

New relation for the coefficients of cyclotomic polynomials

Hajime Kaneko

Institute of Mathematics, University of Tsukuba
Research Core for Mathematical Sciences, University of Tsukuba

概要

本稿では、秋山茂樹氏との共同研究論文 [1] の内容について解説をする (証明は省略). 本研究において、円分多項式の係数に関する新しい種類の合同式が得られた. 円分多項式の係数に関する Lehmer の予想など、本研究の周辺の研究も含めて紹介する.

1 序論

正整数 n に対して、 n 次の円分多項式を

$$\Phi_n(x) = \prod_{\substack{0 < d < n \\ (d,n)=1}} \left(x - \exp\left(\frac{2\pi di}{n}\right) \right) \quad (1.1)$$

により記す. ただし $i = \sqrt{-1}$ である. 本稿では、円分多項式を $x = 0$ および $x = 1$ で Taylor 展開する際に現れる係数を調べる. 本節では、 $x = 0$ における展開について、知られている性質を紹介する. さて、

$$\Phi_n(x) = \sum_{m=0}^{\phi(n)} c(n; m) x^m$$

とおく. ただし、 ϕ は Euler の totient 関数である. $n \leq 104$ のとき、円分多項式 $\Phi_n(x)$ の係数 $c(n; m)$ には $-1, 0, 1$ しか現れない. ところが $n = 105$ のとき、 $c(105, 7) = -2$ が現れる. 鈴木 治郎氏 [17] は、任意の整数 a に対して、 $c(n; m) = a$ となる n, m が存在することを示した. また、 n を固定する. このとき、 $\Phi_n(x)$ の係数の最大絶対値

$$A_n := \max\{|c(n; m)| \mid 0 \leq m \leq \phi(n)\}$$

も研究されている. Erdős[5] は、ある正定数 C が存在して、以下が成立することを示した. 無限に多くの n に対して、

$$A_n > \exp\left(\exp\left(\frac{C \log n}{\log \log n}\right)\right). \quad (1.2)$$

さらに, Vaughan[18] は $C = \log 2$ に対して, (1.2) が成立することを示した. 一方, Bateman[2] は $n \rightarrow \infty$ のとき,

$$A_n < \exp \left(\exp(\log 2 + o(1)) \cdot \frac{\log n}{\log \log n} \right)$$

であることを示した. 特に, Vaughan の定数 $C = \log 2$ は最善である.

2 $x = 1$ における円分多項式の Taylor 展開

円分多項式 $\Phi_n(x)$ の $x = 1$ における Taylor 展開の係数を考察するための研究動機を述べる. 本瀬 香氏 [11, 12] は, $\Phi_n(x)$ が $x > 1$ において単調増加であることを証明しようと試みた. 単調増加性の証明は, 本瀬 香氏が和書 [19, 20] で述べている¹. ここでは, その証明を記載する.

命題 2.1. n を任意の正の整数とする. このとき, 任意の $j = 1, 2, \dots, \phi(n)$ に対して, $\Phi_n^{(j)}(1) > 0$ である. 特に, $\Phi_n(x)$ は $x > 1$ において単調増加である.

Proof. $\Phi_1(x) = x - 1$ および $\Phi_2(x) = x + 1$ に対しては, 命題が成立することを容易に確認できる. 以下, $n \geq 3$ とする. すると,

$$\begin{aligned} \Phi_n(x) &= \prod_{\substack{0 < d < n/2 \\ (d,n)=1}} \left(x - \exp \left(\frac{2\pi di}{n} \right) \right) \left(x - \exp \left(\frac{2\pi(n-d)i}{n} \right) \right) \\ &= \prod_{\substack{0 < d < n/2 \\ (d,n)=1}} \left(x^2 - 2 \cos \left(\frac{2\pi d}{n} \right) x + 1 \right) \end{aligned} \quad (2.1)$$

である. ここで, $-2 < b < 2$ を満たす任意の実数 b に対して,

$$(x+1)^2 + b(x+1) + 1 = x^2 + (b+2)x + b+2$$

の係数はすべて正であることに注意する. よって, 式 (2.1) の積を展開すると,

$$\Phi_n(x+1) = \sum_{j=0}^{\phi(n)} \frac{\Phi_n^{(j)}(1)}{j!} x^j$$

の係数はすべて正であることがわかる. よって, 命題が示された. □

円分多項式の微分 $\Phi_n^{(j)}(1)$ に関する明示公式は, 古くから研究されてきた. ただし, ここでは便宜上 $j = 0$ の場合も含めて考察する. 以降, 本稿では単純化のために $n \geq 3$ の場合のみを考える. Lebesgue[8] は,

$$\Phi_n(1) = \exp(\Lambda(n)) = \begin{cases} p & (n = p^e, p \text{ は素数}, e \text{ は正整数}), \\ 1 & (\text{otherwise}) \end{cases}$$

¹参考文献 [20] では, イギリスの人が証明を注意した, と記述されている.

であることを証明した. ただし, Λ は von Mangoldt 関数である. $j \geq 1$ のときには, Hölder[7](c.f. [3, Lemma 10]) が

$$\Phi'_n(1) = \frac{1}{2}\phi(n)\Phi_n(1)(> 0)$$

であることを証明した.

補足 2.2. $\Phi_n(x)$ の $[1, \infty)$ における単調増加性は, 実は $\Phi'_n(1) > 0$ から従う. 実際, Gauss-Lucas theorem より $\Phi'_n(z)$ の任意の零点は, $\Phi_n(z)$ の零点の凸閉包に属する. $n \geq 3$ および式 (1.1) より, $\Phi_n(z)$ は右半平面

$$\{z = a + bi \mid a \geq 1\}$$

上に零点を持たない. したがって, $\Phi'_n(z)$ は $[1, \infty)$ 上に零点を持たない. 特に, $\Phi'_n(1) > 0$ から $\Phi'_n(a) > 0$ が任意の実数 $a \geq 1$ に対して成立する.

$j \geq 2$ のとき, $\Phi_n^{(j)}(1)/\Phi_n(1)$ に対する明示式が Lehmer によって考察された. 証明には対数微分法が用いられる. j が小さいときの具体例に対して, 数値実験により観察される現象がある. この現象について秋山茂樹氏からセミナーで説明を受けたことが, 本研究の始まりである.

さて, Lehmer の明示式を紹介する準備のために, Jordan の totient 関数を導入する. $\mu(n)$ を Möbius 関数とする. このとき, 正整数 k に対して $J_k(n) = \sum_{d|n} \mu(n/d)d^k$ とおく. すると,

$$J_k(n) = n^k \prod_{p|n} \left(1 - \frac{1}{p^k}\right)$$

であることを注意する. ただし, p は n を割り切る素数を動くとする. 定義により $\phi(n) = J_1(n)$ である. よって Jordan の totient 関数は Euler の totient 関数の一般化である.

補足 2.3. Jordan は, $\mathbb{Z}/n\mathbb{Z}$ 上の一般線型群 $GL_k(\mathbb{Z}/n\mathbb{Z})$ における元の個数の明示公式に totient 関数を用いた. この公式は以下のように表される:

$$\text{Card} (GL_k(\mathbb{Z}/n\mathbb{Z})) = n^{k(k-1)/2} \prod_{j=1}^k J_j(n).$$

定理 2.4 (Lehmer[9]). $\ell \geq 2$ とする. $h = \lfloor (\ell + 1)/2 \rfloor$ とする. すると, 有理係数多項式 $F_\ell(Y, X_1, X_2, \dots, X_h)$ が存在して, 以下を満たす: 正整数 n が $\phi(n) \geq \ell$ を満たせば,

$$\frac{\Phi_n^{(\ell)}(1)}{\Phi_n(1)} = F_\ell(\phi(n), J_2(n), J_4(n), \dots, J_{2h}(n)).$$

定理 2.4 における多項式 F_ℓ が一意的に定まるかどうかは証明が与えられていない. 数論的関数 $\phi, J_2, J_4, \dots, J_{2h}$ の代数的独立性を証明できれば, 多項式 F_ℓ の一意性は保証できる. 以下, F_ℓ は Lehmer の証明により構成されたものを用いる.

さて、定理 2.4 の具体例を挙げる：

$$\begin{aligned}\frac{\Phi_n^{(2)}(1)}{\Phi_n(1)} &= \frac{J_2(n)}{12} + \frac{\phi(n)^2}{4} - \frac{\phi(n)}{2}, \\ \frac{\Phi_n^{(3)}(1)}{\Phi_n(1)} &= \frac{(\phi(n) - 2)(J_2(n) + \phi(n)(\phi(n) - 4))}{8}, \\ \frac{\Phi_n^{(4)}(1)}{\Phi_n(1)} &= \frac{1}{240} \left(30J_2(n)\phi(n)^2 - 180J_2(n)\phi(n) + 5J_2(n)^2 + 220J_2(n) - 2J_4(n) \right. \\ &\quad \left. + 15\phi(n)^4 - 180\phi(n)^3 + 660\phi(n)^2 - 720\phi(n) \right), \\ \frac{\Phi_n^{(5)}(1)}{\Phi_n(1)(\phi(n) - 4)} &= \frac{1}{96} \left(3\phi(n)^4 - 48\phi(n)^3 + 10J_2(n)\phi(n)^2 + 228\phi(n)^2 \right. \\ &\quad \left. - 80J_2(n)\phi(n) - 288\phi(n) + 5J_2(n)^2 + 100J_2(n) - 2J_4(n) \right).\end{aligned}$$

さて、 $\Phi_n^{(3)}(1)/\Phi_n(1)$ および $\Phi_n^{(5)}(1)/\Phi_n(1)$ がそれぞれ $\phi(n) - 2$ および $\phi(n) - 4$ で割り切れていることに着目する。この観察が、本稿の主結果である関係式と関連がある。

Lehmer は、Stirling 数や Bernoulli 数を用いて、定理 2.4 における多項式 $F_\ell(Y, X_1, X_2, \dots, X_h)$ 的具体的表示を与えた。また、[13, 6, 10, 14] が関連文献である。

改めて、

$$\Phi_n(x+1) =: \sum_{h=0}^{\phi(n)} b_n(h)x^h$$

とおく。ただし、 $b_n(h) = \Phi_n^{(h)}(1)/h! (\in \mathbb{Z})$ である。Lehmer[9] は定理 2.4 以外に、 $b_n(h)$ に関する命題を、証明なしで述べている。実数 R および正整数 ℓ に対して、

$$R^{[\ell]} := R(R-1)\cdots(R-\ell+1)$$

とおく。また、正整数 r に対して、 $t_r := J_r(n)/(2r)$ とおく。さらに、ベルヌーイ数 B_m ($m \geq 0$) を

$$\frac{te^t}{e^t - 1} = \sum_{n=0}^{\infty} B_n \frac{t^n}{n!}.$$

により定義する。このとき、Lehmer は

$$\frac{b_n(h)}{\Phi_n(1)} = t_1^{[h]} + 2 \sum_{\ell=1}^{\infty} B_{2\ell} \binom{h}{2\ell} (t_1 - \ell)^{[h-2\ell]} \Omega_\ell \quad (2.2)$$

であると主張した. ただし, Ω_ℓ については, 最初の数項

$$\begin{aligned}\Omega_1 &= t_2, \\ \Omega_2 &= t_4 - 5t_2^{[2]}, \\ \Omega_3 &= t_6 - 7t_4(t_2 - 1) + \frac{35}{3}t_2^{[3]} + \frac{14}{3}t_2, \\ \Omega_4 &= t_8 - \frac{20}{3}t_6(t_2 - 1) - \frac{7}{3}t_4^{[2]} + \frac{70}{3}t_4(t_2 - 1)^{[2]} \\ &\quad - \frac{175}{9}t_2^{[4]} + \frac{10}{3}t_6 - \frac{280}{9}t_2^{[2]} + \frac{290}{9}t_2\end{aligned}$$

が書かれているだけで, 具体的な定義は書かれていない.

さて, 式 (2.2) において, h が奇数 $2k + 1$ である場合を考える. 等式

$$\frac{b_n(2k+1)}{\Phi_n(1)} = t_1^{[2k+1]} + 2 \sum_{\ell=1}^k B_{2\ell} \binom{2k+1}{2\ell} (t_1 - \ell)^{[2k+1-2\ell]} \Omega_\ell$$

において, 右辺の有限和はそれぞれ $t_1 - k = J_1(n)/2 - k = (\phi(n) - 2k)/2$ で割り切ることができる. ここで, $2k + 1 - 2\ell$ は決して 0 にはならないことに注意する.

さて, 式 (2.2) が成立すると仮定する. さらに, Ω_ℓ が t_2 などの多項式で書けると仮定すれば, 以下の予想が成立する:

予想 2.5. k を非負整数とする. すると, 定理 2.4 における多項式 $F_{2k+1}(Y, X_1, X_2, \dots, X_h)$ は $Y - 2k$ で割り切れる. つまり, $\Phi_n^{(2k+1)}(1)/\Phi_n(1)$ を $\phi(n), J_2(n), J_4(n), \dots, J_{2h}(n)$ の多項式として表示するとき, その多項式は $\phi(n) - 2k$ で割り切ることができる.

次の節では, 多項式としての整除性ではなく, 整数として $\Phi_n^{(2k+1)}(1)/\Phi_n(1)$ が $\phi(n) - 2k$ で割り切れるかどうかを考察する. なお, 予想 2.5 を, 京都大学数理解析研究所の本研究会において紹介した. その後に松坂俊輝氏から, 予想を証明したとの報告を受けた.

3 主結果

次の定理は, 整数としての整除性に関する結果である.

定理 3.1. (i) $2\Phi_n'''(1)$ は $\phi(n) - 2$ で割り切れる. さらに, $\phi(n)$ が 4 で割り切れるならば, $\Phi_n'''(1)$ は $\phi(n) - 2$ で割り切れる.

(ii) $k \geq 2$ とする. すると, $\Phi_n^{(2k+1)}(1)$ は $\phi(n) - 2k$ で割り切れる.

具体的な k に対して, 例えば $k \leq 15$ の場合, 定理 3.1 の結果は直接証明できる. 定理 2.4 における多項式 F_{2k+1} を具体的に求めればよい. このとき, Jordan の totient 関数に関する合同式を用いる. この合同式は単独で興味深いために, 本稿で紹介する. $\lambda(m)$ を Carmichael の lambda 関数とする. つまり, $\mathbb{Z}/m\mathbb{Z}$ (c.f. [4, 13]) の単元群を $(\mathbb{Z}/m\mathbb{Z})^\times$ とすると,

$$\lambda(m) = \min\{h \geq 1 \mid \text{任意の } a \in (\mathbb{Z}/m\mathbb{Z})^\times \text{ に対し, } a^h = 1\}$$

により定義される. なお, $\lambda(m)$ の具体的な値は, 以下に述べる方法により具体的に計算をすることができる. m の素因数分解を $m = p_1^{e_1} p_2^{e_2} \cdots p_r^{e_r}$ とする. ただし, p_1, p_2, \dots, p_r は互いに異なる素数であり, e_1, e_2, \dots, e_r は正整数とする. すると, 中国剰余定理より,

$$\lambda(m) = \text{lcm}(\lambda(p_1^{e_1}), \lambda(p_2^{e_2}), \dots, \lambda(p_r^{e_r}))$$

である. ただし, lcm は最小公倍数を表す. さて, p を奇素数とすると, 任意の正整数 e に対して $(\mathbb{Z}/p^e\mathbb{Z})^\times$ は巡回群である. よって $\lambda(p^e) = \phi(p^e)$ である. 一方, e が 2 以上の整数のとき,

$$(\mathbb{Z}/2^e\mathbb{Z})^\times \simeq \mathbb{Z}/2\mathbb{Z} \oplus \mathbb{Z}/2^{e-2}\mathbb{Z}$$

である. 特に,

$$\lambda(2^e) = \begin{cases} 1 & e = 1, \\ 2 & e = 2, \\ 2^{e-2} & e \geq 3 \end{cases}$$

が成立する.

命題 3.2. $k \geq 3$ とし, $n \geq k + 2$ とする. すると,

$$J_k(n) \equiv 0 \pmod{\prod_{\lambda(p^e) \parallel k} p^e} \quad (3.1)$$

が成立する. 一方, $M > \prod_{\lambda(p^e) \parallel k} p^e$ をみたす整数 M と正整数 n_0 を任意に選ぶ. すると, $n \geq n_0$ となる整数 n で, 以下を満たすものが存在する:

$$J_k(n) \not\equiv 0 \pmod{M}.$$

上記の意味で, 合同式 (3.1) は最善である.

例えば, $k = 1$ のときを考察する. $n \geq 3$ のとき, 合同式 (3.1) は

$$J_1(n) = \phi(n) \equiv 0 \pmod{2}$$

という有名な関係式を表す. さらなる具体例を表すため, $\prod_{\lambda(p^e) \parallel k} p^e$ の表を以下に記載する. なお, [16] も参照.

| k | 奇数 | 2 | 4 | 6 | 8 | 10 | 12 | 14 | 16 | 18 | 20 |
|--|----|----|-----|-----|-----|-----|-------|----|-------|-------|-------|
| $\prod_{\lambda(p^e) \parallel k} p^e$ | 2 | 24 | 240 | 504 | 480 | 264 | 65520 | 24 | 16320 | 28728 | 13200 |

一般の k に対する定理 3.1 は, 円分多項式の係数に関する関係式から導かれる. まず, $n \geq 3$ のとき, $\Phi_n(x)$ は (偶数次数の) 自己相反多項式であることに注意する. すなわち, $x^{\phi(n)}\Phi_n(x^{-1}) = \Phi_n(x)$ である. よって, $y = x + x^{-1}$ とおくと, ある $g(y) \in \mathbb{Z}[y]$ が存在して, $\Phi_n(x) = x^{\phi(n)/2}g(y)$ が成立する. さて,

$$\Phi_n(x+1) =: \sum_{h=0}^{\phi(n)} b(h)x^h, \quad g(y+2) =: \sum_{\ell=0}^{\phi(n)/2} a(\ell)y^\ell$$

とおく. すると, 以下が成立する:

命題 3.3. $0 \leq h \leq \phi(n)$ を満たす任意の h に対して,

$$b(h) = \sum_{\ell=0}^{\lfloor h/2 \rfloor} \binom{\phi(n)/2 - \ell}{h - 2\ell} a(\ell) \quad (3.2)$$

が成立する.

ζ_n を 1 の原始 n 乗根の一つとする. 命題 3.3 は, $\zeta_n + \zeta_n^{-1} - 2$ の最小多項式の係数を用いて $\Phi_n^{(h)}(1)$ を表示したものである. なお, 式 (3.2) における 2 項係数を調べることにより, 定理 3.1 は証明することができる. 実は, 円分多項式のみならず, 一般の自己相反多項式に対して定理 3.1 および命題 3.3 の一般化が成立するので, 次節で紹介する.

補足 3.4. h が奇数 $2k+1$ ($k \geq 2$) のとき, (3.2) の 2 項係数における $h - 2\ell = 2k+1 - 2\ell$ は決して 0 にはならない. このことにより, $\Phi_n^{(2k+1)}(1)$ は $\phi(n) - 2k$ で割り切れる. 一方, h が偶数のとき, $h - 2\ell = 0$ となる場合があるため, 整除関係が成立しない.

4 自己相反多項式の係数の関係式

論文 [1] の投稿時点では, 組み合わせ論を用いた少し複雑な議論により, 命題 3.3 を証明していた. レフェリーコメントをもとに, 一般の自己相反多項式に対する関係式に発展させることができた. このことにより, 関係式がより鮮明となった. その結果, 秋山茂樹氏が現在のシンプルな証明を思いつくに至った.

さて, $f(x) \in \mathbb{Z}[x]$ を次数が偶数 $2q$ ($q \geq 2$) の自己相反多項式とする. すると, $x^{2q}f(x^{-1}) = f(x)$ である. また, $y = x + x^{-1}$ とおくと, ある $g(y) \in \mathbb{Z}[y]$ が存在して, $f(x) = x^q g(y)$ が成立する. さて,

$$f(x+1) =: \sum_{h=0}^{2q} \beta(h)x^h, \quad g(y+2) =: \sum_{\ell=0}^q \alpha(\ell)y^\ell$$

とおく. ただし, $\beta(2q) = \alpha(q)$ である. すると, 以下が成立する:

命題 4.1. $0 \leq h \leq 2q$ を満たす任意の h に対して,

$$\beta(h) = \sum_{\ell=0}^{\lfloor h/2 \rfloor} \binom{q - \ell}{h - 2\ell} \alpha(\ell) \quad (4.1)$$

が成立する.

命題 4.1 において 2 項係数を注意深く調べると, 以下の関係式を導くことができる:

命題 4.2. (i) $2f'''(1)$ は $2q - 2$ で割り切れる. さらに, q が偶数ならば, $f'''(1)$ は $2q - 2$ で割り切れる.

(ii) $k \geq 2$ とする. すると, $f^{(2k+1)}(1)$ は $2q - 2k$ で割り切れる.

補足 4.3. 命題と同様の手法が, [15] の Proposition 2 において渋川 元樹氏により導入されている. また, [15] では超幾何関数の応用により, 更なる関係式が導き出されている.

謝辞

Pieter Moree 氏と Michel Marcus 氏に、貴重なコメントおよび参考文献についてお知らせいただき、感謝申し上げます。渋川 元樹氏には、和書 [19, 20] に関する貴重な情報等のご提供、感謝申し上げます。本研究は JSPS 科研費 (19K03439) の助成を受けたものです。

参考文献

- [1] S. Akiyama, H. Kaneko, Curious congruences for cyclotomic polynomials, Res. Number Theory **8** (2022), no. 4, Paper No. 102, 10 pp.
- [2] P. T. Bateman, Note on the coefficients of the cyclotomic polynomial, Bull. Amer. Math. Soc. **55** (1949), 1180–1181.
- [3] B. Bzdęga, A. Herrera-Poyatos, P. Moree, Cyclotomic polynomials at roots of unity. Acta Arith. **184** (2018), no. 3, 215–230.
- [4] R. D. Carmichael, Note on a new number theory function. Bull. Amer. Math. Soc. **16** (1910), no. 5, 232–238.
- [5] P. Erdős, On the coefficients of the cyclotomic polynomial, Portugal. Math. **8** (1949), 63–71.
- [6] A. Herrera-Poyatos, P. Moree, Coefficients and higher order derivatives of cyclotomic polynomials: Old and new. Expo. Math. **39** (2021), no. 3, 309–343.
- [7] O. Hölder, Zur theorie der Kreisteilungsgleichung $k_m(x) = 0$, Prace Mat. Fiz **43** (1936), 13–23.
- [8] V.-A. Lebesgue, Démonstration de l'irréductibilité de l'équation aux racines primitives de l'unité, Journal de mathématiques pures et appliquées 2 e série, tome 4 (1859), p. 105–110.
- [9] D. H. Lehmer, Some properties of the cyclotomic polynomial. J. Math. Anal. Appl. **15** (1966), 105–117.
- [10] P. Moree, S. S. Eddin, A. Sedunova, Y. Suzuki, Jordan totient quotients, J. Number Th. **209** (2020), 147–166.
- [11] K. Motose, On values of cyclotomic polynomials. VII. Bull. Fac. Sci. Technol. Hirosaki Univ. **7** (2004), no. 1, 1–8.
- [12] K. Motose, Ramanujan's sums and cyclotomic polynomials. Math. J. Okayama Univ. **47** (2005), 65–74.

- [13] J. Sándor, B. Crstici, Handbook of number theory. II. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 2004.
- [14] C. Sanna, A survey on coefficients of cyclotomic polynomials, Expo. Math. **40** (2022), no. 3, 469–494.
- [15] G. Shibukawa, New identities for some symmetric polynomials, and a higher order analogue of the Fibonacci and Lucas numbers, Fibonacci Quart. **58** (2020), no. 5, 200–221.
- [16] N.J.A. Sloane, Entry A079612 in The On-Line Encyclopedia of Integer Sequences, OEIS Foundation Inc. (2022), <http://oeis.org/A079612>
- [17] J. Suzuki, On coefficients of cyclotomic polynomials, Proc. Japan Acad. Ser. A Math. Sci. **63** (1987), no. 7, 279–280.
- [18] R. C. Vaughan, Bounds for the coefficients of cyclotomic polynomials, Michigan Math. J. **21** (1974), 289–295 (1975).
- [19] 本瀬 香, 円分多項式・有限群の指標, 弘前大学出版会, 2006 年.
- [20] 本瀬 香, 三角形の独り言, 弘前大学出版会, 2017 年.