

第3章では、パーティクル状汚染による電流リーク欠陥の発生機構と、それを制御するための基板洗浄技術について報告した。従来、パーティクル状汚染によって陽極と陰極が短絡することが、電流リーク欠陥の原因であると考えられてきた。しかしながら、電極間短絡が発生しなくても、パーティクルの存在によって有機層が局部的に薄膜化することにより電流リークが起り得ることが明らかとなった。陰極バッファ層 Li₂O の微小なパーティクル（直径 0.03・0.05 μm）は、電界集中が原因と見られる電流リークを引き起こした。私の知る限り、陰極バッファ層のパーティクルが電流リークの原因と成り得ること指摘した報告は過去にはない。後半では、各種の基板洗浄技術とそれによるパーティクル除去効果および電流リーク欠陥の抑制効果についてまとめた。直径 1 μm 以上、5 μm 未満のパーティクルは、洗浄による除去が困難であり、かつ電流リーク欠陥を引き起す確率も高いため、このサイズのパーティクル状汚染の制御が有機 EL 製造工程にとって重要であることを明らかにした。さらに、従来あまり注目されてこなかった、サブミクロンパーティクルの影響についても調査した。高い逆バイアスが印加された場合に、これらのサブミクロンパーティクルが電流リークの原因と成り得ること、およびそれらの制御には EC 水を用いた洗浄が有効であることを明らかにした。

第4章では、典型的な正孔輸送材料である TPD を用いて、蒸着膜の結晶・凝集化過程と、その有機 EL 素子特性への影響をまとめた。成膜直後の膜は回転楕円体型の独立なグレインから成り、グレイン単位で結晶化が進行することが明らかとなった。結晶化したグレインはクラスターを形成した。クラスターのサイズは加熱により増大したが、個々の結晶化グレインのサイズは変化しないことも分かった。さらに、結晶化の進行に伴って、膜の一部に凝集が発生し、膜に大きなモルフォロジー変化が生じた。従来、蒸着膜の結晶化と凝集化という概念は混同されて用いられてきた。今回の研究により、グレイン単位で進行する結晶化と、結晶化したグレイン同士の凝集とは異なる現象であることが明らかとなった。加熱により結晶化が進行した有機 EL 素子では、I-V 特性の劣化（電圧上昇）が認められた。結晶・凝集化に伴って生じた膜の空隙がキャリア伝導を妨げたことが原因だと思われる。

このように本研究では有機 EL 素子の劣化機構と劣化を制御するための製造技術上の課題について基礎的な検討を行い、有機 EL の量産過程において発生すると予想される幾つかの問題を解決することができた。これまで有機 EL の製造技術上の諸問題を包括的に整理した報告はほとんど見られず、本研究は基礎、応用のいずれからも興味深く重要である。

以上のことから、本論文は博士（工学）の学位論文に値すると認めた。

氏 名	わん 王 にやん りやん 念 良
学位の種類	博 士（工学）
学位記番号	産 第 3 4 号
学位授与の日付	平 成 23 年 3 月 22 日
学位授与の要件	学位規程第4条第2項該当
学位論文題目	Fourier analysis in number theory (整数論におけるフーリエ解析)
論文審査委員（主 査）	教 授 金 光 滋
	（副主査） 教 授 塚 田 春 雄
	（副主査） 教 授 中 野 吉 正

論文内容の要旨

整数論, 特に解析的手法を用いて整数の性質を研究する「解析的整数論」においては, 複素関数論を主なツールとして, 素数分布, 加法数論, 乗法的数論, 超越数論等に多くの重要な結果が得られてきた. 20 世紀のフィールズ賞受賞者, ベイカー, ロス, ボンピエリの業績は主に複素関数論に節方等を援用したものであった. 一方, 保型形式論においては, 定義自身がフーリエ展開であることから分るように, フーリエ解析が重要な役割を果たす.

本論文ではこの点に鑑みて, リーマン・ディリクレが重要な貢献をしたフーリエ解析と創始者ディリクレの用いたディリクレ級数をミックスして, リーマンの遺稿の中身を完全解明した.

さらに, ディリクレは, その類数公式—ディリクレ L -関数の $s=1$ における値 $L(1, \chi)$ を 2 次体の類数 (分数イデアル全体における単項イデアルの群指数) に結び付けるもの—によって, 等差数列における素数定理を証明し, さらに発展して, 類数の計算を実行するために, $L(1, \chi)$ を短区間 (ディリクレ) 指標和で表した. ここで, χ は法 $q > 1$ の既約剰余類群 $(\mathbf{Z}/q\mathbf{Z})^\times$ の群指標を 0-拡張によって, 整数全体で定義したものである. フル指標和は (主指標を除き) 0 である. ディリクレの時代は計算機がなかったため, 類数の計算を簡易化するために短区間の指標和で表すことを試みたと思われる. 最初のモチベーションは, 有限値の類数を無限和 $L(1, \chi)$ で表すのは自然でないと考え, 有限和 (その際既に $\frac{1}{2}$ -和が現れている) で表示する問題を第 2 段階として考えたものである. その後, 数値計算という観点を離れて, 短区間 (重み付き) 指標和自身が興味深い研究対象であることが判明し, 多くの研究がなされた—パートが 70 年代にそれまでの結果をまとめ, 最後に山本氏によってある意味で完成された. 山本氏の方法は, 短区間重み付き指標和をフーリエ解析によって, $L(1, \chi)$ (の 1 次結合) と関連させる方法であるが, 指標が原始的なものに限られている. 本論文では, それを一般指標の場合にまで一層発展精密化し, 多くの結果を得た. その結果は第 3, 4 章にまとめてある.

以下章ごとに結果を略述する.

第 1 章は, 交代和をディリクレ級数にしたものを例として, 本論文の紹介, さらにフルウィッツゼータ関数その対である多重対数関数の導入等をおこなった.

第 2 章が本論文の白眉であり, Ramanujan J. 誌に掲載された de Reyna の 70 ページに喃喃とする冗長な論文を, 一般「ディリクレ—アーベル」型定理を新たに証明し, それを用いて, デデキンドの精神を継いでリーマンの遺稿の完全解決をしたものである. ここで, リーマンの遺稿は, いわゆるデデキンドのイータ関数の上半平面から実軸上へ近づいたときの虚部の極限を計算するものであり, リーマンは遺稿 II に多くの公式を記載したまま死去した. その遺稿の整理を託されたデデキンドがイータ関数を導入することによって, 公式を導出してはいたが, 完璧なものではなかった. そこに上述の de Reyna がすべての公式を解明したものの, 一つ一つをアドホックに処理している. そのアドホックな冗長性を「ディリクレ—アーベル」型定理によって一掃し, すべての公式を解明するのみならず, 関数等式に対応する擬モジュラー関係式まで求めた. デデキンドイータ関数は, $1/2$ -次元の保型形式であり, 半整数ウエイトの保型形式の一般論の重要な例である.

一般「ディリクレ—アーベル」型定理の特殊型は次のように述べられる. $R_n(x)$ が法 q に関する n および, $0 \leq x \leq 1$ で定義されており, $\sum_{n=1}^q R_n(x) = 0$ がなりたつとき, ディリクレ級数 $F(s, x) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{R_n(x)}{n^s}$, $\text{Re } s > 1$ を考える. $R_n(x)$ が $x=1$ で連続のとき, $F(s, x)$ もそうであり, 極限值が $F(1, 1) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{R_n(1)}{n} = \sum_{k=1}^q \hat{R}_k(1) \ell_k \left(\frac{k}{q} \right)$ のように計算される. ここで, $\ell_k(x)$ は 1 次の多重対数関数で, その虚部が 1 次のベルヌーイ多項式であり, 虚部は $x=1$ で連続であるが, 実部であるクラウゼン関数はそうでない. また, ハットは, 有限 (離散) フーリエ級数を表す.

第3章は第4章のある意味で更なる発展版で、これまで未知であった、ディリクレ L -関数の関数等式に同値なモジュラー関係式の顕現として新しい公式を導出した。とくに原始的とは限らないディリクレ指標を係数とするエル関数 $\Gamma(s, \chi)$ に関する結果も導出した。

第4章は山本理論を用いてオイラー数と $L(1, \chi)$ の関係を求め、これまで得られていた1923年～2007年にわたる一無数の合同式の本質的な一般化を行った。とくに、オイラー数が、ガウスの数体に対応する一般ベルヌーイ数であることも明確化した。それによって、一般オイラー数に対する既知・未知の合同式を求めると共に、その由来をも明らかにした。

第5章では、一般オイラー数等の生成関数に対する興味深い公式を述べた。

本論文はディリクレ級数を初めとする解析的方法と有限・無限のフーリエ解析を巧妙にミックスし、解析的数論研究に新しい局面を開いたものである。

論文の主題は、数論にフーリエ解析を応用して、新しい包括的な公式を導き、その応用として、保型型式の極限、オイラー数等に関する合同式等を研究するものである。解析的整数論の手法はこれまで、ディリクレ級数を用いる複素関数論に大幅に依存した研究が多かった。

しかし、解析的整数論の創始者と目されるディリクレはフーリエ級数論に関しても基本的な業績を残しており、複素関数論+フーリエ級数論を応用するのが自然であったと思われる。ディリクレの最大の業績の一つである、類数公式は、(2次)体の類数(一意分解環からの離脱度を表す)をディリクレの L -関数の1における値 $L(1, \chi)$ (の積)で表すものである。しかし、 $L(1, \chi)$ は無級数であり、類数は有限値であるから、 $L(1, \chi)$ を有限型に表すことは非常に自然かつ重要な問題である。当時はコンピュータが存在していなかったため、数値計算のためにも必要であった。この有限表示問題から自然に派生した問題に短区間のディリクレ指標和の表示問題がある。たとえば、 $\frac{1}{4}$ -区間の指標和ですら既に非常に興味深いものであり、ディリクレ以来、連綿と現在まで研究されてきている。とくに70年代にパートがかなり包括的な公式群を求めているが、方法がアドホックなものであり、公式群に載っていないものには直接には使えないものであった。パートと前後して、山本芳彦氏が原始指標の場合のフーリエ級数に基づく一般論を完成させた。ディリクレの L -関数は、原始指標の場合に最も自然な形の関数等式を満たす等好都合なことが多いため文献では専らその場合しか取り扱われていない。しかし、指標全体で初めて詳構造を用いることができるであり、橋本・金光・戸田論文(日本数学会誌)では、この事実が本質的に用いられている。

著者はこの事情に鑑みて、ディリクレの伝統に戻り、一般指標の短区間指標和の問題をとりあげ、山本氏の理論を一般指標の場合にある程度一般化して指標群の構造を用いることができるような形にした。それにより、アメリカ数学会のプロシーディングズに掲載予定の論文[3章]の結果が得られた。そこではさらに、リーマン・ヘッケ・ボナー対応として、関数等式に同値なランベール級数が求められ、研究されている。

それに先立ち、J. Number Theory 誌に掲載された論文[4章]で、一般オイラー数の合同式を集大成している。また、[5章]では、生成関数も用いて、一般オイラー数に対する合同式を研究している。これらの場合、基本的な素材は、法 q の剰余群 $\mathbf{Z}/q\mathbf{Z}$ の乗法群 $(\mathbf{Z}/q\mathbf{Z})^\times$ としての構造を表現するディリクレ指標の短区間和である。

本学位論文の主論文は、単著論文[2章]で、ラムヌジャン ジャーナルに掲載予定の20ページ程のものである。この論文の底流を流れるアイデアは、法 q の剰余群 $\mathbf{Z}/q\mathbf{Z}$ の加法群としての性質を反映する加法指標—指数関数、その短区間和の処理である。この論文では、それに先立つ同誌掲載の de Reyna の70ページに喃喃とする冗長な論文のアドホックな議論を、新たに著者が導出したディリクレ・アーベル定理によって統一かつ大幅に簡易化・明瞭化し、デデキンドのイータ関数の理論を用いて、問題のランベール級数の極限值がすべて closed な形に計算できることを示している。その際に核となるのは、ガウスのディガンマによる表示であり、ガウス・ディリクレ・リーマンの枠組みを継承するものとなっている。さらに、de Reyna はリーマンの遺構論文のデデキンドの編集方針を痛烈に批判しているが、実はデデキンドの編集方法が正しく、ディリクレ・アーベル定理が欠けていたに過ぎないことも明らかにしている。デデキンドイータ関数は半整数ウェイトの保型式の重要な例であり、今後の展開も期待される。

上述の通り、著者は、法 q の剰余群の乗法群としての問題の研究から自然に加法群としての問題に至り、フーリエ解析を自在に数論的問題に応用できる力量を示し、耳目を集める重要な包括的な定理・公式を得た。博士（工学）の学位に相当する結果を導いたと評価できる。

氏 名	原 田 克 彦 <small>はら だ かつ ひこ</small>
学位の種類	博 士（工学）
学位記番号	産 第 3 5 号
学位授与の日付	平 成 2 3 年 3 月 2 2 日
学位授与の要件	学位規程第4条第2項該当
学位論文題目	EDLC を適用した単相正弦波複合 PWM 電圧形インバータによる系統連系太陽光発電システムに関する研究 (UTILITY INTERACTIVE PHOTOVOLTAIC POWER GENERATION SYSTEM WITH THE SINGLE-PHASE SINUSOIDAL COMPOSITE PWM VOLTAGE SOURCE INVERTER APPLIED EDLC)
論文審査委員（主査）	教授 江 崎 秀
	（副主査） 教授 角 藤 亮
	（副主査） 教授 園 田 敏 勝