

広大医誌, 60 (1-6)

1～8, 平成24・12月 (2012)

退任記念講演

放射線の被曝線量評価を振り返って

－広島・長崎, セミパラチンスク, チェルノブイリ, 福島での放射線被曝の調査から－

星 正 治

広島大学原爆放射能医学研究所

放射線影響評価部門

線量測定・評価分野教授

平成24年3月15日

(於：広島大学医学部第5講義室)



星 正 治 教授

略 歴

学 歴

- 昭和41.3 宮崎県立宮崎大宮高等学校卒業
 昭和41.4 大阪大学理学部物理学科入学
 昭和45.3 大阪大学理学部物理学科卒業
 昭和45.4 大阪大学大学院理学研究科修士課程物理学専攻入学
 昭和47.3 大阪大学大学院理学研究科修士課程物理学専攻修了
 昭和47.4 広島大学大学院理学研究科博士課程物理学専攻入学
 昭和52.3 広島大学大学院理学研究科博士課程物理学専攻単位修得退学
 昭和52.5 理学博士（広島大学）
 昭和52.11 第1種放射線取扱主任者免許状
 昭和62.9 医学物理士の資格を得る

職 歴

- 昭和50.4 大分工業大学講師（現日本文理大学）（物理学・数学）
 昭和55.4 広島大学原爆放射能医学研究所助手（放射線生物・物理学）
 平成4.1 広島大学原爆放射能医学研究所付属原爆被災学術資料センター助教授
 平成6.11 広島大学原爆放射能医学研究所国際放射線情報センター教授
 平成17.4 広島大学原爆放射線医科学研究所放射線システム医学研究部門（現放射線影響評価部門）線量測定・評価分野教授
 平成24.4 広島大学名誉教授
- 昭和58.2－昭和59.4 アメリカ合衆国へ出張（Los Alamos National Laboratory Life Science Divisionにて超軟X線の生物影響の研究を行う）
 平成6.4－平成6.10 京都大学放射線生物研究センター客員助教授
 平成6.11－平成9.3 京都大学放射線生物研究センター客員教授
 平成12.6－平成13.3 京都大学原子炉実験所客員教授
 平成14.7－平成15.3 金沢大学理学部客員教授
 平成15.5－平成16.3 金沢大学自然計測応用研究センター客員教授

1. はじめに

放射線の発見は1895年のレントゲンによるX線の発見にはじまる。100年ほど前のことである。発見の後すぐにX線の医学利用の一つとして手の写真が撮影され、これから医学への広い応用がはじまった。その後ベックレルによる自然界にも放射線を発生する物質があることが発見され、キュリー夫妻によりポロニウムやラジウムの抽出が行われ放射線を出す元素が発見された。その後ラザフォードにより放出された放射能がアルファ線、ベータ線、ガンマ線であることがわかった。この後で放射線の人工的に製造されるようになり、その利用による多くの学問的な発展があり、医学や工学分野での広い応用がはじまった。

このことにより、人々は多くの恩恵も受けてきた、現在の生活の中であらゆる分野で使われていて放射線の利用なしでは現代の生活は成り立たなくなっている。一方、放射線による悪影響もすぐに知られるようになった。放射線の被ばくとその影響の系統的な調査としては、原爆被ばく者の協力により、放射線によるがんの発生などの調査が放射線影響研究所 (RERF) で行われてきた。現在では国際放射線防護委員会 (ICRP) で放射線による発がんなどのリスクが検討され、各国の国内法に取り入れられている。日本では、放射線障害防止法があり、これにより使用の制限や作業者の被曝線量の限度が定められている。

放射線のリスク (危険度) は単純化すると、下の式で表される。

$$\frac{\text{被ばく者の健康影響}}{\text{放射線量}} = \text{危険度} \quad (1)$$

放射線影響研究所では約12万人の被ばく者の調査により、一人一人の「被ばく者の健康影響」が調査され、その一人一人への「被ばく線量」が求められている。この分母の被ばく線量は、筆者を含む日米の大規模な調査により2003年に決定された。被ばく線量評価体系 (Dosimetry system 2002(DS02))¹⁾ と称されている。

被ばく線量の評価の意義については、2つの主たる意義があると考えている。

- 1) 被ばくした人本人のため。これは緊急被ばくなどの際、被ばくした人々の被ばく線量がすぐにわかれば、すぐに病院に行く必要のある重篤な被ばくか、定期的な健康診断が望ましいか、全く被ばくが少なく心配がないかなど判断する基準となる。
- 2) 私たち一般人のため。これは、上記 (1) 式を見ていただくと、主に原爆被ばく者の調査から求められた右辺の「危険度」を使い、左辺の分母の被ばくした「放射線線量」を求めれば、分子の「被ばく者の健康影響」が推定できるからである。たとえば、誰かが被ばくしたとし、その「放射線線量」がわかれば、右辺の「危険度」がわかっているので、分子の「被ばく者の健康影響」がわかる。つまり、今後どれだけの確率でがんになるかが推定できることになる。これにより、放射線障害防止法などの法律で被ばくの限度が定められる。

放射線の健康への影響には、白血球の現象や脱毛などのある一定の被ばくを受ければ必ず引き起こされる、確定的影響と、発がんなどの被ばく線量に応じた確率により引き起こされる確率的影響があり、主に危険度は後者の確率的影響をいう。放射線の影響でこの確率的影響を考える場合に、生活のあらゆる場面で確率的影響があることを述べたい。放射線以外にも、健康に悪影響を与えたり、ひどい場合には死亡する危険性がある。それらを認識しその比較することも重要である。

表1. 日本人の日常生活におけるリスクより推定した10万人当たり、一年あたりの死者数 (参考文献2) より抜粋

日常生活		産業生活	
交通事故	10.8 人	林業	49.2 人
内訳:		漁業	58.3 人
自動車事故	10 人	鉱業	131 人
船舶事故	0.4 人	建設業	19.9 人
鉄道事故	0.36 人	製造業	5.4 人
航空機事故	0.044 人	運輸業	12.7 人
喫煙	28 人		
自然放射線	2 人		
医療放射線	3 人		

表1を見てわかるとおり喫煙は10万人当たり28人と非常に大きい、被ばく線量に比例したと仮定した計算値であるが自然放射線や医療放射線による数の2人や3人と比べても10倍もある。また右の表の職業人の推定数は漁業、林業、工業などは非常に大きい数字となっている。このように、放射線の被曝によるリスクはICRPの勧告などにより推計された物であるが、このように一般生活の中でのリスクと比べてその大小を考える必要がある。一般の生活でのリスクは常に存在する。たとえば交通事故では車を運転すればかならず事故が起りえる。そのため保険に入る。保険の一部は強制されている。またリスクは0にはできないことが一般的であり、下げるように努力する事柄である。放射線についても人工的な放射線に関してはリスクを下げる努力が求められていて、可能な限り下げる努力が続けられている。

2. 広島・長崎の原爆被ばく者の被ばく線量推定

放射線影響研究所などを中心に日米の大きな規模の共同研究で原爆線量評価体型 (DS02) を求める努力が筆者も参加して行われた¹⁾。1994年から筆者のグループが、過去の線量評価体型DS86の問題点を発見し、1994年からアメリカの研究者と研究を進めていた。その後正式に日米の共同研究が開始され、2002年に合意がなされた。2003年には最終的な日米の合同会議で決定された。これによる主たる変更は、広島と長崎でガンマ線の被ばく線量が約10%増加したことである。大まかには、(1)式で言えば左辺の分母が10%減少するので右辺のリスクが10%増加することになる。

広島・長崎の原爆による放射線は、ガンマ線と中性子線による。この線量評価は困難を極めた。瓦、煉瓦、タイルなどのガンマ線の線量評価のための被ばく試料や、灯籠の石やコンクリート、鉄材などの中性子線の線量評価のための被ばく試料を長年にわたって収集してきた。2000点は超えている。それらを金沢大学、筑波大学、広島大学など日本の大学だけでなくアメリカやドイツの大学や研究所で計測し相互比較をした。特に中性子の評価のための測定は、超微量で最新の測定設備の必要なユーロビウム152やコバルト60、塩素36の測定のため、世界でも最高技術を持った研究室で測定を行った。この結果、特に問題のあった中性子は遠距離での測定の見直しや原爆の炸裂した高度の再調査による変更により問題が解決した。

これらは前項でも述べたが放射線による発がんなどの健康影響、リスクを求めるためであり、被ばくした人々の健康管理や、放射線作業従事者や一般人の被ばくによる健康影響を最小限にとどめるために使われている。

3. セミパラチンスクにおける調査研究

以上述べてきた放射線のリスクについては、世界的にほとんど広島・長崎の被ばく者の調査から求められてきた、しかしながら広島・長崎の被ばくは、一瞬の被ばくであり、百万分の1秒から1秒の間に大半の放射線が放出された。この瞬時の被ばくによる影響は、通常の被ばくでは長い時間の間の被ばくが多く、その場合のリスクとは異なるのではないかと。瞬時被ばくのリスクをそのまま適用するには問題があるのではないかと言われてきた。セミパラチンスクでは放射能を含んだ雲が通過し残留放射能により被ばくした。その被ばくは種週間から数ヶ月一部はもっと長期間の長時間の被ばくによる。これは広島・長崎の瞬時被ばくと異なり低い線量率の被ばくであり、一般に体験する被ばくの形態である。

セミパラチンスクには旧ソ連の核実験場があり、1994年より筆者はセミパラチンスクでの被ばく線量評価と健康影響調査の担当として調査を開始した。最も被ばくが大きかったとされるのは、ドロソ村で核実験場から約110km離れていて、核実験により生じた放射能を含むガスやちりの雲が通過した。それ以前の現地での調査では内部被ばくと外部被ばくをあわせて4000mGy以上の被ばくがあったと報告されていた。非常に大きい値であったのでこれらの検証を行った。調査研究の目標としては、被ばく線量調査(内部被ばくと外部被ばく)を行い、疫学調査の結果を使い最終的にはリスクを求めることを目的として長い調査研究を行ってきた。

セミパラチンスクには旧ソ連時代に使われていた四国ぐらいの広さの広大な核実験場で、年から1989年にかけて旧ソ連により延べ459回の核兵器の爆発試験がセミパラチンスク核兵器試験場で実施された。その内訳は地表26回、空中87回、地下346回であった。広島原爆の1100倍である。この出力はソ連の全核爆発の6%であるが、実験場周辺に村や都市が接近しているため、周辺住民の放射線被ばくとしては深刻と言われてきた。

大気中の核実験の直後は核分裂後の放射能を含んだ雲が実験場の外の地域を通過して被ばくや汚染を引き起こした。ただ核爆発地点から離れた住民への放射性フォールアウトによる放射線被ばくが及ぼす人体影響は、爆発から

の直接放射線影響に比べると不明な部分が多い。

旧ソ連時代のセミパラチンスクでの被ばく線量推定と健康影響調査はセミパラチンスク市にある現在の放射線医学環境研究所で行われてきた。1991年に旧ソ連からカザフスタン共和国は独立し、実験場周辺地域の被ばく線量のデータを公開した。これらについては前述したがドロン村で400mGy以上の被ばくがあったとされ、またこれらは当時の軍の管理下で実施されたもので、疑問も少なくない。また、大多数のデータはロシアが持ち帰ったとされ公開されていない。

健康影響調査に関しては放射線医学環境研究所によって調査研究によるとこの地域の悪性腫瘍の発生は核実験の後に増加し、全体として被ばくしていない地域より多いとされている。被ばく線量との関係も議論されており、放射線による悪性腫瘍の発生は白血病、甲状腺、食道、胃、肝臓、腸、肺、乳房に観察されている。その他染色体異常や奇形など放射線によるとされる異常が観察されている。放射線によるリスクも計算され広島長崎の原爆被爆者との違いも示されている。ただこれらは診断や調査の基準が異なっていることも考えられるため、今後第三者による確認などの作業が必要と考えられる。

はじめの調査は被ばく線量調査であるが、内部被ばくがありさらに外部被ばくがあり、膨大な調査を必要とする。最も正確で広島・長崎などで実績のある煉瓦の調査を行ったが、結果として約400mGyの外部被ばく線量との結果が出た。また染色体異常、菌の線量測定、地上のセシウム137の汚染量の測定からの計算による推定、放射能のブルームが通過した際にガス状や地理上の放射能からの内部被ばくと外部被ばくの計算などの値について比較調査を行った。その結果外部被ばくについては戸外で全ての値が、約400mGyとなり一致することがわかった³⁾。これにより外部被ばくの推定はたとえば土壤のセシウム137汚染量からも推定できることがわかった。それでドロン村以外の村の土壤中の放射能の値を測定するためのサンプリングを継続して測定中である。

またドロン村では、図1に示すように山本らによる放射能の通過した地点の横断的土壤調査がある⁴⁾。この調査では、ドロン村の近郊の雲の通過地点から横断的に500m毎に土壤を採取しCs-137とPu-239,240を測定した。全体で10kmに渡る横断調査を行った。60年近く経過しているにもかかわらず、中心を最大として左右にきれいなピークを観測した。このように土壤に残った放射能は長い間沈着し現在でも測定し、その結果から当時の被ばく線量を推定することができる。中心のピークで5000Bq/m²の結果となっている。ドロン村は中心線から2km離れていて半分の2500Bq/m²の値を示しているが、この値で戸外の外部被ばくは400Bq/m²となることがわかったことがこの調査での成果である。

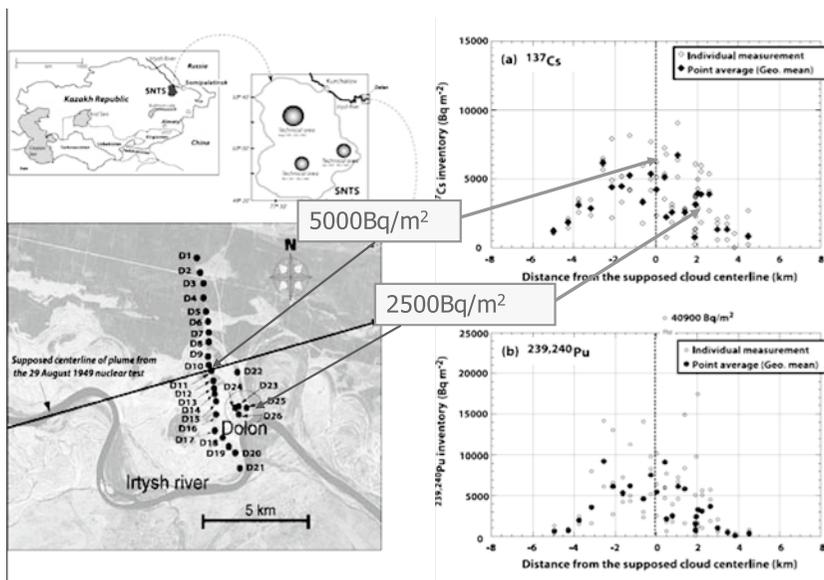


図1. ドロン村における土壤調査とセシウムとプルトニウムの測定結果⁴⁾。

調査としては、その他にも岡本らによる歯の検診、武市らによる甲状腺の検診も同時に行われて、大きな成果を上げている。これらは前述の文献3)に一部示されている。

4. 福島における原子力発電所の事故の経過と今後

2011年3月11日マグニチュード9の地震が東日本の沖合で起こり、その後観測史上最大の津波が発生した。地震そのものにより外部電源が破壊され、非常用電源も津波による浸水により壊れてしまった。それにより福島の原子力発電所の1から4号機で全ての電源が喪失する事態となった。事実はまだ明確ではないが、数時間の後1から4号炉の原子炉の燃料の溶融が起こった。そして压力容器の底が抜けメルトダウンが起こった。その外側の原子炉の格納容器自身にも損傷があると考えられ更に突き抜けた炉もあったと考えられる。最終的には実際に見て見なければこれらの状況はわからない。おそらく放射線量が強く確認することは長い間できないであろう。

時間経過を見てみると、

- (1) 3月11日14時46分、東日本大震災の発生、
- (2) 同、15時27分、津波到達、
- (3) 同、20時50分、避難指示の開始、
- (4) 3月12日、15時36分、1号機で水素爆発。
- (5) 3月14日、11時1分、3号機、原子炉建屋で水素爆発、その日の内に炉心溶融が起こったと考えられる。
- (6) 3月15日、6時0分より、2号機の圧力抑制室で爆発音、同10分頃4号機も水素爆発。その後も放出が続く。

その放出でもっとも影響が大きかったのは3月15日の放出である。12日15時36分の1号機の爆発では海岸に沿って北に流れ女川まで達したと考えられる。これによる実質的な土壌への残留は少なかった。また続く14日11時1分の3号機の爆発の際は、海岸に沿って南へ流れ東京に達した、ただこの際の土壌の残留も比較的少なかった。汚染を引き起こした放射能の放出は、3月15日の2号機と4号機の爆発の後で放射能を含んだガスやちりが南から内陸を北に向かった。そして原子力発電所から飯館村に至る北東方向ほぼ直線の地域で雨や雪により空気中の放射能が土壌に付着、残留した。これに伴って北西の方向に30kmの範囲を超えて飯館村付近まで汚染が広がった。その後も放出は続き福島県から南北の隣接県などの地域の汚染を引き起こした。筆者を含む研究グループの土壌調査の結果は大阪大学核物理研究センターのホームページ内で詳細な測定結果や被ばく線量推定の結果が示されている。⁶⁾

チェルノブイリで経験したとおり、放射線は空中を拡散しながら移動し、通過した地域住民の呼吸などを通して被曝を引き起こす。また雨や雪が降ると空気中の汚染がそれとともに落下し土壌に沈着する。後者についてはヨウ素132やヨウ素131、セシウム134やセシウム137を主に含む。ヨウ素の半減期は8日以内で3ヶ月程度で消滅していく。しかし、セシウム134については半減期2年、セシウム137については半減期が30年で土壌表面から5cmの深さ以内に固着し長らく汚染が続き、被曝の問題を引き起こす。いま除洗が行われようとしているがこのセシウムの対策がそれである。

チェルノブイリでも経験したことであるが、放射能の汚染は雨が降っているか降っていないかで大きく異なる。雨が降っていない場合は放射能を含むガスが通過している際に被曝を避ける処置をすればかなり避けられる。この場合、通過後の残留放射能は比較的少ない。しかしながら、多くの問題は雨が降っている場合である。雨はその種類によるが、一般的にはスポットで降る。降ったところだけがまだらに汚染することになる。チェルノブイリではそのスポットが数十メートル単位のことがあり、隣の家は汚染が少ないのにこちらの家は除洗が必要、そんなところを何カ所か見てきた。町単位で見るとそのスポットは数百メートルになることもあり、数キロメートルそれ以上の場合もある。要するに実際の汚染は細かく測定しなければわからない。そして更に問題になるのは放射能のガスの固まりは拡散して広がるがそれほど早くなく数は百キロメートル先でもスポットを作ることがある。今回も約200km南西の松戸付近にも強い汚染ではないがスポットが見られている。そして、アスファルトやコンクリートなど比較的流れやすい表面と、土壌のように流れた先で固着することもある。道路の側溝などで周りより高い放射線量が測定されているのもこのためである。

汚染の状況であるが、チェルノブイリと比較して見ると、

チェルノブイリ (IAEAなどの資料による)、

- (1) 避難した人口：約40万人、

- (2) 汚染地域 (37kBq/m²以上) : 14万5千人,
- (3) 強制移住地域の面積 : 1万3千km²,
- (4) 放射性物質の放出量 : 520テラベックレル。

福島 (文献5などの資料による数字を含む),

- (1) 警戒, 計画的避難区域の対象人口 : 8万5千人,
計画的避難区域1万人余, 警戒区域およそ7万5千人, (自主的避難者を含むと全体でおおよそ15万人になる)
- (2) 汚染地域 (30kBq/m²以上) : 8千km²,
- (3) 警戒, 計画的避難区域の面積 : 8百km²
- (4) 放射性物質の放出量 : 77万テラベックレル。

これらの推計の数字は単純には比較できないとしても, 福島の汚染の程度がチェルノブイリと比較して地域の広さは10分の1以下であるが, 汚染地域の人口はチェルノブイリの6割程度とその人的被害は大きかった。広島原爆と比較しても放射能の放出は数十倍と言われている。

福島の場合は, 更に海洋の汚染がある, 初期の頃には大量の放射能が海に流れ出した。これらの測定や計算による広がり推計はあるが, 単純に拡散して広がるだけでなく, 海流に乗って移動していく。プランクトンが放射能を吸収し, これを小さい魚が食べ更に大きい魚が食べていく間に濃縮されていくことなど, 重金属と同様なことが考えられている。しかし, これらは詳しくは不明で今後の詳しい研究と対策が待たれる。さらに, 近くの海底土の汚染については固着する事も考えられる。これらの海底土の汚染と今後の変化などについてもこれからの調査にかかっている。このように, 福島原子力発電所の事故は今後莫大な費用のかかる多くの問題を抱えている。

福島の原子力発電所の周辺の汚染について述べてきたが, 原子炉本体についての今後の廃炉の問題もいずれ議論されなければならない。炉を解体して汚染した廃材や溶融した燃料を取り出して, きれいにして廃炉にする議論が主流である。汚染したコンクリートなどの廃材だけでなく, 溶融した高い放射能を持つ燃料もある。それらを取り除いた後どこに捨てるかあらかじめ考えておく必要がある。

もう一つは, これらの放射能による人々への健康影響についてである。これらは, 過去の調査結果から議論されている。たとえば広島・長崎の被ばく者などのリスク, チェルノブイリ他などから推定されている。原爆被ばく者からは100ミリグレイで発がんのリスクが0.5%増えることが推計されている。チェルノブイリではわかったことは甲状腺がん, その直接その原因でなくなった方は10人くらいとの国連科学委員会の報告がある。しかし福島で起こったことまたは将来起こることは, 被曝の形態など他での被曝とは違うので注意が必要である。たとえば原爆被ばく者では, 数秒単位の瞬時の被曝であり, 長期の被曝とはリスクは異なっていると考えられる。今後の健康調査が必要である。

避難地域の設定などでは, 年間20ミリシーベルト以上が対象地域設定の基本とされている。放射線障害防止法などで定める, 一般住民に対する放射線施設からの被曝は1ミリシーベルト以下に設定されている。20ミリシーベルト以上の地域は避難地域であり, 1ミリシーベルト以下は放射線障害防止法で定める上限である。それらの間の1ミリシーベルト以下から20ミリシーベルトの地域をどうするかについては多くの議論があるところである。福島でこれからの健康影響は不明な点が多いが, 広島・長崎やチェルノブイリその他の調査結果から推定し, 過去の調査や現在の汚染状況のデータをわかりやすく開示し, 最終的には個人の判断ができるようにすべきと考える。老人の場合と幼児, 子供のいる場合は判断が異なることもあって良いと考える。

5. おわりに

放射線の調査研究について筆者だけでなく幅広い共同研究者グループ (原爆放射線量やセミパラチンスクに関しては, 文献1, 3) に示すように調査研究が進められてきた。このほかにも, 黒い雨の研究もあるがこれはまだ道半ばである。放射線の調査研究では実際に被ばくした被災者が多数存在し, 健康や生活における悩みも大きい。被ばく線量や健康影響調査は必要でありこれに基づいて健康管理など進められなければならない。またその結果が出るまでには通常10年以上の年月が必要であり, 最終結果を待つことなく被ばくの影響が推定された段階に必要な救済が必要と考える。また放射線による影響のうち発がんなどは確率的に起こり, それはリスクとして考える。また

そのリスクは交通事故など日常生活に於いてもあらゆる場面で存在する。研究者に於いてはこのリスクの考え方を研究者仲間内だけの議論とせず一般人への理解のために努力すべきと考える。

6. 文献

- 1) Reassessment of the atomic bomb radiation dosimetry for Hiroshima and Nagasaki Dosimetry study 2002 (DS02) Vol. 1 and 2. Radiation Effects Research Foundation 2003.
- 2) 新・放射線の人体への影響. 日本保健物理学会, 日本アイソトープ協会 (2001) より抜粋)
- 3) Semipalatinsk study: M. Hoshi et al. J. Radiat. Res. 47 A1-A224.
- 4) M. Yamamoto, J. Tomita, A. Sakaguchi et al. Spatial distribution of soil contamination by Cs-137 and Pu-239, 240 in the village of Dolon near the Semipalatinsk nuclear test site: New information on traces of the radioactive plume from the 29 August 1949 nuclear test. Health Phys. 94 2008 328-337.
- 5) Hiroshima research news 14, 2011広島平和研究所発刊
- 6) 大阪大学核物理研究センターのホームページ内の URL <http://www.rcnp.osaka-u.ac.jp/dojo/> による。

* 広島大学退任記念講演会での講演を基に、講演者による編集の後、許可を得て掲載しております。

そのため、広島大学医学出版会は内容及び使用された図・表・写真に関する一切の責任を持ちませんので、ご了承願います。