

記念講演会要旨

電波望遠鏡データ解析

統計数理研究所 石 黒 真木 夫

(平成 2 年 11 月 2 日, 統計数理研究所 講堂)

これから紹介するのは、「統計数理研究所共同研究」の一環として国立天文台の研究者と共同して行っている研究の内容です。科研費のお世話にもなっています。

図 1 をご覧下さい。これが電波望遠鏡です。大きなお皿のような形のアンテナが並んでいます。これらのアンテナで宇宙から来る電波を「見」ます。

見るといっても電波は本当は見えません。どの方向からどの程度の強さの電波が来るのかを調べて、その結果を図にするのです。たとえば図 2 のような図を作るのが電波で見るということです。これは電波の強さを色で表現したコンピュータで作った絵です。青に近い色が電波の弱い領域を示し、赤に近い色が電波の強い領域を示しています。図 3 のような電波の強さの等高線図にすることもあります。図 3 はオリオン (図 4) の三ツ星の下、大星雲の近くから来る電波の強度を示します。図 3 の OriKL の部分をさらに詳しく見たのが図 2 です。

このような図を描くときに統計学が役に立つというのが今日のお話の主題ですが、このように電波で見るということがどういう意味を持っているのかを紹介しておいたほうが良いでしょう。

図 2 を見て、天文学者は図 5 のようなことが起こっていると考えます。IRc2 は太陽の 20 から 30 倍位の質量を持つ星です。その星のまわりを円盤状に硫化炭素 (CS) の雲が回っています。電波の周波数から CS であることが分かるのです。円盤に含まれる CS の質量は電波の強さで分かります。また、ドップラー効果によって円盤の回転の方向と速さが分かります。

この星は生まれたばかりの星だと考えられています。電波で見ることによって星が生まれる過程でどういうことが起こっているのか見ることができるといわけです。

これは電波望遠鏡で見えることのほんの一例です。この例だけでも電波望遠鏡が天文学者にとって大切な道具であることは明らかでしょう。

いよいよ図 2 や図 4 の写真がどういうふうにしてできるかという話にはいりましょう。衛星放送で使われるパラボラアンテナを思い浮かべて下さい。

パラボラアンテナには指向性があって、電波の来る方向に向けると電波が受信できますが、はずれると受けられません。電波望遠鏡の向きを変えながら電波の強さを調べることによって電波源の分布が分かります。図 3 はそういうやり方で作られています。家庭用のパラボラアンテナに比べてずっと大きいアンテナで受信機の性能もはるかに良いものが使われますが、原理は単純なのです。

アンテナの指向性はパラボラの直径が大きいほど鋭くなります。それで電波源の細かい構造を調べるために非常に直径の大きいアンテナが作られるようになりました。しかし実際の構造物として建設可能なパラボラの大きさには限りがあります。建設可能なパラボラの分解能には限りがあるのです。図 3 で示されている部分のごく一部を詳しく調べると、図 2 に示したような構造が見えるのですが、図 3 を拡大するだけでは図 2 にはなりません。このような細かい構



図1. 国立天文台の電波望遠鏡。長野県野辺山。背景は八ヶ岳（石黒正人氏提供の写真）。

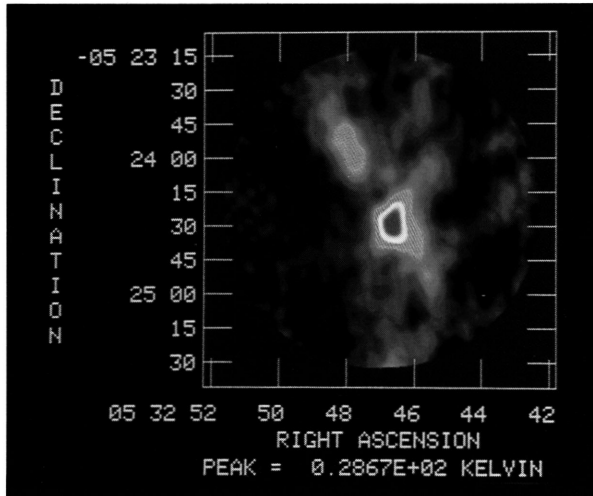


図2. オリオン分子雲のCS(硫化炭素)のJ=1-0輝線スペクトル線の強度分布図。電波の強さを色で表現。青に近い色が電波の弱い領域を示し、赤に近い色が電波の強い領域を示す(Murata et al. (1991)より転載)。

造は1台のパラボラアンテナを使って調べるわけにはいきません。

1台のパラボラアンテナの分解能の限界以上の細かい構造を見るために開発されたのが電波干渉計です。図1に見えているように何台かのパラボラアンテナが1組になって1台の電波干渉計を構成します。電波干渉計のことを電波望遠鏡と言うことがあります。実は表題の「電波望遠鏡データ解析」は「電波干渉計データ解析」の意味なのです。

図6に電波干渉計による観測の原理を示します。パラボラアンテナが3つあるとします。皆、同じ方向を向いています。各パラボラアンテナには同じ Δa の範囲から来る電波が受信されます。小さいけれど、ある1点からの電波ではなく、ある広がりをもった範囲から来る電波の平均値が観測されるのです。

3台は同じ方向を向いているので、I, II, IIIの位置で電波の強さを測ると、皆同じで変化は

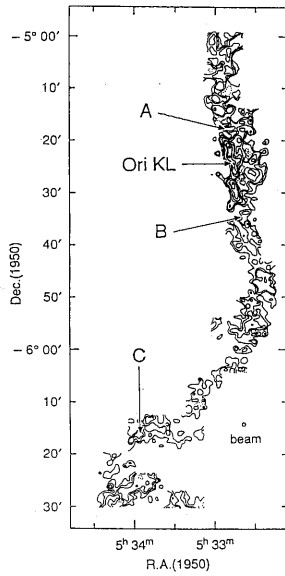


図3. CS (J=1-0) 輝線スペクトル線で見えたオリオン分子雲の地図. 等高線図. この図のOriKLの部分をもさらに詳しく見たのが図2 (立松 他 (1990) の図2を転載).

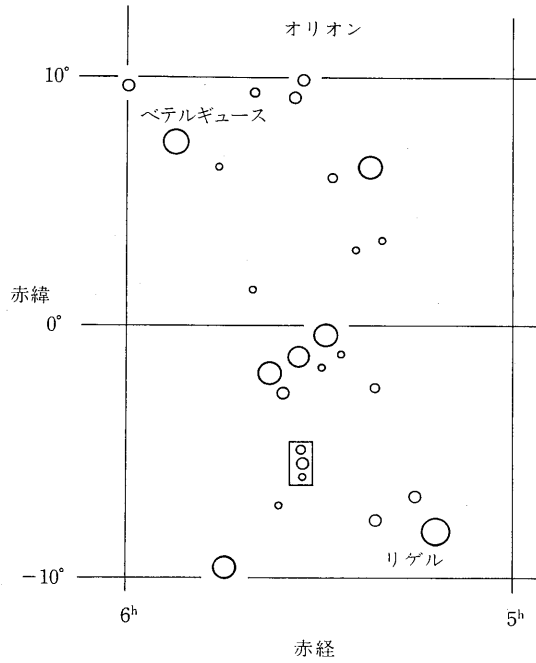


図4. オリオン座. 四角の中を電波で見たのが図3.

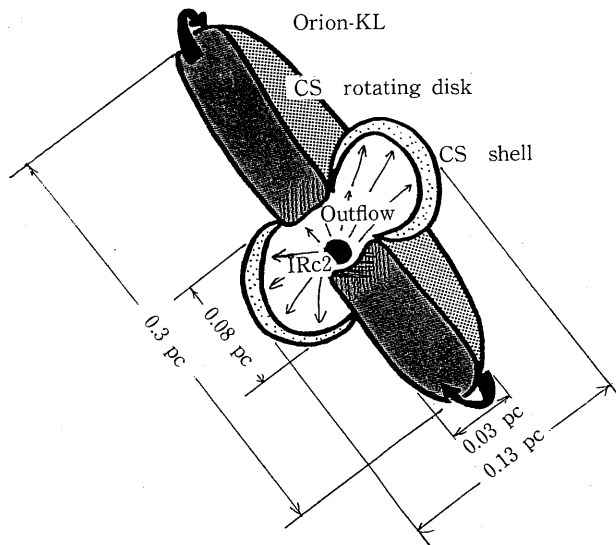


図5. オリオンKLの回転ディスク (提供 村田泰宏氏).

ありません。しかし、 l_1 、 l_2 に示したように視野の異なる部分から来る電波の波面の向きが違うために、視野内の異なる部分から来た電波が各望遠鏡に到着する時間に差があります。その結果、I、II、III の各部分に到着する信号の強度は同じでも、その波形が違います。

その違いのために、I と II の信号の相関をとった信号 IV と、II と III の信号の相関をとった信号 V、I と III の信号の相関をとった信号 VI は皆違った強度を持つことになります。その強度は電波源の構造と相関をとる 2 つのパラボラアンテナの相対的な位置関係によって決まるもので、1 台の望遠鏡では見ることのできない電波源の細部構造に関する情報を含んでいます。

数学的に言うと、このようにして得られるデータはもとの電波源分布のフーリエ変換像の平

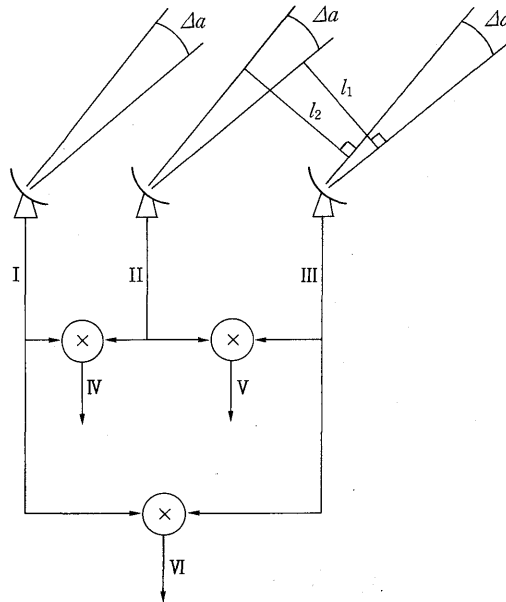


図6. 電波干渉計による観測の原理。

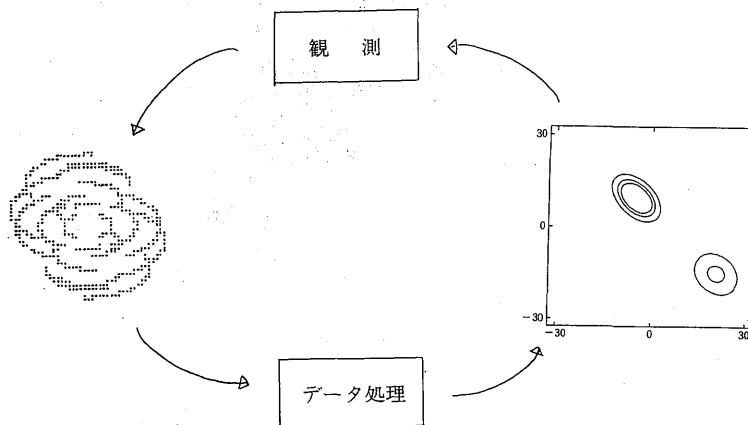


図7. 電波干渉計による観測とデータ処理。左の方の点が観測点の分布を示す。地球の回転を使っているために、観測点が曲線状に並んでいる。

面 (uv 平面と言います) のある点における値になります。1 対のアンテナから 1 つの複素数が得られます。観測点の uv 平面上の位置は 2 つのアンテナの相対位置で決まります。アンテナの数が多ければ相対位置の異なる様々な組合せが可能になり、たとえば 5 台のアンテナによる 1 度の観測で 10 個の観測点における観測値が得られます。

同じ配置のアンテナ群であっても観測を継続することによって別の観測点におけるデータが手にはいります。地球が自転しているために、地上のアンテナ群の宇宙に対する向きがまわるからです。図 7 の左側にこのようにして得られる観測点の分布を示します。地球の回転を使っているために、観測点が曲線状に並んでいます。

電波望遠鏡データ解析の問題は、数学的には、限られた点におけるフーリエ変換の値からもとの図を回復する問題ということになります。

電波天文の分野で広く使われている方法があります。まずデータの無い部分の値を 0 とおいて逆フーリエ変換をしてしまうのです。そうすると本当の電波源分布のぼけた像ができます。このぼけを修正する方法が CLEAN という手法です。ぼけた像から少しずつ本当と思われる構造を取り出す手続きとしてプログラムされています (図 8)。この手続きをいつ止めるかが大きな問題です。

図 6 の右側に示す電波源分布を想定して人工的に作ったデータにこの手法を適用すると、CLEAN をいつ止めるかによって図 9 に示すような様々な答が出てきてしまいます。これまでこの決定は研究者の主観的判断にまかされていました。CLEAN を適当なところで止める客観

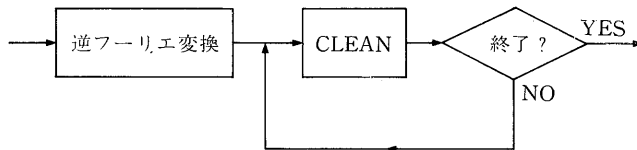


図 8. CLEAN 法。ぼけた像から少しずつ本当と思われる構造を取り出す手続き。この手続きをいつ止めるかが大きな問題。

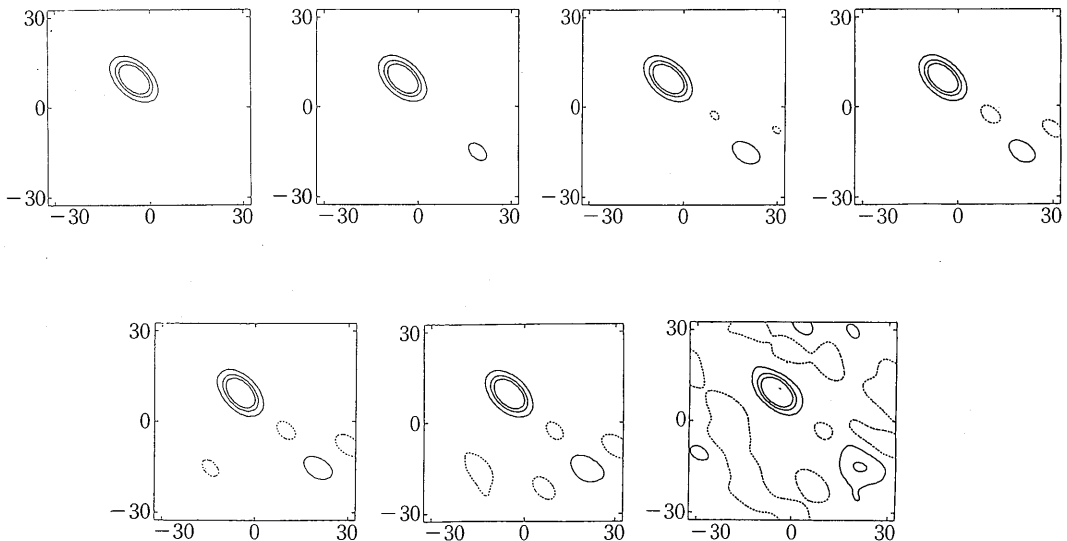


図 9. CLEAN 法の結果。CLEAN をいつ止めるかによって様々な答が出てしまう。

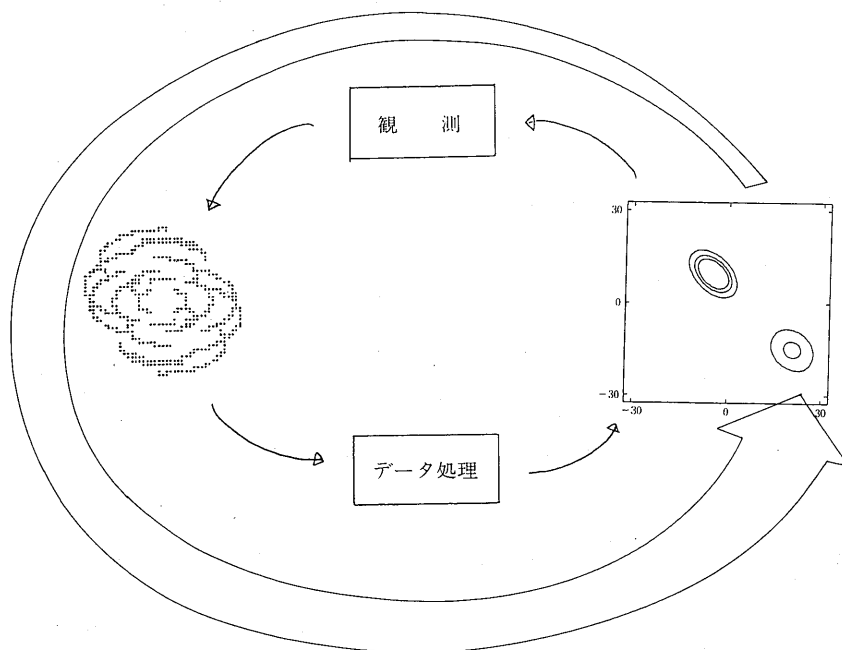


図 10. 観測とデータ解析.

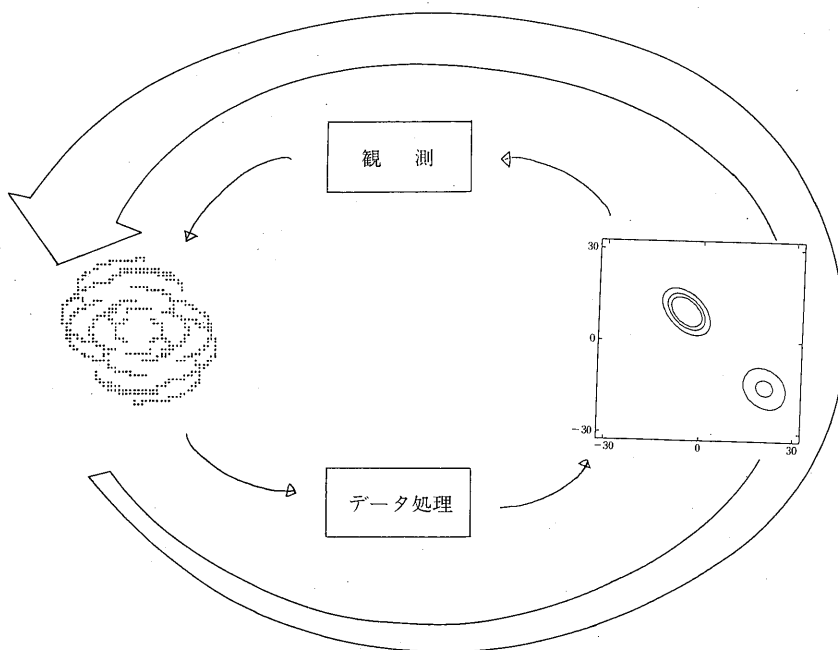


図 11. 統計学の視点.

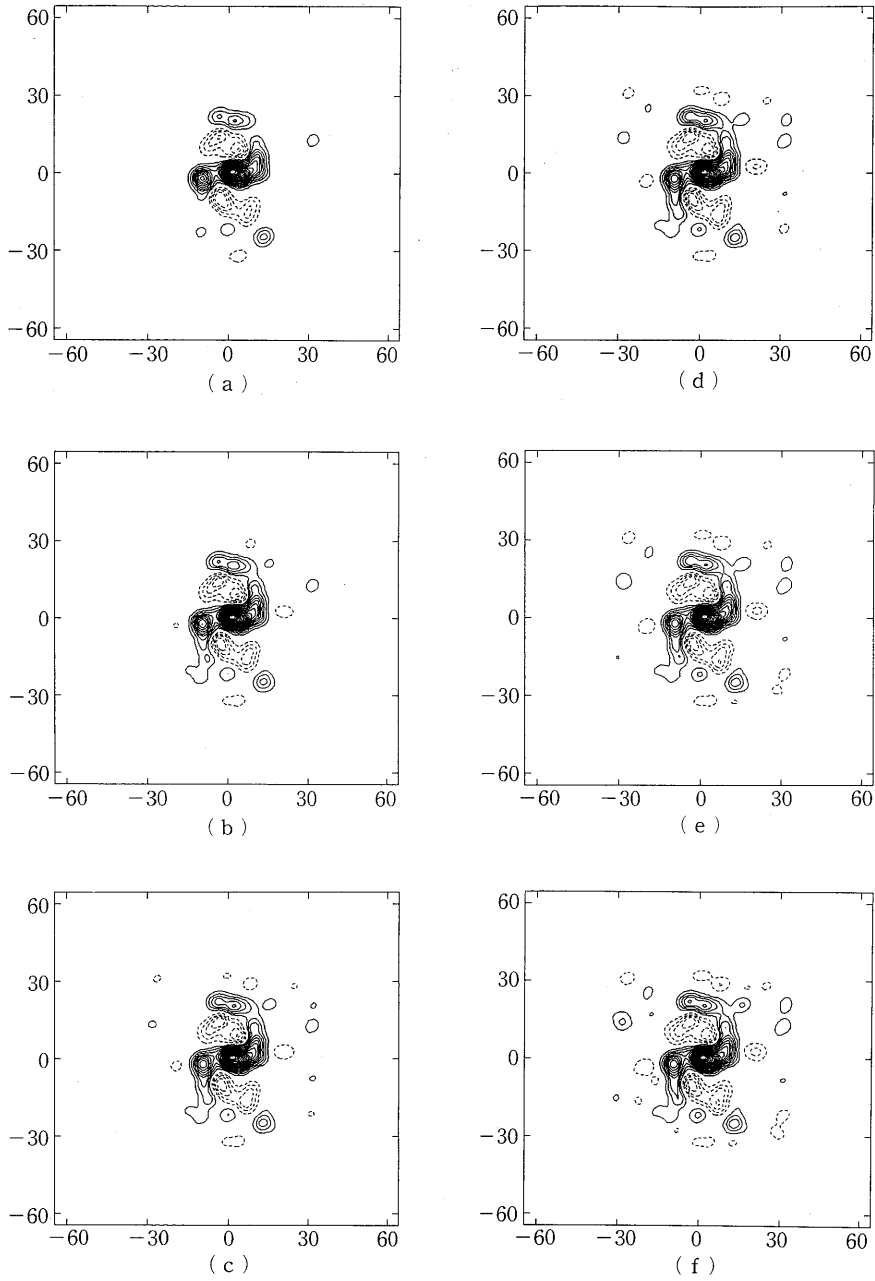


図12. CLEAN法による電波源分布の推定のシミュレーション実験。(a) CLEAN法を200ステップで止めた場合、(b) CLEAN法を400ステップで止めた場合、(c) CLEAN法を600ステップで止めた場合、(d) CLEAN法を800ステップで止めた場合、(e) CLEAN法を1000ステップで止めた場合、(f) CLEAN法を1200ステップで止めた場合。

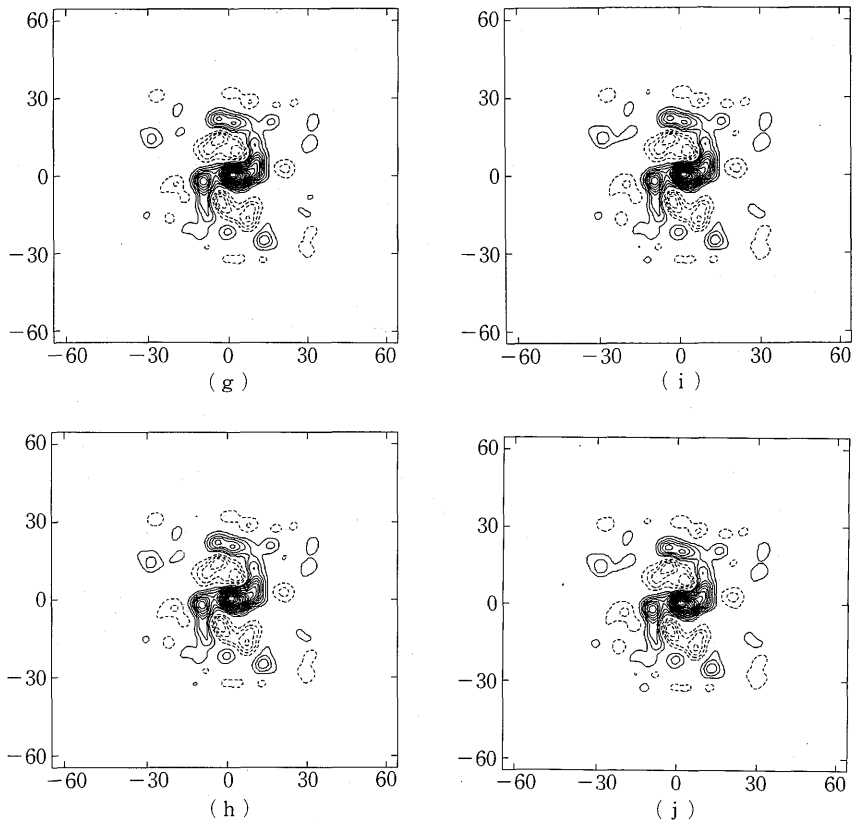


図12. (つづき) (g) CLEAN法を1400ステップで止めた場合, (h) CLEAN法を1600ステップで止めた場合, (i) CLEAN法を1800ステップで止めた場合, (j) CLEAN法を2000ステップで止めた場合.

的な規準が必要です。

このようにある現象を観測して得たデータに基づいてもとの現象に関する推測を行うということは、電波望遠鏡に特有のものではなく、どの科学の分野にもあることです(図10)。データに基づいて推定された対象の構造と真の構造がなるべく近くなるように観測系とデータ処理の手法を工夫することが重要な課題になります。図10に示すループがなるべく良い性質を持つように観測装置とデータ処理法の設計をするということです。

図11に示すように出発点を変えたループが良い性質を持つように設計すれば良いとも考えることができます。手持ちのデータから推定される現象の姿が今の観測値をうまく説明できるような良いループを構成するということです。図10のループが個別科学の視点であり、図11の見方が統計学の視点であると言って良いでしょう。

統計学の見方の利点はループの良さを評価するためにデータと確率分布の近さを計る統一的な規準が採用できるということです。たとえば情報量規準という規準を使うことができます。個々の現象ごとに特殊な規準でループの評価をする必要がないのです。

情報量規準の‘真の値’を計算するためにはデータの真の分布を知ることが必要です。そのためには観測の対象の真の構造と観測系の統計的性質に関する知識が要求されます。これは無理な注文のように思われます。

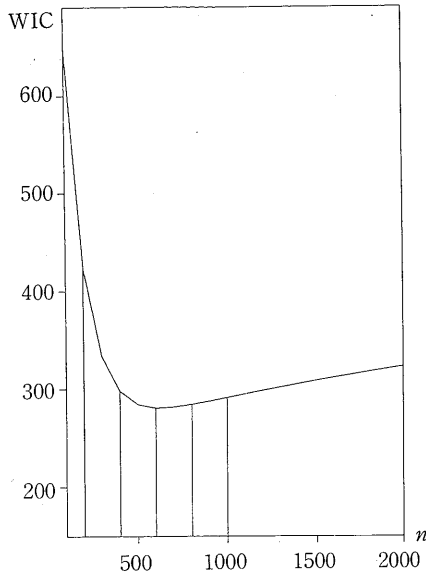


図 13. WIC の値。これで見ると CLEAN を 600 ステップあたりで止めるのが妥当。

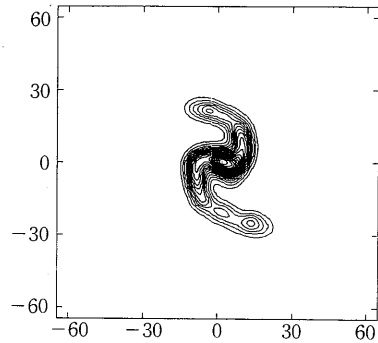


図 14. シミュレーションで使った電波源分布の真の構造。

しかし、1973年に赤池によって、情報量規準の推定量が AIC という統計量で与えられることが発見されました。赤池によって提案された AIC は、普通、モデル選択の規準であると言われていて、それに間違いはありませんが、図 11 に示されているようなループの良さを情報量規準で評価するものであると解釈することが許されると思います。

ただし、AIC が計算できるためには図 11 におけるデータ処理が最尤推定法であることが必要であり、今の電波望遠鏡データ解析の CLEAN 法を含むループの評価には適用できません。

ここで方法は 2 つあります。1 つは CLEAN 法をあきらめて最尤法を使うことにすることで、もう 1 つは最尤法でない場合にも情報量規準が推定できるようにすることです。

赤池はデータ処理に最尤法が採用されているときの図 11 のループの性質を紙とエンピツ(と数式)を使って調べました。それが可能であったのは最尤法という方法が非常に良い性質を持っているためで、CLEAN 法の場合にこのループの性質を紙とエンピツを使って調べることは不可能です。

最近色々な分野で、解析的な手段で計算をすすめるかわりに計算機を使用して数値的に答を出してしまう方法が可能になってきました。統計学の分野でもエフロンという人が考えたブートストラップという方法がその種の方法として最近さかんに行われています。

調べてみると図 11 のようなループの情報量規準による評価の推定値を求めるのにブートストラップ法が使えることが分かってきました。少し変化させたデータをループに通してやって何が起るかを観察する方法だと説明しておきましょう。このようにして計算される情報量規準の推定値に WIC という名をつけます。AIC の A は赤池の頭文字ですが WIC の W は Wong という人の頭文字です。詳しくは別にか書く予定の論文をお読み下さい。

WIC を CLEAN の停止規準として使ってみましょう。図 12 にある構造の電波源を観測したデータを処理して CLEAN 法を 200 ステップで止めた場合から 2000 ステップで止めた場合までを示します。図 13 に対応する WIC の値を示します。これで見ると CLEAN を 600 ステップ

あたりで止めるのが妥当ということになります。

実はこのデータはシミュレーションで作ったデータで、真の構造は図14のような形をしています。かなりノイズの多いデータであり、CLEAN法を使うのなら600ステップで止めるのは確かに妥当であると判断されます。今まで主観的判断で処理されてきたCLEANの停止が統計的な規準で扱えるようになったわけです。

以上で電波望遠鏡のデータ解析の話が終わりますが、途中でふれたように統計的な規準で図11のようなシステムを最適化するという方法の適用範囲は非常に広く、情報量規準を使いやすくすることによって統計的情報処理の範囲は益々広がって行くと思われま

参 考 文 献

- 赤池弘次(1976). 情報量規準 AIC とは何か — その意味と将来への展望 —, 数理科学, **155**, 5-11.
立松健一, 梅本智文, 亀谷 取, 平野尚美, 砂田和良(1990). 45 m 電波望遠鏡でオリオン座を探る, 天文月報, **83**(9), 261-266.
Murata, Y. et al.(1991). IAU Symposium No.147, Fragmentation of molecular clouds and star formation(eds. E. Falgarone and A. Omont), Reidel (in press).