

第7章 中国の剰余定理

7.1 中国の剰余定理

この章の主目的は次の定理を証明することである。

定理 7.1 (中国の剰余定理) m_1, m_2, \dots, m_r をどの2つも互いに素な自然数とすると, 任意の整数 a_1, a_2, \dots, a_r に対して, 連立合同式

$$\begin{cases} x \equiv a_1 \pmod{m_1} \\ x \equiv a_2 \pmod{m_2} \\ \dots\dots\dots \\ x \equiv a_r \pmod{m_r} \end{cases}$$

は整数解 x をもつ。さらに, $M = m_1 \cdots m_r$ とすると, 解は M を法として一意である。すなわち, $x, x' \in \mathbb{Z}$ がともに解ならば $x \equiv x' \pmod{M}$ が成り立つ。

最後の部分, 一意性は次のようにして確かめられる。 $x, x' \in \mathbb{Z}$ がどちらも上の合同式をみたすならば, $x - x'$ は m_1, m_2, \dots, m_r すべての倍数である。一方, 仮定より m_i 達はどの2つも互いに素だから, これらの最小公倍数は M であり, $x \equiv x' \pmod{M}$ が確かめられた。

以下において, 解が存在することの証明を3通り与える。

第1証明 $r = 1$ のときは明らかなので $r \geq 2$ としよう。まず, 第1の合同式から解は $a_1 + m_1 y$ の形をしている。これが第2の式をみたしているので

$$a_1 + m_1 y \equiv a_2 \pmod{m_2} \quad \text{すなわち} \quad m_1 y \equiv a_2 - a_1 \pmod{m_2}$$

であるが, m_1, m_2 は互いに素なので, 定理 5.9 より, 法 m_2 に関する m_1 の逆元 b がとれ, それを用いて $y \equiv b(a_2 - a_1) \pmod{m_2}$ と書ける。 m_1 を掛けて $m_1 y \equiv m_1 b(a_2 - a_1) \pmod{m_1 m_2}$, したがって, 第1, 第2の合同式はひとつの合同式

$$x \equiv a_1 + m_1 b(a_2 - a_1) \pmod{m_1 m_2}$$

に置き換えることができ, $r = 2$ ならばこれが解を与えることになる。 $r \geq 3$ のときも, この操作を繰り返すことで最終的にひとつの合同式に帰着され, それが解となる (正確には数学的帰納法による)。

第2証明 まず, $n_1, \dots, n_r \in \mathbb{Z}$ を次式で定める;

$$n_i m_i = m_1 \cdots m_r \quad (i = 1, \dots, r).$$

すなわち n_i は m_1, \dots, m_r から m_i を除いたものの積であり, 仮定より m_i, n_i は互いに素である. このとき, n_1, \dots, n_r の最大公約数は 1 である. 実際, そうでないとする, $n_1 \equiv \cdots \equiv n_r \equiv 0 \pmod{p}$ をみたす素数 p が存在する. とくに $m_2 \cdots m_r = n_1 \equiv 0 \pmod{p}$ より, $m_j \equiv 0 \pmod{p}$ をみたす $2 \leq j \leq r$ がとれるが, これは m_j, n_j が互いに素であることに矛盾する. よって $\gcd(n_1, \dots, n_r) = 1$ が示され, 定理 3.4 より

$$n_1 t_1 + \cdots + n_r t_r = 1$$

をみたす $t_1, \dots, t_r \in \mathbb{Z}$ が存在する. このとき, n_i の定め方から, $1 \leq i, j \leq r$ に対して

$$n_i t_i \equiv \begin{cases} 1 & (i = j) \\ 0 & (i \neq j) \end{cases} \pmod{m_j}$$

であることがすぐにわかり, したがって $x = a_1 n_1 t_1 + \cdots + a_r n_r t_r$ が解を与える.

上記2つの証明は, 実際に解を求める計算法も与えている. 数学的帰納法による第1証明は, 合同式を2つずつ順々に解いていく方法, 第2証明はすべての合同式を同時に扱い, 解を一気に構成する方法である. 第3証明は次の節で与えることとし, ここではひとつの例題に対し, 第1および第2証明にそった解法をそれぞれ例示する.

例 7.2 次の連立合同式を解け.

$$\begin{cases} x \equiv 2 \pmod{3} \\ x \equiv 3 \pmod{5} \\ x \equiv 2 \pmod{7} \end{cases}$$

解1 まず第1の合同式から, 解は $2 + 3k$ の形をしている. これが第2の式をみたすから $2 + 3k \equiv 3 \pmod{5}$, これを解いて $k \equiv 2 \pmod{5}$ したがって $3k \equiv 6 \pmod{15}$ となるから, 第1, 第2の合同式はひとつの合同式 $x = 2 + 3k \equiv 8 \pmod{15}$ に帰着する. 次に, この解は $8 + 15l$ の形をしているから, 第3の合同式に当てはめ, $8 + 15l \equiv 2 \pmod{7}$ を解いて $l \equiv 1 \pmod{7}$, したがって 15 を掛けて $15l \equiv 15 \pmod{105}$. これから, 解 $x = 8 + 15l \equiv 23 \pmod{105}$ を得る.

解2 まず, $35t_1 + 21t_2 + 15t_3 = 1$ の形の式を見つけたい. そのために $5 \cdot (-1) + 3 \cdot 2 = 1$ と $7 \cdot (-2) + 15 = 1$ に注目して,

$$1 = 7 \cdot (-2) + 15 = 7 \cdot (-2) \cdot (5 \cdot (-1) + 3 \cdot 2) + 15 = 35 \cdot 2 + 21 \cdot (-4) + 15 \cdot 1,$$

すなわち $(t_1, t_2, t_3) = (2, -4, 1)$ が求まる. これを用いて, 解

$$x = 2 \cdot 35 \cdot 2 + 3 \cdot 21 \cdot (-4) + 2 \cdot 15 \cdot 1 = -82$$

を得る. $-82 \equiv 23 \pmod{105}$ より, 解1と同じ解が得られたことに注意せよ.

この例は3~5世紀頃書かれた中国の算術書【孫子算經】に載っていて、上にあげた解2と同趣旨の解法も与えられている。解2は各合同式を同等に扱い(つまり対称性があり)理論的にも優れていると思われるが、途中の計算の意味がとらえにくいのが欠点である。解1の方が計算しやすいと思うが、皆さんはどうか？

7.2 第3証明

定理7.1の第1および第2証明は、証明自体が解の計算法を与えていたが、以下に述べる第3証明からは直接に解を求める方法を見出すことができない。しかし、理論上はきわめて重要であり、その内容は今後の講義でもたびたび扱われるはずである。証明の根拠となるのは、有限集合 A, B の元の個数が同じとき、 A から B への写像は、単射ならば全射でもあるという事実である。

第3証明

$r = 2$ の場合を示せば、数学的帰納法によって一般の場合も示せるので、互いに素な $m, n \in \mathbf{N}$ と任意の $a, b \in \mathbf{Z}$ に対して

$$\begin{cases} x \equiv a \pmod{m} \\ x \equiv b \pmod{n} \end{cases}$$

の整数解の存在を証明することにする。いま、 $u \equiv v \pmod{mn}$ ならば、 $u \equiv v \pmod{m}$ かつ $u \equiv v \pmod{n}$ なので、二つの写像

$$\begin{aligned} \mathbf{Z}/mn\mathbf{Z} &\longrightarrow \mathbf{Z}/m\mathbf{Z}, & u + mn\mathbf{Z} &\mapsto u + m\mathbf{Z}, \\ \mathbf{Z}/mn\mathbf{Z} &\longrightarrow \mathbf{Z}/n\mathbf{Z}, & u + mn\mathbf{Z} &\mapsto u + n\mathbf{Z} \end{aligned}$$

を定めることができる。これらをあわせて剰余群の直積への写像

$$F : \mathbf{Z}/mn\mathbf{Z} \longrightarrow (\mathbf{Z}/m\mathbf{Z}) \times (\mathbf{Z}/n\mathbf{Z}), \quad u + mn\mathbf{Z} \mapsto (u + m\mathbf{Z}, u + n\mathbf{Z})$$

が定義できる。 F が単射であることを示そう。そのために、 $F(u + mn\mathbf{Z}) = F(v + mn\mathbf{Z})$ とすると、 $u + m\mathbf{Z} = v + m\mathbf{Z}$ かつ $u + n\mathbf{Z} = v + n\mathbf{Z}$ 。よって $u - v$ は m の倍数でもあり n の倍数でもある。ここで m, n は互いに素だから $u - v$ は mn の倍数、すなわち $u + mn\mathbf{Z} = v + mn\mathbf{Z}$ を得る。これで F が単射であることが示された。ところで、 $\mathbf{Z}/mn\mathbf{Z}$ の元の個数は mn であり、これは直積集合 $(\mathbf{Z}/m\mathbf{Z}) \times (\mathbf{Z}/n\mathbf{Z})$ の元の個数と等しい。したがって F は全射でもある。すなわち、任意の $a, b \in \mathbf{Z}$ に対して $F(x + mn\mathbf{Z}) = (a + m\mathbf{Z}, b + n\mathbf{Z})$ をみたす $x \in \mathbf{Z}$ が存在するが、これを書き換えると

$$x + m\mathbf{Z} = a + m\mathbf{Z} \quad \text{かつ} \quad x + n\mathbf{Z} = b + n\mathbf{Z}.$$

これらの等式は、 x がはじめの合同式の解であることを示している。

この証明によって, m, n が互いに素ならば, 自然な全単射

$$\mathbb{Z}/mn\mathbb{Z} \longrightarrow (\mathbb{Z}/m\mathbb{Z}) \times (\mathbb{Z}/n\mathbb{Z})$$

が存在することがわかる. さらに, 一般に m_1, \dots, m_r のどの2つも互いに素ならば, $M = m_1 \cdots m_r$ として, 自然な全単射

$$\mathbb{Z}/M\mathbb{Z} \longrightarrow (\mathbb{Z}/m_1\mathbb{Z}) \times \cdots \times (\mathbb{Z}/m_r\mathbb{Z})$$

が存在する. ここで“自然な”とは, 対応が $\bar{a} \mapsto (\bar{a}, \dots, \bar{a})$ によって与えられることを意味する. ただし, それぞれの \bar{a} は, 法 M および法 m_1, \dots, m_r に関する剰余類を考えるのである. さらに重要なことは, この全単射が“演算を保存する”ことだが, それについては次回, 詳しく述べる.

7.3 ひとつの応用例

中国の剰余定理には様々な応用がある. ここでは, 高次合同式への応用のひとつとして2次合同式

$$(1) \quad x^2 + 998x + 241 \equiv 0 \pmod{7560}.$$

の整数解を考えよう. 素朴に考えれば, x に $0, 1, 2, \dots, 7559$ を順に代入して行けばいつか解に到達する可能性があるが, これでは効率が悪いので別の方法を試みる. 法 7560 の素因数分解 $7560 = 2^3 \cdot 3^3 \cdot 5 \cdot 7$ に注目すれば, (1) が次の4つの合同式に帰着されることは簡単な計算からわかる.

$$(2) \quad \begin{cases} x^2 - 2x + 1 \equiv 0 \pmod{8} \\ x^2 - x - 2 \equiv 0 \pmod{27} \\ x^2 - 2x + 1 \equiv 0 \pmod{5} \\ x^2 - 3x + 3 \equiv 0 \pmod{7} \end{cases}$$

これらそれぞれについて (x に値を順に代入して) 解を見つけるのはそれほど大変ではない. 実際, それぞれ以下のような解が見つかる.

$$(3) \quad x \equiv 1 \pmod{8}, \quad x \equiv -1 \pmod{27}, \quad x \equiv 1 \pmod{5}, \quad x \equiv -1 \pmod{7}$$

中国の剰余定理を適用してこれらを連立させれば, $x \equiv 3401 \pmod{7560}$ が得られるが, これがもとの2次合同式 (1) の解になっている. 解の導出と確認は演習としよう.

さて, 以上の方法で (1) のひとつの解が求まったが, (2) の解は (3) 以外にもあることに注意しよう. たとえば 8 を法とする合同式には $x \equiv 5 \pmod{8}$ という解もありこれ以外にはない. 7 を法とする解もあとひとつだけ見つかる. 法 5 については他にはないが, 法 27 に関しては全部で 6 個の解をもつ. よって, (1) は 7560 を法として $2 \cdot 6 \cdot 1 \cdot 2 = 24$ 個の解をもつことがわかる. これらをすべて求めるのは無謀だからやめた方がいいってば!