

宇宙の果てを越えて

柏川伸成

“物質の根源”，“生命の神秘”と並んで，“宇宙の果て”はもはや基礎科学という範疇を超え，人類全体が普遍的に関心をもつ文化といってよいかもしれない。“無限”という言葉が何よりも似合う宇宙。その果てがないといわれる宇宙の果てを知りたい，という矛盾しながらも素直な希求は，神や宗教の関連で扱われるだけでなく，映画や音楽，物語などにもひんぱんに登場し，この知りたいという姿勢こそが私たちがこの世界に生きている証となり，喜びとなっている。科学はけっしてその喜びを理屈っぽい理論や難しい数式で表現することで無味乾燥なものに変えてしまうものではなく，私たちがとりまく世界についての正しい理解を深めることで，その感動をよりいっそう甘いものに変えてくれる。今回はこの宇宙の果て，私たちからもっとも遠くにある天体の観測的研究の最前線について紹介する。



〈図1〉すばる望遠鏡が見つけた赤方偏移6.96の最遠方銀河 SDF J132359.8+272456

速報! すばる望遠鏡がまたしてももっとも遠い銀河を発見

まずは，この原稿の校正締め切りぎりに公表された最新ニュースについて紹介しよう。日本のすばる望遠鏡が128.8億光年かなたにあるこれまででもっとも遠い銀河を発見した。分光観測によって私たちからの距離が正確に測定された銀河の中でこれまででもっとも遠い銀河(128.2億光年)は，実はすばるが2005年に発見したものだった。今回すばるはその自己記録を塗り替えて，さらに遠い銀河を発見したのだ¹⁾。これは後述する「ライマン α 輝線を直接検出する手法」を用いて発見されたもので，これまですばるが長年にわたってこの手法での系統的な研究を行ってきた成果といえる。また他の大型望遠鏡にはない広視野カメラを有していることも，この分野ですばるが成果をあげている大きな理由の1つである。前記録からの差6千万光年を大きく見ると小さいと見るかは読者諸兄に委ねよう。しかし，私たちの知る宇宙はこの1年の間で確実に6千万光年^{*1} 遠くに広がったのだ。

越えてきた“果て”

この10年間で私たちの知る宇宙は大きく広がった。10年前の1996年，人類が知るもっとも遠い天体は，赤方偏移[†](以後 z と書き表す) $z=4.55$ (私たちからの距離123億光年)のクェーサーBR2237-0607であった。4年前にはとうとう $z=6$ を超える最初の銀河が発見され²⁾，2006年11月現在でもっとも遠い天体は $z=6.96$ (128.8億光年)の銀河SDF J132359.8+272456(図1)となっている。その差5億光年は，

宇宙の年齢137億年に比べると短いや感じるかもしれないが，同じ明るさの光源を頼りに見た場合の距離にして約1.5倍の差がある。有史以来えんえんと営み続けられてきた人類による宇宙の果て探しが，この10年間で約1.5倍の奥行きを遠い宇宙を見渡せるようになったことは大きな進歩である^{*2}。

そしてこの進歩を牽引したのは間違いなく，この10年間で完成が相次いだ地上の大望遠鏡(主鏡の直径8~10m)である。より巨大な望遠鏡は，より遠くの微小な光をとらえることを可能にし，私たちの知る宇宙を広げたのである。

さて，この地上大型望遠鏡を用いた遠方銀河の実際の探査には，大きく分けて2つの方法がある(図2)。1つめの方法はライマンブレイク法。遠方銀河からの光は深遠な宇宙を旅してやってくるのだが，その途中何にもじゃまされずにやってくるわけではない。途中にある銀河や銀河間ガスに吸収されながらやってくるのだが，とくに宇宙に多く存在する中性水素ガスによって，その特徴的なライマン α 線(波長121.5nm)にちょうど合致する波長で大きな吸収を受ける。より遠い天体ほどより赤いほうに波長がずれる効果が赤方偏移であるが，遠方銀河より手前にある，より私たちに近い天体やガスにおける吸収は，より青いほうにずれて起きることになる。その結果，遠方銀河のライマン α 線より波長の青いところの光は，こうした途中の天体やガスによってごっそり吸収され，私たちのもとに届くところにはスペクトル上のライマン α 線の前後で，大きな段差が生じている。この段差をライマンブレイク^{*3}とよんでいるが，まさに長い距離を旅

*1 1光年は光が1年間に進む距離 $=9.5 \times 10^{12}$ km。比較のため，最近惑星から除外された冥王星から太陽までの距離を光が進むのに約5.5時間。

*2 ただし，文献3の須藤氏の宇宙論的シミュレーションにおける粒子数の進化(図5)によると，理論天文学の数値シミュレーションにおける技術革新は10年間で扱える粒子数が約100倍になっており，観測天文学における上記の試

してきた者だけに与えられるこの“傷だらけの勲章”を観測することで，その銀河が遠方にあることを知ることができるのである。しかし実際には，遠方からやってくる暗くて微々たる光にこの段差を見つけること自体が難しい場合もしばしばある。

そこで，遠方銀河のライマン α 線を直接観測するという手法が2つめの方法として挙げられる。遠方にある銀河は生まれたばかりで，星を活発に生成していると思われるが，銀河に含まれる塵(ダスト)が少ない場合には，若い星からの光に照らされた水素ガスが再結合するさいに発するライマン α 輝線を観測で検出できる。輝線というのは，ある特定の波長(たとえば赤方偏移4.6の場合は， $121.5 \times (4.6 + 1) = 680$ nmの波長において)だけで明るく輝くスペクトル線のことである。そのために，ある限られた波長内だけの光を透過させる狭帯域フィルターとよばれる特殊なフィルターを用いて，このフィルターの透過波長範囲内にライマン α 輝線が入ってきたさいに明るく見える天体を探す，という方法をとる。しかしこの方法も難点を抱えている。地上から観測する場合，可視光の長波長域では地球大気中の原子・分子からの光が強いため，どの波長でも観測できるというわけにはいかないのだ。効率よい観測を行うためには，この狭帯域フィルターを有効に使える波長が限られているのである。

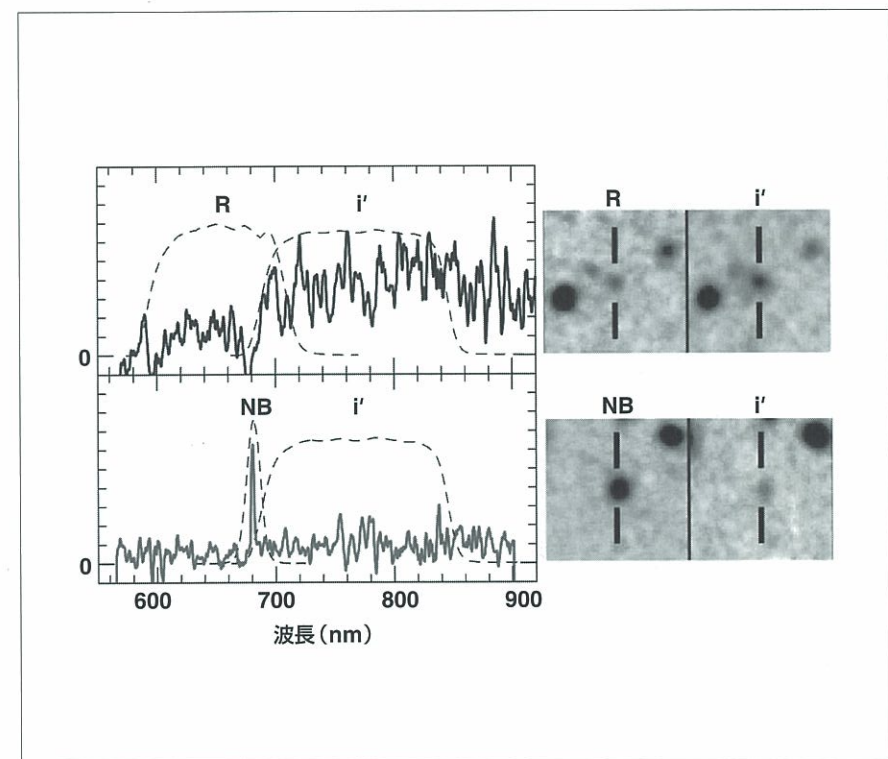
これら2つの手法^{*4}はおのおの難点を抱えつつも，この10年間における遠方銀河探査において大きな成功を収め，いまや $z=3 \sim 7$ (115~129億光年)にかけての遠方宇宙における銀河は，ほとんどこれらの手法で発見され

算をはるかに凌駕する。また，理論天文学における技術革新は連続・継続的に進歩するのに対して，観測天文学におけるそれは離散的かつやや周期的に訪れることも特徴である。

*3 このほかに，私たちからの距離が110億光年くらいの比較的“近い”遠方銀河については，ライマン吸収端による連続光吸収も効く。

*4 実際には，これら2つの手法によって候補天体を探した後に，分光観測によって赤方偏移が決定されると，確実に遠方銀河だといえる。

† 「今月のキーワード」(p.66)参照。



〈図2〉遠方銀河を見つける2つの方法
上の図はライマンブレイクを検出する手法，下の図はライマン α 輝線を検出する手法の原理を示している。たとえばこの図は $z=4.6$ の遠方銀河の場合だが，上の図では，Rバンドより i' バンド，下の図では i' バンドよりNB(狭帯域)バンドのフィルターで見た場合に明るく輝いているものがその候補天体となる。

たものとなっている。このような強力な観測手法をもちつつも，実際の遠方銀河探しは言葉でいうほど楽ではない。なにせ宇宙の果てからやってくる光を見つけようとしているのだから，そのわずかな光をじっと貯め込むには多くの観測時間が必要となり，そのうえ発見できる確率も非常に小さい。たとえばすばる望遠鏡の場合，約10万個の天体の中から2番目の方法を用いて探し出した $z=6.5$ の銀河は，わずか60個足らずである。砂海の中から1粒の金塊を探すようなこの超遠方銀河探査において，遠方記録を塗り替える銀河が次々と見つかったこの10年は，まさにゴールドラッシュであったといってもよいであろう。この2つの観測的手法を相補的に用いながら，世界中の地上大望遠鏡，そして宇宙望遠鏡は今日も遠方銀河探しを行っている。

銀河進化を探索するうえでの宇宙の“果て”

卵から青虫が生まれサナギになり、やがてアゲハチョウになる。誰もが知っている事実だが、これは私たちがこれらの生命のサイクルを何度も観察することによって得た知識である。残念ながら銀河の場合は、その最初から最後までを私たち人間の一生の間につぶさに観察することができない。しかし、私たちは遠くを観測するという手立てによって、人類が生まれるよりずっと前の過去からの光(情報)を捕まえることができる。これを時系列に並べれば、銀河の歴史が概観できるはずだ。より遠くにある銀河を見れば、より若い銀河を見ることになる。そしていけばん遠い銀河は、銀河の最初のころ、誕生したばかりの銀河に違いない。アゲハの最初が卵だったことを知るのと同様、銀河の進化を考えるうえで、いつどのようにして銀河が誕生したのかを知ることは非常に重要だ。現在の宇宙における銀河には色・形・大きさ・重さなどについて多様性が見られるが、これらの諸性質は先天的に得たものなのか、後天的に得られたものなのか？ 小さな銀河が合体・衝突をくり返し現在 α 宇宙に見られる大きな銀河になった、という後天的な物理過程を本質に据える階層的銀河形成モデルを考えるうえで、“最初の銀河”の性質を知ることがきわめて重要なのである。しかも、アゲハチョウになるのかモンシロチョウになるのかを見極めるためには、“最初”としての卵を数多く観察することが私たちに課せられている。

このようなモチベーションによって

*5 何をもって「宇宙最初の銀河」と定義するかは難しいが、それより遠い宇宙には銀河と思われる天体が存在しない場合われわれはそうよぶのであろう。それは巨大な水素ガス雲に包まれた若い星の集合体なのかもしれない。それ以前にはいわゆる「種族III」とよばれる金属量をほとんどもたない「宇宙最初の星」が存在すると考えられている。

天文学における宇宙の果ての銀河探索は行われてきたわけであるが、皮肉にもどんなに果てを突きつめていっても、これが宇宙最初の銀河^{*5}だ、というものにはいまだ出会っていない。誕生したての銀河のことを“原始銀河”とよぶ場合があるが、この“原始銀河”という言葉は、まだ私たちの知る最遠方の宇宙が $z = 0.5$ (50億光年)程度であった50年ほど前からすでに登場しているのである。越えても越えてもまだ“最初”が見つからない銀河。137億年の宇宙の歴史を50年で知ろうとするほうが不遜なのかもしれない。だが、それでも私たちはいつか最初の銀河誕生の現場を目の当たりにすることを信じて、これからも宇宙の果てを越えていくだろう。宇宙の果ての銀河を探る意義には、実はもう1つ大きな観点があるのだが、これについては後述する。

越えるべき“果て”

さて、こうして“果て”を越えてきた私たちは、銀河誕生の瞬間に迫るべく、さらに遠い銀河を探そうとしているわけであるが、実はここに来て新たな難問に直面している。それには大きく分けて次に紹介する3つの壁がある。あらかじめ断っておきたいが、いずれも悲観すべき問題ではなく、逆に多くの天文学者はこの問題を解決するために、いままで以上にこの分野で意欲的になっている、というのが少々楽観的な筆者の正直な印象である。

■ 1つめの壁

——観測技術のデッドエンド

より遠方の天体からの光はより長い波長に赤方偏移する。これまでの手法を応用し続けようとするれば、必然的にさらに長い波長での観測が不可欠になっ

*6 すばる望遠鏡では最近、世界最大の赤外線カメラが稼働開始した。このカメラは、すばるの主焦点カメラと比較すると面積は5%ほどだが、世界の標準的な可視光撮像装置と比べるとほぼ同等の面積を誇る。解説記事としては以下を参照。http://subarutelescope.org/Topics/2006/0222/j_index.html

てくる。現在最遠方に見つかっている銀河は赤方偏移6.96にあり、このライマン線は観測波長967.67 nmにある。この967.67 nmという波長は、もはや可視光の長波長限界に近い。これより長い波長は赤外線領域に入り、観測装置や観測手法を変えなければならない。しかし、赤外線検出器は可視光検出器に比べて圧倒的に面積が小さいという技術的問題がある。赤外線検出器開発の歴史はまだ浅く、現在の技術では可視光最大の検出器に比べてその5%ほどの面積しかもたない赤外線カメラしか存在しない^{*6}。このことは、一度に捕まえることのできる天体の数が可視光観測の5%に減るということを意味し、そのまま観測効率の低下を意味する。より遠方のより暗い光子を捕まえようとしているというのに、この落差は大きな痛手である。

赤外線検出器の狭い面積を技術革新でなんとか克服したいというのが私たちの目下の願望であるが、いまのところそのめどは立っていない。一方で、この低い観測効率をもととせず、前述の遠方銀河探索の2つの手法を赤外線観測に応用し、超遠方銀河を検出しようという挑戦的な観測グループ⁴⁾もすでにいくつか現れてきている^{*7}。これまでの人類の歴史がそうであったように、この技術的問題はいつの日か解決されるであろう。私たちは、400年かかりはしたが、ガリレオの直径5 cmの望遠鏡から技術革新をくり返し、直径8 mの望遠鏡をつくり上げてきたのだから。

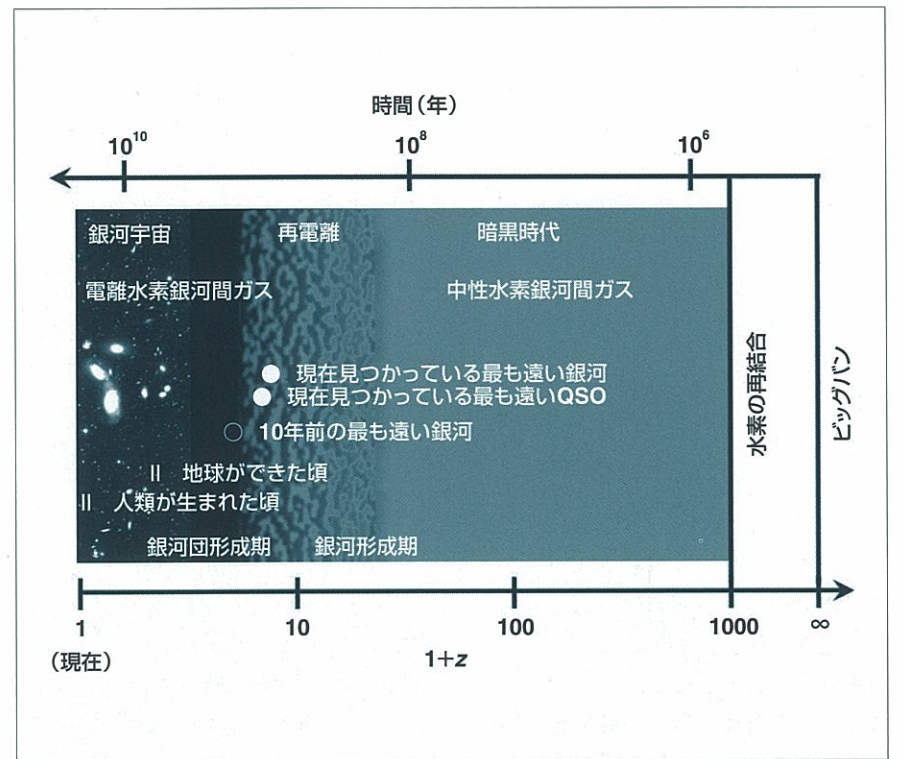
■ 2つめの壁

——初期宇宙の暗黒時代

2番目の問題は、いよいよもって私たちの観測が宇宙の始まりに近づいたが

*7 実際に赤外線観測によって $z = 10$ の銀河を発見したという報告はあるが、その後別の研究者が観測するとこの銀河が見つからなかったという経緯もあり、その真偽のほどははまだ争議中である。

ための、どうしても避けることができない問題である。いまから137億年前にビックバンから誕生した宇宙は、最初は高温のプラズマで満ちていた。やがて宇宙膨張とともに急激に温度が下がり、約30～50万年後にプラズマは再結合して中性のガス(ほとんどが水素原子)となった。この再結合時の物質密度の非一様性は、宇宙背景放射として観測されており、現在の宇宙で観測されている銀河の大規模構造の種となったと考えられる。再結合後の5億年間に、低温のガスが自己重力によって局所的に分裂・収縮して最初の天体が形成され始めるが、その放射する紫外光はまわりに広がる中性ガスに吸収され、私たちに届くことはない。これが“宇宙の暗黒時代”とよばれている時代である。やがて新しく生まれくる銀河やクエーサーから放射される光が周囲の中性ガスを再び電離させ、宇宙全体に広がった中性水素はなくなり、光が宇宙を自由に行き交うことのできる現在の宇宙になった。宇宙全体の電離状態が大きく様変わりしたという、このまさに初期宇宙のビッグイベントは“宇宙再電離”とよばれている<図3>。そして、ちょうどこの時代の銀河を、私たちは最遠方の銀河として捕まえつつあると考えている⁶⁾。この再電離がいつごろ始まりいつごろ終わったのか、どの天体がこの再電離に貢献したのか、そのときの宇宙電離化の空間的非一様性はどの程度あったのかなど、まだまったくわかっておらず、これらは宇宙の歴史、初期天体の形成を考えるうえで基本的かつ重要な問題となっている。宇宙の果ての銀河を探るもう1つの意義とは、まさしくこの宇宙再電離を理解することにある。



しかしながら一方で、何かある遠方銀河に関する観測結果が得られても、それが銀河そのものの性質の変化(銀河進化)によるものなのか、この銀河のまわりの宇宙空間の電離状態の変化によって生じたものなのか区別できない状況が考えられる。これまでの私たちの遠方宇宙の観測はずっと電離水素で満ちた宇宙で行ってきたのであるが、とうとうここまで遠方の宇宙、すなわち暗黒時代に迫らんとする宇宙初期が直接観測できるようになってしまっは、近傍宇宙と同じような観測事実の解釈ではすまされなくなってきたのである。これは逆に考えれば宇宙再電離を観測できるチャンスであり、このことのほうがもはや銀河進化よりむしろ重要な天文学全体の問題解決への糸口なのかもしれない。銀河進化に関わる現象ときちんと分離して理解す

〈図3〉宇宙のおおまかな歴史

人類の最遠方銀河探索は、宇宙の再電離期に突入しようとしている。文献5より改変して作成。



〈図4〉初期宇宙に見つかった年寄り銀河
引用元は<http://www.spitzer.caltech.edu/Media/releases/ssc2005-19/ssc2005-19b.shtml>。
Credit: NASA, ESA/JPL-Caltech/B. Mobasher (STScI/ESA)

るためには、宇宙背景放射、キューサー、およびガンマ線バーストなどの観測に加えて、電波による中性水素ガスの直接観測などほかの対象・手法を含めた再電離に関する観測の蓄積が待たれている。いずれにせよ、大局的には銀河やキューサーなど天体の変化を追いかけることが宇宙の歴史を追いかけることだと直結させて考えていた天文学の歴史において、今後の観測次第では宇宙空間中のガスの物理状態の大きな変化を直接目撃できるかもしれな

いのである。

■ 3つめの壁

——すでに年老いた銀河がそこに？
最後の問題は、まだ事実としてははっきりしていないが、もしかしたら深刻な問題になりうるものである。アメリカの天文学者が中心となって進めているハッブル・スピッツァー宇宙望遠鏡を駆使したグッツ計画(GOODS)とよばれる深宇宙探査の観測において、赤方偏移7くらいにライマンブレイクがあると考えれば説明できるような天体が

見つかった。問題は、この天体が異常なまでに赤いことである。赤いという事実は、古い星がたくさんあると考えれば説明しやすい。可視光に加え近赤外線や中間赤外線での観測データをすべて説明するためには、この天体がすでに 6×10^{11} 太陽質量もの星をもっていると考えざるをえない、という結果を論文筆者らは導いた⁷⁾。私たちがこれまで見ていた遠方の銀河はせいぜい 10^8 、大きくても 10^{10} 太陽質量くらいの星しかもっていなかった。まだまだ星の数が少なく、小さくて生まれたばかりの赤ちゃん銀河を見ていると考えてよいであろう。ところが、そんな赤ちゃん銀河ばかりいると思われていた宇宙のごく初期の時代に、いきなりこの年老いた太っちょ銀河が見つかったのである。彼らが“モンスター”とよぶこの天体は、まだ分光観測によって本当に遠方銀河であるかどうか確定されていない。しかし、もしこのような天体が初期宇宙に普遍的に存在していたとしたら、私たちが考えていたよりずっと前に(論文筆者らの計算によると宇宙誕生から2億年後)最初の銀河は誕生したことになり、これまでの冷たい暗黒物質を想定した銀河形成シナリオを一から考え直す必要に迫られる。早くも気の早い研究者はこうした天体が再電離に与える影響などを論文にまとめ、銀河形成シナリオの危機を論じているが、この天体が本当にモンスターなのかどうか追観測の結果などを含めて、もうしばらく静観したいところである。

さらなる果てを求める旅へ

そもそも“果て”は、そこに果てがあるとはわかった時点で果てではなくなって

しまう。私たちのさらなる果てを求める旅は終わることがない。現在、さらに巨大な地上望遠鏡、宇宙望遠鏡の設計・開発が着々と進んでいる。この新たな“船”に乗って、現在の“果て”を越える旅に出る日もそう遠くない。

参考文献

- 1) M. Iye *et al.*: Nature, **443**, 186 (2006).
- 2) E. M. Hu *et al.*: APJ **568**, L75 (2002); 柏川伸成: パリティ Vol. 18, No. 1 (2003), p. 43.
- 3) 須藤靖: パリティ Vol. 21, No. 2 (2006), p. 4.
- 4) たとえば D. P. Stark *et al.*: New Astron. Rev. **50**, 46 (2006); R. J. Bouwens *et al.*: APJ **624**, L5 (2005).
- 5) J. Miralda-Escude: Science **300**, 1904 (2003).
- 6) N. Kashikawa *et al.*: APJ **648**, 7 (2006).
- 7) B. Mobasher *et al.*: APJ **635**, 832 (2005).

人に話したくなる物理

身近な10話



江馬一弘 著

四六・168頁/定価1,680円(税込)
ISBN 4-621-07750-3

家電製品のしくみや台風の渦など、身近な話題と物理の関係を、物理学科の美奈さんと物理はニガテな明くんが、イラストと会話で楽しく解説。10日間の講義で物理のおもしろさを伝えます。

主要目次

- 1日目.. 高速でぶつかる分子
- 2日目.. ランチからレントゲンまで
- 3日目.. 「チン」で回りだす水分子
- 4日目.. 地球は巨大なメリーゴーランド
- 5日目.. たえば地球を1cmとすると
- 6日目.. 意外と身近な角運動量
- 7日目.. 冷蔵庫・エアコンでなぜ冷える?
- 8日目.. 光にもカタヨリがある
- 9日目.. 3色なのにフルカラー!?
- 10日目.. 最短時間で突き進め

丸善〔出版事業部〕

営業部 (03) 3272-0521 FAX (03) 3272-0693
<http://pub.maruzen.co.jp/>