

線虫の発生プログラムにおける細胞死の制御

杉本 亜砂子 (生物化学専攻)

sugimoto@ims.u-tokyo.ac.jp

すべての人にいつか死が訪れるように、個体を構成している一つ一つの細胞も何らかのかたちで死んでいく。ヒトの死因が多様であるのと同様に、細胞にも老衰・病死・自殺・他殺・事故死などにたとえられるような様々な死に方がある。そのなかで私が興味を持っているのは、発生過程の中であらかじめプログラムされている細胞の自殺、すなわち「プログラム細胞死」あるいは「アポトーシス」と呼ばれているものである。プログラム細胞死は、形態形成や変態、過剰に作られた神経細胞・免疫細胞の除去など、発生におけるさまざまなプロセスで重要な役割を果たしている。

私たちはプログラム細胞死を研究するために、線虫 *C. elegans* をモデル系として用いている。*C. elegans* の細胞数は成虫でもわずか959個しかなく、受精卵から成虫になるまでに細胞がどのように分裂していくかという「細胞系譜」が完全に明らかにされている。しかも細胞系譜には全く個体差がなく、細胞死がいつどこで起きるかがあらかじめ分かっているのである。他の実験生物にはないこの特徴によって *C. elegans* はプログラム細胞死研究のモデル生物としてかねてより注目され、H. R. Horvitz らのグループが中心となってプログラム細胞死の制御機構の遺伝学的解析が進められてきた。その結果、CED-3 と呼ばれるタンパク質分解酵素（哺乳類ではカスパーゼと呼ばれる）を中心とした細胞死誘導経路が明らかになり、その経路が線虫からヒトに至るまで進化的に保存されていることが示されている。

プログラム細胞死の制御に関与する主要因子が同定さ

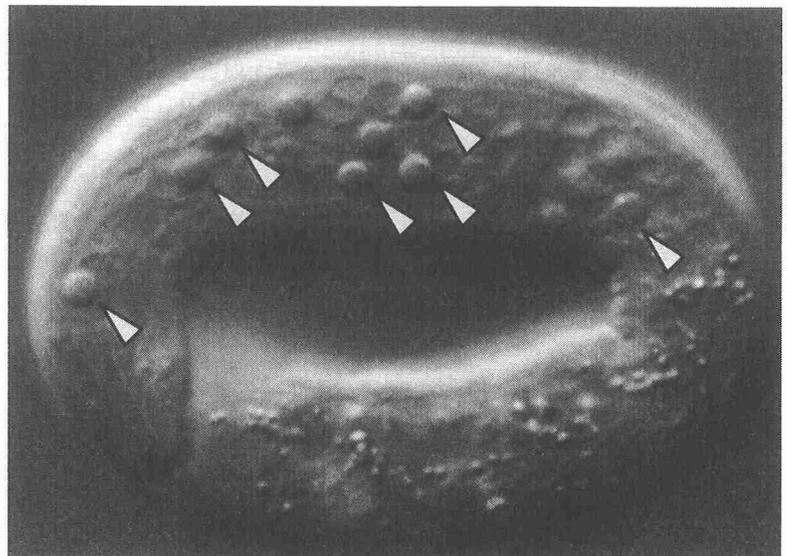
れたことは非常に大きな進歩ではあるが、まだ多くの問題が残されている。これまでに明らかになっているのは実は細胞死を引き起こすスイッチに相当する部分であって、個々の細胞において細胞死スイッチの ON/OFF がどのように決められているのか、また、細胞死スイッチが ON となった後に細胞内で何が起きているのかについては不明な部分が多い。私たちは、細胞死スイッチの上流・下流で何が起きているかを遺伝子レベルで明らかにするために、胚発生過程において細胞死の起きるパターン（数・場所・時期）の異常や、死んだ細胞の形態異常を示す突然変異体を網羅的に分離し、その原因遺伝子の同定を進めている。

最近私たちは、細胞死が起こる時期が全体的に遅れる *cdl-1* 突然変異体の原因遺伝子を同定した。*cdl-1* 遺伝子は、染色体構成成分であるヒストンの転写後発現調節に関与する脊椎動物 Stem-Loop Binding Protein (SLBP) の相同遺伝子であった。*cdl-1* 遺伝子機能を初期胚で破壊するとヒストンの発現が低下したときと同様な染色体凝縮不全が観察され、CDL-1 タンパク質が他の生物の SLBP と同様にヒストン発現に関与していることが示唆された。*cdl-1* 変異体でみられる細胞死が遅れるという表現型もヒストンの発現低下（およびそれに付随する染色体構造の異常）に起因するのかどうかについては現在解析を進めている。*cdl-1* をはじめとする細胞死関連突然変異体およびその原因遺伝子を解析することにより、発生プログラムにおける細胞死の制御機構の全体像が見えてくると期待している。

図 胚発生後期の *C. elegans*

(微分干渉顕微鏡像)

プログラム細胞死で死んだ細胞は平らなボタン状に見える（矢頭）。この個体は死細胞の貪食に異常がある変異体であるため、野生型よりも多くの死細胞が蓄積している。



植物は紫外線を利用している？

近藤 矩 朗 (生物科学専攻)

nr-kondo@biol.s.u-tokyo.ac.jp

いまから30数億年前に海中で誕生した生物が陸上に進出したのは約4億年前と言われている。当時、成層圏オゾン層は既に形成されていたが、現在と比べると薄く、地上にはかなり強い紫外線が降り注いでいたと考えられる。紫外線のうち、波長の短いUV-Cはオゾン層によりカットされ、UV-B領域(290~320nm)の紫外線がいまよりも大量に降り注いでいたはずである。UV-Bは生物にとって強い害作用があり、DNAに損傷を引き起こし、生物を死に至らしめることがある。培養細胞に、現在地上に到達している程度のUV-B量を照射すると、細胞分裂を止めたり、染色体に異常を起こすなどの障害が現われる。したがって、生物が陸上に進出するに際し、UV-Bに対する防御機構を強化・発達させたはずである。防御機構として良く知られているのは、DNA損傷の修復機構で、除去修復や光回復などがある。また、生物が陸上に進出すると、同時に高濃度の酸素に曝されることになった。生物は誕生とともに活性酸素(毒性の高い酸素分子種)に対する防御機構を既に獲得していたことは知られているが、陸上への進出の際に、活性酸素に対する防御機構をさらに強化したと思われる。

1980年代に入って南極のオゾンホールが発見されて以来、成層圏オゾン層の破壊が社会問題になった。オゾン層が減少すると地表面に到達するUV-B量が増えることになり、これによる生態系への影響が懸念された。UV-B量が増加すれば、植物の生育は低下すると考えられ、これを確かめるために、室内および野外において、UV-Bを付加したり、カットして太陽光あるいは人工可視光を植物に照射する実験が行われた。結果は様々であった。UV-B増加により成長が阻害されたり、枯死する場合もあったが、植物種によってはほとんど影響を受けない場合もあった。さらに、UV-Bの増加により成長が促進される場合も決して少なくなかった。それにもかかわらず、UV-Bの成長促進効果に注目した研究者は極めて少なく、最近になって、UV-Bにより作物の収穫が増加した例などが公に認められるようになり、UNEPの報告書にも取り上げられた。しかしながら、植物へのUV-Bの影響は一定ではなく、同じ植物種を用いても必ずしも同じ結果が得られるとは限らない。UV-Bの影響は植物の種や品種によって異なるほかに、植物のエイジ

や温度、光強度などの環境要因の影響を強く受ける。例えば、キュウリの幼植物体の場合、25°Cではほとんど影響がないのに、20°Cで顕著な成長阻害が見られた。

私たちは、キュウリの第一本葉がUV-B照射を受けると早い時期から除草剤のパラコートに対して極めて高い耐性を獲得することを見いだした。パラコートは活性酸素の生成を促進する薬剤である。紫外線を受けた植物葉内では活性酸素の生成が増大することが報告されていたが、通常条件では、現在の太陽光紫外線によって活性酸素に特有な障害が生じているようには思われない。紫外線は植物葉内にフラボノイドと呼ばれる一群のフェノール性物質を蓄積させる。フラボノイドは紫外線を吸収することによって植物の紫外線防御に関わっていることが知られているが、一方で、抗菌作用を示したり、活性酸素の解毒に関与することが報告されている。また、UV-B照射を受けると、活性酸素の解毒に関与する種々の酵素の活性が増大することが、いくつかの植物種で報告されている。確認はされていないが、おそらく、キュウリ以外の植物種でもUV-B照射により同様な活性酸素耐性を示すと考えられる。したがって、活性酸素を多量に生成する条件(例えば、乾燥、強光など)では、紫外線を受けた植物の方がこれらの環境要因の影響を受けにくくなり、一見、紫外線の影響が他の環境要因によって変動したように見える場合もあったと思われる。上に述べたように、植物が陸上に進出した際に、強い紫外線と高濃度の酸素に同時に曝されたため、植物がさらに強力な活性酸素解毒システムを構築するために紫外線を利用するようになったと考えても、それほど無理はないように思われる。

最近、対流圏におけるフロン濃度の増加が止まり、減少傾向に転じたことが報告された。将来、成層圏オゾン層の破壊が停止し、オゾン層が1970年代の状態に回復したとしてもUV-Bが到達しなくなることはない。UV-Bが他の環境要因の影響を緩和する一方で、他の環境要因が、UV-Bに対する防御機構のどれかに影響を与える可能性がある。UV-Bに対する植物の防御機構の詳細や、防御機構に対する環境要因の影響を明らかにすることは、将来の環境影響の予測や植物の環境応答の理解のために重要であろう。

細胞がそれ本来の固有の形態をつくるための機構

松井 泰 (生物科学専攻)

matsui@biol.s.u-tokyo.ac.jp

エレガントな方法による発見の報告は、聞いていても報告していても気持ちのよいものであるが、その意味で、遺伝学的解析法というものは、生命のカオスの中から、新しい発見の糸口を見い出すのにエレガントな方法と考えている。近年、two-hybrid 法により蛋白質の結合を判定することが可能となり、遺伝学的方法のみでは、証明しづらかった蛋白質間の直接の相互作用が簡便に検出できるようになってきた。したがって、遺伝学的解析法が高度に発達している出芽酵母を用いた研究は、いまや、芸術的とまでいえるような研究が可能になってきているように思う。芸術といえば、天才がつきものであるが、それとは無縁の筆者としては、苦しい闘いながら、その手法を用いて、出芽酵母細胞が固有の形、構造を獲得するための機構を研究している。

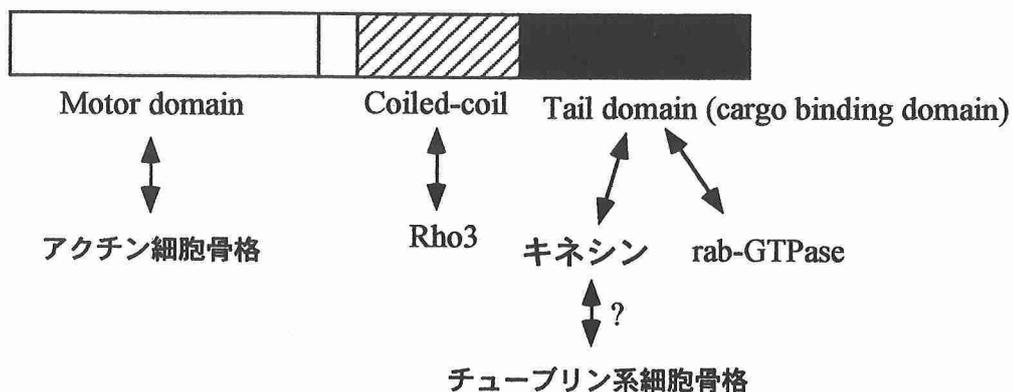
細胞がその本来の形を形成するには、きちんとした場所の細胞表層を伸長させ、細胞内小器官を正しく配置するための機構が必要であり、それには極性輸送の系が確立されることが必須である。そのためには、1) アクチン系、チューブリン系の細胞骨格とその上を移動するモーター蛋白質、2) 細胞骨格系を制御する rho 型 GTPase 経路、3) 細胞内の膜系の行き来を制御する rab 型 GTPase 経路、が重要な働きをしていると考えられる。そして、これら3者がどのように協調をとりあって働いているかが興味のあるところである。

アクチン細胞骨格の上を走るモーター蛋白質であるミオシンのうち、クラスVに分類されるミオシンVは、哺乳動物から出芽酵母にいたるまで、極性輸送に重要な働きをしていることがわかっている。そして、チューブリン系細胞骨格上を走るモーター蛋白質であるキネシンと結合することが報告されている。筆者らが解析している

rho 型 GTPase の一つである Rho3 が、細胞表層伸長部位の決定、すなわち細胞表層伸長機構のターゲティングに関わっており、その標的因子の一つが出芽酵母のミオシンVである Myo2 であることがわかってきた。博士課程の伊藤敬君が Myo2 の解析を進め、Myo2 と遺伝学的相互作用を示す因子として、未解析の rab 型 GTPase を同定したが、この rab 型 GTPase は、two-hybrid 法により Myo2 と結合活性を示す因子としても同定され、Myo2 と結合して機能を高進させる働きがあることがわかった。突然変異を導入し、いろいろな Myo2 変異株の単離解析をおこなった。その結果、*myo2-338* と *myo2-573* という対照的な2つの *myo2* 変異を同定した。Myo2-338 は、この rab 型 GTPase とは結合しなくなりキネシンと強固に結合する。Myo2-573 は、逆にキネシンとの結合は検出されないもののこの rab 型 GTPase とは、強固に結合するようになっていた。そして、ミオシン機能を発現するのに、Myo2-338 は、キネシンを必須とし、Myo2-573 は、rab 型 GTPase を必須とした。これらのことより、Myo2 は、キネシン依存的なモードと rab 型 GTPase 依存的に働くモードがあることがわかった。

これらの解析やいままでの報告より、ミオシンVが細胞骨格系、rab-GTPase 経路、rhoGTPase 経路の3つの接点となる因子であることが強く示唆される。種々の突然変異 Myo2 を単離することで、動的に働いているであろう Myo2 の瞬間的な姿をフリーズして解析できることがわかったので、さらなる突然変異 Myo2 の単離、解析を通じて、3つの複雑な経路の協調が Myo2 を通じてどのように行われているかを調べてゆきたい。

Myo2



植物細胞の増殖の特性

長田 敏行 (生物科学専攻・附属植物園)

nagata@biol.s.u-tokyo.ac.jp

真核細胞に共通する細胞増殖機構のあることは、最近の細胞周期の研究から明らかになってきた。植物細胞には、それに加えるにかなり特徴的な増殖の特性があることも次第に明らかになってきた。このような特性の解明には私共が手掛けているタバコのBY-2細胞株が、大きく貢献しているが、一般には馴染みがないと思うので、少しだけ触れる。1980年以来より始められたBY-2細胞の研究は多方面で展開されたが、特に植物細胞として最も増殖速度が速く、またこのため植物細胞として唯一の高度な細胞周期の同調が可能なる実験系ということで、世界中に広まり、私の確認する限りでも、少なくとも24か国200余の研究室で使われている¹⁾。

BY-2細胞は、培地に植物ホルモンの一種である合成オーキシンの2,4-Dを加えてやることにより盛んな増殖を行なうが、培地中の2,4-Dを除くと、細胞分裂は完全に停止する。この細胞に再度2,4-Dを加えると、DNA合成を経由して、細胞分裂が再開し、半同調的な細胞分裂が観察される。即ち、オーキシンは植物細胞の細胞増殖因子であるということが出来る²⁾。

ところが、BY-2細胞より由来した細胞株で、2B-13細胞と呼ばれているものがあり、この細胞株も私は1985年以来維持している。この細胞は、オーキシンを全く加えないで盛んに増殖する。こう書くと、読者の中には結局オーキシンは増殖に不可欠ではないのではと思われる方も居るかもしれないが、実は、この現象は植物細胞組織培養の創始者の一人であるパリ大学のゴートレ (R.-Gautheret) により1943年に発見され、その後多くの研究によってもその正体が不明の馴化 (ハビチュエーション) と呼ばれている現象で、決してオーキシンが不必要というわけではない。但し、馴化細胞といわれる中にも、自らオーキシンを生産するものがあることが知られているので、2B-13細胞でもオーキシンの生産量を調べてみたが、その結果は、BY-2細胞と変わらないか、あるいはそれより低くなっていた。すなわち、2B-13細胞は定義通りの典型的な馴化細胞であり、植物ホルモンに対して独立栄養になっているということが出来る。そこで、2B-13細胞では、通例増殖に必要なオーキシンが何故不要であるにもかかわらず盛んな増殖をするかの

研究を進めた。これらの答えが、植物細胞の特徴的増殖機構解明へと繋がると期待されるからである。そこで、2B-13細胞の培養濾液を、上に述べたオーキシン飢餓状態で細胞分裂を全く停止しているBY-2細胞に加えたところ、2,4-Dを加えないのに細胞分裂の復活が見られた。この実験は、2B-13細胞の培地中には、オーキシン飢餓により細胞分裂が出来ない細胞に細胞分裂活性を誘導する物質があることを示している。そこで、培地中の活性成分を同定するために、その一般的な物性を調べたところ、熱に安定であるがタンパク質であろうという推定が得られた。しかも、その分子サイズは相当大きいということで、ゲル濾過法により分画を行なったところ、分子サイズによりその成分は分画できたが、興味あることに特定の分画のみがオーキシン飢餓BY-2細胞に細胞分裂活性を賦与できたことである。結論的には、この活性成分は、分子量29kDaのタンパク質と言うところへ到達し、下図の様な作業仮説を提案した。驚くべきことに今までこの様な高分子で細胞分裂活性を有するものは全く報告されていないことであり、もしこれで馴化が説明できれば年来の難問解決ということになる。しかし、研究としてはここでこのタンパク質の特性を同定して、初めて論文にする価値があるということで今その途次にある。この物質の意義、そこから帰結される結論をなお待たねばならない。幸いに、この予報的な結果は、最近あったEMBOワークショップでも好評で、BY-2細胞の他に2B-13細胞もこれを契機に世界ブランドになる気配も見える。

最後に、今回の話題は、私の研究室のテーマとしては明確に掲げたことはこれまでなかったが、私自身は学生時代より暇を見ては細々と進めてきた課題で、ここへきて解決の兆しが見えたので、大学院生の江口君、斎藤君、それに西田助教授のテクニカルアドバイスを得て、形を整えてきたものである。生物現象のなかには、発見以来未だ手付かずの現象があることが伝わればと思ひ、未完ながら紹介した次第である。

1) *Methods Cell Sci.* 23, 123-127 (1999)

2) *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* 90, 11152-11156 (1993)

オーキシン → 物質 X(29kDa) → 細胞分裂
(馴化?)

植物の脱分化と器官再生の遺伝学的解剖

杉山 宗隆 (附属植物園)
sugiyama@ns.bg.s.u-tokyo.ac.jp

植物の組織片を適当な植物ホルモン（通常は比較的高濃度のオーキシシンとサイトカイニン）を含む培地上で培養すると、脱分化が誘導され、そのまま培養を続ければカルスが形成される。脱分化した組織片をさらにホルモン組成の異なる培地に移植すると、ホルモン環境に応じてシュート（苗条）や根などの器官を再生する。この脱分化から器官再生に至る過程には、植物の発生の根本を支える諸々の機構が集約的に動員されているはずである。私たちは、このような考えのもと、脱分化、器官再生を遺伝学的に解剖することで、植物の発生の基本機構を新しい視点で捉えようと、モデル植物シロイヌナズナを実験材料に、この現象に関わる突然変異体の収集と解析を行ってきた。

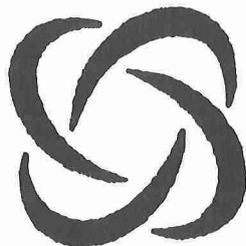
最初に単離したのは、*srd1*、*srd2*、*srd3* という3種の温度感受性変異体である。これらの変異体がそれぞれどのような現象のどの段階に関して温度感受性を示すかを詳細に調べ、その結果を整理して、各責任遺伝子 *SRD1*~*3* の働きを脱分化・器官再生過程に図1のように位置づけることができた。この中でとくに興味深いのは *SRD2* である。*SRD2* は、脱分化段階での増殖能獲得、シュートの形成、根の発達、と一見直接の関係がなさそうに思える複数の事象に関与するのである。*srd2* 変異体の側根形成を仔細に観察してみると、側根原基の形成は概ね正常だが、根端分裂組織の構築が温度感受性を示すことが分かった。この際制限温度下で形成された、分裂組織を欠く側根は、原基的な性質を保持したまま成長

を続け巨大な瘤となった（図2）。こうした *srd2* 変異体の表現型に基づいて、私たちは次のような作業仮説を立てている。すなわち、*SRD2* は増殖能レベルの励起全般に関与すること、頂端分裂組織の構築は（原基やカルスの形成に比べ）高いレベルの増殖能を要求すること、頂端分裂組織の構築が原基内の他の領域における細胞増殖を抑制すること。今後 *SRD2* 遺伝子の単離を一つの突破口に、増殖能の実体、分裂組織構築と細胞増殖制御の関係を解き明かしたい、と考えている。

脱分化・器官再生に関わる素過程を残らず遺伝学的に抽出するためには、3種類の突然変異体ではもちろんあまりにも少ない。その後新たな温度感受性変異体の探索を続けた結果、今では総数が60種類を数えるに至っている。ほとんどの変異体は、単離したばかりでまだ本格的な調査を行っていない。すべての変異体について一通りの解析が終わったとき、脱分化・器官再生過程の枠組みをどう理解できるのか、今から楽しみである。

参考文献

- I. Yasutani, S. Ozawa, T. Nishida, M. Sugiyama, and A. Komamine (1994) *Plant Physiology* 105, 815-822.
- S. Ozawa, I. Yasutani, H. Fukuda, A. Komamine, and M. Sugiyama (1998) *Development* 125, 135-142.
- M. Sugiyama (2000) *International Review of Cytology* 196, 67-84.



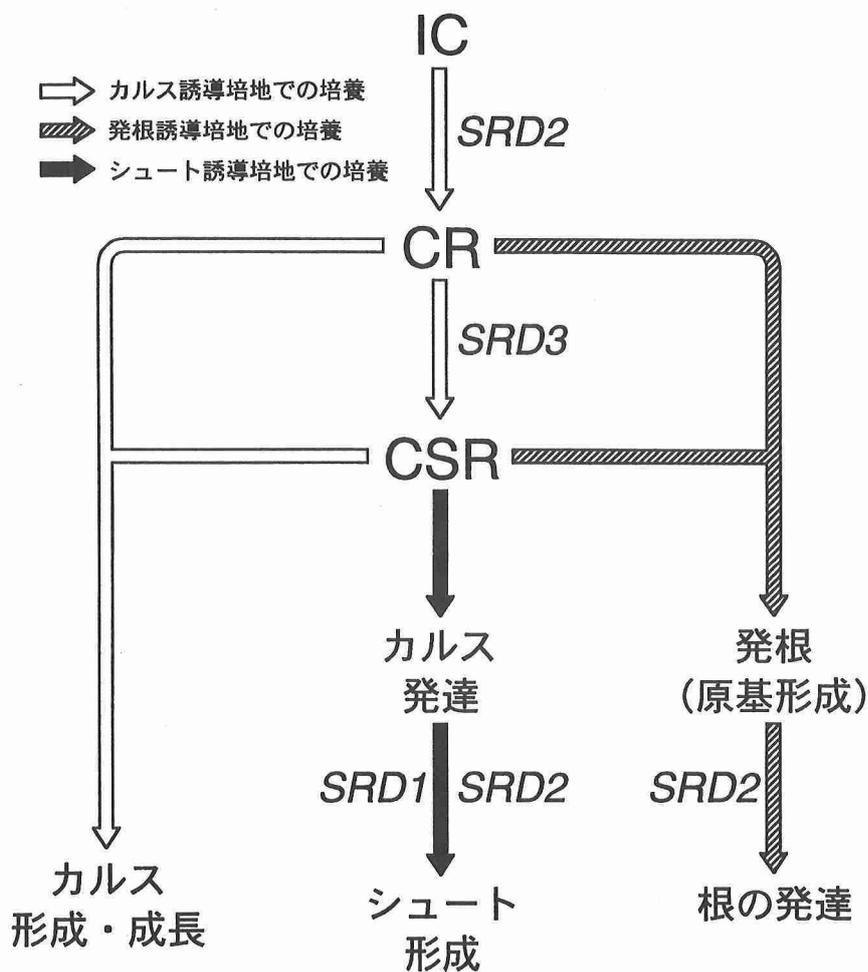


図1 脱分化・器官再生過程と *SRD* 遺伝子の関与

IC、CR、CSR は順に、増殖能・根分化能とシュート分化能のいずれも持たない状態、増殖能・根分化能は有するがシュート分化能は持たない状態、増殖能・根分化能とシュート分化能のいずれも備えている状態を表す。

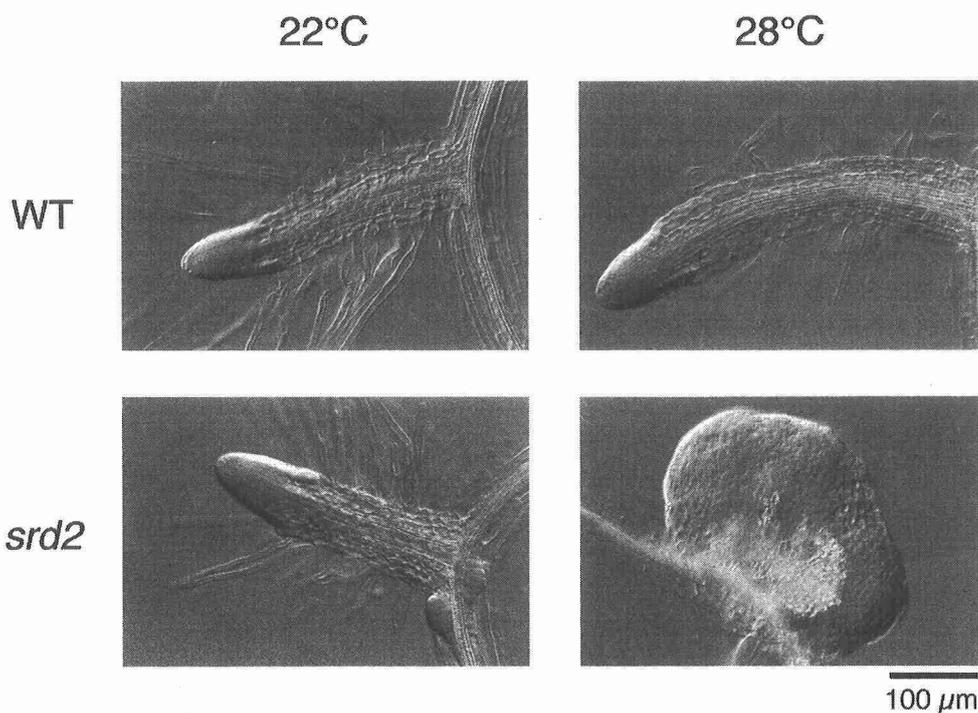


図2 側根形成に対する *srd2* 変異の影響

野生型 (WT) と *srd2* 変異体の主根外植片から、許容温度 (22°C) または制限温度 (28°C) で側根形成を誘導した。

近赤外水素分子振動回転輝線で見える星形成

田中 培生 (天文学教育研究センター)
mtanaka@ioa.s.u-tokyo.ac.jp

水素は最も軽い元素であり、数密度で宇宙の原子の90%ほどを占める豊富な元素である。実際、水素イオン、水素原子のスペクトルは広い波長範囲にわたって検出され、宇宙の様々な現象を解明してきた。一方、比較的低温・高密度のガスは水素分子として存在し、いわゆる分子雲（暗黒星雲とも呼ばれる）を形成している。星はこの分子雲中で原始星として生まれ、周囲のガスとの様々な相互作用を経て主系列星へと成長していく。星形成の初期質量関数—銀河の構造及び進化、さらに生命誕生の必然性をも左右する天文学の大問題—を知るために、星誕生の現象が様々な手法で研究されている。

さて、水素分子は質量が小さいため、回転遷移がミリ波ではなく赤外域に入ってくる。特に地上からの観測が可能で近赤外域には水素分子の振動回転遷移が豊富に存在し、ここ四半世紀、観測が行われてきた。しかし、複雑なことに、水素分子の励起機構には、全く異なる2種が存在する。つまり、この励起機構の決定なしには、この極めて重要な観測量が、物理現象の解明に役立たないどころか、大きな混乱を引き起こす。

2種の励起機構とは何か？ 一つは、衝撃波の通過などによって比較的高温になった分子ガスが分子間の衝突によりその温度に対応した振動・回転準位に励起される機構であり、もう一つは、紫外線の照射によって一度電子励起状態に励起された後、カスケード的に電子基底状態に戻る際に、その遷移確率に応じた再配置が起こるといった機構である。前者を熱励起、後者を紫外励起と呼ぶ。この両者は、多くの振動回転輝線を観測し、各準位の滞在数を知ることによって区別できるはずである。観測的特徴を簡単に述べると、熱励起の場合、振動温度、回転温度共に約2000Kと共通の値をとり、オルソ/パラ比は高温での熱平衡値である3を示す。一方、紫外励起の場合、分子ガスの温度・密度、さらにダスト上での形成過程などに依存するが、大まかには、高い振動温度、低い

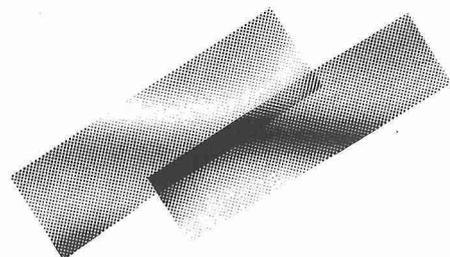
回転温度、3より有意に小さいオルソ/パラ比を示す。

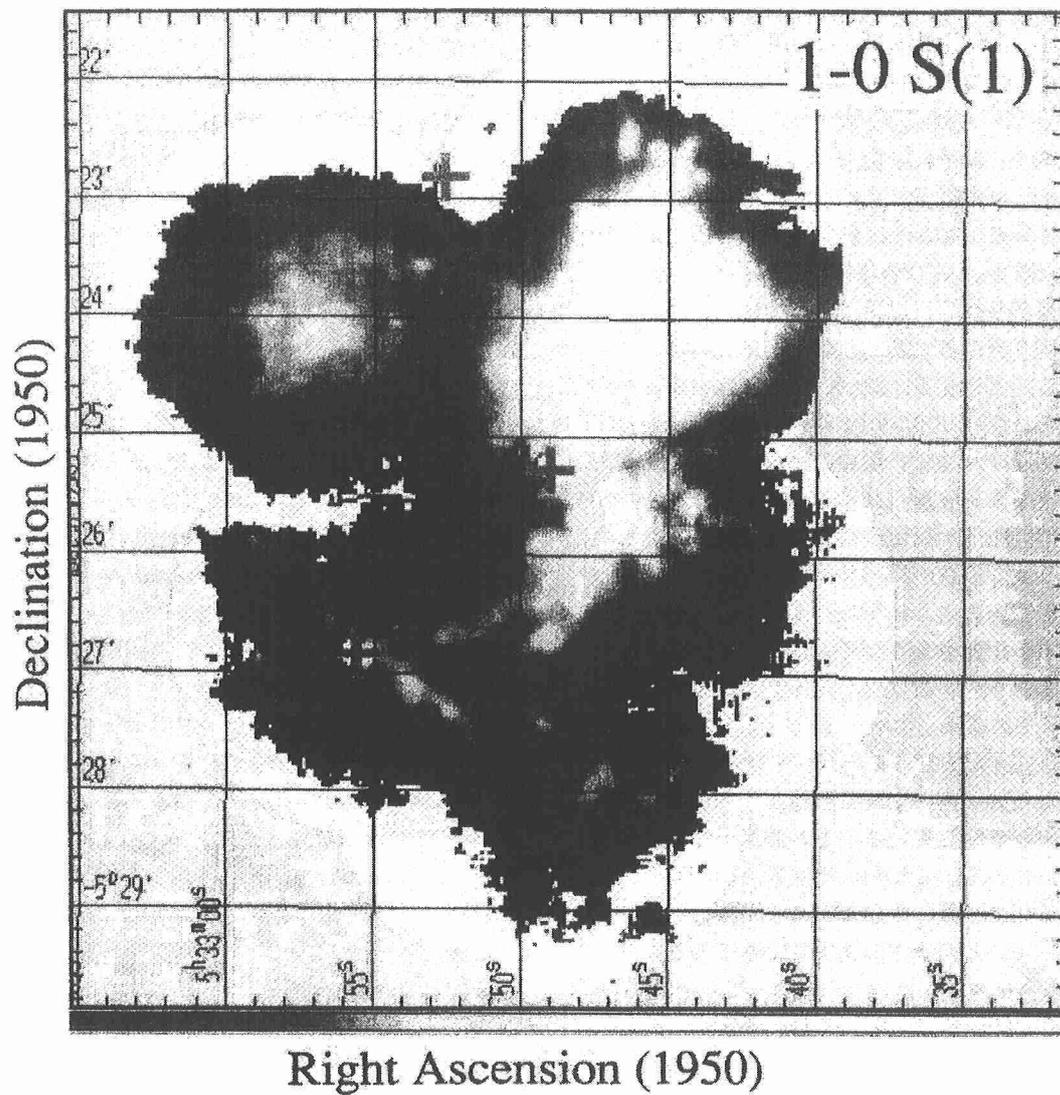
簡単な観測でこれらの判別を行うために今まで用いられてきた方法は、低励起で強度の強い2本の輝線の比 $[2-1S(1)/1-0S(1)]$ を使う方法である。しかし、これには大きな問題があった。上記の紫外励起の場合、ガス密度が高くなると、分子間の衝突により低励起準位の滞在数は熱励起の場合の滞在数に近づいてしまい、区別できない。

我々は、次の4通りの方法を考え、励起の判別を試みてきた。

- (1) 低励起の6本の輝線を検出し、振動・回転温度、オルソ/パラ比を調べる。
- (2) 上記2本の輝線比の空間分布を観測し、その密度[輝線強度]と励起[輝線比]との相関を求め、その領域全体での励起を確定する。
- (3) 紫外励起の際に衝突の影響が出にくい、より高励起の輝線ペアを用いて励起を決定する。
- (4) 熱励起の際には、衝撃波の通過といった大きな速度を伴う運動が存在する。波長分解能の高い観測により天体の速度構造を明らかにして、励起を決定する。

最初の方法は、種々の天体による観測的違いを明確に浮き上がらせたが、その中間状態を示すデータの解釈には疑問が残った。次の2つの方法については、空間2次元のイメージ取得に有利なファブリペロ分光器を用いて銀河系内の星形成領域、H II領域、反射星雲やスターバースト銀河で観測を行い、その有効性を示した。観測例として、オリオン星雲での水素分子輝線分布を示す。2本の輝線比の空間構造から場所による励起の違いが明らかにできた(図)。4つ目の方法については、現在エシエル分光器を開発中であり、それを用いて速度プロファイルを取得することを目指している。





図の説明：オリオン星雲での水素分子輝線分布。右上の明るいところが衝撃波による熱励起（原始星）。全体に淡く広がっている部分は紫外励起。

宇宙のバリオン数の起源、暗黒物質、Qボール

川崎 雅裕 (ビッグバン宇宙国際研究センター)
kawasaki@resceu.u-tokyo.ac.jp

宇宙にある星などはそのほとんどの質量を陽子と中性子で構成されている原子核が担っている。陽子や中性子は核子（バリオン）とよばれる（核子はさらにクォークという素粒子3つから構成されている）。しかし、素粒子の世界では電子、陽子、中性子といった粒子に対して陽電子、反陽子、反中性子とよばれる反粒子が存在することが知られている。しかし、私たちの知る限り反粒子でできた天体はない。バリオン（陽子・中性子）にはバリオン数1、反バリオン（反陽子・反中性子）にはバリオン数-1を割り当てると私たちの宇宙は正のバリオン数を持っていることになる。なぜ、宇宙にはバリオンがたくさんあって、反バリオンがないのかということは宇宙論の大きな問題の一つで、現在の宇宙論・素粒子論では元々宇宙はバリオン・反バリオンが同じだけあったが宇宙の進化に伴い粒子・反粒子の対称性を破るような反応によってバリオンの数が反バリオンの数より多くなったために現在の宇宙のように正のバリオン数をもった宇宙になってしまったと考えられている。

このように私たちの宇宙は反バリオンはほとんどなくバリオンがたくさんある。しかし、バリオンが現在の宇宙の密度において支配的であるかというそうではない。実際には、私たちの宇宙の密度は正体が不明の暗黒物質と呼ばれる物質が支配していることが銀河や星の運動の観測から知られている。これが、暗黒物質の問題とよばれるものである。つまり、残念ながら私たちは自分たちが住んでいる宇宙がどのような物質でできているか知らないのである。

この宇宙のバリオン数の起源と暗黒物質という2の問題を同時に解決するモデルが提案されている。これは素粒子の超対称性理論に基づいたもので、超対称性はボゾン（スピンが整数の粒子）とフェルミオン（スピンが半整数の粒子）の間の対称性で、それに従えば、スピン1/2のクォークにはスピン0のスカラー・クォークが存在することになる。超対称性理論に基づいたモデルではある種のスカラー・クォークの期待値が大きくなり、これと粒子・反粒子の対称性を破るような反応が合わさって宇宙にバリオン数が作られる。このときQボールとよばれるスカラー・クォークの球状の固まりができるということが最近分かったのである[1, 2] (図)。Qボールは1つが 10^{20} 以上のバリオン数をもつがサイズは原子核程度のもので、安定で現在も宇宙に多数存在し暗黒物質となり得るのである。さらに、宇宙初期では周りの熱プラズマとの相互作用でその1部が蒸発しバリオン数を放出する。この放出されたバリオン数が最終的に核子（バリオン）となって現在星などを作っているバリオンの量

を説明するのである。このように宇宙の暗黒物質とバリオン数がQボールという同一の起源を持つために他の暗黒物質やバリオン数生成メカニズムと違って宇宙の暗黒物質密度がバリオン密度の約100倍という事実も説明できるのである。

Qボールはもしそれが暗黒物質になっていれば将来検出される可能性もあり、今後の理論的・実験的研究によって暗黒物質の正体とバリオン数の起源について有用な証拠が得られる期待がある。

参考文献

- [1] A. Kusenko and M. Shaposhnikov, *Supersymmetric Q-ball as Dark Matter*, Physics Letters, **B418** (1998) 46.
- [2] S. Kasuya and M. Kawasaki, *Q-ball Formation through Affleck-Dine Mechanism*, Physical Review, **D61** (2000) 041301.

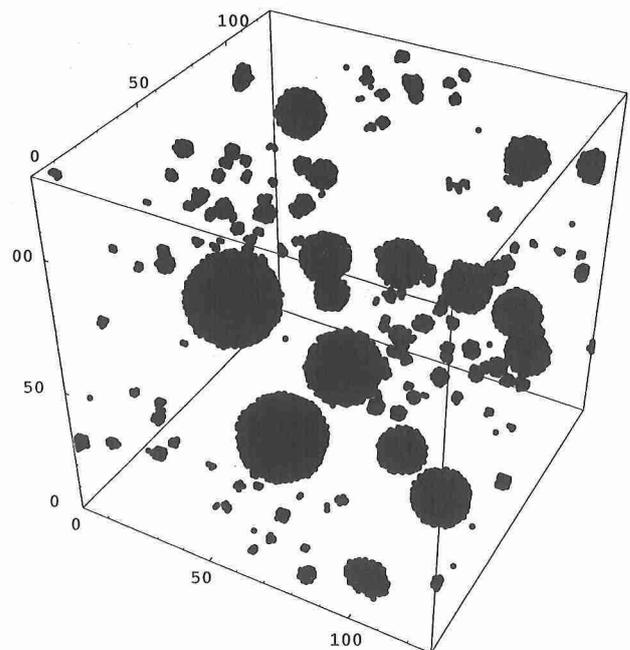


図1：Qボールの宇宙における生成のシュミレーション[2]