

総合科学研究会報

第1・第2合併号（2005年7月）

『総合科学研究会報』について

私たちは昨年、「総合科学研究会」を発足させました。誰もが自由に参加できる会として企画し、昨年度は以下のように合わせて4回の勉強会を開きました。

第1回（2004年6月30日）：末永恵子氏（医学部人文社会科学講座）、「帝国医療と医学犯罪 15年戦争期の満州医科大学の医療活動と医学研究」。

第2回（2004年9月9日）：福田俊章氏（医学部人文社会科学講座）「『人格』とは誰のことか カントと生命あるいは医療の倫理」。

第3回（2004年10月29日）：吉田 宏氏（医学部物理学講座）、「重力レンズ効果の紹介」

第4回（2005年3月17日）：安達 隆氏（医学部数学講座）、「オプション価格付け理論の紹介」。

この『総合科学研究会報』はその記録です。

●第1回 2004年6月30日（水）

帝国医療と医学犯罪－15年戦争期の満州医科大学の医療活動と医学研究－

末永恵子

旧満州医科大学は、1911年、旧奉天（現在の瀋陽）に南満州鉄道株式会社（以下満鉄）が創設した南満医学堂を前身とする医科大学である。南満医学堂は、初代の満鉄総裁後藤新平の発案により日中両国学生に医学を教授し、将来満蒙の地で活動医師を養成することを目的として設立された。後藤が植民地政策の中で医療・衛生を重要視し、病院や医学校の整備に熱心だったことは有名である。南満医学堂は日本による中国東北部侵略・占領のための文化的「好武器」と位置づけられていた。その後の曲折はあるにせよ、後藤の構想した植民地支配における医学・医療が、この南満医学堂・満洲医科大学設立の原点にあった。

南満医学堂は、1922年には大学令により修業年限予科3年、学部4年の医科大学に昇格し、満洲医科大学と改称した。これと同時に中国人学生のみを対象として4年修了の専門部も併設

されている。15年戦争期には、医師不足を背景に入学者は漸次増加を遂げ、戦況の悪化に伴い1941年の14回生より繰り上げ卒業も始まる。同年には学内に高射砲も設置され戦時色を強めていった。敗戦の前の1944年の冬には物資が不足し、スチーム暖房が入らなくなり、インクも凍る状態になったという。こうして1945年8月に日本の敗戦と同時に満洲医科大学は終焉を迎えるのである。南満医学堂創立から始まって約33年間後のことであった。

本報告は、満洲医科大学が、日本の植民地支配においてどのような役割を担ったのかを特に15年戦争期の医学研究・医療活動の側面から概観したものである。これによって、植民地支配や戦争遂行に医学はどのような意味を持っていたのか、という帝国医療における医科大学の役割を考える一端となろう。さらに、本稿では、アカデミズムといわば植民地における医学犯罪の関係を追究することにもなる。そのことは、戦争期の医学犯罪の問題を731部隊に代表される軍関連部隊に限定せず、医学犯罪の広い裾野を明らかにすることになる。

満洲医大における医学研究の特徴的な点を指摘すると、第一に満蒙開拓に関連した保健衛生の研究に取り組んでいたことが挙げられる。学内には、1940年に開拓医学研究所が設立されているし、教官は満洲国の衛生行政の求めに応じて、受託研究や委員就任などに積極的であった。例えば、関東局移民衛生調査委員会の委員には満洲医科大学の教官が多数就任している。

①衛生学

衛生学教室教授の三浦運一は、「満洲の気候風土に対する我國民の適合方法」つまり、移民の住居として適当な建材や構造や暖房方法・換気方法などを実際開拓村に試験家屋を建設して研究している。さらに衣服・食物・井水の調査を行い、開拓民の定住のために、衛生学の見地より様々な提言を行っている。

②微生物学

微生物学教室の専任教授の研究対象は、ペスト・再帰熱スピロヘータ・馬鼻疽菌・発疹チフス、結核菌・非病原性抗酸菌・BCG波状熱・発疹チフス・満洲チフス・流行性出血熱・サルモネラ菌で、いずれも中国東北部で流行した伝染病に関する研究である。これらの研究対象となった細菌は、関東軍防疫給水部（731部隊）での細菌研究の対象とも一致し、実際に防疫給水部から菌株の分譲を受けていた事実から、研究上の関係があったものと推測できる。

③生理学

教授緒方維弘は、はじめ恩師久野寧の研究テーマを受け継いで発汗を中心とする高暑環境下の体温調節生理学を専門に研究していた。「北満開拓の進展に伴う必然的な要求」に応え、テーマを耐寒体温調節反応における寒冷感覚の意義に変更する。731部隊で凍傷の生体実験を行った吉村寿人とも密接な関係があった。

④病理学

病理学教室は、中国東北部の風土病のKala-Azar、Kaschin-Beck氏病、地方性皮膚炎、地方性甲状腺腫のほか、流行していたアミーバ赤痢、急性伝染病、寄生虫病に関する研究を精力的に行っていた。

中国の地方病研究は単なる医学研究にとどまらず、列強の対中戦略の一要件として国際競争の

中にあった。研究蓄積が少なく、病因や発生のメカニズムがはっきりせず、治療法も確立していない地方病の研究に先鞭をつけることは、学問上の競争であるばかりでなく、中国に対する政治的影響力の強弱を決める一手段でもあった。

⑤解剖学

当時、様々なヒトの部位を測量しての人種間の比較研究が世界的流行のようになっていた。しかも、それは学術研究の域を超え、人種的あるいは民族的差別の意味合いを持つ政治的言説を形成する材料ともなっていた。解剖学教室の業績の中には、「北支那人脳の豊富にして最良な材料による細胞、繊維及び血管構成学的構造」を研究したものがある。しかし、「北支那人脳」の研究は、生体解剖という重大な医学犯罪にあたる可能性が高かった。そのことは作成された論文、証言などで裏付けられる。

以上のことから、満洲医科大学の研究の特徴は以下のようによまとめられる。第1に当時の国策であった満蒙開拓に関連する保健衛生の研究を精力的に進め、満洲国の医療行政にも多くの教官が参加していたこと。第2に中国東北部に特有の地方病の研究に力を入れていたこと。第3に解剖学教室において学会の風潮を背景に人類学的比較研究が行われたこと。第4に倫理的見地からは許されない医学犯罪を伴う研究もあったこと。

満洲医科大学の医学研究は、満蒙開拓の国策に沿うべく、特に基礎系の衛生学・微生物学・生理学・病理学教室が東北部の地域環境に焦点を当てた保健衛生の研究を行っていた。それは、第一に中国人のためではなく日本人のための医学であった。中国東北部（＝植民地）の地方病研究に力を注ぐ動機の一つには、研究上の国際間競争でイニシアティブをとるのは日本（＝宗主国）でなければならないという意識があった。

また、時代背景から人類学的比較研究が盛んに行われるが、満洲国では、豊富な人類学の研究素材を本国と違って容易に手に入れることができた。すなわち各民族の多数の人々の指紋の形状の調査や四肢の計測などである。さまざまな部位の形状・形態が比較研究の対象となって、人類学的業績が生み出された。しかし、満洲医大解剖学教室は、生体の外から知り得ることを超えて、生体の新知見を開拓するという功名心がエスカレートし、生体にメスを入れ「新鮮な脳」を素材にしてしまった。植民地人の身体をいわば、論文作成の資源に利用したと言えよう。

満洲医科大学の医療活動の主たる対象は日本開拓民や満鉄職員への医療の提供であった。付属病院の取り扱い患者の殆どは日本人であり、中国人には病院は、近づき難い場所であったようである。蒙古民への医療提供は巡回診療団を派遣して行われたが、保健指導医師の満鉄青少年義勇隊訓練所への常駐派遣と違って一時的なもので、形式的なものにすぎず、宣撫の効果が上がったかは疑問である。満洲医科大学は、創設の目的のように軍医や満鉄の病院医師、それから基礎系を中心に研究者を輩出した。戦後は、医学犯罪に関与した研究者も汚点になるような業績を隠蔽しつつ日本の医科大学に就職先を見つけていった。その医学犯罪の事実の十分な解明とその上に立った反省がなされていない点では、731部隊と共通している問題である。

（すえなが けいこ・医学部人文社会科学講座）

●第2回 2004年9月9日(木)

「人格」とは誰のことか カントと生命あるいは医療の倫理

福田俊章

発表を終えてひとこと——「生きるに値しない」とは何のことか

最近の生命倫理学では、(a)「患者の自己決定権」の尊重に(b)「生命の質的区別」ということが標語のように繰り返し語られます。その際、(a)自己決定権の主体、(b)生存権をもった「生きるに値する」人間のことは(c)「人格(person パーソン)」と呼ばれます。「人格」は「自分を自分としてわきまえている、そうした意味で理性的な存在」というほどの人間存在を指します。言う所の「人格」概念はロック(1632-1704)などと共にカント(1724-1804)に由来するものとされています。

本発表はカント倫理学本来の「人格」概念を確認することを通じて、「生きるに値しない」という性格づけを人間が人間に与えてしまうことの意味を考えようとしたものでした。その際重要だと思われるのは、カントの議論をそのまま生命/医療倫理上の諸問題に適用して答を求めようとするのは危険だということです。カントの抽象度の高い議論をそのまま複雑な現実に応用するならば、それは抑圧的な効果を生むだけでしょう。

「人格」概念について言うならば、カントは人間なら誰もが「人格」でありうると考えています。彼は「胎児や新生児は果たして『人格』か」などという問題意識のもとで「人格」なる概念を提示したわけではありません。彼は「人格」であるということをつねに理念的に捉えています。人間が事実として「人格」であるかどうかは問題なのではなく、立て前として「人格」でありうるといふことこそ、重要なのです。

カントは「道徳的でありうる」ということにこそ有限な理性的存在者としての人間の特質と価値を見出していました。人間は常に道徳的に正しい行為をしているわけではない。しかし、決して道徳に無縁な存在者ではない。道徳的に間違っただけを犯す者も、間違っただけをしたからといって人間であることをやめはしない。かえって、人間であるからこそ、その行動が道徳的に評価され、「間違っている」と断ぜられるのです。「悪人でも人間(人格)だ」というのは形容矛盾でも何でもありません。現実には、人間が「生きるに値しない」ようになることはありうるのかもしれませんが、にもかかわらず依然として、その人間は「人格」であり続けるということです。

抽象的な次元で「人格」の尊厳を語るからこそ、カント倫理学の真骨頂があると言わなければなりません。そして、そうした倫理学であるからこそ開きうる他者との関係性——単なる「持ちつ持たれつ」を越えた人間関係の次元——もまたあるのではないのでしょうか。

生命/医療倫理(学)の「人格」理論が描き出す人間関係は功利的な性格をそなえています。そこで一人前の人間と認められるのは、「相手の役に立てる」(と自分を売り込める)人間です。しかし、そうした視点からは「物言わぬ他者」や「応答することのない他者」といった存在は往々にして無視されがちです、しかし、カント倫理学はそうした他者との関係性を確かに始めること

が出来るでしょう。カント倫理学は他者を当てにすることなく——つまり、相手の方からまず働きかけてくれることを期待せず、あるいは自分が働きかければ相手から何か返ってくる（元が取れる）と期待することもなく——とにかくまずは自分から他者に働きかけることを求める倫理学なのだからです。

このように言うと、「生きるに値しない」という人間評価をどこか積極的に称揚しているかのように聞こえるかもしれません。実際、ある特定の人間を指して「あいつは生きるに値しない」と語ることは傲慢なことだと思います（カントもある箇所で、そうした物言いは癩に障ると述べている）。しかし、そうは言ってもカントは命をかけて義務を果たすべき場合のあることを認めるはずだろうし、だとすればそうした場合に義務を果たさなかった人間は「生きるに値しない」ということにならざるをえないでしょう。

しかも、カントは「死に値する人間は死ななければならない」と明確に主張する死刑肯定論者でした。その時、カントは「死に値する」という観念を認め、しかもその観念に規範的な効力のあることを認めています。「死に値する」という観念を認めるカントが「生きるに値しない」という観念を認めないわけには行かないはずです。

もともと、カントはどういう場合に人間は「死に値する」のかを明言していないし、「死に値する人間は死ななければならない」という件の主張は——「なすべきことはなさなければならない」という主張がそうであるように——同語反復のようなものですから、この主張の規範性は空虚なものと言うべきかもしれません。

なお、確定稿は「『人格』の尊厳と『生きるに値しない生』——カントと生命あるいは医療の倫理」として『別冊情況 特集カント没後 200年』（第3期第5巻、第12号、136頁-149頁、2004年、情況出版）に掲げたので、御参看願えれば幸いです。

研究会当日は50枚近くにふくらんだ未定稿を一気に読み上げることとなり、いささか会の趣旨にそぐわないものとなりました。この場を借りてお詫びするとともに、当日筆者の話に耳を傾けてくださった皆様に改めて御礼申し上げます。

（ふくだ としあき・医学部人文社会科学講座）

重力レンズ効果の紹介⁽¹⁾

吉田 宏

福島県立医科大学 物理学講座

概要

重力レンズ効果は現在の宇宙物理、天体物理の研究の中で重要なテーマの1つであることが認識されつつある。そこで、「重力レンズ効果とは如何なる効果なのか？」を中心に、重力レンズ効果についての簡単な紹介をする。また、最近筆者が興味を持っている「多重重力レンズ効果」についても簡単に紹介する。

1 序論 — 光が曲がる? —

現在の重力理論は Newton の「万有引力の法則」に始まる (1701)。Newton 自身は、光の直進性を疑いもしなかったようであるが、後にこの重力理論を使って、Cavendish(1783)、Soldner(1801)はそれぞれ独立に、光が非常に重い天体の近くを通過する場合、光路が $\Delta\varphi_N = 2GM/c^2r$ (ここで G, c は重力定数および光速で、 M, r は天体の質量および半径) だけ曲がることを指摘した。この角度を太陽に対して算出すると、 $\Delta\varphi_N \approx 0.85$ [秒角] で、当時の観測技術で検出するにはあまりにも小さな角度であった (1 秒角は 1° の 3600 分の 1 で、1cm の物体を 2km 離れたところで見たとときの角度)。この為、当時は光の湾曲について殆ど注目されなかった。

光の湾曲が再び着目されたのは、Einstein が一般相対性理論を発表した後のことであった。一般相対性理論によって、重力を時空の幾何学として扱うことが可能になった。物体が存在することで重力が生じ、その重力によって周りの時空が歪められる。光は時空に沿って道筋が最短になるように伝播するので、時空が曲がっていれば光路も湾曲することになる。Einstein は一般相対性理論を使って、光が天体の重力によって曲げられる角度は Newton の重力理論で得られる角度の 2 倍 ($\Delta\varphi = 2\Delta\varphi_N = 4GM/c^2r$) であることを予言した⁽²⁾。これを受けて、Eddington は 1919 年の皆既日食の際に太陽の近くに見える天体の位置を正確に観測し、太陽の影響がないときの同じ星の位置との比較から、 $\Delta\varphi_{\text{obs}} = 1.60 \pm 0.31$ [秒角] のずれを検出した。この観測によって、一般相対性理論の正しさが立証された。

また、Eddington (1920) は、光の軌道が曲がれば、光源からの光は 2 つの像として観測される (多重効果) ことを示唆している。更に Chwolson (1924) は、一方の像は元の光源より明るく、他方は暗くなること (増光効果) を指摘した。Einstein (1936) は光の湾曲によって生じる 2 つの像の明るさが変わることを (重力がレンズのように光に作用する、という意味でこれを「重力レンズ効果」といい、この効果を生じさせる重力源である天体をレンズ天体という) を導き、これを定式化している。ただしこの時点で Einstein は、レンズ天体が星のような天体では光路の曲がる角度も小さく、重力レンズ効果が現れる現象は非常に稀にしか観測されないであろうと悲観的であった。これに対して、

Zwicky (1937) によって、太陽のような星ではこの現象は稀かもしれないが、系外銀河 (アンドロメダ大星雲のような我々の銀河系の外に存在する銀河) のような重い天体ならばこの効果が実際に観測される可能性は高い⁽³⁾ ことが指摘された。

実際に重力レンズ効果の認められる天体が発見されたのは Zwicky から約 40 年後のことであった。Walsh et al. は Q0957+561A,B という 2 つのクェーサー (準星) のスペクトルが殆ど一致していることから、これらは同一の天体が重力レンズ効果 (多重効果) によって、2 つの像として見えているだけであることを見出した (Walsh et al., 1979)。Q0957+561A,B のように、1 つのクェーサーが複数の像として観測されるクェーサーは多重クェーサーと呼ばれている。多重クェーサーの他にも、観測者-レンズ天体-光源が一直線上に並んでいるときに現れる Einstein リング (光源がリング状に見える) と呼ばれる天体 (例えば、MG1131+0456: Hewitt et al., 1988) や、光源の形が非常に大きく歪んだ巨大アークと呼ばれる天体 (例えば、A370, CL2244-02: Lynds & Petrosian, 1989) もいくつか観測されている。Walsh et al. の発見以来現在までに約 80 の重力レンズ効果を受けているであろう天体が発見されている⁽⁴⁾。

現在までに発見されている約 10,000 個のクェーサーの中で、多重クェーサーを見極める条件は何か? これは非常に難しい問題である。現在のところ次の点をクリアしていれば重力レンズ効果であると判断されている。

1. 複数の像が見えていて、各像の分離角度が非常に小さい (高々数秒角)
2. 各像のスペクトルが非常に似ている
3. 複数の像の間にレンズ天体となりうる天体が光源より手前にある

第 1 の条件は、重力レンズ効果は通常の天体 (星、銀河、銀河団など) で生じるので、表 1 からわかるように光路の曲がり角は高々十数秒角となる、ということからきている。曲がり角がこれ以上大きな場合はブラックホールなどの異常な現象と見なされている (とはいっても現在までのところ、そのような現象は報告されていない)。第 2 の条件は、重力レンズ効果がすべて波長の光に対して同じ効果をもたらす、ことに基づいている。従って像が異なっても、それが同一の光源の像であれば、少なくとも各像のスペクトルは同じである筈である。更に、天体のスペクトルは人の指紋のようなもので、一般に、天体が異なればスペクトルも異なっている。第 3 の条件は必ずしも必要では

(1) 本稿は第 3 回総合科学研究会 (2004 年 10 月 29 日) で講演した内容をもとに、重力レンズ効果についてまとめたものである。

(2) Einstein は 1912 年、未完成の一般相対性理論を使って光路の曲がる角度を計算し、 $2GM/c^2r$ を得た (Newton の重力理論で得られた結果と等しい)。しかし、この値は重力による時間の遅れのみを考慮し、空間の曲がりを考慮していなかったとして、後に $4GM/c^2r$ と訂正した。

(3) “平均的な星の間隔に対する星の大きさの比”は、“平均的な銀河の間隔に対する銀河の大きさの比”の約 $10^{-3} \sim 10^{-6}$ 倍である。別の言い方をすれば、銀河は密集しているが星は散在している、ということである。

(4) cf. <http://cfa-www.harvard.edu/glensdata/>

ない。しかし、複数の同じスペクトルを持つ像が観測され、それらの間に銀河のような天体が観測されれば、その現象が重力レンズ効果による現象であることを決定付けることになる。

表 1. 各階層における光の曲がる角度

天体	質量 [g]	半径 [km]	曲がる角度 [秒角]
木星	$\sim 10^{30}$	$\sim 10^5$	0.0175
星 (太陽)	$\sim 10^{33}$	$\sim 10^6$	1.75
銀河	$\sim 10^{45}$	$\sim 10^{18}$	> 1.75
銀河団	$\sim 10^{48}$	$\sim 10^{20}$	~ 17.5

2 重力レンズ効果とは

重力レンズ効果には、Zwicky の指摘した多重効果 (1 つの光源が複数の像として見える現象)、観測される像の明るさが元々の光源の明るさと異なる効果 (増光効果: Chwolson) の他に、像の形を変形する効果や、光源から同時に放出された光でも、通る道筋が異なれば観測者に到達する時刻が異なる効果 (到着時間の遅れ) などがある。この節では、この現象での基本方程式である「レンズ方程式」について説明した後、これらの効果について簡単に解説する。

2.1 レンズ方程式

前節で述べたように、一般相対性理論によると光は時空に沿った最短の光路を伝播する。光路は滑らかな曲線となるが、実際にこのような曲線を扱うのは非常に難しい。幸い重力レンズ効果による重力が比較的弱い場合 (ブラックホールのような天体でない限り) では、この曲線は折れ線で近似できる。この近似から得られる方程式が、重力レンズ効果での基本方程式である「レンズ方程式」である。

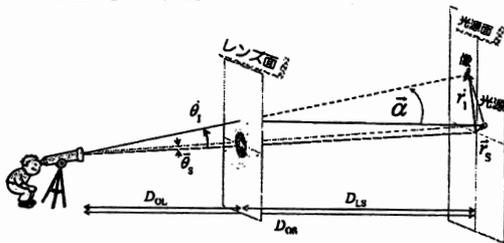


図 1. 観測者、光源、重力レンズ天体の位置関係

図 1 のように観測者と光源の間に重力レンズ天体があるとすると、観測者-重力レンズ天体間、観測者-光源間、重力レンズ天体-光源間の距離をそれぞれ D_{OL} , D_{OS} , D_{LS} とする。また、重力レンズ天体を含み視線方向に対して垂直な平面を重力レンズ面、光源を含み視線方向に対して垂直な平面を光源面と名付ける。本来重力レンズ効果を受けなければ、光源は

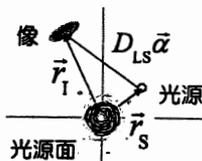


図 2. 光源面への射影図

光源は重力レンズ天体に対して θ_s の角度 (実際の観測では知ることができないのだが) に見える筈である。しかし、重力レンズ天体の重力によって光路が重力レンズ面で角度 α だけ曲がるので、重力レンズ天体に対して θ_l の角度のところに光源の像が観測される。この様子を観測者から光源面へ射影したのが図 2 である。ここで、 $\vec{r}_l = D_{OS}\vec{\theta}_l$ と $\vec{r}_s = D_{OS}\vec{\theta}_s$ はそれぞれ光源面へ射影した重力レンズ天体に対する像と光源の位置である。 \vec{r}_s と \vec{r}_l の差が重力レンズ効果によって光路が曲げられた結果で $D_{LS}\vec{\alpha}$ である。すなわち、 $\vec{r}_s - \vec{r}_l = -D_{LS}\vec{\alpha}$ の関係が得られる。一般に、光の曲がり角

α は光が重力レンズ面のどこを通るのかによって定まる。従って、 α は $\vec{\theta}_l$ の関数で与えられる。先の式の \vec{r}_l を右辺に移項して、右辺を D_{OS} で割ったものが、所謂「重力レンズ方程式」である:

$$\vec{\theta}_s = \vec{\theta}_l - \frac{D_{LS}}{D_{OS}} \vec{\alpha}(\vec{\theta}_l). \quad (1)$$

2.2 多重効果

式 (1) は与えられた真の光源の位置 $\vec{\theta}_s$ に対して、像の位置 $\vec{\theta}_l$ を与える非線形 2 元連立方程式となっている。しかし、重力レンズ天体の質量分布が球対称 (質量分布の重力レンズ天体の中心からの距離だけの関数) であるときは、 $\vec{\alpha}(\vec{\theta}_l)$ は $\vec{\theta}_l$ と平行になるので、式 (1) において、 $\vec{\theta}_s \rightarrow \theta_s$, $\vec{\theta}_l \rightarrow \theta_l$, $\vec{\alpha}(\vec{\theta}_l) \rightarrow \alpha(\theta_l)$ と置き換えることができる。これより、重力レンズ方程式を図 3&4 のようにグラフを使って解くことができる。

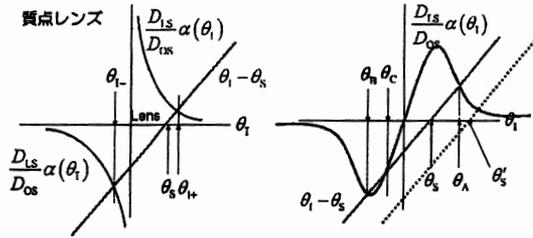


図 3. 質点レンズ

図 4. 質点でない球対称重力レンズ

図 3&4 では横軸を θ_l 、縦軸を β とし、直線 $\beta = \theta_l - \theta_s$ と曲線 $\beta = D_{LS}\alpha(\theta_l)/D_{OS}$ を描いたものである。横軸と縦軸の交点に重力レンズ天体があり、横軸と $\beta = \theta_l - \theta_s$ との交点に光源 θ_s がある。そして、直線と曲線の交点の θ_l の値が重力レンズ方程式の解、すなわち観測される像の位置である。図 3 では、重力レンズ天体を、質量を持つ点状の天体 (質点レンズ) と近似した場合である。直線と曲線は 2 点で交差していることから、この重力レンズ天体では 1 つの光源に対して 2 つの像が観測される。また、この図から光源の位置が異なれば像の位置も異なることがわかる。図 4 では、質点レンズでない球対称の重力レンズ天体を採用した場合である。この重力レンズでは、光源が θ_s にあるときは像の数は 3 つ、 θ_s' にあるときは像の数は 1 つであることがわかる。

一般に式 (1) の α は重力レンズ天体の質量分布に大きく依存している。従って、観測された像の個数や位置関係等から重力レンズ天体にある程度制限を与えることができる。

2.3 変形効果と増光効果

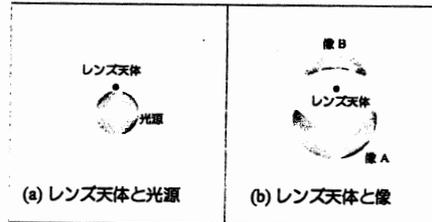


図 5. 像の変形と増光

図 5 は観測者が望遠鏡を覗いたときの、(a) 重力レンズ効果を受けないときの重力レンズ天体と光源、(b) 重力レンズ効果を受けているときの重力レンズ天体と現れる像 A (下)、B (上) の様子を描いたものである。重力レンズ効果は、光源上の各点から放出される光に対して、同じように作用するわけではない。重力レンズ天体の近くを通る光の方が大きく曲がり、遠くを通る光はあまり曲がらない。即ち、図 5(a) で重力レンズ天体の近くにある光源上の点は、図 5(b) では元の位置から大きくずれる。逆に図 5(a) で

レンズ天体から離れている光源上の点は、図 5(b) では元の位置からのずれが小さい。従って、図 5(a) のようなレンズ面上で元々円形をしている天体でも、レンズ効果を受けると、図 5(b) のような歪んだ形に見えることになる。これが重力レンズ効果による変形効果である。

また、図 5 の (a) と (b) を比較すると、元々の光源と像の大きさが異なっている。これは、観測される像の明るさと元々の光源の明るさは異なっていることを示している。レンズ面上の単位面積当たりの光量(光の密度)は重力レンズ効果があるなしによらないので、元々の光源の明るさも像の明るさもレンズ面上を占める面積に比例する。従って、レンズ面上での光源の占める面積に対する像の占める面積の比が、元々の光源の明るさに対する像の明るさの比を与える。これが増光効果と呼ばれるものである。増光といっても必ずしも像が明るくなるわけではなく、図 5(b) の例では、像 A は元々の光源より明るくなるが、像 B では暗くなっている。

像の多重化や変形・増光効果などの観測データをうまく再現するレンズ天体のモデルを構築することで、レンズ天体の質量や質量分布などを見積もることができる。また、このような解析は、暗く見えない物質(ダークマター)がどの位の割合で銀河の周りに存在するのかを算定する有力な手法として期待されている。

2.4 到達時間の遅れ

重力レンズ効果によって光源と観測者と結ぶ光路が複数できる(多重効果)。一般に光路が異なれば、この長さ(光路長)も異なる。従って、同時に光源を出発した光でも、光路が異なると観測者に到達する時刻が異なる。これが、到達時間の遅れである。この時間差 ΔT の測定値と理論値を比較すると、宇宙年齢を決める重要な定数である Hubble 定数 H_0 を見積もることができる(Refsdal, 1966)。しかし、到達時間の遅れは複数の像の間で光路長が異なる効果を取り入れただけでは正しく評価することができない。実は、光路が異なるということは、各光路上で光がレンズ天体から受ける重力の影響が異なる、ということでもある。この影響は、時計の進み方という形で現れるので、 ΔT を大きく左右することになる(Cooke & Kantowski, 1975)。

先に述べた多重クェーサー Q0957+561A,B の間でも像の間の到着時間の遅れが観測されている。像 A,B 間の時間差は約 417 日程度と見積もられていて、この時間差から $H_0 = 64 \pm 13 \text{ km/s/Mpc}^{(5)}$ という Hubble 定数が得られている。この他にも Hubble 定数を測定する方法はいくつかあるが、得られている値は 50 ~ 100 km/s/Mpc とかなり幅がある。これに対して、重力レンズ効果を使った方法では、他の多重クェーサーの観測からも 60 ~ 75 km/s/Mpc 程度と見積もられている。

2.5 その他の重力レンズ効果

ここまでは、主に多重クェーサー等に見られる重力レンズ効果について述べてきた。これらの天体以外でも、重力は遠距離にまで到達可能な力なので、重力レンズ効果とははっきり認識はされないにしても、多少は重力レンズ効果を受けている筈である。従ってどのような観測量も多少は重力レンズ効果の影響を受けていると考えられる。この影響を観測量にどのように取り入れ、どのように解析するかは、観測量から宇宙の構造を調べ

る上では重要となる。この影響を見積もる為に、仮定したレンズ天体の分布から平均的な(重力レンズ効果を受けた)観測量を求める手法が、統計的重力レンズ効果と呼ばれる手法である(cf. Schneider, Ehlers & Falco, 1992)。

また、1つの視野内に観測される多数の銀河(複数の像を持たない光源)の形の分布から光に及ぼされる重力の効果(弱重力レンズ効果)を解析することで、銀河より手前にあるダークマターの分布を推定することができる。このような研究も、現在盛んに行われている(例えば、Hoekstra et al., 1998)。

3 宇宙論における多重レンズ効果

ここでは、一般相対性理論に基づいた宇宙モデル(例えば二間瀬 1998 を参照)について簡単に解説し、非一様な宇宙への1つのアプローチとしての重力レンズ効果について、最近の著者の研究を紹介する。

3.1 相対論的宇宙論

Einstein は一般相対性理論を完成させると、この理論で宇宙を記述しようとした。このとき、「宇宙原理」と呼ばれる原理を適応した。これは、「宇宙は一様・等方(=宇宙はどこでも、どの方向でも同じように見える=我々は特別のところには存在するわけではない)」というものである。この原理から当時の共通認識であった「静的宇宙(不変な宇宙)」のモデルを作ろうと試みたが、結果的に失敗した。なぜなら、物質によって生じる重力(引力)で宇宙が潰れてしまうからである。苦肉の策として宇宙が潰れないよう反発力として導入したのが、現在宇宙項 Λ と呼ばれる力である。

これに対して、Friedmann は 1922 年、宇宙項を導入しなくても潰れない一様等方な宇宙モデル(膨張宇宙モデル)を発見した。更に、Lemaître(1927) は、宇宙項入りでも Friedmann のモデルと同じようなモデルが作れることを示した。これらのモデルはそのモデルに含まれる 2 つのパラメータ(宇宙項と密度パラメータ)で全く異なる構造に分類できる: 永遠に膨張が止まらない「開いた宇宙」、膨張の勢いは止まるが膨張は止まらない「平坦な宇宙」、やがて膨張は止まりある時点から収縮していく「閉じた宇宙」。このモデルを Friedmann-Lemaître モデルという。現在では、このモデルが宇宙の平均的な姿を良く記述しているとして、広く受け入れられている。

「宇宙は膨張している」ことを観測的に示したのが Hubble であった。Hubble は 1928 年、遠方の銀河までの距離の測定から、「遠方の銀河ほど速く遠ざかっている(後退している)」ことを発見した。これが Hubble の法則である。また、銀河の後退速度と銀河までの距離の間の比例定数が Hubble 定数である。

一般に観測者に対して運動している物体から発せられる波には Doppler 効果が生じる。近づいてくる救急車のサイレンは通常より高く、遠ざかるときは低く聞こえる。これが Doppler 効果である。一般に、Doppler 効果で波の振動数が低くなると波長が伸びる。光も波の 1 種なので、光源が観測者に対して遠ざかれば、この Doppler 効果を受けて光の波長は伸びる。この伸びが「赤方偏移」と呼ばれるもので、光の場合近似的に遠ざかる光源の速さに比例する。従って、Hubble の法則は赤方偏移と光源までの距離との関係を与える。つまり、赤方偏移は天体までの距離の指標として使うことができる。

⁽⁵⁾ 1Mpc は約 3×10^{19} km。「 $H_0 = 64 \text{ km/s/Mpc}$ 」とは「1Mpc 離れた天体は秒速 64km で遠ざかっている」ということ。

3.2 宇宙論的距離

天体までの距離には幾つかの見積もり方がある。最もポピュラーなのが、角度距離と光度距離である。前者は、同じ大きさのものでも近くにあると大きく見え、遠くにあると小さく見えるということに基づいた距離測定法である。後者は、見かけの明るさは距離の2乗に反比例するというに基づいた距離測定法である。どちらの距離測定法も、Friedmann-Lemaîtreモデルでは容易に計算できる(この計算法をMattigの公式という)。

Mattigの公式に基づいて距離を求めるのは、ある意味正確でない。というのは、この公式では一様等方な宇宙が仮定されているからだ。実際の宇宙には、銀河があり星があり惑星があり、様々な階層の非一様性が存在している。この非一様性はFriedmann-Lemaîtreモデルでは一切考慮されていない。この非一様性を考慮するという事は、非一様性によって生じる重力レンズ効果を考慮することである。重力レンズ効果を受けると、光源の大きさも、明るさも変わる。従って、上記の角度距離も光度距離も大きく重力レンズ効果の影響を受ける。

Mattigの公式は、ある意味すべての非一様性を均すことによって、重力レンズ効果も予め取り入れた距離測定法である。これに対して、Dyer & Roeder (1972, 1973)は、宇宙に存在する物質を一様に分布する部分と非一様に分布する部分とに分け、通常距離を決めるときは一様に分布する部分のみを考慮し、光が銀河のような非一様性の近くを通るときの光源までの距離を見積もるときは、改めて、その非一様性による増光効果を取り入れたらよいのではないかと、提案した。このような距離測定法をDyer-Roederの公式という。

3.3 多重重力レンズ効果と連続極限

Mattigの公式は一様宇宙での距離測定法で、非一様性を均した近似法である。一方Dyer-Roederの公式は、取敢えず一様に分布する物質の効果のみを取り入れて距離を求め、非一様性の影響は重力レンズ効果で考慮しようという、先送りの方法である。

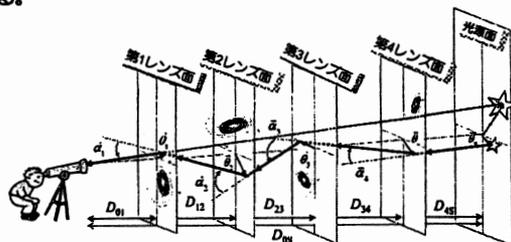


図6. 多重重力レンズ効果

「この先送りの方法は非一様な宇宙での距離測定法としてふさわしいのか？」という問題に対して、最近Yoshida, Nakamura & Omote (2005)において1つの見解が得られた。そこでは、まず、図6のように観測者と光源の間に複数のレンズ天体を置き(これを非一様性とみなす)、これらのレンズ天体による多重重力レンズ効果を定式化した。次に、隣り合うレンズ面の間隔が0となる極限(連続極限)での重力レンズ効果による増光効果を求め、これをDyer-Roederの公式に取り込んだ。その結果得られた距離測定公式は、Sachs (1961)によって導かれた一般相対論的幾何光学の方程式を満たすことがわかった。これは、「多重重力レンズ効果の連続極限の下では先送りのな距離

測定法でも、光源までの距離として十分意味のある公式を与える」ことを示している。

またYoshida, Nakamura & Omote (2003)では、多重重力レンズ方程式(式[1]の多重重力レンズ版)を使って、様々なレンズ天体の配位に対して、図6における第1レンズ面(観測できる天球上の面)から光源面への対応(写像)の平均が求められた。その結果、第1レンズ面上での任意の2点と、それぞれの点に対応する光源面上の2点は、平均的には、互いに平行でレンズ面上の2点間の距離は光源面上の B_N 倍となることが示された(B_N は宇宙モデルと光源の赤方偏移、レンズ天体の数 N に依存する)。更に、連続極限(宇宙の平均密度を一定にして N を無限大にする極限と等価)をとると、 B_N は D_{FL}/D_{DR} (D_{FL}, D_{DR} はそれぞれMattigの公式で得られる光源までの距離、Dyer-Roederの公式で得られる光源までの距離)となることがわかった。これは、「非一様宇宙において、2つの天体の間隔を観測すると、平均的には一様宇宙と全く同じものになる」ことを示している。

以上のように、多重重力レンズ効果の手法は、非一様宇宙を理論的に解明する為の有効なアプローチであると考えられる。

4 結び

重力レンズ効果は天体物理・宇宙物理の様々な側面に取り入れられている。また、本稿では取り上げなかったが、我々の銀河の構造を調べる手段や惑星探査の1つの手段としても研究が進められている(Mollerach & Roulet, 2002)。近年、観測技術が向上する中で、これまでより詳しい観測データが大量に得られるようになってきた。そのようなデータに対して、重力レンズ効果を取り入れたデータ解析・手法が、真の宇宙像を知る上で必要である。

参考文献

- Chwolson, O. 1924, *Astron Nachr*, 221, 339.
 Cooke, J.H. & Kantowski, R. 1975, *ApJ*, 195, L11.
 Dyer, C.C. & Roeder, R.C. 1972, *ApJ*, 174, L115.
 Dyer, C.C. & Roeder, R.C. 1973, *ApJ*, 180, L31.
 Eddington, A. 1920, *Space, Time & Gravitation* (Cambridge Univ. Press).
 Einstein, A. 1936, *Science*, 84, 506.
 Hewitt, J.N. et al. 1988, *Nature*, 333, 537.
 Hoekstra, H. et al. 1998, *ApJ*, 504, 636.
 Lynds, R. & Petrosian, V. 1989, *ApJ*, 336, 1.
 Mollerach, S. & Roulet, E. 2002, *Gravitational Lensing and Microlensing*(World Scientific).
 Refsdal, S. 1966, *MNRAS*, 134, 315.
 Sachs, R.K. 1961, *Proc. R. Soc. London A*, 264, 272.
 Schneider, P., Ehlers, J. & Falco, E.E. 1992, *Gravitational Lenses* (Springer-Verlag, Berlin).
 Walsh, D., Carswell, R.F. & Weymann, R.J. 1979, *Nature*, 279, 381.
 Yoshida, H., Nakamura, K. & Omote, M. 2003, *astro-ph/0304012*.
 Yoshida, H., Nakamura, K. & Omote, M. 2005, *MNRAS*, 358, 39.
 Zwicky, F. 1937, *Phys. Rev. Lett.*, 51, 290.
 二間瀬 敏史, 1998, なっとくする宇宙論, 講談社

『オプション価格付け理論の紹介』

安達 隆(福島県立医科大学医学部数学講座)

今日、リスク・ヘッジや収益獲得を目的として、オプションの取引量は増加してきており、また、商品も多様化してきている。これにともない、リスク管理や適切な時価評価の重要性が高まっている。そのため、オプションを含む金融派生商品の公正価格を評価することは金融工学においても重要な研究課題であり、第4回「総合科学研究会」では、この価格付けに関する理論について簡単に紹介した。以下、紹介した内容の概説を記載する。

オプションとは

オプションとは、その所有者が、ある単位数の証券等を、ある行使価格で、ある一定の期日(以前)に取引できる権利(条件付き請求権)である。権利行使時期が最終日に限定されているものをヨーロッパ型、それ以前の任意の時期に行使できるものをアメリカ型という。

元となる証券等の原資産から派生して発達した金融商品という意味で“金融派生商品(デリバティブ)”とも呼ばれる。ただし、デリバティブはオプションだけでなく、先物取引、先渡契約、スワップも含む。

市場で取引されている主なオプションは下表の通りである。

	原資産または リスク要因	名称
店頭取引	通貨	通貨オプション
	債券現物	債券現物オプション
	金利	キャップ, フロアー
	スワップ	スワップション
	天候	天候オプション
	地震	地震オプション
取引所取引	通貨先物	通貨先物オプション
	債券先物	債券先物オプション
	金利先物	金利先物オプション
	株価指数先物	株価指数先物オプション
	個別株式	株券オプション
	商品先物	商品先物オプション

例: (ヨーロッパ型コール・プットオプション)

満期時 T に価格 K で株式を買うことができる権利をヨーロッパ型コールオプションという。時点 T での株価 S_T が K より高ければ、権利を行使して、価格 K で株式を購入し、市場で売ることにより $S_T - K$ の利益を得ることができる。 S_T が K より低いときは、権利を放棄することになる。

逆に、満期時 T に価格 K で株式を売ることができる権利をヨーロッパ型プットオプションという。時点 T での株価 S_T が K より低ければ、市場で株式を購入し、権利を行使して、価格 K で株式を売ることにより $K - S_T$ の利益を得ることができる。 S_T が K より高いときは、権利を放棄することになる。

したがって、ヨーロッパ型コールオプションとプットオプションのペイオフ C_c, C_p はそれぞれ、

$$C_c = \max\{S_T - K, 0\}, \quad C_p = \max\{K - S_T, 0\}$$

と表現できる。

2 項 1 期間モデルにおける公正価格

1 期間 2 証券モデルでのオプション評価について考える。市場では、安全証券(Bond)と危険証券(Stock)の2つの証券が取引されているものとする。現時点での安全証券の価格は1円、危険証券の価格は $S_0 (> 0)$ 円とする。また安全利子率を r とすると、1 期間後の Bond 価格は $1+r$ となる。また、1 期間後の Stock 価格 S_1 は次のどちらかの値をとるものとする。

$$S_0 \begin{cases} \rightarrow (1+\mu+\sigma)S_0 \\ \rightarrow (1+\mu-\sigma)S_0 \end{cases}$$

ただし、 $-1 < \mu - \sigma < r < \mu + \sigma$ という自然な仮定をおく。さらに、次の条件を仮定する。

仮定 1: 証券市場には摩擦的要因が一切存在せず、投資家は取引費用・税金を払うことなしに、いくらでも所与の市場価格によって、自由に売買取引(空売を含む)を行うことができる。

仮定 2: (無裁定条件) 元手なしに, 証券取引により, 時点 1 において確実に損をせず, かつ正の確率で儲けることはできない。

金融工学では, この「無裁定」の考え方を基本前提(いわば公理)として, 理論が組み立てられている。一方, 証券市場に様々な摩擦的要因を組み入れた現実の市場により近いモデルに関する解析は, 現在の主要な話題となっている。

以上のモデルのもと, 上述のヨーロッパ型コールオプションの売買価格 $p(C_c)$ は以下のように決定される。

初期資産 X_0 を用いて, 時点 1 におけるペイオフ C_c を複製する投資戦略を考える。Stock へ π 円投資し, 残り $X_0 - \pi$ 円を Bond へ投資したとすると, 時点 1 における資産価格 X_1 は

$$\text{株価上昇時: } X_1 = (1+r)X_0 + (\mu - r + \sigma)\pi$$

$$\text{株価下落時: } X_1 = (1+r)X_0 + (\mu - r - \sigma)\pi$$

となる。これが $X_1 = C_c$ となるためには

株価上昇時:

$$(1+r)X_0 + (\mu - r + \sigma)\pi = \max\{(1 + \mu + \sigma)S_0, 0\}$$

株価下落時:

$$(1+r)X_0 + (\mu - r - \sigma)\pi = \max\{(1 + \mu - \sigma)S_0, 0\}$$

を満たさなければならないから, これを解くと

$$\pi = \frac{\max\{(1 + \mu + \sigma)S_0, 0\} - \max\{(1 + \mu - \sigma)S_0, 0\}}{2\sigma}$$

$$X_0 = \frac{1}{1+r} \left(\frac{\sigma - (\mu - r)}{2\sigma} \max\{(1 + \mu + \sigma)S_0, 0\} + \frac{\sigma + (\mu - r)}{2\sigma} \max\{(1 + \mu - \sigma)S_0, 0\} \right)$$

を得る。したがって, この値 X_0 がオプション価格 $p(C_c)$ となる。実際, もし $p(C_c) > X_0$ ならば, オプション 1 単位を空売りして得た $p(C_c)$ 円のうち, π 円を Stock へ投資し, 残り $p(C_c) - \pi$ 円を Bond へ投資することにより, 確実に正の利益 $(1+r)(p(C_c) - X_0)$ 円を得ることになる。これは仮定 2 に反する。同様に $p(C_c) < X_0$ のときは, 反対売買が裁定取引になる。したがって, 仮定 2 によりオプション価格 $p(C_c)$ は複製費用 X_0 により一意に決定されることになる。

おわりに

無裁定機会にもとづくオプションの価格付けに関してもっとも簡単なモデルに関して述べた。価格付けの基本的な考え方について理解していただけたことと思う。この考え方を基本として, 確率測度の変換(リスク中立確率測度)という概念を取り入れることにより, 多項多期間モデルや確率微分方程式を用いた連続時間モデルへと理論がスムーズに拡張され, 展開されていくことになる。そこで有名なブラック・ショールズの公式が導出される。これらの理論は, 仮定 1 におけるような理想的な市場を前提として構築されたものではあるが, 実務においても価格変動の予測や実際の取引価格の算定などの場面で積極的に取り入れられている。詳細に関しては, 例えば, 文献 [2], [3] を参照していただきたい。

理想的な市場に関する理論はほぼ確立され, 現在は, 市場に様々な摩擦的要因(取引費用, 税金, 不完全情報, 取引制約 etc.) を組み入れたモデルに関する解析が研究課題となっている。今後, 現実の市場により近いモデルに関する理論が構築されることにより, さらに多種多様な金融派生商品が開発され, 様々なリスク管理の道具として, 役立つと考えられる。

参考文献

- [1] 伊藤 清 著「確率論」岩波基礎数学選書 (1991).
- [2] 田尾啓一 編「デリバティブと金融技術革新」中央経済社 (2001).
- [3] 藤田岳彦 著「ファイナンスの確率解析入門」講談社サイエンティフィク (2002).

編集後記

『総合科学研究会報』の創刊号が出来ました。今回は4回分の記録をまとめて掲載したので、「第1・第2合併号」といたしました。次号以降は半年に1度の発行を考えております。

今年は、6月23日（木）に看護学部の中山仁先生をお迎えして第5回の勉強会を催すことが出来ました。9月には、第6回を開きます。

これからも、年4回を目安に勉強会を開いてゆくつもりでおります。どなたでも参加御自由の研究会です。会での話題提供の希望は随時受け付けておりますので、下記連絡先までお気軽にどうぞ。

総合科学研究会報 第1・第2合併号

2005年7月吉日発行

編集・発行 福島県立医科大学総合科学研究会
〒960-1295 福島県福島市光が丘1番地
福島県立医科大学医学部人文社会科学講座内