

# 総合科学研究会報

第9号(2010年1月)

## 本号について

総合科学研究科も発足して今年で7年めに入ろうとしています。その間、これまでに19回の勉強会を開催して来ましたが、本会報には最近の2回(第17回と第18回)の様態を掲載しました。

第17回(2008年12月24日): 森修一氏(医学部微生物学講座・当時)、草津湯の沢ハンセン病自由療養地の研究—湯の沢部落と日本のハンセン病政策—

第18回(2009年3月31日): 吉田 宏氏(医学部自然科学講座)、距離測定における重力レンズ効果の影響

ちなみに、森修一氏の現在の御所属は国立感染症研究所ハンセン病研究センターです。

なお、第19回の研究会は2009年6月に開催され、医学部人間科学講座(人文社会科学)の福田俊章氏に話題提供をお願いしました。第20回以降も随時開催の予定です。

## 草津湯の沢ハンセン病自由療養地の研究

- 湯の沢部落と日本のハンセン病政策 -

森 修一                      福島医大微生物学講座  
 加藤三郎、田中梅吉      国立療養所栗生楽泉園  
 横山秀夫                      群馬県吾妻郡草津町

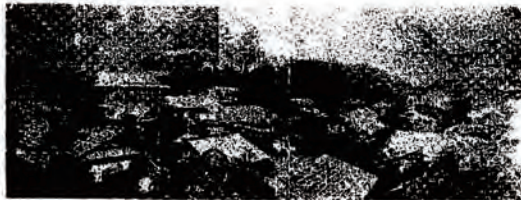
1

## 湯の沢部落の概観

(1887-1932)

2

## 湯の沢部落(1887-1932)



群馬県草津温泉に隣接して存在、戦前の日本で唯一のハンセン病患者の自由療養地であった。明治20年から昭和17年まで存在した。

3

## 湯の沢部落の地理



昭和12(1937)年『草津温泉史第三巻』



4

## 湯の沢部落の様相

綱引き大会



ハダシ



相撲大会



保育園

5

## 湯の沢部落でのハンセン病の治療

点灸療法



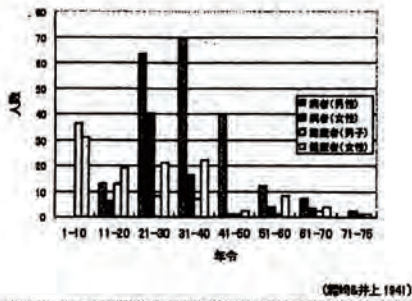
バルナ病院



刺灸の通

6

## 湯の沢部落の人口構成



## 湯の沢部落の経済機構

- ・ 借屋組合、労働共済会、消費組合、商業組合
- ・ その他  
高利貸、故郷からの仕送

湯の沢部落職業別構成 (1941年) (昭和16年上)

職業	人数	職業	人数	職業	人数
日雇い人夫	69世帯	農工	37世帯	借屋	15世帯
大工	4世帯	土工	4世帯	古物商	3世帯
運送員	3世帯	呉服商	3世帯	専業主婦	2世帯
豆腐屋	2世帯	炭焼	2世帯	縫具屋	2世帯
飲食店	1世帯	酒屋	1世帯	靴工	1世帯
洋服店	1世帯	魚商	1世帯	代客、買店	1世帯
女中	1世帯	代診	1世帯	織内商	1世帯
ペンキ屋	1世帯	製材業	1世帯	僧侶	1世帯
				教会堂守	1世帯

## ハンセン病医学と隔離政策

## ハンセン病政策の変遷

### スルホン剤開発以前(難治の時代)

1. 共同体からの排除(共同体外への送致、隔離)
2. 宗教的隔離(キリスト教による隔離、保護、ターミナルケア)
3. 社会的隔離(立法措置、保護、社会防衛)
4. 遺伝病対策としての隔離と結婚の禁止
5. 公衆衛生政策としての隔離(感染防止)の進展

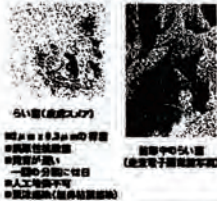
### スルホン剤開発以後(可治の時代)

1. 公衆衛生政策としての隔離の廃止、外来制度の進展  
保護施設としての療養所の併設、農業コロニーなどの設置
2. ハンセン病医療や政策の一般の医療-行政政策への組み入れ(Integration)
3. 多剤併用療法(Multi-drug therapy: MDT)政策の進展

現在でもハンセン病の発生機構、病態生理、らい菌の自然史には謎が多い。また、患者・回復者への偏見・差別の是正と社会復帰も大きな課題である。

## ハンセン病

ハンセン病は結核菌と近縁である病原性抗酸菌「らい菌(Mycobacterium leprae)」の感染により発症する疾患であり、主として末梢神経と皮膚がおかされる。らい菌感染者の免疫反応の差異により多様な病像を示す。



- 感染時期: 免疫系が十分に機能していない乳幼児期がもっとも多い。
- 発病: らい菌がヒトの体内に入っても発病は極めて希である。
- 感染の成立、発病因子: 菌の量、ヒトの免疫状態、環境要因など様々な因子が関与、貧困との相関が高い。
- 潜伏期間: 数ヶ月から数十年(平均4~6年)である。

## On the origin of leprosy

Science, 308:1040-2, 2005



らい菌のSNP(一塩基多型)を分析することによって、この単一クローンが世界中に広まっていったことを追って調べることができた。

この疾患は、東アフリカまたは近東(エジプト、トルコ、バルカン半島)に起源を持ち、一連の人間の移住に伴い広がっていったと考えられた。

ヨーロッパや北アメリカの人々が、ハンセン病をアフリカ西部、さらに南北アメリカ大陸に伝来させたのは過去500年以内のことである。

## 隔離の形式

開催年	主催者	第1施設	第2施設	第3施設	第4施設
1923年	第3回国際らい学会	病院	療養所	農業コロニー	
1938年	カイロ会議		療養所	Agricultural Settlement 特定村落区域	
1948年	ハバナ会議		療養所	農業コロニー	
1952年	WHOらい会議	病院	隔離所 (Anyam)	農業コロニー	村の施設
1954年	ラクナー会議	病院	療養所	地方都市施設	快復厚生施設

### コロニー隔離

特設村落などを中心とした隔離で、感染の拡大阻止を目的とするが、社会から遠ざけられている患者の保護の側面が強い。

### 施設隔離

患者を強力な感染源としてみなし、病院施設、療養所などを中心に最重な隔離を行うもので、一般には社会防衛の側面が強い。

13

## 施設隔離

### 病院(Hospital)

病院は都市にあって一時的に患者の診断、治療、看護をなすもので暫定的隔離施設である。



### 療養所(Leprosarium, Sanatorium)

長期的隔離施設



### コロニーと村落(Agricultural Colony, Group Isolation, 特定村落区域, 地方都市施設をも含む)

住居隔離が困難な患者を隔離するために療養所に空床が無い時、一定の土地を指定してこれらの患者を集めて村落をつくるのが特定村落であり、主として農業生産を行い、完全または部分的自給を図るもの。これがさらに集団的発展をしたものがコロニーである。



14

## 日本のハンセン病政策の経過

- 法律第11号「癩予防ニ関スル件」の成立  
明治40年(1907年)、浮浪する患者の隔離
- 「癩予防法」の成立  
昭和6年(1931年)、全患者の隔離

隔離政策の  
進展・確定期

- 「らい予防法」の成立  
昭和28年(1953年)、「癩予防法」を継続
- 「らい予防法」の廃止  
平成8年(1996年)

隔離政策の  
維持廃止期

15

## 光田健輔(1876-1964)



明治9年に山口県防府市に生まれ、医学を志し、上京。明治30年には医術開業試験後期試験に合格、同年、東大病理の選科生となり、山極勝三郎、三浦守治の下に病理学を学んだ。日本のハンセン病医学、隔離政策の先駆者である。

彼は湯の沢部落の医療を助け、住民の救済を行っていた。

16

## 明治以前から隔離政策の開始期

-明治期(-1912)

17

## ハンセン病史概略(-1907)

世紀 欧州 日本

- 前4世紀 インドから地中海沿岸諸国へ(隔離小屋、らい村の存在)
- 4-5世紀 欧州内陸部へ蔓延(戦争、交易、民族移動による)
- 6世紀 欧州各地へ広がる
- 8-9世紀 患者の存在(大宝令、令義解など)
- 13世紀 ハンセン病の猖獗時期(患者は約100万人)  
(隔離施設は19,000ヵ所以上)
- 14世紀 欧州内陸部の流行は減少
- 17世紀 ハンセン病の消滅(北欧を除く)
- 19世紀 ノルウェーでの隔離開始、ハンセイによるM.lepraeの発見(1873年)  
ドイツでのハンセン病の小流行、国際らい会議の開催(1897年(明治30年))  
日本における流行
- 20世紀初頭 隔離政策の開始 法律第11号「癩予防ニ関スル件」の成立  
1907年(明治40年)

18

## 欧州のハンセン病史 宗教的規範による行動制限



仮装埋葬の様式

### 宗教的規範による行動制限

「汚れたるもの」、「死の前の死」黒頭巾の着用、共同生活の禁止、財産の没収、結婚禁止、離婚など

## 欧州のハンセン病史 宗教的規範による行動制限

- らい病人は黒き頭巾をかぶりて歩くべし
- 彼は教会、水車場、製パン場にはいるべからず
- 彼は市場、縁日に来るべからず
- 彼は公衆の水飲み場にて顔や手を洗うべからず
- 彼は物に触れんとする場合は、かならず杖を以て触れるべし
- 彼は他人に声をかけられて返事せんとするときには、相手の風下に立ちて口をきくべし
- 彼は夕方の人混みの時間に狭き道を歩くべからず
- 彼は市町村のうちに住まうべからず
- 彼の住む場所は人里を遠く離れた田舎なるべし

## ペストの流行、宗教改革 市民革命、産業革命



ペストに闘む医者

市民革命

産業革命

## ノルウェーの隔離1856年-

□19世紀半ば、北欧のノルウェーにはハンセン病が蔓延し(1856年の調査では患者数2858人、有病率は10000対20の高率であった)。

□世界的なハンセン病研究者であったダニエルセン(Daniel Cornelius Danielssen, 1815 - 1894)は、その研究からハンセン病は主として血液の障害を主とする非特異的な遺伝的異常と考え遺伝説を唱え、ハンセン病撲滅の手段として患者を病院に隔離し、結婚させない方法を提唱した。

□この提案は1851年、議会により却下されたが、非常に多くの医学者がこの提案を支持し続け、1856年にはハンセン病患者登録制度が確立し、隔離政策が実行されていた。



ノルウェー

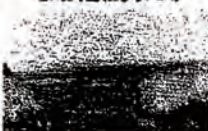


Gerhard Henrik Armauer Hansen (1841-1912)

## ハワイの隔離1865-



モロカイ島(カラウハレ)



ダミアン神父(1870年代)



コクアとその妻(1870年代)

□ハワイでは1850年代からハンセン病が大流行した。  
□1865年には、原住民の約3%強にハンセン病の発生が報告され、同年、ハンセン病患者の強制隔離が開始された。  
□カラウハレでの強制隔離患者数は1866年で141人、1890年代では約700人、1900年代の初期では1000人以上であった。

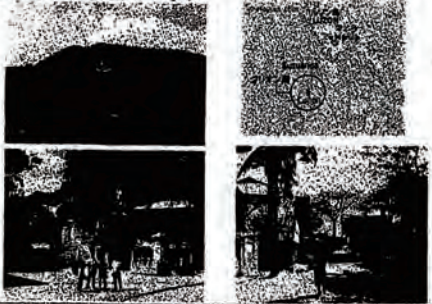
## 第一回国際らい会議 1897(明治30)年、ドイツ ベルリン



Rudolf Ludwig Karl Virchow 1821-1902

□ハンセン病の予防措置を中心に議論が行われ、「適切な治療法の存在しない現在、感染症であるハンセン病の地域への蔓延を阻止、予防するには患者隔離しか方法はない」と決議された。  
□らい菌の生活条件と人体内への進入路は不明。おそらく人に対する侵入門戸は口腔および鼻腔粘膜である。  
□日本からは土肥慶蔵、高木友枝などが参加した。

## クリオン療養所「生きる死者の地」 1905年(明治38年)-



23

## 隔離政策の進展(公衆衛生政策)

- 1885年 ハワイ州で強制隔離を開始
- 1884年 ルイジアナ州カールビルにハンセン療養所が開設
- 1890年 ニューサウスウェールズで隔離を立法化
- 1892年 南アフリカのケープコロニーで隔離を立法化
- 1897年 第一回隔離らい会議
- 1901年 スリランカで隔離を立法化
- 1905年 ハワイ州政府はモロカイ島での隔離を立法化
- 1907年(明治40年) 法律第11号「癩予防ニ関スル件」の成立



見取療養病院(1888年)



神山養生病院(1889年) 鹿島園(1894年) 回春病院(1895年) 聖路閣待勞病院(1898年)

24

## 日本における隔離の提唱

1901年(明治34年)



土肥廣隆(1866-1931)

1901年(明治34年)9月9日、東京帝國大学皮膚病學部(ばいど)学部長教授、土肥廣隆は九州医学会で「日本ノ癩病ニ就テ」と題して演説を行った。その内容は

- ハンセン病は伝染病である。
- しかし、感染力は弱い。それでは何故感染するのか。
- 貧困などもその要因であるが体質が重要である
- 様々な治療が一時は功を奏すが、それは恒常的ではない。つまり根治は不可といえる。
- ハンセン病の撲滅には隔離が唯一、有効である。併せて断種により原因の伝染を防ぐのが有効である。

27

## 山根正次の演説

1901年(明治34年)



山根正次(1857-1925)

明治34年、当時、警務局長であった山根正次は皮膚科診療科科学会第一回総会において、演説として以下の演説を行った。

- 急性伝染病より慢性伝染病である癩毒、ハンセン病は何より恐ろしい病気である。
- 癩毒により國家を担う若者、軍人は大きな打撃を受けている。
- ハンセン病は多くの悲劇を生んでいる。
- その撲滅法は唯一隔離にある。また結婚を許すべきではない。
- 患者は気の毒かも知れないが、ハンセン病による悲劇を断ち切るにはやむを得ない。

28

## コッホと北里柴三郎

□1908年(明治41年)、コッホ(Heinrich Hermann Robert Koch, 1843-1910)が来日、日本では盛大な祝宴が行われた。この来日中、コッホは結核およびハンセン病における隔離の必要を強調した。

□コッホの弟子である北里柴三郎は明治30年代からハンセン病患者の隔離を唱え続け、政府の隔離政策に非常に大きな影響を与えた。



29

## 日本における隔離の開始1907- 法律第11号「癩予防ニ関スル件」



第一区「全生病院」、1908年、東京

- 1905年(明治38年) 癩予防相談会  
洗沢栄一、窪田静太郎、大隈重信、清浦奎吾、島田三郎、光田健輔、三井、岩崎、大倉、安田、住友などの財閥の代表、ハンナ・リデル
- 山根正次、根本正、斎藤寿雄の建議など
- 1908年(明治41年) コッホ、北里柴三郎

30

## 公立療養所の設立(1909年-)



金生病院1908年



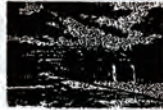
外島療養院1908年



九州療養所1908年



第4区療養所1909年  
(大島青松園)



北部療養院1909年

31

## 第2回国際らい会議

1909年(明治42年)、ノルウェー、ベルゲン



Gerhard Henrik Armauer  
Hansen  
(1841~1912年)

- ハンセン病の原因、伝播様式などの理論を注意深く確認する
- 治療薬の開発を行うべき
- 任意隔離の推奨
- 患者の子供を両親から早期分離、観察が決議された。
- 乞食らい、浮浪者らいの厳格な隔離を行う。
- 接触者の定期的検診などが勧告された。
- 日本からは北里柴三郎が出席した。

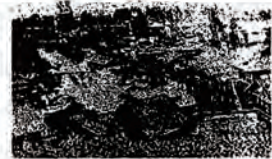
32

## 湯の沢部落開村

明治20(1887年)

33

## 草津温泉とハンセン病



明治期の湯畑周辺



- ・ベルツ(Erwin von Balz)
- ・1878年頃より草津温泉を訪れるようになり、「草津には無比の温泉以外に、日本で最上の山の空気と、全く理想的な飲料水がある。」
- ・皮膚病一般、梅毒、ハンセン病への効用を論文などで世界に知らしめた。

34

## 湯の沢部落1887-

年	人口	住民による運動	宗教運動	支配の構図	日本のハンセン病政策
明治20年 (1887)	10名			相互扶助の精神	民間事業のみ
明治26年 (1893)			ペルトラン派草	宿屋組合	
明治28年 (1895)	50名				
明治35年 (1902)	126名	高橋団の成立		宿屋組合 対 高橋団	
明治40年 (1907)					療子法二箇スル件制定 (施行 1909年)
明治42年 (1909)		労働共済会の成立			府県連合の公立療養所開設

35

## 絶対隔離政策の進展期

大正期(1912-1926年)

36

## 絶対隔離政策の進展

- 1912年 アメリカ合衆国では患者は厳密に隔離された個室を用いて療養所に移送される規制が制定された。
- ハワイ、カナダ(英領)、オーストラリア、スウェーデン、アメリカ合衆国、ドイツ、スイス、その他の国でハンセン病予防法が成立した(1922年)。イギリスには全然これらの規定がない。
- 1922年 アメリカ連邦政府による療養所運営が開始(カービル療養所)、偽名、選挙権無し、郵便物の減額処理、解放制度の設置、1945年まで自主的入所は15%であった。
- 1923年、「第三回国際らい会議」、光田徳輔が参加
- 1925年(大正14年)、日本救療協会の成立

この時期の隔離は感染予防の政策から患者への隔離が主なる。特設部署が否定され始め、療養所問題が進展する。

27

## 『癩患者の告白』(明治-大正)

- 要約: 発病し、病院で治療を行い、宗教にすがり、民間療法を試みるが効果がなく、治療費の捻出に財産を使い果たし、世間の差別にさらされ、家族にさえも迫害され、ある日、浮浪の旅に出る。やがて、故郷からの仕送りが途絶え、貧窮に苦しみ、人々からの施しで日々を生きるが病状は次第に悪化、自殺する者も非常に多い。
- 彼等に世間一般は非常に冷たく残酷、最後に療養所にたどり着き、つかの間の安息を得、療養所に感謝する。しかし、療養所も安息の地ではなく(療養所内での患者の扱いに対する不満、善良な患者と不良な患者の混在、自由が無い、など)、やがては患者自身により運営される自由療養村を希求する様になる。

内務省衛生局

28

## 湯の沢部落(大正期)

年	人口	住民による運動	宗教運動	支配の構図	日本のハンセン病政策
大正2年(1913)		光塩会(回春病院)、大坂東洋教会草津支部の成立(外島療養院)			
大正4年(1915)	252名	共同自炊会の運動	盲童組合	対 労働共教会	
大正5年(1916)		日本救公会	ゴウウォール・リー家庭		懲戒控束令の制定
大正6年(1917)		バルナバ(医療)の開設、バルナバホームの設置・建設が進む			
大正9年(1920)	528名	消痰組合	労働共教会・知識人(名醫家、大卒者)		
大正10年(1921)					
大正11年(1922)					
大正14年(1925)	676名	訪問村開設			日本救療協会の成立
(1925)		三上千代、日本救療協会、光田徳輔			

29

## バルナバ・ミツシヨンの開始

- 1915年(大正4年)8月、光塩会の宿沢黨の願いにより東京の牛込教会のコンウォール・リーが来草した。
- リーは湯の沢部落を視察、その後、救療事業を決意し、1916年(大正5年)4月、まだ残雪の残る草津に入り伝道を開始した。バルナバ・ミツシヨンの開始である。



Mary Helena Cotwell Leigh  
1857-1941

30

## バルナバ・ホーム

- 1916年(大正5年)には「愛の家庭」(婦人患者救済のための施設)が設けられ本格的な患者救済事業が始まった。その後、多くの患者救済施設が設けられた。
- 各ホームは総称して「バルナバ・ホーム」と呼ばれ、開設15年後の1930年(昭和5年)には36棟、収容人員232名に達した。



31

## 子供の教育



- 草津町は健康児童に限り、草津町の小学校で一般の児童とともに同じ教室内で授業を受けることを許可、1925年(大正14年)には、ハンセン病およびその他の病気で通学できない子供のために聖望小学校ができた。

32



## 自由療養地構想の進展

### 自由療養地構想の開始

※1919年(大正8年)3月25日、第41回帝國議會衆議院において、土屋清三郎ほか13名により建議案が提出された。

「政府は患者をして、その家族より離れて部落生活を営ましむるため、適当な施設をなすべし。」

※この衆議院における建議と並行して、内務省の諮問機関である保健衛生調査会も1920年(大正9年)9月14日「療予防案要項」を発表し、有實患者のために自由療養地を設けるように提案した。

※1921年(大正10年)3月19日には、第44回帝國議會衆議院において中馬興丸ほか3名が、療予防案法改正に関する建議案を提出した。

43

## 湯の沢部落による建議

1922(大正11)年

湯の沢部落を国策としての自由療養地とし、住民の苦境を救い、さらには絶対隔離政策の進行と対峙すべく、住民あげての自由療養地認定請願が興された。それが1922年(大正11年)3月28日の湯の沢区長高田による建議であった。

群馬県吾妻郡草津町湯の沢区を患者の自由療養地とする件

1. 自由療養地の建設は療予防政策および患者救済ならびに國家の權威保持に必要なこと。
2. 湯の沢部落を自由療養地とするの利益  
古来草津温泉の療疾患に特殊の効驗ありとの伝説により未草患者多きこと。現行制度の下に於ける根本的隔離実行に比し経費少きを期し得ること。

44

## 鈴蘭村の開村

※1925年(大正14年)、三上千代はハンセン病患者の理想村を目指して鈴蘭村を開村した。鈴蘭村は一種の特設部落である。

※鈴蘭村は「YMCA」(賀川豊彦)、「希望社」(後藤幹吉)、光田健輔、篤志団体の支援を受けた。

※鈴蘭村を背景に日本の救癩運動は高まった。「YMCA」を中心に、1925年、「日本救癩協会」が成立した。



三上千代  
(1891-1978)

45

## 絶対隔離政策の確立期

昭和期(1926-1945年)

46

## 絶対隔離政策の確立

国際連盟保健機構、昭和16(1931)年  
「ハンセン病の公衆衛生の原理」

- ・ハンセン病の発生予防の最重要は隔離と治療である。
- ・感染段階における患者の隔離の価値は大なるものであり、これを強制することは行政的にも可能であり、譲うべきである。
- ・法律・伝染に關しての報告、伝染性患者の隔離、治療の便宜、消毒方法、従業禁止
- ・疫学的監視・患者數の把握、早期発見、予查検診
- ・教育宣伝、科學的研究、隔離、退所患者の監視、新生児の分離、患者の結婚の禁止など

(井上 1957: 98-100)

47

## 絶対隔離政策の進展

□1912年 アメリカ合衆国では患者は厳密に隔離された個室を用いて療養所に移送される規制が制定された。

□ハワイ、カナダ(英領)、オーストラリア、スウェーデン、アメリカ合衆国、ドイツ、スイス、その他の国でハンセン病予防法が成立した(1922年)。イギリスには全然これらの規定がない。

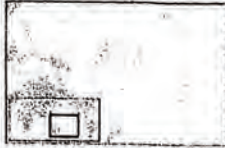
□1922年 アメリカ連邦政府による療養所運営が開始(カービル療養所)、偽名、選挙権加し、郵便物の滅菌処理、解放制度の設置、1945年まで自主的入所は15%であった。



48

## ナウルにおけるハンセン病の流行

1912年(大正元年)-



□ハンセン病がナウルに入ったのは1912年、隣国、ギルバート島の患者からであった。  
 □1920年には4人の患者が報告され、1924年には全人口の24%がこの病気に冒された。  
 □この流行はインフルエンザの大流行の後に起こったものであった(1918年、スペイン風邪)。  
 □この流行は1927年から減少に転じ、1952年には全人口の4%になり、1981年には1%以下にまで減少した。



太平洋連邦に属する島国ナウルにハンセン病が流行し、多くの患者が苦しんでいる。

41

## 第3回国際らい会議

1923年(大正11年)、フランス、ストラスブール

- 外国人のハンセン病患者の入国禁止
- ハンセン病の流行の著しい場所での隔離の必要性(隔離は人道的であること)
- 患者の子供の親からの分離と観察
- 貧困者、浮浪者などの病院、療養所または特設部落への隔離
- 患者の定期検診
- 特效薬の積極的探求
- 日本からは光田健輔が出席した。



39

## ハンセン病の化学療法進展



大風子

### □大風子油製剤の開発

□朝鮮、支那等地方に産する大風子の根から精製した油である。紀元前よりハンセン病の特効薬として知られていた。

□1917年(大正6年)、ロジャース(英)は大風子油を製剤化し、内服薬や、注射薬としてインドで使用し、らい菌の増殖と、臨床症状の改善を導き、その後大風子エチルエステルやヨウ化添加物の製剤が開発された。

□大風子製剤を治療剤として対策に使用する試みは、米領管理下のフィリピンにおいて具体的に実施され、解放制度が施行、隔離政策に変化が生じ始めた(パロールシステム)。

大風子油製剤の注射

31

## パロールシステムの稼働と問題点



米政府はキュリオン産製所で大風子製剤を治療剤として対策に使用し、パロールシステム(解放政策)が稼働し始めた。パロールシステムは1907年に始まったが、稼働上の問題は1922年以降であり、実質の稼働は1930年代であった。



1906年-1932年  
解放患者2263人

候補者期	4ヶ月
解放委員会期	1ヶ月
国家決定委員会期	1ヶ月
解放期	2ヶ月
解放前期	2ヶ月
解放後期	5ヶ月

解放後の軽快患者は、2年後で約70%の再発があり、さらに解放患者のFollow-upは50%以下であり、パロールシステムは厳しい批判にさらされた。

32

## 日本における大風子油治療



大正時代から昭和20年代までの日本のハンセン病治療も大風子油で行われていた。日本では製剤ではなく、純度の高い大風子油の注射が行われていた。しかし、その再発率は約70%であり、製剤と同様に治療の限界があった。この臨床結果は光田健輔により第3回国際らい会議で発表された。

33

## ハンセン病の疫学研究的進展

□1930年代より、ハンセン病の疫学研究が進展、感染源、感染経路については、兄弟姉妹、両親、親戚、配偶者などの順での感染する。  
 □男女の罹患率は男2.7に対し女1、成人は感受性が低い、潜伏期間は数カ年にわたる。  
 □治療薬(大風子油など)の効果は恒久的ではない。

□感染は接触により起こり、らい菌の伝播は患者と幼児との数に比例して増減する。  
 □1930年(昭和5年)には、ハンセン病研究促進を目的としてLeonard Wood Memorialが発足  
 □1931年(昭和6年)にはInternational Journal of Leprosyが刊行された。

34

## 「ハンセン病の公衆衛生の原理」国際連盟保健機構 昭和6年(1931年)

- ハンセン病の発生予防の最重要線は隔離と治療である。
- 感染段階における患者の隔離の価値は大なるものであり、これを強制することは行政的にも可能であり、譲すべきである。
- 法律・伝染に関する報告、伝染性患者の隔離、治療の便宜、消毒方法、従業禁止
- 疫学的監視・患者数の把握、早期発見、学童検診
- 教育宣伝、科学的研究、隔離、退所患者の監視、新生児の分離、患者の結婚の禁止など

(井上 1957: 98-100)

35

## 絶対隔離政策の開始

「癩予防法」の成立、1931年(昭和6年)



昭和六年(一九三一年)の癩病予防法の成立

36

## 「フィリピンらい監理諮問委員会」

昭和7年(1932年)

- これまでのハンセン病は不治という見解から、治療業による治療の可能性があるとの見解が示された。一方、その限界も併せて指摘された。
- 本会議ではこれらの結果を踏まえ、隔離の緩和、パロールシステムの施行に傾く世界の政策を、これらの科学的根拠からもう一度、考え直す必要があるという見解を示した。
- また、本会議ではパロールシステムの問題点が議論され、医学的には大幅な修正が必要なこと、社会的には患者の入所促進のためパロールシステムを維持すべきであるとの見解も示された。

(柳橋&鶴崎編 1957:80-103)

37

## 患者収容の推進



野外生活患者の収容



患者輸送列車(お召し列車)



沖繩1935年(昭和10年)



本妙寺部落解散1940年(昭和15年)

38

## 湯の沢部落 昭和期 (部落解散まで)

年	人口	住民による運動	宗教運動	支配の構図	日本のハンセン病政策
昭和3年 (1928)					日本瘰癧学会発足
昭和4年 (1929)					放癩車運動始まる
昭和5年 (1930)					長島愛生園、薬生薬泉園建設決定
昭和6年 (1931)					瘰癧予防協会発足、癩予防法制定、長島愛生園完成
昭和7年 (1932)					薬生薬泉園運営開始
昭和8年 (1933)		ゴッフォールバーリ-湯の沢を去る			放癩車運動高まる
昭和13年 (1938)					特別病院の建設・運営開始(薬生薬泉園内)
昭和16年 (1941)	574名	湯の沢部落解散		バルナバ・ミッション解散	

39

## 湯の沢部落 昭和期



40

## 栗生楽泉園の開設 1932(昭和7年)

- ※ 1930年(昭和5年)、内務省社会局で「鈴蘭村」救済計画が話し合わせ(光田や政治家・実業家の参加があった)、民間での患者救済の限界を確認すると共に、国立療養所の建設促進が意見された。
- ※ 同年8月15日の新聞に「白根山麓の高原に瘧の自由療養区一明年度から三ヶ年計画で設置」と政府決定が報じられた。国立療養所栗生楽泉園の建設開始である。



## 湯の沢部落解散1942(昭和17年)



## 絶対隔離政策の継続

昭和期1944-

## プロミンの出現



プロミンの注射

石塚守三  
プロミンの合成に成功した。

スルホン剤であるDDSが主成分で1943年、米國カービル産業所においてFagetにより使用され劇的な効果が証明された。



軽快退所

## 患者運動の開始1947-

湯の沢部落の元住人達を中心となった。

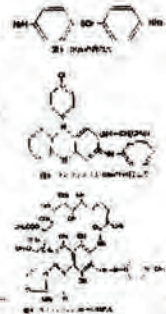


## 化学療法の進展期 絶対隔離政策の終焉

※digsona(DDS) 1949年—  
プロミンの有効成分であり、経口投与が可能であり、在宅治療への道筋を開いた。パラミノ安息香酸の拮抗剤、らい菌の葉酸の合成を阻害する。

※クロファミジン(CLF, B663)1962年—  
フェナジン系誘導剤で、菌のDNAと強固に結合して抗菌作用を示す。

※リファンピシン(RFP)1970年—  
抗生物質であるリファマイシンの誘導体。菌のRNA合成を阻害し、その作用は殺菌的である。



年代	疫学など	隔離の種類、感染防止対策
1943年	Prominの報告(ファジエット)	
1952年	WHO第1回らい専門委員会	開放性患者の伝染力は強く、非開放性は伝染力が少ない 開放性患者の隔離は必要
		DDSの経口投与による集団治療がハンセン病コントロールに有効と報告
		化学療法による家庭内感染の著しい低下、BCG接種、DDSの予防投与の効果が確認される
1956年	第7回国際らい学会	従来の患者隔離政策を廃止、外来治療を実施すべきとの決議が行われた
1963年	WHO/EURO/EMRO/Inter-Regional Leprosy Control Conference	外来、在宅治療の提言
		DDS、RFP治療後の再発の報告
1972年	THELP、IMMLEP学会の発足	
		DDS耐性菌に対する新たな化学療法の開発、ワクテンによる予防研究
1981年	THELPの会議	MDTが提唱された
1981年	第44回世界保健総会「ハンセン病制圧宣言」	
		MDTとintegrationを中心にハンセン病政策は進展
2005年	ハンセン病が公衆衛生上の問題点となる国は5カ国に激減	

## ハンセン病回復者の社会復帰

日本では患者・回復者の社会復帰は困難を極めた。




黒髪事件 1954年  
(竜田児童通学拒否事件)

## 希望の村運動(韓国)

Initiated by Jon Lew in 1947

定着村を作り患者・回復者の定住を促進した。

Mobile clinic の開始  
Korean Leprosy Association の設立  
Promin の導入



# 距離測定における重力レンズ効果<sup>(1)</sup>

吉田 宏

福島県立医科大学 医学部 自然科学講座 (物理学)

## 概要

天体までの距離の観測値と理論値とを比較することで、宇宙がどのような構造を特徴付けるパラメータ (宇宙論パラメータ) に制限を与えることが出来る。本報告では、遠方の天体までの距離をいかにして測定するのかについて概説した後、これらの観測値に対して重力レンズ効果はどのように関わっているのか、そして平均的には重力レンズ効果は距離の見積りにどのような形で現れるのかについて、最近の多重重力レンズ効果に関する数値実験の結果も含めて紹介したい。

## 1 序論

### 1.1 距離測定<sup>(2)</sup>

#### 1.1.1 三角測量を利用した距離測定

距離を測定する際、メジャーを直接あてて測定できればそれに越したことは無いが、必ずしもメジャーをあてられるとは限らない。メジャーを直接あてることは出来ないが比較的近くにある物体までの距離は「三角測量」と呼ばれる三角形の相似の性質を利用して求めることが出来る。この方法を応用して、火星や金星などまでの距離を測定し、更にその値を使って太陽までの距離<sup>(3)</sup>が求められている<sup>(4)</sup>。

三角測量と地球の公転運動を組み合わせて恒星までの距離を求める方法を「年周視差法」という。今見える星の位置と半年後の同じ星の位置 (見える方向) の違いと太陽までの距離 (1AU) から、その星までの距離を見積もることが出来る。この方法で初めて恒星までの距離を見積もったのが、あの Bessel<sup>(5)</sup> である (1838 年)。この他にも、三角測量と太陽の固有運動を組み合わせた永年視差法と呼ばれる方法や、総計視差法、運動星団収束点法等の方法でより遠くの天体までの距離が求められている。これらの方法の中で、現在最も遠くまで測定している方法は、Hipparcos 衛星による年周視差法を用いた測定で、約 300 光年程度までの天体が測定されている。それより遠方の天体では年周視差があまりにも小さい為、現在のところ測定されていない。しかし、数年後には更に高性能な測定が可能な位置天文専用観測衛星 JASMINE (JAXA:日本) や GAIA (ESA:ヨーロッパ) が計画されており、3 万光年までの観測が期待されている。

#### 1.1.2 明るさを利用した距離測定

更に遠方の天体までの距離はどのようにして求められるのだろうか? 光源の明るさには光源の「真の明るさ  $L$ 」と「見かけの明るさ  $l$ 」とがある。 $L$  は、光源が 1 秒間あたりに放出するエネルギー、 $l$  は 1 秒間あたりに  $1\text{m}^2$  内を通過するエネルギーである。この  $l$  と  $L$  の関係は、光源までの距離を  $D$  とすると  $l = L/(4\pi D^2)$  で与えられる。従って、何らかの方法で見かけの明るさ  $l$  と真の明るさ  $L$  がわかれば、この関係から光源までの

距離を

$$l = \frac{L}{4\pi D^2} \Rightarrow D = \sqrt{\frac{L}{4\pi l}} \quad (1)$$

と見積もることができる。これと等価な関係として、光源の見かけの等級  $m (= -2.5 \log_{10} l + \text{定数}_1 = -2.5 \log_{10} L + 5 \log_{10} D + \text{定数}_2)$  と絶対等級  $M = -2.5 \log_{10} L + \text{定数}$  を使って

$$m - M = 5 \log_{10} (D/10\text{pc}) \quad (2)$$

の関係がある<sup>(6)</sup>。この  $m - M$  を「距離指標」という。

見かけの明るさは通常の観測 (測光観測) だけで得られるのに対して、真の明るさはその天体までの距離がわからないと求められない。つまり、距離がわからなければ真の明るさがわからないことになる。天体までの距離を知るために真の明るさ使おうというのが上記の式 (2) なのに、真の明るさを距離から求めるのでは、堂々巡りである。距離測定とは独立に光源の真の明るさが求められるような方法が必要である。そんな都合の良い方法が Leavitt によって発見された。Leavitt はセファイド型変光星という周期的に明るさの変わる星を数多く小マゼラン星雲の中に見つけ、これらの変光の周期と見かけの明るさの間には強い相関のあることを見出した。更に、Hertzsprung や Shapley は、比較的近くのセファイド型変光星までの距離を前述の距離測定法で求め、Leavitt の「変光周期と見かけの明るさの関係」を「変光周期と真の明るさの関係」に焼きなおすことに成功した。この関係を使えば、変光周期の測定から真の明るさが分かり、その変光星を含む星団や銀河までの距離を知ることが出来る。

この方法を利用して Hubble は M31 (アンドロメダ大星雲) が我々の銀河の外にあることを見出している。この観測によって、宇宙は我々の天の川銀河の外側にも広がっていることが明らかになった (1924 年)。現在では、セファイド型変光星を用いた方法で、約 6500 万光年までの距離測定が可能である。

#### 1.1.3 標準光源と距離はしご

セファイド型変光星の変光周期と真の明るさの関係のように、測光観測とは独立な観測から真の明るさを見積もることのできる天体を「標準光源」といい、その天体 (を含む星団や銀河など) までの距離を見積もる方法を「標準光源法」という。セファイド型変光星より遠い天体までの距離は、渦巻銀河の回

(1) 本稿は第 18 回総合科学研究会 (2009 年 3 月 31 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) この章は Webb (1999) の著書 MEASURING THE UNIVERSE を参考にした。

(3) この距離を 1 天文単位 = 1AU といい、1AU  $\approx$  1.5 億 km であることが知られている。

(4) 最近では、火星程度までの近くの惑星に対してはレーダーやレーザーを使って非常に精度の高い測定がなされている。

(5) 旗の振動などを解析する際に現れる特殊関数を見つけた、あの Bessel である。

(6) 1pc (パーセク)  $\approx$  3.24 光年。1 光年は光が 1 年かけて進む距離で約  $9.45 \times 10^{13}$  km である。

転速度  $V$  と真の明るさの関係 (Tully-Fisher 関係)、楕円銀河の銀河内の恒星の速度分散  $\sigma_V^2$  と真の明るさの関係 (Faber-Jacson 関係) や Ia 型の超新星の光度曲線の形と最も明るくなったときの真の明るさの関係などの方法が知られている。これらの方法で約 30 億光年までの距離が測定できる。

Tully-Fisher 関係や Faber-Jacson 関係は次のように得られる：(セファイド型変光星が検出できる程度に) 比較的近くの銀河内のセファイド型変光星の変光周期の測定から、その変光星を含む銀河 (母銀河) までの距離を算出し、母銀河までの距離と見かけの明るさから真の明るさが求められる。更に、測光観測とは別の観測から母銀河の回転速度/速度分散を求め、これらの量と真の明るさの関係 (Tully-Fisher 関係/Faber-Jacson 関係) が確立される。この確立した関係を、セファイド型変光星の確認できないような遠方の銀河に適用して、回転速度や速度分散の観測から真の明るさを求め、これと、測光観測から得られる見かけの明るさを組み合わせて、より遠方の銀河までの距離が測定可能となる。

このように、比較的近くの天体まで距離を求めておいて、天体の明るさは独立な物理量と真の明るさとの関係を新たに確立し、それを使って更に遠方の天体までの距離を求める方法を「距離はしご」と呼んでいる。天文学では、三角測量から始まり、いくつかの距離測定法を距離の小さいほうから順に繋ぎ合わせて、より遠方にある天体までの距離が算出されている。

## 1.2 宇宙モデル

### 1.2.1 赤方偏移と膨張則

Slipher(1912 年) は多くの渦巻星雲<sup>(7)</sup> のスペクトルが全体的に波長の長い (赤い) 方向へずれている (これを「赤方偏移」という) こと、すなわち、これらの星雲が我々から後退していることを見出した。また、Hubble はセファイド型変光星の変光周期と真の明るさの関係を使って渦巻星雲までの距離を求め、遠方の渦巻星雲ほど速く遠ざかっていることを見出した。これを、「Hubble の膨張則」という (1929 年)。

Hubble の膨張則は銀河の後退速度  $V$  とその銀河までの距離  $D$  との関係である。銀河の後退速度  $V$  は赤方偏移 (スペクトルのずれの度合い) を  $z$  で表すと、 $V = cz$  ( $c$  は光速) と表せるので、比例定数を  $H_0$  (これを Hubble 定数という) とすると、 $D = V/H_0 = (c/H_0)z$  のように距離と赤方偏移の関係が得られる。このように、天体までの距離は赤方偏移の関数として表すことができる。赤方偏移の比較的小さな天体に対しては、上述の関係があることが理論的にも観測的にも示されている。しかし、より赤方偏移の大きな天体までの距離はより複雑な  $z$  の関数として与えられる。

### 1.2.2 一般相対論的宇宙モデル

Einstein は 1915 年に一般相対性理論を完成させ、1917 年にその理論を使って宇宙の記述を試みている。重力は引力なので、物質のみで構成される宇宙はすぐに潰れてしまう。Einstein は静的宇宙<sup>(8)</sup> を構築する為、重力に抗するように宇宙項 ( $\Lambda$ : 宇宙定数とも呼ばれている) で表される反発力<sup>(9)</sup> を導入した。これに対して、Friedmann は 1922 年に宇宙項がなくとも潰れない膨張宇宙モデルを発表、更に 1927 年に Lemaître は Friedmann のモデルを宇宙項入りのモデルに拡張した。彼らのモデルを Friedmann-Lemaître (FL) モデルという。Hubble が「Hubble の膨張則」を発見する (1929 年) 2 年前のことである。現在、FL モデルは宇宙の大域的な構造をよく記述するモデルとして、広く受け入れられている。

FL モデルは 3 つのパラメータで特徴付けられている：宇宙の年齢やスケールを決める Hubble 定数  $H_0$ 、宇宙の中にある物質の平均密度に関連した密度パラメータ  $\Omega_0$ 、そして、Einstein の導入した宇宙項に関連したパラメータ  $\lambda_0$ 。宇宙の曲率に関連した  $K = \Omega_0 + \lambda_0 - 1$  の値が負ならば宇宙は永遠に膨張し続ける開いた宇宙、ゼロならば永遠に膨張し続ける平坦な宇宙、そして、正ならば膨張からやがて収縮に転じる閉じた宇宙に対応している。従って、宇宙の構造や将来を調べるということは、これらの宇宙論パラメータ  $H_0, \Omega_0, \lambda_0$  を調べることに相当する。

### 1.2.3 距離-赤方偏移関係

宇宙論パラメータを調べる 1 つの方法として、以前からよく知られているのが、距離-赤方偏移関係 ( $D-z$  関係) である。「観測から得られる天体までの距離  $D$  と赤方偏移  $z$  の関係」と理論的に得られる距離と赤方偏移の関係を比較することで、どのような宇宙論パラメータがベストなのかを判断することができる。FL モデルでは、天体までの距離と赤方偏移の関係は宇宙論パラメータ ( $H_0, \Omega_0, \lambda_0$ ) を与えることで一意的に決めることができる。FL モデルでの  $D-z$  関係、すなわち、距離公式  $D_{FL}(z)$  は Mattig の公式で与えられる<sup>(10)</sup>。

$D-z$  関係と等価な関係に、距離指標 (式 (2)) を用いた距離指標-赤方偏移関係 ( $(m-M)-z$  関係) がある。ただ、赤方偏移が小さな天体の領域では殆ど宇宙論パラメータに対して制限を与えられないこと、その為赤方偏移の大きな天体 ( $z > 1$ ) の難しい観測によるデータが必要であること、そして、赤方偏移の大きな天体 (特に銀河) ではそれ自身の進化効果が大きくデータを左右すること等から、この関係では宇宙論パラメータに制限を与えるのが難しいとされてきた。

しかし、Ia 型の超新星が標準光源として使えることが明らかになってからは (Perlmutter et al. 1995) 事態が一変し、現在、距

<sup>(7)</sup> 当時これらの天体は天の川銀河の内か外かは、大問題だった。これらの天体が天の川銀河と同じような非常に多くの星の集団であることは Hubble の観測の後 (1924) である。それ以降、このような天体を「渦巻銀河」と呼んでいる。尚、銀河にはこの他に、楕円銀河や不規則銀河、矮小楕円銀河などがある。

<sup>(8)</sup> 宇宙は静的なもの、不変なものである、というのが当時広く受け入れられていた宇宙観である。

<sup>(9)</sup> Einstein 自身は後に、この項を導入したことを人生最大の失敗と悔やんでいる。しかし、最近の観測結果によって宇宙は加速的に膨張していることが示唆されている。この加速的膨張を推し進めているのが、所謂ダークエネルギーである。宇宙項  $\Lambda$  の起源がこのダークエネルギーであると考えられている。

<sup>(10)</sup> 特に、宇宙論パラメータ依存性を強調するときは  $D_{FL}(z; H_0, \Omega_0, \lambda_0)$  と表すことがある。 $D_{FL}(z; H_0, \Omega_0, \lambda_0)$  は次のように与えられる。

$$D_{FL}(z; H_0, \Omega_0, \lambda_0) = \frac{c}{H_0 \sqrt{K}} (1+z) \sin \left[ \sqrt{K} \int_0^z \frac{dz}{\sqrt{(1+z)^3 \Omega_0 + \lambda_0 - K(1+z)^2}} \right] \quad (3)$$

で与えられる ( $K = \Omega_0 + \lambda_0 - 1$ )。また、この  $D_{FL}(z; H_0, \Omega_0, \lambda_0)$  は次の方程式を満たす解でもある (但し、 $Y(z) = \sqrt{\Omega_0(1+z)^3 + \lambda_0 - K(1+z)^2}$  とする)。

$$(1+z)^2 Y(z) \frac{d}{dz} \left\{ (1+z)^2 Y(z) \frac{d}{dz} \frac{D(z)}{(1+z)^2} \right\} + \frac{3}{2} \Omega_0 (1+z) D(z) = 0, \quad \frac{d}{dz} D(z) \Big|_{z=0} = \frac{c}{H_0}, \quad D(0) = 0. \quad (4)$$

離指標-赤方偏移関係は宇宙論パラメータに制限を与える有効な手段の一つと認識されている。最近では、Riessら(2007)の超新星 Ia 型の観測によって  $z \leq 1.6$  までの距離測定がなされ、加速的膨張宇宙モデル ( $\Omega_0 = 0.29, \lambda_0 = 0.71$ ) を支持する結果が得られている。

### 1.2.4 重力レンズ効果の影響

「重力レンズ効果」とは、光源と観測者の間にある天体の重力によって光の道筋が湾曲し、これに伴って生じるいくつかの現象 (①像の多重化, ②明るさの変化 (増光効果), ③像の変形, など) をいう。この中で、特に距離測定に影響するのは像の増光効果である。前述のように遠方の天体までの距離は、測光観測による見かけの明るさ  $l_{\text{obs}}$  とこれと独立な観測による真の明るさ  $L$  の測定から式 (1) を使って求められる。元々の見かけの明るさ<sup>(11)</sup>  $l_0$  が、重力レンズ (増光) 効果によって  $\mu$  倍の明るさ  $l_{\text{obs}} = \mu l_0$  で観測される場合は、これから得られる天体までの距離  $\tilde{D}$  は

$$l_{\text{obs}} = \frac{\mu L}{4\pi D^2} = \frac{L}{4\pi \tilde{D}^2} \Rightarrow \tilde{D} = \sqrt{\frac{L}{4\pi l_{\text{obs}}}} = \sqrt{\frac{L}{4\pi \mu l_0}} = \mu^{-1/2} D \quad (5)$$

と見積もられる (Yoshida, Nakamura, Omote 2005)。従って、実際の距離  $D$  に対して  $\mu^{-1/2}$  倍だけ過小評価 ( $\mu < 1$  では過大評価) することになる。このように、重力レンズ効果を正しく評価しなければ、正確な距離測定が難しくなり、その結果、この関係から得られる宇宙論パラメータも実際のものとは異なる可能性がある。

## 1.3 Weinberg の光量保存則

### 1.3.1 非一様性の取り込み

FL モデルは「宇宙が一様等方である」という宇宙原理の従って構築された宇宙モデルである。このモデルは宇宙の大域的な構造や平均的な構造をよく記述しているモデルである。Mattig の距離公式で与えられる  $D-z$  関係は、FL モデルでの「至るところ均一に物質が分布している」という仮定を前提とした距離公式である。しかし、我々の近傍の (局所的) 宇宙には、銀河団、銀河、星団、星等のように物質が集中している空間もあれば、殆ど何も無い空間 (ポイド) もある。このような空間を光が伝播する場合は、光源までの距離として、密度一定の仮定の下で得られる (Mattig の) 距離公式をそのまま適用するのは適切とはいえない。

非一様性を取り込む手法として通常とられるのは、物質の密度分布を平均の密度と平均からのずれ (密度揺らぎ) との和で表す方法である。この手法では、一様な密度の宇宙に、正の密度揺らぎを持つ空間には銀河団や銀河等の天体が、負の密度揺らぎをもつ空間にはポイドが分布していると考えられている。この手法での距離計算は Mattig の距離公式で与えられる。これを filled-beam 近似という (Petters, Levine, Wambsganss 2001)。非一様性の距離公式への影響は、式 (5) のように重力レンズ効果による増光係数  $\mu$  の形で取り込まれている。

ポイドでの物質密度は宇宙全体に一様に分布している平均密度より小さい。従ってこの手法では、ポイドでの物質密度を平

均密度より小さくするような負の質量を持つ (非物理的な) 物質を導入しなければならない。また、式 (5) に現れる増光係数  $\mu$  の中に密度揺らぎの 2 乗に関連する量がある為、負の質量の物質であっても通常の物質と同じように考慮されてしまい、重力レンズ効果を過大評価してしまうおそれがある。

Filled-beam 近似とは異なる手法として、Dyer & Roeder によって提案された clumpy 宇宙モデルを用いた方法がある。このモデルでは、宇宙に存在する物質密度を一様に分布する部分と、星や銀河のような比較的狭い領域に集中している部分 (clump) とに分け、clump の影響を無視して光の筒の中の (一様に分布した) 物質による影響のみを取り入れて距離が求められる。この近似を empty-beam 近似といい、式 (4) の第 1 式第 3 項の  $\Omega_0$  を  $\bar{\omega}\Omega_0$  で置き換えたときの方程式の解として与えられる。この解を  $D_{\text{DR}}(z)$  と表し Dyer & Roeder の距離公式 (以降、DR の距離公式) という<sup>(12)</sup>。ここで、 $\bar{\omega}$  は平滑パラメータと呼ばれるもので宇宙の平均密度に対して一様に分布する物質の割合を表している。

Filled-beam 近似の場合と同様に clump の影響は重力レンズ効果で取り込まれる。しかし、filled-beam 近似の場合と大きく異なるのは、clumpy 宇宙では全ての clump は正の質量を持つ通常の物質から成っており、ポイドの部分には一様に分布する物質 (平均密度より小さい密度を持って分布している) がある点である。従って、このモデルではポイドだからといって非物理的な物質を導入する必要が無く、また、増光係数にも非物理的な物質からの寄与は無い。

### 1.3.2 Weinberg の光量保存則

一般に clumpy 宇宙モデルでの  $D_{\text{DR}}(z)$  は  $H_0, \Omega_0, \lambda_0$  の同じ FL モデルでの  $D_{\text{FL}}(z)$  より大きい。従って、(赤方偏移と真の明るさが) 同じで光源でも、clump の影響を全く受けなければ、FL 宇宙にあるときより暗く見える (これを dimming 効果と呼ぶ)。clumpy 宇宙を伝播する光は、少なからず clump より重力レンズ効果という形で影響を受ける。このときの増光係数は clump の分布に大きく依存するので、赤方偏移と真の明るさが同じ光源でも観測者の受け取る光量  $l_{\text{obs}}$  は光源ごとに異なる。従って、個々の clump の分布がわからない限り、それぞれの光源からの光量に関してそれ以上議論を進めることは出来ない。しかし、clumpy 宇宙で観測される光源の平均的な明るさについて議論することは、見かけの明るさと赤方偏移の関係が FL モデルと clumpy 宇宙モデルとでどのように異なるのかを知る上で重要である。

光源と clump の様々な配位に対して光源の検出する光量  $l_{\text{obs}}$  の平均値  $\langle l_{\text{obs}} \rangle$  は、FL モデルで得られる「赤方偏移と真の明るさが同じ光源」からの光量  $l_0$  と等しいことが Weinberg によって示された (1976)。これを Weinberg の光量保存則という。これは、clumpy 宇宙モデルを用いたことによる dimming 効果と、clump による重力レンズ効果 (増光効果) とが丁度バランスして、結果的に FL モデルでの光量と等しくなることを示している。これを距離公式に焼き直すと、clumpy 宇宙モデルにおいて DR の距離公式で距離を求めこれに重力レンズ効果を考慮しても、平均的には FL モデルでの Mattig の距離公式で得られる距離公式と一致することに相当する。

(11) 「元々の明るさ  $l_0$ 」は、「もし重力レンズ効果を生じさせる天体が視線方向の近くに無かったら」という仮想的な場合での見かけの明るさのことで、決して観測されることはない。

(12) 宇宙論パラメータや平滑パラメータの依存性を強調するときは  $D_{\text{DR}}(z; \bar{\omega}, H_0, \Omega_0, \lambda_0)$  と記されることがある。

(13) 密度パラメータ  $\Omega_0$  と宇宙定数  $\lambda_0$  を組み合わせたパラメータで  $q_0 = \Omega_0/2 - \lambda_0$  と表される。この値が正ならば宇宙膨張の度合いが小さくなりつつあること



この法則の証明は①全ての clump は質点状の天体 (質点レンズ) であり, ②光源の赤方偏移は比較的小さく, 更に, ③宇宙膨張の度合いを表した減速パラメータ  $q_0$  <sup>(13)</sup> が小さいこと, 等を前提としている。しかし, 最近では, 赤方偏移の非常に大きな Ia 型超新星までの距離が測定されたり (Riess et al. 2007), 宇宙背景輻射の観測 (Spergel et al. 2007) から減速パラメータの大きな宇宙が示唆されているように, Weinberg の仮定②, ③が適切であるとは云えない。また, 仮定②に基づいた「どの光源からの光も高々1回の重力レンズ効果 (単一重力レンズ効果) しか受けない」とした解析の妥当性も再検討の必要がある。従って, Weinberg の示した「光量保存則」は大きな減速パラメータの宇宙において, また, 大きな赤方偏移の光源に対しても成立するかどうかは自明なことではない。

そこで今回の報告では, 減速パラメータの大きな宇宙において赤方偏移の大きな光源に対して非一様性の影響がどのように現れるのか, 特に, Weinberg の光量保存則がこの場合でも成り立つのかについて調べたのでその結果を紹介する。

## 2 多重重力レンズ効果

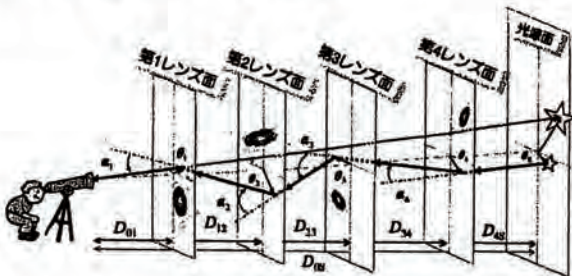


図1. 多重重力レンズ効果

図1のように, 観測者-光源間に散在する天体 (clump または非一様性) をレンズ天体として扱い, ある仮想的な基準線に垂直で各レンズ天体を含む様に各レンズ面を設定する。  $N_L$  個のレンズ天体が分布する領域内を光が伝播するとして, レンズ天体が1つの場合と同じ近似を適用すると, 光の道筋は図1のような折れ線で近似できる。  $i$  番目のレンズ面での光の角度位置 (以降, 単に「位置」と呼ぶ) を  $\theta_i$ , そこでの光の曲がり角を  $\alpha_i$  とすると, 単純な幾何学的考察から以下のような多重重力レンズ方程式が得られる:

$$\theta_s = \theta_0 - \sum_{i=1}^{N_L} \frac{D_{is}}{D_{0s}} \alpha_i (D_{0i} \theta_i) \quad (6)$$

$$\theta_i = \theta_0 - \sum_{j=1}^{i-1} \frac{D_{ji}}{D_{0i}} \alpha_j (D_{0j} \theta_j), \quad \theta_1 = \theta_0, \quad (7)$$

(Blandford & Narayan 1986; Yoshida, Nakamura, Omote 2005). ここで,  $D_{ij}$  は  $i$  番目のレンズ面から  $j$  番目のレンズ面までの距離である。一般に, この方程式は与えられた光源の位置  $\theta_s$  に対して, 観測される像の位置  $\theta_0 (= \theta_i)$  を解とする非線形方程式になるため,  $\theta_s \rightarrow \theta_0$  の写像は1対多となり, 1つの光源に対して多くの像が対応している。逆に, 観測面上の点  $\theta_i$  を与えると, これに対応する光源面上の点  $\theta_s$  が式 (6), (7) を通して逐次的に得られる。

を, また負なら, 膨張が加速的に進んでいることを示している。

## 3 数値実験

### 3.1 背景宇宙とレンズモデル

ここでは今回の数値実験で用いる宇宙モデルとレンズモデルについての概略を述べる。

宇宙は非常に大きなスケールでは FL モデルで記述されているものと仮定する。このとき, 宇宙論的時間  $T$  と赤方偏移の関係や光の伝播を記述するパラメータと赤方偏移の関係等は我々が観測出来る狭い領域 (擬似的に観測する領域のことで, これを以下では「観測領域」と呼ぶ) に対しても FL 宇宙での関係と同じ関係が使えるものとする。一方, 観測領域では非一様性が顕著である為, 局所的な宇宙モデルとして上述の clumpy 宇宙モデルが適用できるものとする。この宇宙での距離は DR の距離公式  $D_{DR}$  で与えられ, 数値実験で扱う観測領域の共動座標系での体積を求める際の距離にも  $D_{DR}$  を用いる。観測領域の最大の赤方偏移  $z_{max}$  と立体角  $\Omega$  を与えると, この領域の体積  $V^{(DR)}$  が得られる。

また, この領域内の物質の全質量  $M_{tot}$  は  $\bar{\rho}_0 V^{(DR)}$  ( $\bar{\rho}_0$  は現在の宇宙の平均密度) であり, この内, 非一様性 (レンズ天体) として存在している質量の総量は  $(1 - \bar{\omega}) M_{tot}$  である。従って領域内に  $N_L$  個の質量の等しいレンズ天体があるとすると, レンズ天体1つ当たりの質量  $M_L$  は  $(1 - \bar{\omega}) \bar{\rho}_0 V^{(DR)} / N_L$  で与えられる。ここでは Weinberg の仮定①と同様に, レンズ天体のモデルとして最も単純な質点レンズを用いる。また, この  $N_L$  個のレンズ天体を観測領域内にランダムに分布させ, 各レンズ天体で視線方向に垂直となるように図2の様にレンズ面を設定する。

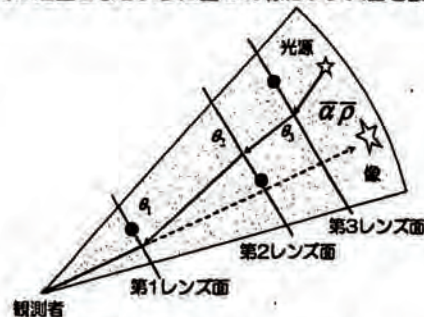


図2. レンズ天体とレンズ面

### 3.2 像の明るさの見積

次に, 数値実験における像の擬似的な観測の仕方, 増光係数の求め方について述べる。

Schramm & Kayser (1987), Kayser & Schramm (1988) は観測面上の点  $\theta_0$  に対応する光源面上の点  $\theta_s$  が光源の位置 (光源が光って見える点又は領域  $\mathcal{D}_{src}$ ) に対してどこにあるかを調べることで, (重力レンズ方程式を解かずに) 像の位置や明るさを求められることを示した。彼らによれば, もし  $\theta_0$  に対応する光源面の位置  $\theta_s(\theta_0)$  が  $\mathcal{D}_{src}$  内であれば, 観測者はその光源の像を  $\theta_0$  で観測することになる。

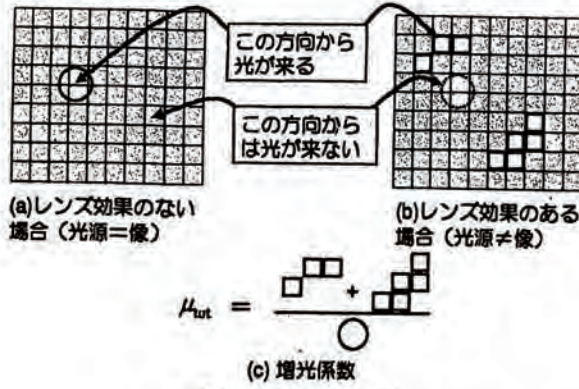


図3. 増光係数の見積

実際の数値実験では、観測面を図3(b)のようにメッシュ状に分割し、それぞれのセルの中央点  $\theta_0(i, j)$  (ここで、 $i, j$  はセルの位置を表す整数の組) に対応する光源面の点  $\theta_s(i, j)$  が  $\mathcal{D}_{src}$  内にあるとき、観測面上の  $(i, j)$  番目のセルの位置に像が観測される。光源面での光源の単位面積当たりの明るさ (表面輝度) を  $I_{src}(\theta_s(i, j))$  とすると、観測面での像の表面輝度  $I_{obs}(\theta_0(i, j))$  も  $I_{src}(\theta_s(i, j))$  <sup>(14)</sup> なので、 $(i, j)$  番目のセル全体の明るさはセルの面積を  $\Delta\theta_{0,x}\Delta\theta_{0,y}$  とすると  $I_{src}(\theta_s(i, j))\Delta\theta_{0,x}\Delta\theta_{0,y}$  と表せる。よって像全体の明るさは  $\sum I_{src}(\theta_s(\theta_0))\Delta\theta_{0,x}\Delta\theta_{0,y}$  で求められる。<sup>(15)</sup> 一方、重力レンズ効果を受けないとした場合の光源の明るさは、 $\theta_s = \theta_0$  の関係から  $I_0 = \sum I_{src}(\theta_0(i, j))\Delta\theta_{0,x}\Delta\theta_{0,y}$  で与えられる。特に、光源の表面輝度が一定の場合は、図3(c)のように観測面上で像の占める面積と光源面上で光源の占める面積の比で増光係数を表すことができる。今回の数値実験では、表面輝度が一定で半径  $r$  [kpc] の球対称な光源を仮定した。この場合、観測面上の点  $\theta_0(i, j)$  に対応する光源面上の点  $\theta_s(i, j)$  が光源の中心から半径  $r/D_{DR}(z)$  内にあれば、像として  $(i, j)$  番目のセル (中央点が  $\theta_0(i, j)$ ) の方向に  $I_{src}(\theta_s(\theta_0(i, j)))\Delta\theta_{0,x}\Delta\theta_{0,y}$  の光量が観測される。

### 3.3 パラメータ

ここでは、今回の数値実験で使用したモデルのパラメータについて記述する。今回は大きく分けて2つの数値実験を行った。1つは、特定の背景宇宙モデルに対して「距離指標-赤方偏移の関係」(式(2))における多重重力レンズ効果の影響を調べる数値実験 (数値実験 I)、もう1つは多重重力レンズ効果の影響を受けた「距離指標と赤方偏移の関係」から宇宙論パラメータを逆算したときの、もともとの宇宙論パラメータに対してどれだけの影響があるのかについて調べる数値実験 (数値実験 II) である。

#### 3.3.1 背景宇宙とレンズ天体に関するパラメータ

数値実験 I では、背景宇宙モデルを表1のような4種類のモデルについて解析した。モデル A, C では、物質が clump 以外には全く分布していない。従って、光は物質の無い空間を伝播する。一方モデル B, D では、全物質の3割が宇宙に均一に分布しているとしている。それぞれのモデルで観測領域の視野  $\mathcal{Q}$

モデル	$\Omega_0$	$\lambda_0$	$\bar{\alpha}$	$(1-\bar{\alpha})M_{tot}/M_\odot^{*2}$
A	1.0	0.0	0.0	$6.64 \times 10^{14}$
B	1.0	0.0	0.3	$3.84 \times 10^{14}$
C	0.3	0.7	0.0	$6.32 \times 10^{14}$
D	0.3	0.7	0.3	$3.66 \times 10^{14}$

\* $M_\odot$  は太陽質量で約  $2 \times 10^{30}$  kg である。また、Hubble 定数  $H_0$  を 50 km/s/Mpc とした。

と最大赤方偏移  $z_{max}$  (ここでは 40 秒角  $\times$  40 秒角、 $z_{max}$  を 5 とする) と与えると、この領域に含まれる物質の全質量  $M_{tot}$  が決まり、これより、レンズ天体として存在する全質量が  $(1-\bar{\alpha})M_{tot}$  で与えられる。表1の第5列に各モデルに対するレンズ天体の全質量を記した。また、この数値実験では、観測領域内に分布するレンズ天体の数  $N_L$  を  $10^2, 10^3, 10^4, 10^5$  とし、重力レンズ効果の影響が距離指標-赤方偏移関係にどのように現れるのか、だけでなく、レンズ天体の数にどのように依存するのかについて調べた。これは、単一重力レンズ近似を用いた場合の「 $N_L M_L$  が一定なら、レンズ効果は  $N_L$  (または  $M_L$ ) によらない」という従来の結果が、多重重力レンズ効果を考慮した場合ではどのように変わるのかを調べるためである。図4は光源の赤方偏移  $z$  に対して光源と観測者の間にあるレンズ天体 (レンズ面) の数をモデル A~D に対して  $N_L = 100$  の場合をプロットしたものである。この図から、モデル A においては、光源が  $z = 1$  にあるとき、考慮しなければならないレンズ天体は5個、 $z = 2$  では25個であることを示している ( $N_L = 10^3$  のときはそれぞれ  $10^3/10^2$  倍のレンズ天体を考慮しなければならない)。全てのレンズ天体で強いレンズ効果を示すとは限らないが、これらの影響をはじめから考慮しない弱重力レンズ効果の解析には問題がある。

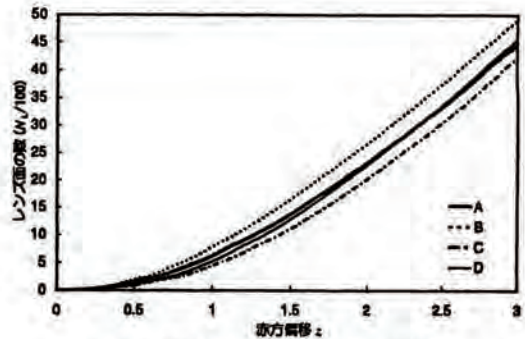


図4. レンズ面の数と赤方偏移の関係

また、数値実験 II では、 $\bar{\alpha} = 0, H_0 = 50$  km/s/Mpc とし、宇宙論パラメータ ( $\Omega_0, \lambda_0$ ) を (0.1, 0.0) から 0.1 刻みで  $\Omega_0 = 1.0, \lambda_0 = 0.9$  まで 100 組 (図5の白丸) の背景宇宙について光源からの光を擬似的に観測する。観測領域は数値実験 I で用いたものと同じ  $\mathcal{Q}, z_{max}$  を用い、領域内の分布するレンズ天体の数  $N_L$  を  $10^2, 10^3, 10^4$  とし解析をした。

<sup>(14)</sup> 重力レンズ効果を受けても表面輝度は変わらない。明るさが変わるのは像の見える領域が変わり、その面積が変わるためである。

<sup>(15)</sup> この  $\sum$  は、 $\theta_0$  に対応する光源面上の点  $\theta_s$  が光源の光っている領域内にある場合の  $\theta_0$  についての和、 $\theta_s(\theta_0)$  が  $\theta_s(\theta_0) \in \mathcal{D}_{src}$  を満たす  $\theta_0$  についての和を表している。

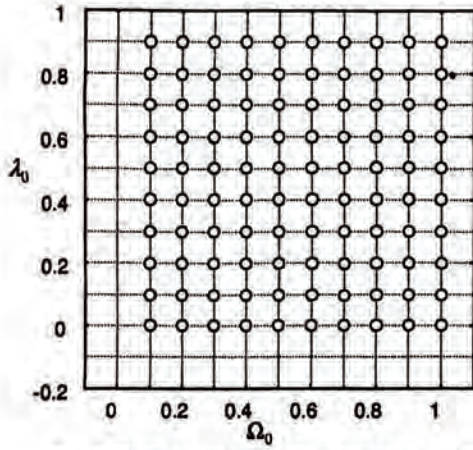


図5 数値実験 II で使用した宇宙論パラメータ

### 3.3.2 観測領域と光源に関するパラメータ

擬似観測での観測視野  $\Omega$  を上述のように 40 秒角  $\times$  40 秒角とし、この観測面を縦  $\times$  横  $= 2^{10} \times 2^{10}$  のようにメッシュを切って、それぞれのセルの中央点 (観測面上) に対応する光源面上の位置を求めた。観測面上でのセルの大きさは  $\Delta\theta_{lx} = \Delta\theta_{ly} \approx 0.039$  秒角となる。これが、今回の擬似観測の解像度である。各背景宇宙モデルに対して、 $N_L$  個のレンズ天体がランダムに分布した観測領域を 240 種類用意し、それぞれの観測領域での光の伝播を調べた。これは 1 つの宇宙モデル (同じ宇宙論パラメータ & 同じ  $N_L$ ) において 240 個の視野を観測したことになる。全ての視野を並べると 10 分角  $\times$  10 分角程度となり、これは月の約 27 分の 1 の視野にあたる。

また、それぞれの数値実験では、表面輝度が一定で絶対等級が  $-19.78$  等の光源を考える。この光源の半径は絶対等級から  $r \approx$  約 6kpc (約 20,000 光年) に相当する。表 2 には赤方偏移  $z = 1, 2, 3$  にこの光源があったときの視半径とその領域内のセルの数を記した。ただし、この表の値は重力レンズ効果を考慮していない。更に、光源の赤方偏移  $z_s$  は 0.01 から 0.01 刻みで 3 までを考慮し、各光源面に 9 個の光源を置いた。これは光源の擬似観測の効率を上げる為で、それ以上の意味はない。このように設定すると、1 つの擬似観測で 9 個の光源を独立に観測することが可能である。1 つの背景宇宙モデルに対して 240 個の視野を観測するので、各赤方偏移  $z_s$  に対して  $9 \times 240 = 2160$  個の光源を観測することに相当する。

表 2. 光源の視半径と光源の占めるセルの数 \*<sup>2</sup>

$z_s$	$\Omega_0 = 1.0, \lambda_0 = 0.0$		$\Omega_0 = 0.3, \lambda_0 = 0.7$	
	視半径 (秒角)	セルの数	視半径 (秒角)	セルの数
1	0.635	830	0.507	530
2	0.558	640	0.428	370
3	0.539	600	0.408	340

\*<sup>2</sup> 光源の占めるセルの数は  $\pi(\text{視半径})^2 / (\Delta\theta_{lx}\Delta\theta_{ly})$  で定まる。

## 4 実験結果

### 4.1 数値実験 I の結果

#### 4.1.1 平均の距離指標-赤方偏移関係

数値実験によって、与えられた赤方偏移に対して各光源の距離指標  $m_{\text{obs}} - M$  (distance module: “ $m_{\text{obs}} = -2.5 \log_{10} I_{\text{obs}} + \text{定数}$ ” と光源の絶対等級  $M = -19.78$  との差をとったもの式 (2)) が得

られる。非常に多くの光源に対して、距離指標を平均したものを図 6 に示す。各図の一番上の破線 (DR) は距離公式として DR の距離公式を用いて理論的に求めた距離指標である。また、最も下のグレーの太線 (FL) は、距離公式として Mattig の距離公式を用いて理論的に得られた距離指標である。DR と FL の間にあるのが、重力レンズ効果を考慮して得られた距離指標である。上から順にレンズ天体の数  $N_L$  が  $10^2$  (細実線),  $10^3$  (細破線),  $10^4$  (一点破線),  $10^5$  (太実線) の場合を示している。背景宇宙は

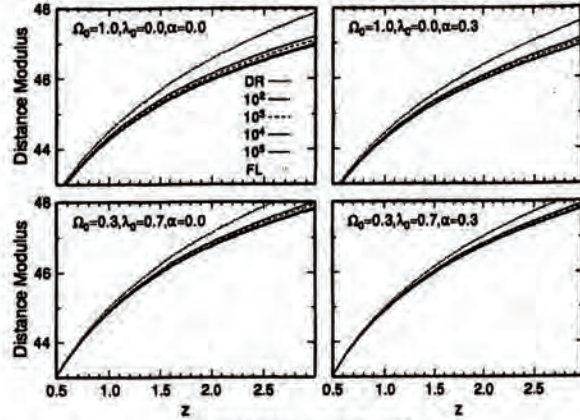


図 6 距離指標-赤方偏移関係

左上の図がモデル A, 右上が B, 左下が C, 右下が D に対応している。

これらの図から、まず、 $N_L$  が異なれば平均の距離指標も異なることがわかる。これは、「レンズ天体の全質量が同じなら、平均の距離指標はレンズ天体の数に依存しない」という単一重力レンズ効果で得られた結果と大きく異なっている。従来の重力レンズ効果の解析では、レンズ天体の質量によらず距離指標は FL モデルでの距離指標に一致するとされてきた。しかし、今回の結果から、従来の解析は重力レンズ効果を過大評価している可能性が示唆される。

また、どの背景宇宙モデルでも平均の距離指標は  $N_L$  が充分大きくなければ FL モデルでの距離指標と一致しないことがわかる。これは、Weinberg の光量保存則 (clumpy 宇宙モデルで DR の距離公式を用いるために光源が暗く見える効果と、重力レンズ効果によって光源が明るく見える効果が相殺するので、clumpy 宇宙モデルでの同じ赤方偏移を持つ天体までの距離の平均は、結果的に、FL モデルでの距離公式で与えられるものと等しい) は多重重力レンズ効果まで考慮すると成立しないことを意味している。従来の解析で光量保存則が成立するとされていたのは、光源の視線方向に対してレンズ天体が無限に離れている場合でも (本来なら多重重力レンズ効果を考慮すべきところを) 単一重力レンズ効果しか考慮しなかった為である。1 つの光源に対して、あるレンズ天体 A によって有効な重力レンズ効果が生じる範囲  $\Sigma_A$  と別のレンズ天体 B によって有効な重力レンズ効果が生じる範囲  $\Sigma_B$  とがオーバーラップしていない場合 ( $\Sigma_A \cap \Sigma_B = \emptyset$ ) に限り単一レンズ天体の近似が可能なのであって、 $\Sigma_A, \Sigma_B$  の大きさを無限とする従来の考え方に問題がある。

#### 4.1.2 距離指標の標準偏差

データのばらつきを示す統計量に標準偏差がある。図 7 は各背景宇宙モデルでの光源の赤方偏移  $z$  に対する  $m_{\text{obs}}$  の標準偏差  $\sigma_m$  を示している。この左上の図がモデル A, 右上が B, 左下が C, 右下が D である。また、各図において、細実線が  $N_L = 10^2$ ,

細破線が  $10^2$ , 一点破線が  $10^4$ , 実線が  $10^5$  の場合を示している。

これらの図から,  $\sigma_m$  の  $N_L$  依存性は, レンズ天体が少ないとき ( $N_L = 10^2, 10^3$ ) は殆ど依存性を見せないが, レンズ天体が多く分布するとき ( $N_L = 10^4, 10^5$ ) は  $N_L$  依存性は顕著に現れることがわかる。また,  $N_L$  が大きな場合では, 背景宇宙の宇宙論パラメータ依存性よりも  $N_L$  依存性のほうが大きいことがわかる。

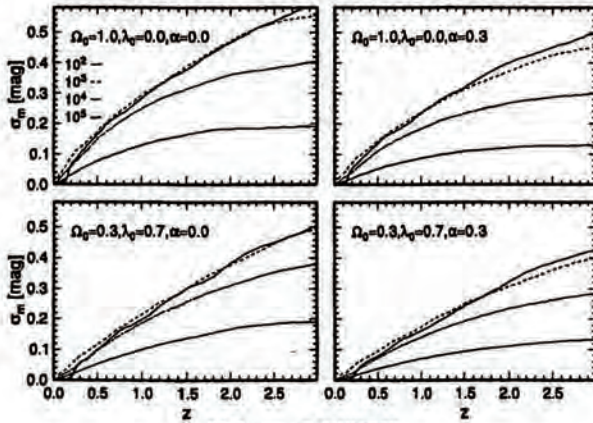


図7  $m_{\text{obs}}$  の標準偏差

## 4.2 数値実験 II の結果

数値実験 I で, 重力レンズ効果を考慮した場合の距離指標-赤方偏移関係は重力レンズ効果を考慮しない場合の距離指標-赤方偏移関係と異なることがわかった。ということは, 擬似観測による距離指標-赤方偏移関係から逆算した宇宙論パラメータは, 予め設定した背景宇宙モデルの宇宙論パラメータと異なることを意味する。

そこで, 数値実験 II では, 逆算した宇宙論パラメータと元々の宇宙論パラメータとのずれはどの位なのか, また, そのずれは元々の宇宙論パラメータや  $N_L$  にどう依存するのかについて調べた。その結果を図 8(a)-(c) に示す。(a), (b), (c) はそれぞれ,  $N_L = 10^2, 10^3, 10^4$  の場合である。矢印の始点 (白丸) は背景宇宙で設定された宇宙論パラメータで矢印の終点は重力レンズ効果を考慮した擬似観測によるデータを使って逆算した宇宙論パラメータである。

まずわかるのは, 全体的に元々宇宙論パラメータに対して擬似的観測から得られた宇宙論パラメータは小さい値となっている, ということである。このことから, 実際の観測で得られる距離指標と赤方偏移の関係から求めた宇宙論パラメータは, 実際の宇宙論パラメータに比べて小さくなることが示唆される。

また, 宇宙論パラメータのずれの大きさは, 元々の密度パラメータ  $\Omega_0$  に大きく依存し, 宇宙定数  $\lambda_0$  にはあまり依存しないこともわかる。 $\Omega_0$  が小さい宇宙では,  $D_{\text{FL}}(z)$  と  $D_{\text{DR}}(z)$  の差が小さいため clumpy 宇宙モデルによる dimming 効果も小さくなく, しかもレンズ天体の質量が密度パラメータ  $\Omega_0$  に比例するので重力レンズ効果も大きくない為である。

更に,  $N_L$  が大きいほどずれが小さいことがわかる。これは, 数値実験 I において  $N_L$  が大きいほど, FL 宇宙で得られる距離指標-赤方偏移関係に近いものが観測される, という事に対応している。また, 図 8 の全ての矢印は, 殆ど同じ方向を向いている。これは, 背景宇宙モデルで予め設定した減速パラメータ  $(q_0)^{\text{org}}$  と擬似観測から得られる減速パラメータ  $(q_0)^{\text{obs}}$  とを比較することで確認できる (図 9)。ここで,  $q_0 = \Omega_0/2 - \lambda_0$  である。

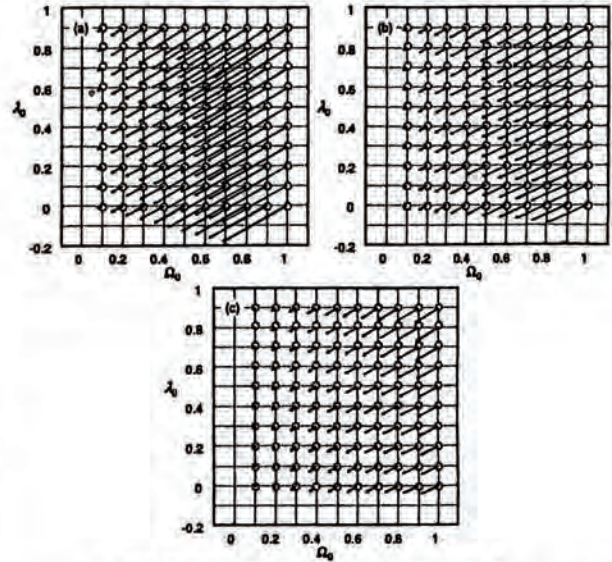


図8 宇宙論パラメータのずれ ( $\Delta\Omega_0, \Delta\lambda_0$ )

図 9 から, 全て  $(q_0)^{\text{org}} = (q_0)^{\text{obs}}$  の線上に乗っていることがわかる。これより, 解析した全ての宇宙モデルにおいて, 減速パラメータには重力レンズ効果の影響は殆ど現れないことがわかる。また, 減速パラメータのずれがほぼ  $\Delta q_0 = 0$  なので,  $\Delta\Omega_0/2 = \Delta\lambda_0$  であることがわかる。従って, 宇宙論パラメータのずれ (図 8) は全て  $\Delta\lambda_0/\Delta\Omega_0 = 1/2$  の方向にずれていることがわかる。

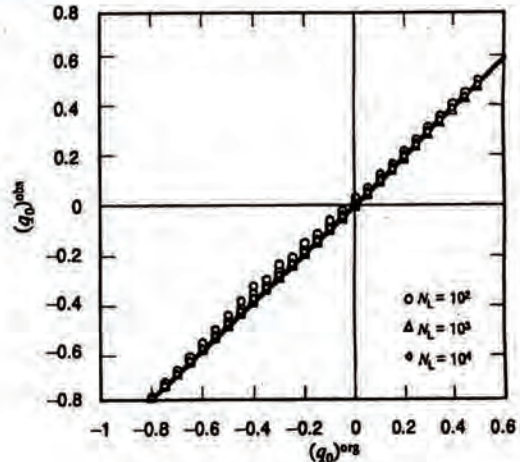


図9 減速パラメータのずれ

## 5 まとめ

本研究では, 多重重力レンズ方程式を使って, Schramm & Kayser の方法に従って重力レンズ効果を受けた光源に対する距離指標を求めた。今回試みた数値実験では, 多くのレンズ天体が分布する clumpy 宇宙モデル内を伝播する光を擬似的に観測し, 平均的な距離指標  $m_{\text{obs}} - M$  やその標準偏差を求め, これらの統計量に clumpy 宇宙的側面がどのように現れるのかを調べ, 多重重力レンズ効果を考慮した場合での「Weinberg の光量保存則」の妥当性や, 距離指標に対する統計量のレンズ天体の数  $N_L$  依存性についても調べた (数値実験 I)。その結果, 以下の事が明らかとなった。

- ① 平均の「距離指標-赤方偏移関係」は分布するレンズ天体の個数  $N_L$  (レンズ天体 1 つあたりの質量  $M_L$ ) に依存する ( $N_L M_L$  を一定として)。これは, 「平均の距離指標-赤方偏

移関係」は  $M_L$  に依存しない」という、従来の単一重力レンズ効果を使ったときの結果と大きく異なっている。

②  $N_L$  が大きくなると ( $M_L$  が小さくなると) clumpy 宇宙モデルでの距離指標-赤方偏移関係は、FL 宇宙モデルでのものと一致する。

- $N_L \leq 10^3$  では、宇宙がスカスカなので dimming 効果が強く、重力レンズ効果を考慮しても FL 宇宙モデルで期待されるほど明るくならない。この場合は、 $M_L \geq 10^{11} M_\odot$  に相当するので、宇宙において銀河団、銀河群、銀河レベルの天体が優勢な宇宙では、Weinberg の光量保存則は成立しない。
- $N_L \geq 10^4$  では、距離指標-赤方偏移関係は FL 宇宙モデルのものと殆ど一致する。この場合、サブハローと呼ばれる  $10^{10} M_\odot$  より質量の小さなレンズ天体が優勢に分布していれば、Weinberg の光量保存則は成立することになる。

③ 「距離指標」に対する標準偏差では、宇宙論パラメータ依存性以上に  $N_L$  依存性がある。

更に、この結果を受けて、擬似観測から求められる距離指標-赤方偏移関係を使って逆算した宇宙論パラメータと元々の背景宇宙での宇宙論パラメータのずれについて多くの宇宙モデルを使って調べた (数値実験 II)。その結果次の事がわかった。

- ④ どの背景宇宙モデルの場合でも宇宙論パラメータのずれ ( $\Delta\Omega_0 = \Omega_0^{(obs)} - \Omega_0^{(org)}$ ,  $\Delta\lambda_0 = \lambda_0^{(obs)} - \lambda_0^{(org)}$ ) は負である。
- ⑤ レンズ天体が少ないと、または、背景宇宙モデルの  $\Omega_0$  が大きいと、宇宙論パラメータのずれ ( $\Delta\Omega_0, \Delta\lambda_0$ ) が大きい。
- ⑥ それぞれの宇宙論パラメータのずれに比べて減速パラメータ  $q_0 = \Omega_0/2 - \lambda_0$  のずれはほとんどない。これは、( $\Delta\Omega_0, \Delta\lambda_0$ ) が 1/2 方向であることを意味している。

本報告を終える前に 1 つ注意しておきたい点がある。本研究では Weinberg の光量保存則が成立しない可能性を示したが、

これは「エネルギー保存則が成立しない」ことを意味している訳ではない。あくまでも、Weinberg の光量保存則「clumpy モデルでの距離指標-赤方偏移関係を平均すると、同じ宇宙パラメータの FL モデルでの距離指標-赤方偏移関係に一致する」が成立しないことを主張しているだけである。また、幾つかの論文 (例えば Premadi et al. 2001) で見られる光量保存則は「観測面に届く光はすべて光源面に起源がある」ということを主張しているので、これは Weinberg の光量保存則とは意味が違う。往々にして、混同されるので注意が必要である。

## 参考文献

- Blandford, D.R., Narayan, R. 1986, ApJ, 310, 568  
Dyer, C.C., Roeder, R.C. 1972, ApJ, 174, L115  
Dyer, C.C., Roeder, R.C. 1973, ApJ, 180, L31  
Kayser, R., Schramm, T. 1988, A&A, 191, 39  
Perlmutter, S. et al. 1995, ApJ, 440, L41  
Petters, A.O., Levine, H., Wambsganss, J. 2001, Singularity Theory and Gravitational Lensing (Birkhäuser)  
Premadi, P., Martel, H., Matzner, R., Futamase, T. 2001, ApJS, 135, 7  
Riess, A.O. et al. 2007, ApJ, 657, 98  
Schramm, T., Kayser, R. 1987, A&A, 174, 361  
Spergel, D.N. et al. 2007, ApJS, 170, 377  
Webb, S. 1999, MEASURING THE UNIVERSE (Springer, Paris)  
Weinberg, S. 1976, ApJ, 208, L1  
Yoshida, H., Nakamura, K., Omote, M. 2005, MNRAS, 358, 39

## 編集後記

『総合科学研究会報』の第9号が出来上がりました。原稿をお寄せ下さった方たちには、この場を借りて改めて御礼申し上げます。

これからも、定期的に勉強会を開いてゆく予定です。どなたでも任意に参加できる研究会ですので、会での話題提供の御希望も随時受け付けております。下記連絡先までお気軽にお申し出ください。

### 総合科学研究会報 第9号

2010年1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間科学講座(人文社会)内