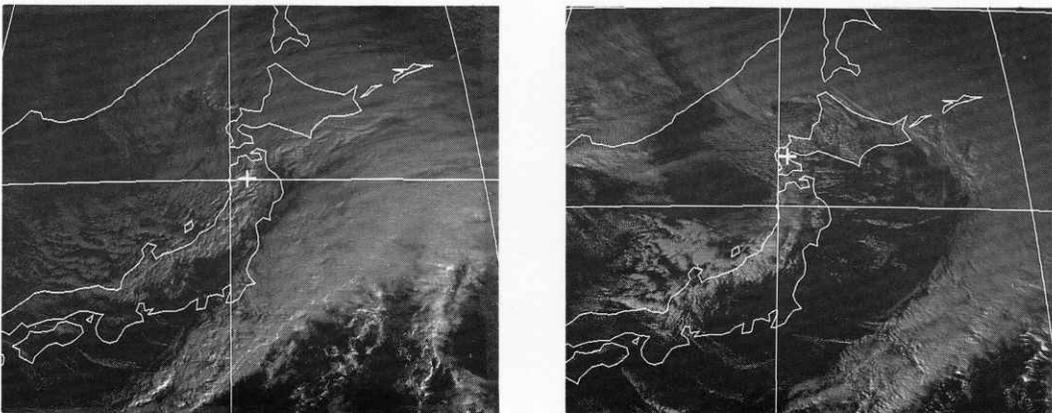


写真2 1987年1月8日08時40分の可視画像(左側)と14時40分の可視画像(右側)。雲の特徴の分類は雲バンドの南縁(閉塞前線)

千歳空港で09時28分に並みの乱気流が発生した。地上天気図では09時に日本海北部に低気圧があり、低気圧から閉塞前線が三陸沿岸の閉塞点に伸びている。15時には閉塞点は根室付近で低気圧として解析されている。写真の閉塞前線に対応する厚いバンドの南縁の移動を外挿すると、この厚い雲バンドの南縁付近の通過時に乱気流が発生した。尚11時40分には衛星観測がなされていない。

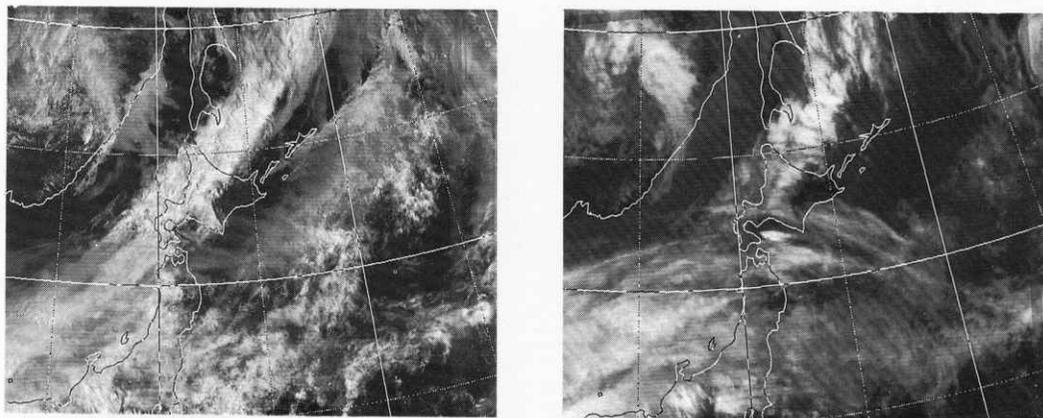


写真3 1987年5月13日8時40分の可視画像(左側)と赤外画像(右側)。雲の特徴の分類は対流雲列(寒冷前線)

千歳空港で10時00分に並みの乱気流が発生した。地上天気図ではオホーツク海北部にある低気圧から伸びる寒冷前線が09時頃に北海道南部にかかっている。写真では、この寒冷前線に対応する雲バンドの南縁に対流雲列があり、ゆっくり東進している。この対流雲列付近で乱気流が発生した。

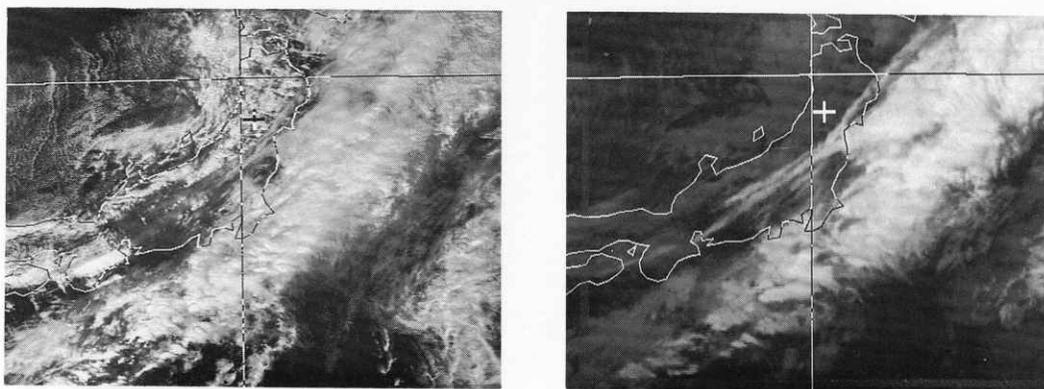


写真4 1986年10月22日11時40分可視画像(左側)と赤外画像(右側)。雲の特徴の分類は対流雲列(寒冷前線)

羽田空港で10時35分に強いウィンドシャーが発生した。09時の地上天気図では青森県の東海上に発達中の低気圧があり、低気圧から伸びる寒冷前線は関東付近を通り奄見大島付近に伸び、東進している。写真では活発な対流雲で構成されている雲バンドが関東南岸を西南西から北東に伸びている。この雲バンドの北縁付近の伊豆半島南西海上から伊豆半島南端を通り東京湾付近にかけて活発な対流雲列がある。さらに千葉市付近から北東に対流雲列が伸びており、内陸では不活発だが海上では雲頂温度が低く活発である。写真の3時間前の画像でも不明瞭な対流雲列が関東平野に見られるので、この対流雲列付近でウィンドシャーが発生したと推定できる。

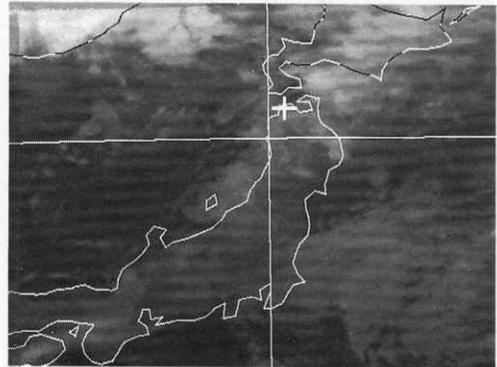
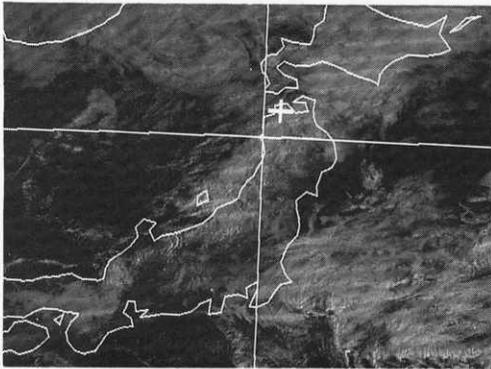


写真5 1987年2月23日08時40分の可視画像(左側)と赤外画像(右側)。雲の特徴の分類は対流雲列(寒冷前線)

新潟空港で10時15分に強い乱気流が発生した。9時の地上天気図では渡島半島西海上に低気圧が解析されているが前線は解析されていない。写真では日本海北部に雲渦がありその前面の北海道から佐渡付近に前線性の雲バンドが伸びている。この雲バンドの南西端の富山湾から新潟市付近に対流雲列が伸びている。3時間後の衛星画像でもこの対流雲列は弱まったがほぼ同じ位置に存在している。この対流雲列付近で乱気流が発生した。

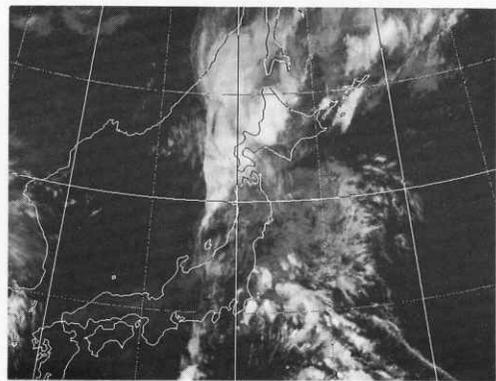
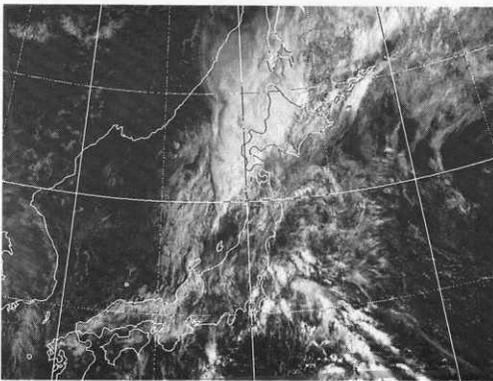


写真6 1988年8月26日08時40分の可視画像(左側)と赤外画像(右側)。雲の特徴の分類は対流雲列(停滞前線)

函館空港で8時50分に並みの乱気流が発生した。09時の地上天気図では能登半島付近から北北東にのびる停滞前線が解析されている。写真では、この前線に対応してCbバンドがあり、ゆっくり東進している。乱気流はこのCbバンド南縁付近で発生した。

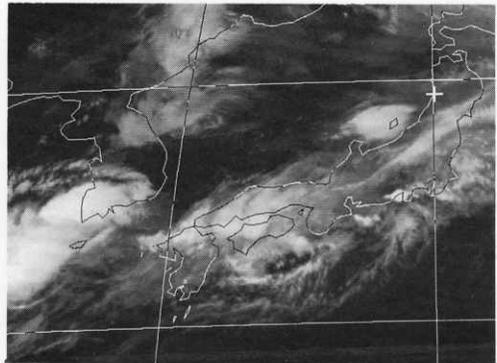
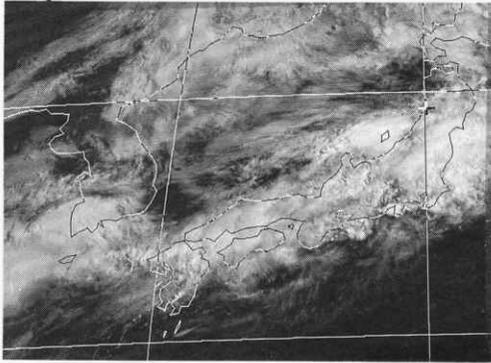


写真7 1986年7月15日08時40分の可視画像(左側)と赤外画像(右側)。雲の特徴の分類は対流雲列(停滞前線)

福岡空港で09時00分に並みの乱気流が発生した。09時の地上天気図では低気圧が鳥取の北の日本海南部にあり、停滞前線が低気圧から隠岐島付近、対馬付近を通り済州島の北に伸びている。写真では九州北部の西海上からティパリング状の非常に活発な積乱雲が瀬戸内海に伸びている。乱気流はこのティパリングクラウド付近で発生した。

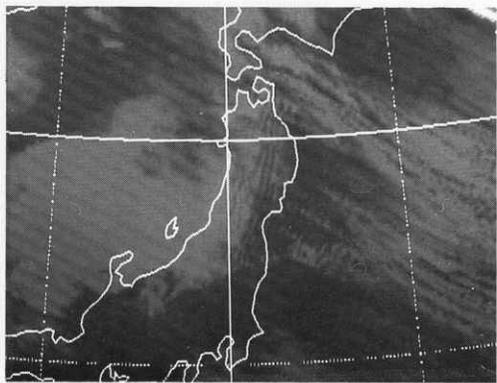
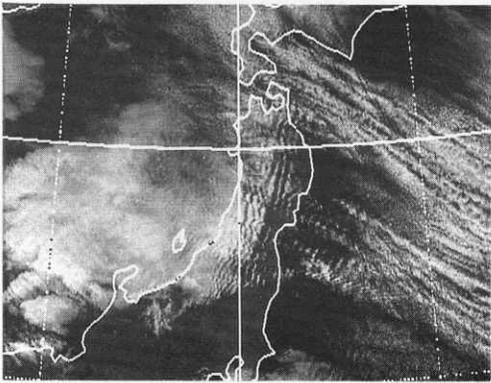


写真8 1987年11月25日11時40分の可視画像(左側)と赤外画像(右側)。雲の特徴の分類は波状雲。

仙台空港で09時00分から12時55分の間に低層でラフエアー、高度3000~5000フィートで並みの乱気流、及び高度6000フィート以下で並み以下の乱気流が発生した。又17時56分から18時03分の間に並みの低層乱気流及び7000フィート以下で弱い乱気流が発生した。衛星画像では前日の日本海の活発な筋状雲が次第に弱まり、又東北地方にかかる雲は「山脈に沿う雲」(写真17)から典型的な「波状雲」に変化した。この波状雲は日中持続した。典型的な波状雲域で高度7000フィート以下の乱気流が多発した。

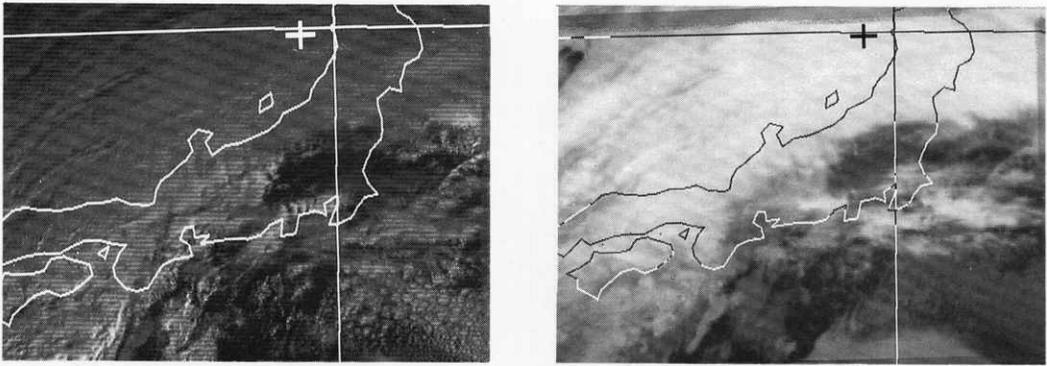


写真9 1984年12月18日08時40分の可視画像（左側）と赤外画像（右側）。雲の特徴の分類は波状雲。
羽田空港で08時45分に強いウィンドシアーが発生した。9時の地上天気図では紀伊半島に低気圧があって温暖前線が関東南岸に解析されている。写真ではこれらの低気圧に対応して関東平野を除き東北地方から西日本にかけて厚い雲域に覆われている。関東平野は晴天で関東南岸の雲頂温度の低い雲は上層雲で、その下に下層雲が散在している。その中で富士山付近から東京湾にかけて明瞭な波状雲が見られる。強いウィンドシアーはこの波状雲付近で発生した。尚この波状雲は可視画像のない05時40分の観測では存在が不明で、11時40分の観測では消滅している。

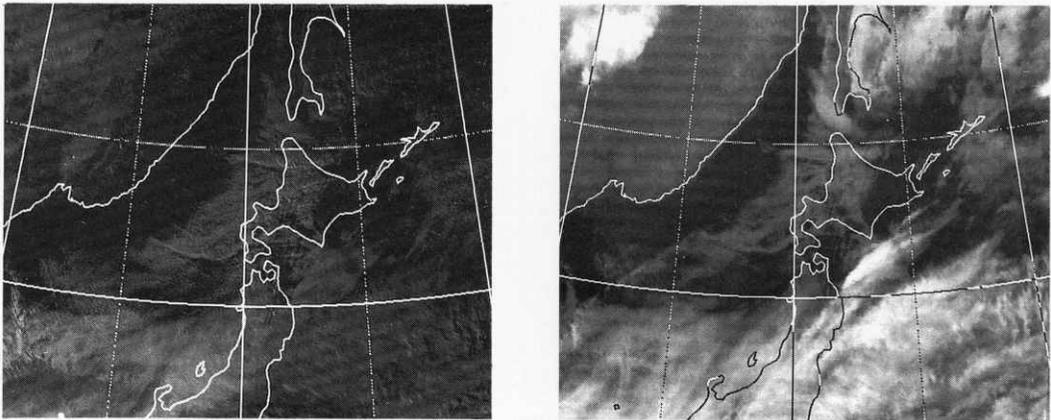


写真10 1987年12月11日14時40分の可視画像（左側）と赤外画像（右側）。雲の特徴の分類は筋状雲。
函館空港で15時57分に並みの乱気流が発生した。写真では、オホーツク海中部の低気圧に対応する雲域の後面にコンマ型雲とみられる雲域がオホーツク海南部にあつて東進している。この雲域の通過後北海道の西海上の日本海に筋状雲が発生した。写真では内浦湾から西に伸びている相対的に太い対流雲列がある。この相対的に太い対流雲列の南側では筋状雲は弱い。1時間毎の画像でこの対流雲列を追跡すると、この対流雲列は南下しており、乱気流発生時頃に函館空港にかかっていた。尚レーダー観測では対流性エコーが渡島半島に散在しているが、線状構造とは認識されていない。

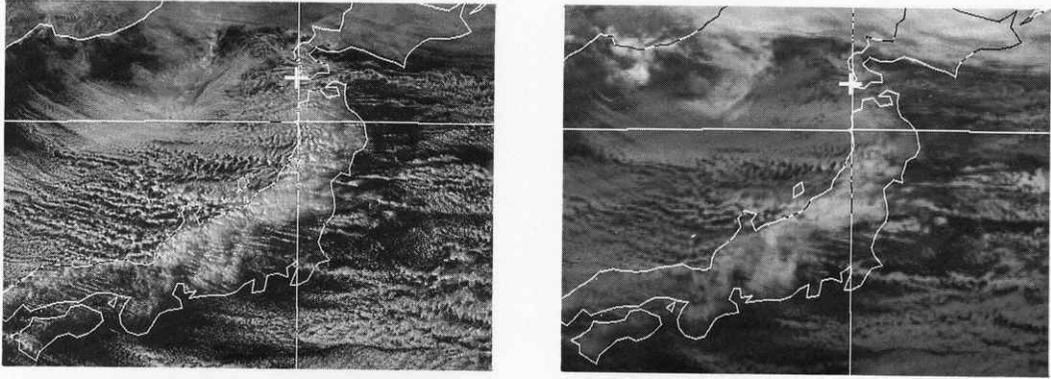


写真11 1985年2月22日14時40分の可視画像(左側)と赤外画像(右側)。雲の特徴の分類は寒気場の対流雲列。

羽田空港で14時17分に強いウィンドシアーが発生した。写真では、日本周辺は強い典型的な筋状雲となっており、東北から近畿地方にかけて雲頂温度が低く活発である。太平洋側にも対流雲列があり、その内のやや活発なものが東京湾北部を横切っている。写真に示した時間の前後3時間の観測でもこの対流雲列はあるが、写真に示した時間のものが最も明瞭である。この対流雲列付近で強いウィンドシアーが発生した。

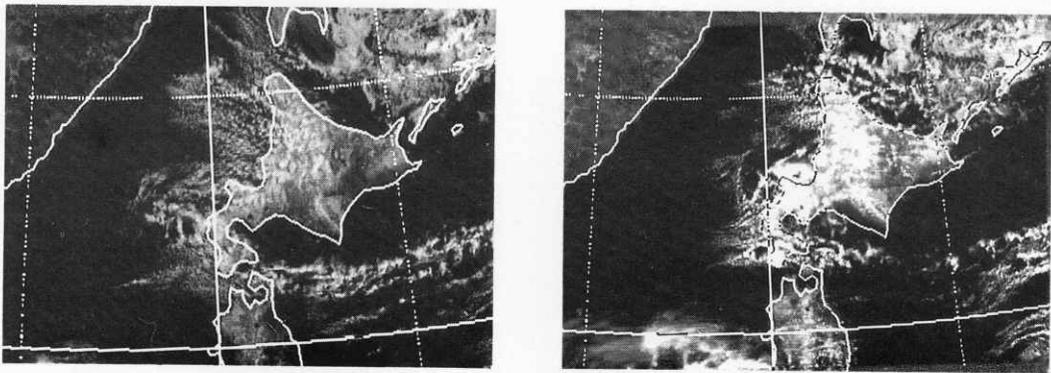


写真12 1987年3月27日08時40分の可視画像(左側)と11時40分の可視画像(右側)。雲の特徴の分類は小雲渦。

千歳空港で10時15分に並みの乱気流が発生した。写真では、北海道西の日本海に極弱い筋状雲があり、その中で08時40分の画像では渡島半島のすぐ西海上に、11時40分の画像では石狩湾付近に下層雲の小雲渦がある。この小雲渦周辺で乱気流が発生した。

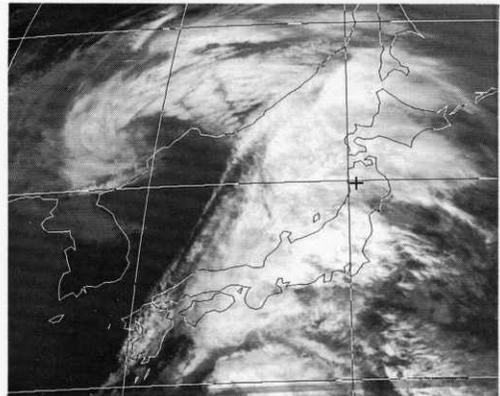
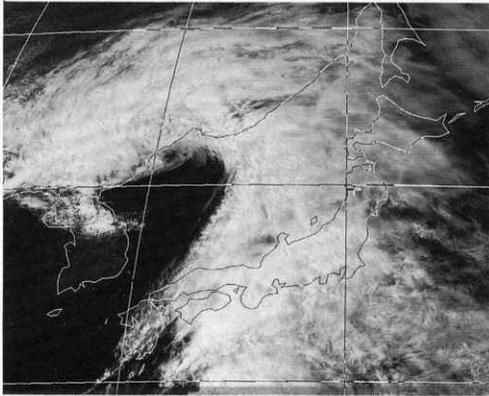


写真13 1986年5月14日14時40分の可視画像(左側)と赤外面像(右側)。雲の特徴の分類はコマ状雲前面の上層雲域。

千歳空港で14時58分に並みの乱気流が発生した。15時の地上天気図では沿海州南端付近に発達した低気圧がある。写真ではこの低気圧に対応して明瞭な発達したコマ状の厚い雲域がある。乱気流はこの厚い雲域の東側の上層雲域で発生した。

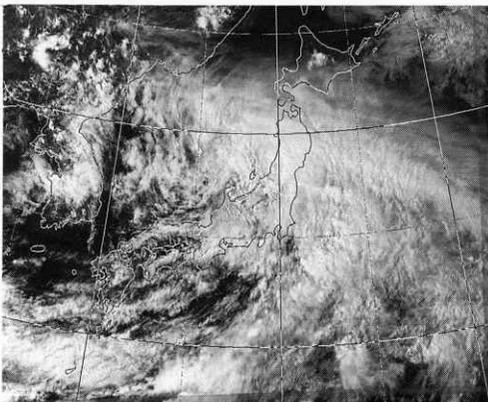


写真14 1987年6月20日14時40分の可視画像(左側)と赤外面像(右側)。雲の特徴の分類はコマ状雲前面の上層雲域。

千歳空港で15時40分に並みの乱気流が発生した。15時の地上天気図では日本海南西部に低気圧及び関東南岸に北東進している発達中の低気圧が解析されている。写真ではこれらの低気圧に対応して日本海南西部に下層雲の雲渦、関東南岸にフックがあり、それらの前面に厚い雲域が広がっている。乱気流はこの厚い雲域の北側の上層雲域で発生した。可視画像で千歳付近及びその南海上の下層雲は層雲又は霧である。

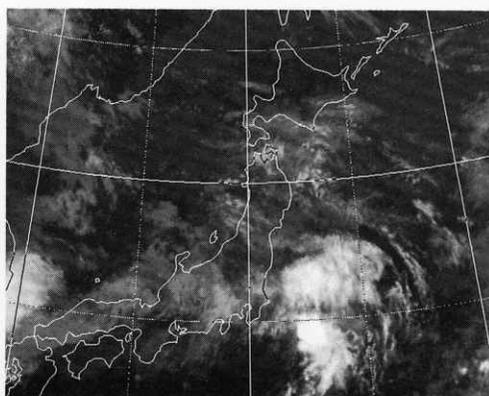
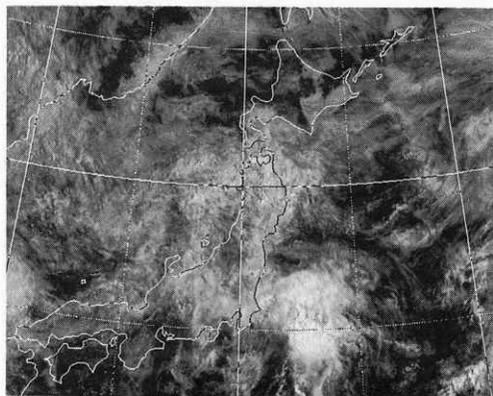


写真15 1988年7月17日08時40分の可視画像(左側)と赤外画像(右側)。雲の特徴の分類は擾乱に伴う下層雲域の北東縁

函館空港で8時56分に並みの乱気流が発生した。09時の地上天気図では能登半島の北西海上及び関東の南海上に低気圧が解析されている。写真では、これらの低気圧に対応して2つの雲渦が見られる。日本海の雲渦前面の東北地方には、積雲を含む下層雲域が広がっている。この雲域の北東縁は津軽海峡付近にある。レーダー観測では青森県に散在するCuが東西に伸びている。乱気流はあまり特徴的ではない下層雲域の北東縁付近で発生した。尚40N以北の薄い雲域は層雲または霧である。

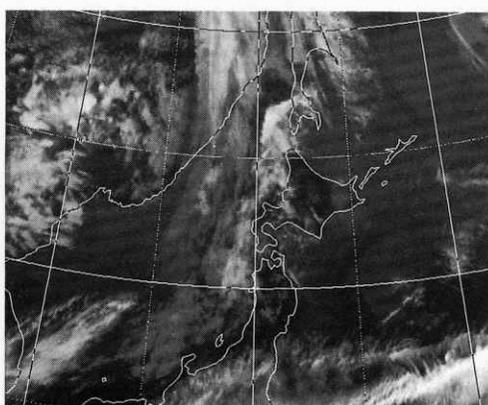
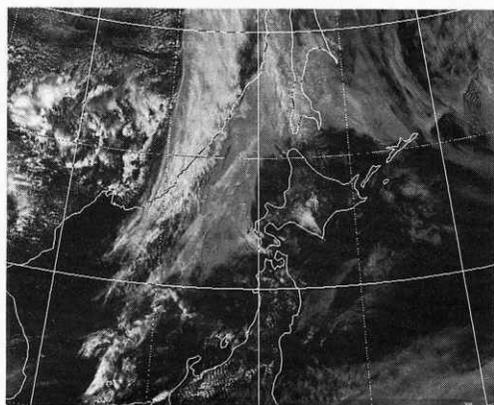


写真16 1988年5月1日14時40分の可視画像(左側)と17時40分の赤外画像(右側)。雲の特徴の分類は霧域の明瞭な境界

函館空港で17時25分に強い乱気流が発生した。写真では、寒冷前線に対応して沿海州から南南西に雲バンドが伸びており、東進している。14時40分の可視画像では、この雲バンド前面に霧又は層雲が広がっており、その明瞭な東縁が稚内から津軽海峡にある。17時40分の赤外画像では、雲バンド前面の北海道から東北地方の日本海沿岸に上層雲がかかって霧又は層雲は不明である。毎時の可視画像によると、霧又は層雲域に上層雲が重なり又日没の為不明瞭であるが、霧又は層雲が持続しており、極ゆっくり北東進していると推定される。乱気流は寒冷前線に対応する雲バンドの東側200~300kmの霧又は層雲域の明瞭な縁付近で発生したと推定される。

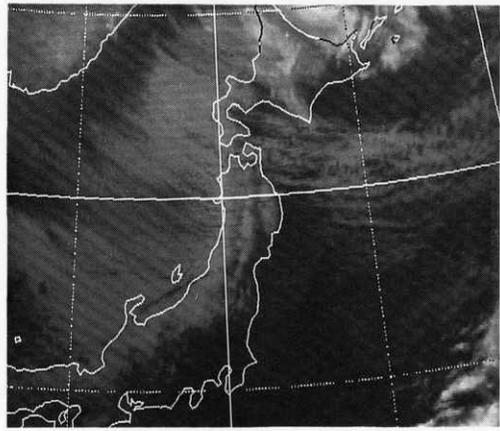
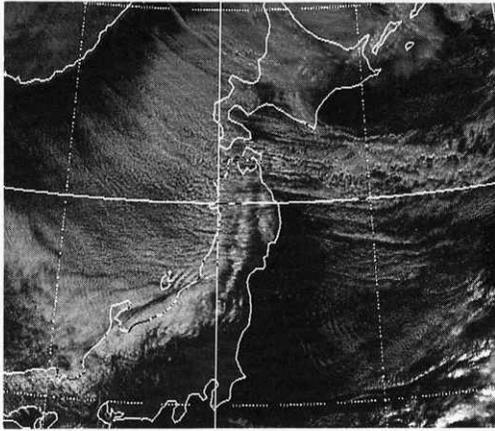


写真17 1987年11月24日11時40分の可視画像（左側）と赤外画像（右側）。雲の特徴の分類は「山脈に沿う雲」

仙台空港で12時39分から13時50分の間に3回、17時58分から18時50分の間に4回の並みの乱気流が発生した。15時の地上天気図では東進しながら急激に発達した低気圧がエトロフ島付近にあって、寒冷前線は日本の東海上に解析されている。衛星画像では寒冷前線に伴う対流雲バンドの通過後日本海に筋状雲が発生し、24日中では強い状態が続いた。奥羽山脈に沿って雲がかかり山脈の両側が晴天域となる「山脈に沿う雲」は9時頃から明瞭になり21時頃まで続いた。この「山脈に沿う雲」で乱気流が多発した。

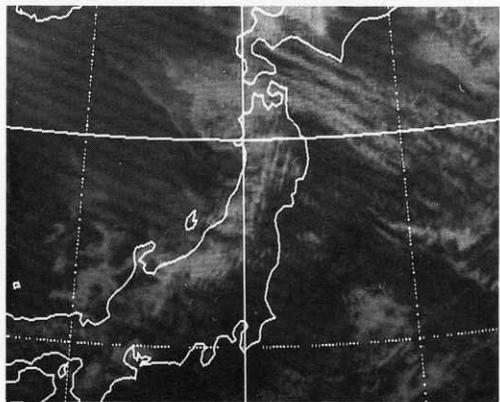
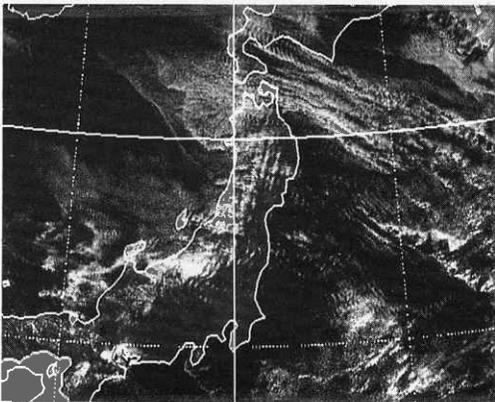


写真18 1987年11月22日11時40分の可視画像（左側）と赤外画像（右側）。雲の特徴の分類は「西側波状雲パターン」

仙台空港で11時37分から13時55分の間に並みの乱気流が4回発生した。衛星画像では寒冷前線に伴う雲バンドの通過後日本海には弱い筋状雲が発生した。03時頃から蔵王付近には不明瞭な「山脈に沿う雲」が形成され、11時頃には「山脈に沿う雲」から太平洋側は「波状雲」に変化した。宮城県付近には波状雲はない。日本海側でも不明瞭ながら波状になっている（「西側波状雲パターン」）。このような状態は日中持続した。この「西側波状雲パターン」で並みの乱気流が多発した。

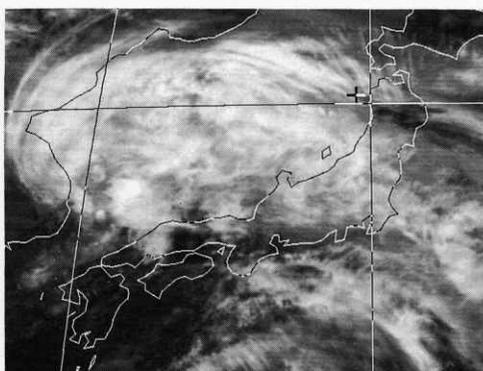
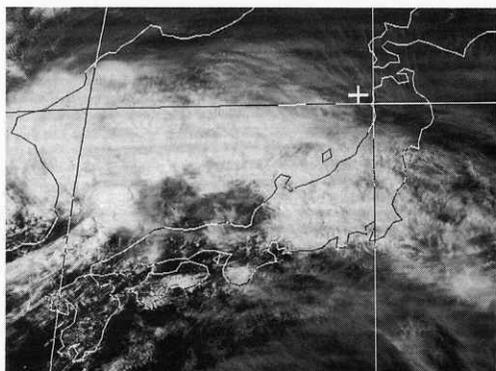


写真19 1983年4月28日14時40分の可視画像(左側)と赤外画像(右側)。雲の特徴の分類は雲バンドの北縁

新潟空港で14時15分に強の乱気流が発生した。9時の地上天気図では朝鮮半島の南西端の沿岸付近にキンクを持つ前線が東シナ海北部から中国地方西海上に解析されている。その後このキンクは東北東進し21時には日本海に低気圧として解析されている。写真では低気圧に対応する雲渦が朝鮮半島南東部の沿岸にあり、前線性の雲バンドが中部、関東地方を通過して日本のはるか東海上の低気圧に対応する雲渦に連なっている。乱気流はこの厚い雲バンドの北縁付近で発生した。尚東北地方南部の雲は中上層雲である。

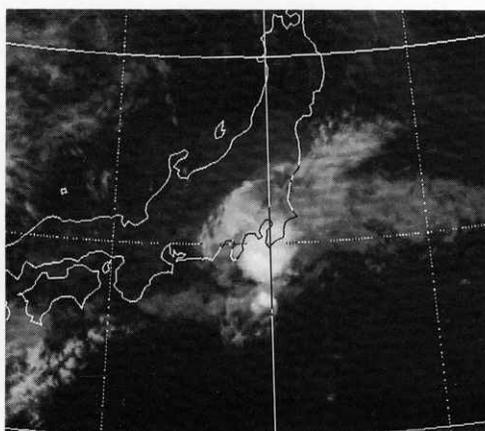
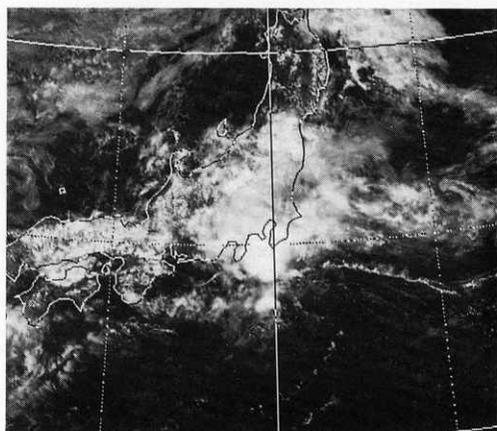


写真20 1987年8月23日11時40分の可視画像(左側)と赤外画像(右側)。雲の特徴の分類は小擾乱に伴う雲域の北西縁

新潟空港で12時05分に並みの乱気流が発生した。9時の地上天気図では東西に伸びる前線上を東進する低気圧が静岡付近に解析されている。写真では低気圧に対応して関東付近の上層雲のバルジがあり、関東南岸の活発な対流雲とともに東進している。この上層雲のバルジの後面の東北南部及び北陸地方に下層雲が残っている。乱気流はこの下層雲域の北縁付近で発生した。

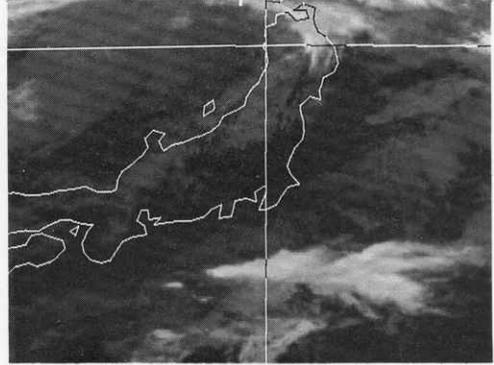
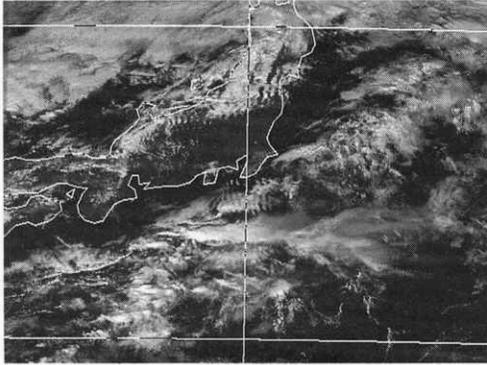


写真21 1985年11月23日11時40分の可視画像（左側）と赤外画像（右側）。雲の特徴の分類は波状雲周辺。

羽田空港で11時00分に強い乱気流が発生した。写真では寒冷前線に対応して40N147E付近から九州の東岸にかけてあまり組織的ではない下層雲が伸びている。その後面の伊豆大島の東側に波状雲があり、相模湾にも波状雲の崩れたような雲がある。後者の雲は08時40分の画像では波状であった。これらの波状雲が乱気流と関連している可能性が考えられる。

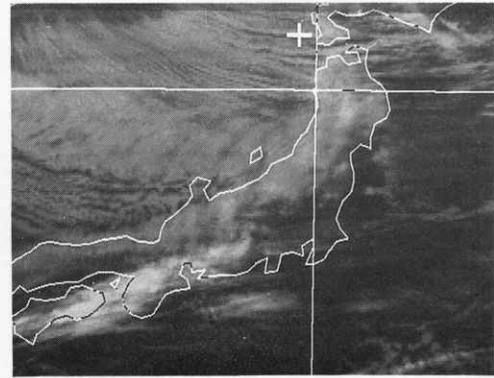
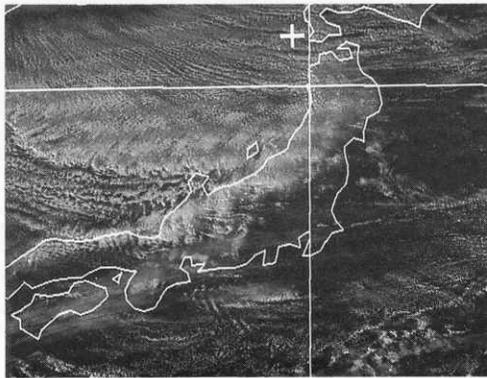


写真22 1985年1月16日14時40分の可視画像（左側）と赤外画像（右側）。雲の特徴の分類は寒気場の対流雲列。

羽田空港で15時02分に強いウィンドシアーが発生した。写真では発達した低気圧に対応する明瞭な雲渦が稚内の西海上にあり、日本海は強い典型的な筋状雲となっている。東京付近から東海上に伸びる一部途切れている細く弱い対流雲列がみられる。11時40分の画像ではこの対流雲列はなく17時40分の観測では可視画像がないので不明である。この細い対流雲列が強いウィンドシアーと関連している可能性が考えられる。

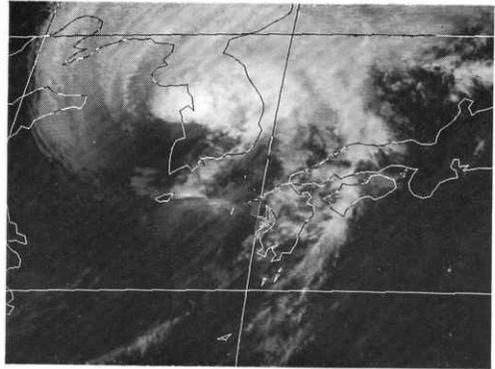
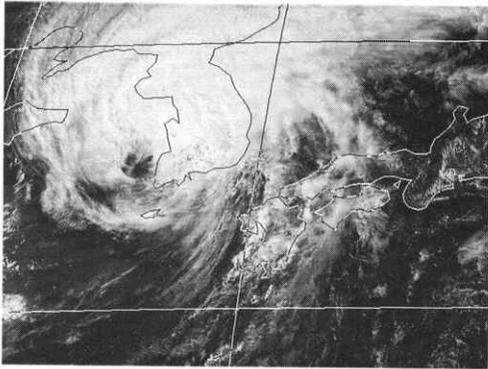


写真23 1986年8月28日14時40分の可視画像(左側)と赤外画像(右側)。雲の特徴の分類は台風周辺の対流雲列。

福岡空港で14時25分に並みの乱気流が発生した。写真では台風の雲渦が朝鮮半島西岸にあり、対流雲列が九州南西海上から福岡付近を通り台風の雲域に入り込んでいる。11時40分の画像ではこの対流雲列は対馬付近にあったもので、乱気流はこの対流雲列の通過時に発生した。

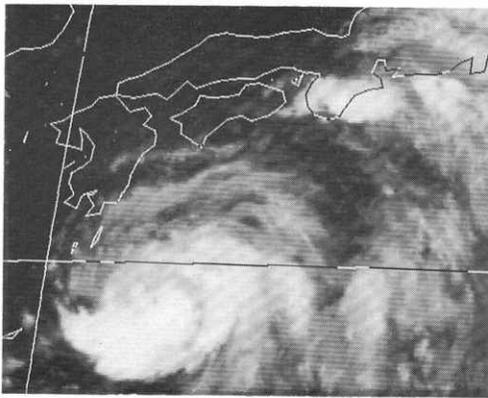


写真24 1985年8月6日14時40分の可視画像(左側)と17時40分赤外画像(右側)。雲の特徴の分類は台風周辺の晴天域(Cb列の北西)。

福岡空港で16時08分に強いウィンドシアーが発生した。写真では台風の眼が奄見大島の東北東約300kmに見られる。17時40分の画像では福岡市の南約20kmに積乱雲があり、ここから鳥取付近までの線上に積乱雲が点在している。14時40分の画像では九州、中国及び四国地方には積雲が散在している程度で、17時40分までの間に急激に発達した。福岡空港は上記積乱雲から離れており、ウィンドシアーがこの積乱雲と関連するか不明である。