

GMS 衛星雲圖所見混合切力與重力波雲系分析

吳宗堯 王時鼎 謝信良 洪理強

中央氣象局

摘要

本文係分兩部份。第一部份為就三次與鋒面相連之橫波雲之討論。由各層天氣圖及附近探空資料分析，認為該雲系係屬由 Kelvin and Helmholtz instability 所造成之混合切力與重力波 (mixed shearing-gravitational waves) 雲。惟實測波長較計算得出不穩定波臨界波長為長，可能與波之頻散 (dispersion) 有關。又該波狀雲可發現甚為穩定，此項現象並經討論。第二部份為颶風西側與盛行氣流垂直之橫波雲分析。該區氣流基本上與不連續鋒不同，應屬單一均勻氣團。但由氣流分析，顯有垂直風切，並由衛星圖分析，該區似有下沉作用，可能出現有溫度垂直降溫率之不連續區，故亦可允許混合切力重力波之存在。是以此處認為亦可能為類似 (apparent) 之混合切力重力波雲。

一、前言

藉氣象衛星資料分析與傳統資料分析之最大不同點為，由於氣象衛星為面之觀測及由於其解像度 (resolution) 之不斷增高，而使我們對大氣中之中小幅度系統之分析能力獲得無與倫比的進展。中央氣象局自建立衛星觀測站，並於民國 70 年 1 月 28 日正式開始作業以來，每日可接收 8 次之紅外線 GMS 雲圖及 3 次 (00Z, 03Z, 06Z) 之 GMS 可見光雲圖。下述對混合切力重力波分析主要則為根據本局所直接接收雲圖所作者。

二、鋒面區中所見混合切力重力波 (mixed shearing and gravitational waves 或簡稱 MSGN)

有關在鋒面上所見之混合切力重力波 (MSGW) 此處茲舉三例。

為便於討論，此處先將由 Kelvin 與 Helmholtz 不穩定度 (KHI) 所造成之混合切力與重力波之物理機制略作說明。現考慮在一密度與風速均為不連續的內面 (interface) 亦即鋒面上，假定上層之密度為 ρ' ，基流速度為 U' ，其下層之密度為

ρ 及基流為 U ，即可得出在其內面擾動之相速 C ，為 (Haltiner and Martin, 1957)：

$$C = \frac{\rho U + \rho' U'}{\rho + \rho'} \pm \sqrt{\frac{gL(\rho - \rho')}{2\pi(\rho + \rho')} \frac{\rho \rho' (U - U')^2}{(\rho + \rho')^2}} \dots\dots\dots(1)$$

上式中其他符號， L 為擾動波長， g 為重力加速度。上式第一項為移流項，第二項亦即擾動部份荷動力項。根號中第一項牽涉重力 (g) 及上下層之密度差 ($\rho - \rho'$) 所造成之效應，亦即重力波效應部份，第二項牽涉上下層之風變 ($U - U'$)，亦即切力波效應部份。前者使擾動趨於穩定 (如 $\rho' < \rho$)，後者即永為使擾動趨於不穩定。特別是如 C 為複數 (即 $C = C_r \pm iC_i$) 時，如此時波長， $L < L_c$ ，即將成不穩定波，亦即混合切力重力波 (mixed shearing-gravitational waves)。此處 L_c (臨界波長) 為：

$$L_c = \frac{2\pi}{g} \frac{\rho \rho' (U - U')^2}{(\rho - \rho') (\rho + \rho')} \dots\dots\dots(2)$$

或以溫度代替密度，得

$$L_c = \frac{2\pi}{g} \frac{(U - U')^2 T T'}{(T' - T)(T + T')} \dots\dots\dots(3)$$

在不連續面處，如 $\rho \neq \rho' \neq 0$ ， $u \neq u' \neq 0$ 理論上將有混合切力重力波存在，惟此項事實須波長

L 爲甚短，係屬中小幅度之波動。而僅能藉助氣象衛星資料之討論方有意義。有關此項波動，迄至現在止，就所知似均未見有藉衛星資料所作之討論。

(一)例一——時間：1981年12月2日及3日，所見之波係在巴士海峽及以南地區

1 圖 1 a, b 爲 2 日 06 Z 及 3 日 06 Z, GMS-1 可見光雲圖。

2 圖 2 a - e 各爲 2 日該混合切力重力波在巴士海峽期間之 (a) 00 Z 地面圖, (b) 12 Z 地面圖, (c) 12 Z 850 mb 圖, (d) 12 Z 700 mb 圖, 及 (e) 12 Z 500 mb 圖, 圖中混合切力重力波之區域以虛線範圍示出。其盛行風以箭頭表示, 附有點線區域表與下層風向爲相反者, 亦即示有風切存在。

3 圖 3 a - c 爲 2 日 00 Z 台灣之 (a) 桃園, (b) 馬公及 (c) 東港 400 mb 以下之探空屬性及高空風分佈。而此處經研判認爲沿 20°N 線以南 110°E 至 135°E 經線之間約寬 3 個緯度帶之條紋狀雲系, 即爲鋒面區中之混合切力重力波 (mixed shearing gravitational waves 或稱 MSGW), 理由爲:

(a) 由 2 日 00 Z, 12 Z (圖 2 a, b) 地面圖, 可見該雲系之前緣顯見有因寒潮高壓南下之鋒面存在, 而該項雲系係與鋒面相聯。

(b) 藉桃園 (圖 3 a), 馬公 (圖 3 b) 兩地探空屬性可見, 該兩地係在該項雲系區之北 (因該區主要在海面, 無探空資料), 亦即鋒面帶之北。但顯見無論其溫度 (密度) 與高空風分佈均滿足上述 Kelvin and Helmholtz instability 之條件, 即在內面 (interface) 上有風與溫度 (密度) 之不連續。由圖 2 a, b 可見「內面」之下爲東來風, 之上爲西來風, 顯有風之不連續 (公式 1), 又內面上下之溫度差均在 5 - 8°C 間, 亦即有明顯之溫度或密度不連續 (公式 1 或 3)。上述兩者亦即切力波與重力波產生之必要條件。而在本例係在鋒面上, 藉雲之存在而顯示出來, 兩條件同時滿足, 故稱混合切力重力波。又圖 2-c 爲東港探空, 因有中央山脈影響, 分佈較不規則, 雖其更接近該波狀雲, 但仍不作討論依據。

(c) 由 2 日 12 Z 各層天氣圖 (圖 2 b - e), 可見在該條狀雲之處, 700 mb 層及以下爲東來風, 以上爲西來風, 顯見有極明顯之風切存在。亦即就大範圍而言, 該雲區處均滿足上所述之條件。

(d) 審視圖 1 a - b 衛星雲圖可見: (1) 該雲條略與鋒面帶垂直 (參見圖 2 a - b), 其分佈甚見規則。(2) 其波長甚短, 平均略在 20 至 26 公里之間。(3) 配合上述圖 2 b - e 及圖 3 a - b, 可見該條狀雲係與風向量 (\vec{v}) 及風切向量 ($\frac{\partial \vec{v}}{\partial h}$) 略均爲垂直, 即此處條狀雲係略呈南北排列 (即波峯與波谷), 而風向量及風切向量爲近似東西向。(4) 藉圖可見該雲條顯受呂宋島南北向縱貫山脈影響, 由地面圖並可見主要屬層積雲。(5) 該雲條於 24 小時內明顯向南位移並變寬。

(二)例二——時間：1980年1月5日

本圖亦同例一, 主要波動即在台灣以南之海上。此處之資料包括:

1 圖 5 a - c 各爲 5 日 00 Z, 03 Z 與 06 Z 之可見光 GMS-1 衛星雲圖。

2 圖 6 a - d 各爲 5 日 (a) 00 Z 地面圖, (b) 12 Z 地面圖, (c) 12 Z 850 mb 圖, (d) 12 Z 700 mb 圖及 (e) 12 Z 500 mb 圖。圖中之說明同圖 2。

3 圖 7 爲 5 日 12 Z 馬公之探空屬性分佈。本例基本上略同例一, 惟切變層較低, 係在 700 mb 層以下 (見圖 6 d)。並由圖 5 a - c 可見, 6 小時內該 MSGW 位置均甚小變化, 波與鋒面略呈垂直, 並與風向量及風切向量平行。其波長略在 25 至 35 公里之間。由圖 7 在 MSGW 處顯可見有溫度與風之不連續, 此爲 MSGW 之必要條件。

(三)例三——時間：1981年12月18日

此處茲附該日 00 Z 與 03 Z 之 GMS-1 VIS 雲圖如圖 8 a - b。該日 00 Z 地面圖如圖 9 a, 12 Z 之地面圖, 850 mb 圖, 700 mb 圖及 500 mb 圖如圖 9 b - e。其說明同圖 2。

由圖 8 a 之衛星雲圖可見有兩處均出現有波狀雲。與鋒面有關者係在圖之東部。藉圖可見此 MSGW 雲區甚窄不及兩個緯度, 其波長略在 18 - 22 公里之間。另外與颱風有關之波狀雲, 將在下節述之。

由以上三例略可得下述之認識：

(a)由探空分佈所得溫度與風之垂直變化(圖2 a-b)以及大範圍天氣圖上所示條狀雲區之垂直風場變化及其分佈,可見在此情況均滿足混合切力重力波(MSGW)之存在條件。而復在衛星雲圖之鋒面區上顯見出現有在理論上與混合切力重力波形式其一致之波狀雲。故此處認為此即為大氣中出現之混合切力重力波。

(b)本項混合波,此處認為主要係由於進入低緯鋒面下層為東來風,而鋒面上方為西來風,即由於此項風切所造成之切力波(shearing wave)。最重要之理由,如主要為重力波,即波不必與風向量及風切向量垂直,亦即與鋒面垂直(鋒面為東西方向,風向量及風切向量亦為東西方向,見上討論)。此處茲舉由鋒面產生重力波一例,如圖4之衛星雲圖所示。我們認為圖中與鋒面平行且在鋒面之後之雲條即為「重力波」(詳細討論,非本文範圍)。該重力波向鋒後傳播,並漸消失於鋒面後約6個緯度之處。亦即此處所述鋒面處之「重力波」與上所述之「混合切力重力波」為垂直者。

(c)由公式1,2或3均可見,混合切力重力波之波長必須為短波,其波長須小於臨界波長(公式2或3)。此處經估計其波長略在20-25公里之間,而波浪雲(Billow cloud)亦係由切力作用造成,其波長係在1-2公里之間(Haurwitz, 1957),此項解像度非目前同步衛星能力所及。

(d)以上已述及此項波動主要為切力作用所造成,但此處稱混合切力重力波,此因該波存在之處,亦為有明顯逆溫之處,此亦為重力波存在之必要條件,故稱混合切力重力波。

(e)此處茲藉公式3,就例1馬公探空及高空風分佈(圖3),得 $U' - U = 9.7 \text{ m/s}$,鋒面上下之溫度各為 278°K , 284°K ,藉此所求得之臨界波長(L_c)約為3公里,略與Haurwitz(1941)所求得Billow雲波長相似。如考慮大氣之壓縮性,上述(3)式可寫為:

$$L_c = \frac{\pi}{2g} \Delta U^2 \frac{T + T'}{[(T' - T)^2 + \frac{\Delta U^2}{2g} (T' + T)^2 (\gamma_a - \gamma)]^{\frac{1}{2}}}$$

.....(4)

式中 γ 為降溫率,假定兩層中均相同。 γ_a 為乾絕熱降溫率,則臨界波長較(3)式所求得者將更短。而此處三例切力重力波之波長均約在20公里以上。關於此Abdullah(見Viezee et al, 1966)曾就頻散波(dispersive waves,因此處MSGW之移速為波長函數故為頻散波)之動態作過研究,渠認為波長可大於上述所算得者之10至100倍,因由於個別波與波羣(wave group)交互作用之結果。故上述所觀測之波長仍為合理。

(f)又本次各例,此MSGW波基本上均甚穩定,例如,例一者在24小時後仍存在。此想由於鋒面層上大氣有顯著逆溫而使MSGW波之能量被局限(trap)於逆溫層之下有關。洪秀雄(1982)曾引述Lindzen和Tung(1976)之研究,在某種有利條件下(上層有臨界層存在,即風速與內重力波之相速相等之處,且該處李查遜數小於1/4,則該層就會引起「超反射」,如此下面這一層就是極為良好之波導),內重力波,可久久而不消失。

三、與颱風有關之橫波雲

此處僅舉一例,時間為1981年12月18日,其圖例見以上已述及之圖8 a與b,及圖9 a-e(說明見圖2)。另圖10為馬公之探空屬性。該地與該橫波雲略距10個緯度。現先對該項波動雲系作一分析。首先由圖9 a-e可見,在18日00Z該颱風Kit中心氣壓為945mb(圖9 a),12Z減至960mb(圖9 b)。藉該兩圖均可見有冷空氣引入颱風中心,故在迅速減弱中。圖9 c 850 mb圖,氣流略與地面圖形式同。但至700 mb(圖9 d)顯見橫波雲處氣流已有別。圖中細點區域應屬西南風範圍。500 mb層(圖9 e)略同700 mb層。其次再審視衛星雲圖,藉圖可見該波狀雲係與風(\vec{V})及垂直風切($\frac{\partial \vec{V}}{\partial h}$)均為垂直,故此處稱橫波雲,其波長經估計亦約在20-25公里之間。現再看大氣穩定度情況,此處係以該日00Z馬

公者作參考(見圖 10)。因此項橫波雲係僅出現於颶風西方。該處下層氣流均來自北向,顯伴隨下沉氣流,因一般天氣均甚佳。由馬公探空可見,其上空有兩逆溫層。下層者並伴隨有風之不連續,而上層者風為連續,但伴有垂直風切。此處將釋述者,即只要水汽接近飽和,上述兩種情形均可產生切力波(shearing waves)雲。第一種下層所產生者為混合切力重力波(MSGW),係由於 Kelvin and Helmholtz instability(公式 1)所引起。第二種情形,Phillips and Walker(1932)之實驗(參見 Viezee, et al., 1966),及 Godske, et al., (1957)之理論討論認為均可能有切力波產生。如此項雲系係發生於有逆溫層之處,並更具重力波之性質,是可以稱 MSGW 雲。故在颶風西緣空氣如有沉降運動,即該項橫波雲之產生可作合理說明,亦係屬混合切力重力波。

注意,此處 Kit 颶風左方所產生之疑似(apparent)混合切力重力波,其特性基本上與上述三例在鋒面處產生者又為不同。鋒面處因為兩層不同氣團之交界處,均滿足混合切力重力波之條件,而颶風附近無該項氣團之不連續,但由以上文獻引述仍可有橫波雲存在。而該橫波雲顯有混合切力重力波(MSGW)之性質。

四、結 論

(一)此處三次個例出現於鋒面處且與鋒面帶垂直之波狀雲,經初步分析似係混合切力重力波所造成,該各例之天氣圖及探空資料分析均支持該項事實。惟所見波長大於計算之不穩定波存在之臨界波長,此或係由於頻散波效應之結果。又本類波動可發現其存在均相當穩定,此想與鋒面之上所見之穩定層有關。

(二)本文並另分析一項在颶風左側所見之橫波雲。該雲出現環境與上述出現於鋒面區者顯有不同。鋒面區基本上滿足 Kelvin and Helmholtz instability 條件,故可出現此混合切力重力波雲,而此處與颶風相聯者,因屬單一氣團,惟該處有垂直風切,因附近天氣甚佳空氣有下沉作用,推想亦有

穩定層存在,該雲系並均可見係與風向量(\vec{V})及垂直風切($\frac{\partial \vec{V}}{\partial h}$)相垂直,故可能亦為混合切力重力波所造成。

誌 謝

本項分析蒙趙友變先生整理分析原始資料,沈秀蓉小姐為洗印衛星雲圖,及黃榮宗先生負責繪圖工作,特此致謝。

參考文獻

- 1 Godske, C.L., et al., 1957: Dynamic meteorology and weather forecasting. The wavely press, Inc. p. 331.
- 2 Haltiner G.J. and F. L. Martin, 1957: Dynamic & physical meteorology P373-375.
- 3 Haurwitz, B. 1941: Dynamic meteorology. P.282 -288.
- 4 Viezee W., et al., 1966: Tiros-viewed jet stream cloud patterns in relation to wind, temperature, and turbulence. P1-51.
- 5 王時鼎: 衛星氣象學講義。
- 6 洪秀雄, 1982: 中範圍氣象理論模式之評介之三: 其他現象。P 363-364。中範圍天氣系統研討會論文集編, 中央氣象局出版。

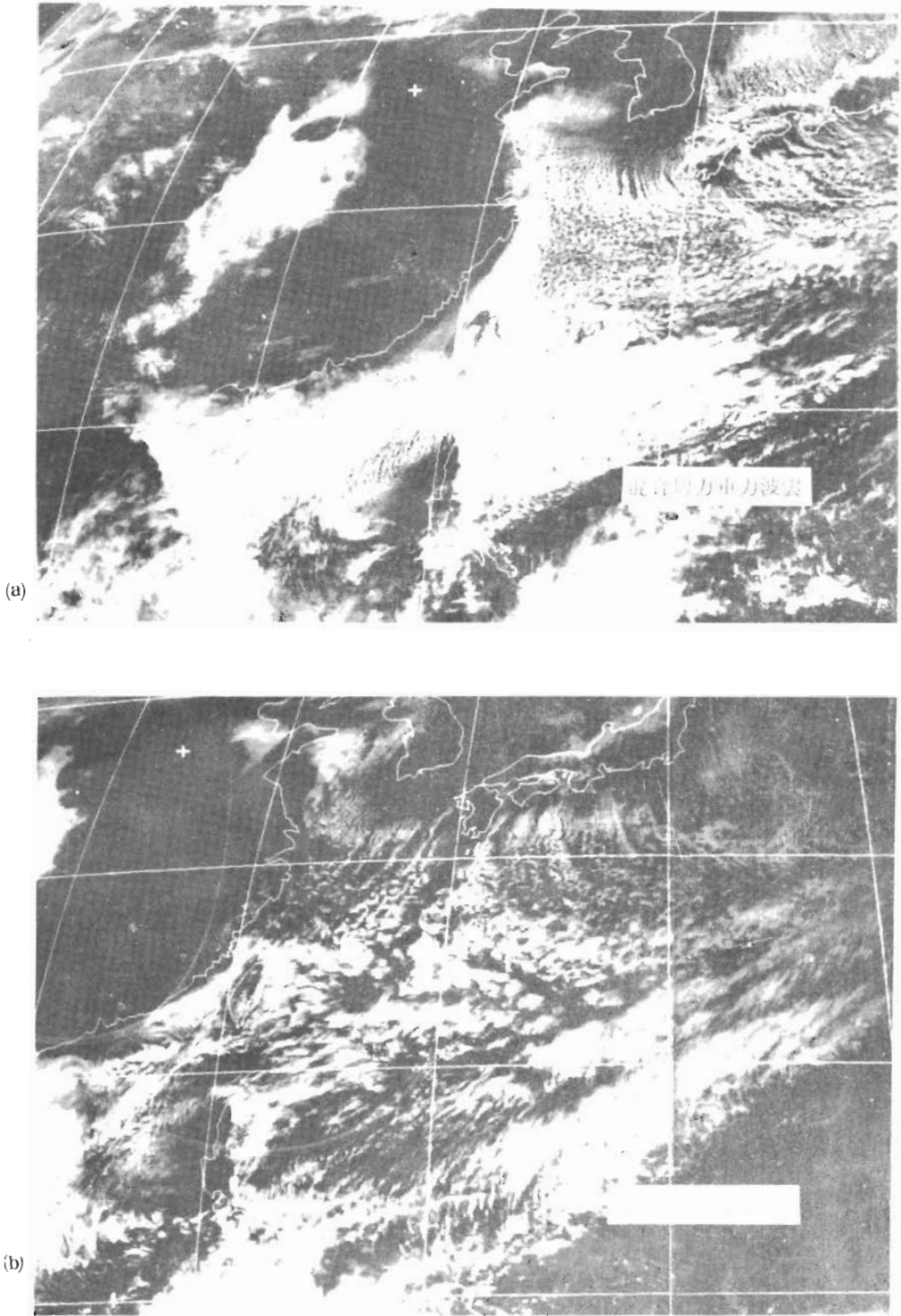


圖 1 1981 年 12 月 (a) 2 日 06 Z 及 (b) 3 日 06 Z GMS - 1 可見光 (VIS) 雲圖，示鋒面上混合切力重力波 (mixed shearing - gravitational waves, MSGW) 之存在。

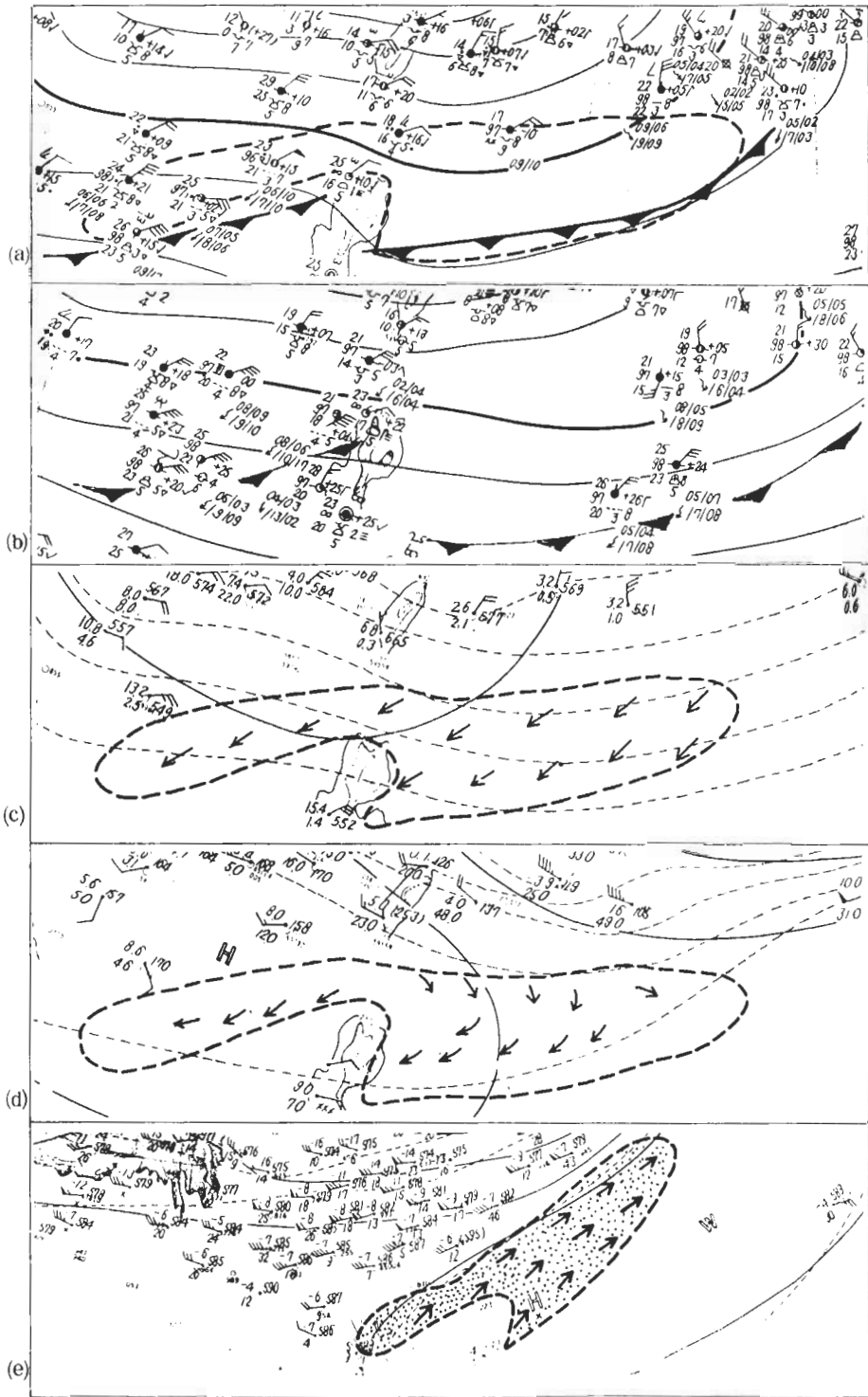


圖2 1981年12月2日當鋒面上混合切力重力波 (MSGW) 存在期間之天氣圖。(a) 00Z地面圖, (b) 12Z地面圖, (c) 850mb圖, (d) 700mb圖, (e) 500mb圖。該波存在處並特別以斷線區標出, 箭頭表盛行風, 點線區表上層風向相反之區域。

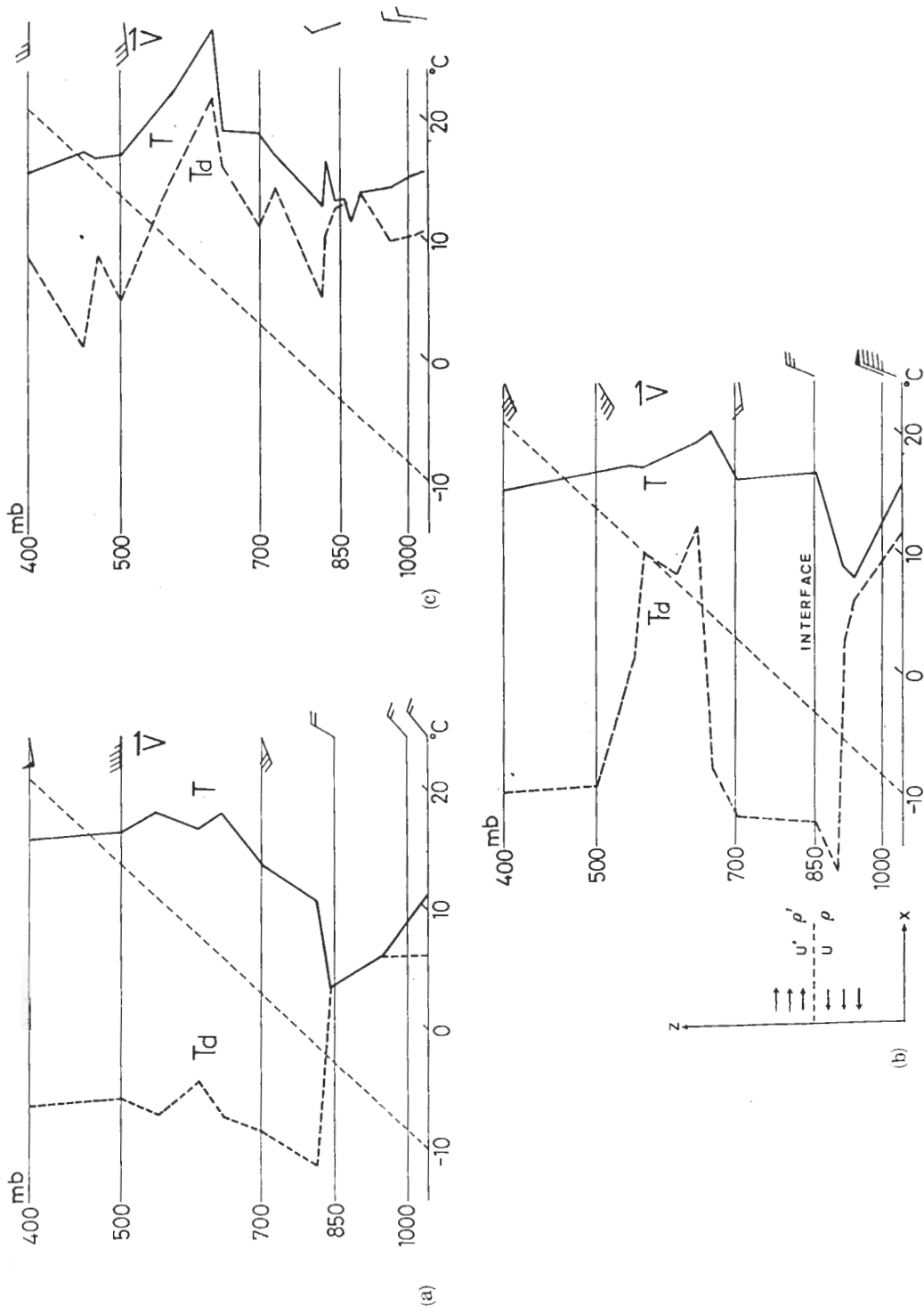


圖 3 1981 年 2 日 00 Z 該切力重力波出現時，台灣之 (a) 桃園，(b) 馬公，及 (c) 東港 400 mb 層以下探空屬性及其高空風分布。圖 (b) 中並附 MSGW 波基本流場模式圖。

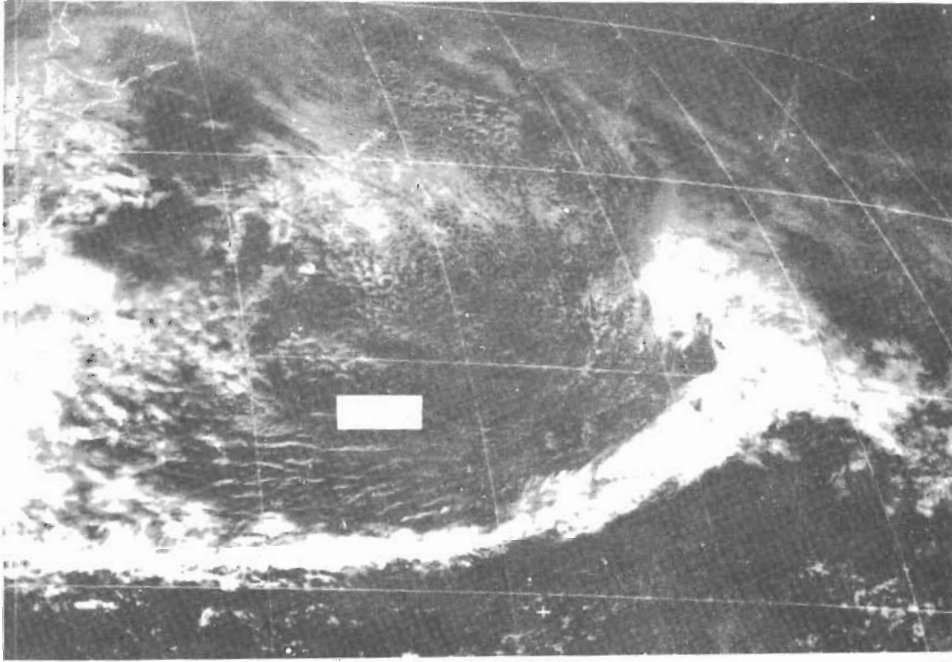


圖4 1982年1月4日03Z GMS-2可見光(VIS)雲圖,示平行於鋒面並向後方傳播之重力波雲。注意,鋒面上亦有MSGW雲系。

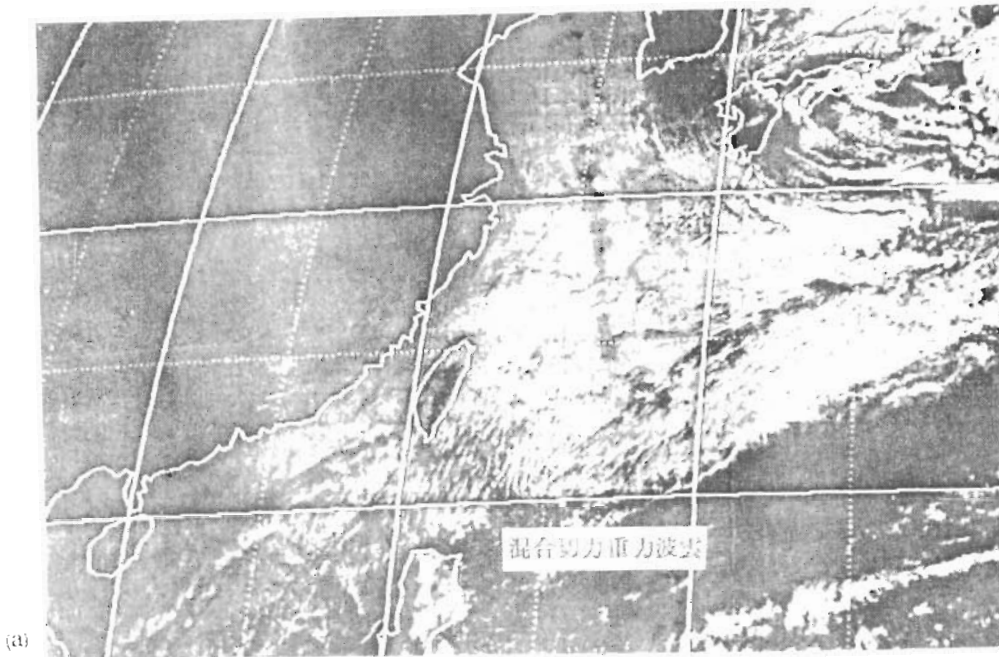
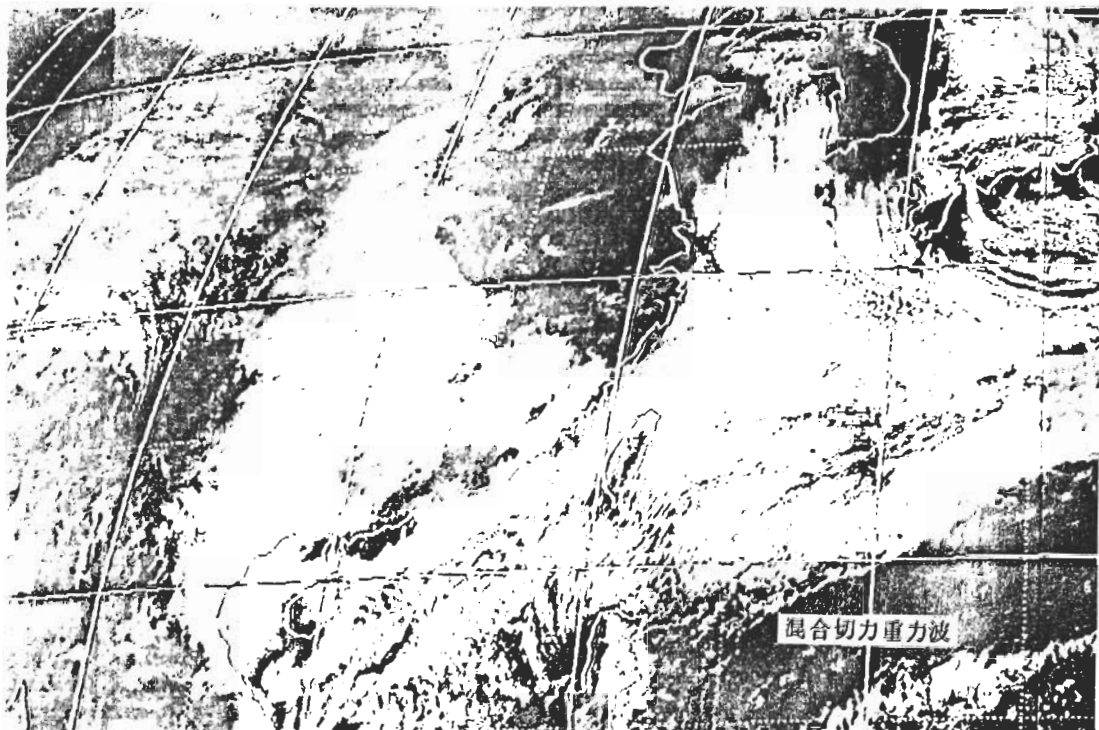
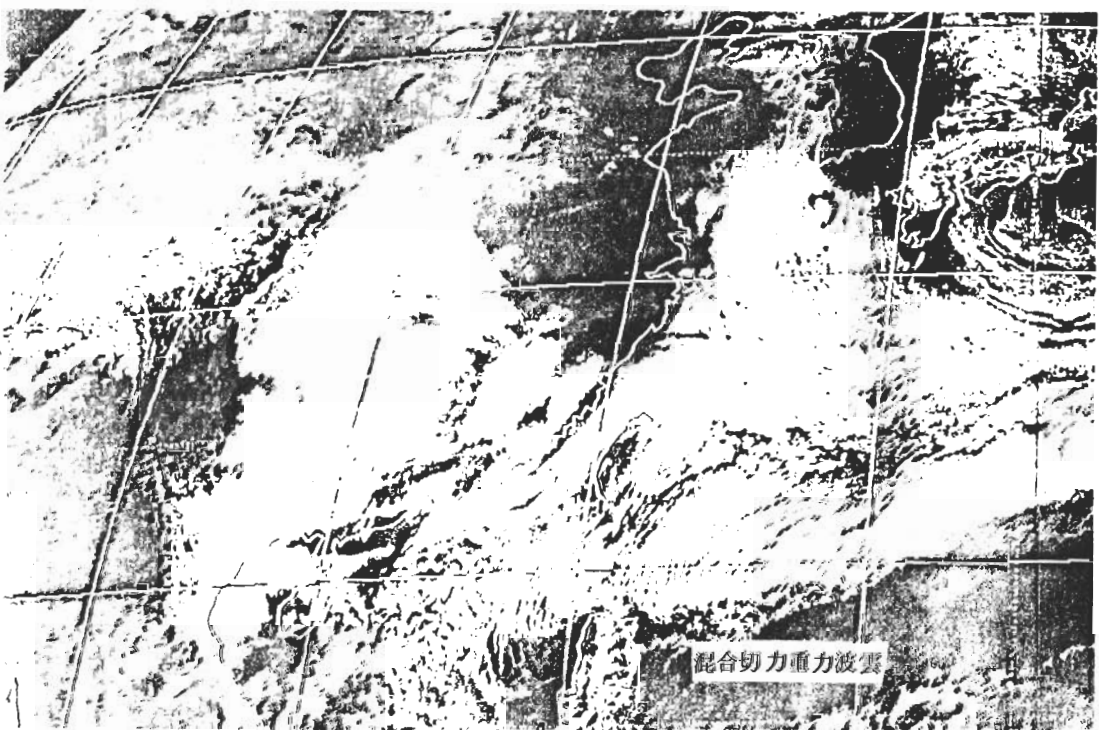


圖5 1980年1月5日,(a)00Z,(b)03Z及(c)06Z之可見光GMS-1衛星雲圖,標以示巴士海峽鋒面區上之混合切力重力波雲(MSGW)。



5(b)



5(c)

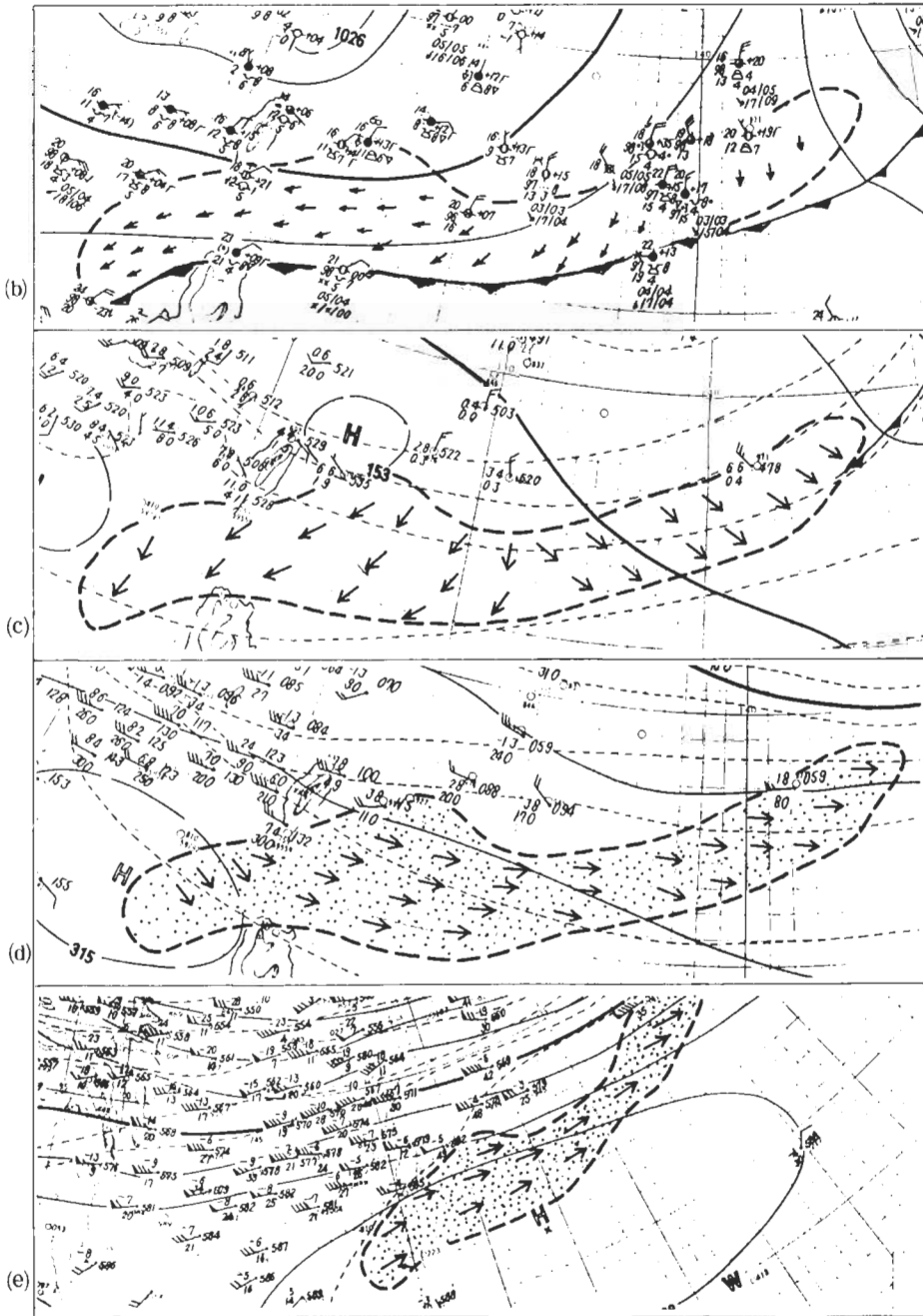


圖 6 1980 年 1 月 5 日 MSGW 雲出現時之(a) 00 Z 地面圖(略), (b) 12Z 地面圖, (c) 850 mb 圖, (d) 500mb, (e) 500mb 圖(說明見圖 2)。

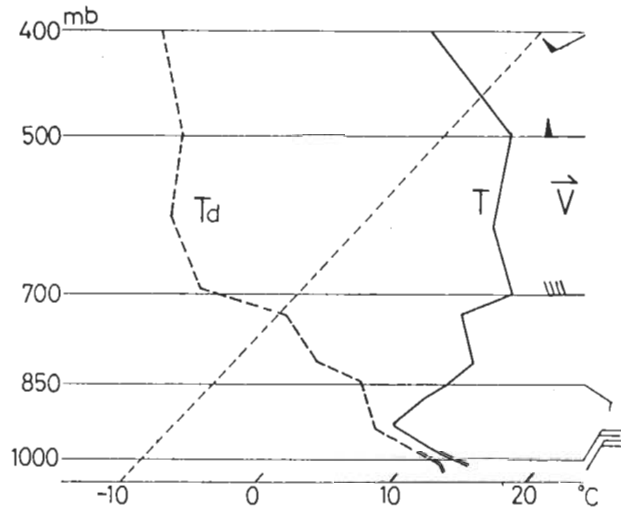


圖 7 1980 年 1 月 5 日 12 Z 馬公之探空屬性分佈。(c) 06 Z

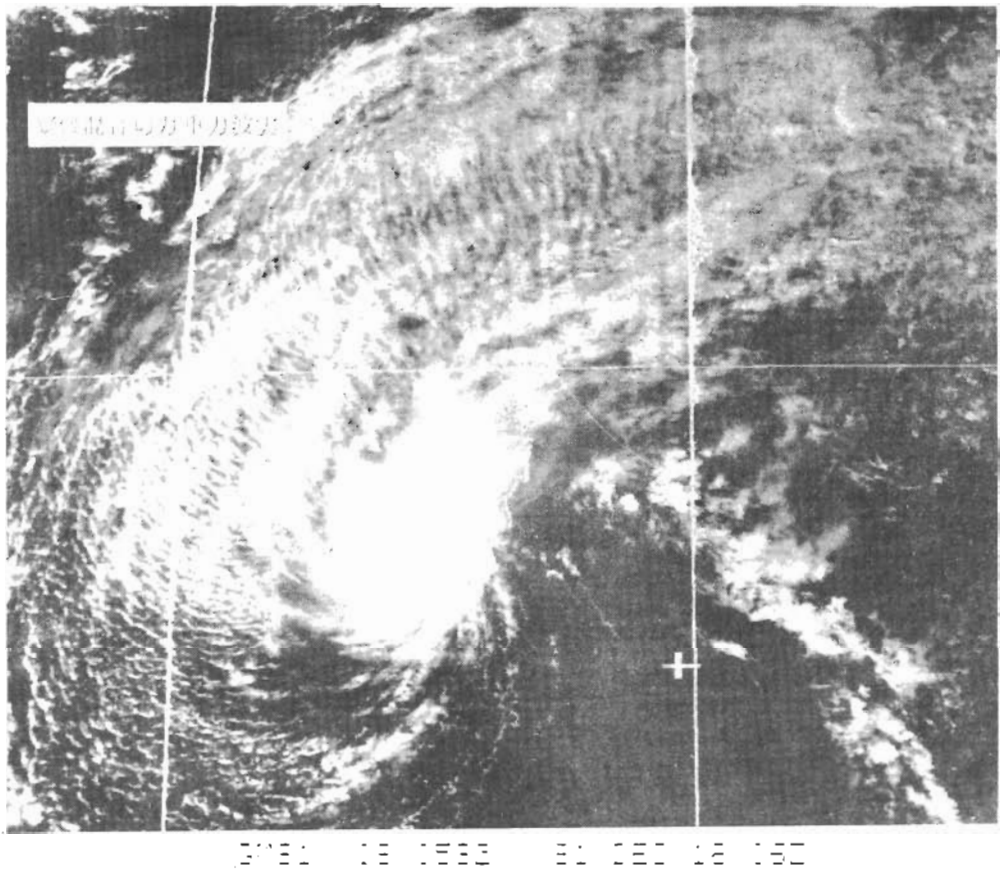
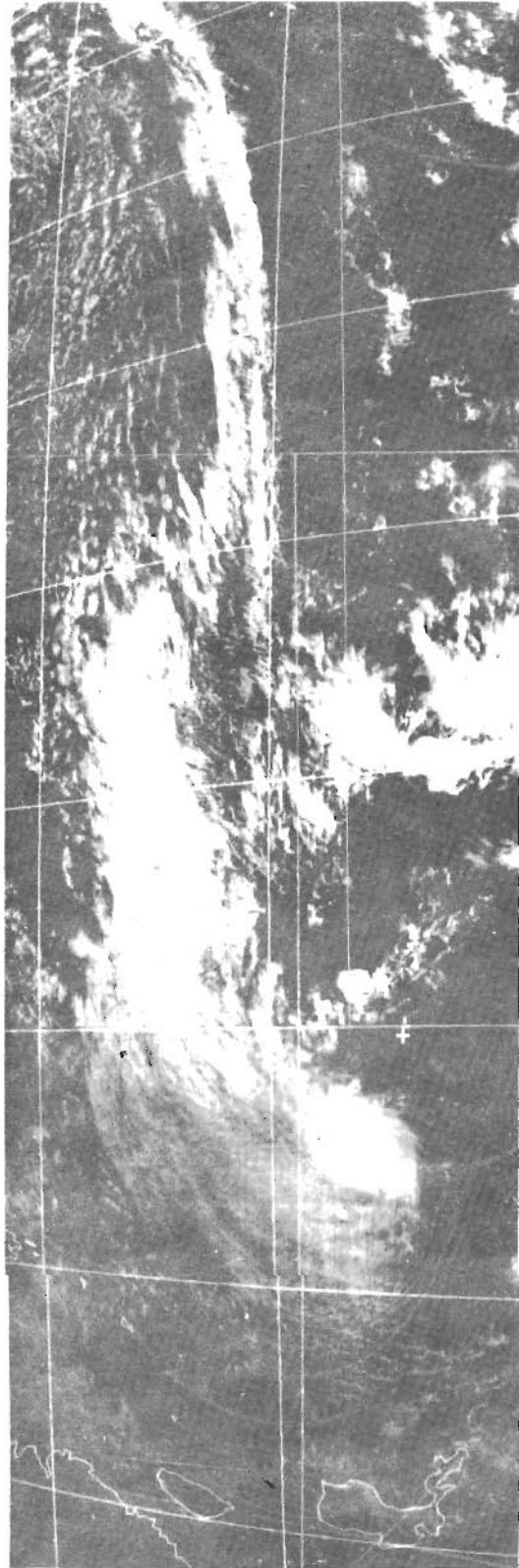


圖 8 c



圖中可見有低壓及波雲

8 b



8 a

圖 8 1981 年 12 月 18 日 (a) 00 Z, (b) 03 Z (C) 06 Z 之 GMS-1 衛星 VIS 雲圖。示颶風西側之橫波雲系。藉圖可見無論低雲與高雲 (卷雲) 中均可見有橫波雲存在。

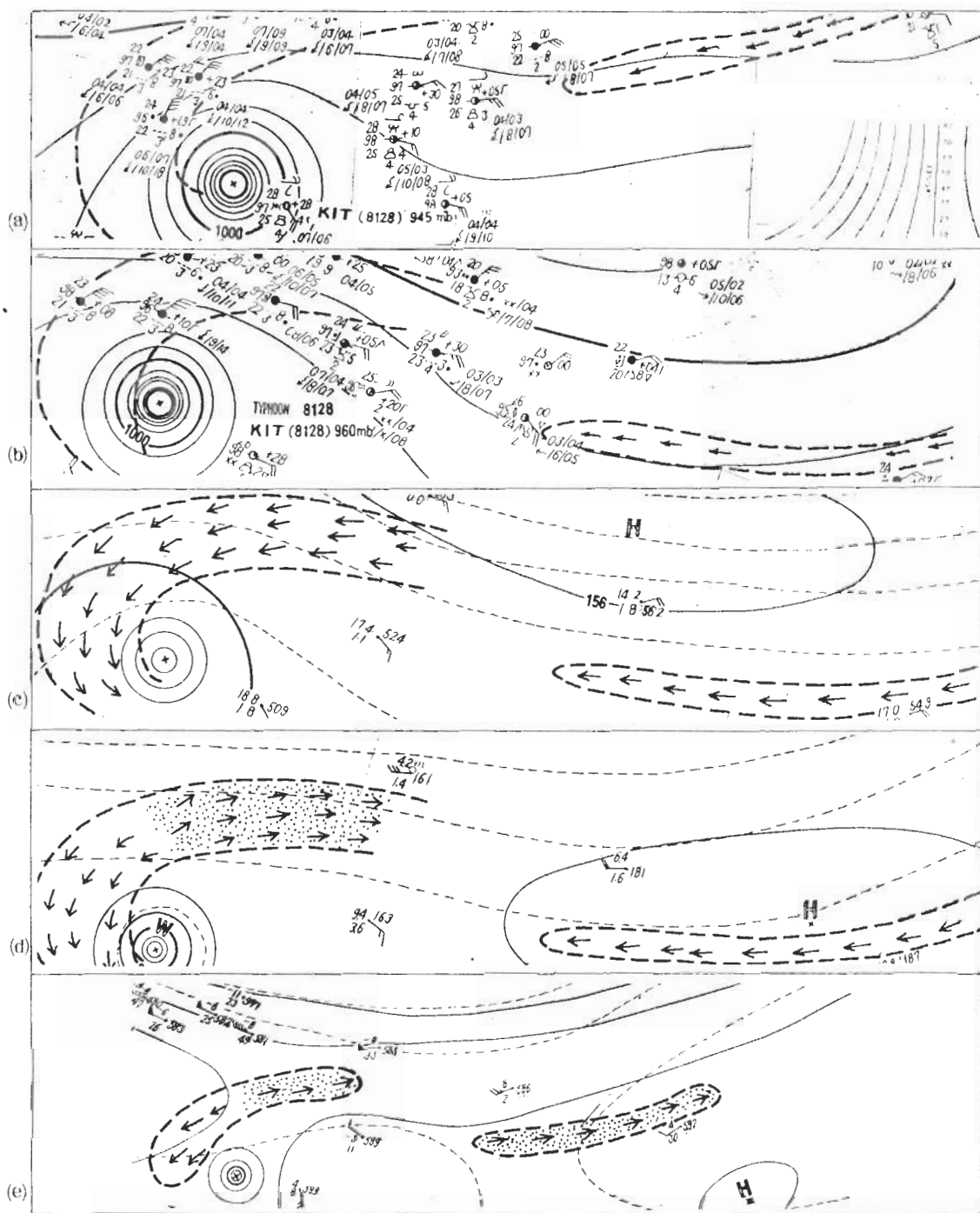


圖9 1981年12月18日MSGW雲出現期間之(a)00Z地面圖，(b)12Z地面圖，(c)850mb圖，(d)700mb圖，(e)500mb圖(說明見圖2)。

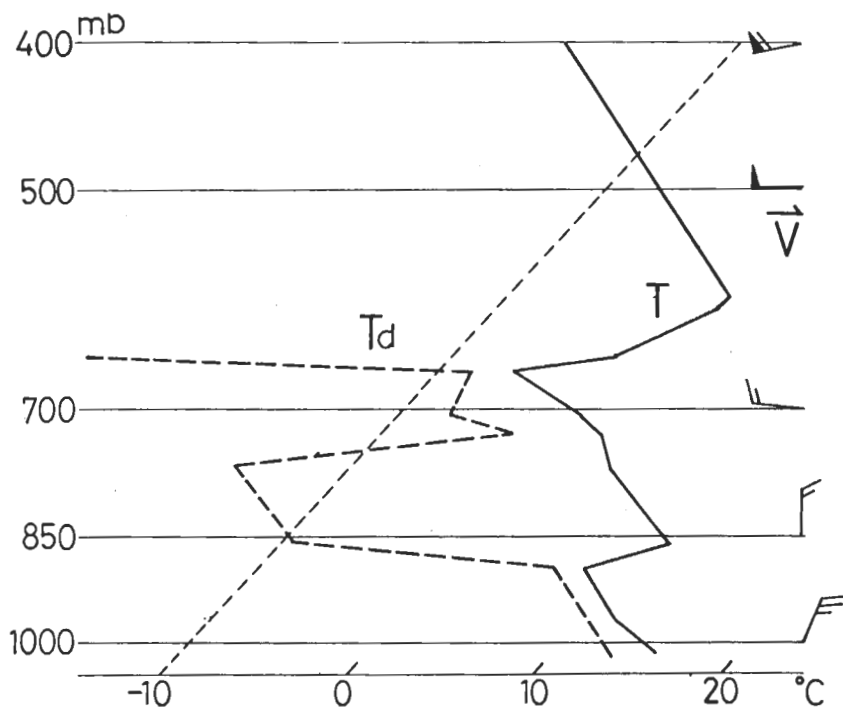


圖10 1981年12月18日00Z馬公之探空屬性及高空風分佈。