

# 重力波を直接検出

## アインシュタインの予言，100年後に実証される

2016年2月15日

真貝寿明<sup>2</sup>

2016年2月12日0時30分（米国東部時間11日10時30分），アメリカの重力波観測グループLIGO（ライゴ）のメンバーは，ブラックホールが衝突・合体して発生した重力波を捉えることに成功した，と発表した。

重力波は，アインシュタインが今から100年前に提出した一般相対性理論から予言される物理現象だが，今回，ようやく直接観測されたことになる。しかも，ブラックホールが実在していることの直接の証拠が得られ，さらに得られた波形は，相対性理論の予言通りだった。

本年は，ウェーバーが重力波の検出を試みてから50年，現在の干渉計による重力波検出プロジェクトが稼働して25年が経っているが，待ちに待った発表だ。日本の新聞・テレビもトップニュースで報道した。

## 目次

1	LIGOグループの発表内容	2
2	一般相対性理論と重力波	2
2.1	一般相対性理論は重力の理論	2
2.2	ニュートンの理論との違い	3
2.3	一般相対性理論の予言	3
2.4	重力波	4
3	重力波検出実験	4
3.1	初期の重力波検出実験	4
3.2	レーザー干渉計による重力波検出	5
3.3	現在の重力波レーザー干渉計	6
4	重力波観測の意義	7
4.1	重力波観測で何がわかるのか	7
4.2	重力波観測がもたらす意義	7



図1：記者会見冒頭で，“We have detected gravitational wave. We did it.”とアナウンスし，ガッツポーズを決めたLIGO所長 David Reitze.（中継画像のキャプチャ）

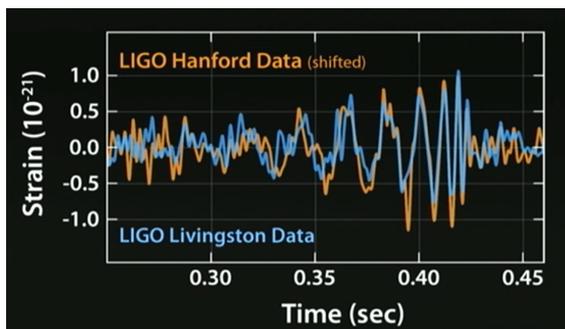


図2：記者会見で発表された重力波波形。2つの干渉計からの波形が重なっていることを示している。（中継画像のキャプチャ）

<sup>1</sup>このメモは，LIGOグループが重力波検出の発表を行う前のメモ(1)，(2)と，発表直後のメモ(3)を統合したものです。  
このメモ URL：[http://www.oit.ac.jp/is/~shinkai/book/20160215gw\\_shinkai.pdf](http://www.oit.ac.jp/is/~shinkai/book/20160215gw_shinkai.pdf)  
前のメモ(3)の URL：[http://www.oit.ac.jp/is/~shinkai/book/20160212gw\\_shinkai.pdf](http://www.oit.ac.jp/is/~shinkai/book/20160212gw_shinkai.pdf)  
前のメモ(2)の URL：[http://www.oit.ac.jp/is/~shinkai/book/20160211gw\\_shinkai.pdf](http://www.oit.ac.jp/is/~shinkai/book/20160211gw_shinkai.pdf)  
前のメモ(1)の URL：[http://www.oit.ac.jp/is/~shinkai/book/20160209gw\\_shinkai.pdf](http://www.oit.ac.jp/is/~shinkai/book/20160209gw_shinkai.pdf)  
(2)に含んでいた「宇宙背景放射と重力波」は割愛しました。

<sup>2</sup>しんかいひさあき。大阪工業大学情報科学部。 <http://www.oit.ac.jp/is/~shinkai/>

# 1 LIGO グループの発表内容

LIGO グループの発表した内容を端的にまとめると、次のようになる。

## 1. 重力波の波形を直接検出した。

2015年9月14日のイベントを2台のレーザー干渉計で観測した。アインシュタインの一般相対性理論による予言が正しかった。

## 2. 波源は、2つのブラックホールが衝突・合体し、1つの大きなブラックホールになる過程である。

ブラックホールはこれまで状況証拠からその存在が信じられていたが、今回はじめて、その痕跡を実証することができた。そして、ブラックホール連星が存在していることも初めて確かめられた。

重力波は、これまで人類が観ることのできなかつた新しい情報である。今回捉えた波形は、

太陽質量の29倍と36倍のブラックホールの質量が、連星として互いに周回しながら重力波を放出し、エネルギーを失って光速の半分程度の速度で衝突・合体した。合体後は太陽質量の62倍の大きなブラックホールになった。すなわち、合体の瞬間には、太陽質量の3倍のエネルギーを重力波として放出した。

ことを示している。記者会見と同時に、論文が12本<sup>3</sup>公開された。著者は1000名を超えている。

以下では、重力波とは何か、この観測にはどのような意義があるのか、を解説したい。

# 2 一般相対性理論と重力波

## 2.1 一般相対性理論は重力の理論

相対性理論は2つある。どちらもアインシュタインが一人で完成させたものだ。

1905年に発表された「**特殊相対性理論**」(発表当時は「相対性原理」)は、(光の速さに近いほどの)ものすごく速く運動する物体に対する物理法則だ。電磁気学の法則に登場した光速の解釈のために考え出されたもので、「物理法則は、どの座標系から見ても同じはずだ」という原理に立つと、時間の進み方は座標系によって異なってしまう(相対的である)ことが導かれた。物体の運動が光速近くになった場合に、その違いは顕著になり、光速に近い運動状態では時間の進み方が遅くなる。この現象は、宇宙から飛来する粒子(宇宙線)が地球大気と衝突して生み出す素粒子の寿命が、実験室でできるときよりも長くなることから確かめられている。また、特殊相対性理論の結論として、エネルギーと質量の等価性( $E = mc^2$ )も導くことができ、原子核の安定性を議論したり、核分裂や核融合反応を説明する基盤を与えている。物体の移動速度は光速(秒速約30万km)が上限であることも結論される。

一方、それから10年後にアインシュタインが発表した「**一般相対性理論**」は、(星の質量に匹敵する以上の)ものすごく重い物体に対する物理法則だ。特殊相対性理論では扱わなかった加速度運動を考えるうちに、アインシュタインは、重力加速度の生じる原因を考え始める。宇宙ステーションのような狭い空間では、地球の重力と遠心力が釣り合って無重量状態になるが、大域的に考えると重力の効果は消すことができない<sup>4</sup>。そこで、重力の原因は時間・空間のもつ幾何学的な性質の帰結ではないか、とリーマン幾何学と格闘した。そして、重力の正体は時空(時間と空間を合わせた4次元空間)の歪み(ゆがみ)として説明する理論を提案した。時間も空間もゴム膜のように伸びたり縮んだりするものであり、重い

<sup>3</sup>B.P.Abbott et al. Phys. Rev. Lett. 116 (2016) 061102 ほか

<sup>4</sup>アインシュタインの時代には、宇宙ステーションは存在しなかったもので、この例えは現代版である。彼は自由落下するエレベータ内で重力が慣性力と相殺することを思考実験した。

天体の周りではトランポリンのように時空が引き伸ばされ、その歪み具合に沿って物体が動いていくのだ、と説明したのである。

## 2.2 ニュートンの理論との違い

私たちは、高校での物理で、ニュートンの万有引力の法則（1687年）を習う。りんごが落下するのを見て閃いた、とニュートン自身が語ったとされる理論だ。すべての物質は引っ張り合う性質をもつ、と仮定することで、重力の原因を説明する。りんごが地球に落下するのも、月が地球を周回するのも同じ万有引力で説明できる<sup>5</sup>。

ニュートンは、万有引力の存在を認めれば、惑星の楕円運動が自然に導かれることを示した<sup>6</sup>。ニュートンによって創始された物理学は、身近な現象を次々と解明した。18世紀にはハレー彗星の回帰を的中させ、19世紀には天王星の不可思議な運動から海王星の存在を予言するなど、リンゴの落下から惑星の運動までをたった一つの法則で説明したのである。現在でも、分子レベルから銀河系スケールまでは、ニュートンの運動方程式で十分に説明することができる。

アインシュタインの相対性理論は、ニュートンの物理学を、光速近くの極限と大きな重力の極限に拡張したものだ。決してニュートン力学を否定したわけではない。事実、アインシュタインの相対性理論は、日常レベルではニュートンの物理学に戻るように構築されている。

## 2.3 一般相対性理論の予言

一般相対性理論は、宇宙膨張を予言し、ブラックホールの存在を予言し、重力波の存在を予言している。いずれの予言も、アインシュタイン自身が拒絶反応を起こすほど予想外のものだった（詳しくは拙著 [1] ご参照のこと）。

宇宙が膨張していることは、今や誰もが知る事実である。遠方の銀河がドップラー効果によって赤方偏移していることや、宇宙背景放射と呼ばれるマイクロ波の発見・元素合成の理論などから確固たる理論となっている。宇宙はビッグバンと呼ばれる高温で高圧の火の玉として誕生し、現在は138億年が経過している。ビッグバンの前にはインフレーション膨張と呼ばれる急激な時空膨張があったと考えられている。

ブラックホールは、燃え尽きた重い星が重力崩壊してできる時空構造で、光でさえも脱出できない領域を指す。現在までに、ブラックホールを直接観測できた例はないが、周囲の星やガスの動きから、小さな領域に大きな質量が存在していることが予想され、それらがブラックホール「候補天体」と言われている。私たちの銀河系の中心には太陽の420万倍の質量をもつブラックホールが存在していると考えられているし、数十個の強いX線を放つ天体もブラックホール候補である。

---

<sup>5</sup>月が地球に落下しない理由はお分かりだろうか。ボールを速く投げる例で考えよう。当然ながらボールは投げる速さが大きいほど遠くまで飛ぶ。秒速7.9kmの速度を与えると、地面に落下せずに地球をぐるっと周回する。このように引力として重力が働いても、初速度が十分大きければ、物体は落下せずに方向を変えるだけの効果になり、決して衝突するわけではないのだ。

<sup>6</sup>惑星が太陽の周りを楕円を描いて周回していることを示したのは、ケプラーである（1609年）。ケプラーは、当時、世界で最も精密な天文観測をしていたティコ・ブラーエのデータを解析して、太陽系の惑星は円ではなく、楕円を描いていることを発見した。まだ望遠鏡が発明される前の話である。

## 2.4 重力波

一般相対性理論が残した大きな予言の3つめは、重力波の存在である。ニュートンの万有引力の考え方では、どんなに遠くに離れている物体の間でも、力は一瞬で伝わることになるが、これは情報伝達の上限度が光速であるとする特殊相対性理論と矛盾する。時空の歪みを表す式（重力場の方程式）を解析したアインシュタインは、電磁波と同じように重力も波として伝わることを発見した。時空の歪みも、湖の表面のさざ波のように、周囲へ（この場合は立体的な球面状に）波として伝わってゆくのである。これが重力波である。

残念ながら、重力波は非常に弱い。原理的には質量のある物体が加速度運動すれば発生するのだが、太陽程度の天体が光速に匹敵するほどの速さで回転運動しないと、重力波は観測可能にはならない。しかも、波の振幅は波源からの距離に比例して減少するので、天体スケールのもをを観測するのは非常に困難になる。ターゲットとされる天体現象は、超新星爆発やブラックホールの合体、中性子星の合体などだが、それらの発生頻度も不確かだ。

アインシュタイン自身も、この困難さを認識していた。そして、一般相対性理論は、現実の物理現象とは程遠い理論で、1つの数学的な解釈と見なされ、1950年代までほとんどの物理学者からは注目を集めることがなかった。一般相対性理論が息を吹き返すのは、60年代に、相対性理論を使わなければ説明できない天体現象（クェーサーと呼ばれる強い電波源や中性子星など）が発見されてからである。

## 3 重力波検出実験

### 3.1 初期の重力波検出実験

60年代の終わりには、重力波を実際に観測しようと試みる物理学者も登場した。アメリカのウェーバーである<sup>7</sup>。ウェーバーは、1.5トンものアルミニウムの円筒を吊るし、重力波が通過するときその形が歪むことを観測しようと試みた。今では「共振型」と呼ばれる原理である。そして68年に「2台の装置で重力波を同時観測した」と報告し、世界に衝撃を与えたが、残念ながら追従した他のどのグループも追試できず、今では幻の発見とされている。しかし、ウェーバーの誤報は、より正確に重力波を検出しようとする機運を生んだ。

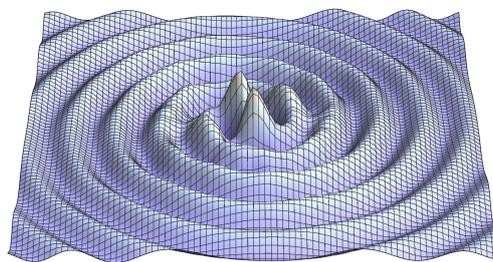


図3：連星から放出される重力波のイメージ図。中央の2つの大きな山のところに星があり、2つの星が次第に近づいて合体するまでに、時空に歪みを引き起こす。歪みは波として周囲に伝播する。

<sup>7</sup>ウェーバーは、メーザーと呼ばれる原子共振を用いた光の発振原理（レーザー光線登場の原型となった原理）を考案した物理学者でもある。

74年に、アメリカの電波天文学者ハルスとその学生だったテイラーは、偶然、連星をなす中性子星を発見した。太陽程度の質量をもつ2つの中性子星が9時間弱で周回するこの連星は、一般相対性理論をテストする良い実験場となった。長期間の観測から、連星同士がエネルギーを失いながら次第に近づいていく様子(図3)がわかった。このエネルギー損失分は、一般相対性理論の計算によって、重力波として周囲に広がっていった分と一致している。こうして、重力波が存在していることが、(間接的にだが)初めて報告されることになった。ハルスとテイラーは、93年にノーベル物理学賞を受賞した。

### 3.2 レーザー干渉計による重力波検出

80年代に入ると、レーザー干渉計を用いて広い周波数帯域での重力波検出を目指す計画が提案される。干渉計とは、光のもつ波の性質を利用して、微小な距離測定をする装置である。その原理を説明しよう。

干渉とは、2つの波が重なり合うときに、強めあったり弱めあったりする現象である。波の振幅の激しい部分どうしが同じ高低で(山と山で)重なれば強めあうし、逆の高低で(山と谷で)重なれば振幅はゼロに近くなる。光の場合は、明るさに強弱が生じて「干渉縞」となる。

干渉計を考え出したのは、マイケルソンで、19世紀末のことだった。当時は、光がなぜ真空中を伝播できるのかがわからず、宇宙空間を満たすエーテルと呼ばれる仮想物質の検出が目的だった。マイケルソンは、1つの光を2筋に分け、L字型の2本の経路(「腕」と呼ぶ)で光を往復させ、再び合成する装置をつくり、地球の運動で光の経路差が生じるかどうかでエーテルの存在を実証しようと試みた(図4)。残念ながら、エーテルは検出できずにマイケルソンは「実験は失敗した」と結論したが、現在ではエーテルはなく、光は真空中を進むものとして理解されている<sup>8</sup>。

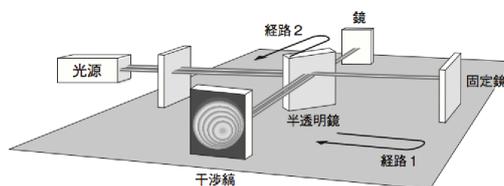


図4: 干渉計の原理 ([1] より)。

重力波は、ほかの物質と相互作用が弱いために、地球があってもすり抜けて通り過ぎてゆく。宇宙から来る現象であっても、空を見上げる必要はなく、レーザー干渉計で記録されるデータから、重力波の波形が隠れていないかの宝探しをすることになる。

マイケルソンの装置は、腕の長さが11mだったが、重力波の場合は、微弱な変化を相対的に検出するために、腕の長さは数kmで設計される。アメリカのLIGOは4kmの腕をもち、イタリアのVIRGOと日本のTAMAは3kmの腕である。実際にはレーザー光線は、腕を100往復ほどして干渉測定器に入射する。

微弱な重力波を検出するためには、レーザー信号に含まれるノイズとの戦いが強いられる。巨大な干渉計では強力なレーザー光が必要になるが、強力な光は量子揺らぎを発生させ、微小な測定を阻害する。実験物理学者たちは、相反する技術的要請を乗り越えて、2000年代には干渉計を稼働させた。理論物理学者たちは、連星の合体現象で生じる重力波の波形予測の計算を、さまざまな難題を乗り越えて準備した。

アメリカでは、LIGO(ライゴ<sup>9</sup>)と呼ぶ、一辺が4kmの腕をもつレーザー干渉計を、ワシントン州のハンフォード(砂漠の中)と、ルイジアナ州のリビングストン(ジャングルの中)の2箇所に設置(図

<sup>8</sup>後に量子力学によって光には波動性と粒子性の両方の性質があることが結論されている。光が伝播するのは、光子(photon)という粒子が飛んでいると考えてもよい。

<sup>9</sup>Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory, レーザー干渉計重力波天文台 <https://ligo.caltech.edu/>

5左) し、2005年から観測を開始した。イギリスとドイツは600mの腕をもつ干渉計 GEO をドイツ・ハノーバーに設置し、2005年に稼働。フランスとイタリアは3kmの腕をもつレーザー干渉計 VIRGO (ヴィルゴ)<sup>10</sup> をイタリア・ピサに設置し、2007年に観測を開始する。日本は、これらに先立って2002年から3年間、東京・三鷹の国立天文台に300mの腕をもった干渉計 TAMA を運用した実観測を行った。

しかし、(予想されていたことだが) 2000年代の干渉計の能力では、どのプロジェクトも重力波を捉えることができなかった。もっとも感度の高かったアメリカの LIGO は、20メガパーセク(7000万光年先)の中性子星連星を捉える能力をもっていたが、2年以上の実観測で、一回も確かな重力波イベントを発見することができなかった。

### 3.3 現在の重力波レーザー干渉計

各国は、レーザー干渉計を数年間停止し、感度を改善して、再び観測を始めたところである。感度が10倍良くなると、10倍遠いところの天体からの重力波を捉えることができる。体積比で1000倍にあたるので、重力波を捉える確率も1000倍高くなる。中性子星連星やブラックホール連星が実際にいくつあるのか、そして地球に向けて強い重力波を放出する確率がどの程度なのかは不確定な要素が多いが、現在の感度であれば、おそらく1年間に10個以上のイベントを発見することができるだろうと期待されている。

日本は、岐阜県・神岡の山中に、一辺が3kmの腕をもつレーザー干渉計 KAGRA (かぐら)<sup>11</sup> を新たに建設した。ニュートリノ観測でノーベル物理学賞を2度日本に導いた(2002年度小柴昌俊氏、2015年度梶田隆章氏)スーパーカミオカンデ(小柴氏の時代はカミオカンデ)に隣接する場所である。山中にトンネルを掘って造られた干渉計は、地面振動を抑えることができ、装置全体を低温に冷却することで熱雑音も抑え、第2世代 LIGO と同程度の感度を得る計画である。2016年3月15日には、1ヶ月の試験運転を開始し、2017年には本格的に稼働させる予定である。KAGRA プロジェクトのトップは、東京大宇宙線研究所所長を務める梶田隆章氏である。

アメリカの LIGO は、これより一足早く、2015年9月に、第2世代 LIGO (アドバンスト・ライゴ) を稼働させた。



図5：(左) アメリカ・ルイジアナ州の LIGO。(右) 岐阜県・神岡の山中に設置された KAGRA。

巨大なプロジェクトであり、携わる研究者の数も多い。LIGO/VIRGO のチームはデータ解析に関わるグループのメンバーが1000名を超えている。

<sup>10</sup><http://www.ego-gw.it/>

<sup>11</sup><http://gwcenter.icrr.u-tokyo.ac.jp>

## 4 重力波観測の意義

### 4.1 重力波観測で何がわかるのか

重力波が観測されると、当然ながら波源となった天体の様子がわかることになる。中性子星連星であれば、運動の様子や半径・質量がわかり、これまで原子核実験では得られなかったような、高密度物質の状態がどのようになっているのかの情報がわかる。連星合体のときには、もっとも重力波の振幅が大きくなると考えられているが、その直後の波形がもしすぐに（ミリ秒程度で）減衰するようならば、ブラックホールが形成された決定的な証拠になる（図6）。これまで私たちはブラックホールを望遠鏡で「観た」ことがないが、それが重力波の波形データの中からわかることになるのだ。

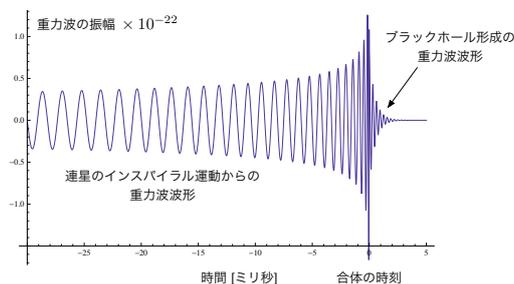


図6：中性子星連星の合体の前後で放出される重力波の波形（予想）。次第に振幅を大きくしながら、1kHzに近い周波数にまで上がる。合体後にブラックホールが形成されるならば、重力波はブラックホールに飲み込まれてしまい、急速に減衰する。この減衰部分が観測されれば、ブラックホールを直接観測したことになる。

さらに、重力波が一般相対性理論からの予測どおりに検出されるかどうかで、一般相対性理論の正しさも議論することができる。これまでに、一般相対性理論は、重力レンズ効果（質量の大きい星や銀河によって光が曲がって進むこと）や、水星の近日点移動、中性子星連星の軌道の変化などさまざまな視点で検証され、他の後発の重力理論をすべて棄却して生き残ってきている。しかし、いずれもブラックホール形成には及ばない「弱い」重力場での検証だ。重力波の直接観測によって、初めて「強い」重力場での理論の検証が現実化するのである。

今回の記者発表で示された重力波の波形（図2）は、まさに、このような連星合体による瞬間の波形だった。

### 4.2 重力波観測がもたらす意義

今回の重力波の初観測の意義をまとめておこう。

#### (1) 重力波が実在していたことがわかる

アインシュタインの予言のうち、100年もの間、宿題となっていた重力波の存在が直接確認された。初観測は、それだけで十分な意義がある。

#### (2) 強い重力場での一般相対性理論が検証できる

これまで100年間、一般相対性理論は数々の手段で検証実験をパスしてきたが、いずれも「弱い」重力場での話だった。今後は、ブラックホールが形成するような「強い」重力場での検証が可能になる。

#### (3) 天文学に広がりが生じる

可視光線、赤外線、電波、X線、ガンマ線など、これまでさまざまな波長で遠方の銀河や星の姿を解

明してきた天文学に、重力波という新しい手段が加わる。重力波の発見データを蓄積することによって「重力波天文学」が誕生する。相互に観測データを照らし合わせることで、より一層私たちは宇宙に対する知見を広げられることになる。

#### **(4) 未知の分野の解明が進む (a) ブラックホールや中性子星**

これまでに直接「観る」ことができなかったブラックホールや中性子星などのコンパクト天体が「観測される」ことになる。重力の引き起こす物理現象や、高密度な原子核の状態方程式など、未知だった分野の研究が可能になる。

#### **(5) 未知の分野の解明が進む (b) 銀河形成**

ブラックホールがどの位存在して、どのような質量分布なのか。連星を作っているものはどの位の割合なのか。銀河中心には超巨大ブラックホールが存在しているが、どのようにして形成されたのか、など未知だった分野の研究が可能になる。

#### **(6) 未知の分野の解明が進む (c) 初期宇宙**

これまでは、初期宇宙の解明は、宇宙誕生後 38 万年の宇宙背景放射を観測することが限界だった。重力波は、これより前の情報をもたらす可能性がある。LIGO や KAGRA では無理かもしれないが、次世代の重力波観測がそれを可能にするだろう。

#### **(7) 未知の分野の解明が進む (d) 未知の現象**

実は科学者にとって、もっとも面白くなる結果は、これまでに知られていない未知の現象が検出されることだ。電波望遠鏡が中性子星を、マイクロ波伝送実験が宇宙背景放射現象を、核実験監視衛星がガンマ線バースト現象を見つけたように、まったくの偶然から始まる研究が、重力波観測でも起きるかもしれない。それは例えば、時空が 5 次元以上だった、とか、光速を超える現象が存在した、とか、...

今回の重力波の初検出は、私たちに新しい「目」をもたらしてくれた。報道関係者からの取材では、「ノーベル賞を獲るか、日本のプロジェクトは負けたのか」といった質問をうけたが、科学の価値は、そのような尺度で測るべきではない。最先端の科学が、すぐに私たちの生活に結びつくことは期待できないが、新しい知見を得たことは、人類の財産である。

## **参考文献**

[1] 真貝寿明, 「ブラックホール・膨張宇宙・重力波 一般相対性理論の 100 年と展開」(光文社新書, 2015 年 9 月刊)