

# 銀河系内球状星団のデータベースの比較

## Comparison of Databases of Globular Clusters in the Milky Way

高橋 広治\*

Koji TAKAHASHI

### 1. 序論

球状星団は、数10万から数100万個の恒星が、その自己重力のもとに球状に集まっている恒星の集団である。我々の銀河系では、これまでのところ約150個の球状星団が確認されている。球状星団は非常に古い天体であり、銀河系本体の誕生と同時期に誕生したものである。そのような球状星団は、銀河形成や恒星の進化、恒星系の進化などを理解するうえで、重要な役割を担っている。

銀河系の個々の球状星団に対する観測的研究から得られた様々なパラメーターをまとめたデータベースとしては、Harris (1996) [1] によるものが広く使われている。彼のデータベースには、数多くの研究から得られた、距離、光度、色指数、速度、コア半径や半光度半径、金属量などの様々なパラメーターが集約されており、球状星団にかかわる研究を行う上で非常に有益なものとなっている。

また、このデータベースをより一層有益なものとしているのは、最初の出版後も、新たな観測結果を取り入れて継続的に更新されており、それがインターネット上に公開されている [3] という特長である。現時点における最新版は2010年版で、これは2003年版以来の改訂であったが、1回の改訂としてはこれまでで最も大きな改訂であるとHarris が述べている (Harris 2010) [2]。

高橋 (2005) [6] は、銀河系の球状星団の諸パラメーター (主に構造に関するもの) の間の相関関係を調べたが、これはHarrisの2003年版のデータベースに基づいたものであった。このような研究の結果は、当然ながら、使用したデータベースに依存する。そこで、本論文では、球状星団の構造にかかわるパラメーターについて、Harrisの2003年版と2010年版のデータベースの間で、何ほどの程度の相違があるのかについて考察する。

また、2010年版の構造パラメーターに関しては、多くの球状星団についてMcLaughlin & van der Marel (2005) [5] の結果が採用されているが、彼らの研究では、いくつかのパラメーター決定の際に使われる力学モデルの違いが及ぼす影響が論じられている。本論文では、このモデルの違いによるパラメーター値の変化についても考察する。

### 2. Harrisのデータベースの2003年版と2010年版の相違

この節では、Harrisの2003年版データベースと2010年版データベースを比較する。これらは両方ともHarrisのWebページ [3] で公開されている。本論文で比較するのは、球状星団の構造にかかわるパラメーターである。

まず、掲載されている球状星団の個数についてだが、2003年版では150個、2010年版では157個の

\* 埼玉工業大学人間社会学部情報社会学科

球状星団が掲載されている。2010年版で新たに加わったのは、Whiting 1、Koposov 1、Koposov 2、FSR1735、BH261、GLIMPSE-01、GLIMPSE-02の7個である。2003年版と2010年版の比較は、両方で共通している150個の星団について行う。ただし、パラメーターによっては、データが存在していない星団もあるので、150個より少ない星団についての比較となる場合もある。

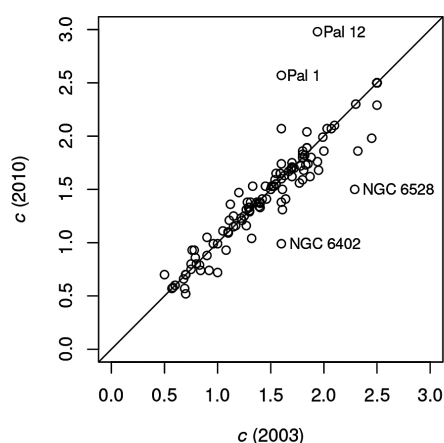


図1：中心集中度  $c$  に関する、Harrisのデータベースの2003年版と2010年版の比較。横軸が2003年版の値で、縦軸が2010年版の値。2つの値の差の絶対値が0.5以上ある星団については、点の右横に星団名を示している。

図1に示したのは、星団の中心集中度  $c$  の比較である。横軸が2003年版の値で、縦軸が2010年版の値である。各星団について両方の値が一致する場合は、点是对角線の直線上に乗る。なお、中心集中度  $c$  は、星団のコア半径  $r_c$  と潮汐半径  $r_t$  から、 $c = \log_{10}(r_t/r_c)$  として定義されるパラメーターである。

2つの版の間の差は、大部分の星団についてはそれほど大きくないが、いくつかの星団については、目立った差が見られる。図1において点の右横に星団名を示したのは (Pal 1、Pal 12、

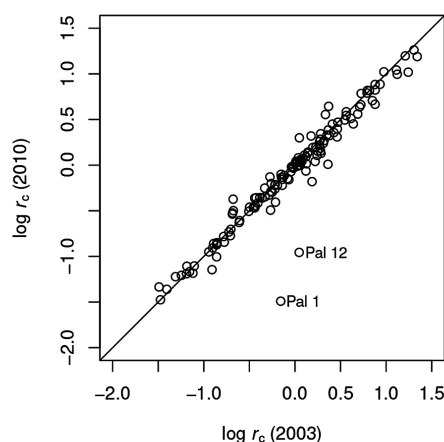


図2：コア半径  $r_c$  [pc] に関する図1と同様の比較。2つの値（対数值）の差の絶対値が1.0以上ある星団については、点の右横に星団名を示している。

NGC 6402、NGC 6528)、2つの値の差の絶対値が0.5以上あるものである。

図2に示したのは、星団のコア半径  $r_c$  の比較である。グラフの縦軸・横軸はパーセク (pc) 単位の値の対数である。星団名が示されている2つの星団は、2つの対数值の差の絶対値が1.0以上あるものである。これら2つ、Pal 1とPal 12は、図1においても差が大きいものとして現れていたが、中心集中度  $c$  はコア半径に直接的に依存しているので、これは当然の結果と言える。Pal 1とPal 12に対する値は、McLaughlin & van der Marel (2005) [5] によるものだが、これらの星団については、フィットの程度は必ずしも良くないもので、そこから導かれたパラメーターの信頼性には注意が必要である。

なお、中心集中度は潮汐半径  $r_t$  にも依存するが、潮汐半径は2003年版まではデータが掲載されていたものの、2010年版では省略されている。これは、潮汐半径は他のパラメーターに比べて、星団の構造を表すモデルに対する依存性がずっと強いことが明らかになったから [2] ということである。このモデル依存性については、3節で議論する。

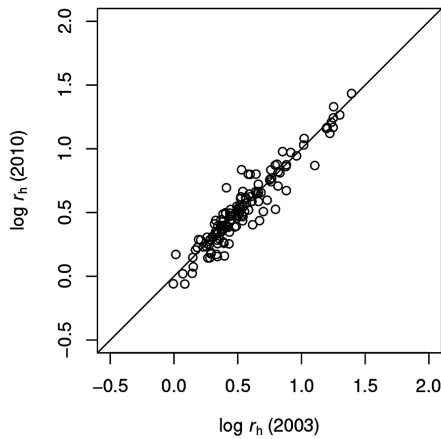


図3：半光度半径 $r_h$  [pc]に関する図1と同様の比較。2つの値（対数値）の差の絶対値はすべて0.4より小さい。

図3に示したのは、星団の半光度半径 $r_h$ の比較である。グラフの縦軸・横軸はパーセク (pc) 単位の値の対数である。半光度半径については、差が特別に大きい星団はない。2つの対数値の差の絶対値は最大でも0.3程度である。

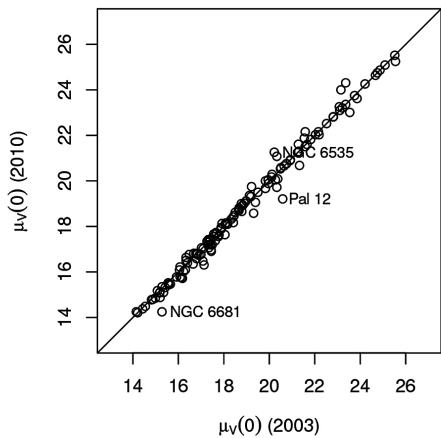


図4：中心表面輝度 $\mu_V(0)$  [mag/arcmin<sup>2</sup>]に関する図1と同様の比較。2つの値の差の絶対値が1.0以上ある星団については、点の右横に星団名を示している。

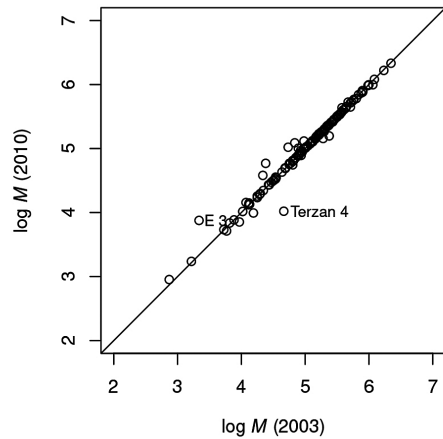


図5：星団質量 $M$  [ $M_\odot$ ]に関する図1と同様の比較。2つの値（対数値）の差の絶対値が0.5以上ある星団については、点の右横に星団名を示している。

図4に示したのは、星団の中心表面輝度 $\mu_V(0)$ の比較である。単位はmag/arcmin<sup>2</sup>である。中心表面輝度については、差が特別に大きい星団はない。2つの値の差の絶対値は最大でも1.4程度である。

図5に示したのは、星団の質量 $M$ の比較である。グラフの縦軸・横軸は太陽質量 ( $M_\odot$ ) 単位の値の対数である。星団名が示されている2つの星団 (E3、Terzan4) は、2つの対数値の差の絶対値が0.5以上であるものである。全体的には2つの値の差は小さいといえる。

なお、星団質量そのものはHarrisのデータベースには掲載されていない。ここでは、すべての星団について、質量光度比 ( $M/M_\odot$ )/( $L/L_\odot$ ) は2であると仮定して、星団の絶対実視等級を質量に換算した。この質量光度比はHarrisが星団の緩和時間を計算する際に用いたものである。

### 3. King モデルとWilson モデルの相違

McLaughlin & van der Marel (2005) [5] は、85個の銀河系内球状星団ならびにLMC、SMC、

Fornax銀河の68個の星団について、星団の表面輝度分布を3種類の力学モデルでフィットすることによって、コア半径などのパラメーターを求めた。3種類の力学モデルとは、Kingモデル、Wilsonモデル、べき乗則モデルである。Kingモデル (King1966 [4]) は、球状星団に対して伝統的にもっとも頻繁に用いられてきたモデルである。Wilsonモデル (Wilson 1975 [7]) はその変形版であり、星団の中心付近ではKingモデルとほとんど変わらないが、Kingモデルよりも広がったハローを持つという特徴がある。べき乗則モデルは、先の2つのモデルと異なり、形式的には無限に広がるハローを持つモデル、すなわち、潮汐半径が無限大のモデルである。

McLaughlin & van der Marel (2005) [5] は、研究の結果、大部分の星団について、WilsonモデルがKingモデルと同程度に、もしくは、それ以上に良く表面輝度分布をフィットすることができる結論した。また、べき乗則モデルは、しばしばWilsonモデルと同程度に良くフィットするが、星団によってはかなり悪いフィットになる場合があると結論した。

そこで、この節では、Kingモデルによる結果とWilsonモデルによる結果について、2節で行ったのと同様な比較を行う。なお、Harrisの2010年版のデータベースには、Kingモデルによる結果が掲載されている。

図6に示したのは、中心集中度  $c = \log_{10}(r_t/r_c)$  の比較である。横軸がKingモデルによる結果で、縦軸がWilsonモデルによる結果である。中心集中度  $c$  がモデルに強く依存することは、この図から明らかである。ほぼすべての星団について、Wilsonモデルの方が、より大きい  $c$  の値をもたらしている。以下で明らかになるように、これは主として、Wilsonモデルの方がより大きな潮汐半径  $r_t$  の値をもたらすことに起因するものである。

なお、例外の程度が大きいのはPal1であるが、

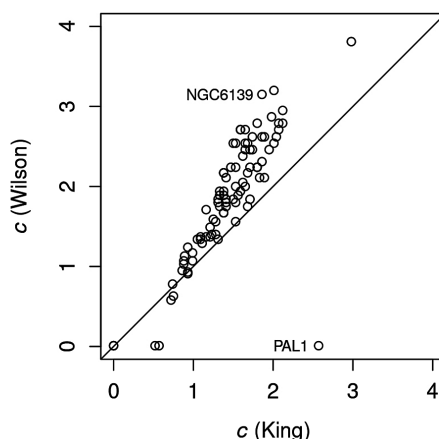


図6：McLaughlin & van der Marel (2005) がKingモデルを使って求めた中心集中度  $c$  の値と、Wilsonモデルを使った求めた同パラメーターの値の比較。2つの値の差の絶対値が1.2以上ある星団については、点の左横に星団名を示している。

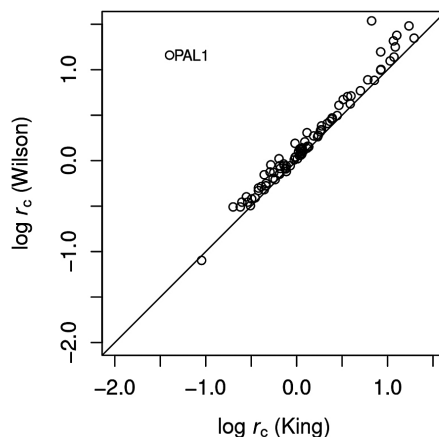


図7：コア半径  $r_c$  [pc] に関する図6と同様の比較。2つの値 (対数値) の差の絶対値が1.0以上ある星団については、点の右横に星団名を示している。

この星団については、中心部付近の表面輝度分布のデータが十分ではないために、モデルによる違いが極端に大きく現れてしまっているものと考えられている [5]。

図7に示したのは、コア半径  $r_c$  に関する比較である。ほとんどの星団について、Kingモデルに

比べて、Wilsonモデルの方がより大きなコア半径を与えることがわかるが、その違いは大体的場合において、それほど大きくない。ここでも例外はPal 1である。

なお、McLaughlin & van der Marel (2005) [5] の論文においては、本論文およびHarrisのデータベース [3] におけるコア半径に当たるものは、スケール半径 $r_0$ として表記されている。図7に示したのは、彼らの $r_0$ である。また、彼らの論文においてコア半径 $R_c$ と表記されているのは、表面光度密度が中心部の半分になる半径のことであるので、注意が必要である。

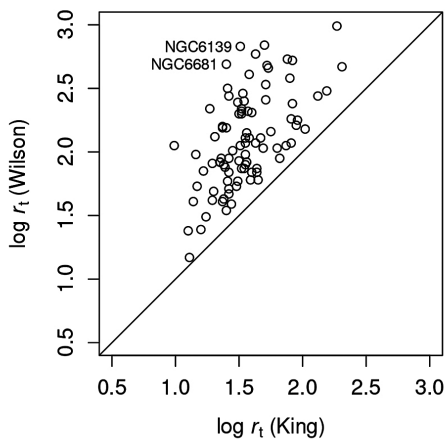


図8：潮汐半径 $r_t$  [pc]に関する図6と同様の比較。2つの値（対数値）の差の絶対値が1.2以上ある星団については、点の左横に星団名を示している。

図8に示したのは、潮汐半径 $r_t$ に関する比較である。すべての星団について、Wilsonモデルの方がより大きな潮汐半径を与えている。しかも、その違いの程度はかなり大きい。図6で見られる中心集中度の違いの主原因は、この潮汐半径のモデル依存性である。

このように潮汐半径の決定はモデルに大きく依存することが判明したために、Harrisは2010年版のデータベースにおいては、そのデータを掲載す

ることをやめたのである [2]。潮汐半径は、星の分布密度が実質的にゼロになる半径ということがその定義であるから、観測的に正確に定めることにはそもそも限界があるパラメーターである。

中心集中度 $c$ は、Kingモデルにおいては、中心ポテンシャルの深さと1対1に対応する量であることから、星団内の星の分布の「中心集中度」を表すパラメーターとして使われてきた。しかし、今見たように、観測的に定める潮汐半径はモデルに強く依存するので、星団の「中心集中度」を表すパラメーターとして、この $c$ は必ずしも適当ではないと言える [5]。

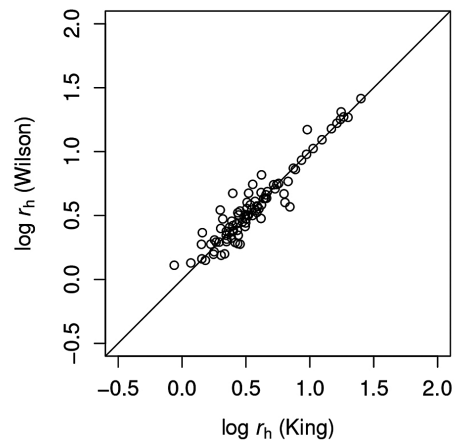


図9：半光度半径 $r_h$  [pc]に関する図6と同様の比較。2つの値（対数値）の差の絶対値はすべて0.3より小さい。

図9に示したのは、半光度半径 $r_h$ に関する比較である。半光度半径についても両モデルの結果に多少の違いは見られるが、その平均的なばらつきの程度はそれほど小さくなく、また、系統的にどちらかにずれているということもない。つまり、使用するモデルにあまり影響を受けないパラメーターと言える。

図10に示したのは、中心表面輝度 $\mu_V(0)$ に関する比較である。Pal 1を除いて、両モデルの違

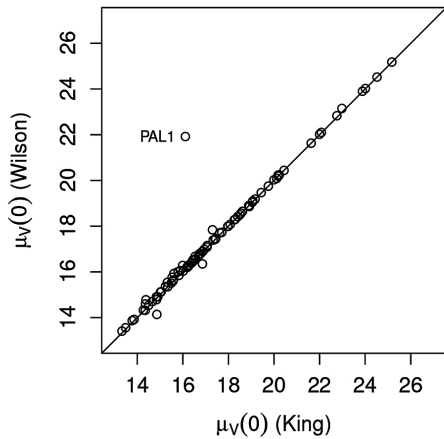


図10：中心表面輝度 $\mu_V(0)$  [mag/arcmin<sup>2</sup>] に関する図6と同様の比較。2つの値の差の絶対値が1.0以上ある星団については、点の左横に星団名を示している。

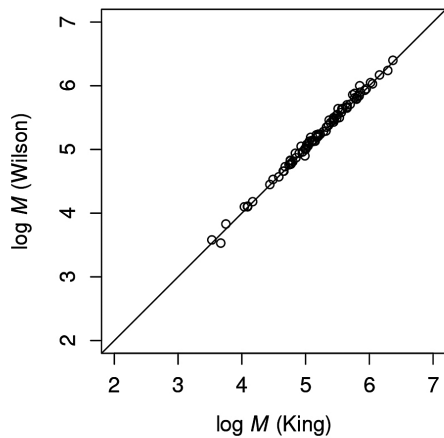


図11：星団質量 $M$  [ $M_\odot$ ] に関する図6と同様の比較。2つの値（対数値）の差の絶対値はすべて0.2より小さい。

いは小さい。Pal 1 は、Kingモデルの場合に中心表面輝度が非常に明るくなっているが、これはKingモデルでフィットした場合は非常に小さなコアが得られる結果となったからである [5]。

図11に示したのは、星団質量 $M$ に関する比較である。星団質量のモデルによる違いは小さいと言

える。なお、McLaughlin & van der Marel (2005) のデータベースでは、Harrisのデータベースの場合と違い、星団質量そのもののデータが掲載されている。その星団質量は、星団ごとに求めた質量光度比に基づいたものである。

最後の図である図12は、各星団の質量 $M$ と半光度半径 $r_h$ を1つの図の上を示したものである。白四角はKingモデルによる結果、白丸はWilsonモデルによる結果であり、各星団についてKingモデルの点からWilsonモデルの点に向かって矢印を引いている。

この図を示したのは、質量と半光度半径のモデルによる変化に加えて、2体緩和時間のモデルによる変化を同時に示すためである。2体緩和による星団の力学的進化のタイムスケールを表す指標としては、半光度半径における緩和時間 $t_{rh}$ がよく使われる（定義式は [5] を参照）。星の平均質量がどの星団でも一定（ここでは具体的には $0.5 M_\odot$ ）と仮定すると、緩和時間 $t_{rh}$ は $M$ と $r_h$ だけで決まる。すなわち、この緩和時間がある一定の値をとるという条件は、図12の上ではある1つの曲線に対応する。図12では、緩和時間が $10^8$ 、 $10^9$ 、 $10^{10}$ 、 $10^{11}$ 年となる曲線を点線で示している。

図12の平面上で考えると、モデルの違いによる差異の大きさは、示した矢印の線の長さに対応する。この図から、矢印の長さが長いものについては、図上でほぼ垂直方向に矢印が伸びていることがわかる。緩和時間との関係で言うと、緩和時間の大きな変化は、大部分が半光度半径の変化に起因していることがわかる。これには、緩和時間が $M^{1/2} r_h^{3/2}$ におおよそ比例することも関係している。

緩和時間のモデルによる違いは、大きいもので2～3倍の違いである。これは、球状星団の誕生から現在までの約 $10^{10}$ 年間の進化を考えるとときには、無視できない違いである。



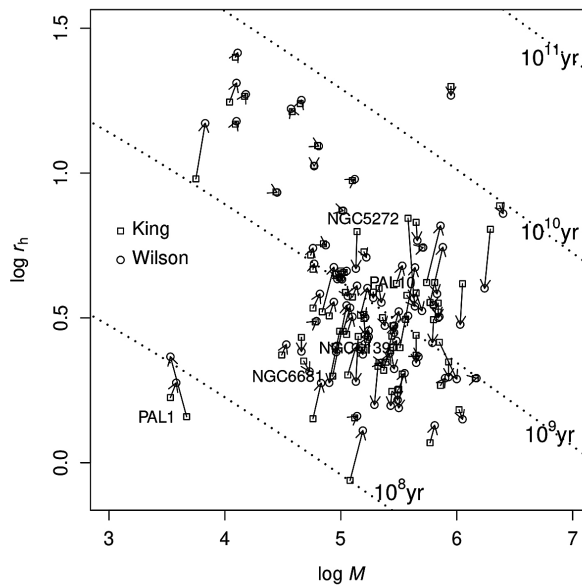


図12: McLaughlin & van der Marel (2005) が求めた各星団の質量 $M$  [ $M_{\odot}$ ] と半光度半径 $r_h$  [pc]。白四角はKingモデルによる結果、白丸はWilsonモデルによる結果であり、各星団についてKingモデルの点からWilsonモデルの点に向かって矢印を引いている。この図上で両モデルの差異が特に大きい星団については、Kingモデルの点の左横にその星団名を示している (NGC 5272、NGC 6139、NGC 6681、PAL 1、PAL 10の5個)。図中の点線は、半光度半径における緩和時間 $t_{rh}$ が一定の値 ( $10^8$ 、 $10^9$ 、 $10^{10}$ 、 $10^{11}$ 年)をとる曲線である。

#### 4. 結論

本論文では、銀河系内の球状星団の種々のパラメータをまとめたデータベースとして広く使われているHarris (1996) [1] のデータベースについて、その2003年版と2010年版 [2, 3] の相違を検証した。検証したパラメータは、中心集中度、コア半径、半光度半径、中心表面輝度、星団質量といった、星団の構造にかかわるものである。検証の結果、表面輝度分布のモデル・フィッティングに問題がありそうな星団を除けば、大部分の星団については、2つの版の間の差はそれほど大きくないことがわかった。

次に、Harrisの2010年版のデータベースでも採用されているMcLaughlin & van der Marel (2005) [5] の結果から、パラメータのモデル依

存性について確認した。Kingモデルから求めたパラメータとWilsonモデルから求めたパラメータとを比較した結果、潮汐半径ならびにそれに直接依存している中心集中度 $c$ についてはモデル依存性が大きいことが確かめられた。それとは逆に、半光度半径や星団質量は、モデルにあまり依存しないことが確認された。

#### 参考文献

- [1] Harris W. E., "A catalog of parameters for globular clusters in the Milky Way", *Astron. J.*, vol. 112, p. 1487, 1996
- [2] Harris W. E., "A new catalog of globular clusters in the Milky Way", arXiv:1012.3224, 2010
- [3] Harris W. E., "Catalogs and Manuals", <https://www.physics.mcmaster.ca/~harris/>

Databases.html

- [4] King I. R., "The structure of star clusters. III. Some simple dynamical models", *Astron. J.*, vol. 71, p. 64, 1966
- [5] McLaughlin D. E., van der Marel R. P., "Resolved massive star clusters in the Milky Way and its satellites: Brightness profiles and a catalog of fundamental parameters", *Astrophys. J. Suppl.*, vol. 161, p. 304, 2005
- [6] 高橋広治, "球状星団の諸パラメータの間の相関関係: 統計環境Rを用いたデータ解析", 埼玉工業大学人間社会学部紀要, 第3号, p. 123, 2005
- [7] Wilson C. P., "Dynamical models of elliptical galaxies", *Astron. J.*, vol. 80, p. 175, 1975