

ジェット流について

毛利 圭太郎*

1. ジェット流の発見

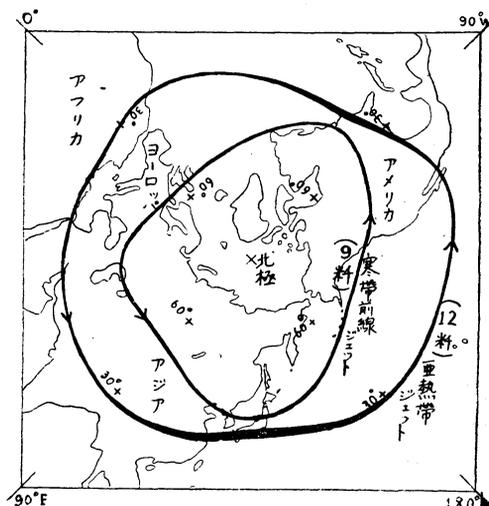
中緯度の上空で偏西風が強いということは、すでにビヤークネスによって1933年に彼の著「物理的流体力学」の中で指摘されているし、またウイレットも1944年に彼の著「叙述気象学」の中で述べている。しかしその意外に強いという事実は第二次大戦中、日本上空の B-29 によって確認された。1947年になってシカゴ大学でロスビー、パルメンの指導のもとに大気大循環に関する大規模な研究が行われるようになり、はじめてジェット流に対する理論的ならびに総観的なメスが加えられることになった。このときの研究成果はアメリカ気象学会誌に報告されており、この中でジェット流に対するつぎのような定義が与えられた。ジェット流は上層偏西流中であつて波状をなしながら半球をとりまいて東方に流れる蛇行流であり、この流れの運動エネルギーは狭い帯状をなした高速流の中に集中されている、というのである。この総合研究は新しい事実の解明を告げたものであり、その後における理論的ならびに総観的研究に大きな刺激となった。海洋学においても海流中のジェットが問題となり、気象と海洋は相ていけいして研究がすすめられた。

まず問題になったのはジェット流に伴って運動が集中していることと、それに伴って温度の場が集中しているということであった。古い前線や気団に関する概念は修正されねばならなくなった。ジェット流の南側では等温位面上において高気圧性シアがありこれが大きくなると、いわゆる力学的不安定をひき起す。またジェット流の北側の低気圧性シアは予想外に大きく、風のレーダー観測がふえるにつれ2ない5 f^{**} というような実測さえあらわれてきた。これはまた不安定化作用をおよぼす。かくしてジェット流の両側では強い不安定が存在することが分った。しかもこのような不安定を伴った高速流が線状をなして自由大気中を流れている。これは不思議なことである。クレスマンやフィリップスは北半球の視野で観察すると、ジェット流は寒気側から暖気側に移動してゆき、しかもその中心の温位が上昇してゆく傾向のあることを見出した。リールは総観的な見地からジェット流の中にはゆるやかに運動する極大と極小があり、それらは細片状のジェット流をなすことがあることを見

出だした。同様のことはメキシコ湾流の観測から海洋中にも存在することがわかってきた。このようなジェット流の微細構造の発見は今まで分っていたジェット流の概念に大きな修正を必要としてきた。最近では飛行機観測によってジェット流の研究が行われており、その成果がまとまればまた新たな進歩がもたらされることと思われる。

2. 2種類のジェット流

ジェット流の平均的な状態を知るために今までに多くの平均断面図が作られている。もっとも早かったのは北米大陸についてヘスガ西経80度に沿う平均断面図を作ったものである。その後かく地域について作られ、極東では140°E、120°Eおよび印度の76°E子午面について、また中東イラン付近やヨーロッパにおいても作られた。南半球では濠州東岸とニュージーランド付近のものがあつた。これらから知られることは平均ジェット流の中心はほぼ200mb(12キロ)あたりに存在し、冬季は緯度30度から40度のあいだ、夏季は40度から50度のあいだにあることが分った。またこのジェット流の北方に弱いながらもう1つのジェット流が300mb(9キロ)あたりに存在



第1図 冬季におけるジェット気流の平均の状態(2種類のジェットを示す)

* 中央気象台予報課

** $f = 2\omega \sin \phi$ はコリオリー因数

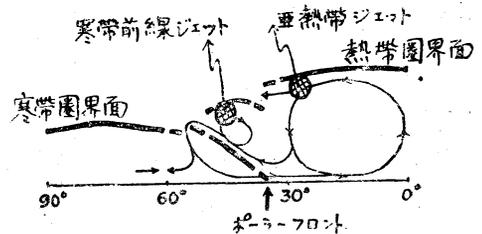
することが分った。別に平面図上の風速の分布を調査して、ナマイアス、ミンツ、バンノンなどの200mb付近の平均図ができてきた。これによると200mb天気図上でジェット流の軸は蛇行しながら半球をとり巻いており、とくに大陸の東岸で強く、大洋の東半分で弱いことが分った。夏は冬よりもジェット流の強さが弱く、これは南北の温度差によるものと考えられている。第1図にバルメンによって作られた冬季のジェット流の平均の状態図を示してある。ここに外側に示したものは亜熱帯ジェット流といわれるもので、亜熱帯高圧帯の北側12キロ付近に存在する。大陸の東岸、すなわち日本付近とアメリカ東岸では強く、冬の最盛期には日本付近で平均秒速80メートル、アメリカ東岸で60メートルにも達する。このジェット流は比較的その位置が変わらないのが特徴であって、もちろん強くなったり弱くなったりはするが、ほぼ30度の緯度圏にそって存在している。内側のジェット流はポーラーフロントに伴うジェット流 (以下簡単のためポーラー・ジェット流とよぶ) とよばれ、いわゆるポーラー・フロントの上空約9キロのところにおいて、ポーラー・フロントの変動とともに変動している。図に示してあるのは大略の位置で、ポーラー・フロントが500mbと交る線の上空にあって南北に変動するから、平均図上にはあまりはっきり現われてこない。しかし、個々のジェット流の中心風速は必ずしも小さくなく秒速100メートルをこえることも稀ではない。もっとも亜熱帯ジェット流の個々の場合の最大風速には秒速200メートルにも達するものがあり、その猛烈なスピードには驚ろかされる。さて、第1図をみてわれわれの注意をひく事実は亜熱帯ジェット流は強まると北上し、弱まると南下することである。日本付近でもアメリカ東岸でも、強まると共に北上する事実がはっきり認められ、太平洋の東部や大西洋の東部では弱まると共に緯度30度線よりも南下している。

この事実は大気大循環を理解する上に大切なことである。空気粒子は加速されると高圧側から低圧側に向う気圧力を受けて非地衡風を生ずるが、このような非地衡風がジェット流の強化、弱体化に伴って起っていることを考えれば、大規模な収発、発散がジェット流付近で起っていることになる。運動量の南北輸送に対して大気大循環的に密接に結びついていることになる。またポーラー・ジェット流は、亜熱帯ジェット流とは逆に大陸の東側で南下し、大洋の東の部分で北上していることは極めて対照的な現象である。事実、日本付近ではポーラー・ジェット流はシベリヤから南下してきており、北アメリカ東岸でもカナダから南下している。一方、太平洋の東部ではアラスカ湾近くを通り、また大西洋東部では北緯55度付近のイギリス上空を通っている。これは大陸の東部では北方から寒気が南方に流れだしていることを示すも

のであり、ポーラー・フロントに伴った寒気の吹出しそのものに対応している。これらの現象も大気大循環の立場から興味ある事実で寒気の吹出しに伴っては地表摩擦のため地表付近では非地衡風があらわれ、それに伴って発散が行われている。地上で最も冬季の季節風の吹出しの強い日本付近の上空で、極めて強い亜熱帯ジェット流が加速されながら北上してくるということは決して偶然の一致とはいえないことで、必ずやそこに密接な相互関係があるのではなからうか。

最近の資料によると日本上空200mbあたりの平均等高度線はほぼ東西ないし西南西—東北東の方向に走っているが、亜熱帯ジェット流はさらに大きな角度で低圧側に吹きこんでいる。いま平均ジェット流の軸にそって平均流が流れるものと仮定すると、この空気の流れが平均等高度線となす角 α はほぼ $\tan \alpha = f^{-1} \cdot \partial v / \partial s$ で与えられる。ここに $\partial v / \partial s$ は流れの方向にそう風速増加の割合である。実測とくらべてみると、ほぼ一致する。したがって、日本上空では大規模な南方からの空気の輸送が行われているわけで、日本付近で冬季観測されるいろいろな現象はこのような流れの場と関係深いものが多いのではないかと思われる。

日々のジェット流のもようは第2図に示すように、ポ



第2図 冬季における子午線循環のモデル

ーラー・フロントや圏界面と密接にむすびついていると考えられている。第2図は北半球における典型的な場合であって、もちろんポーラー・ジェット流の変動に伴っているいろいろの変形があらわれ、また極東においては大陸の影響で特異な形をとる。第2図において太く書いたのが前線および圏界面、細く書いたのが流れの方向である。大きくみるとポーラー・フロントはポーラー気流と熱帯気流とを分けているが、さらに細かくみるとポーラー・フロントの上空に第3の気流ともいべき子午面内の細胞がみられる。この細胞がポーラー・ジェット流に伴ったものであり、その上方にはポーラー・フロントに伴う圏界面とよばれるものがある。ポーラー・フロントの北側はいわゆるポーラー気流で水平混合の卓越する領域であり、ほぼ 2°C の絶対温度で特徴づけられている。その上空9ないし10キロにはほぼ 310°K の温位をもったポーラー圏界面がある。緯度30度から南方は熱帯の循

環細胞でその子午面内の循環の方向は“順”である。この細胞の北縁はいわゆる亜熱帯高圧帯であり、その上空12キロあたりに亜熱帯ジェット流の存在することは前に述べたとおりである。上空100ないし80mbあたりには380ないし400°Kぐらゐの温位をもった熱帯圏界面があり、これが北にのび、中緯度上空まできて多重細片状になりつゝ消えている。熱帯細胞は角運動量の保存で特徴づけられる領域であつて絶対湿度はほぼ零に近い。中緯度上空の中間細胞領域がいわゆる偏西風帯とよばれるところであり、ここはポーラー気流と熱帯気流との混合領域に相当する。この混合の複雑な過程が風の場合からみればジェット流の形をとり、温度の場合からみれば前線の形をとっているわけである。湿度は熱帯の貿易風帯では地球から大気に与えられる。すなわち熱帯は湿度の発源地になっている。中緯度の偏西風領域においては湿度は地表付近で大気から失われ、エネルギーは乱流のため最後には熱エネルギーとして消えてゆく。すなわち偏西風領域は湿度の消滅地帯である。この湿度の輸送は、すでに多くの運動量輸送の研究によつても知られているように、熱帯では順循環によつて上空に運ばれ、ついで上層対流圏において北方へと運ばれてゆく。この過程に立ってはいはじめて亜熱帯ジェット流の本質が理解されるのではなからうか。運動量の輸送に伴つて当然大気大循環の本質である熱量の輸送が行われ、熱帯でえられた太陽熱は中緯度や高緯度に運ばれてゆくわけである。ただ絶対角運動量だけで亜熱帯ジェットの全部を記述することは、残念ながらできない現状であつて、廻転流体の実験からも知られているように、また海洋中にも大気中にも見出されるように細片状ジェット流の機巧を説明しないかぎり完全な理解には到達しえない。いろいろの人達によつて考えられているようにジェット流の力学にはまだ解明

されないものがある。その一つには非線型の問題があり、その数学的な困難さが、たの分野でもそうであるように1つの障壁となっている。

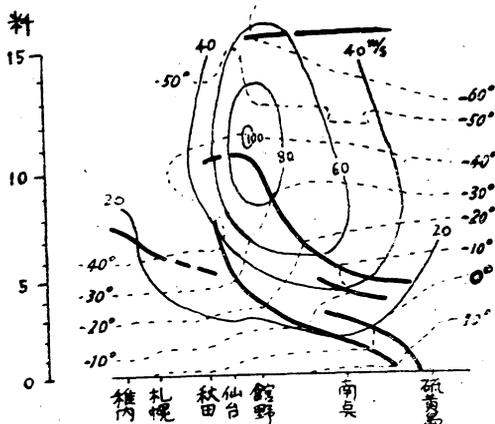
本邦附近においては恐らくヒマラヤおよびチベット高原の影響と思われるが亜熱帯ジェット流の下の対流圏中層にはっきりした等温層すなわち巾広い前線があらわれることがある(第3図参照)。亜熱帯ジェット流は寒候期には比較的定常に近いが、ポーラー・ジェット流は南北に変動するため、時としてこの中層の巾広い前線とポーラー・フロントとが一緒になって厚さ2ないし5キロにも及ぶ前線帯を形成することがある。このような時には両者のジェット流は相重なって極めて強いジェット流を生ずることがある。

3. ジェット流に対する力学的な考察

ジェット流を力学的に考察することは極めて興味深い問題である。多くの学者がこの問題について努力をつづけてきた。一時はジェット流は解明されたと思われた時もあったが、最近のように数多くの高層資料、飛行機観測資料が集積されてくると、ふたたび理論的考察は混乱状態にならざるをえなくなった。それに加えて前述したような非線型の問題があり、数学的にも困難さを加えてきた。チャーニーにはじまる数値予報の輝やかしい成果によつて絶対湿度保存の原則にゆるぎない確信をもつようになったが、つぎには非地衡風の問題が脚光をあびてきた。とくにジェット流とか前線のような集中現象は非地衡風によつて特徴づけられる現象であり、これをどう処理するかは、収斂発散、垂直速度などの問題とも関連して短期予報においても旬日予報においても重要な問題である。

ジェット気流が発見された当初、理論的に問題となつたのは海洋中のジェット流との構造上の類似性であつた。密度の違う大気中と海洋中でともにジェット流が存在するという事は現象のスケールが違っていても力学的相似性のあることを意味している。また圧縮性はあまり重要ではないと考えざるをえない。局地的な加熱によつて引き起された現象ではないということになる。また海洋中に水蒸気の凝結がないことから、潜熱の役割は二次的なものであることがわかる。すくなくともジェット流の集中現象を起す原因は廻転地球上の力学的な機巧の中にあるといわざるをえない。

なぜジェット流のようなエネルギーの集中した現象が起るのであろうか。またなぜジェット流の下に前線が、すなわち温度場の密集が起るのであろうか。ロスビーは側面混合の考えから出発し、側面混合の起る領域の南の端、緯度40度あたりに強い西風の領域ができること、およびその付近に南北の温度傾度の強い領域ができるこ



第3図 日本上空の垂直断面図(140度子午面にそう)(1950年12月10日12時)
太線は前線および圏界、細実線は等風速線(西成分、米/秒)破線は等温線(°C)。

* ω は地球回転の角速度

とを説明した。この考えによるとジェット流の周囲の垂直循環は逆である。その後、このジェット流の垂直循環について数多くの研究が行われた結果、果して順循環なのか逆循環なのか混んとしてきた。そしてこの垂直循環の問題と2種類のジェット流が組み合わせられ、はっきりした結論が出せなくなったのが現状であるといえる。ジェット流がわからなくなったというのは主としてこのような点にある。

逆循環の立場でいえばエネルギー的には都合がいい。逆循環といえは北側の冷い空気が上昇し、南側の暖い空気が下降するのであるから、南北の温度傾度はますます急峻になり、ソレノイド場は強められ、したがってジェット流は加速される。一方、順循環の立場でいえばごく常識通りに冷気は沈降し暖気は上昇するのであるから、南北の温度傾度は時間的に弱まることになる。したがって順循環の立場でいえば、南北の暖冷両気流の合流の割合の方が温度傾度の弱まり方よりも強いということでジェット流の強化を説明しなければならなくなる。これはちょっと苦しい説明の方法であって、エネルギー的には逆循環の説明の方がずっとすっきりしている。ところが、順循環を支持する幾つかの事実があらわれてきた。

まず第1は運動量の南北輸送に関連してである。前にも述べたように熱帯の循環細胞はあきらかに順循環であり、熱帯上層対流圏から亜熱帯に流れてくる空気は亜熱帯ジェット流を形成すると共に亜熱帯高圧帯を形成している。したがって亜熱帯高圧帯を説明するには亜熱帯ジェット流に伴う循環は平均的には順であるといわざるをえない。また日本やインドなど極東方面の亜熱帯ジェット流の研究によると、亜熱帯ジェット流の南側の上層対流圏に寒候期といえど極めて高温の部分の存在することが確かめられてきた。このような高温領域はすでに北アメリカ上空でも認められていたことであるが、極東ではもっといちじるしい。事実、盛夏期の熱帯の上空の気温にもくらべられるような温度であり、これは大規模な沈降現象に伴ったものと解せざるをえない。これを移流で説明することはちょっと困難である。また亜熱帯高圧帯に

おおわれた場合はアジアのどの領域においても好晴を経験する。こうして亜熱帯ジェット流には平均的に順循環が伴っていると考えざるをえない。そこで最近では亜熱帯ジェット流に伴う平均の“順”循環は認めるが、その中を移動してゆくジェット細片(局地的極大極小)に伴う垂直循環は“逆”なのではないかと考えられるようになった。すなわち大気大循環的に考えた亜熱帯ジェット流の平均的な機巧の中を、ポーラー・ジェット流と同じような局地的な極大域が“逆”循環をもちながら移動しているというのである。

このように考えてみると平均的なジェット流と、それに重なった局地的なジェット流とは別の機巧で説明されることになるかも知れない。このような立場からロスビーは、局地的ジェット流の生成は“運動量輸送量極小の原理”にもとづいて説明しようと試みた。この原理によればジェット流の垂直方向のエネルギーの集中は説明できる。

しかし、水平方向の集中に問題が残っており、これについてはまだ論議が多い。

廻転円板状の水槽実験によると、極または赤道を冷却または加熱した場合や、水槽中に障害物を入れた場合や、不連続面を作ってそれにじょう乱を与えた場合などにジェット流が現われることが確かめられている。このようにごく簡単な実験においても容易に観測されるジェット流が、なかなか説明できないという点に今後に残された多くの問題がある。

最近、本邦においてもジェット流に伴う豪雨や、ジェット流と梅雨との関係について立派な研究が行われており、またジェット流と季節風との関係やジェット流と台風の転向との関係についても面白い事実がわかってきた。航空気象の立場からはジェット航法と関連して太平洋のジェット流が対象になっており、また短期予報や旬日予報の立場からも技術的にいろいろ取り上げられ実用化されている。このような意味から上層の十分な風の観測が行われる来るべき国際地球物理年へのわれわれの期待には大きいものがあるといえよう。

と並んでいる。著者の筆風は、氏の隨筆を読んでも、前著地上気象器械学を読んでも、簡易明解な文章である点にその特徴が表われている。学者の著書の中には、わざわざ読者をして了解に苦しむような述べ方をしている人もある。その必要もないと思うのに、わざわざややこしいいまわしや数式をろうする人がある。科学者だから文のよしあしは責められないでよいものという誤った観念からであろう。本を著作しようとする人は、読者に分るように本は書くものだという信念を持って書かれた佐貫博士のこの気象器械を大いに見習って貰いたいものである。内容が新しい気象器械に集中し、しかも文章がすっきりしてよく分る。座右に置きたい良書である。

(藤原寛人)

気象器械学
気象学講座 第6巻

佐貫安男 著

91頁 250円 地人書館

この書をお買いになった方は同じく佐貫博士著の地上気象器械(共立全書、250頁、昭29年4月発行4000円)を購入されることをおすすめする。地上気象器械と今度の気象器械学と2つ揃えば気象器械について知りたいことは何でも分るからである。この本は一口にいうと新型気象器械学である。内容を見ても、防氷風向風速計、準器気圧計、雲高測定器、無線ロボット、気象レーダー、ゾンデ、超高層探測ロケットと新しい気象測器がずらり