

# 銀河系外天体の距離 (I)

高瀬 文志郎\*

## 1. はじめに

銀河系の主構成メンバーが恒星であるように、宇宙の主構成メンバーは銀河 (galaxies, 銀河系外星雲) である。本誌前号で述べられたように、恒星またはその集団である星団までの距離を求め、それらの分布を知ることによって、銀河系の大きさが明らかになった。それと同様に、銀河または銀河団までの距離を知れば、宇宙の拡がり求められるわけである。

ただし銀河系の場合は、球状星団が銀河系全域にわたって観測されるので、それらの分布範囲から銀河系の大きさがつかめたのであるが、宇宙の場合はそうではない。銀河や銀河団の分布限界は、望遠鏡の観測射程のずっと先にあり、われわれの観測し得る最遠の銀河の距離も、宇宙が少なくともそこまでは拡がっているという値を示すに過ぎない。

いまのところ、最遠の銀河とされているのは、赤方偏移  $z$  の値が 3.40 におよぶ準星 OH471 である。次号で述べるように、この  $z$  に対してハッブルの法則を適用し、ハッブル定数  $H$  を  $100 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$  とし単純にすると、その距離  $r$  は  $2700 \text{ Mpc}^{**}$  (88 億光年) となる。またもし、 $H=50 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$  という値を採用するならば、 $r=5400 \text{ Mpc}$  (180 億光年) となる。

さて、銀河の距離決定には、近距離のものと遠距離のもの (その境は  $10 \text{ Mpc}$  程度) で全くちがった方法が用いられる。近いものでは、その中に含まれる“距離指標”となる天体を見分けて、その天体の距離、すなわち銀河の距離を求める。一方遠いものでは、その銀河のスペクトル線の赤方偏移  $z$  が距離  $r$  に比例するという、いわゆるハッブルの法則を使って、測定した  $z$  の値から  $r$  を算定するのである。遠い銀河では距離指標となる天体も見分けがつかないし、一方近い銀河では、宇宙膨張による銀河の後退速度が、銀河のめいめい勝手な運動の速度と同程度以下なので、スペクトル線のずれ  $z$  に対してハッブルの法則を適用することはできない (実際に局部銀河群に属する銀河の中には  $z$  が負、すなわち青方偏移のもの

もある)。

$r=10 \text{ Mpc}$  程度の銀河は、上の二つの方法がどちらも適用できるので、両者の橋わたしの役割を果している。すなわち、これらの距離をまず第一の距離指標法でできると、第二法で使うハッブル法則の定数  $H$  の値が求められ、したがってこれより遠い銀河の距離が算定できることになるわけである。この手続の具体的内容については次号を参照されたい。

## 2. 近距離銀河の距離指標

発光体のみかけの明るさは、その距離の自乗に反比例する、またもののみかけの直径は、その距離に反比例する。これらの原理によって、絶対等級 (天体を  $10 \text{ pc}$  の距離から見た等級) のわかっている天体、または実直径を測ることによって、それらの距離を計算することができるわけである。

明るさを使う方のやり方は、恒星や星団の距離決定にも用いられ、前号までの本欄にも再度登場している。すなわち、みかけの等級  $m$ 、絶対等級  $M$ 、および距離  $r$  (pc) のあいだにある、つぎの関係式を使うのである。

$$m - M = 5 \log r - 5 \quad (1)$$

ここに  $m$  は、観測されるなまの値  $m_0$  に、吸収物質による減光量  $a$  の補正をしなければならない。すなわち

$$m = m_0 - a \quad (2)$$

である。なお  $m - M$  の値を距離指数という。

一方、天体の実直径を  $D$ 、視直径を  $d''$  (ラジアンでは  $0.485 \times 10^{-5} d$ ) とすると

$$r = D / (0.485 \times 10^{-5} d) \quad (3)$$

である。 $D$  が pc 単位なら  $r$  も pc であることはいうまでもない。

銀河の中で見わけのつく星や星雲などの天体のうち、絶対等級または実直径がわかっているものが、すなわち銀河の距離指標として利用されることになる。そのような天体のおもなものは、つぎのようである。

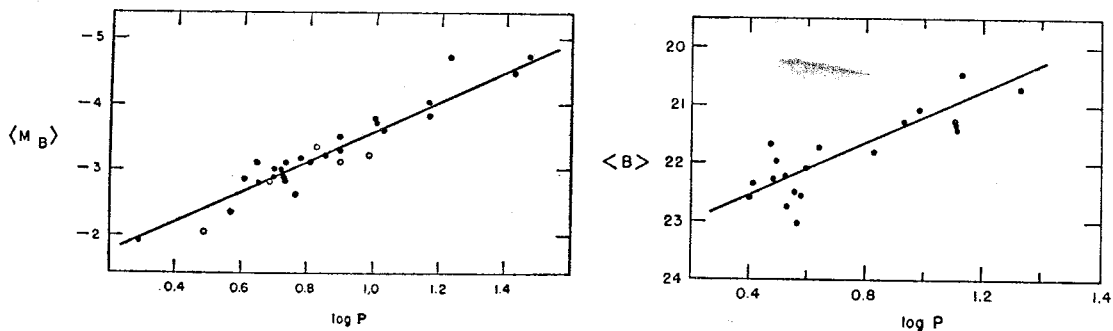
### a) セファイド

セファイドの周期・光度関係は、銀河系内のセファイドだけでなく、マゼラン雲やアンドロメダ銀河のものについてもよく成立つことがわかっている。銀河系のセファイドについては、たとえばクラフトの式：

$$\langle M_B \rangle = -1.33 - 2.25 \log P \quad (4)$$

\*Bunshiro Takase: 東京天文台  
Extragalactic Distance Scale

\*\*Mpc (メガパーセク) =  $10^6 \text{ pc}$  (パーセク) = 330 万年



第1図 銀河系(左)およびM31(右)のセファイドの周期・光度関係図

で、その関係が表わされる(第1図(左)参照)。ただし  $\langle M_B \rangle$  は  $B$  絶対等級の一周期間の平均値,  $P$  は変光周期(日単位)である。他方アンドロメダ銀河M31のセファイドについても、そのみかけの  $B$  等級の平均値  $\langle B \rangle$  と,  $\log P$  のあいだには、第1図(右)のような直線関係が得られ、これを式で表わすと

$$\langle B \rangle = 23.45 - 2.25 \log P \quad (5)$$

となる。直線の傾斜を示す  $\log P$  の係数は、銀河系のセファイドと全く同じであり、これは図からもうかがえる。そこで周期光度関係は両者で全く共通であると考えてもよいであろう。そうすると(4)と(5)の両式から

$$B - M_B = 24.78$$

が得られ、これはM31の距離指数にほかならない。

なお銀河系のセファイドについて成立つ周期・色指数関係もまたM31と共通であるとする、周期  $P$  の測定から、その本来の色指数  $(B-V)_1$  が得られる。一方、観測される色指数の値を  $(B-V)_0$  とすると

$$E_{B-V} = (B-V)_0 - (B-V)_1$$

はいわゆる色超過である。吸収物質による  $B$  等級および  $V$  等級への減光量  $a_B$  および  $a_V$  は、統計的にそれぞれ  $E_{B-V}$  の4倍および3倍という値であることが知られている。M31のセファイドについての  $E_{B-V}$  を平均すると0.15等となるので、 $a_B = 0.60$ ,  $a_V = 0.45$  を得る。そこでM31の本来の距離指数は

$$m - M = B - M_B - a_B = 24.18$$

となる((2)式参照)。

なお  $V$  等級についても同様な計算をすると

$$m - M = V - M_V - a_V = 24.62 - 0.45 = 24.17 \quad (7)$$

となり、(6)とよく一致する。そこで(6)と(7)の平均値  $m - M = 24.18$  を(1)に入れて距離に換算すると

$$r = 0.69 \text{ Mpc}$$

という値が得られ、これがすなわちM31の距離である。三角座の銀河M33, 大マゼラン雲LMC, 小マゼラン

雲SMCおよびIC1613もすべて局部銀河群のメンバーでセファイドが観測される。これらについて、M31と同様な方法で計算した距離指数と距離はつぎのようである。

|           |      |       |       |        |
|-----------|------|-------|-------|--------|
| 銀河        | M33  | LMC   | SMC   | IC1613 |
| $m - M$   | 24.3 | 18.4  | 18.78 | 24.2   |
| $r$ (Mpc) | 0.72 | 0.048 | 0.057 | 0.69   |

**b) 銀河の中の最も明るい星**

まず次表を見ていただきたい。a)で述べたセファイドおよびあとで述べる電離水素領域の大きさから求められた各銀河の距離指数、それぞれの銀河の中の最も明るい星と銀河全体のみかけの  $B$  等級(以上どちらも吸収量補正前の値)、およびこれらの値から計算したそれぞれの絶対等級  $M_B$  が記載されている。 $B_0$  および  $M_B$  の肩にある\*とGは、それぞれ最も明るい星と銀河全体についての値であることを示す。

| 銀河型         | M31  | M33  | LMC  | SMC  | IC1613 | NGC 2403 | M101 |
|-------------|------|------|------|------|--------|----------|------|
|             | Sb   | Sc   | Ir   | Ir   | Ir     | Sc       | Sc   |
| $B_0 - M_B$ | 24.8 | 24.7 | 18.7 | 19.0 | 24.3   | 27.6     | 27.7 |
| $B_0^*$     | 15.7 | 15.2 | 9.3  | 10.3 | 17.1   | 18.6     | 18.2 |
| $B_0^G$     | 4.3  | 6.2  | 0.6  | 2.8  | 10.0   | 8.8      | 8.2  |
| $M_B^*$     | -9.1 | -9.5 | -9.4 | -8.7 | -7.2   | -9.0     | -9.5 |
| $M_B^G$     | 20.5 | 18.5 | 18.1 | 16.2 | 14.3   | 18.8     | 19.5 |

この表の中で  $M_B^G$  が  $-18$  等より明るい5つの銀河についての  $M_B^*$  をみると、 $\overline{M_B^*} = -9.3 \pm 0.2$  等となって、よく揃っている。もう少し暗い小マゼラン雲を入れても  $\overline{M_B^*} = -9.2 \pm 0.3$  等で分散が小さい。そこで銀河の中の最も明るい星はよい距離指標になるといえよう。

ちなみにわが銀河系内の最も明るい星として知られているのは  $\delta^1 \text{ Sco}$  の  $-9.2$  等で、これも上の  $\overline{M_B^*}$  の値とよく一致している。

**c) 銀河内の最も明るい星団**

球状星団が銀河系の大きさをきめる上で重要な役割を

果していることについては、前号にも述べられたとおりである。球状星団 (Sc, Ir 銀河では散開星団) は非常に明るいので、よその銀河の中のものも観測可能であり、銀河の距離指標としても有力な候補といえよう。

ド・ヴォークルールは、局部銀河群中のいくつかの銀河について、それらの絶対等級  $M_B^0$  と、各々の中の最も明るい星団の絶対等級  $M_B^*$  についての、下表のようなデータから、それらのあいだのつぎの関係式をみちびいた。

$$M_B^* = -10.0 + 0.2 (M_B^0 + 21.0) \quad (8)$$

銀河 M31 銀河系 LMC NGC205 炉座系

$M_B^0$  -20.45 -19.5: -18.15 -15.8 -12.2

$M_B^*$  -9.75 -9.7 -9.4\* -9.0 -8.1

(表中: は不確定値,  $M_B^*$  の値のうち \* 印は散開星団, 無印は球状星団である。)

ただし局部銀河群中の銀河でも M33 や NGC185 などには (8) 式はあてはまらない。また銀河系の中の最も明るい星団 (オメガ・ケンタウリ) の  $M_B$  の値は、その中に含まれること座 RR 星型変光星の絶対等級  $M_B$  を +0.8 等として計算したものであるが、この値もまだ決定的なものでないことを注意しなければならない。

球状星団は乙女座銀河団中の楕円銀河 M87 にも多数が観測され、この M87 は 1 で述べた  $r \sim 10$  Mpc 程度の銀河であるので、ハッブル定数  $H$  の決定に役立つことになる (次号参照)。

#### d) 銀河の光度階級

渦巻銀河のうちの Sb, Sc および不規則銀河 (Ir) については、その渦巻の腕の発達程度と銀河の絶対等級のあいだにより相関のあることが、ヴァンデンバーグによって唱えられた。彼は露出のそろっているパロマー掃天図上の銀河の写真をもとに、それらを 5 つの光度階級に分類している。すなわち、渦状腕が非常によく発達してその表面光度も明るいものを I とし、ほとんど渦状構造の見られない、表面光度の低いものを V とし、そのあいだを II, III, IV とするのである (第 2 図参照)。この分類を、彼の所属する天文台 (カナダの David Dunlap Observatory) の頭文字をとって DDO 分類ともいっている。

さてヴァンデンバーグは次号で述べるようにそれらの赤方偏移・等級関係 (ハッブル図) をもとにして、DDO 分類と写真絶対等級  $M_{pg}$  の対応を、つぎのように与えた (: は不確定な値であることを示す)。

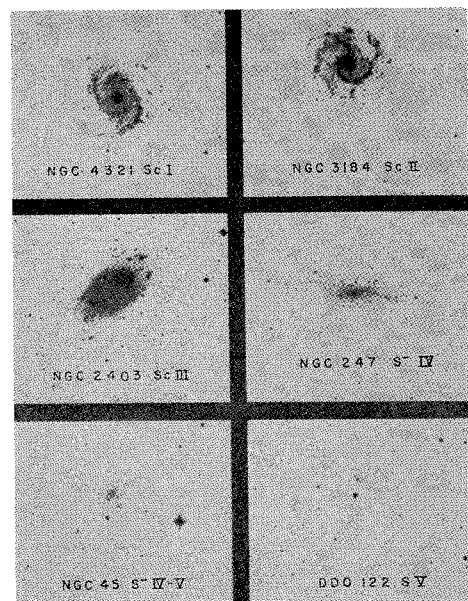
| 光度階級         | I     | II    | III   | IV     | VI-V   |
|--------------|-------|-------|-------|--------|--------|
| $M_{pg}$ {Sb | -20.4 | -19.4 | -18.0 | —      | —      |
| {Sc・Ir       | -20.0 | -19.4 | -18.3 | -17.3: | -16.1: |

ただしこの  $M_{pg}$  は赤方偏移・等級関係のハッブル定数  $H$  を  $100 \text{ kms}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$  として得た値なので、 $H$  の値が変れば上表の  $M_{pg}$  の値も変る。いずれにしても Sb, Sc および Ir の銀河では、渦巻の腕の発達程度が有力な距離指標となるわけである。

#### e) 電離水素領域の直径

Sb, Sc および Ir の銀河には、高温の O, B 型星のまわりの星間水素が電離して輝やく電離水素領域 (H II 領域) が見られる。距離  $r$  が既知ないくつかの銀河について、それぞれの最も大きい H II 領域の実直径  $D$  を、それらの視直径  $d$  から (3) 式で求めてみると、比較的よく一致した値が得られることがわかった。たとえばサンディージが M33 と LMC について測定した結果の平均値は、最も大きい H II 領域の直径  $D_1$  が 245 pc, また上位 5 つの H II 領域の直径の平均値  $\bar{D}_5$  は 175 pc である。

H II 領域の直径はこのようになり大きく、しかも明るいので、 $r=10$  Mpc の銀河でも最大のものが  $5''$  ぐらいの視直径になり、距離指標として有力である。実際にこれを乙女座銀河団中の M100 に適用すると、その中の H II 領域の最大のものの視直径が  $d_1=3.8$ , 上位 5 つの平均視直径が  $\bar{d}_5=2.5$  である。これらと上記の実直径の値から (3) 式で距離  $r$  を求めると、 $D_1$  と  $d_1$  からは 13.2 Mpc,  $\bar{D}_5$  と  $\bar{d}_5$  からは 14.4 Mpc となる。他の方法、たとえば最も明るい星の明るさから求めた距離も 14.4 Mpc でよく一致することがわかる。



第 2 図 Sc 型銀河の DDO 光度階級分類例