

銀河系外天体の距離 (II)

高瀬 文志郎*

3. ハッブルの法則

銀河のスペクトル写真から、その視線速度を始めて測定したのは、米国ローウェル天文台のスライファーで、1912年のことであった。原理は恒星の視線速度決定と同様で、本来の波長が λ_0 であるスペクトル線のずれを $\Delta\lambda$ 、 $z = \Delta\lambda/\lambda_0$ とすると、ドップラーの原理から、その天体の視線速度 V は cz (c は光速) で表わされる。ただし $V = cz$ は、 $V \ll c$ のときに成立つ近似式で、 V がずっと大きいときは相対論による一般的なドップラーの式

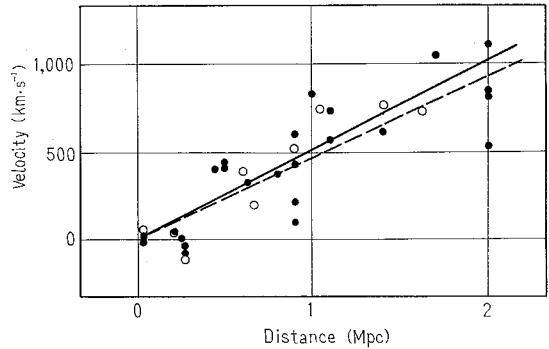
$$V = c \frac{(1+z)^2 - 1}{(1+z)^2 + 1} \quad \left(\text{または } z = \sqrt{\frac{1+V/c}{1-V/c}} - 1 \right) \quad (9)$$

を使わなければならない。

スライファーの努力によって、1920年代後半には、銀河の V のデータも 40 個を越した。恒星の場合の視線速度はすべて太陽に対する値を算出するが、銀河の場合は銀河系の中心に対しての値を求めなければならない。それには、太陽付近の星々の銀河中心まわりの運動すなわち銀河回転と、付近の星々に対する太陽の動き、いわゆる太陽運動の影響を差引けばよい。このような補正を施すと、アンドロメダ銀河ほかごく少数の例を除くほとんどすべての銀河の V は正の値となる。そこで、銀河のスペクトル線のずれがドップラー効果によるものと考えられる限り、銀河は全般的に銀河系から遠ざかっているということが明らかになったのである。

一方1923年には、アンドロメダ銀河や三角座の銀河の中にセフィドが発見され、それらの銀河の距離決定のよすがが得られた。これをもとに、銀河の中の最も明るい星の絶対等級が算出され、本誌前号に述べたように、これをより遠い銀河の距離指標として使用することが考えられたのもこの年代のことである。ハッブルは 1929 年、視線速度 V と距離 r がともに求められた 22 個の銀河について、 V と r が第 3 図のような直線関係で表わされることを始めて発表した。ハッブルの法則と呼ばれるこの関係は、宇宙膨張説とも結びつけられて注目を集めたのである。

さてこの関係を



第 3 図 最初のハッブル図 (1929年)

黒丸と実線は個々の銀河についてのデータ、白丸と破線は銀河をグループに分けたときの平均値を示す。

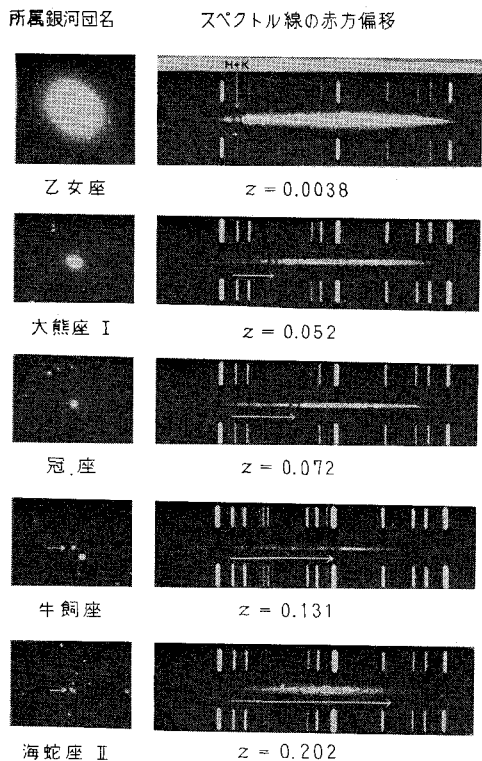
$$cz (= V) = Hr \quad (10)$$

と表わしたときの比例定数 H をハッブル定数というが、第 3 図では H の値が約 $500 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$ であることがわかる。またこの図の右端に並ぶ 4 つの銀河は、乙女座銀河団のメンバーであるが、それらの距離は 2 Mpc となっている。 H とともに、現在の値に比べて大きな隔たりがあり、いささか今昔の感なきを得ない。

開拓者スライファーの仕事を引き継いで、銀河のスペクトル線測定に取組んだのは、ハマソン (ウィルソン山天文台の 100 インチ、60 インチ、のちパロマー天文台の 200 インチを使用) やメーヨール (リック天文台の 36 インチ反射鏡を使用) で、しだいに速く微かな銀河へと測定が進められた。その成果は 1956 年の *Astronomical Journal* 誌 (61 巻) に集録されている。この論文の第 1 部はハマソン、第 2 部はメーヨールが執筆しており、それぞれが測定した 620 個および 300 個 (ただし両者共通なものが 114 個あるので総数は約 800 個) の銀河の cz の値がリストされている。第 3 部にはこれらの銀河の測光結果 (等級 m) のリストと、 cz 対 m の関係が論じられており、ハッブルの直弟子サンデイジの執筆になる。1953年に逝去したハッブルがもし生きていたら、当然彼がこの論文の主著者になったであろう、ということが序言に書かれている。大変有名なこの論文は、3 人の著者の頭文字を並べて HMS と呼ばれるので、このあと引用の際はこの略称を使うことにしよう。

1929年に、銀河の速度・距離関係として表現されたハ

* Bunshiro Takase: 東京天文台
Extragalactic Distance Scale



第4図 銀河スペクトルの赤方偏移
各スペクトル中の2本の吸収線はカルシウムの H, K 線。それらの赤方偏移 z (図の横向き矢印の長さ) は、微光の銀河すなわち遠距離の銀河ほど大きい。

ップルの法則は、HMS では第5図に示すように $\log cz$ と m の関係として示されている。はじめに述べたように cz は必ずしも V に等しくはなく、赤方偏移 z の定数倍であるというのが正しい。そこで $\log cz$ 対 m の関係を、ふつう赤方偏移・等級関係といっている。

ハッブルの法則を示す(10)式と、前号でも述べた

$$m - M = 5 \log r - 5 \quad (11)$$

という式 (M は絶対等級) を組み合わせると

$$m = 5 \log cz + k, \quad (12)$$

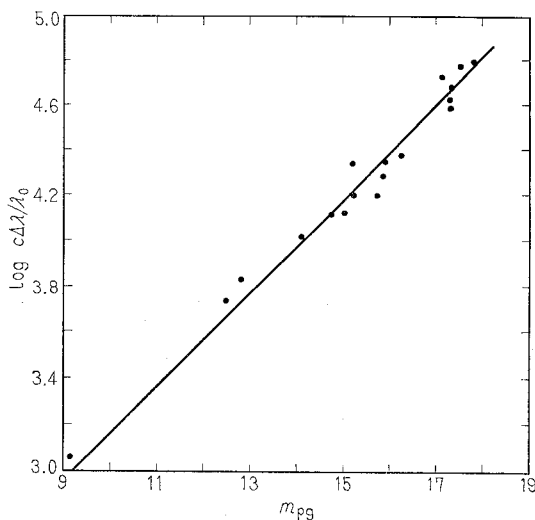
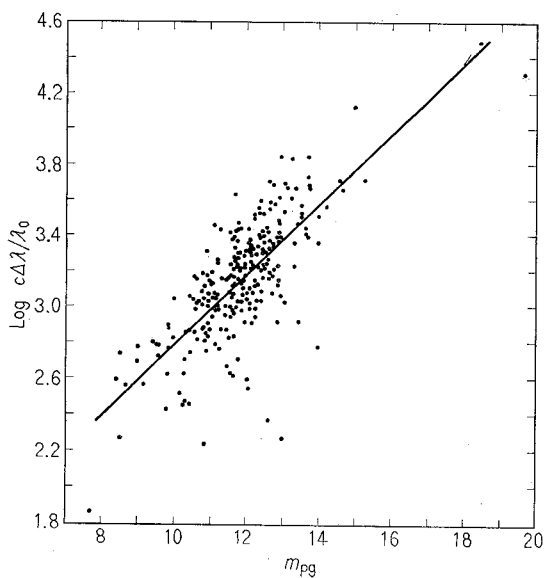
ただし

$$k = M - 5 - 5 \log H \quad (13)$$

となる。ここで銀河の絶対等級 M を一定と仮定すれば、 H はもちろん定数であるから k も定数となり、(12) 式は $\log cz$ が m と直線関係で結ばれることを示す。遠い銀河になると、距離指標となる天体の見分けはつかないので、 r が求められない。しかしそのみかけの等級 m は測定できるので、 $\log r$ の代りに m の値をとった図としたのである。

なお銀河のみかけの等級は、前号でも述べたように、観測値 m_o に銀河系内の吸収物質による減光量 a を補正しなければならない。さらに z の大きい銀河では、その放射エネルギーの波長範囲が赤い方へずれるので、銀河から来る光量のうち写真等級 m_{pg} や B, V 等級を定義する波長範囲内に入る分は減少する。その分の補正、いわゆる K 補正も必要である。そこで銀河のみかけの等級は

$$m = m_o - a - K \quad (14)$$



第5図 ハマソン・メーヨール・サンデイジのハッブル図 (1956年)
左は474個の散在銀河、右は18個の銀河団に所属する最も明るい銀河についての図である。

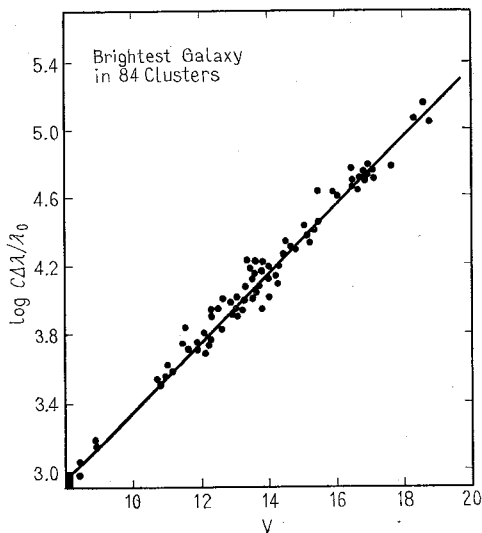
で表わされる。

第5図は散在銀河(メンバー数50個以下の銀河集団に属するものにこれに含める)およびメンバー数50個以上の銀河団中の最も明るい銀河についてのハッブル図である。それぞれの直線は(12)式を示したもので、第3図に比べてはるかに遠く微かな銀河に至るまで、ハッブルの法則がよく成立つことがわかる。散在銀河の方では、観測点の直線からのばらつきがかなり目立つが、これは主として個々の銀河の絶対等級のばらつきによるものであろう。一方銀河団中の最も明るい銀河がきれいに並んでいることから、それらの絶対等級はよく揃っていることがうかがわれる。

サンデイジはこの点に着目して、銀河団中の最も明るい銀河についての cz と m の値の増補に努め、1968年には41個、1972年には84個の銀河団についてのハッブル図を得た。後者についての第6図を見ると、やはり点々が非常によく $m=5 \log cz + k$ という直線に乗っていることがわかる。なおこの図や第5図(右)の縦軸の値は、各銀河団中のメンバー銀河の cz の値の平均値である。これは、銀河団が全体として後退運動をしながら、個々の銀河がめいめい勝手な運動をするので、それらの cz の値を平均することによって、後者の影響を取除いたのである。

4. ハッブル定数の値

赤方偏移 z の測定された銀河の距離 r は、(10)式により cz/H で与えられるが、肝心のハッブル定数 H の値が、じつはまだ確定していないのである。



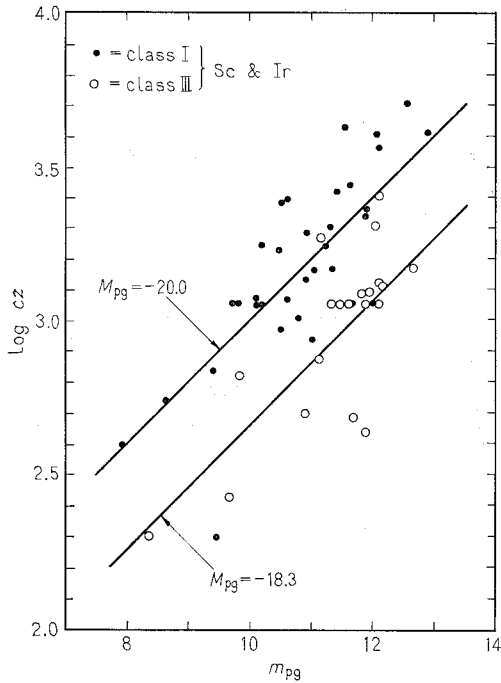
第6図 サンデイジのハッブル図(1972年)。直線は $m=5 \log cz - 6.76$ で表わされる。左下隅の矩形部は、第3図のハッブル図の範囲。

前節に述べたようにハッブルの1929年の値は約 $500 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$ であった。このときの銀河の距離決定は、アンドロメダ銀河 M 31 などのセフィドの距離をもとにしたものである。ところが1952年になって、バーデは M 31 中のセフィドの絶対等級 M が、それまでに考えられていた値より1.5等明るいことを指摘した。一方では M 31 のセフィドのみかけの等級 m も0.35等暗い値が正しいということが示された。結局その $m-M$ は1.85等だけ大きくしなければならない。そこで M 31 および他の銀河の中の最も明るい星の M も、以前の値よりこれだけ明るいことになる。さらにそれをもとに算出したすべての銀河の距離指数も1.85等大きい(すなわち距離は2.3倍遠い)値に改めなければならないということで、当時大きなセンセーションをまき起したものである。

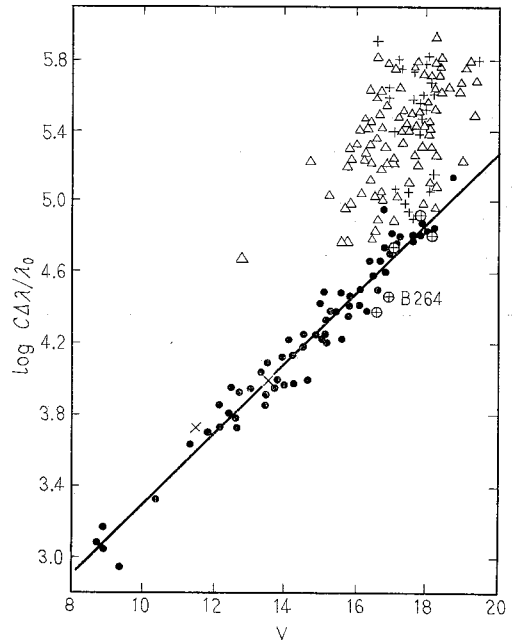
HMS の cz 対 m の関係が発表されたのはその直後である。彼等は乙女座銀河団中の最も明るい渦巻銀河 M 100 について、その中の最も明るい星の M に対して上記改訂値を適用して、その距離指数 $m-M$ を29.05と求めた。すなわち $r=6.4 \text{ Mpc}$ である。一方乙女座銀河団の諸銀河の cz の平均値は 1136 km s^{-1} なので $H \sim 180 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$ となった。前号に述べた電離水素領域の大きさを指標として求めた M 100 の距離の最近の値は 14.4 Mpc なので、これに対応する H の値はさらに小さくなるわけである。

1968年にサンデイジが41個の銀河団銀河の cz 対 m の関係を発表したときに求めた H の値は $75 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$ であった。さらに1970年、ド・ヴォークルールは、乙女座銀河団中の最も明るい楕円銀河 M 87 の球状星団について、前号で述べた(8)式を適用し、銀河団中の最も明るい銀河の絶対等級 M_{91}^0 を -22.5 等と求めた上で、 $H=52 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$ という値を出している。なおサンデイジは、目下タンマンと共同で M_{91}^0 のさらに詳しい検討を行なっている由で、その結果の予報によれば、 H の値はやはり50に近い値になりそうだとのことである。

最近はこのように $H=75$ とか50とかの小さな値が出まわるようになったが、1960年代の大半は $H=100 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$ が標準値として用いられてきた。これは前号に述べた銀河の光度階級の提唱者ヴァンデンバーグの主張した値である。彼は渦巻の腕の発達程度がちがう銀河が、ハッブル図上で互に平行な別々の直線((12)式で $\log cz$ の係数は等しいが k の値がちがうもの)上に並ぶことに気づいて、光度階級を提唱したのである。たとえば Sb 型で階級 I の銀河は $k=-35.4$ 、Sc および Ir 型で階級 III の銀河は $k=-33.3$ となる。ここで M 31, M 33, LMC, SMC, NGC 6822 の5つの近距離銀河の絶対等級 M を目安に使って、(13)式から H を求めた結果が上



第7図 銀河の光度階級によるハッブル図の相違



第8図 電波銀河(●印), 準星(Δ, +, および⊙印), セイファート銀河(×印) についてのハッブル図 (サンデイジ, 1972年)

記の値になった。なおヴァンデンバーグは、上の5つの近距離銀河以外の諸銀河についても、前号に述べた諸種の距離指標から得られた絶対等級の値を(13)式に入れて H の値をチェックしているが、その結果は平均して $95 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$ になったという (1970, 72年)。

このように、今のところ H は 100 に近い値と 50 に近い値の両説に二分された形である。前号で述べた $z = 3.40$ の準星 OH 471 の距離の計算例のように、同じ z に対して距離の値は 2 倍の範囲の不確かさをまぬがれない。なお第8図 (サンデイジ, 1972年) によれば、電波銀河のハッブル図は、第6図と似ているが、準星はその直線より上に集まり、ばらつきも大きい。したがって OH 471 の z から、前号のような距離の計算をすること自体が問題であることも注意しておかなければならない。

z や m の値、したがってハッブル図そのものはかなりよく決まっていると思われるが、これを z 対 M の関係にしようとするとき不確かさが入ってくるのである。これは距離指標法による近・中距離銀河の $m-M$ の決定に、まだまだ問題が残っているからにほかならない。なお m の補正の一つである銀河系の吸収物質による減光量 a を求める式についてもまだ定説がなく、サンデイジは最近、従来のものと全くちがう新しい計算式を使っている (1972年)。

ハッブル定数の逆数 $1/H$ は、宇宙膨張が始まって以

来の時間を示す目安になる。したがって H の値が変わると、宇宙のひろがりだけでなく、宇宙の年齢もまた変ることになるわけで、宇宙論への関連がきわめて大きい。

雑 報

地球の基準楕円体と地心重力定数

本年1月号の「物をはかる話①」に書いた、地球の基準楕円体の赤道半径 6378.160 km という値は、IAU が 1964年に採用したものだが、もともとはアメリカのフィッシャー女史が、地上の測地網のデータから出したもので、人工衛星の結果は使っていない。

人工衛星によって各国の測地網がむすびつけられ、これを求め直してみると、上記の値は 20~30 m ほど大きすぎるのではないかとことが分ってきている。

また、2月号に記した地球の地心重力定数の $398603 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{s}^2$ という値も、1964年 IAU によって採用されているが、これは月に向けたレイジヤール・ロケットの加速度の観測から出したものである。

ところが、同じような観測から GE の値を決め直すと、1965年には、398 603.2、66年には 398 601.3、67年には 398 601.0、1972年には 398 600.8 と年とともに減少してきていることが分る。これがたしかな意味をもつものなのかどうかは、当事者には判断がつかないようだ。

(古在由秀)