ISSN 0919-8253





ジャイロミル型風車の起動性能向上に関する研究(翼取付角の影響) 	3
ジャイロミル型風車の翼ピッチコントロールによる 起動性能向上に関する研究平野孝典、藤本一郎	9
2次元非対称クーロン系のコステリッツ=サウレス相転移 	15
トウモロコシ冠根形成について 	23
フォトダイオード・センサーによる多波長大気光観測 	29
衛星観測による南大西洋磁気異常帯の高エネルギー電子降下の長期変動と 地上IRIS観測による電離層CNA現象の検証 	35
磁気異常帯域における大気電場計観測 	55
長町信音、Paulo Fagunde, Emilia Correia, Washington Lima Julio Cesar Gianibeli, Ricardo Monreal, Nelson Jorge Schuch	49
高分子光ファイバの干渉計型センサとひずみ測定への応用	59
Evaluation of Adhesive Joint Strength by using Discoloration Value of Epoxy R	esin
	67
Texture Evaluation for Various Resins Subjected to Shot Blasting Process 	69
根菜類育生のための新しい水耕栽培システムの提案森きよみ	71
水耕と人工培地によるイモ類の屋内制御型栽培法における水環境制御 森きよみ、前山利幸、大黒篤	73
根菜類生産のための植物工場に関する基礎的研究 一光源とマイクロバブルの影響	75
波形単板コアパネルによる軽量家具のデザイン 	77
リズム感を演出したトンネル壁面のパターンデザイン 永見豊、千保広覚	79
触覚と聴覚を用いた視覚障害者のための図形パターン 伝達支援システムに関する研究杉本雅彦	83
	87

論文 FULL PAPERS

ジャイロミル型風車の起動性能向上に関する研究(翼取付角の影響)平野孝典 藤本一郎	3
ジャイロミル型風車の翼ピッチコントロールによる起動性能向上に関する研究平野孝典 藤本一郎	9
2次元非対称クーロン系のコステリッツ=サウレス相転移 鈴木康夫 Henri Orland	15
トウモロコシ冠根形成について 仁木輝緒 斉藤進 森きよみ ダニエル K, グラデッシュ	23
フォトダイオード・センサーによる多波長大気光観測巻田和男 高野元春 星野光男 加藤泰男 野澤宏大	29
衛星観測による南大西洋磁気異常帯の高エネルギー電子降下の長期変動と地上IRIS 観測による電離層 CNA 現象の検証 	35
磁気異常帯域における大気電場計観測	
卷田和男 星野光男 加藤泰男 野澤宏大 大川隆志 源泰拓 長町信吾 Paulo Fagunde	
Emilia Correia Washington Lima Julio Cesar Gianibeli Ricardo Monreal Nelson Jorge Schuch	49
高分子光ファイバの干渉計型センサとひずみ測定への応用	59

ジャイロミル型風車の起動性能向上に関する研究(翼取付角の影響)* Study on Starting Performance Improvement of Gyromill Wind Turbines (Effect of the Setting Angle of Blades)

平野 孝典 Takanori HIRANO** 藤本 一郎 Ichiro FUJIMOTO***

Abstract

For the purpose of improvement in startup performance of gyromill wind turbine, an experimental survey has been performed. A rotating torque was measured for a four-blade wind turbine model with considering the variation of rotating speed ratio and setting angle of blade. Furthermore, the same experiment was performed for one-blade model to compare the difference of the aerodynamic characteristics. The result shows that it is effective to set the setting angle of blades with large minus angle because the drag force is large in startup.

Keywords: Gyromill Wind Turbine, Unsteady Aerodynamics

1. はじめに

21世紀に入り地球環境問題が顕著化し、中でも化石燃料の 枯渇や地球温暖化は重大な問題となっている。このような情 勢の中、ヨーロッパ諸国やアメリカでは自然エネルギを利用 した風力発電の利用が進められている。また、中国を始めと するアジア諸国の経済は急成長しており、今後エネルギ需要 はさらに急増していく見通しである。しかし、電力供給源と して未だに化石燃料への依存率が高く、地球環境問題に対応 できていないのが現状である¹⁾。さらに、今回の地震と津波 による原子力発電所の極めて重大な事故により、今後の原子 力発電は中止される方向にある。そのため自然エネルギを利 用した発電がクローズアップされている。自然エネルギを利 用した風力発電は、環境負荷の低減による環境問題等の改善 や電力確保に有効な手段の一つであり、将来的に有望な発電 手段であると考えられる。

これまでに著者らは、低出力ではあるが高効率で設置箇所 に制約の少ないジャイロミル型風車(垂直軸揚力型風車)に ついて、単独翼の静的空力特性を基にして4枚翼風車の起動 特性を解析し、切欠き翼の効果や、翼の取付角と風車の起動 性能との関係について実験的解析を行い、特に翼の取付角が 回転始動時の性能向上に大きな影響を及ぼすことを明らかに した²⁾。また、渦法による数値シミュレーションの結果が、風 車起動時の空力特性と定性的に一致することを報告した³⁾。さ らに、単独翼の静的実験データ²⁾を用いて準静的な4枚翼風 車の回転時の空力性能を解析し、周速比と最適取付角の関係 について報告した⁴⁾。

本報では、4枚翼風車モデルを用いた風車回転時のトルク 計測により得られた周速比と最適取付角の関係および1枚翼 実験の解析結果との比較による翼干渉について得られた知見 について報告する。

2. 実験装置、実験方法及び解析方法

2.1 実験装置及び実験方法

実験装置概略図をFig.1に示す。本実験装置は回流式低速 風洞の吹出し口に設置されている。吹出し口寸法は幅1200mm ×高さ200mmである。吹出し口中央に風車模型を設置した。 DCサーボモータでフライホイールを定速回転させ、フライ ホイール軸と接続した風車模型を回転させる構造とした。回 転数は安定化電源を用いて制御し、デジタル回転速度計に表 示させる。風車方位角(基準翼が主流に対して90°の位置を 方位角0°とし、風車回転方向を正とする)はDCサーボモー タに内蔵されたロータリーエンコーダとTKIFビデオカメラ コントローラを用いて設定を行い、自動計測プログラムを用 いて任意の方位角で測定を行う。翼取付角は $\beta = -60^\circ - 20^\circ$ の 範囲で20°刻みとした。風車モデル下部に取り付けた回転型 トルクセンサ(タカス技研製)を用いて回転中の軸トルク変 動を測定し、その出力電圧をA/D変換ボードを介してパソコ ンに取り込む。

風車モデルは円周上に翼を4枚取り付けた4枚翼モデルと、 円周上に1枚のみを取り付けた1枚翼モデルの2種類を使用 する。また、1枚翼モデルで得られた結果をもとに4枚翼風車 の非定常モーメントを擬似的に求め、4枚翼モデルの結果と 比較することにより、4枚翼風車の非定常空力特性を解析する。



Fig. 1 Test Equipment

^{*} 原稿受付 平成 25 年 11 月 12 日

^{**} 工学部機械システム工学科

^{***} 工学部機械システム工学科

2.2 供試翼

供試翼として、実機風車で使用されているNACA2415型翼 を使用した。材質は真鍮で、翼弦長は30mm、翼幅は139.3mm である。Fig. 2に供試翼断面図を示す。また、Fig. 3に翼の取 り付け位置と本報で使用する記号の定義を示す。

2.3 計測プログラム

Visual Basic 6.0 で作成した自動計測プログラムを使用して 測定を行った。TKIFビデオカメラコントローラから出力さ れるパルスを計測クロックに設定し、アンプ内蔵角型近接セ ンサ(パナソニック電工SUNX株式会社製GX-H12A)を風車 方位角原点に取り付け、センサの出力パルスを計測開始トリ ガとして用いた。

2.4 実験条件

実験条件をTable 1に示す。翼取付角 β は- $60^{\circ} \sim 20^{\circ}$ の範囲 を 20° 刻みとした。また周速比(周速/主流速度) λ は、回 転開始後の低回転数時に相当する範囲とした。





Fig. 3 Schematic of wind turbine

Table 1 Test Condition

主流風速 U_{∞}	10 [m/s]
取付角 β	20~-60 [deg]
	20 [deg] 刻み
周速比 λ	0.02~0.06
	0.02刻み
レイノルズ数 Re	2.2×10^{4}

2.5 トルク係数C₇

トルク係数 C_T は、風車の回転軸トルク測定で得られたトル クTを、翼枚数n、主流風速 U_∞ 、空気密度 ρ 、翼の代表面積 S、風車半径rで無次元化した、翼1枚当たりのトルクを示す 値で、式(1)で与えられる。

$$C_{\rm T} = \frac{\rm T}{n\frac{1}{2}\rho U_{\infty}^2 S \rm r} \quad \cdots (1)$$

2.6 回転エネルギ係数*C_E*

回転エネルギ係数 C_E は、翼が方位角 θ に対して一周回転したときにトルクのなす仕事を無次元化した値であり、式(2)で与えられる。

$$C_E = \left(\frac{1}{2\pi}\right) \int_0^{2\pi} C_T \cdot d\theta \quad \cdots (2)$$

3. 結果及び考察

3.1 4枚翼モデル

Fig. 4~Fig. 6 に周速比 $\lambda = 0.02 \sim 0.06$ におけるトルク係数 の方位角 θ に対する変化を、取付角 β をパラメータとして示 す。また、Fig. 7 に $\beta = -60^{\circ}$ における相対迎角の変化を示す。 これらの図から、全ての周速比で $\beta = -60^{\circ}$ が C_{τ} の変動振幅は







Fig. 5 Torque Coefficient ($\lambda = 0.04$)



最大となっており、さらにC_rの値も最大となることが分か る。例えばFig. 6の λ = 0.06、 β = -60°では、最初の C_{τ} のピー クは一番翼が θ = 32.4°にある時である。この時2番翼から4 番翼の相対迎角は、このθを基点にθが90°、180°及び270°変 化した方位角の相対迎角となる。Fig. 7から1番翼から4番翼 までの各翼の相対迎角を求めると、各々 α =-90°、-180°、90°、 0°となり、1番翼と3番翼では翼背面の流れは完全に剥離して 大きな抗力が作用することになり、これが回転力に寄与して 大きな*C*_Tが生じたと考えられる。

次に、Fig. 6の β = -60°と β = -20°では、翼の取付角を β = -60°に設置した方が高いC_rを得ている。このときの翼の位置 関係を考えてみると、風車接線方向と主流のなす角は、β= -60°では角度が小さく、β =-20°では角度が大きい。翼に作 用する空気力を接線方向と半径方向に分解すると、β=-60° の方が接線方向成分の作用する割合が多いため、β=-20°よ り高い*C_rを*示すものと考えられる。

結論として、本実験範囲内の全ての周速比において、取付 角を $\beta = -60^{\circ}$ に設定した場合に高い C_{τ} が得られることから、 低い周速比範囲では、翼取付角をマイナス側に大きくし、抗 力を利用して起動すると起動性能が良くなると言える。

3.2 1枚翼モデル

ここでは1枚翼モデルの解析結果を示す。Fig.8に周速比 $\lambda = 0.06$ におけるトルク係数 C_{τ} の方位角 θ に対する変化を示 す。また、Fig.9にβ=20°における相対迎角の変化を示す。 Fig. 8の C_{τ} の変化をみると、 $\beta = 20^{\circ}$ では $\theta = 110^{\circ}$ で最大の



Fig. 10 Torque Coefficient ($\lambda = 0.06$)

270

360

180

方位角 θ [deg]

 C_{τ} が得られている。このときの迎角は、Fig. 9に示すように a =-90°であり、翼背面の流れは完全に剥離して、翼には大 きな抗力が作用することになり、この $a = -90^{\circ}$ となる $\theta = 110^{\circ}$ で最大のC_Tが生じたと考えられる。θが180°変化したθ=290° においても $a = 90^{\circ}$ となり主流に対して翼は垂直となるが、 θ =110°とは違い、発生した抗力がCrのマイナス側に寄与する ために、 $\theta = 290°$ 付近で最小の C_{τ} が生じたと考えられる。 β =-20°の場合においても同様のことが考えられるが、β = 20° とは異なり、 $a = -90^{\circ}$ となる $\theta = 72^{\circ}$ は $\theta = 0^{\circ} \sim 90^{\circ}$ の範囲に 位置するため、抗力が C_{τ} のマイナス側に作用し、 $a = 90^{\circ}$ と なる θ = 248° は θ = 180°~270°の範囲に位置するため、抗力 がC_rのプラス側に寄与したものと考えられる。

次に、1枚翼風車モデルの実験結果を使用し、擬似的に4枚 翼風車の C_{τ} の変動波形を求めた。Fig. 10に、周速比 $\lambda = 0.06$ におけるトルク係数 C_r の方位角 θ に対する変化を、3種類の 取付角について示す。

 C_T の変化を見ると、例えば $\beta = 20$ ではFig. 6の4枚翼の 結果とは異なり最大振幅が減少している。これは最大の C_T を 得ている $\theta = 110$ と最小の C_T を得ている $\theta = 290$ [°]は θ が180[°] 回転した位置であり、擬似4枚翼風車として計算すると互い に相殺し合うのが原因である。このことは、本実験の全ての 取付角においても同様であり、最大振幅が減少する傾向となっ た。

3.3 翼干渉の影響

1枚翼モデルの実験結果を使用し、計算から求めた疑似4枚 翼のトルク係数 C_T の結果と4枚翼モデルのトルク係数 C_T を 比較することで翼干渉の影響について考察する。

Fig. 11に周速比 $\lambda = 0.06$ 、 $\beta = 20°$ における疑似4枚翼(図 中1枚翼と表記、△印)と4枚翼モデル(図中4枚翼と表記、 〇印)のトルク係数 C_T の方位角 θ に対する変化を示す。ま た、Fig. 12に方位角 $\theta = 290°$ における翼の位置関係を示す。

Fig. 11 で C_T の変化を見ると、 $\beta = 20$ では擬似4枚翼モデ ルの C_T (図中△印)は、4枚翼モデル(図中〇印)よりも高 い C_T を得ている。Fig. 8の1枚翼実験で最小の C_T となる方位 角($\theta = 290^\circ$)における翼の位置関係を見てみると、Fig. 12 に示すように、 $\theta = 290^\circ$ に位置する4番翼(翼④)は迎角が 90°で回転力としてはマイナス側に寄与することになる。しか し、4枚翼では前方に位置する翼①と翼②の後流により風車



Fig. 11 Torque Coefficient ($\lambda = 0.06$, $\beta = 20^{\circ}$)



Fig. 12 Placement of the blade ($\theta = 290^{\circ}$)



Fig. 13 Rotational Energy Coefficient

内の主流が加速されて動圧が増し、その結果、抗力は翼干渉 のない疑似4枚翼の場合より大きくなる。そのため翼④の回 転力へのマイナスの寄与が増大するため4枚翼の方が疑似4 枚翼より*C_Tが減少した*ものと考えられる。つまり、翼干渉は 回転力を低下させるように影響すると言える。

3.4 回転エネルギ係数C_F

風車が1周回転したときの回転エネルギ C_E を求め、 λ をパ ラメータとして β に対してFig. 13に示す。 C_E が大きい程、風 車の回転力が大きいことになるので、 C_E が最大となる取付角 が最適取付角となる。

Fig. 13から、 C_E についても C_T の場合と同様に、風車起動 直後($\lambda = 0.02$)では、取付角を $\beta = -60°$ とマイナス側に大 きく取り、抗力型として C_T を得た方が大きな C_E を得られる ことがわかる。また、周速比 λ が高くなるにつれて C_E が徐々 に大きくなっていることが分かる。周速比増加による C_E の増 加の理由は、非常に低い周速比では回転力への寄与はほとん ど抗力によるものであるが、周速比が増加すると風車回転速 度が増して翼の相対速度が増し、ジャイロミル型風車本来の 揚力の寄与が増大するためであると考えられる。

本研究で測定した周速比範囲では、全ての場合において、 翼取付角を $\beta = -60^{\circ}$ に設置した方が回転効率が良いことが確 認できた。

4. 結論

4枚翼風車モデルおよび1枚翼風車モデルの2種類のジャイ ロミル型風車について、風車初期回転時すなわち低周速比に おける風車軸トルクの測定を行った。

その結果、風車初期回転時($\lambda = 0.02$)では、風車静止時²⁰ と同様に、翼の取付角を $\beta = -60°$ に設置し、抗力型の風車と して回転させると効率が良いことが確認できた。また、今回 測定した周速比範囲($\lambda = 0.02 \sim 0.06$)では、回転力係数 C_T は一回転中に大きな変動が生じるが、周速比 λ が高くなるに 従い振幅が小さくなる傾向が見られることが分かった。さら に、回転エネルギ係数 C_E を求めた結果、風車停止時に得られ た結果²と同様に、 $\beta = -60^{\circ}$ に翼を設置すると効率が良いことが分かった。

また、翼干渉の影響を明らかにするために、1枚翼モデル の実験結果を用いて疑似4枚翼風車の回転力を求め、4枚翼モ デルの実験結果と比較した結果、翼干渉は回転力を低下させ るように影響することが分かった。

参考文献

- (財)日本エネルギー経済研究所、アジア/世界エネル ギーアウトルック2007、第399回定例研究報告会(2007)
- 2) 江口正一、石井進、平本政明、野口常夫、平野孝典、田

中英穂、風車用切欠き翼の空力特性に関する研究、ガス タービン学会第33回定期講演会講演論文集(2005)、 pp.107-111

- 3) 平野孝典、石井進、平本政明、田中英穂、藤本一郎、渦 法による風車翼周りの流れの数値シミュレーション、ガ スタービン学会第34回定期講演会講演論文集(2006)、 pp.85-89
- 4) 井上亮二、藤本一郎、平野孝典、平本政明、石井進、垂 直軸型風車の空力性能に関する研究(周速の影響)、第 36回ガスタービン定期講演会講演論文集(2008)、pp.79-83

ジャイロミル型風車の翼ピッチコントロールによる起動性能向上に関する研究* Study on Starting Performance Improvement of Gyromill Wind Turbines by Pitch Control of Each Blade

平野 孝典 Takanori HIRANO* 藤本 一郎 Ichiro FUJIMOTO**

ABSTRACT

For the purpose of improvement in startup performance of four-blade gyromill wind turbine, a flow simulation by the vortex method was performed. Aerodynamic forces acting on each blade in stationary state were calculated with considering the setting angle of blade for each azimuth angle. From the aerodynamic forces, a rotating force of each blade was calculated in each azimuth angle, and the optimum setting angle of each blade for each azimuth angle was determined. It is confirmed that the starting performance is largely improved by pitch control so the setting angle of each blade as to be set the optimum setting angle for the azimuth angle.

Keywords: Gyromill Wind Turbines, Starting Performance Improvement, Pitch Control, Numerical Simulation, Vortex Method

1. はじめに

近年、地球温暖化防止や原子力発電の危険性などから、ク リーンで安全なエネルギである再生可能エネルギの利用が盛 んになってきている。

自然エネルギには太陽光、地熱、水力、波力、風力などが あり、これらを利用する技術の研究開発・実用化への精力的 な取り組みが行われている。その一つである風力発電は、風 車の大型化やウィンドファームにより、世界中で発電量に占 める割合が高くなってきている¹⁾。本研究では、風力発電用 風車の中では小型で、低出力だが効率が高く風向に左右され ないという特徴を持ったジャイロミル型風車に着目する。

これまでに、垂直軸揚力型のジャイロミル型風車について、 単独翼の静的空力特性を基にし、切り欠き翼の効果や、翼の 取付角と風車の起動特性との関係について実験的研究を行っ ている²⁾。また、渦法による数値シミュレーションにより、翼 の取付角が風車の回転起動時の性能向上に大きな影響を及ぼ すことを明らかにした³⁾。さらに、風車起動時には翼の取付 角を-60°付近として抗力型風車として起動させ、風車回転開 始後には取付角を0°付近にして揚力型風車として回転させる ことで、起動性能及び風車回転効率が向上することが明らか になっている^{4,5)}。

本報では、数値解析手法の一つである渦法を用いて、4枚 翼ジャイロミル型風車の回転起動性能向上を目的とした解析 結果について報告する。具体的には、風車周りの流れのシミュ レーションを行い、流れ方向に対する翼の回転角度に対して 翼毎に最適取付角を求め、各翼のピッチコントロールによる 起動性能向上の可能性について検証する。

2. 基礎理論

2.1 渦法の基礎

渦法は、渦度輸送方程式を基礎にした数値計算手法であり、 その数理的な基礎研究は既に発表され、整合性、収束性や安 定性は解明されており、大規模な剥離を伴う物体や強い循環 を持つ物体の後流など、渦の移流が支配的な流れ場において 有効な数値解析法と考えられ適用されてきた。渦法は、渦度 場から速度場を求める際、Biot-Savartの式に基づき計算する ラグランジアン渦法とPoisson方程式を解いて求めるVortexin-cell法に大別される。渦法の特徴は、渦度輸送方程式を Euler方程式と粘性拡散方程式に分離して解くことにある。渦 度場と速度場はBiot-Savartの式によって関係付けられている ことから、渦法では、Euler方程式における対流項の計算が 渦要素を移流させるだけで取り扱うことができるため、対流 項に関する数値粘性の問題が生じないという優れた性質を含 め、以下のような特徴を持つ。

- (1) 対流項に関する数値粘性の問題がない。
- (2) 空間格子を設けることなく渦度の集中する流れを自動 的に追随する。
- (3) 外部境界条件は自然に満足される。

このように渦法は、有限要素法や差分法に代表される格子 系の解析手法に比べて優れた特徴を持つ。

2.2 基礎方程式

非圧縮性流れを対象とする渦法の基礎式はNavier-Stokes 方程式の回転から得られる渦度輸送方程式及び発散から得ら れる圧力Poisson方程式から成り立っている。

$$\frac{\partial \omega}{\partial t} + (u \cdot grad)\omega = (\omega \cdot grad)u + v\nabla^2 \omega \quad (1)$$
$$\nabla^2 p = -\rho \cdot div(u \cdot grad \ u) \quad (2)$$

ここで*u*及びωはそれぞれ速度ベクトル及びω=rot・*u*で 定義される渦度ベクトルを表す。流れ場の速度*u*が求められ れば、流体の粘性、流れの非定常性に直接関わらず、流れ場 の圧力は(2)式で求めることができる。

^{*} 原稿受付 平成25年11月12日

^{**} 工学部機械システム工学科

^{***} 工学部機械システム工学科

3. 解析方法

3.1 解析対象

本研究ではNACA2415型翼を供試翼とした。この翼は実際 のジャイロミル型風車で使用されている翼型である。供試翼 は2次元で、翼弦長は30mmとした。また、渦法では物体表 面を分割する必要があるが、本解析では翼表面を103枚のパ ネルに分割している。

Fig. 1に供試翼の断面図、Fig. 2に翼の取り付け位置及び本 報で使用する記号を示す。方位角θは風車の回転角度を示し、 取付角βは風車回転面の接線方向と翼弦方向のなす角度を表 す。各翼を反時計回りにNo.1、No.2、No.3、No.4とする。



3.2 計算条件

本研究では、2次元4枚翼ジャイロミル型風車を対象とす る。静止状態から回転を開始するまでに風車翼が受ける流体 力から方位角毎の最適取付角を求めるため、風車は静止状態 (周速比λ=0)の条件で解析を行った。計算条件をTable 1に 示す。



Fig. 2 Schematic of Wind Turbine

Table 1 Analysis Conditions

主流速	U_{∞}	[m/s]	3.00E-01
代表長さ	D_{θ}	[m]	3.00E-02
密度	ρ	[kg/m ³]	1.21
動粘性係数	ν	[m ² /s]	1.48E-05
レイノルズ数	Re	-	6.08E+02
取付角	β	[°]	30~-60 (10°刻み)
方位角	θ	[°]	0~80 (10°刻み)

4. 解析結果及び考察

4.1 揚力係数と抗力係数

流体中の物体に作用する流体力成分には揚力と抗力がある。 揚力係数*C*_Lは流体力の流れ方向と直角方向成分の無次元数、 抗力係数*C*_Dは流体力の流れ方向成分の無次元数であり、各々 (3)式と(4)式で定義される。

$$C_{L} = \frac{L}{\frac{1}{2}\rho U_{0}^{2}S} \quad (3)$$
$$C_{D} = \frac{D}{\frac{1}{2}\rho U_{0}^{2}S} \quad (4)$$

ここで、Lは揚力、Dは抗力、 $1/2 \rho U_o^2$ は動圧、Sは前面投 影面積を表す。一例として、方位角 $\theta = 0^\circ$ 、取付角 $\beta = 0^\circ$ にお いて翼No.1 に作用する空力係数 (C_L 及び C_D) の時間履歴を Fig. 3に示す。経過時間 4[s] 付近で揚力係数 C_L は一旦最少値 を取るが、その後は正の値に転じることが分かる。



Fig. 3 Time Variation of Aerodynamic Forces of Blade No.1 $(\beta = 0^{\circ}, \theta = 0^{\circ})$

4.2 回転力係数

回転力係数 C_T は、翼に作用する回転方向の力を無次元化したものである。 C_T の値が大きいほど風車の回転力は大きくなる。回転力係数 C_T 、揚力係数 C_L 及び抗力係数 C_D の定義をFig.4に示す。ここで、 C_T は反時計回りを正とする。



Fig. 4 Schematic of Aerodynamic Forces

(5)式に、翼No.1から翼No.4までの各翼の回転力係数*C*_Tの 計算式を示す。

風車の回転力係数 C_T は、(6)式に示すように、 C_{T_1} から C_{T_4} までを合計して求めた。

$$C_{T} = C_{T_1} + C_{T_2} + C_{T_3} + C_{T_4} \tag{6}$$

Fig. 5に、(5)式で求めた各翼(翼No.1~翼No.4)及び、(6) 式で求めた風車の回転力係数 C_T を示す。横軸は経過時間[s]、 縦軸は回転力係数 C_T を示す。ここで、突然一様流が流れ始め た直後の風車の回転力係数 C_T を解析するため、経過時間3[s] までの間の回転力係数 C_T に注目する。



Fig. 5 Time Variation of Rotational Force Coefficient $(\beta = 0^{\circ}, \theta = 0^{\circ})$



Fig. 6 Time Variation of Rotational Force Coefficient for Elapsed time until 3[s] $(\beta = 0^{\circ}, \theta = 0^{\circ})$

Fig. 6は経過時間3[s]間の回転力係数 C_T を示す。図を見て みると、翼No.1ではこの経過時間内は回転力係数 C_T はマイ ナスの値となっている。一方、翼No.3では、 C_T はプラスの 値となっており、風車を回転させる力が発生することが分か る。また、経過時間1.5[s]付近で、翼No.2及び翼No.4では C_T は他の翼より大きなマイナスの値となっており、トータル の回転力係数 C_T に大きな影響を与えることが分かった。その 時の渦パターンをFig.7に示す。



Fig. 7 Flow Pattern at Elapsed Time 1.5[s] $(\beta = 0^{\circ}, \theta = 0^{\circ})$

Fig. 7は経過時間1.5[s]、方位角 $\theta = 0$ 、取付角 $\beta = 0$ にお ける渦パターンである。翼周りの渦パターンを見てみると、 翼No.2及び翼No.4ではカルマン渦列を形成し始めている。

次に、経過時間3[s]間における、トータルの回転力係数 C_T に及ぼす翼取付角 β の影響について検討する。



Fig. 8 Effect of β on Rotational Force Coefficient (Elapsed time until 3[s])

Fig. 8は方位角 $\theta = 0^{\circ}$ 、取付角 $\beta = 30^{\circ} \sim -60^{\circ}$ の回転力係数 C_T を示す。図を見ると、 $\beta \leq -30^{\circ}$ では経過時間 1.5[s]付近で 回転力係数 C_T はほぼ最大となっており、その値を風が吹き始 めた直後に発生する最大回転力係数、つまり風車が回転を始 める回転力に達した時点として仮定する。 $\beta \geq -20^{\circ}$ では C_T が 最大となる経過時間は $\beta = -60^{\circ}$ に比べてかなり遅れており、回 転し難いことを表している。経過時間 1.5[s] の C_T の値を最大 回転力係数として、方位角 $\theta = 0 \sim 80^\circ$ の範囲について 10° 毎に 求めた結果を、取付角 $\beta = 30^\circ \sim -60^\circ \varepsilon / ラ × - 9 として Fig.9$ に示す。ここで、方位角 $\theta = 90^\circ$ は1番翼が2番翼が最初(t=0) にあった位置と重なることを意味しており、 $\theta = 0^\circ$ と同じ状 態に戻ることになる。



Fig. 9 Maximum Rotational Force Coefficient for Azimuth Angle at 1.5[s]

Fig. 9において、方位角 θ 毎の最大回転力係数 C_T を結んだ 包絡線をFig. 10に示す。また、Table 2に各方位角 θ におけ る最適取付角の値を示す。



Fig. 10 Envelope of Optimum Rotational Force Coefficient

Table 2 Optimum Setting Angle

θ[°]	最適取付角 β [°]
0	-60
10	-60
20	-60
30	-50
40	30
50	30
60	30
70	-60
80	-60

Table 3 Optimum Setting Angle of Each Blade

方位角	最適取付角β[°]			
θ [°]	翼No.1	翼 No.2	翼 No.3	翼 No.4
0	0	30	-50	-60
10	0	30	-40	-60
20	10	10	30	-50
30	20	-60	-30	-30
40	20	-60	30	-30
50	30	-60	-60	-20
60	30	-60	-60	-20
70	30	-60	-60	-10
80	30	-60	-60	0



Fig. 11 Rotational Force Coefficient in Two Cases (1) Case of Identical Optimum β for all blades, 2 Case of Optimum β for each blade)

Table 2に示すように、例えば方位角 $\theta = 60^{\circ}$ では最適取付 角は30°であるが、Fig. 10を見ると回転力係数 C_T はマイナス になることが分かる。そのため、さらに起動特性の向上を図 るために、経過時間1.5[s]における翼毎の回転力係数をFig. 9 と同様に翼取付角 β をパラメータとして表し、方位角 θ 毎に 最適取付角を求めた結果をTable 3に示す。この各翼の最適 取付角を用いて回転力係数を求めた結果をFig. 11に示す。図 中①(□記号)は方位角 θ 毎に全翼を同じ最適取付角に設定し た場合、②(○記号)は方位角 θ 毎に各翼の最適取付角を設定 した場合を示している。

Fig. 11より、②の場合、つまり方位角 θ 毎に各翼の最適取 付角を設定した場合、回転力係数 C_T は①の場合の2倍以上大 きくなることが分かった。

すなわち、翼毎にピッチコントロールを行うことにより、 起動性能は格段に向上すると言える。

5. 結論

渦法を用いて、静止した4枚翼ジャイロミル型風車に突然 一様流が流れる場合の風車周りの流れのシミュレーションを 行い、翼取付角をパラメータとして、風車翼に作用する回転 力を求め、方位角毎に最適取付角を求めた。全翼を同じ最適 取付角に設定するより、方位角毎に各翼の最適取付角設定を 行う方が回転力は大きくなり、起動性は大きく向上すること が明らかになった。

参考文献

- (財)日本エネルギー経済研究所、アジア/世界エネルギー アウトルック 2007、第 399 回定例研究報告会(2007)
- 2) 江口正一、石井進、平本政明、野口常夫、平野孝典、田 中英穂、風車用切欠き翼の空力特性に関する研究、ガス タービン学会第33回定期講演会講演論文集(2005)、pp. 107-111
- 3) 平野孝典、石井進、平本政明、田中英穂、藤本一郎、渦 法による風車翼周りの流れの数値シミュレーション、ガ スタービン学会第34回定期講演会講演論文集(2006)、 pp.85-89
- 4) 井上亮二、藤本一郎、平野孝典、平本政明、石井進、垂 直軸型風車の空力特性に関する研究(周速の影響)、第36 回ガスタービン定期講演会講演論文集(2008)、pp.79-83
- 5) カイリル アクマル ビン ナン、他4名、ジャイロミ ル型風車の非定常空力特性に関する実験的研究、第39回 日本ガスタービン学会定期講演会講演論文集 (2011)、pp. 181-185

2次元非対称クーロン系のコステリッツ=サウレス相転移* Kosterlitz-Thouless Phase Transition in Two Dimensional Asymmetric Coulomb System

鈴木 康夫 Yasuo SUZUKI** Henri Orland***

Abstract

Polyelectrolytes in solution dissociate into polyvalent macro-ions and a large number of small ions with the opposite charge, called counter-ions. This is the so-called asymmetric Coulomb system. The giant multivalent ions show peculiar phenomena, such as counter-ion condensation (a fraction of counter ions is bound to the strongly charged macro-ions) and charge inversion (attraction between macro-ions with same charge). In order to investigate a possible low temperature phase and strong correlations between macro-ions in polyelectrolyte solutions, we study a two dimensional asymmetric Coulomb system. The possible existence of a Kosterlitz-Thouless (KT) transition in such a system is investigated. KT transition occurs in many systems, such as the two dimensional classical XY model, dislocations in crystal surfaces, vortices of superconductors, superfluid helium. In these systems, the interactions between topological excitations have a logarithmic dependence on their spatial separation. We apply the renormalization group theory to the two dimensional asymmetric Coulomb system, with a logarithmic dependence of the interaction on the spatial separation of the multivalent charges. We find that the KT phase transition in the asymmetric Coulomb system and the transition temperature depends on the greatest common divider of the valences of charges of the system.

1. はじめに

食塩(NaCl)などの電解質は水溶液(食塩水)中では正の イオン(Na⁺)と負のイオン(Cl⁻)に解離する。このように正と 負のイオンがどちらも1価のイオンである場合には、電解質 溶液の物性はよく理解されている。しかしイオンの価数が大 きくなると事態は複雑になり、多価イオン科学は独自の研究 分野を構成している。¹⁾

高分子は分子量の大きな分子、巨大分子である。それはひ も状の物質であり、モノマー分子とよばれる小さい単位がく り返し結合するような構造を取っており、重合体 (polymer) とも呼ばれる。高分子は自然界にも存在する。身の回りのも のでは衣料につかわれる絹や毛糸などが高分子である。ナイ ロンやポリエステルといった人工の高分子も合成されている。 工業製品にはポリエチレンやPETなどがよく使用されてい る。生体物質である核酸やたんぱく質も高分子であり、生体 内で重要な機能を担っている。



Fig. 1. Polyeletrolyte: Macroion and Counter ions

電解質を一定の割合でモノマーに含む高分子は、高分子電 解質と呼ばれている。高分子電解質は水溶液中で小さな対イ オンをたくさん放出して自分自身も電荷を帯びる。高分子の 方は大きな電荷を帯びることになり、サイズの大きなイオン となる。これをマクロイオンと呼ぶ。(Fig. 1) 水溶液中では熱エネルギーの方が静電気的エネルギーを上 まわるので対イオンは解離して水溶液中を動きまわる。大き な電荷を帯びて巨大イオンになった高分子の方はひもの形を 変えるという自由度をもっている。サイズの小さい多価のイ オンでも複雑な物性を示すが、サイズも電荷も大きいマクロ イオンの場合はさらに面白い物理現象が生じる。

そのひとつは、対イオン凝縮¹³⁾という現象である。水溶液 中でのマクロイオンが帯びる電荷量が制限されるという現象 である。熱エネルギーが大きいときにはほとんどすべての対 イオンが溶液中を動き回るが、温度が低くなるにしたがって 熱エネルギーと静電気エネルギーが同程度になると、マクロ イオンはある一定の電荷線密度以上には帯電しなくなる。小 さなサイズの電解質には見られない現象である。

もうひとつの物理現象は、過剰スクリーニングや電荷反転⁴⁾ と言われる現象である。溶液中の対イオンはマクロイオンの 電荷を遮蔽してマクロイオン間の静電気力を弱める。マクロ イオンどうしが近いときは通常のクーロンの法則による距離 の逆自乗依存性を持つ。ある距離より離れると相互作用が極 端に弱くなる。これをスクリーニング(遮蔽)とよぶ。高分 子電解質の場合は、理由はよく判っていないが、相互作用の 大きさが弱くなるばかりか、向きが逆転して、同符号の電荷 を帯びているはずのマクロイオンの間に見かけ上、斥力では なく引力が生じることがある。これも通常の小さい電解質に は見られない現象である。

さらに高分子電解質ではマクロイオンの形と対イオンの分 布といった2つの大きな自由度があるために、モノマーの性 質から正確なひもの形を予想するのは難しい。長距離力であ る静電気力がはたらけば、高分子は直線状に伸びるはずであ るが、自分自身の形を変えることや対イオンの分布がそれに 伴って変化することによって静電気力が遮蔽され、棒以外の 形をとるマクロイオンも多い。棒状のマクロイオンについて は対イオン凝縮を平均場理論で説明できる (Fig.2)が、そうで

^{*} 原稿受付 平成 25 年 10 月 29 日

^{**} 工学部基礎教育系列

^{***} IPhT CEA-Saclay, France



Fig. 2. Counter ion Condensation

ない形状の高分子電解質についてはお手上げであり、いまの ところくりこみ理論によっても簡単には解決されそうもない。 生体の中では、DNAやたんぱく質をはじめとしてたくさん の高分子電解質が存在して、さまざまな機能を発揮し、生命 現象を営んでいる。生体物質の生命現象において果たす機能 もこのような物理学的な性質によるであろうと考えられる。

高分子電解質の応用としては、コロイド溶液の安定化作用 がある。コロイド粒子は、分子に比べると巨大な粒子のこと であり、重合度が高い高分子はコロイド粒子である。一般に コロイドはお互いに引きつけあう性質があり凝集沈殿しやす い。高分子電解質を疎水性コロイドの表面に植え込むと、コ ロイドを水の中に安定して分散させることができる。このよ うに表面に高分子電解質を植えた状態を高分子電解質ブラ シ⁵⁾という。ちょうどコロイドの界面から高分子電解質がブ ラシのように突き出しているからである。こうすると疎水性 のコロイドが親水性のコロイドに変わり、いままで水の溶け ず有機溶媒に溶かしていたペイントなどを水溶性に変化させ ることができる。こうして環境にやさしい水溶性ペイントを 開発することができる。

その他、医療への応用としては、生体が拒否反応を示す人 工的な物質の表面に親生体性の高分子を植え付けることに よって生体拒否反応を和らげる試みがある。たとえば、血管 や食道などを広げる医療機器であるステントの表面に高分子 を植え付けることにより拒否反応を抑える。このような応用 にとって、マクロイオンの周りにおける対イオンの分布が重 要な役割を果たすので、ブラシ状態の高分子電解質における 対イオン分布を調べ、対イオン凝縮などの現象が起こるかど うか研究する必要がある。

高分子電解質が植え込まれた界面を上から眺めるとFig. 3 のように棒状の高分子電解質が並んでいる中を対イオンが動 き回っている様子が想像できる。このような高分子電解質の 構造および配置を電解質ブラシと呼ぶ。

ここでは特に対イオン凝縮の解明につながる多価のイオン



Fig. 3. Polyelectrolyte brush: グレーの〇は負に帯電したマクロイ オン、+ は対イオンを示す。

が存在するとき、クーロン系の低温相について研究した結果 を述べる。

2. 対イオン凝縮

棒状の巨大イオンは希薄溶液中では、電荷線密度がある値 以上には大きくならない。温度や誘電率により、棒状のイオ ンの最大電荷線密度が決まってしまう。この現象を対イオン 凝縮という。⁶

棒状のマクロイオンの近傍では、対イオンがマクロイオン から受ける静電ポテンシャルは対数的な距離依存性をもって いる。棒状のマクロイオンには電荷が線密度 λ で一様に分布 しているとしよう。(Fig. 2)便宜的にマクロイオンに近い領 域を1と名付け、それ以外の溶液中の領域を2と名付けるこ とにする。領域1では対イオンはマクロイオンにはりついて いるとし、領域2では対イオンは溶液中を自由に動き回って いるとする。どのような場合に領域1にいる対イオンが無く なるか、その条件を考えてみよう。

それぞれの領域における静電ボテンシャルを ψ_1 、 ψ_2 とし、 その差を $\delta \psi = \psi_1 - \psi_2$ とおく。2つの領域にいる対イオンの 濃度を c_1 、 c_2 とすると、平衡状態ではボルツマン分布にある ので

$$c_1 = c_2 \exp\left(-e \,\,\delta \psi/kT\right) \tag{1}$$

がなりたつ。ここで*k*はボルツマン因子である。*e*は対イオン の電荷であり、

$$-e \delta \psi > 0$$
 (2)

が成り立つ。 β を領域2にいる対イオンの割合とすると、1 – β が領域1にある対イオンの割合となる。領域1の溶液内の 体積分率を ϕ とすると、領域2の体積分率は1 – ϕ となる。こ のときボルツマン分布の式は

$$\ln (1-\beta)/\beta = \ln \phi/(1-\phi) - e \delta \psi/kT$$
(3)

と表せる。それぞれの領域における、マクロイオンからの特 徴的な距離を*r*₁, *r*₂とすると、静電ポテンシャルの差は

$$\delta \psi = -2 \lambda / 2 \pi \varepsilon \ln (r_2 / r_1) = \lambda / \varepsilon \ln \phi$$
(4)

と評価できる。ここでr₂²/r₁²=1/φの関係を使った。1-βの割 合で対イオンが領域1にいるので、領域1での電荷線密度は

$$\lambda = e \ \beta / a \tag{5}$$

となっている。ψがじゅうぶんに小さいことを考慮すると、 ボルツマン分布の式は

$$\ln (1 - \beta) / \beta = (1 - \beta Q) \ln \psi$$
(6)

となる。ただし、 $Q=e^2/4\pi \epsilon a kT$ とおいた。

$$\lambda_{\rm c} = Q = e/2l_{\rm B} \tag{7}$$

と見積もることができる。この $l_{\rm B}=e^2/4\pi \epsilon kT$ をビヨルン長 (Bjerrum length) という。

希釈溶液において、高分子電解質が起こす対イオン凝縮現 象については、2次元クーロン系のHauge-Hammer転移^{7.8)}や Kosterlitz-Thouless転移^{9.10}との関係も含めて、理論および計 算機シミュレーションに基づいて、すでに多くの研究がなさ れている¹¹⁻¹⁴⁾。しかし、高分子電解質の濃度が有限の場合は、 解析が難しくなる。

3. 対称クーロン系の相転移

電荷q,からなる2次元クーロン系における相互作用は

$$U(\vec{r_i}, \vec{r_j}) = -\frac{q_i q_j}{2\pi\epsilon} \ln |\vec{r_i} - \vec{r_j}|, \qquad (8)$$

である。ここですべてのイオンが対称的に同じ大きさの電荷 をもつとし、 $|q_i| = |q_j| = q$ とおくと対称クーロン系の相互作 用になる。

対称クーロン系は低温ではすべてのイオンがペアを組んで 中性になる。高温では熱エネルギーが静電エネルギーに打ち 勝って、すべてのイオンが解離し動き回る。反対の電荷をもっ たペアのイオンが解離するときに要するエネルギーは

$$\delta E \approx \frac{q^2}{2\pi\epsilon} \ln\left(\frac{R}{a}\right). \tag{9}$$

である。ここで*a*はモノマーのサイズであり、*R*は系全体の サイズである。ペアを組んでいたイオンが解離するときのエ ントロピーの差は

$$\delta S \approx 2k \ln\left(\frac{R^2}{a^2}\right),\tag{10}$$

である。したがってイオンが解離するときの自由エネルギー の差は

$$\delta F = \left(\frac{q^2}{2\pi\epsilon} - 4kT\right) \ln\left(\frac{R}{a}\right). \tag{11}$$

である。したがって、イオンの解離に伴う相転移温度は

$$kT_K = \frac{q^2}{8\pi\epsilon}.$$
 (12)

と見積もることができる。これが平均場理論によるKT相転 移の説明である。

この相転移をより正確に記述するために、くりこみ理論を 考える。2次元対称クーロン系は低温では2次元XYスピン系 や2次元Sine-Gordon系と等価である(付録A)。そこで2次 元Sine-Gordon系のラグランジアン

$$\mathcal{L} = -\frac{1}{2} \int (\nabla \varphi)^2 d^2 x + \mu \int \left(e^{i2\pi\sqrt{\beta}\varphi} + e^{-i2\pi\sqrt{\beta}\varphi} \right) d^2 x$$
(13)

について解析する。ここでSine-Gordon系の β はクーロン系 の $e^2/2\pi kT$ に対応する(付録A)。荷電粒子の大きさを変化さ せることに対応する積分の下限の値aを変化させると同時に 場の量である ϕ を変化させて、ラグランジアンが変化しない 固定点を探す(付録 B)。そのとき流れの方程式(付録 C)は

$$dy_{k} = \left\{-y_{k}\left(\pi\beta - 2\right) + 2\pi^{2}\beta \sum_{p\neq 0, q\neq 0}\delta(k - p - q)y_{p}y_{q}\right\}\frac{da}{a}$$
(14)

および

$$dx = 2\pi\beta^3 y_1 y_{-1} \frac{da}{a} \tag{15}$$

となる。

非対称クーロン系の場合は、p=1, q=-1とおけばよい。そのとき、対称性より $y_1=y_{-1}$ が成り立つので、これをyとおくと、流れの方程式は

$$dy = -y\left(\pi\beta - 2\right)\frac{da}{a} \tag{16}$$

および

$$dx = 2\pi\beta^3 y^2 \frac{da}{a} \tag{17}$$

となる。この方程式は

$$x^2 - y^2 = \text{const.} \tag{18}$$

の線の上に境界をもつ。(*x*, *y*) 平面内でのくりこみ変換による 流れを図にすると Fig. 4 のようになる。



Fig. 4 flow diagram¹⁰⁾

流れが Fig. 4 の原点 (0, 0) に行き着いて停止するためには $\beta_c = \frac{2}{\pi}$ という初期条件であればよい。これは相転移点が $T_c = e^2/4\pi \epsilon k$ であることに対応する ⁹⁻¹⁰。

4. 一般化された1次元非対称クーロン相互作用系

ここではクーロン系を一般化し、いろいろな価数のイオン が含まれている系 (Fig. 5)を考える。イオンの価数の間には 中性条件だけが定まっており、外界から平衡状態に応じてイ オンが自由に供給されると考え、大分配関数について解析す る。

価数がpであるイオンの電荷密度を

$$\rho_p(r) = \sum_{i=1}^{N_p} pe\delta(\vec{r} - \vec{r}_i^{(p)})$$
(19)

と記述すると、いろいろな価数のイオンからなる系の電荷密 度は

$$\rho(r) = \sum_{\mathbf{p}} \rho_{\mathbf{p}}(r) \tag{20}$$

と書くことができる。また場の理論における対数的相互作用 を

$$v = \frac{1}{2\pi\epsilon} \ln r \tag{21}$$

と表す。 そのとき、p価のイオンからなる系の分配関数は

$$Z_{N_{p}} = \left(\prod_{p=-\infty, \neq 0}^{\infty} \prod_{i=1}^{N_{p}} \int d\vec{r}_{i}^{(p)}\right) \frac{1}{N_{p}!h^{2N_{p}}} \exp\left\{\beta \int d^{2}r d^{2}r' \rho(\vec{r})v(\vec{r}-\vec{r}')\rho(\vec{r}')\right\}$$
(22)

となる。



Fig. 5 multivalence ionic system

またイオンの出入りがあるような系の大分配関数は

$$Z = \sum_{N_p=1}^{\infty} \lambda_p^{N_p} Z_{N_p}$$
(23)

と表される。この系は次の一般化されたゴードン系の大分配 関数と等価である。(付録 A)

$$Z = \int_{\Lambda} d\psi \exp \mathcal{L}$$

= $\int d\psi \exp \left\{ -\frac{1}{2} \int (\nabla \psi)^2 d^2 x + \sum_{p=-n, p \neq 0}^n \mu_p \int e^{-i2\pi p \sqrt{\beta} \psi} d^2 x \right\}$
(24)

ここで、ゴードン系の β はクーロン系の $e^2/2\pi kT$ に対応する。

6. くりこみ理論

ゴードン系の大分配関数(24)が2次元非対称クーロン相互 作用系の熱力学的性質を定める。この分配関数にくりこみ群 の方法を適用する。これは系のスケールを変換したときに物 理量がどう変わるを計算し、物理量が変わらない、つまり、 スケール変換に対して不変であるような条件を求める。相転 移点ではゆらぎが大きくなり、系のスケール変換にまったく 依存しなくなるはずである。その条件を利用して相転移点の 情報を求めるのである。

具体的には、運動量空間における積分の範囲(カットオフ) を変化させ、それに応じて場の量を変化させたときに、この 分配関数が元と同じ形になる条件を考える。(付録 B)

φ→ψ+χ Λ→Λ-dΛ=Λ'

(25)

という変換を施して、変換前と変換後の分配関数が同じにな る条件を求めると

$$Z = \int_{\Lambda'} d\psi \exp \left[-\frac{1}{2} \left(1 - 4 \frac{d\Lambda}{\Lambda^5} \beta^2 \mu_1 \mu_{-1} \right) \int (\nabla \psi)^2 d^2 x + \left\{ \sum_{k\neq 0}^n \mu_k \left(1 - \frac{k^2 \beta}{4\pi} \frac{d\Lambda}{\Lambda} \right) - \sum_{p\neq 0, q\neq 0} \delta(k - p - q) \mu_p \mu_q \frac{d\Lambda \beta}{\Lambda^3} \right\} \int e^{-ik\sqrt{\beta}\psi} d^2 x \right]$$
(26)

となる。

分配関数の変化を相互作用の結合定数について2次の微少 量まで展開し、それぞれの次数で係数が等しくなるとおくと、 くりこみ群の流れの方程式が求まる。

$$\frac{dy_k}{ds} = -2y_k + \beta \left(\frac{y_k}{4\pi} - \frac{1}{2\Lambda^2} \sum_{p \neq 0, q \neq 0} \delta(k - p - q) y_p y_q\right)$$
(27)

この流れの方程式は、価数の合計が0になるような組合せ のイオンだけが、相転移に関係することを表している。そし てその相転移は2次元対称クーロン系の相転移と全く同じKT 転移になることを示している。つまり、一般の2次元非対称 クーロン系でもKT相転移が起こり、 $m, n \epsilon$ 整数として mp+nq=rで決まる最小のr(>0)の値によって相転移温度が 決まる。例えば、6価の負イオン(p=6)と3価の正イオンが あると、r=3となり、転移温度は $T_c=r^2e^2/4\pi\epsilon k$ となる。こ れは素電荷がr倍になったのと同じ結果である。こうして、系 のイオンのもつ価数の最大公約数で相転移温度が決まること が示された。この結果は多数の価数のイオンが存在する場合 にも自然に拡張され、すべてのイオンの価数の最大公約数に よって転移温度が決まることが導ける。

また、くりこみ群の流れの方程式から、非対称クーロン系 でも相転移はKT相転移と同じ性質をもつことがわかるので、 この転移温度ではイオン間の相関が発散する。相転移温度以 上でも相転移点に向けて温度が下がって行くと相関が大きく なるので、この領域では電荷反転などの現象が起こることが 期待される。

7. おわりに

高分子電解質の応用を広げるために、有限濃度の高分子電 解質が水溶液中でどのような対イオン分布を示すか、マクロ イオンはどのような形をとるかを解明する必要がある。その 解明へ向けてのはじめの一歩として、2次元非対称クーロン 系の低温相について、くりこみ群理論を用いて研究した。

非対称クーロン系であっても、対称クーロン系と同じ Kosterlitz-Thouless転移を起こし、特徴的な臨界現象を示す ことを発見した。また相転移温度は系に存在するイオンの価数の最大公約数で決まることがしめされた。最大公約数をア とすると、非対称クーロン系の相転移温度 T^(a) は、1 価のイ オンだけからなる対称クーロン系の相転移温度 T^(s) のr倍に なる。つまり

$$T^{(a)}_{\ \ c} = r^2 T^{(s)}_{\ \ c} \tag{28}$$

の関係がなりたつ。

2次元非対称クーロン系は対イオン凝縮に似た現象を示す ことになる。相転移温度以下では強い相関があるが、相転移 温度以上でも相関が長いので、同符号のイオン同士の相関に も影響し、同符号のイオンの間にみかけ上の引力がはたらく 電荷反転現象の可能性があるのではないかと考えて、今後、 電荷反転現象についての研究を進めていきたい。

以上の結果は、高分子電解質ブラシに関する自己無撞着場 の理論のこれまでの研究結果における低温での対イオン分布 の結果と矛盾しない。高分子電解質ブラシにおける対イオン 凝縮の可能性は今後の研究課題である。

参考文献

- 1) Onsager Nuovo Cimento, 1949, 9, pp.279-87.
- 2) Manning G. S. J. Chem. Phys., 1969, 51, pp.924-33.
- 3) Oosawa F. Polyelectrolytes (Dekker) 1971.
- 4) Tanaka M. Phys. Rev. 2003, E68, p. 061501.
- 5) Pincus P., Macromolecules, 1991, 24, pp.2912-2919.
- Grosberg A. Yu. and Khokhlov A. R. Statisctical Physics of Macromolecules, 1993 (AIP Press).
- 7) Hauge E. H. and Hemmer P. C., Physica, 1963, 29, p.1338.
- Hemmer P. C. and Hauge E. H., *Phys. Rev.*, 1964, A133 p.1010.
- Kosterliz J. M. and Thouless D. J., J. Phys. C: Solid State Phys., 1973, 6, p.1181-203.
- Kosterlitz J. M. J. Phys. C: Solid State Phys., 1974, 7, p.8129-8134.
- 11) Levin Y. Physica A 1998, 157, pp.408-12.
- 12) Levin Y. Rep. Prog. Phys. 2002, 65, pp.1577-632.
- Suzuki Y. Y. J. Phys.: Condens. Matter 2004, 16, pp. S2119-S2125.
- 14) Naji A. and Netz R. R. Phys. Rev. 2006, E73, p.056105.

付録 A クーロン系とゴードン系の等価性

2次元非対称クーロン系の大分配関数は

$$Z_0 = \sum_{N_p=1}^{\infty} \left(\prod_{p=-\infty, \neq 0}^{\infty} \prod_{i=1}^{N_p} \int dx_i^{(p)} \right) \frac{\lambda_p^{N_p}}{N_p! h^{2N_p}} \exp\left\{ \frac{1}{2} \int dx dy \ \rho(x) 2\beta v(x-y) \rho(y) \right\}$$

である.ここで λ_p はフガシティである.これがゴードン系の大分配関数と等価であることを示す.補助場 ϕ を導入してルジャンドル変換をして変数を ϕ に変えると,

$$\begin{split} Z_0 &= \int d\phi \sum_{N_p=1}^{\infty} \left(\prod_{p=-\infty, \neq 0}^{\infty} \prod_{i=1}^{N_p} \int dx_i^{(p)} \right) \frac{\lambda_p^{N_p}}{N_p!h^{2N_p}} \\ & \exp\left\{ \frac{1}{2\beta} \int dx dy \; \phi(x) v^{-1}(x-y) \phi(y) + i \int dx \rho(x) \phi(x) \right\} \end{split}$$

となる.
用いると、
$$v^{-1} = \epsilon \nabla^2 \delta(\vec{r})$$
 $\rho_p(r) = \sum_{i=1}^{N_p} pe\delta(\vec{r} - \vec{r}_i^{(p)})$ 춘

$$\begin{split} Z_0 &= \int d\phi(x) \sum_{N_p=1}^{\infty} \left(\prod_{p=-\infty,\neq 0}^{\infty} \prod_{i=1}^{N_p} \int dx_i^{(p)} \right) \frac{\lambda_p^{N_p}}{N_p! h^{2N_p}} \\ & \exp\left\{ -\frac{\epsilon}{2\beta} \int (\nabla \phi(x))^2 dx + i \int dx \sum_{p\neq 0} \sum_i pe\delta(x-x_i^{(p)}) \phi(x) \right\} \end{split}$$

となり、δ関数の性質を使って積分を実行すると、

$$\begin{split} &= \int d\phi(x) \exp\left\{-\frac{\epsilon}{2\beta} \int (\nabla \phi(x))^2 dx\right\} \sum_{N_p=1}^{\infty} \prod_{p=-\infty, \neq 0}^{\infty} \frac{\lambda_p^{N_p}}{N_p! h^{2N_p}} \prod_{i=1}^{N_p} \left[\int dx_i^{(p)} \exp\left\{ipe\phi(x_i^{(p)})\right\}\right] \\ &\geq \alpha \leq n^{i}, \quad \& \& O \text{ DB + } iN_p (C \text{ KAF } U \text{ CN }) O \text{ CT}, \\ &= \int d\phi(x) \exp\left\{-\frac{\epsilon}{2\beta} \int (\nabla \phi(x))^2 dx\right\} \sum_{N_e=1}^{\infty} \prod_{p=-\infty, \neq 0}^{\infty} \frac{\lambda_p^{N_p}}{N_p! h^{2N_p}} \left(\int dx \exp\left\{ipe\phi(x)\right\}\right)^{N_p} \\ &\geq \alpha \leq n^{i}, \quad \text{if X By D O transform} \\ &= \int d\phi(x) \exp\left\{-\frac{\epsilon}{2\beta} \int (\nabla \phi(x))^2 dx\right\} \prod_{p=-\infty, \neq 0}^{\infty} \exp\left\{\frac{\lambda_p}{h^2} \int dx \exp\left[ipe\phi(x)\right]\right\} \\ &\geq \alpha \leq n. \quad \text{if X By D o transform} \\ &\geq \alpha \leq n. \quad \text{if X By D o transform} \\ \end{aligned}$$

$$\begin{split} &= \int d\phi(x) \exp\left\{-\frac{\epsilon}{2\beta}\int (\nabla\phi(x))^2 dx + \sum_{p=-\infty,\neq 0}^{\infty} \frac{\lambda_p}{h^2}\int dx \ e^{ipe\phi(x)}\right\} \\ &\geq \hbar x \ \Im. \quad \Xi \subseteq \mathbb{C} \\ &\varphi(x) = \sqrt{\frac{\epsilon}{\beta}}\phi, \\ &\geq \hbar \zeta \ \& \\ &= \int d\phi(x) \exp\left\{-\frac{1}{2}\int (\nabla\varphi(x))^2 dx + \sum_{p=-\infty,\neq 0}^{\infty} \frac{\lambda_p}{h^2}\int dx \ e^{ipe\sqrt{\frac{\beta}{\epsilon}}\varphi(x)}\right\} \\ &\geq \hbar x \ \Im. \quad &\triangleq \Im \ \& \\ &E \hbar x \ \Im. \quad &\triangleq \Im \ \& \\ &E \hbar x \ \Im. \quad &\triangleq \Im \ \& \\ &E \hbar x \ \Im. \quad &\triangleq \Im \ \& \\ &E \hbar x \ \& \\ \end{split}$$

$$= \int d\phi(x) \exp\left\{-\frac{1}{2}\int (\nabla\varphi(x))^2 dx + \sum_{p=-\infty,\neq 0}^{\infty} \mu_p \int dx \ e^{i2\pi p\sqrt{I_H}\varphi(x)}\right\}$$

というゴードン系の大分配関数になる. 2つの系が等価になるためには、変数の間に $\frac{e^2\beta}{2\pi\epsilon}$ (Coulomb) $\Leftrightarrow \beta$ (Gordon)

という関係が必要である.

付録 B くりこみ変換

系のサイズを変えたときに大分配関数

$$\label{eq:Z} Z \equiv \int_{\Lambda} D\psi \exp\left\{\int L(\psi;\mu_p,\beta) d^2x\right\}$$

が不変に保たれるにはパラメーター μ や β にどのような 関係があればよいかを調べるのがくりこみ理論である. ここで一般化したゴードン系のラグランジアンを

$$L(\psi;\mu_p,\beta) = (\nabla\psi(x))^2 + \mu_p e^{i2\pi p \sqrt{\beta}\psi(x)}$$

とし、積分範囲 Λ を変化させると同時に系のスケールX についても線形変換を同時に行う.さらに場の変数 ϕ も 大きさを変化させ、パラメーター μ と β も変化させる.

$$\Lambda' = \Lambda - d\Lambda, \Lambda' x = \Lambda x',$$

 $\psi' = A(\psi - \chi) = A\phi, \mu'_p = \mu_p + d\mu_p, \beta' = \beta + d\beta$
新しい大分配関数は

$$Z = \frac{1}{2} \int D\psi' \exp\left\{\int L(\psi'; u'(\mu_p, \beta, d\Lambda), \beta'(\mu_p, \beta, d\Lambda))d^2 x'$$

$$\begin{split} Z &= \frac{1}{A} \int_{\Lambda} D\psi' \exp\left\{ \int L(\psi'; \mu'_p(\mu_p, \beta, d\Lambda), \beta'(\mu_p, \beta, d\Lambda)) d^2 x \right. \\ &\geq k \, \Im \, \Im \, . \quad \Box \equiv \nabla \end{split}$$

ł

$$\phi = \psi - \chi$$
 and $\psi' = A\phi$

という関係がある.初めの大分配関数と変換後の大分配 関数が等しくなるためには、パラメーターμとβがどの ように変換されればよいのか具体的に計算してみよう.

$$\begin{split} Z &= \int_{\Lambda} D\psi \exp\left\{\int L(\psi;\mu_{p},\beta)d^{2}x\right\} \\ &= \int_{\Lambda'+d\Lambda} D\psi \exp\left\{\int L(\psi;\mu_{p},\beta)d^{2}x\right\} \\ &= \int_{\Lambda'} D\phi \int_{d\Lambda} D\chi \exp\left\{\int L(\phi+\chi;\mu_{p},\beta)d^{2}x\right\} \\ &= \int_{\Lambda'} D\phi \exp\left\{\int L'(\phi;\mu_{p},\beta,d\Lambda)d^{2}x\right\} \\ &= \frac{1}{A}\int_{\Lambda} D\psi' \exp\left\{\int L(\psi';\mu'_{p}(\mu_{p},\beta,d\Lambda),\beta'(\mu_{p},\beta,d\Lambda))d^{2}x'\right\} \\ &\geq k \leq 0 \quad \forall; \quad \forall; m \in \mathbb{N} \quad$$

$$d\beta = \beta'(\mu_p,\beta,d\Lambda) - \beta$$

付録 C 流れの方程式 スケール不変の考え方より $\int_{A} D\psi \exp\left\{\int L(\psi;\mu_{p},\beta)dx\right\} = \int_{A'} D\phi \exp\left\{\int L(\phi;\mu'_{p},\beta')dx\right\}$ が成り立つ. 場の変数 $\phi \ge \phi$ の間の関係を使って $Z = \int_{\Lambda'} D\psi \exp \left\{ \int L(\psi; \mu_p, \beta) dx \right\}$ $= \int_{\Lambda'} D\psi' \int_{d\Lambda} D\chi \exp \left\{ \int L(\phi + \chi; \mu_p, \beta) dx \right\}$ $=\int_{\Lambda'} D\phi \exp \left\{\int L'(\phi; \mu_p, \beta, d\Lambda) dx\right\}$ となる. これを具体的に計算すると $\int L'(\phi; \mu_p, \beta, d\Lambda) d^2x = -\frac{1}{2} \left(1 + 8\pi^4 \beta^2 \sum_{t} k^4 \mu_k \mu_{-k} \frac{d\Lambda}{\Lambda^5} \right) \int (\nabla' \phi)^2 d^2x$ + $\sum_{k\neq 0} \left\{ \mu_k \left(1 - k^2 \pi \beta \frac{d\Lambda}{\Lambda} \right) - 2\pi^2 \beta \sum_{p\neq 0, q\neq 0} \delta(k - p - q) p q \mu_p \mu_q \frac{d\Lambda}{\Lambda^3} \right\}$ $\int_{\int -2\pi i k \cdot \sqrt{\beta} k \cdot q^2} e^{-2\pi i k \cdot \sqrt{\beta} k \cdot \sqrt{\beta} k \cdot \sqrt{\beta} k \cdot \sqrt{\beta} e^{-2\pi i k \cdot \sqrt{\beta} k \cdot \sqrt{\beta} k \cdot \sqrt{\beta} k \cdot \sqrt{\beta} e^{-2\pi i k \cdot \sqrt{\beta} k \cdot \sqrt{\beta} k \cdot \sqrt{\beta} k \cdot \sqrt{\beta} e^{-2\pi i k \cdot \sqrt{\beta} k \cdot \sqrt{\beta} k \cdot \sqrt{\beta} k \cdot \sqrt{\beta} e^{-2\pi i k \cdot \sqrt{\beta} k \cdot \sqrt{\beta} k \cdot \sqrt{\beta} e^{-2\pi i k \cdot \sqrt{\beta} k \cdot \sqrt{\beta} k \cdot \sqrt{\beta} e^{-2\pi i k \cdot \sqrt{\beta} k \cdot \sqrt{\beta} k \cdot \sqrt{\beta} e^{-2\pi i k \cdot \sqrt{\beta} k \cdot \sqrt{\beta} k \cdot \sqrt{\beta} e^{-2\pi i k \cdot \sqrt{\beta} k \cdot \sqrt{\beta} k \cdot \sqrt{\beta} e^{-2\pi i k \cdot \sqrt{\beta} k \cdot \sqrt{\beta} k \cdot \sqrt{\beta} e^{-2\pi i k \cdot \sqrt{\beta} k \cdot \sqrt{\beta} k \cdot \sqrt{\beta} e^{-2\pi i k \cdot \sqrt{\beta} k \cdot \sqrt{\beta} k \cdot \sqrt{\beta} e^{-2\pi i k \cdot \sqrt{\beta} k \cdot \sqrt{\beta} k \cdot \sqrt{\beta} e^{-2\pi i k \cdot \sqrt{\beta} k \cdot \sqrt{\beta} e^{-2\pi i k \cdot \sqrt{\beta} k \cdot \sqrt{\beta} k \cdot \sqrt{\beta} e^{-2\pi i k \cdot \sqrt{\beta} k \cdot \sqrt{\beta} k \cdot \sqrt{\beta} e^{-2\pi i k \cdot \sqrt{\beta} k \cdot \sqrt{\beta} k \cdot \sqrt{\beta} e^{-2\pi i k \cdot \sqrt{\beta} k \cdot \sqrt{\beta} k \cdot \sqrt{\beta} e^{-2\pi i k \cdot \sqrt{\beta} k \cdot \sqrt{\beta} k \cdot \sqrt{\beta} e^{-2\pi i k \cdot \sqrt{\beta} k \cdot \sqrt{\beta} k \cdot \sqrt{\beta} e^{-2\pi i k \cdot \sqrt{\beta} k \cdot \sqrt{\beta} k \cdot \sqrt{\beta} e^{-2\pi i k \cdot \sqrt{\beta} k \cdot \sqrt{\beta} k \cdot \sqrt{\beta} e^{-2\pi i k \cdot \sqrt{\beta} k \cdot \sqrt{\beta} k \cdot \sqrt{\beta} e^{-2\pi i k \cdot \sqrt{\beta} k \cdot \sqrt{\beta} k \cdot \sqrt{\beta} e^{-2\pi i k \cdot \sqrt{\beta} k \cdot \sqrt{\beta} k \cdot \sqrt{\beta} e^{-2\pi i k \cdot \sqrt{\beta} k \cdot \sqrt{\beta} e^{-2\pi i k \cdot \sqrt{\beta} k \cdot \sqrt{\beta} k \cdot \sqrt{\beta} e^{-2\pi i k \cdot \sqrt{\beta} k \cdot \sqrt{\beta} k \cdot \sqrt{\beta} e^{-2\pi i k \cdot \sqrt{\beta} k \cdot \sqrt{\beta} k \cdot \sqrt{\beta} e^{-2\pi i k \cdot \sqrt{\beta} k \cdot \sqrt{\beta} k \cdot \sqrt{\beta} e^{-2\pi i k \cdot \sqrt{\beta} k \cdot \sqrt{\beta} k \cdot \sqrt{\beta} e^{-2\pi i k \cdot \sqrt{\beta} k \cdot \sqrt{\beta} k \cdot \sqrt{\beta} k \cdot \sqrt{\beta} e^{-2\pi i k \cdot \sqrt{\beta} k \cdot \sqrt{$ $\times \int e^{-2\pi i k \sqrt{\beta} \phi} d^2 x$ となるが,ここでスケール変換 A'=A-dA を行い,さ らに再スケール変換 $x = \frac{\Lambda}{\Lambda'} x'$ を行い, $\int_{\mathcal{M}} (\nabla \phi)^2 d^2 x = \int_{\mathcal{M}} (\nabla' \phi)^2 d^2 x'$ という関係が満たされるようにする. そのとき, $\int_{\Lambda'} e^{-2\pi i k \sqrt{\beta \phi} d^2 x} = \left(\frac{\Lambda}{\Lambda'}\right)^2 \int_{\Lambda} e^{-2\pi i k \sqrt{\beta \phi} d^2 x'} = \left(1 + 2\frac{d\Lambda}{\Lambda}\right) \int_{\Lambda} e^{-2\pi i k \sqrt{\beta \phi} d^2 x'}$ と計算できる. したがって大分配関数は $Z = \int_{\Lambda} d\phi \exp \left[-\frac{1}{2} \left(1 + 8\pi^4 \beta^2 \sum_k k^4 \mu_k \mu_{-k} \frac{d\Lambda}{\Lambda^5} \right) \int (\nabla \phi)^2 d^2 x' \right]$ $+\sum_{k\neq 0} \left\{ \mu_k \left(1 - k^2 \pi \beta \frac{d\Lambda}{\Lambda} \right) - 2\pi^2 \beta \sum_{p\neq 0, q\neq 0} \delta(k - p - q) p q \mu_p \mu_q \frac{d\Lambda}{\Lambda^3} \right\}$ $\times \left(1 + 2 \frac{d\Lambda}{\Lambda}\right) \int e^{-2\pi i k \sqrt{\beta} \phi} d^2 x'$ となる.一方, $L(\psi'; \mu'_{p}.\beta') = -\frac{1}{2} \int (\nabla \psi')^2 d^2 x' + \sum_{k}^{n} \mu'_{k} \int e^{-i2\pi k \sqrt{\beta'} \psi'} d^2 x'$ であるから, $L'(\phi;\mu_p,\beta,d\Lambda) \ = \ -\frac{1}{2} \left(1+8\pi^4\beta^2\sum_k k^4\mu_k\mu_{-k}\frac{d\Lambda}{\Lambda^5}\right) \int (\nabla\phi')^2 d^2x'$ $+\sum_{k\neq 0} \left\{ \mu_k \left(1 - k^2 \pi \beta \frac{d\Lambda}{\Lambda} \right) - 2\pi^2 \beta \sum_{p\neq 0, q\neq 0} \delta(k - p - q) p q \mu_p \mu_q \frac{d\Lambda}{\Lambda^3} \right\} \\ \times \left(1 + 2 \frac{d\Lambda}{\Lambda} \right) \int e^{-2\pi i k \sqrt{\beta} \phi} d^2 x'$ (87) と計算できる. ここでφからφ'へのスケール変換が $\psi' \equiv \phi \sqrt{1 + 8\pi^4 \beta^2 \sum k^4 \mu_k \mu_{-k} \frac{d\Lambda}{\Lambda^5}}$

を満たしていると、大分配関数は不変にとどまる.また

$$\beta' = \beta + d\beta$$
 へのスケール変換については、

$$\begin{split} \sqrt{\beta'}\psi' &= \sqrt{\beta}\phi \\ &= \frac{\sqrt{\beta}\psi'}{\sqrt{1+8\pi^4\beta^2\sum k^4\mu_k\mu_{-k}\frac{d}{2}}} \end{split}$$

の関係が満たされればよいので,

$$\left(1+8\pi^4\beta^2\sum k^4\mu_k\mu_{-k}\frac{d\Lambda}{\Lambda^5}\right)\phi^2=\psi'^2$$

という関係が導かれ,

$$\begin{split} \beta' &= \frac{\beta}{\left(1 + 8\pi^4\beta^2\sum k^4\mu_k\mu_{-k}\frac{d\Lambda}{\Lambda^5}\right)} \\ &= \beta - 8\pi^4\beta^3\sum k^4\mu_k\mu_{-k}\frac{d\Lambda}{\Lambda^5} \\ \& 与 え ら れる. した がって, \\ d\beta &= -8\pi^4\beta^3\sum k^4\mu_k\mu_{-k}\frac{d\Lambda}{\Lambda^5} \end{split}$$

がくりこみによる流れの方程式を与える. μについて 調べるには、やはり、

$$\begin{split} L'(\phi;\mu_p,\beta,d\Lambda) &= -\frac{1}{2}\left(1+8\pi^4\beta^2\sum_k k^4\mu_k\mu_{-k}\frac{d\Lambda}{\Lambda^5}\right)\int (\nabla\phi')^2 d^2x' \\ &+\sum_{k\neq 0}\left\{\mu_k\left(1-k^2\pi\beta\frac{d\Lambda}{\Lambda}\right)-2\pi^2\beta\sum_{p\neq 0,q\neq 0}\delta(k-p-q)pq\mu_p\mu_q\frac{d\Lambda}{\Lambda^3}\right\} \\ &\times\left(1+2\frac{d\Lambda}{\Lambda}\right)\int e^{-2\pi ik\sqrt{\beta}\phi}d^2x' \end{split}$$

を計算すればよい. φ'へのスケール変換を考慮すると,

$$= -\frac{1}{2} \int (\nabla \psi')^2 d^2 x' \\ + \sum_{k \neq 0} \left\{ \mu_k \left(1 - k^2 \pi \beta \frac{d\Lambda}{\Lambda} \right) - 2\pi^2 \beta \sum_{p \neq 0, q \neq 0} \delta(k - p - q) p q \mu_p \mu_q \frac{d\Lambda}{\Lambda^3} \right\} \\ \times \left(1 + 2 \frac{d\Lambda}{\Lambda} \right) \int e^{-2\pi i k \sqrt{\beta'} \psi'} d^2 x'$$
(93)

となるので、
$$\mu$$
 の変化は

$$\mu'_{k} = \left\{ \mu_{k} \left(1 - k^{2} \pi \beta \frac{d\Lambda}{\Lambda} \right) - 2\pi^{2} \beta \sum_{p \neq 0, q \neq 0} \delta(k - p - q) p q \mu_{p} \mu_{q} \frac{d\Lambda}{\Lambda^{3}} \right\} \left(1 + 2 \frac{d\Lambda}{\Lambda} \right)$$

$$= \mu_{k} - k^{2} \mu_{k} \pi \beta \frac{d\Lambda}{\Lambda} - 2\pi^{2} \beta \sum_{p \neq 0, q \neq 0} \delta(k - p - q) p q \mu_{p} \mu_{q} \frac{d\Lambda}{\Lambda^{3}} + 2\mu_{k} \frac{d\Lambda}{\Lambda}$$

$$\geq t_{k} \otimes z \geq t_{k} \times t_{k} \otimes t_{k} \otimes z \geq t_{k},$$

$$d\mu_{k} = -k^{2} \mu_{k} \pi \beta \frac{d\Lambda}{\Lambda} - 2\pi^{2} \beta \sum_{p \neq 0, q \neq 0} \delta(k - p - q) p q \mu_{p} \mu_{q} \frac{d\Lambda}{\Lambda^{3}} + 2\mu_{k} \frac{d\Lambda}{\Lambda}$$

$$\geq t_{k} \otimes z \otimes z \geq t_{k} \otimes t_{$$

 $d\mu_k = 2\mu_k \frac{d\Lambda}{\Lambda} - k^2 \mu_k \pi \beta \frac{d\Lambda}{\Lambda} - 2\pi^2 \beta \sum_{p \neq 0, q \neq 0} \delta(k - p - q) p q \mu_p \mu_q \frac{d\Lambda}{\Lambda^3}$ $= -(k^2\pi\beta-2)\mu_k\frac{d\Lambda}{\Lambda} - 2\pi^2\beta\sum_{p\neq 0,q\neq 0}\delta(k-p-q)pq\mu_p\mu_q\frac{d\Lambda}{\Lambda^3}$ となる. これは $\Lambda \frac{d\mu_k}{d\Lambda} = -\left(\pi k^2\beta - 2\right)\mu_k - \frac{2\pi^2\beta}{\Lambda^2}\sum_{\substack{p\neq 0, q\neq 0}} \delta(k-p-q)pq\mu_p\mu_q$ E $\Lambda rac{deta}{d\Lambda} = -rac{8\pi^4}{\Lambda^4}eta^3\sum_k k^4\mu_k\mu_{-k}$ が流れの方程式になることを示している. ここで,新し い変数sを $ds = \frac{d\Lambda}{\Lambda}$ として導入すると、2つの方程式は $\frac{d\mu_k}{ds} = -\left(\pi k^2 \beta - 2\right) \mu_k - \frac{2\pi^2 \beta}{\Lambda^2} \sum_{\substack{p \neq 0, q \neq 0}} \delta(k - p - q) p q \mu_p \mu_q$ $\frac{d\beta}{ds}=-\frac{8\pi^4}{\Lambda^4}\beta^3\sum_kk^4\mu_k\mu_{-k}$ となる. さらに $y_k = \frac{\mu_k}{\Lambda^2}$ と新しい変数ykを定義すると、流れの方程式は、 $\frac{dy_k}{ds} = -\left(\pi k^2\beta - 2\right)y_k - 2\pi^2\beta\sum_{p\neq 0,q\neq 0}\delta(k-p-q)pqy_py_q$ および $\frac{d\beta}{ds}=-8\pi^4\beta^3\sum_{\mathbf{k}}k^4y_ky_{-k}$ となる.新しい変数xを $x = 2\pi^2\beta$ と置くと、(x, y)平面内の流れの方程式は $\frac{dy_k}{ds} = -\left(\frac{k^2}{2\pi}x - 2\right)y_k - x\sum_{p,q}\delta(k-p-q)pqy_py_q,$ $\frac{dx}{ds} = -2x^3 \sum k^4 y_k y_{-k}$ と見やすい形になる.

トウモロコシ冠根形成について* Crown root primordia in *Zea Mays*

仁木 輝緒 Teruo Niki** 斉藤 進 Susumu Saito** 森 きよみ Kiyomi Mori*** ダニエル K. グラデッシュ Daniel K. Gladish****

Abstract

Crown root primordia and crown root development were morphologically investigated by serial sections during corn embryogenesis. Primordia were located on the mesocotyls of the embryos of giant corn *Zea mays* L. var. *Cuscoensis* K. (Poaceae) and sweet corn, *Zea mays* L. var. *saccharata*. The water content of seeds was initially 5%. Primordia initiated opposite the peripheral vascular bundles.

The primordia of crown roots were not present on the embryos of seeds of sweet corn collected on 17 June. Though the water content was not measured, it was estimated to be 75-85%. In the seeds of sweet corn collected on 23 September, primordia of crown roots were visible on the mesocotyls of these embryos. These seeds' water content had decreased to 50%. Though embryos were not as well developed as dry seeds, appearance of crown root from seeds was repressed and /or not generated.

It was concluded that primordia will be generated on sweet corn embryos during the period from June-September (while they are drying in the ear), according to typical embryogenesis and development.

Keywords: crown root, embryo, peripheral vascular bundle, root primordium, Zea mays

1. はじめに

植物の根は、どの器官・組織に始原(由来)するかにより 定義すると、3つに分けることが出来る。1)胚発生の過程で 幼根として出現・発育する胚性根…種子根、2)さらにこの根 の中に始原体が形成される根生根……側根、3)茎・葉に始原 体が形成されるのを不定根…冠根(イネ科植物)、である。イ ネ科植物は、種子根は1本で、個体に出来る数百の根は冠根 と呼ばれ、茎を始原とするものである。イネでは冠根は土壌 中の不伸長茎の節・節間から生じ、一定の時期に形成される と報告されている^{8~11)}。そして、冠根の始原細胞(原基)の 出来る時期や冠根が茎から外に出る時期と出葉との間に規則 性があることが明らかにされている。しかし、胚発生のいず れの時期に、初生の冠根始原細胞が生じるのか定かではない。

トウモロコシも同様に冠根を形成する。イネに比して種子 の中の胚は比較的大きいので、解剖学的組織観察には好材料 である^{1.2)}。Avery (1930)、Randolph (1936) は、トウモロコ シの種子中の胚の背根(子葉に接した部位)に、冠根を描い ている^{1.7)}。しかし同じトウモロコシで、受精後の胚発生の過 程を観察していても、冠根始原細胞についての詳述は無い。 また、それ以降、今日まで冠根始原細胞について詳細に調べ た形態学的観察の報告は多くない。

本報告は、今日的な形態観察の手法により、イネ科植物、 特にトウモロコシを材料として、種子胚発生における初生冠 根始原細胞の形成時期を求めようとしたものである。本研究 はその初報である。

2. 材料と方法

種子が大きく、大きな胚を有するペルー産のジャイアント コーン Zea mays L. var. Cuscoensis K. (Poaceae) と、現在一 般的に食されているスイートコーン Zea mays L. var. saccharata (種子・胚は小さい)を用いた。

1リットルトールビーカにバーメキュライト、そして蒸留 水 375mLを加え、アルミホイルで上部を覆った。オートク レーブで90分加熱滅菌を行い、これを培地とした。

種子を1%次亜塩素酸水溶液で5分間滅菌し、培地に播種した。発芽・発育条件は連続暗黒、温度は20℃である。

播種後 0、3、24、72時に種子を採取し、胚を剖出し、胚の 外観観察を行った。光学顕微鏡観察用の試料は、各時間に採 取、胚を剖出し、4%パラホルムアルデヒド水溶液で、室温・ 一晩の固定処理を行った。また種子登熟前の胚発生の過程を 観察するために、6、9月期のスイートコーンを得、種子から 胚を剖出し、同様に固定を行った。

固定、水洗後アルコールで脱水した試料は、テクノビット 7100樹脂に包埋した。薄切片試料は、ライカミクロトームで、 2.5μm厚を得、0.5%トルイジンブルー水溶液で染色をし、ラ イカ光学顕微鏡(DMLB)で観察、キャノンデジタルカメラ 5Dマーク IIで写真撮影を行った。

種子の含水率の測定

スイートコーン種子の含水率量は、種子35粒を80℃で2日 間乾燥させ、重量を測り含水率を求めた。

なお、本報告で記述する胚の組織用語は下記の模式図に示す ものである。

^{*} 原稿受付 平成 25 年 10 月 22 日

^{**} 工学部基礎教育系列

^{***} 工学部機械システム工学科

^{***} マイアミ大学生物学科



Fig 1 Diagram of a seed (a) and embryo (b) of *Zea mays*.子葉 (Cotyledon, Cot), 鞘葉 (Coleoptile, Co-p), 中胚軸 (Mesocotyl, Mc), 種子根 (Primary root, R), 第一節 (Scutellar node, Scn), 根鞘 (Coleorhiza, Co-r), 根冠 (Root cap, Rc), 維管束 (Vascular bundle, Vb). (Figure redrawn after Avery, 1930).

3. 結果

3.1 播種後の冠根形成の外観的観察

胚からの冠根の出芽は、ジヤイアントコーン、スイートコーンとも、外観的には播種24時間で観察できる(Fig. 2、矢印)。



Fig. 2 Face view of an embryo of sweet corn. (a) before sowing;(b) 24 hr after sowing. Arrow indicates a crown root primordium. St: stem, R: root.



Fig. 3 Mesocotyls of corn before sowing. (a) and (b), longitudinal and cross section, respectively, of giant corn embryos; (c) and (d), longitudinal and cross section, respectively, of sweet corn embryos. Arrows indicate crown root. Arrowheads indicate vascular bundles. St: stem, R: root. Co; cotyledon.

観察される冠根数は1~2個。次に種子の皮を破って、出芽 (冠根)として観察できるのは72時間後であった。

3.2 切片観察による種子中の胚の形態

播種0時間の胚組織・細胞は収縮(脱水)状態にあり、固 定液の浸透により組織・細胞は固定されることになる。乾燥 試料への固定液・樹脂浸透、薄切はしばしば困難である(Fig. 3a-d)。すなわち組織及び細胞質は収縮状態を示しているの で、微細構造の観察は困難である。薄切片による胚の内部観 察では、ジャイアントコーン、スイートコーンとも、この時 期において、すでに冠根を観察できる(Fig. 3)。しかし、組織 細胞に細胞分裂像は観察できなかった。

3.3 播種3時間後の胚観察

播種3時間後、冠根は、辺周部維管束環の外側に接した節 部(第一節部)・節間の上位部に、複数観察できる。冠根始原 細胞は辺周部維管束環の外側の部位である(Fig. 4b, *)。し かし、脱水状態なので辺周部維管束環部位の細胞構造は明瞭 ではない。また周部維管束環細胞群、始原細胞群での細胞分 裂像は観察できなかった。根としての基本構造が出来ている のが分かる(Fig. 4a-d)。

3.4 播種 24 時間後の胚観察

播種24時間後ではさらに冠根の数増加・伸長しているのが 観察される(Fig. 5)。冠根は中胚軸の辺周部維管束環の外側 の細胞群を始原部位とし、伸張方向は茎頂方向(胚軸に対し て上方)で、子葉の結合した上胚軸近くの部位である。胚の 横断切片像には複数の冠根が観察できる(Fig. 5b)。すなわ ち冠根は辺周部維管束環から形成・伸長し、横断切片像、ま たは縦断切片像が複数観察できる。しかし、この時期におい ても辺周部維管束環群、始原細胞群での細胞に細胞分裂像は 観察できなかった。



Fig. 4 Mesoocotyl of embryo in corn embryo 3 hours after sowing. (a) longitidual section of a giant corn embryo, (b) high magnification of the crown root in (a). Some epidermal cells and cortical cells of the crown root were highly plasmolysed (Double arrow). *in (a); first node. (c) cross section of sweet corn embryo, (d) high magnification of a crown root in (c), Arrows indicate crown root; arrowheads indicate vascular bundles. Double arrow in (d) shows collapsed cells near to the root cap of a crown root. St: stem, Co; cotyledon, Co-p; Coleoptile, Rc; Root cap, *in (b); primordial cells.



Fig. 5 Sections of giant corn embryo 24 hr after sowing. (a) longitudinal section, (b) cross section. Arrows indicate crown root; arrowheads indicate vascular bundles. St: stem, R: root.



Fig. 6 Sections of embryo on sweet corn collected on 17 June 6a; longitidual section, 6b; cross section. Arrows and arrowheads show vascular bundle, * in (6a); first node, Co; cotyledon.



Fig. 7 Sections of embryo on sweet corn collected on 23 September. 7a; longitidual section. 7b; high magnification figure of Fig. 7a Arrow shows crown root. Arrowhead show vascular bundle. Double arrow shows collapse of cotyledon near to crown root tip. * in (7b); primordia of crown root. St; stem.

3.5 種子登熟前の胚の観察

食しているスイートコーンは6~9月期のものである。6~ 8月期の胚は、種子胚乳部位から容易に分離する。Fig.6は6 月17日採取したコーンの胚観察像である。第一節部(Fig.6a, ※)から茎頂までの部位に維管束系は明瞭であるが、冠根始 原体および、冠根は観察できない。

9月23日採集したトウモロコシは、種子登熟・乾燥過程に ある。この時期の胚には、中胚軸部位辺周部維管束環の外側 に冠根の始原体を観察できる(Fig.7b、*)。始原体細胞群 にはいくつかの形態的特徴を見る事が出来る。それらの特徴 は、1)維管束系細胞群の増殖、2)維管束群に囲まれた部位 の細胞増加、3)それら細胞群内の顆粒の存在、4)初生期に おいて冠根と根冠の境界が不鮮明、5)冠根先端部に接した子 葉組織細胞(中胚軸)の崩壊(Fig.7b、二重矢印)である。

観察される冠根の内部形態は基本的には種子根の形態と同 じである。なお観察した播種0~24時間においても中胚軸組 繊細胞群に細胞分裂像は観察できなかった。

3.6 採集種子登熟前の含水率

受精後の種子胚の発生段階を知る一指標として、種子の含 水率(w/w%)を調べた。

Water content (w/w%)			
17 June	23 September	(dry seeds)	
About 80*	50	5	
*estimated value (data were not collected)			

6月17日の含水率は計測しなかったが、85~75%程度の含 水率と推測される。種苗会社から入手した種子の含水率は5% であった。

なお、播種後の発芽に要する日数は、5%含水率種子(種苗 会社より入手)では、3日目に100%の出芽を示し、冠根の出 芽も3日目に観察された。50%含水率の種子(9月23日採集) では、4日目に約50%の種子根の出芽を観察し、冠根は10日 後で10~20%の出芽率であった。

4. 考察

種子の含水率は通常10%以下である¹³⁾。種苗会社等から入 手したスイートコーンの含水率は5%程度であった。すなわ ち、種子は乾燥状態にある。播種後0時間というのは、種子 を直ちに固定液に入れ、固定操作を行ったものである。この 場合、固定作用が働く前に、固定水溶液の浸透というプロセ スが入る。つまり、固定作用が始まる前に吸水というプロセ スが入り、若干の時間差が生じることになる。この事は、試 料が極度に脱水乾燥状態にある場合、固定液の浸透は時間の 長短に関わらず問題となる。生じる問題点は、①固定作用が 細胞の原形質分離を起こす、②固定作用の不十分さは試料の 脱水・樹脂浸透を不完全にする、③その結果、良い切片が得 られず細胞の構造観察を困難にする、等である。

さて、ジャイアントコーン(データ未掲載)、スイートコー ンともに、播種24時間において、外観から胚に冠根の存在を 観察できる。この事は、冠根の早い時期での存在を示唆して いる。切片像で播種0時間のジャイアントコーン、スイート コーンを観察したとき、中胚軸に冠根を認めることが出来た。 しかしながら、細胞構造を観察する良好な切片は得られず、 あくまで得られた像での理解となる(Fig. 3)。播種3時間に おいてもほぼ同様な状態であるが、3時間の播種(吸水)時 間は、固定作用を少し容易にしている。すなわち、強度の脱 水・乾燥状態から種子が吸水を可能な状態になり、固定液の 浸透・固定作用が比較的スムーズに進行している。したがっ て、組織構造・細胞構造の固定上のアーティファクト変化が 少なく、観察が比較的容易となる(Fig. 4)。中胚軸に沿って 複数の冠根が観察でき、冠根の始原部位が辺周維管束の外側 にあるのが示される(Fig. 4a-b)。

観察される冠根がいつ生じたかを考察すると、冠根の表皮 細胞は原形質分離(Fig. 4b, 二重矢印)を起こしていること から、固定が行われる時点において冠根が存在していること を示唆する。つまり、組織細胞は脱水・したがって強く収縮 している状態で、固定作用を受けると、細胞壁は固定作用を 受けないから細胞質から乖離し、アーテイファクト的に原形 質分離を起こす。この現象が生じる事は、固定を行う前に、 冠根がすでに存在していたことを示すことになる。冠根は種 子の中にすでに形成されていて、播種に伴う吸水により伸長 が進行すると考えることが出来る。

播種24時間では冠根は数も伸長も顕著に観察される。冠根 数の増加・伸長は、始原細胞(体)の増加、細胞分裂を必要 とするが、播種0~24時間において冠根、及び始原細胞群に 細胞分裂像を観察できなかった。したがって、初期の冠根伸 長は、種子根の伸長と同様、細胞の吸水・膨大によるものと 考えられる。

播種前に冠根が存在するとなると、冠根はいつ中胚軸に形 成されるのか。Fig. 6 (6月17日採種)では中胚軸に冠根及 び冠根の始原体は観察できない。Fig. 7 (9月23日採種)で は冠根の始原部位が観察できる (Fig. 7b, *)。このことから、 この時期の胚発生・充実の中で冠根始原体が形成されるもの と考えられる。イネでは冠根は辺周維管束環の外側から生じ ると報告されている¹⁰⁾。本研究で用いたコーンでも一致した 観察である。しかし新田らは、冠根原基に分化する辺周維管 束環の外側に接した組織の冠根原基はあらゆる横断面で観察 できることを報告しているが、第一"要素"根(冠根)での 特定は困難と述べている¹⁰⁾。同じくイネを用いて、川田らは 冠根始原体を観察し、第一節 (First node)、第二節、第三節 の辺周維管束環に冠根始原体部を記載しているが、詳細な観 察は示していない^{&9}。本研究においては節・節間の始原体形 成位置に深く観察しなかった。

本研究では、トウモロコシを材料とし、種子根先端細胞群 において観察された顆粒を含む細胞の特徴¹²⁾と同じ細胞群を 辺周維管束環の外側始原細胞群に観察した。顆粒を多く含む 細胞は生理的活性の高いことを示唆しており¹²⁾、これら冠根 始原細胞群も生理活性が高いと思われる。

種々の根は共通した形態的特徴を持ち、胚性根、根生根に ついては、よく調べられている^{3~6)}。しかし、冠根の形成、そ の始原体についての報告は多くない。イネの種子根はすぐ退 化し、冠根に置き換わる。

トウモロコシの種子根は冠根出芽後においても成長し、側 根も形成させる。Randolph⁷はトウモロコシを用いて受精後 の胚発生過程の観察を詳細に行っているが、胚発生の過程に おける冠根形成についての記述は多くない²)。また播種24時 間後においてトウモロコシの中胚軸に冠根を描いているが、 吸水前の種子胚には描かれていない⁷⁾。

本研究では、播種0時間において、すでにジャイアントコー ン、スイートコーンとも冠根を有することを観察した。この 事は種子乾燥に入る前に、冠根始原体、冠根の形成が起きて いることを示す。食に供する6~9月期のスイートコーンの胚 観察を行い、胚の充実・種子乾燥のプロセスで冠根始原体が 出来ることが示された。トウモロコシの種子休眠は品種によ り、異なることが示されている¹³⁾。種子休眠胚発生の充実プ ロセスステージは種々の指標により測ることが出来ると思わ れる。本研究では、一指標として含水率の変化を調べたが、 含水率10%の時に始原体が観察された。胚の充実、始原体形 成時期を知るためには、播種時の種子根の必要とする出芽日 数、冠根の出芽日数なども、調べる必要があろう。

また、冠根形成の初期に、冠根の先端域に接した中胚軸細 胞群が崩壊することは、種子根形成時、側根形成時に見られ る根鞘の崩壊、皮層細胞の崩壊の形態変化と比して、興味深 い。

謝 辞

本研究は平成25年度拓殖大学理工学研究所共同研究の助成 を受けて行われました。

参考文献

- Abbe, E.C and.Stein, O.L 1954. The growth of the shoot apex in maize: embryogeny. Amer. J. Botany Vol.41, No.4, pp. 285-297
- Avery, G.S 1930 Comparative anatomy and morphology of embryos and seedlings of maize, oats, and wheat. Bot. Gaz. 89: 1-39.
- Clarke, K.J., McCully, M.E., and Miki, N.K. 1979. A developmental study of the epidermis of young roots of *Zea mays* L. Protoplasma 98, 283-309.
- Clowes, F.A 1978 Origin of the quiescent centre in Zea mays New Phytol 80, 409-419.
- Esau, K 1977. Anatomy of seeds plants, 2nd ed. John Wiley & Sons Inc., New York.
- 6) Fahn, A 1990. Plant Anatomy 4th ed., Pergamon.
- Randolph, L.F 1936 Developmental morphology of their caryopsis. Journal of Agricultural Research 53: 881-916.
- 8) 川田信一郎・原田二郎 1972. 日作紀 41: 296-309.
- 9) 川田信一郎・原田二郎1977.水稲冠根の始原体における 直径の形成過程について 日作紀46(39): 423-430.
- 新田洋司・山本由徳・一柳尚輝1996. 水稲の冠根原基の 形成に関する研究 日作紀65: 465-472.
- 新田洋司・山本由徳・永見隆司1998. 水稲の主茎及び分 月の不伸長茎部における冠根原基の形成 日作紀67:543-548.
- 12) T. Niki, S. Saito and D. K. Gladish. 2014 Granular bodies in root primary meristem cells of *Zea mays* L. var. *Cuscoensis* K. (Poaceae) that enter young vacuoles by invagination: a novel ribophagy mechanism. Protoplasma DOI10.1007/s00709-014-0622-3
- 13) 戸澤英男 2005. トウモロコシ 農文協

フォトダイオード・センサーによる多波長大気光観測 Airglow observation of multiple wave lengths by using photodiode sensors

巻田 和男 Kazuo MAKITA*
高野 元春 Motoharu TAKANO*
星野 光男 Mituo HOSHINO*
加藤 泰男 Yasuo KATO**
野澤 宏大 Hiromasa NOZAWA***

Abstract

Airglow observation for multiple waves length is carried out by using photodiode sensor at Southern Space Observatory (SSO), Brazil during February 2013. These wavelengths are 560nm(O), 568nm(Back ground), 589nm(Na), 610nm(Back ground), 632nm(O), 855nm(Back ground), 870nm(O_2), 890nm(OH). Among them, OI(630nm) intensity shows large variation. It seems similar phenomena observed in the last times.

In this time we could not found any clear variations for 589nm(Na), 870nm(O2), 890nm(OH) wave lengths. So we hope to observe the variation of other wave lengths.

Keywords: Airglow, Geomagnetic Anomaly, Photodiode.

1. はじめに

2年前にシリコン・フォトダイオード・センサーによる大 気光測定器を開発し¹⁾、これを用いて磁気異常帯でテスト観 測を行ったところ、大気光現象を観測する事が可能であるこ とがわかった。ただ、そのテスト観測時には632nmと610nm の2波長のみの観測であった。その後、同様なシステムを用 いて、いくつかの波長域に対し大気光現象の観測を行うこと を計画し、2012年8月にブラジル南部宇宙観測所(Southern Space Observatory; SSO)を訪れ、多波長域での大気光観測 を実施した。しかしながら、得られた観測データはバックグ ラウンドのノイズが高く、信号が不安定で良好なデータを得 ることができなかった。そのため2013年2月に再度現地を訪 れ、増幅器や配線の変更を行った結果、良好なデータを収集 することが出来たため、その結果について報告する。

2. 多波長フォトダイオード測定器

今回測定した波長は560 nm(O), 568 nm(Back ground), 589 nm(Na), 610 nm(Back ground), 632 nm(O), 855 nm(Back ground), 870 nm(O₂), 890 nm(OH) の8 波長である。各々の波 長は2つの酸素原子、ナトリウム、酸素分子、OHの特徴的な 5つの発光波長である。また、同時にバックグラウンド強度 を測定するため、発光波長の周辺域で3 波長を選び測定した。これら8 波長について標準光源によるキャリブレーションを 行った。

Fig.1は増幅器(AMP)の出力特性を示した図である。こ の図は568nmのフィルターを測定器に装着し、標準光源を照 射しながらAMPの出力レベルを10分間モニターしたもので ある。データからの出力レベルはおよそ500mVであるが、出 力レベルの変動幅はAD変換のビット幅±2mV程度で、S/N 比でおよそ100以上であることがわかった。このAMPはセン サーの出力電流を1000M Ωの負帰還抵抗で電圧に変換し、更 に1000倍増幅して、1pAが1Vになるように設計されている。 AMP後の信号は10mのケーブルで室内に導き、バッファ AMP を介しデータロガーに入力し、最終的にパソコンに取り込ん でいる。この結果から検出された微弱電流は、外部の影響を 受けることなく安定に増幅されていることがわかる。なお、 現在使用しているデータロガーのADコンバーターは12ビッ トであるが、それを24ビットに変えれば、AMP素子の限界 値であるfA領域まで測定可能と思われる。



Fig. 1 Characteristics of Amplifier used for photodiode detector

Fig. 2は560 nm, 568 nm, 589 nm, 610 nm, 632 nm, 855 nm, 870 nm, 890 nm の8 つのバンドパス・フィルターの透過曲線 を示している。各フィルターの透過率に標準光源の絶対光度 をかけて、各々の感度特性 (Rayleigh/Volt; R/V) を求めた。 なお、使用したフィルターはエドモントン社で販売している 量産タイプのため²⁰、透過曲線は以前に観測で使用したもの とほとんど違いはなかった。このような計算から求められた 感度特性は、560 nm では856 R/V, 568 nm では990 R/V, 610 nm では 1048 R/V, 632 nm では916 R/V, 855 nm では 49.7 R/V, 870 nm では 39.9 R/V, 890 nm では 32.8 R/V である。

原稿受付 平成25年9月17日

 ^{*} 基礎教育系列
 ** 名古屋大学太陽地球環境研究所

^{***} 鹿児島高等工業専門学校



Fig. 2 Transmission rate for 560nm, 568nm, 589nm, 610nm, 632nm, 855nm, 870nm and 890nm wave length filters

これら8波長のフィルターを装着したフォトダイオード測定 器をブラジル南部宇宙観測所 (Southern Space Observatory; SSO) に設置し、大気光観測を実施した。Fig. 3はSSOの光 学観測棟屋上に設置した写真である。フォトダイオード測定 器からの信号は室内に置かれたデータロガーに導かれて、PC 経由でハードディスクに記録される。PCの時刻については、 GPS信号を受信し、GPS時刻とPC時刻が同期するようにし ている。



Fig. 3 8 waves length photodiode detectors installed at SSO

3. 多波長フォトダイオードによる大気光観測

Fig. 4はSSOで2013年2月7日23時09分28分から2月8日 08時10分までの期間に観測されたデータを示している。この 日は一晩中、雲がほとんどない快晴夜であった。なお、時刻 は世界時(Universal Time; UT)で表示している。SSOの地 方時(Local Time; LT)と世界時との差は3時間、すなわち、 LT=UT-3hの関係にある。この図で示したデータは生デー タであり、出力値はボルト(V)で示している。これによると



Fig. 4 Raw data of 8 waves length obtained at SSO on 07-08, Feb. 2013

OH (890nm) が大変強く、O₂ (870nm) やバックグラウンドの 波長 855nm も強い。また、OI (630nm) も顕著な変動を示し ている。他方、Na-D (589nm)やOI (557.7nm) は一晩を通し て、顕著な変動は見られていない。

Fig. 5 は OI (557.7nm), Na-D (589nm), OI (630nm), O₂ (870 nm), OH (890nm) の5 波長について、バックグラウンド強度 を差し引き、キャリブレーション結果より、Rayleigh 値に換 算した値を示している。すなわち、OI (557.7nm; 560nm-668 nm), Na-D (589nm; 589nm-568nm), OI (630nm: 632nm-610 nm), O₂ (870nm; 870nm-855nm), OH (890nm; 890nm-855 nm) である。この日のデータを見ると、赤線のOI (630nm) が大きな変動を示していて、夕方から夜中にかけて 50R以上 の2回のピークが見られ、日の出前にもピークが見られる。 また、青線のOH (890nm) や緑線OI (557.7nm) は50R 程度で 推移している。他方、橙線のNa-D (589nm) と茶線のO₂ (870nm) については 50R 以下と弱く、顕著な変動は見られな かった。



Fig. 5 Calibrated 5 waves length signal subtracted from background intensity

なお、観測目的の発光波長とバックグラウンド強度との差 をとることにより、曇天の場合でも発光波長の強度を抽出で きることを Appendix(参考資料) I で示してある。

ところで、2011年から2013年までの3か年間分のデータ (SSOの24日分の観測データ)について解析を行った。それ らのデータはAppendix(参考資料)IIに示してあるが、そ の中で2011年、2012年、2013年に観測された特徴的な現象 をFig. 8a, b, c にそれぞれ示してある。Fig. 8aは2011年3月 3日、8月30日、9月3日に観測された3日分の例を示してい



Fig. 8a Intensity of 630nm increases at 06h UT and decreases at 08h UT.

る。この例では6h UT (3h LT)から輝度の上昇が始まり、7h 前後に60R程度のピークが見られ、それ以後減少し、8h (5h LT) 過ぎにバックグラウンド・レベルになる。

Fig. 8bは2012年2月18日、2月20日、2月22日に観測さ れた3日分の例を示している。この日はバックグラウンド・ レベルが異なり、輝度変動も同じでないが、6h UT 前後に上 昇し、7h頃に100R 程度のピークが見られ、8h UT 頃にバッ クグラウンド・レベルになる。ただし、2月20日はピークが 顕著に見られない。



Fig. 8b Intensity of 630nm increases at 06h UT and decreases at 08h UT except 20130220 event

Fig. 8cは2013年2月5日、2月6日、2月8日に観測された 3日分の例を示している。この例では。5h UT (02h LT) 前後 に輝度が上昇し、6h から 6h30m 頃に 100R 程度のピークが見 られ、8h UT (05h LT)にバックグラウンド・レベルに戻る。



Fig. 8c Intensity of 630nm increases at 05h UT and decreases at 08h UT.

Fig. 9は鹿児島高専(鹿児島の地方時 LT = UT + 9h)で観 測された2012年2月19日、2月26日、3月26日の3例の観測 データを示してある。これによると、日によってバックグラ ウンド・レベルは異なっているが、いずれも17h - 18h UT頃



Fig. 9 Intensity of 630nm increases at 17h UT (02h LT) and decreases at 20h UT (05h UT).

(02h – 03h LT) に輝度が上昇し、19h UT に50 から100R 程度 のピークを示し、20h UT (05h LT) にバックグラウンド・レ ベルになる。SSOで観測された現象は、鹿児島においても夜 明け前に630nmnの輝度上昇が見られることがわかった。

SSOおよび鹿児島の観測データにおいて、630nm輝度が夜 明け前05から8UT(地方時で02h-05h LT)にかけて、60R-100R程度まで上昇し、日出前にバックグラウンド・レベルに 戻ることが共通に見られた。このような夜明け前に630nmの 輝度上昇が見られる現象は1999年にSSOでフォトメータ観測 を開始して以来、たびたび観測される現象であり、2003年か ら行った沖縄での光学観測においても同様な結果が得られて いる^{3).4)}。

この夜明け前に見られるピークには季節変動も見られるが³、 それと共に、同じ観測期間中においてピークが見られない日 がある。Fig.9 は夜明け前にピークが見られなかった 2012年 2月24日、8月15日、8月17日の3例を示している。これら の日には06h-08h UTに630nmの輝度上昇が見られていない。



Fig. 10 Intensity of 630nm are not increased during 06 - 08h UT.

Fig. 10のように朝方に630nmの輝度上昇が見られる場合と 見られない場合について、中低緯度の地磁気擾乱の指数 (Kp) を調べてみたが、顕著な差は認められなかった。一般に630nm の輝度上昇は酸素原子の密度上昇に関係していると思われる が⁵⁾、現在のところ酸素密度についての観測データがないた め、その原因については不明である。

4. まとめ

商業用に販売されているシリコン・フォトダイオードとフィ ルターを組み合わせた小型で安価な光学測定器により多波長 域での大気光観測を行った。観測期間中、夜明け前に630nm の輝度上昇が見られる現象がたびたび観測された。この現象 はこれまでのフォトメータ観測により得られた結果と同じで、 シリコン・フォトダイオードによる大気光観測が有効である ことを実証することが出来た。今回はOI (630nm) 以外の波長 域で特に目新しい現象は観測されなかった。今後、観測を継 続することにより、OI (557.7nm)、Na-D (589nm)、O₂ (870nm)、 OH (890nm) の波長域での現象も観測できるものと期待して いる。 フォトダイオード測定器に関しては、安定して観測データ の収集ができるようになったが、現象の輝度変化パターンを より詳細に明らかにするために、現在の視野角をもう少し狭 くした方が良い。これまでのデータを見る限り、視野角を数 度程度に狭めても増幅器の時定数を長くすることで解析可能 なデータが得られると思われる。また、OI (630nm)に関して は、曇りであっても、背景光観測の出力との差分により、雲 の影響をかなり取り除けることも判明した。実際に、33日間 の観測日 (曇天の日も含む)のうち、OI (630nm)のデータに ついて解析が不可能であった日は2日間のみであった。他方、 OI (557.7nm)のデータ出力は雲の影響を受けないという、説 明し難い現象も見られた。更に、他の波長域での雲の影響に ついては、各フィルターの波長により異なるため、今後、更 に検討を加えていく必要がある。

謝辞

本研究は拓殖大学工学部・採択型研究費の助成を受けて行 いました。また、南米での研究調査は拓殖大学・短期留学制 度を利用させていだきました。お世話いただいた関係各位に 対し、心よりお礼申し上げます。

参考資料 I: 曇天時に2波長の観測データから、630nmの 輝度変動を抽出

2013年2月5日夜から2月6日朝にかけて観測された632nm (630nm波長用)と610nm(バックグラウンド波長用)の強 度変動をAppendix Fig.1に示している。図によると2月6日 6時45分頃から、2波長共その強度が時間的に激しく変動し ているのが見られる。これは天頂付近を雲が絶え間なく通過 しているために起きている。





Appendix Fig. 2にはFig. 1で示したデータをもとに、 632nmから610nmのバックグラウンド強度を差し引き、物理 量に変換したものである。この図を見ると、2月6日6時45 分頃から見られていた時間的に激しく変動している現象が消 えている。つまり天頂付近に雲が存在している状況下で観測 されたデータに対し、2波長間で差をとることにより、雲の 影響を取り除いた630nmのみの輝度変動を抽出することがで きることを示している。



Appendix Fig. 2 Luminosity of OI (630nm) subtracted from background intensity

参考資料 II:フォトダイオード・センサーを用いた大気光OI (630nm) 観測データ

2011 年から 2013 年にかけて、ブラジル南部宇宙観測所 (Southern Space Observatory; SSO) および鹿児島高専で観 測された大気光データについて、Appendix Fig. 3-8 にまと めてある。



Appendix Fig. 3 2011 年 3 月にブラジル南部宇宙観測所 (SSO) で観測されたデータ。



Appendix Fig. 4 2011年8月-9月にブラジル南部宇宙観測所(SSO) で観測されたデータ。



Appendix Fig. 5 2012年2月にブラジル南部宇宙観測所 (SSO) で観測されたデータ。



Appendix Fig. 6 2012 年 8 月にブラジル南部宇宙観測所(SSO) で観測されたデータ。



Appendix Fig. 7 2013 年 2 月にブラジル南部宇宙観測所(SSO) で観測されたデータ。



Appendix Fig. 8 2012年2月に鹿児島高専で観測されたデータ。

参考文献

- Makita, K., M. Takano, M. Hoshino and Y. Kato, Development of airglow detector by photodiode and observation data. Bulletin of Science and engineering Takushoku Univ. Vol.12, No.1, p41-44, 2011.
- 2) Edmund Optics, Japan, http://www.edmundoptics.jp
- Makita K., Study of Geomagnetic Hole, Natural Science Series of Takushoku University 7, p1-167, 2007
- Makita, K., M. Hoshino, Y. Masuda and K. Shiokawa, Optical observation at Okinawa, Bulletin of Science and engineering Takushoku Univ. Vol.9, No.1, p19-26, 2004.
- Sobral, J.H.A, H.C. Carlson, D. T. Farley and W.E. Swartz, Nighttime dynamics of the F region near Arecibo as mapped by airglow features. J. Geophys. Res., 83, 2561, 1978

衛星観測による南大西洋磁気異常帯の高エネルギー電子降下の長期変動と 地上IRIS観測による電離層CNA現象の検証*

Long-term Variations of High-energy Electron Precipitation in the South Atlantic Magnetic Anomaly by Satellite Observations and Verification of Ionospheric CNA Phenomena by the Ground-based IRIS Observations

西野 正徳 Masanori NISHINO** 加藤 泰男 Yasuo KATO** 巻田 和男 Kazuo MAKITA*** Nelson Jorge Schuch****

Abstract

Adding the previous analysis of high-energy electron fluxes (>100 keV) in the South Atlantic Magnetic Anomaly (SAMA) during 1995-2004 years from the NOAA satellite, we have analyzed long-term variations of high-energy electron fluxes during 1987-2004 years in the solar activity cycles 22-23. Comparing the variations with geomagnetic activity indices Dst, we have obtained following characteristics in active solar phases: In the solar maximum phase, electron fluxes increased largely stepwise associated with strong geomagnetic storms occurred in the Southern fall (around April), followed by gradual decreases through winter (around July) and spring (around October), thereafter increased moderately in summer (around December). In the solar declining phase, electron fluxes were enhanced stepwise or gradually associated with geomagnetic storms in fall from higher background fluxes remained in the maximum phase, showed a peak in winter, followed by gradual decrease in spring and summer, in case of the solar cycle 22. In case of the solar cycle 23, the electron flux peak in winter was further enhanced associated with very strong geomagnetic storms in spring and summer. The maximum enhancement ceased through gradual decrease during 1.5 years. It is thus concluded that electron flux increase in the SAMA region basically depends to occurrence frequency and intensity of geomagnetic storms. However, it is remarked that the electron flux increase becomes larger in the solar declining phase than in the maximum phase, due to higher background fluxes remained in the maximum phase. Referring the above long-term variations, we have verified unusual cosmic noise absorption (CNA) phenomena observed by the IRIS associated with the strong geomagnetic storm on April 8-14, 2001. CNA intensities and motion of their images observed in the evening to night hours on April 10-12 corresponded evidently to increased electron fluxes in the SAMA observed by the simultaneous NOAA satellites, identifying the "Storm CNA".

Keywords: South Atlantic Magnetic Anomaly (SAMA), Satellite high-energy electron fluxes, "Storm CNA" verification by the IRIS

1. はじめに

地球の磁力線で囲まれた空間領域を磁気圏と呼ぶが、磁気 圏外部から数10keV以上の高エネルギー粒子が流入して、内 部磁気圏には高エネルギー粒子が充満している。内部磁気圏 は、地球に遠い側に放射線帯(バンアレン帯)の外帯(地球 半径の3-6倍)、近い側に放射線帯の内帯(地球半径の1.2-2.5倍)が存在し、これらの間には電離圏起源の数eVの低エ ネルギープラズマ圏のスロット領域が存在する(Fig. 1)。

放射線帯外帯から内帯に侵入した高エネルギー粒子は地球 磁場に捉えられ、ジャイロ運動をして磁力線に沿って南北半 球を往復しながら(ミラー運動)経度方向にドリフト周回す る。高エネルギー粒子はドリフト周回しながら、世界で最も 弱い磁場強度(22,568 nT)¹⁾の南大西洋磁気異常帯(South Atlantic Magnetic Anomaly,略してSAMA)上空の電離圏下 部(~100 km)にまで降下することが理論的に提唱され²⁾、 実験的には、350 kmから850 kmの高度を周回飛行する日本 の低高度軌道衛星OHZOLAによってSAMA領域への高エネ ルギー粒子降下が確認された³⁾。このような高エネルギー粒 子の降下はSAMA領域上空を飛翔する科学衛星や実用衛星



Fig. 1 Schematic diagram of solar wind-magnetosphere system (after "What is the Radiation belt?" booklet published by STEL Nagoya University)

^{*} 原稿受付 平成25年9月17日

^{**} Nagoya University, STE Lab.

^{***} Takushoku University

^{****} INPE Southern Space Center
などの搭載計器に誤動作や動作不良の障害を及ぼすことが報 告されていて⁴⁾、今日の衛星時代では深刻な社会問題となっ ている。このような被害の軽減のために、近年、「宇宙天気予 報」の研究が進展し、予報の情報が公開されている。我々は、 SAMA 領域電離圏への高エネルギー粒子(電子)の降下を地 上で検出する目的のために、電子降下に起因する電離圏の電 子密度の増加を、宇宙から到来する銀河電波雑音(38.2 MHz) の電離層吸収量(CNA)によって2次元測定するイメージング リオメータ(IRIS)観測装置を、SAMA領域の中心に近いブ ラジル南西部のサンタマリア(SMR, 29.4°S, 306.2°E)に1999 年に設置して観測を開始した⁵⁾。

IRIS装置を用いた初期的な観測結果として、2000年7月に 発生した巨大地磁気嵐 "Bastille Day storm" に伴われた CNA 現象を観測し、"Storm CNA"と同定した⁶⁾。しかし、連続観 測データの解析結果、静かな、あるいは弱い地磁気活動にお いても電離圏固有の擾乱に起因するCNA現象が多く観測さ れ、"Storm CNA"との判別が問題となった。この問題を調査 するため、太陽活動極大期の2000-2001年においてSAMA領 域上空を通過する米国の低高度軌道衛星NOAA-14で観測さ れた高エネルギー電子 (>100 keV) のフラックスデータと地 上IRIS観測から得られた同時CNAデータを比較して、強い 地磁気嵐の発生に伴ういくつかの "Storm CNA" を検証した7)。 さらに、この問題の解明のためには、太陽活動周期程度の長 期にわたる高エネルギー電子フラックスの変動特性を理解す ることが重要であると考え、まず、第23太陽活動周期の10 年間(1995-2004年)に亘るNOAA-14衛星の高エネルギー 電子データを解析した⁸。この解析では、太陽活動周期を極 小期、上昇期、極大期、下降期の4つの期間に分けて電子フ ラックスの変動特性を得て、地磁気活動との関係を調べた。 この中で顕著な特性は、太陽活動の極大期から下降期では強 い地磁気嵐の発生に伴って電子フラックスが増大すること、 さらに注目する特性は、下降期において強い地磁気嵐の発生 に伴って電子フラックスが極大期より多量に観測され、元の 静穏なフラックスに戻るまでに約1年半要したことである。 また、50イベントの強い地磁気嵐に伴って観測された電子フ ラックスが地磁気活動度に比例する関係を見出し、SAMA領 域電離圏への高エネルギー電子降下の物理機構は、磁気嵐に ともなって内部磁気圏内で発生する ELF-VLF 周波数帯電磁 波動 (プラズマヒス) と高エネルギー電子との波動粒子相互 作用が卓越することを示唆した。しかし、この太陽極大期か ら下降期の顕著な特性を一層明確にするには、さらに長期に わたる解析が必要であると考え、第22-23太陽活動周期の18 年間(1987年-2004年)のNOAA衛星の電子データを解析 した。本稿では、この18年間の高エネルギー電子フラックス の長期変動の特性を記し、地磁気活動との関係を明確にする。 次に、この長期変動の特性を参考に、太陽極大期の2001年 3-4月に発生した強い地磁気嵐に伴って観測された衛星電子 フラックスデータをIRIS装置で観測された同時CNA現象と 比較して "Storm CNA"を検証する。

2. NOAA衛星の高エネルギー電子データの解析

NOAA 衛星は815 km から870 km の電離圏高度を地球一周 102分で南北方向に周回飛行する低高度軌道衛星で、搭載さ れている粒子観測センサー (MEPED) は、地球中心方向(0 度)と、これに直角の方向(83度)に向いていて、高エネル ギー電子、及びプロトンのフラックスが1分毎に計測され、 カウントレート (counts/sec) として Web で公開されている?)。 本解析では、NOAA衛星シリーズの中のNOAA-10(1987-1991年)、NOAA-12 (1991-1994年)、NOAA-14 (1995-2004 年)を用いる。地磁気緯度の低いSAMA領域では、2方向セ ンサー共磁力線に捕捉された高エネルギー電子を計測してい ることになる¹⁰⁾。2方向センサーからの電子フラックスデー タを抽出した結果、直角方向のフラックスは地球中心方向の フラックスに比べて通常1-2桁程度大きいので、本解析では 直角方向の高エネルギー電子のフラックスデータ (> 100 keV) を扱う。前述のOHZORA衛星による高エネルギー電子 (0.19-3.2 MeV) 観測の統計結果を参考にするとSAMA領域は、ほ ぼ南緯18-48度,東経290-350度の範囲と推定されるので、 NOAA衛星がSAMA領域を通過する軌道は1日に約4回あ る。これらの軌道の中、2軌道は世界時でほぼ4h-12h UT(サ ンタマリアでは1h-9h LT)の夜間から午前の時間帯になり、 他の2軌道は、ほぼ17h-23h UT (サンタマリアでは14h-20h LT)の午後から夕方の時間帯になる。Fig.2は、前述の巨大 磁気嵐 "Bastille Day storm"の期間にNOAA-14が午後側の 時間帯でSAMA領域内及び近辺を南から北へ通過した軌道を 示す。4角の枠はSAMA領域、青い点はSMRの地点を示す。 SAMA領域で観測された電子フラックスの緯度分布は、通常、 南緯30度近辺でピークを持つガウス分布を示すので7、午前 側、午後側のそれぞれ2軌道の中、ピーク値の大きい方を電 子フラックスの代表値として抽出する。前稿の解析では、午 後側の電子フラックスの方が、午前側に比べて2倍程度大き かったので、本解析でも、午後側の電子フラックスデータを 扱う。

3. 衛星電子フラックス、及び地磁気活動の長期変動

Fig. 3 は1986年から2004年までの太陽黒点数 (Sunspot Number)の毎月の値(青色線)と平滑化した値(赤色線)の 変動を示す¹¹⁾。本解析の1987-1995年の電子データは第22太 陽活動周期、1996-2004年の電子データは第23太陽活動周期 に相当する。太陽黒点数のピーク値は第22周期の方が第23 周期より大きい。また、両周期共、極大期では2つの黒点数 のピークを持つことが判る。



Fig. 2 NOAA-14 orbital trajectories in the afternoon on July 15, 2000 are given with time (UT) in latitudes and east longitudes. A red square shows the South Atlantic Magnetic Anomaly (SAMA) region. IRIS station at Santa Maria (SMR) in Brazil is marked by a blue dot.

Fig. 4は、NOAA-10, -12, -14の電子データから抽出された SAMA領域の高エネルギー電子フラックス(単位は1000 counts/sec)の各年の変動をDay of Yearで示す。また、Fig. 5 は、地磁気活動の各年の変動をDOYで示す。ここで、地磁 気活動は地磁気活動指数Dst(1時間値、nT)¹²⁾を1日で加算 した値(ΣDst)で表す。

以下、電子フラックスの変動特性、及び地磁気活動との関係を太陽活動の(A)極小期(1987,及び1996-1997)(黒色線)、 (B)上昇期(1988,及び1998-1999)(緑色線)、(C)極大期 (1989-1991,及び2000-2002)(赤色線)、(D)下降期(1992-1995,及び2003-2004)(青色線)の4つの期間に分けて記す。

(A)第22周期の太陽活動は1986年に極小になり、翌年の 1987年には電子フラックスは年中ほぼ20,000 counts/sec (c/s と略す)以下と小さく、その中で南半球の秋季(4月周辺)と 春季(10月周辺)でわずかに増大し、冬季(6月周辺)でわ ずかに減少する季節変動を示した。第23周期の極小期の1996 年にもフラックスは20,000 c/s以下となり、第22周期と同じ 季節変動を示した。1997年には電子フラックスは18年間で最 小の基底変動を示し、太陽活動の極小年(1996年)から1年 遅れている。一方、ΣDstは、1987年、及び1996年に最小値 を示し、この両年では、秋季、春季に大きく、冬季に小さい 季節変動を示し、電子フラックスの季節変動と似ている。つ まり、太陽活動極小期ではSAMA領域の高エネルギー電子フ ラックスの季節変動は地磁気活動に起因すると言える。

(B) 第22周期の太陽活動上昇期の1988年では、データの 大半が欠測であったため変動は明らかでない。第23周期の上 昇期の1998年では、秋季の5月付近で電子フラックスは階段 状に増大し (~40,000 c/s)、その後、小さな振動を繰り返し ながら年末まで緩やかに減少していった。1999年では、電子



Fig. 3 The monthly (blue) and the monthly smoothed (red) sunspot number during 1986-2004 years.

フラックスは18,000-40,000 c/s の範囲で、春季にわずかに増 大する 季節変動を示す。一方、ΣDstにおいては、1998年の 5月に比較的大きいΣDst (-3000 nT)のパルスが発生した。 このパルスが上記電子フラックスの階段状の増大に対応して いる。しかし1999年の2-3月に発生したやや小さいΣDst (-2000 nT)のパルスに起因した電子フラックスの増大は小さ かった。一方、1999年10月では、大きいΣDst (-3200 nT) のパルス発生にもかかわらず電子フラックスの増大は小さかっ た。

(C) 第22 周期の太陽活動極大期の第1 ピークの1989 年で は、3月に電子フラックスは階段状に大きく増大 (~80,000 c/s) し、その後、小さな振動を繰り返しながら減少していき、 10月に増大前のフラックス (<20,000 c/s) に戻った。1990年 の4月ではフラックスは階段状に小さく増大し、6月頃ピーク になり、その後緩やかに減少して10月に20,000 c/s以下に なった。 第2のピークの1991年では、3月末に電子フラック スは小さく階段状に増大 (~30,000 c/s) し、6月にさらに大 きく増大 (~80,000 c/s) し、振動しながら10月に~30,000 c/s に減少するが、11-12月にはまた増大 (~50,000 c/s)した。第 23 周期の極大期の第1ピークの2000年には、フラックスは5 月に階段状に増大し (>40,000 c/s)、振動を続けながら10月に 減少し、11-12月にはまた小さく増大した。第2のピークの 2001年には、フラックスは4月に階段状に大きく増大 (>60,000 c/s) し、緩やかに減少しながら10月に ~20,000 c/sまでに減 少し、11-12月にはまた小さく増大した。2002年には、フ ラックスは4月にパルス状に小さく増大し、7-8月の冬季に ピーク (~40,000 c/s) になり、10月には~20,000 c/sに減少 するが、11-12月にはまた小さく増大した。

一方、ΣDstは、両周期共、1年中大きな、あるいは巨大な ΣDstのパルスが多く発生した。その中で、秋季と春季に大 きなパルスの発生が多く、特に2001年で顕著である。した



Fig. 4 Daily variations (DOY) of high-energy electron fluxes (>100 keV) from 1987 to 2004 years observed by the NOAA-10, -12, -14 satellites. Fluxes in vertical lines are multiplied by 1000. Black, green, red and blue variations correspond to solar minimum, rising, maximum, and declining phases, respectively.



Fig. 5 Daily variations (DOY) of 1-day sum geomagnetic indices (ΣDst) from 1987 to 2004 years. Black, green, red and blue variations correspond to solar minimum, rising, maximum, and declining phases, respectively.



Fig. 6 The monthly smoothed sunspot number (red) and the monthly averaged high-energy electron fluxes (blue) during 1987-2004 years. Fluxes (counts/sec) in a vertical line are multiplied by 1000.

がって秋季の大きなΣDstのパルスに起因して電子フラック スは階段状に増大し、冬季に緩やかに減少して春季のΣDst のパルスに起因して電子フラックスがまた増大する変動が極 大期のパターンと考えられる。

(D) 第22 周期の太陽活動下降期では、極大期の1991年末 (夏季)からの電子フラックスの増大が続き、1992年の5月に は電子フラックスは高い背景値から階段状に増大(~60.000 c/s) し、冬季、このフラックスレベルを保ちながら11月には やや減少 (~40,000 c/s) した。1993年にはフラックスは~ 40,000 c/sの背景値から緩やかに増大し、4-5月にピークにな り、10月に~40,000 c/sに減少した。また、1994年にはフラッ クスは前年と同じく5-6月にピークになり、10月に減少した。 1995年には1月のフラックスレベル (~40,000 c/s) から 年末 に向けて単調に減少していった。第23周期の下降期の2003 年では、フラックスは1月から緩やかに増大しながら5月下 旬には階段状に増大 (~80,000 c/s) し、10 月にはやや減少し たが、11月頃からさらに大きく増大し、最大のフラックス (>100.000 c/s) に達した。この最大のフラックスは翌年の 2004年には緩やかに減少しながら8月頃に小さな増大を示す が、11月にはフラックスは~30,000 c/s に戻った。つまり、 2003年5月末の階段状のフラックス増大から2004年11月の フラックスに戻るまでに約1年6カ月要したことになる。

一方、ΣDstは、第22周期の下降期では、パルスは極大期 に比べて小さく、発生数も少なくなった。しかし、電子フラッ クスは、前述したように、高い背景値から緩やかに増大し、6 月頃にピークを示し、その後10-11月に減少した。第23周期 では2003年5月末の比較的小さいΣDstパルス (-2000 nT) に もかかわらず電子フラックスは階段状に増大し、10-11月の 突発的に巨大な2つのΣDstパルスに起因して電子フラック



Fig. 7 The monthly average of 1-day sum geomagnetic indices (ΣDst) (red) and the monthly averaged high-energy electron fluxes (blue) during 1987-2004 years. Fluxes (counts/ sec) in a vertical line are multiplies by 1000.

スは最大に増大した。

以上、第22-23太陽活動周期における電子フラックス変動 の特性、及び地磁気活動との関係を詳細に記した。活発な太 陽活動期での変動特性をまとめると、極大期では両太陽周期 共、秋季の強い地磁気嵐によって電子フラックスが階段状に 大きく増大し、その後、緩やかに減少し、春季の強い地磁気 嵐によってフラックスはまた増大する。一方、下降期では、 極大期の電子フラックスの残留を背景にして、秋季の地磁気 嵐によってフラックスは増大するが、その後の春季の地磁気 嵐の大きさに起因して、第22周期と第23周期の電子フラッ クスの増大の様相が異なる。

次に、電子フラックスの変動と地磁気活動を1ヶ月毎で平 均した長期変動トレンドとして特性を記す。

Fig.6は、太陽黒点数の平滑化した変動(赤色線)と、1ヶ 月平均した電子フラックスの18年間の長期トレンド(青色 線)を示す。両太陽極大期では電子フラックスの振幅が大き い年と、小さい年がある。これらは、両極大期での2つの黒 点数のピーク間のくぼみに対応している。すなわち短期間の 太陽活動の低下が電子フラックスの大小に影響したと考えら れる。一方、太陽下降期では、両周期共電子フラックスは平 均して大きく、それぞれのピーク値は極大期のピーク値より 大きい。特に、第23周期の下降期の電子フラックのピークは 最大である。

Fig. 7は、1ヶ月平均した電子フラックスの18年間の長期 トレンド(Fig. 6の青色線)と、1日合計値ΣDstの1ヶ月平 均値の長期トレンド(赤色線)を示す。Dstの1ヶ月平均値は 1-2年の短い周期で振動するが、振動の振幅値は、太陽極小期 では小さく、極大期では大きい。第22周期の極大期では、太 陽黒点数の2つのピークのくほみで地磁気活動は弱くなり、 電子フラックスも小さくなる(~1991年)。第23周期の極大 期でも太陽黒点数のくぼみで地磁気活動は弱くなり、電子フ ラックスも小さくなった(~2001年)。一方、下降期では両周 期共、地磁気活動が弱くなっても電子フラックスは極大期よ りも増大した。特に第23周期では、第22周期に比べて地磁 気活動が弱くなったにも関わらず、Fig.5で示したように、 2003年11月に発生した2度の巨大な地磁気嵐に伴ってフラッ クスは最大に増大した。

以上、Fig.6とFig.7のトレンドをまとめると、SAMA領 域の衛星電子フラックスは基本的には太陽活動に関連した地 磁気活動の強弱に依存する。しかし、太陽活動の下降期では、 極大期に増大した電子フラックスが残留して高い背景フラッ クスになり、下降期に発生した地磁気嵐によって、この背景 フラックスから一層増大する長期トレンドを示す。

最近の論文において、NOAA衛星で観測された放射線帯外帯(地球半径の4倍)における高エネルギー電子(>300keV)の平均フラックスが、第22周期と第23周期の太陽活動極大期に増大し、下降期には一層増大して最大になったという報告がある¹³⁾。このトレンドは、本節で示したSAMA領域の電子フラックスの長期トレンドと一致する。SAMA領域を通る磁力線は放射線帯内帯につながるので、地磁気擾乱時における内帯での電子フラックスの増大は外帯から内帯への多量な高エネルギー電子の流入に起因すると考えられる。



Fig. 8 Daily variations of high-energy electron fluxes (unit, 1000 counts/sec) and geomagnetic indices Dst (1-hour value) during March 1-31, 1989.

4. 磁気嵐に伴った電子フラックスの増大イベント

前節で記した18年間の長期トレンドから、太陽活動極大 期、及び下降期において電子フラックスの増大と地磁気擾乱 との関係が明らかになった。本節では、これらの関係を表す イベント例を示す。以下、Fig.8からFig.11において、上段 は電子フラックス(単位は1000 c/s)の日変動、下段は地磁 気活動指数Dst(1時間値)の日変動を示す。

(A) 太陽活動極大期

Fig. 8は、第22周期の極大期の第1ピークの1989年3月の イベントを示す。3月13日、Dst maxが-500 nT以上に及ぶ 非常に強い地磁気嵐が発生した。この影響でカナダのケベッ ク州で大停電の被害が出たことは記録に残るところである。 この巨大なDst maxは2日後には小さくなり、その後、-100 nT以下の小さい変動を示した。この巨大なDst maxに伴っ て電子フラックスは約20,000 c/sの背景値から階段状に大き く増大し、その後、高いフラックスレベルの範囲(60,000-80,000 c/s)で変動した。すなわち、電子フラックスは、地磁 気変動に対して積分的に応答していることが判る。

Fig. 9は、第23周期の極大期の2つの黒点数のピークのく ぼみに近い2001年3-4月のイベントを示す。3月20日にDst maxが-150 nT程度の地磁気嵐が発生した。しかし、電子フ ラックスは約20,000 c/sの背景値から僅かに増大しただけで ある。3月31日にDst maxが-400 nT程度の強い地磁気嵐が



Fig. 9 Daily variations of high-energy electron fluxes (unit, 1000 counts/sec) and geomagnetic indices Dst (1-hour value) during March 16-April 30, 2001.



Fig. 10 Daily variations of high-energy electron fluxes (unit, 1000 counts/sec) and geomagnetic indices Dst (1-hour value) during February 1-28, 1994

あり、これに伴って電子フラックスは約20,000 c/sの背景値 から約40,000 c/sにまで増大したが、4日後に減少した。その 後、4月11日までの小さなDst変動に伴ってフラックスは徐々 に増大し、4月12日の強い地磁気嵐 (Dst max -260 nT程度) に伴ってフラックスは~70,000 c/s近くまで増大し、さらに、 4月18日の地磁気嵐 (Dst max, -100 nT程度) に伴って フ ラックスは最大 (~80,000 c/s) に達し、その後、振動しなが ら減少していった。このイベントでは、比較的小さい地磁気 嵐が短い間隔で繰り返して発生したため、電子フラックスは 積分されてこぶ状に増大し、その後、地磁気活動の低下に伴っ て電子フラックスは振動しながら減少していった。

(B)太陽活動下降期

Fig. 10は、第22周期の下降期の1994年2月のイベントを 示す。2月6日、Dst max が-120 nT 程度の弱い地磁気嵐があ り、その後、Dst は小さく振動を続け、2月22日にはDst max が-130 nT 程度の地磁気嵐が発生した。これらのDst 変動に 対応して電子フラックスは、1993年末から残留している約 40,000 c/sの背景値(Fig. 4参照)からこぶ状に増大し、その 後やや減少したが、2月22日の地磁気嵐(Dst max -150 nT 程度)に伴って最大約70,000 c/sに達した。

Fig. 11は、第23周期の下降期の2003年の10月のイベント を示す。電子フラックスは、10月以前のDst変動の影響で



Fig. 11 Daily variations of high-energy electron fluxes (unit, 1000 counts/sec) and geomagnetic indices Dst (1-hour value) during October 1-31, 2003.

40,000 c/sから 60,000 c/sの背景値で変動していた。10月15 日、Dst maxが-80 nT程度の弱い地磁気嵐が発生した。これ に対応して電子フラックスは約70,000 c/sにまで増大した。 その後の小さなDst変動に伴って電子フラックスも60,000 c/ s前後で小さな変動を続けた。10月29日から2度にわたる非 常に大きいDst max (-350 nT~-400 nT)の地磁気嵐が発生 し、これにともなって電子フラックスは100,000 c/s以上にま で大きく増大した。この非常に強い地磁気嵐は"Halloween Storm"と呼ばれ、南米チリーの最南端プンタアレナス(53.1°S, 289.1°E)の上空付近を通過した低高度軌道衛星(NOAA-14、及 びSAMPEX)は、高エネルギー電子フラックスの増大を観測 した¹⁴⁾。

以上の4つのイベントをまとめると、太陽極大期で発生し た単発的な強い地磁気嵐に伴って電子フラックスは低い背景 値から階段状に大きく増大した場合と、連発的な弱い地磁気 嵐に伴って電子フラックスはこぶ状に緩やかに増大した場合 があった。一方、下降期では、Dst max が-100 nT 程度の比 較的弱い地磁気嵐にもかかわらず、極大期で残留された高い 背景フラックス値からこぶ状に増大した。特に、Fig. 11 の場 合は、後続する非常に強い地磁気嵐に伴って電子フラックス は高い背景フラックスから大きく増大して最大のフラックス に達した。したがって、下降期での電子フラックスの変動は





極大期の残留フラックスが影響することが判った。

5. 衛星電子フラックスと地磁気活動との相関

前稿では、地磁気活動上昇に対する降下電子フラックス増 大の相関関係を調べるために、第23周期太陽活動の1995-2004 年の期間、Dst max> -100 nT の 50 イベントの地磁気嵐を抽 出して、電子フラックスの絶対値と、ΣDst、及びDst max との相関をとった。これらの相関の散布図は分散したが、一 定の比例関係を見いだせた⁸⁾。本稿では、第22-23周期の1987-2004年の期間でDst max >-100 nTの122 イベントの地磁気 嵐を抽出して相関関係を調べた。前稿と同じく電子フラック スの絶対値をとると、相関値は、ΣDst、及びDst max に対 してそれぞれ 0.158、及び 0.278 となり、これらの値は必ずし も有意な大きさでない。したがって本稿では、Fig. 8-11に示 した4つのイベントから判るように、背景フラックスからの 増大量との相関解析を行った。例えばFig. 8, Fig. 9, Fig. 10, Fig. 11の場合、増大イベントの直前のフラックスとして、そ れぞれ15,200 c/s, 16,210 c/s, 49,371 c/s, 51,785 c/sをとった。 その結果、電子フラックスの増大量と、ΣDst、及びDst max に対しての相関の散布図はFig. 12, 及びFig. 13に示され、相 関値は、それぞれ 0.498、及び 0.569 に上昇した。これらの相 関値は十分高い値ではないが有意な値であると考えられる。 十分高い値にならない原因は、SAMA 領域内の衛星軌道の経 度(Fig. 2参考)が、真の電子フラックス分布のピークの位 置からずれる場合があるという空間的な問題と、SAMA 領域 内の電子フラックス分布の時間変動が速くて、1日単位の衛 星電子データでは十分でないという時間的な問題があると考 えられる。以上の相関解析結果から、SAMA 領域電離圏への 高エネルギー電子の降下フラックスの増大は地磁気活動度に 比例する関係にあることが一層明確になった。この結果は、



Fig. 13 Relationship between NOAA electron flux enhancement (unit, 1000 counts/sec) and Dst max for strong geomagnetic storms (Dst max > -100 nT).

高エネルギー電子の電離圏への降下機構は、内部磁気圏で発 生したプラズマヒス波動との相互作用であることを強く支持 している。

6. 地上IRIS観測による"Storm CNA"の検証

本研究の目的は、SAMA領域での地上IRIS観測によって、 どのような地磁気擾乱のもとで高エネルギー電子降下、すな わち "Storm CNA" を検出できるか、さらに "Storm CNA"の 領域の空間的なスケールはどの程度で、時間的にどのような 動きをするかの知見を得ることである。

前述の強い地磁気嵐 "Bastille Day storm"の時にNOAA 衛星で多量の電子フラックスが観測され、同時にIRIS装置で "Storm CNA"が検出された。したがって本稿では、"Storm CNA"の検出条件として、この時の電子フラックス60,000 c/s を目安とする。この目安では、1987-2004年に発生した全地磁 気嵐(122個)の中、37個の地磁気嵐において"Storm CNA" が検出される可能性がある。本節では、37個の地磁気嵐の中 で、衛星電子観測と同時に観測されたCNA現象の一例とし て、Fig. 9で示した太陽極大期の2001年3月16日から4月30 日のイベントにおいて、電子フラックスが60,000 c/sを超え た4月12日前後の地磁気嵐に伴ったCNA現象を検証する。

Fig. 14の上段は、2001年4月8-14日のDstの時間変動を 示す。また、下段は、サンタマリア (SMR)のIRIS装置から 得られた4月8-14日のCNAの時間変動 (UT)を示す。IRIS装 置の東西 (EW)、南北 (NS)方向に向いた2次元4×4アン テナビームの中の天頂に近いビーム(N4E4)で得られたCNA 強度 (1スケールは1.0 dB)である。上段のDstの変動から、 4月8日11時UTに地磁気嵐は開始し (SC)、その後Dstは約 -60 nTにまで減少して、11日15時UTに-2 nTに戻った。こ の初相の期間の8日と9日には、4h-16h UT頃に強度0.5 dB



Fig. 14 Daily and time variations (UT) of geomagnetic indices Dst and CNA intensity (unit, 1 dB/div) observed by the IRIS during April 8-14, 2001.

Cosmic Radio Noise Intensity on April 10, -11, -12, 2001 and QDC



Fig. 15 Time variations (UT) of cosmic radio noise intensity on April 10 (white), April 11 (yellow) on April 12 (green), 2001 observed by the IRIS, and a QDC curve (red) analyzed from cosmic radio noise intensity on several geomagnetic quiet days from April 3, 2001.



Fig. 16 Upper panel: Selected CNA images during April 9-12, 2001. Absorption intensities are displayed by a color bar. Geographic North and East are noted. Lower panel: Latitudinal variations of electron fluxes of >100 keV energies (unit; 1000 counts/sec) observed by the NOAA satellites passing in and around the SAMA region. Two arrows show latitudinal range (15.7-43.1°S).

IRIS上空通過時刻	通過緯度	通過経度
APR 9 09:10 UT	31.8 S	289.1 E
APR 10 18:01 UT	30.7 S	347,7 E
APR 10 19:42 UT	30.7 S	322.1 E
APR 10 21 : 25 UT	30.7 S	286.6 E
APR 11 17:49 UT	30.4 S	350.6 E
APR 11 19:31 UT	30.3 S	325.1 E
APR 11 21 : 13 UT	30.3 S	299.6 E
APR 12 01 : 46 UT	32.8 S	40.0 E
APR 12 03:27 UT	29.4 S	15.6 E

Table 1 Day and time (UT), South latitudes, east longitudes of the NOAA satellites passing over the IRIS latitude.

以下のCNAが記録された。サンタマリアでは10h UT (07h LT)頃に日出になるので、夜間から日出前のCNAが日出時 に一度弱くなり、日出後から再び強くなる低緯度電離圏下層 の吸収の特徴である¹⁵⁾。Dstは11日16h UTから急速に減少 し(成長相)、12日の0h UT頃に最大に減少して(Dst max= -270 nT)、その後回復相に入った。CNA は、10日の16h UT の午後から11日の3h UTの深夜に変化の激しい変動を示し た(> 0.5dB)。また、11日16h UTから12日04h UTにもや や強いCNA が記録された。これらの午後から夜間のCNAは、 本地磁気嵐の初相の終わりから成長相、回復相の初めまでの 擾乱期間の現象である。

CNA記録の中で10日の17h38m-19h05m UTと、11日の 22h50m-24h00mUTではCNAは零になっている。この原因は 次のFig. 15で説明される。すなわち、Fig. 15は4月10日(白 色点)、11日(黄色点)、及び12日(緑色点)の38.2MHz銀 河電波強度の日変動を示す。また、この図に静穏日変化曲線 (QDC)(赤色点)を示す。QDCは4月3日から数日間の静穏 な日の電波強度データから統計処理で求められた⁵⁰。上記10 日と11日の時間帯では電離圏スプレッドF層が発生して、電 波強度が強くスキャッターして、その結果、QDCと電波強度 との差分は負になり、CNAは零に記録された。また、回復相 の12日の07h~16h UT(緑色点)にも電波強度に強いス キャッターが発生してCNAは零になった。次に、Fig. 16で CNA現象と衛星電子フラックスデータとを比較する。

Fig. 16の上段は、IRIS装置から得られた4月9日から12日 のCNA画像を示す。ここで画像の時刻はTable 1に示すよう に、NOAA衛星がIRIS装置のある南緯30度付近を通過した 時刻とほぼ同じ時刻を選んでいる。画像の積分時間は128秒 で、CNA 強度はカラーバーで示され、地理的な北と東の方向 が図中に与えられる。これまでのリオメータ観測から、"Storm CNA"を起こす高エネルギー電子のエネルギーは20 keV、あ るいは40 keVと推定されているので16)17)、吸収層の高度を100 kmと設定すると、画像の視野は約330 km×330 kmの平面 になる⁵⁾。この視野を衛星高度870 kmに伸ばすと、IRIS点 (29.4°S)を中心に緯度範囲では15.7°Sから43.1°Sになり、こ の緯度範囲を電子フラックスの緯度分布(下段)の右側に示 す。以下、CNA画像と電子フラックスの緯度分布を比較する。 1) 4月9日、衛星は09h10m UTにSAMA領域の西側境界を 通過し、南緯30度で約30,000 c/sのフラックスを観測した。 この時、前述した弱い電離圏F層吸収は、天頂のやや高緯 度側の西部で得られた。

 2) 4月10日、衛星は18h01m UTにSAMA領域の東側の境 界付近を通過し、南緯35度付近で約30,000 c/sのフラック スを観測したが、前述したように、スプレッドF層のため にCNA画像は黒になった。19h42m UTに衛星はSAMA領 域の中央部を通過し、南緯25度付近で約50,000 c/sのフ ラックスを観測した。この時、視野の低緯度側(赤道側) 境界から、天頂に広がる強いCNA画像が得られた。この CNA画像は降下電子フラックスに対応していると考えられ る。21h25m UTに衛星はSAMA領域の西側境界を通過し、 南緯30度付近で約20,000 c/sのフラックスを観測した。こ の時、天頂のやや低緯度側で弱いCNA画像が得られた。

- 3) 4月11日、衛星は03hUTまでSAMA領域外の東側を通 過し、この時、天頂の高緯度側で弱いCNA 画像が得られた (図は省略)。この時間、CNAと電子フラックスとの対応は 不確定である。衛星は17h48m UT にSAMA領域の東側の 境界付近を通過し、南緯20度と30度付近で、約60.000 c/s の大きい2つのフラックスピークを観測した。この時、低 緯度側境界で比較的強いCNA画像が得られ、天頂へ伸びて いた。また、天頂のやや高緯度側で東西に伸びる幅の狭い、 弱いCNA画像が得られた。19h31m UTでは、衛星は SAMA領域の中央部近くを通過し、フラックスは最大(~ 70,000 c/s) になり、2つのピークは17h48mよりやや高緯 度側に移っている。この時,低緯度側境界と天頂のやや高 緯度側の西側境界で強いCNA画像が得られた。また、高緯 度側の東側で東西に伸びるバンド状のCNA画像が得られ た。21h13mUTでは、衛星はSAMA領域内の西側を通過 し、フラックスは小さくなるが(< 30.000 c/s)、2つのピー クはさらに高緯度側に移っている。この時、低緯度側境界 で強い東西に伸展するCNA画像が得られ、また、東側と西 側で、低緯度側から高緯度側に伸びるやや強いCNA画像が 得られた。
- 4) 4月12日、衛星は01h46m UT にSAMA 領域外の遠い東 側を通過し、このため電子フラックスは10,000 c/s以下に なった (図は省略)。一方、視野の低緯度境界で東西に伸展 する強いCNAと、天頂近くで弱いCNAが広がっている。 また、天頂の高緯度側で東西に伸びるバンド状のCNAが得 られた。03h27m UTでは、衛星はSAMA領域外の東側を 通過し、フラックスは小さく(~10,000 c/s)なった。この 時、低緯度側境界の西側で弱いCNAが得られた。このよう に、4月11日の16h~24h UTの午後については、CNA画 像の強度増大や、高緯度側への移動の様相は衛星電子フ ラックスのピーク強度の増大、及び高緯度方向への移動の 様相と一致するので、降下電子フラックスに対応した "Storm CNA"と考えられる。しかし、4月12日の0h-4hの 夜間については、"Storm CNA"の可能性と、磁気嵐の回復 相に発生するF。層高度の上昇の電離圏擾乱によるCNAの 可能性も考えられる 17)。

7. まとめと今後の課題

前稿では、SAMA領域上空を通過するNOAA衛星の高エ ネルギー電子データ(>100 keV)を用いて、第23太陽活動 周期における電子フラックスの変動特性を報告した。本稿で は、さらに第22周期の電子データを加えて、1987年から2004 年(18年間)の衛星電子データから電子フラックスの長期変 動特性を求め、地磁気活動Dstとの関係を調べた。その結果、 太陽活動の極大期では、南半球の秋季に発生した強い地磁気 嵐に伴って電子フラックスは階段状に大きく増大し、冬季を 過ぎて春季に向けて緩やかに減少していくが、夏季に発生し た地磁気嵐によって電子フラックスは再度増大した。太陽活 動の下降期では、極大期の夏季に増大した電子フラックスが 背景となって、秋季の地磁気嵐によって増大し、冬季にピー クになり、春季に向けて減少していく場合(第22周期)と、 第22周期と同じく、冬季にピークになった電子フラックス が、春季の非常に強い磁気嵐によって最大に達し、その後1 年半かけて緩やかに減少していく場合(第23周期)とがあっ た。これらの長期変動から、SAMA 領域での電子フラックス の変動は基本的には地磁気嵐の発生頻度及び強弱に依存する が、太陽活動の下降期では、極大期の電子フラックスの残留 のため、背景フラックスが高くなり、その結果、極大期より 高い電子フラックスになる。

以上の電子フラックスの太陽周期変動を参考に、太陽活動 極大期の2001年4月8-14日に発生した強い地磁気嵐の期間に IRIS装置で観測されたCNA現象を検証した。4月10-12日の 午後から夜間に観測されたCNA現象は、通常の電離圏擾乱に 起因するCNAとは異なった。この時間、SAMA領域を通過 する衛星の電子フラックスは4月11日に最大70,000 c/sに達 した。CNAの2次元画像を同時衛星の電子フラックスの緯度 変化と比較した結果、CNA強度の増大や動きは衛星電子フ ラックスの増大と移動に合致していた。したがって上記CNA 現象は "Storm CNA"であると同定される。今後、さらに多 くの "Storm CNA"の検証例を増やして "Storm CNA"の空 間的な構造を明らかにしていきたい。次期第24周期太陽活動 の極大期、及び下降期を迎えるにあたり、IRIS観測を連続実 施することにより、SAMA領域電離圏への高エネルギー電子 降下の動態解明の研究に進展させたい。

謝辞

本研究では、NOAA衛星電子データはGoddard Space Flight Center のSpace Data Facility (SPDF)のCoordinated Data Analysisの Web から提供された。また、地磁気Dstデー タはNASA National Geophysical Data CenterのWebから提 供された。太陽黒点数データはSolar Influence Data Analysis Center のWebから提供された。これらの各機関からの研究 データの提供に対して深く感謝します。ブラジルでのIRIS観 測装置の設置、維持は、拓殖大学理工学研究所・個人研究や 文部科学省科学研究費補助金、及び日本学術振興会特定国派 遣者事業で実施されました。

参考文献

- http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/index-j.html 京都大学地磁 気世界資料解析センター
- Torr, D.G., M.R. Torr, J. C.G. Walker, and R.A. Hoffman, Particle precipitation in the South Atlantic geomagnetic anomaly, Planet. Space Science, 23, 15-26, 1975
- 3) Kohno, T., K. Munakata, K. Nagata, H. Murakami, A. Nakamoto, N. Hasebe, T. Takenaka, J. Kikuchi, and T. Doke, Intensity maps of MeV electrons and protons below the radiation belt, Planet. Space Science, 38(4), 483-490, 1990
- Heirtzler, J.R., The future of the South Atlantic anomaly and implications for radiation damage in space, J. Atmos. Solar-Terr. Phys., 64, 1701-1708, 2002
- 西野正徳、巻田和男、湯元清文、F. Rodrigues, N.J. Schuch, ブラジル磁気異常帯におけるイメージングリオメータ観 測、拓殖大学理工学研究報告、Vol. 8, No. 1, pp. 15-20, 2001
- 6) Nishino, M., K. Makita, K. Yumoto, Y. Miyoshi, N.J. Schuch, and M.A. Abdu, Energetic particle precipitation in the Brazilian geomagnetic anomaly during the 'Bastille Day storm' of July 2000, Earth Planets. Space, 58, 607-616, 2006
- 7) 西野正徳、巻田和男、N.J. Schuch, ブラジル磁気異常帯 における宇宙電波の電離層吸収現象、拓殖大学理工学研 究報告、Vol. 12, No. 1, pp. 23-39, 2011
- 8) 西野正徳、巻田和男、N.J. Schuch, 南大西洋磁気異常帯 における高エネルギー電子降下の太陽周期変動、拓殖大 学理工学研究報告、Vol. 12, No. 2, pp. 25-32, 2013
- http://cdaweb.gsfc.nasa.gov/Goddard Space Flight Center, Space Physics Data Facility (SPDF)
- 10) 鶴内 晃、南大西洋磁気異常帯における放射線粒子変動の研究、東北大学理学研究科地球理学専攻、修士論文、 pp. 1-64, 1998
- http://www.sidc.be Solar Influences Data Analysis Center, Royal Observatory of Belgium
- 12) http://www.ngdc.nasa.gov/stp/geomag/dst.html NOAA National Geophysical Data Center
- Miyoshi, Y., R. Kataoka, Solar cycle variations of outer radiation belt and its relationship to solar wind structure dependences, J. Atmos. and Solar Terrestrial Physics, 73, 7-87, 2011
- 西野正徳、巻田和男、R. Monreal, 巨大磁気嵐 'Halloween Storm' に伴うチリ・プンタアレナスにおける電離層吸収 現象、拓殖大学理工学研究報告、Vol. 11, No. 2, pp. 37-47, 2010

- Abdu, M.A., S.S. Degaonkar, and K.R. Ramanathan, Attenuation of galactic radio noise at 25 MHz and 21.3 MHz in the ionosphere over Ahmedabad during 1957-1964, J. Geophys. Res., 72(5), 1547-1554, 1967
- 16) Abdu, M.A., S. Ananthakrishman, E.F. Coutinho, B.A. Krishnan, and S. Reis, Azimuthal drift and precipitation of electrons into the South Atlantic geomagnetic

anomaly during an SC magnetic storm, J. Geophys. Res., 78(25), 5830-5836, 1973

17) Nishino, M., K. Makita, K. Yumoto, F. Rodrigues, N.J. Schuch, and M.A. Abdu, Unusual ionospheric absorption characterizing energetic electron precipitation into the South Atlantic Magnetic Anomaly, Earth Planets. Space, 54, 907-916, 2002

磁気異常帯域における大気電場計観測 Atmospherics Electric Field Observation at Geomagnetic Anomaly Region

巻田 和男 Kazuo Makita* 星野 光男 Mituo Hoshino* 加藤 泰男 Yasuo Kato** 宏大 野澤 Hiromasa Nozawa*** 大川 隆志 Takashi Ookawa**** 源 泰拓 Yasutaka. Minamoto**** 長町 信吾 Sinngo Nagamachi**** Paulo Fagundes***** Emilia Correia***** Washington Lima****** Julio Cesar Gianibeli******* Ricardo Monreal******** Nelson Jorge Schuch*********

Abstract

In order to study particle precipitations due to the Global Circuit, several Electric Field-Mill detectors were installed at Geomagnetic Anomaly Region on February 2013. These Electric Field-Mill detectors were constructed by our hands and calibrated by using the facility of Kakioka Geomagnetic Observatory. The preliminary data obtained at Palmas, Atibaia, San Jose dos Campos and Southern Space Observatory (SSO) are also shown. Imaging riometer is operating at theses observatories, so we can study the relationships between atmospheric electric field and cosmic noise absorption.

Keywords; Electric Field-Mill detector, Global Circuit, Cosmic Noise Absorption, Imaging Riometer, Geomagnetic Anomaly Region

1. はじめに

大気電場は雷・雲・雨・風等の気象現象に密接に関連して 変動を示すことがよく知られている^{1),2)}。一般に、晴天静穏時 には地上で100V/m程度の一定電場が観測される。しかし、 雷雲が近づくと数kV/mから数十kV/mの大きさにまで上昇 し、正負に激しく変動する。また、雲天や雨などの時にも弱 い電場変動が観測される。この大気電場は全地球の雷活動を 発電機とし、地上と電離層を結ぶグローバル・サーキット3 と呼ばれる回路で結ばれていると考えられている。しかしな がら、それがどのような特徴や性質をもっているのかという 点については十分研究が進んでいるとは言い難い。これは前 述したように大気電場データは観測地点の気象現象に強く影 響を受けるのみならず、日変化や季節変化がある上に、空気 中の煙・排気ガス・放射線物質等の影響も受ける。そのため、 電場データからグローバル・サーキットを議論する場合には 上記の影響を取り除いたデータを慎重に選択し解析しなけれ ばならない。更に、地上での電場データは高度数十km以上

原稿受付	平成 25 年 9 月 17 日
*	基礎教育系列
**	名古屋大学太陽地球環境研究所
***	鹿児島工業高等専門学校
****	気象庁地磁気観測所
****	Universidade do vale do Paraiba, Brazil
*****	INPE-CRAAM, Mackenzie University, Brazil
******	Universidade Luterana do Brazil
******	La Plata University, Argentina
*******	Maglhanes University, Chile
*******	INPE Southern Space Center, Brazil

の電場変動を反映していないとする計算結果もあり、電場観 測でグローバルサーキットの存在を明確に示した報告は少な いのが現状である。。

仮に、このようなグローバル・サーキットが地上と電離層 間(中低緯度と高緯度間の電離層も含め)に定常的に存在し ているとすれば、例えば、高緯度で生起する擾乱現象は電離 層を介して中低緯度の地上で何らかの現象を引き起こしてい る可能性が示唆される。我々は高エネルギー粒子が多量に入 射している磁気異常帯域で超高層大気観測を実施しているが、 このようなグローバル・サーキットがこの異常帯の粒子加速 や電離現象等に関係しているとすれば、例えば、極域での擾 乱現象に対応する諸現象がここで観測され得ると考えられる。

本研究はグローバル・サーキットと入射粒子等との関係を 明らかにする目的で、磁気異常帯周辺域に数台の電場計を設 置することを計画した。他方、これまで観測を行ってきたイ メージングリオメータのデータと比較する事も重要であるた め、電場計をイメージングリオメータが稼働している観測点 に設置した。

2. Electric Field Mill 電場計とキャリブレーション

大気電場の測定方法としては、水槽から水滴を放射し、水 槽の電位を測定する水滴集電器や地面と誘導体間に帯電する 電荷量を回転板でスイッチングしながら電場強度を測定する フィールドミル回転集電器による方法等がある⁴⁾。我々は扱 いが簡単なField Mill電場計を製作し、現地に設置し観測す





Fig. 2 Field-Mill sensor



Fig. 3 Rotating switch plate

ることにした。

この電場計を製作するにあたっては、名古屋大学太陽地球 研究所で過去に製作されたField Mill電場計を参考にして製 作を進めた。Fig. 1 は製作した電場計の外観図である。全体 を軽くするためにセンサー部を格納するケース及びポールは 全てアルミニウム材料を用いた。現地では高さは2.0 mのポー ルをセメントの土台に固定し、長さは1.0 mの水平ポールの先 にセンサーを取り付けた。また、風等でセンサーが動かない よう斜め方向の支柱を取り付けると共に、3 方向にステーを 張った。

センサーからの信号ケーブルはポール内を通して、ポール に取り付けた格納箱内の増幅器(AMP)に接続した。また、 AMPで増幅されたシグナルは100m程離れた室内のデータロ ガーに入力し、コントロール用PCのハードデイスク内に保存 した。

Fig.2はフィールドミル電場計のセンサー部を示している。 図の①は固定金属板(誘導板)で、抵抗RとコンデンサーC に接続している。②の遮蔽板は3枚羽で構成され、常時回転 している。③の固定板と②の遮蔽板の空隙部分が重なる時、 ①の誘導板は地面に露出し、その時の大気電場により①に誘 導された電荷がコンデンサーCに蓄積される。

②が③の空隙部分を遮蔽すると、誘導板は遮蔽され、コン デンサーに蓄積された電荷は抵抗を通じて大地に流れる。こ の繰り返しにより生じた三角波の電圧変動をバンドパス・フィ ルターを通して基本波のみを増幅する。

本電場計は電力周波数50Hz/60Hzに対して、モータの回転 数が1500/1800回転/分(f=25Hz/30Hz)であるから、1回転 に3回のON/OFFが繰り返される。このモータの回転周波数 の3倍、すなわちf=75Hz/90Hzの基本波のみを増幅し正弦 出力波を得る。

(注)電源ノイズ(50Hz/60Hz)及びその高調波の影響を最小 限に抑えるため、基本周波数を電源周波数の1.5倍になる よう、3枚羽構造としている。

ところで、遮蔽板の回転による基本周波数(f = 75Hz/90Hz)

と大気電場の正弦出力波との間の位相合わせをする必要があ るため、Fig. 3のような回転スイッチ板をモータの回転軸に 取り付けて回転スイッチ板の凸部分と遮蔽板の空隙部分とを 同期させる。そして、回転スイッチ板を挟むようにフォト・ インタラプタ (PI)を取り付け、回転スイッチの凸部がPIを 通過した時、PIスイッチがONになるように設定する。すな わち、誘導板が地面に露出した時にPIスイッチがONになり、 遮蔽板が誘導板を覆う時にOFFになる。

そして、Fig. 4に示されたPIスイッチによる矩形出力波 (Wave1)と大気電場の正弦出力波(Wave2)の位相が同 位相となるよう、回転スイッチ板に対するPIスイッチの位置 及び増幅回路の位相用抵抗を調節して位相合わせを行う。



Fig. 4 Phase adjust between Wave ① (rectangle wave) and Wave ② (sin wave)

電場計の増幅回路はFig.5に示されている。増幅器のGain は1~1000倍の範囲で設定できる。また、設置する場所の電 力周波数(50Hz/60Hz)の違いによってモータの回転数が異 なることから基本波(75Hz/90Hz)のバンドパス・フィルター の周波数が変わってくる。従って、それに対応した回路素子 を使用しなければならない。Fig.5の表には電力周波数が50Hz 及び60Hzの場合の抵抗とコンデンサー素子の値を示してい る。

Fig. 6においては、出力値のオフセット電圧調整と極性変 更の個所を示している。またFig. 4で示した、PIスイッチに



Fig.5 Amplifier circuit of Field Mill detector



Fig. 6 Amplifier circuit of actual wiring

よる矩形出力波(Wave●)と大気電場の正弦出力波(Wave ②)の波形をチェックする個所も表示してある。前述したように、この2点での出力波形をオシロスコープで見ながら Phase Adjust ツマミを回して位相調整を行う。

ところで、製作した電場計のキャリブレーションは気象庁 地磁気観測所(茨城県石岡市柿岡)において行った。Fig. 7a のように床に敷き詰めた銅板(面積約4m²)の中央に電場計 センサーを上向きに置き、上面の銅板を下げて、Fig. 7bのよ うに2つの銅板間の距離を21.0 cmに固定した。この装置は一



Fig. 7a Field Mill sensor and Copper plate



Fig. 7b Field Mill sensor installed h of two copper plates cm width of two copper plate (2m²)

様な電場中で電場計の検定を行うために作られたものである。

この2つの銅板間に上面(正電圧)から下面の向きに0Vか ら±500Vの範囲で電圧を加え、電場計の出力を測定した。な お、増幅器はGain7 (100倍)に設定して行った。

Table 1a, b, cは銅板間に上から下向きに加えた電圧と電場 計の出力電圧との関係を、7台の電場計について調べた結果 である。Table 1aとTable 1bの6台は今回拓殖大学で製作し た電場計で、ブラジル南極基地, INPE Atibaia, University Vale do Paraiba (UNIVAP), Magalhanes University, University Lutterano Brazil (ULBRA), Trelew Geomagnetic Observatory にそれぞれ設置した。またTable 1cは名大STE 研で過去に製作した電場計の検定結果であり、それは鹿児島 工業高等専門学校に設置した。

これらの電場計の検定結果をFig.8に示している。ここで、 横軸は銅版にかけた電場(銅板間を21.0cm、上側の銅板に正 電圧を加えたときの換算値)、縦軸は電場計の出力電圧を示し ている。これによると、加えた電場が小さい範囲(500V/m 程度)では、7台の電場計出力はほぼ似たような値になって いる。Kagoshimaに設置した名大STE研製の電場計と拓大製 の電場計6台との出力差も小さく、どの電場計で測定しても 測定値には大差ないと思われる。

ところで、現地に電場計を設置した後に検定を行う場合に は、簡易的に電場計センサーの下部に金属板をかぶせ、金属 板とアース間(センサーの筐体)に小さな電圧を加えて、検定



Fig.8 The relationship between added Electric Field (V/m) and output of Field Mill detector (V) at Kakioka Calibration

Table 1a Added voltage between copper plate and output voltage. Field Mill sensor was constructed by Takushoku University

ブラジル	ル南極基地	INPE	Atibaia	UN	IVAP(SJC)~
加電圧(∨)↩	電場計電圧(∨)↔	加電圧(∨)⊷	電場計電圧(∨)₽	加電圧(∨)⊷	電場計電圧(∨)↔
0+	0.039•	0+	0.017*	0+	0.005+
30+	0.647	30+	0.806+	30+	0.7494
70+	1.561+	70+	1.868+	70+	1.76+
100+	2.243	100+	2.697+	100+	2.526+
150+	3.384+	150+	4.009+	200+	5.072+
200+	4.52+	200+	5.354+	350+	8.904+
400+	9.074+	300∉	8.0234	4004	10.164
450+	10.204	350+	9.3694	0+	-0.011+
0+	-0.0284	0+	-0.017*	-30+	-0.7554
-30+	-0.653+	-30+	-0.795+	-70*	-1.777+
-70+	-1.5554	-70+	-1.868+	-100+	-2.5444
-100+	-2.237+	-100+	-2.674+	-150+	-3.821+
-150+	-3.3734	-150+	-4.0144	-2004	-5.0934
-200+	-4.503+	-200+	-5.361+	-300+	-7.643+
-400+	-9.045+	-300+	-8.062+	-380+	-9.681+
-450+	-10.176	-350+	-9.392*	42	4

Table 1b Added voltage between copper plate and output voltage. Field Mill sensor was constructed by Takushoku University

Magalhane	(Agalhanes Uny (P.Arenas)		ULBRA(Palmas)		magnetic Obs.+'
加電圧(∨)₽	電場計出力(∀)₽	加電圧(∀)₽	電場計電圧(∨)↔	加電圧(∀)₽	電場計電圧(∀)↔
0+	0.011*	0+	-0.034	0+	0.017+
30+	0.732*	30+	0.698+	30+	0.743+
70+	1.754+	70+	1.675.	70+	1.743.
100+	2.509+	100+	2.419	100+	2.4984
150+	3.781+	150+	3.645	150+	3.747+
200+	5.048+	200+	4.877.	200+	4.991+
300+	7.592+	300+	7.336	300+	7.491+
380+	9.625+	400+	9.806+	400+	9.994+
0+	0.045+	0.	-0.022+	0+	0.017+
-30+	-0.715+	-30+	-0.687	-30+	-0.715+
-70+	-1.714+	-70+	-1.669	-70+	-1.714-
-100+	-2.471+	-100+	-2.402	-100+	-2.4644
-150+	-3.742+	-150+	-3.634	-150+	-3.708+
-200+	-4.997+	-200+	-4.861+	-200+	-4.946+
-300+	-7.541+	-300+	-7.325	-300+	-7.467-
-380+	-9.574+	-400-	-9.784-	-400+	-9.937-

	鹿児島工業高等専	門学校(鹿児島	む、も(船
加電圧(♡)⊷	電場計出力(▽)≁	加電圧(♡)↩	電場計出力(∿)⊷
0+	0.045	0+	0.028-
10↔	0.131-	-30+	-0.613
20+	0.303	-70+	-1.396
304	0.556	-100+	-1.981
40+	0.726-	-150+	-2.964
50+	0.891	-200+	-3.9354
70∢	1.283	-400+	-7.836
100+	1.876-	-500+	-9.785
1504	2.862	*	
200+	3.816	47	
4004	7.722	сь С	
500+	9.672	c.	

Table 1c Added voltage between copper plate and output voltage. This Field Mill sensor was constructed by STE Lab.

Table 2 Added electric Field (V/m) and output voltage by Calibration plate

E(∀/m)	7 √ (Antarctica	Atibaia	UNIVAP	ULBRA	Trelem	Kagoshima	<u>Kakioka</u> +
57	.6	0.275	0.237	0.293	0.281	0.365	0.293	0.284
11	8.4	0.578	0.472	0.628	0.584	0.686	0.605	0.585
173	8.4	0.872	0.702	0.953	0.883	1.002	0.912	0.880
23	9.8	1.174	0.941	1.288	1.191	1.328	1.220	1.184
29	9.6	1.471	1.174	1.622	1.497	1.647	1.530	1.488
36	0.4	1.768	1.408	1.958	1.805	1.961	1.840	1.797

を行うことになる。ここでは、センサーに取り付ける検定用 金属板と誘導板との間隔を2.5cmとして検定を行った。なお、 Magalhanes Univ. (Punta Arenas)の電場計はこの検定を行 う前に現地へ輸送してしまったため、この金属板によるキャ リブレーションは行えなかった。また、柿岡に設置してある 名大STE研製の電場計については、新しいモーターに交換し てから金属板による検定をおこなった。 Table 2は7台の電場計について、加電場(電圧を2.5cm間 に加えたときの換算値)と電場計の出力電圧値の結果を示し ている。この結果をわかりやすく表示するために、Table 3で は電場計の出力電圧が実際の大気電場強度といかなる対応を しているか、換算した結果をに示してある。

このTable 3の結果をグラフ化した結果をFig. 9に示している。また、各観測点の電場計の出力特性(電場強度と出力

Output	Kagoshima	Kakioka	Antarctica	Atibai	UNIVAP	ULBRA	Trelew
V	E=V/m	E=V/m	E=V/m	E=V/m	E=V/m	E=V/m	E=Vm
1	196.0	201.7	204.4	232.9	186.6	201.1	189.4
2	391.9	402.0	407.3	436.1	369.1	399.7	367.2
3	587.8	602.3	610.3	639.2	551.7	598.3	529.8
4	783.7	802.6	813.2	842.4	734.2	796.9	706.6
5	979.6	1002.9	1016.1	1045.6	916.7	995.5	883.3



Fig. 9 Relationships between Electric Field and Output voltage

Kagoshima:	E= 195.9V + 0.1	
Kakioka:	E= 200.3V + 1.4	
Antarctica:	E= 202.9V + 1.4	
INPEAtibai:	E= 203.2V + 29.8	
UNIVAP:	E = 182.5V + 4.1	
ULBRA:	E = 198.6V + 2.5	
Trelew:	E = 189.4V + 11.6	

Table 4 Linear regression of the relationships between Electric Field (V/m) and output voltage (V)

電圧の関係)を回帰直線により求めた式をTable 4に示して いる。各観測点の回帰直線には多少ばらつきが見られるが、 電場計に1V出力が見られた時には概ね200 V/m前後の大気 電場に対応していることがわかる。一般的に静穏時の大気電 場の大きさは100 V/m程度であるから、この電場計による静 穏時の出力電圧はおよそ0.5V程度と予想される。

3. 電場計設置と観測データ

2013年2月から3月にかけて、ブラジル、アルゼンチン、 チリを訪れ、Field-Mill 電場計の設置作業を行った。Fig. 10a に各観測点 (ULBRA (Palmas; 10.2°S), Atibaia INPE (23.1°S), UNIVAP (San Jose dos Campos; 23.0°S), SSO (29.4°S), Trelew (43.2°S), Punta Arenas (53.1°S)〕の場所を、またFig. 10bには設置した電場計の写真を示している。更にFig. 10cに 南極ブラジル基地に設置した電場計を示している 電場計は 高い建物等が周辺(数十m以内)に無い場所を選び設置した。 高さ2mの電場計ポールはセメントの土台に固定した。セン サー部が重いため、斜めの支柱で補強すると共に3方向にス テーを張り、風などで振動しないようにした。なお、Southern Space Observatory (SSO) は6年ほど前からSTE研で製作し た電場計による大気電場観測を行っているが、最近モータが 不調になったため、今回新しいモータに交換した。また、ブ ラジル南極基地は一昨年火災があり、基地のオペレーション が止まっていたが、基地のオペレーションが再開した2013年 12月に設置した。

今回電場計を設置した場所は、イメージングリオメータや 1 チャンネルリオメータが設置され連続観測を行っている地 点である(Atibaia は現在のところイメージングリオメータ は設置されていないが、2014年に設置する予定である。また、 ブラジルの南極基地にはイメージングリオメータは設置され ていない)。ところで、ブラジルの電源周波数は60Hzである ため、その1.5倍の90Hzの基本波を通すバンドパス・フィル ターを AMP 回路に組み込み、各観測点に輸送した。しかし、 Trelew(アルゼンチン)とPunta Arenas(チリ)の電力周波 数が50Hzである事が現地で判明した。このため50Hz電源の 1.5倍の75Hzの基本波を通すバンドパス・フィルターに変更 する必要が生じた。また50Hzの電源周波数用モータに合う コンデンサーに交換しなければならなくなった。更に、この 変更を行った後、位相・オフセット調整、キャリブレーショ ン等を改めて行う必要もあった。このような作業を滞在中の 短期間に行うことは困難であったため、AMP部は日本に持ち 帰りバンドパス・フィルターの中心周波数を変更することに した。このため、Trelew及びPunta Arenasの電場計は現在 観測が停止している。

電場計が稼働しているのは日本の柿岡地磁気観測所と鹿児 島高専の2か所とブラジル国内のPalmas (ULBRA), Atibaia (INPE Observatory), San Jose dos Campos (UNIVAP), Santa Maria (Southern Space Observatory), ブラジル南極基地 (EACF) の5か所であり、これらの地点で得られたデータを 示していく。Fig.11aは2013年3月21日に鹿児島と柿岡で観 測された電場データである。鹿児島の大気電場変動は柿岡よ り顕著であるが、1か月間の電場データについて調べてみた ところ、全般的に鹿児島の大気電場変動は柿岡より大きい傾 向が見られた。この理由として、鹿児島の電場計は建物の屋 上に設置してあるため、地面から14mほどの高さである。こ れに対して、柿岡は南米4点と同じように、地面に2mのポー ルを建てそこにセンサーを下向きに置いてある。このため、 両地点で1m当たり100Vの大気電場が存在しているとしても、 鹿児島に設置した電場計は柿岡の電場計の出力電圧に比べ7 倍程度大きい値を示すことが予想される。実際にFig. 11aの データを見ると、鹿児島での出力電圧は1-6V程度であるの に対し、柿岡の出力電圧は200mV-1Vであり、予想された値 とほぼ一致している。このように設置条件の違いは大気電場 計の感度特性の違いとなって表れている。他方、柿岡では雷 のモニターとして有効なリオメータ観測を行っているがその データも一緒に示してある。それによると03-09h頃に 38.2MHzの電波強度が強まっているが、電場変動は大きくな いため、この電波変動は雷の影響ではないと考えられる。

Fig. 11bに同じ2013年3月21日にブラジルの4点で観測さ れた電場計データを示している。またこの4地点ではリオメー タ観測も行っているため、そのデータも一緒に示してある。 これによると、3か所で大きな電場変動(赤線)が05-13hに 見られる。この間リオメータで受信された電波には大きな強 度変動(黒線)が見られていないため、近くに雷雲等はなく、 静かな気象状況であったと思われる。なお、16h以降にPalmas, Atibaia, SSOで激しい電波の強度変動が見られているが、こ れは雷雲の影響によると思われる。

赤道域に近いPalmasのデータであるが、05hから11h頃ま で4回の急激な負の変動が見られる。最初の変動は05h00m-06h00m、2回目は6h30m-08h30m、3回目は07h50m-09h40m、 4回目は09h40m-11h00mの時間帯に見られる。このとき他の 観測点のデータを見ると、Palmasで最初の変動が見られた時



Fig. 10a Installation place of Field Mill detectors



Fig. 10b Photographs of Field-Mill detector at 6 stations



Fig. 10c Photograph of Field-Mill detector at Estacão Antartica Comandante Ferraz (EACF).



Fig. 11a Electric Field Mill data (green line) at Kagoshima and Kakioka. 1ch riometer data (Black line) is also shown at Kakioka data

間帯にAtibaiaやSan Jose dos Camposでは顕著な変動は見 られないが、SSOでその時間帯に弱い負の変動が見られる。 Palmasの2回、3回、4回目の変動については、Atibaiaの電 場変動と対応があるように見える。しかし、AtibaiaとPalmas は2,000km程離れているため、直接的な対応があるか否かは 更に検討が必要であろう。また、Atibaiaでは11h00m-13h00m に負の変動が見られるが、Palmasではそれに対応するような 変動は見られない。他方、San Jose dos CamposとAtibaiaは 100km 程しか離れていないため、似た変動が見られると予想 される。しかし、2点のデータを比較すると、05h00m-13h00m の時間帯に激しい変動が2点で見られるものの、その強度変 動の様相は異なっていて複雑である。他方、SSOでの電場変 動はPalmasの最初の変動と対応があるように見られるが、そ れ以外の時間帯では、他の観測点との対応はほとんど見られ ない。



Fig.11 b. Electric Field-Mill data at Palmas, Atibaia, San Jose dos Campos and SSO.

4. まとめ

グローバル・サーキットによる高エネルギー粒子の入射現 象をモニターするために、2013年2月より南米大陸・磁気異 常帯域の数か所に電場計を設置し観測を開始した。最初に述 べたように、グローバル・サーキットが汎世界的に存在して いるとすれば、電離層を介して中低緯度と高緯度が結びつい ていることになる。すなわち、低緯度の雷現象が高緯度の諸 現象と、また高緯度のオーロラ現象が低緯度の諸現象と結び ついていると考えられる。特に、地球磁場の弱い磁気異常帯 においては、高緯度の擾乱現象に伴い高エネルギー粒子の入 射量の増加が見られると考えられる。この磁気異常帯に入射 する粒子は数十kmの高度まで降下しているため、その付近 の中性粒子を電離し、地上付近の大気電場変動を引き起こす ことが予想される。このような大気電場変動が起きた場合、 イメージングリオメータの同時観測データを調べることによ り、大気電場と入射粒子さらに極域擾乱との関係を総合的に 明らかにすることができる。

本研究は大気電場観測を行い、グローバル・サーキットが 磁気異常に入射する高エネルギー粒子にどのように影響して いるか明らかにすることである。ただ、大気電場データは気 象条件により大きく変動するため、観測点周辺の静穏な気象 条件下のデータを選択び解析する必要がある。しかし、静穏 な気象条件下のデータを選択する際、どのような基準でデー タを取捨選択すれば妥当であるのかという問題点がある。こ の解決策として、多点電場観測データを調べることで、その 困難さを避けられる可能性がある。すなわち、離れた何点か の大気電場データが同じような変動を示しているとすれば、 それは局所的な気象現象の影響ではなく、グローバルな現象 の反映であると考えられる。従って、磁気異常帯周辺域の多 点観測データの収集、解析が重要であると思われる。

他方最近、雷雲時に電場加速によりガンマ線やX線が放射 されるということが話題になっている⁵⁰。これまで、鳥居氏⁶⁰ 等と共同で宇宙線と電場変動との関係を磁気異常帯で調べて いる^{77.80}。磁気異常帯は粒子の入射が常時見られているため、 雷雲時の大気電場の増加に伴いそれらの入射粒子が加速され 宇宙線が発生しやすい場所である。このような宇宙線の増加 が雷の大気電場の増加に伴い起きているとすれば、この地域 の生活環境に重大な影響を与えている可能性がある。

地球磁場は現在単調に減少を続けているが、磁気異常帯周 辺域の減少速度は他の地域に比べ著しく、あと200年足らず でこの地域の地球磁場強度は半分以下になると予想されてい る。このような弱い地球磁場になると大気電場変動が激しく なるとともに、高エネルギー粒子や宇宙線の入射量の増加が 起こる。その結果この地域の地球環境は大きな影響を受ける と考えられるが、本研究はそのような近未来の地球環境を予 測することが目的である。そのためには、これまで多点に設 置した大気電場計やイメージング・リオメータのデータを注 意深く解析し、見守っていく必要があろう。

謝辞

本研究は拓殖大学工学部・採択型研究費の助成を受けて行 いました。また、南米での研究調査は拓殖大学・短期留学制 度を利用させていだきました。お世話いただいた、関係各位 に心よりお礼申し上げます。

参考文献

- 1) 日本大気電気学会編、日本大気電気概論、コロナ社、2003
- 2) 北川信一郎, 雷と雷雲の科学、森北出版、2001
- 3) Rycroft, M. J., A. Odzimek, N. F. Arnold, M. Fullekrug, A.Kulak and T. Neubert New model simulations of the global atmospheric electric cirduit driven by thunderstorms and electricfield shower clouds: The roles of lightning and sprites, J.A.S.T.P., Vol. 69, Issues 17-18, 2485-2509, 2007
- 4) 地磁気観測所編、技術報告、第34号特別号、観測指針、 P51-84, 1994
- 5) ドワイヤー、JR. スミス. D. M, 雷雲からのガンマ線、日 経サイエンス2月号、P71-76, 2013
- 高居建男、雷雲から放射線が出る、JRL, Vol. 2, No. 2, 2013.
- 7) Makita, K., T. Torii, M. Hoshino, M. Nishino, K. Shiokawa, N. J. Schuch, Cosmic Ray and Riometer Observations in associated with Thunderstorm at Brazilian Geomagnetic Anomaly Region, Bulletin of Science and Engineering, Takushoku University, Vol. 9, No.2, 37-42, 2004
- 8) Makita, K., M. Hoshino, M. Nishino, E. Masuda, N. J. Schuch, A. Foppiano, Airglow, Atmospheric Electric Field and 38.2MHz wave phenomena observed at Brazilian Geomagnetic Anomaly Region during Magnetic Storm, Bulletin of Science and Engineering, Takushoku University, Vol.9, No. 3, 73-82, 2006

高分子光ファイバの干渉計型センサとひずみ測定への応用* Polymer Fiber-optic Interferometric Sensor and Its Application to Strain Measurement

越出 愼一 Shinichi KOSHIDE** 笠野 英秋 Hideaki KASANO*** 佐々木 繁 Sigeru SASAKI***

Abstract

Consept of structural health monitoring is proposed. Fiber-optic sensor is small insize, light weight, possess chemical inertia, does not require Joule heating, and is made of dielectric materials. Moreover, the polymer fiber-optic sensor is superior flexibility. The sensor is favorite candidates for use as the sensing system of structural health monitoring. In this peper, strain measurement of polymer fiber-optic Mach-Zuender and Micelson interferometric sensors are described. Calibration test for strain measurement of those sensors are carried out. The test results demonstrate that the sensors are useful for the structural health monitoring.

Keywords: Fiber-optic, Polymer, Strain measurment, Interferometric sensor, Strucutural health monitoring

1. 緒言

構造物の安全性を実時間的に監視する概念(ヘルスモニタ リング)が提唱されており、光ファイバ・センサはこの監視 用センサとして有効であるとされている。このような観点か ら、これれまでに実時間的にひずみの測定が可能な干渉計型 の光ファイバ・センサに関する研究を行い、ひずみ測定用の センサとして有効であることを実証してきた。しかしながら、 これまでの研究では主に石英(無機)ガラスの光ファイバを 使用したセンサで実験をしてきたが、このファイバは脆性材 料である。このため、微小ひずみの測定には有効であるが、 引張のひずみに対しては破断し易く、測定範囲が限定されて しまう。一方、最近では柔軟性があり、石英ガラスと同程度 の透明性を持つ高分子光ファイバが開発されている。そこで、 ここではこれまでの研究と同様なマッハ・ツエンダ及びマイ ケルソン干渉計型のセンサ部分に高分子光ファイバを使用し、 ひずみ測定の検定試験を行った。この結果、高分子光ファイ バのセンサでもひずみ測定が可能であることが確認された。

2. 光ファイバ干渉計型センサによるひずみの測定

一つの光源からの可干渉光を二つの光に分割し、さらにこの二つの光を再度重ねると干渉が起きる。この現象を利用したマッハ・ツエンダ干渉計、ファブリ・ペロ干渉計、マイケルソン干渉計、フィゾー干渉計などの光学的干渉計があるが、 光ファイバ干渉計型センサはこれらの干渉計を光ファイバで構成させたものである。とくにこれまでの研究では、このうちのマッハ・ツエンダ及びマイケルソン干渉計型のセンサにより、ひずみ測定の実験をしてきた。

このような干渉計では、二つの光を重ね合わせたときに起 きる干渉光の強度*I*は次の式で与えられる。

 $I^2 = A_s^2 + A_r^2 + 2A_s A_r \cos \phi$

ここで、*A*_s及び*A*_rは分割された二つの光の振幅、φはこの 光の光路差に関係した位相差である。

式(1)で与えられる干渉光の強度は位相差 ϕ の変動によっ て最大(A_s + A_r)²から最小(A_s – A_r)²へ、すなわち明るいと ころから暗いところへと周期的に変化する。これにより、例 えばマイケルソン光学干渉計などではFig.1に示すような干 渉のしま模様が観察される



Fig. 1 Fringe pattern of interferometer

一方、光ファイバ干渉計では、光源から入射された可干渉 光がカプラ(双方向性結合器)で振幅が*A*_sと*A*_rの光に分割さ れ、感知ファイバと参照ファイバに入射される。さらに、こ の二つの光をカプラで重ね合わせて干渉させる。



Fig. 2 Light intensity for optical phase retardation

この場合、感知ファイバのセンサ部分がひずみ ε を受けて 伸縮すると、式(1)の位相差 ϕ が変動する。この変動を $\triangle \phi$ とすると、Fig. 1のしま模様上の点が半径方向に移動する形 になり、 $\triangle \phi$ に対する光の強度変化はFig. 2のような波形に なる。

この波形の周期は2πになっている。したがって、位相差

(1)

^{**} 理工学総合研究所 客員研究員

^{***} 機械システム工学科

の変動 ϕ は波形の波数から決定することができる。また、 温度変化があまり大きくなく、光ファイバの伝播損失に関係 した高次の項が無視できるとすると、 $\Delta \phi$ と光ファイバのセ ンサ部分のひずみ ε の関係は次の式で表すことができる。

$$\Delta \phi = \frac{2 \pi \mathbf{n}}{\lambda} \left[1 - \frac{n^2}{2} \left\{ p_{12} - \nu \left(p_{11} + p_{12} \right) \right\} \right] \varepsilon L$$
(2)

ここで、 λ は可干渉光の波長、n及びvはFig. 3で示される ような構造の光ファイバのコア(光が伝播する部分)の屈折 率及びポアソン比、 p_{11} 及び p_{12} はひずみ・光学定数、Lはセン サの長さに関係した値である。



Fig. 3 Construction of optical fiber

ここで、使用する光ファイバの諸特性と光の波長から決定 できる定数(ひずみ感度)*C*を次の式で示す。

$$C = \frac{2\pi n}{\lambda} \bigg[1 - \frac{n^2}{2} \bigg\{ p_{12} + v \bigg(p_{11} + p_{12} \bigg) \bigg\} \bigg]$$
(3)

さらに、 *ε* と△ *φ* の関係を次の式に変換する。

$$\epsilon = \frac{1}{CL} \Delta \phi \tag{4}$$

この式(4) は*C*が定数であるので、 $\varepsilon \geq \triangle \phi$ が直線関係に なることを示している。したがって、*C*の値が既知で、セン サの長さ*L*が与えられれば、Fig. 2のような出力波形から $\triangle \phi \varepsilon$ 求め、式(4) より ε を決定することができる。これが 光ファイバ干渉計型センサによるひずみ測定の原理である。

3. 光ファイバ干渉計型センサの装置

各種の光学干渉計と同様な光ファイバ干渉計を構成してひ ずみの測定が可能であるが、ここではとくにマッハ・ツエン ダ及びマイケルソン干渉計型の装置を構成し、ひずみの測定 への応用について検討をした。

3.1 マッハ・ツエンダ干渉計型センサ

マッハ・ツエンダ干渉計型センサ装置をFig.4に示す。こ の型のセンサではFig.4のように光ファイバを接続し、光源 から入射された可干渉光をコネクタ(結合器)を介してカプ ラで分割する。さらに、コネクタを介して感知ファイバと参 照ファイバに入射させる。この感知ファイバのセンサ部分を



Fig. 4 System of the fiber-optic Mach-Zuender Interferomeiric sensor

被測定物の表面に接着、あるいは埋め込む。感知ファイバ、 参照ファイバはもう一組のコネクタ及びカプラに接続し、こ のカプラで二つのファイバを伝播してきた光を重ねて干渉さ せる。被測定物の感知ファイバが取り付けられたセンサ部分 のひずみ ε は被測定物と同じ大きさのひずみになつていると 考えられる。したがって、このときの位相差の変動△φで生 じる光の強度変化を光検出器で電圧に変換してFig. 2のよう な波形を記録すれば、この場合のひずみ ε が求められる。 3.2 マイケルソン干渉計型センサ

前述のマッハ・ツエンダ干渉計型センサは感知ファイバ、 参照ファイバともに連続したファイバで構成されている。こ のため、各ファイバに分割して入射させた光を重ねるのにも う一組のコネクタ及びカプラが必要になる。これに対して、 マイケルソン干渉計型センサでは感知ファイバ及び参照ファ イバの端面に光を反射する鏡を取り付け、ここで光を反射さ せることによって、一組のコネクタ及びカプラで構成された 装置にすることができる。Fig. 5 はマイケルソン干渉計型セ ンサの装置である。

この型のセンサでは、Fig. 5のようにカプラで分割し、コ ネクタを介して感知ファイバ及び参照ファイバに入射された 光が鏡状になった各ファイバの端面で反射される。この二つ の反射光は光の分割に使ったカプラに戻ってくるので、ここ で重ねられて干渉が生じる。この場合も、感知ファイバのセ ンサ部分のひずみ ε による△φの波形信号を記録すれば、ひ



Fig. 5 System of the fiber-optic Micelson interferometric Sensor

ずみが求められる。とくに、この型のセンサでは、カプラを 一つしか使用しないので、マッハ・ツエンダ干渉計型よりも 簡単な装置になる。ただし、ファイバの端面に鏡を取り付け る必要があり、センサ部分を光が往復することになるので、 センサに相当する長さが被測定部分に取り付けられた部分の 長さの2倍になる。

4. 高分子光ファイバ

これまでの実験に用いた装置では、マッハ・ツエンダ干渉 計型センサ、マイケルソン干渉計型センサとも装置の全ての 部分に石英ガラス光ファイバを使用していた。これらの装置 では、感知ファイバのセンサ部分がひずみにより伸縮するが、 石英ガラスの光ファイバは脆性である。このため、引張を受 けた場合には、ひずみが1200から1500×10⁻⁶程度になると 破断してしまう可能性があった。この対策として、Fig. 4及 びFig. 5に示された既製の装置の感知ファイバと参照ファイ バの部分に柔軟性があり、より大きな引張ひずみにも対応で きる高分子光ファイバを適用した。Table 1 にはこの光ファ イバの材質について示す。

品名		高分子光ファイバ FC 直角研磨 50 コア		
全長		2040mm		
コネクター		FC/直角研磨 PC		
コア	径	50µm		
	屈折率	1.356		
	材質	ポリテトラフルオロエチレン(PTFE)		
クラッド	径	490±5µm		
	屈折率	1.342		
	++.69	テトラフルオロエチレン・ヘキサフルオ		
	14頁.	ロプロピレン共重合体 (FEP)		
コーティング径	/材質	490μm/ポリマー樹脂		
操作波長		850nm		
最大滅衰		<33dB/km		

Table 1 Quality of polymer optical-fiber

高分子光ファイバの場合もファイバの構成は石英ガラスの ものと同じである。しかし、これまでの実験装置で使用して いる石英ガラス光ファイバはコアの直径が10µmなのに対し、 今回使用した高分子光ファイバはコアの直径が50µmで、ク ラッド部分の材質も異なっている。感知ファイバ及び参照ファ イバ以外は石英ガラスの光ファイバで構成されたこれまでの 装置を使用しているので、まずコネクタを介してこの高分子 光ファイバへ光が入射するか確認する必要があった。これに 対して、本装置では684.6nmの赤色の可視光源を使用してい るので、この赤色光の伝播を観察する手法を利用して検討し た。その結果、感知ファイバ及び参照ファイバへ入射する光 の量は減少するが、干渉による波形信号は観察可能であるこ とが確認された。

5. 片持はり試験片の曲げによる検定試験

ここで使用した高分子光ファイバでは特性のうちのひずみ・ 光学定数の*p*₁₁と*p*₁₂が与えられていないので、ひずみ感度*C* の値を前述の式(3)で求めることができない。しかし、ひず み測定に適用するには、この値を求める必要がある。これに 対して、Fig. 6 のような負荷(たわみ)速度が制御できる試 験装置で、曲げを受ける片持はり試験片の表面ひずみの測定 に電気抵抗ひずみ測定法を併用した検定試験を実施して*C*の 値を求めた。すなわち、この試験では、Fig. 7 のように、光 ファイバセンサと同一のひずみを受ける位置にひずみゲージ を接着した片持はり試験片の表面ひずみ ε を測定し、このひ ずみと次式により*C*の値を実験的に求めることができる。

(5)



Fig. 7 Specimen of caliburation test

Table 2には石英ガラス光ファイバの特性を示してあるが、 この検定試験を検討するために、波長 λ が 684.6 nm の光源と Table 2の特性を持つ石英ガラス光ファイバによるマッハ・ ツエンダ干渉計型センサのひずみ感度 Cを式(3)で求める と、10.5 × 10⁶ (rad/m) になる。

Table 2 Characteristics of quartz glass fiber

屈折率 n	1.463
ポアソン比 v	0.17
ひずみ・光学定数 p ₁₁	0.121
ひずみ・光学定数 p ₁₂	0.270

一方、Table 3にはこの石英ガラスファイバのセンサに対 し、三段階の負荷速度の検定試験の式(5)で得られたひずみ 感度の値を示してある。 この表の小数点以下の値には多少のばらつきはあるが、ほ ほ計算された値と一致しており、このような検定試験で実験 的にひずみ感度を求める方法が有効であることを示している。

Table 3 Strain sensitivity constants of quartz glass fiber Mach-Zuender interferometric sensor

負荷速度(µm/s)	ひずみ感度C (rad/m)	
33.2	10.3×10^{6}	
37.8	10.1×10^{6}	
42.3	10.2×10^{6}	

Fig. 8は高分子光ファイバのマッハ・ツエンダ干渉計型セン サによる検定試験で得られた波形とひずみ測定値の例である。 この図では波形が光ファイバセンサで得られた信号、直線 が電気抵抗ひずみ測定法で得られたひずみ変化の信号である。 このような三段階負荷速度に対する試験の△φとひずみゲー ジによる ε から求めたひずみ感度の値を Table 4 に示す。



Fig. 8 Typical signal of polymer fiber-optic Mach-Zuender interferometric sensor

Table 4 Strain sensitivity constants of polymer fiber-optic Mach-Zuender interferometric sensor

負荷速度(µm/s)	ひずみ感度 (rad/m)
24.9	11.5×10^{6}
42.2	11.5×10^{6}
64.5	11.7×10^{6}

Fig. 9はマイケルソン干渉計型センサの検定試験で得られ た波形とひずみ測定値の例である。

このマイケルソン干渉計型センサの場合はマッハ・ツエンダ 干渉計型センサで得られたものと時間(横)軸の幅が違って いるが基本的には同じ信号波形である。

Table 5はこのセンサの三段階の負荷速度に対する試験結

果を示したものである。しかし、マイケルソン干渉計型では センサ部分を光が往復するので、ひずみ感度を△φ/2εL、 すなわちC/2の形で求めている。このため、この表のひずみ 感度として示されている値はマッハ・ツエンダ干渉計型の場 合のほぼ1/2になっている。



Fig. 9 Typical signal of polymer fiber-optic Micelson interferometric sensor

Table 5 Strain sensitivity constants of polymer fiber-Optic Micelson interferometric sensor

負荷速度(µm/s)	ひずみ感度 (rad/m)
28.8	5.06×10^{6}
30.7	5.21×10^{6}
38.4	5.21×10^{6}

6. 試験結果に対する検討

感知ファイバと参照ファイバに高分子光ファイバを使用し た干渉計型センサの場合、Fig. 8あるいはFig. 9のように位 相差の変動△々に関する波形はいずれも振幅が比較的小さく、 一定になっていない。また、波形全体が多少揺らいでいる。 これは以下のような点が原因であると考えられる。まず、こ こで使用した装置ではコアの径が小さい石英ガラスの光ファ イバとコアの径が大きい高分子光ファイバをコネクタで接続 しているので、この部分での光の漏えいがかなり大きい。こ のために、光量が少なくなった状態の信号波形を記録してい る。また、光源の出力にかなり大きな周期的変動のあること が確認されている。このため、波形全体が揺らいだ状態になっ てしまう。とくに、マイケルソン干渉計型ではファイバ端面 での反射による損失もあるのでこの傾向が大きくなっている。 このため、波数の端数を正確に判定できるような、より高精 度の測定をするためには、安定した光源の使用、同一の高分 子光ファイバで構成した装置にするなどの改良をする余地が ある。さらに、ここで使用している干渉計型のセンサはひず みの正負、すなわち引張ひずみであるか圧縮ひずみであるか の判定が不可能である欠点がある。これに対しては光の周波 数をずらすヘテロダイン法あるいは反射光の強さを精密に測 定する方法などが提案されているが、いずれの方法も装置が 複雑になり、必ずしも有効ではなく、負荷状態で判断してい るのが現状である。しかし、光ファイバ干渉計型センサの最 大の長所はFig. 8あるいはFig. 9で示したような波数が判定 できる波形であれば、△φが求められるので、ひずみの測定 が可能なことである。

7. 結言

光ファイバ干渉計型センサによるひずみ測定では温度以外 の環境変化の影響を受けることがない利点がある。しかし、 これまで行ってきた研究で使用した石英ガラスの光ファイバ は脆性で、破断し易く、とくに引張ひずみに対しては微小範 囲のひずみの測定しかできない欠点があつた。この対策とし て、ここではひずみを受けるセンサ部分に柔軟性のある高分 子光ファイバの使用について検討をした。従来から使用して きた石英ガラスの光ファイバに接続する装置であったが、マッ ハ・ツエンダ干渉計型、マイケルソン干渉計型いずれのセン サでもひずみの測定は十分可能であることが確認された。

この光ファイバセンサは実時間的なひずみ測定が可能であ ることから、構造物の健全性監視用センサとして、とくに最 近では公共構造物への適用が注目されている。このような観 点から、本研究を踏まえて、今後干渉計型センサのひずみ測 定が可能な範囲、温度変化によるセンサの膨張あるいは収縮 の影響の検討などのより実用的な面の研究を行い、有効なセ ンサとしての応用ができるようにすることを期待している。

8. 謝辞

高分子ファイバのマッハ・ツエンダ干渉計型センサに関し ては2011年度卒業研究で林俊祥君が行った実験結果、またマ イケルソン干渉計型センサに関しては2012年度の卒業研究で 岩佐一志君が行った実験結果を引用させて頂いた。ここで両 君に感謝の意を表す次第です。

参考文献

- 1) 吉原邦夫, 物理光学, pp. 51-86, 共立出版、1974
- 2) 越出愼一,知的構造用光ファイバひずみセンサに関する 研究,航空宇宙技術研究所報告 TR-1323、1997

抄 録 ABSTRACTS

Evaluation of Adhesive Joint Strength by using Discoloration Value of Epoxy Resin	
Shun Yoshida Toshio Sugibayashi Kiyomi Mori Akihiko Okamura Mizah Binti Ramli	67
Texture Evaluation for Various Resins Subjected to Shot Blasting Process	
Kazunari Takamura Toshio Sugibayashi Kiyomi Mori	69
根菜類育生のための新しい水耕栽培システムの提案森きよみ	71
水耕と人工培地によるイモ類の屋内制御型栽培法における水環境制御森きよみ 前山利幸 大黒篤	73
根菜類生産のための植物工場に関する基礎的研究 ―光源とマイクロバブルの影響―	
森きよみ 前山利幸 平林大騎 岡田武仁	75
波形単板コアパネルによる軽量家具のデザイン阿部眞理 三戸部健 白石照美 小幡谷英一 沈得正	77
リズム感を演出したトンネル壁面のパターンデザイン	79
触覚と聴覚を用いた視覚障害者のための図形パターン伝達支援システムに関する研究杉本雅彦	83

Evaluation of Adhesive Joint Strength by using Discoloration Value of Epoxy Resin*

Shun YOSHIDA** Toshio SUGIBAYASHI*** Kiyomi MORI*** Akihiko OKAMURA**** Mizah Binti Ramli*****

Abstract

In this research, the correlation between the strength of adhesively bonded joint and the discolorations of adhesive under high temperature and different environmental conditions are investigated. These successful experiments assert that the strength of adhesive bonding could be judge by its appearance color.

Keywords: aluminum alloy, epoxy resin, discoloration.

1. Introduction

Joining techniques such as welding, bolting, riveting, and adhesive joining have been widely used in the industries all over the world. However, recently adhesive bonding has been known to have the greatest features among those techniques. Known for thousand of years, this method is believed to have the advantages such as improve stress distribution, weight reduction, reduce manufacturing cost and superior thermal resistance. But yet, the adhesion mechanism and coupling theory of adhesive has not been elucidated ^[1]. In order to determine how adhesive behaves according to the temperature at certain exposure of time, experiments are carried out to assess the discoloration of epoxy resins.

In this research, aluminum alloy A5052, which is commonly used in automobiles, marine components, aircraft and other aerospace structures, is taken as the adherend and epoxy resin is applied as the adhesive. To evaluate the physical properties of adhesive quantitatively, SCE methods as well as $L^*a^*b^*$ colorimetry are used as the assessment techniques. Results containing the correlation between discoloration of epoxy resin by heat and the adhesive bonding strength are studied and will be discussed. The highest temperature for samples to be heated in the furnace is 200°C, and the maximum duration of exposure is 100 hours. Discoloration of epoxy resin will be figure out in terms of lightness and chromaticity at certain temperature and hours.

2. Materials and methods

To investigate the strength of joints at high temperatures, one-component epoxy resin was adopted in the joints. Heat

*** 機械システム工学科

required to cure the epoxy adhesive is 120°C for 1 h followed by 150°C for 1 h. For this type of epoxy adhesive, Young's modulus and Poisson's ratio are 4.4GPa and 0.36 respectively.

Failure tensile tests of single lap joints at room temperature ($25^{\circ}C \pm 3 \ge C$) were performed by a hydraulic testing machine with loading rate of 1 MPa/s in order to obtain the strength of joints. Single lap joints were manufactured by combining two aluminum alloy plates of A5052-H112 with a dimension of $25 \times 150 \times 5$ mm³. The bonding area of the joint was 25×25 mm². The substrates' surface roughness was approximately 0.4μ m.

After all specimens were cured according to the recommended curing conditions, specimens were exposed to different high temperatures (200°C) for different periods (0 h until 100 h). Specimens that underwent only the curing process were named "Non-exposure", while others were denoted by their exposure conditions.

3. Evaluation approach

When the epoxy adhesive was exposed to high temperatures, we noticed that the color of epoxy adhesive changed gradually. The discoloration of epoxy adhesive is distinct for every condition. Grant et al. reported that as the temperature increases, the joint strength decreases^[2]. If these phenomena are combined, then it becomes possible to predict the strength of adhesive joint by observing the discoloration of the adhesive. It is considerably more challenging to measure the discoloration of epoxy adhesive at a fractured surface. Therefore, we decided to apply some of the epoxy adhesive on one of the substrates and labeled it as "Reference resin".

4. Experimental results and discussion

4.1 Reference resin

Fig. 1 shows the photographs of reference resin. The discoloration of epoxy adhesive can be clearly distinguished. The reference resin which was not exposed to high temperature but only went through the curing process, is labeled as "Non-exposure". Primarily, it shows white color. As time and

 ^{*} 原稿受付 平成25年10月17日
The original title "Mechanical Properties Evaluation of Aluminum Alloy A5052 by Discoloration of Epoxy Resin"
AB2011 International Conference on Structural Adhesive Bonding

Faculty of Engineering, University of Porto ** 東京農工大学工学府機械システム工学専攻

^{****} 株式会社スリーボンド ***** 機械システム工学車内

^{*****} 機械システム工学専攻

temperature increased, a discoloration occurred.



Fig. 1 Photographs of reference resins



Fig. 2 Correlations between adhesive joint strength $\sigma_{_F}$, lightness of fractured surfaces $L^*_{_{(F)}}$ and lightness of reference resins $L^*_{_{(F)}}$.

4.2 The correlation between the strength of adhesively bonded joint and L*a*b* color system

The correlation between $\sigma_{F} L^{*}_{(F)}$, and $L^{*}_{(R)}$ are described in Fig. 2. L^{*} signifies lightness variable, where $L^{*}=100$ indicates white color and $L^{*}=0$ indicates black color of an object. The results show that as $L^{*}_{(F)}$ and $L^{*}_{(R)}$ increased, the values of σ_{F} increased too. Therefore, the strength of a joint can be predicted by considering the lightness of adhesive at elevated temperatures.

5. Conclusion

In this research, we proposed a novel prediction method to predict the strength of adhesively bonded joints through the observation of colors and surface texture of the adhesive. Our main findings are the following:

- The surface color of epoxy resin was positively correlated with the joint strength σ_F.
- 2) The strength of a joint can be predicted by considering the lightness of adhesive at elevated temperatures.

REFERENCES

- K. Ikegami, and T. Sugibayashi, A method of estimating the strength of adhesive bonded joints of metal, J. Adhesion, Vol. 21, 211-227 (1987).
- [2] K. Kihara, H.Isono, H.Yamabe, T. Sugibayashi, A study and evaluation of the shear strength of adhesive layers subjected to impact loads. Int. J. Adhesion and Adhesive, Vol.23, 253-259 (2003).

Texture Evaluation for Various Resins Subjected to Shot Blasting Process*

Kazunari TAKAMURA** Toshio SUGIBAYASHI*** Kiyomi MORI***

Abstract

Industrial products place great importance not only on its function and performance but also on added value obtained from the surface which performs its attractiveness and tactual sense. However, there are a few investigations for evaluating the surface texture of various resins. This report presented the experimentally evaluation for the texture of acrylic resin surface which is fabricated by shot blast. The relationship between the arithmetic mean roughness of the surface of shot blasted acrylic resin and optical characters of it was investigated.

Keywords: Texture, 3D parameter, Shot blasting

1. Introduction

In this present report, the relationship between the surface texture of the acrylic resin and optical properties was investigated experimentally by using the surface texture parameters because industrial products place great importance not only on its function and performance but also on added value obtained from the surface which performs its attractiveness and tactual sense. Firstly, it was confirmed by using acrylic resin that the 2D surface texture parameter, which is often used for evaluating the surface texture, was correlated with the areal surface parameter which was introduced in 2012^{(1),(2)}. Moreover, the relationship between grassiness and brightness and optical properties such as the specular light distribution, spectral reflectivity and haze were investigated by referring to arithmetic mean height of acrylic surface.

2. Measuring method and Experiment result

1.8mm × 1.8mm area of acrylic surface was scanned at 1024×1024 pixels resolution by the non-contact 3D surface profiler applied white fringes method. The measured example of shot blast surface and the profile curves are shown in Fig. 1 and Fig. 2, respectively. Both figures verify that all surface area of the test piece is fabricated by shot blast. Fig. 2 indicates that both convexo-concave shapes seem similar when the arithmetic mean height Sa differs. The relationship between skewness(*Ssk*), kurtosis(*Sku*) and arithmetic mean height (*Sa*), which represent the future of the surface, are shown in Fig. 3. The skewness(*Ssk*) and the kurtosis(*Sku*) shows each same values when the arithmetic mean height(*Sa*) differs, which indicates that the convexo-concave shapes of shot blast surface are similar when the arithmetic mean height(*Sa*) differs, which indicates that the convexo-concave shapes of shot blast surface are similar when the arithmetic mean height (*Sa*) differs.

* 原稿受付 平成25年10月17日 AB2011 International Conference on Structural Adhesive Bonding Faculty







Fig. 2 Surfaces of shot blasted Acrylic resin.



of Engineering, University of Porto

^{**} 機械システム工学専攻

^{***} 機械システム工学科



Fig. 6 Transmittance and Haze.

Fig. 4 shows the relationship between glossiness(Gs), $lightness(L^*)$ and arithmetic mean height(Sa). The glossiness and the lightness were measured with the test piece on the black cloth in a dark room. The glossiness(Gs) decreases as the Sa increases. On the other hand, the lightness shows same value as the Sa differs.

Fig. 5 shows the relationship between the specular light at incident angle 60° and the arithmetic mean height. The peak value of specular light decreases as the arithmetic mean value increases. Furthermore the specular light disappears to be diffusion light.

Fig. 6 shows the relationship between the transmittance, the haze and the arithmetic mean height (*Sa*). The value of the transmittance increases and the value of the haze decrease as the arithmetic mean height (*Sa*) increases. The value of transmittance shows smaller than the value of haze when the value of Sa is more than 0.6μ m.

3. Conclusion

In this present report, the relationship between the surface texture and optical property of acrylic resin was investigated experimentally. As a result, it was indicated that the shot blast surface was able to be characterized by relating the arithmetic mean height to the other surface texture parameters.

REFERENCES

- ISO 25178: Geometric Product Specifications (GPS)— Surface texture: areal.
- [2] Shun YOSHIDA, Kaori OOTAKE, Kazuhiro KAWA-NABE, Yoshihito KAGAWA, Hiroaki ISONO and Toshio SUGIBAYASHI J. JILM 61, 187(2011).

根菜類育生のための新しい水耕栽培システムの提案* Proposal of New Hydroponically Culture System for Root Vegetables

森 きよみ Kiyomi MORI **

Abstract

To develop a hydroponically culture system with solid mediums for potatoes, colocasia antiquorums and root vegetables as a food and energy source, the effect of different types of culture mediums is investigated. Effect of air bubbles in nutrient solution on growth of roots is also presented.

Keywords: Plant Factory, Root vegetables, Hydro culture, Solid medium, Air bubbles

1. 緒 言

低価格のLED照明装置の普及により、室内人工光による植 物工場の開発が急激に進められ、植物工場の第三次ブームと 言われている。さらに、最近の気候変動現象により農作物へ の影響が懸念される中、工業的知識の導入による安心で安全 な食糧生産技術に対する期待が高まっている。国内では、大 企業も完全制御型の室内植物工場の開発に参入し¹⁾、製品化 を進めているが、そのほとんどは葉菜類、果菜類およびキノ コ類の生産を目的をしている。しかし、エネルギーベースで の食糧自給を確保できなければ、人間は生きていくことがで きない。水耕栽培による根菜の栽培実験の結果としては、江 口らが養液水位が人参の生育に及ぼす影響について報告して いる²⁾が、根菜類あるいはイモ類に関して特化した水耕栽培 技術に関する定量的な研究成果の報告は少ない。

そこで、本研究においては、エネルギー源となるジャガイ モ、サトイモなどのイモ類および大根、人参などの根菜類を 栽培するための新しい水耕栽培システムの開発を目的とし、 養液中への気泡導入による生育状況への影響と、収穫部位を 支える人工培地の効果について、実験栽培を行って検討した。

2. 実験方法

各国の食糧自給率の現状をFig.1に示す³⁾。また、本研究 で提案しているシステムの概念図をFig.2に示す。栽培実験 では、まず、ジャガイモの種芋を2013年3月15日に小型水 槽に配置し、根と水の状態を観察しながら室温(15°C~18°C) で栽培した。植付けから2週間後のイモの様子をFig.3に示 す。次に、同年3月30日に人参の種を市販の小型水耕栽培装 置(ホームハイポニカ303、協和株式会社製)に播種した。播 種から18日後の人参の写真をFig.4に示す。その後、ある程 度成長したジャガイモおよび人参は、それぞれ培地を使用し た栽培装置に移植し、収穫まで生育した。本研究で検討した 培地3種類をFig.5に示す。本報では、Fig.5(a)のハイドロ コーンをジャガイモの栽培に使用した結果を報告する。

養液に入れる肥料は大塚ハウス™のNo.1およびNo.2を使 用した。照明装置は、蛍光灯(家庭用ペンダントライト、3波 長タイプ、昼白色、6200 lm、68W)を用いた。根は水と養液

* 原稿受付 平成 25 年 11 月 12 日

中の無機イオンを取り込み、葉は吸収した空気中の二酸化炭 素と光により光合成を行って、エネルギーを蓄え、酸素を排 出することから、水耕栽培における植物の生長には、養液の 水環境が大きく影響する。水耕栽培により栽培された根の一 例として、スイートコーンの根の先端の電子顕微鏡 (SEM)写 真をFig.6に示す。水環境を清浄な状態で維持し、さらに溶 存酸素濃度を維持するために、本システムではアスピレータ 用のベンチュリ管を使用した自作の気泡発生装置を導入した。

3. 実験結果

Fig. 5の3種類の培地について保水率を測定した結果、Fig. 5(a)のハイドロコーンが最も低い結果となった。ジャガイモの栽培には、低保水率が適していることから、本実験ではハイドロコーンを使用した。植付けから約3ヶ月後の6月13日に収穫したジャガイモの写真をFig. 7に示す。本栽培実験で



Fig. 1 Rate of food self support (for enegy)



Fig. 2 Proposed cultivation sytem

⁸th International Symposium on Advanced Science and Technology in Experimental Mechanics, (November, 2013, Sendai, Japan)

^{**} 工学部機械システム工学科


Fig. 3 Potatoes in a water tanks with bubbles



Fig. 4 Carrots 18 days after planted



(a) Hydro Corn (b) Vermiculite (c) Verdenite Fig. 5 Solid mediums

は、最大で50mm程度の新ジャガイモを収穫することができ た。なお、気泡導入の影響を確認するために、ジャガイモの 種芋は最初に2つの水槽にそれぞれ数個ずつ配置し、一方の 水槽にだけ気泡を導入し、他方は導入せずに栽培実験を行っ た。結果は、気泡を導入しなかった水槽では、種芋が腐敗し て水がにごり、最終的には枯れた。また、培地を入れた栽培 装置に移植せず、養液のみで栽培したジャガイモは、花が咲 いた後でも、新ジャガイモが育つことは無かった。

人参や大根等の根菜類では、貯蔵根(食糧とする部分)は 地中のみならず、地上へ向かっても生長する。そこで、人参 については、高分子材料製のスポンジを支えおよび遮光のた めに使用した。播種からおよそ2.5ヶ月後に収穫した人参を Fig. 8に示す。最大で約100mmの長さの貯蔵根を収穫するこ とができた。

4. 結 言

ジャガイモと人参を水耕栽培で生育するために、気泡と培 地を用いた新しい栽培システムを提案し、以下の結果を得た。



Fig. 6 An example of root chip SEM image of hydroponically cultured vegetables (corn)



Fig. 7 New potatoes harvested



Fig. 8 New carrots harvested

- (1) 水耕栽培に培地を使用することにより、人工光による屋内栽 培においてジャガイモと人参の収穫ができることを確認した。
- (2) 栽培養液中に気泡を導入することにより、養液のにごりと 腐敗を抑制することができた。
- (3) 今回の実験で得られた結果を基に、今後、本格的な栽培シ ステムを構築し、より安定した収穫のできるシステム要件 を定量的に調べる予定である。

参考文献

- Ono, E., Watanabe, H.: Plant Factories Blossom, *ProQuest Agriculture J.*, 13-2 (2006), 13-14.
- Eguchi, T, Suzuki, T., Miyamoto H., Hamakoga, M., Yoshida, S., Chikushi, J., and Kitano, M.: Influence of Ground Water Level on Carrot Grows in Solid Substrate Culture System (in Japanese), *J. SHITA*, 21-2 (2009), 67-71.
- 3) 農林水産省ホームページ、http://www.maff.go.jp/j/ zyukyu/zikyu_ritu/other/2-5-2.xls.

水耕と人工培地によるイモ類の屋内制御型栽培法における水環境制御* Water Environment Control in Indoor Plant Factory of Potatoes Cultured Hydroponically with Solid Medium

森 きよみ Kiyomi MORI** 前山 利幸 Toshiyuki MAEYAMA*** 大黒 篤 Atsushi DAIKOKU****

Abstract

Plant factories with indoor hydroponics come to attract attention with development of the LED lamps and increasing crisis awareness for the drastic change of climate in recent years. We proposed a low cost compact plant factory of energy source of human beings available for utilizing in a home. Potatoes were experimentally cultivated by a hydroponic system that was the combination of an artificial medium and nutrient solution to evaluate the artificial control type plant factory within a room. In this study, effect of air bubbles and dissolved oxygen contents of the solution on growth of potatoes is investigated. Circular fluorescent lamps are used as the lighting device.

Keywords: Hydroponics, Potatoes, Culture Medium, Energy Source, Plant Factory, Circular fluorescent lamp

1. 緒 言

近年、異常気象現象や地震などによる自然災害が増加し、 環境とエネルギーおよび健康に関する関心が非常に高まって いる。同時に、安全な食料を安定的に得るための食料自給率 向上や食品のトレーサビリティに対する要求も高まっている。 そのような状況の中、食料としての植物を安定供給するため の屋内完全制御型植物工場の研究・開発が、各種環境センサー とLED照明のコスト低下により、21世紀に入ってから急速に 注目を浴びてきている¹⁾⁻⁴⁾。しかし、そのほとんどがレタスな どの葉菜類およびトマトなどの果菜類を生育するためのプラ ントである。

そこで、本研究では、屋内における人工制御型植物工場に おいてイモ類および根菜類の生育をおこなうために、機械シ ステムの技術を応用し、まず、ジャガイモを対象に人工の培 地と水耕栽培の組合せである固形培地耕による栽培実験を 行った。本報告では、影響因子として溶液中の溶存酸素量に 着目し、バブルジェットによる水環境の変化と生育状態との 関係について、得られた結果を述べる。

2. 栽培実験の方法

Fig. 1に、ジャガイモの栽培実験に用いた小型プラントの 概略を示す。照明には、一般家庭用のペンダントライト(サー クル型蛍光灯、昼白色、68W、最大光束6200lm、光量子密度 換算値⁴⁾ 68µmol m⁻²s⁻¹)を用いた。照明時間は、毎日朝5時 から夜9時までの16時間とした。今回の実験では、室温は特 に制御はしていないため、平均気温は20°C前後であったが、 照明中は、蛍光灯により植物の周囲は気温が高くなっていた と考えられる。栽培装置は、アクリル水槽に50mm 程度の深 さまで水を入れ、その中にプラスチック製のかごを設置した。 不織布を敷いたかごの中に培土としてハイドロコーンを深さ 200mm 程度まで入れ、その中に種イモを埋めた。水はポンプ で循環させ、吐出口に自作の気泡発生器を取り付けた。Fig. 2に気泡発生器の写真を示す。配管の途中にアスピレータを 取り付けて空気を吸い込み、ホースの出口に気泡を発生させ るための溝を付けたパイプと、さらに発生した気泡を細かく するためのネットを取り付けた。

Fig. 3に、気泡を入れた場合と入れない場合の、水槽内の 水の溶存酸素量を測定した結果を示す。この結果は、イモを 植える前の水の測定結果である。図中に示した直線は、それ ぞれの温度における飽和酸素量を示している。いずれの温度 においても、気泡を導入した水の酸素量がわずかに増加して いることが確認できた。

ジャガイモの種イモは、まず、水のみを循環させた水耕栽 培装置に植え、イモにわずかに水が掛かる程度の水位で発芽 させた。その後、ある程度根が成長するまでは、そのまま水 のみで育成し、葉が10枚程出た頃に、Fig. 1の装置に定植し た。Fig. 4に、定植前のジャガイモの葉の様子を示す。定植 前の水槽にも、気泡発生器は取り付けてある。



Fig. 1 Schematic diagram of small plant

^{*} 原稿受付 平成25年11月12日 日本実験力学会2013年度年次講演会、講演論文集No.13, pp.199-200 (August 21, 2013)

^{**} 工学部機械システム工学科

^{***} 工学部電子システム工学科

^{**** (}株)構造計画研究所



Fig. 2 Bubble generator



Fig. 3 Effect of bubbles on content of dissolved oxigen

3. 栽培実験の結果

種イモの植え付けからおよそ2か月半で、少量ながら新ジャ ガイモを収穫することができた。Fig. 5に、収穫直前の塊茎 である新ジャガイモ(培地の表面近くに生育)の写真を示す。

気泡発生器を取り付けずに、水の循環だけで栽培した場合 には、植え付け時の水耕栽培でも水の濁りが著しく、種イモ が腐敗してしまった。それに対して、気泡を導入した場合に は水がほとんど濁らず、水中の根は白く、根の成長も顕著で あった。これらの結果から、気泡を積極的に導入することに より、水耕液中の溶存酸素量の増加はわずかしか見られなかっ たが、マイクロバブルほど微小な気泡ではない場合にも、水 の浄化あるいは菌の発生を抑制する効果が十分みとめられた。 なお、培地を使わずに、水耕液のみで栽培した場合には、水 上の葉および茎は大きく成長したが、新イモ(塊茎)の成長 はみられなかった。

4. 結 言

人工培地と水耕栽培を組合せた固形培地耕システムにより、 ジャガイモを屋内で人工光により栽培した結果、少量ながら イモを収穫することができた。結果を以下にまとめて示す。 (1)4月の植え付けから約2か月半で6月には新ジャガイモの 収穫ができた。



Fig. 4 Before fix-planting



Fig. 5 New potatoes in artificial solid

(2)気泡発生装置を水中に設置した結果、水耕液の腐敗が抑 えられ、根の成長も顕著であった。この結果から、マイク ロバブルほど微小気泡ではない場合にも、気泡による水耕 液の浄化の効果は確認できた。

参考文献

- 野口伸ほか:知能的太陽光植物工場の新展開,日本学術 会議 農業情報システム分科会、(2011), 1-15.
- 古在豊樹ほか:閉鎖型苗生産システムの開発と利用、 SHITA Report No.16 植物工場の最新技術 その2、日本 植物工場学会 (2000), 14-29.
- 高辻正基:植物工場への展開一工から農へ一、植物環境 工学、24-3 (2012), 163-166.
- 4) 村瀬治比古、福田弘和:ハイテク植物工場とイノベーション、植物環境工学、24-3 (2012), 167-173.
- 5) http://www.hoshi-lab.info/env/light-j.htlm

根菜類生産のための植物工場に関する基礎的研究 — 光源とマイクロバブルの影響—* Basic Investigation of Plant Factory for Edible Roots — Effect of Light Source and Bubble Jet—

森 きよみ Kiyomi MORI** 前山 利幸 Toshiyuki MAEYAMA*** 平林 大騎 Daiki HIRABAYASHI**** 岡田 武仁 Takehito OKADA****

Abstract

Great attention has been devoted to find the optimum conditions for growing vegetables in hydroponic cultures since 1980s with significant advancement of highly controlled plant factory. In recent years, indoor type plant factories come attract attention with the development of low cost LED lamps. In addition, a safe and stable food supply based on the engineering technology is required with increasing crisis awareness for the drastic change of climate, especially in JAPAN. In this study, water remediation technologies utilizing the bubbles and bubble jet are applied in nutrient solution to cultivate root vegetables and potatoes in solid medium culture system. We represent here the effect of bubbles on dissolved oxygen and growth of vegetables.

Keywords: Plant Factory, Solid Medium Culture, Bubble Jet, Root Vegetables

1. 緒 言

1980年代に植物工場の自動化技術の開発が進み、回転式レ タス工場など大手企業が事業参入することにより、水耕栽培 による植物工場が注目を浴びるようになった。21世紀に入っ てからは、青色LEDの普及に従って人工光型の屋内水耕栽培 方式による植物工場の開発が進み、現在、植物工場の第三の ブームと呼ばれている。食料自給率の低い日本国内において は、2011年の東日本大震災と原子力発電所の事故などにより、 安心で安全な食糧確保への関心が高まり、自動車産業や家電 製品で培われた工学の高い知識と技術力を基盤とした植物工 場の研究開発が精力的に行われている^{(1)~(3)など}。

植物工場は、照明光の種類により太陽光型と人工光型の大 きく二つに分類できるが、栽培される野菜の多くはレタスな どの葉菜類、トマト、イチゴなどの果菜類、カイワレ大根な どのスプラウト類およびきのこ類などである。しかし、食糧 確保の観点からすると、人間のエネルギー源である根菜類お よびイモ類の栽培も、益々重要になってくるものと思われる。

そこで、本研究においては、根菜類栽培用の植物工場の完 全自動化技術の開発を目的に、まずは基礎となる物理的な影 響因子として、光源の波長が植物の生育に及ぼす影響につい て3種類の光源を用いて確認した。さらに、水の浄化技術と して注目されているマイクロバブル⁽⁴⁾およびバブルジェット を水耕栽培に適用し、その影響について栽培実験を行った。

2. 栽培実験

ダイコンに関しては、一般的な土壌栽培においても貯蔵根 (食用とする部位)が地表から上下に成長する。そこで、ま ず、貯蔵根部分を支える構造体としての土の代わりに、本研 究の水耕栽培ではスポンジを用いて生育状況を確認した。



Fig. 1 Schematic diagram of simplified small plant

Fig.1に実験に用いた市販の簡易型水耕栽培装置を示す。養 液の循環装置の管には、ベンチュリ効果により液中にわずか に空気を取り込むための穴が開けてある。その結果、貯蔵根 が発達し始めた時期にスポンジにより支えた場合には、水面 から上に肥大しながら真直に成長し、約2ヶ月で貯蔵根の長 さが20cmに達した。しかし、支えが無い場合には貯蔵根は 湾曲し、根径も支えがある場合に比べ細かった。このことか ら、根菜類については、土は水およびイオン化した養分を吸 収するための媒体であると同時に、構造体としても必要であ ることが確認できた。

次に、光源の違いによる生育への影響を調べるために、一 般家庭用シーリングライトを用いて、Fig. 1の栽培装置により 実験を行った。用いた照明は、一般家庭用サークル蛍光灯(68W, 最大6200lm、光量子束密度換算値⁽⁵⁾ 68µmol m⁻²s⁻¹)と家庭用 白色 LED 照明(34W, 最大 3200lm)の2種類である。LED 照 明は、蛍光灯に比べて消費電力および光束がほぼ半分の値と なっている。それぞれの栽培装置表面における分光照度分布 を Fig. 2 に示す。その結果、1ヵ月後に収穫したサンチュの葉 の平均枚数と葉の最大厚さは、蛍光灯の場合には15枚/株、 約0.5mmであり、LEDの場合には12枚/株、約0.3mmであっ た。葉菜類の成長には、150~200µmol m⁻²s⁻¹の光量子束密度 が必要と言われているが⁽⁶⁾、今回用いたLED 照明の照度では、 十分な光合成が行えなかったが、葉の大きさについては蛍光 灯の場合とほとんど差が無く、照度の不足、特に赤色光の不 足が葉の厚みと数に影響を及ぼすことが確認できた。

^{*} 原稿受付 平成25年11月12日 第23回環境工学総合シンボジウム,日本機械学会講演論文集No.13-15, pp. (Jury 12, 2013)

^{**} 工学部機械システム工学科

^{***} 工学部電子システム工学科

^{****} 工学部機械システム工学科 平成25年3月卒業

最後に、アスピレータの原理を利用した自作のマイクロバ ブル発生器を導入した実験用栽培装置(Fig. 3)により、養液 中の溶存酸素濃度におよぼすバブルの効果と水環境の変化お よび試験栽培をしたサンチュの生育状況について調べた。こ の実験には、植物栽培用に青、緑、赤の波長の照度を大きく した蛍光灯を用いた。その分光分布をFig. 4に示す。バブル 発生器を導入したことによる溶存酸素量の変化をFig.5に示 す。飽和溶存酸素量は温度によって異なるが、23℃から30℃ のいずれの場合にも、バブルにより溶存酸素量が増加してい る。また、最初に行った簡易型栽培装置による生育実験のサ ンチュ収穫後の溶液中の酸素量は、バブル導入実験による同 じ温度の酸素量よりも低く、呼吸により酸素が消費されたこ とを確認できた。Fig. 6には、バブル発生器の有無によるサ ンチュ発芽後の生育状態を比較して示す。初期の葉の成長に も差が見られるが、特に根の成長に大きな差が見られ、これ は酸素濃度のみならず、バブルによる攪拌効果とバブルがは じける際のバブルジェットによる溶液中の熱移動と流れによ る刺激も影響しているものと考えられる。

3. 結 言

人工光による植物工場における根菜類生育に及ぼす影響と して、照明光の種類による違いおよび溶液中へのバブルジェッ ト導入の効果について、基礎的な実験を行った。その結果、 バブルの効果は、生育初期段階から根の成長に大きな効果が



Fig. 2 Spectral irradiances of home use lighting lamps



Fig. 3 Schematic diagram of plant with bubble jet



Fig. 4 Spectral irradiance of a fluorescent lamp for growing plants

見られ、根菜類の栽培にもその効果が期待できるという結果 を得ることができた。

謝 辞

本研究の一部は拓殖大学理工学研究所 共同研究助成の支 援により行ったことをここに記し、関係各位に謝意を表しま す。また、溶存酸素量の測定方法等、本研究を遂行するに当 り、貴重なご助言をいただきました拓殖大学工学部 松永直樹 教授に感謝の意を表します。

参考文献

- 高辻正基:植物工場への展開 工から農へ、植物環境 工学、24-3 (2012), 163-166.
- (2) 堀部和雄、一野天利、河本敬子、谷澤一雄: 資源循環型 植物生産システムにおける野菜工場の環境因子量予測、 Memoirs of the school of B. O. S. T. of Kinki University, 23 (2009), 55-66.
- (3) 村瀬治比古、福田弘和:ハイテク植物工場とイノベーション、植物環境工学、24-3 (2012), 167-173.
- (4) 柘植秀樹監修:マイクロバブル・ナノバブルの最新技術
 Ⅱ、シーエムシー出版 (2010), 188-189.
- (5) http://www.hoshi-lab.info/env/light-j.html#2.
- (6) D・サダヴァ他(著)・石崎泰樹、丸山敬監訳:大学生物 学教科書 第1巻細胞生物学、ブルーバックスB-1672、講 談社(2010).







Fig. 6 Effect of bubbles

波形単板コアパネルによる軽量家具のデザイン* Design of Lightweight Furniture by Using Corrugated Veneer Core Panel

阿部 眞理 Abe MARI**
三戸部 健 Mitobe KEN***
白石 照美 Shiraishi TERUMI**
小幡谷英一 Obataya EIICHI****
沈 得正 Sim Teck CENG*****

Abstract

Lighten the furniture can be considered as a method of an earthquake disaster measures in the living space. In this research, we developed the lightweight material called corrugated veneer core panel and made the furniture by using it. The furniture that we made is a nesting type block shelf. This shelf is comprised by six blocks and can rearrange it depending on storage space and things. The weight of nesting type block shelf was confirmed that, which is much more lightweight than equal product in the market. Furthermore, we applied the corrugated veneer core panel to develop a honeycomb core panel and color corrugated veneer core panel. It will be necessary to examine a method to apply these materials to furniture in future.

Keywords: lightweight furniture, corrugated veneer core panel, earthquake

1. 研究の背景と目的

わが国はこれまで幾度となく大きな震災に見舞われており、 震災への備えが必須となっている。居住空間内における震災 対策のひとつとして、家具固定の重要性が注目されているが、 転倒防止の後付け器具等に頼っているのが現状で、家具や内 装にダメージを与え、意匠性に欠ける。また、転倒の危険性 を回避するべく家具の移動を試みた場合、重い家具は高齢者 にとって負担が大きい。いずれにせよ、家具全体の改善が課 題といえる。本研究では、軽量で強度があり、かつ意匠性に 優れた材料である波形単板コアパネル^{1) 2)}を開発し、それに よる軽量な家具提案を行うことを目的とした。

2. 波形単板コアパネルによる箱物家具構造・接合方法の検討

開発した波形単板コアパネルを用い、箱物家具の基本的な 構造³³によるオープンボックスを試作し、構造および接合方 法を検討した(図1)。試作したオープンボックスの構成部材は、 天板、側板、地板である。また、部材の接合では、波形単板 コアパネルのコア部分がソリッドでないため、L字型の補助 材(ヒノキ材)を用い、留継ぎによって接合することとした。



図1 試作したオープンボックス

- * 原稿受付 平成 25 年 10 月 17 日
- ** 工学部デザイン学科
- **** (株) フィズリペアワークス
- **** 筑波大学大学院生命環境科学研究科
- ***** 工学研究科工業デザイン学専攻

3. 波形単板コアパネルによる軽量家具の制作

3.1. 部材どうしの接合部のデザイン検討

オープンボックスの試作では、L字型の補助材を用いた留 め継ぎを採用したが、接合部の意匠性に問題が残った。軽量 家具のデザインにあたり、以上の問題点をふまえながら部材 どうしの接合方法を再検討し、図2に示すような方法を考案 した。この方法は2層式の波形単板コアパネルを用い、L字 型の補助材に波形単板コア材をはさみこんで接合するもので ある。これにより、端面に化粧材を施す手間が省け、さらに、 波形単板コアパネルのコア部分および接合部分を見せるデザ インが可能となった。



図2 部材(板材)どうしの接合方法

3.2. 制作する箱物家具の種類に対する検討

波形単板コアパネルによる軽量家具をデザイン、制作する にあたって、箱物家具の種類について検討した。箱物家具に はタンス、キャビネット、シェルフなどの種類があるが、試 作したオープンボックスの構造を参考とし、今回はシェルフ を制作することとした。シェルフにはオープン型、ブロック 型、ウォール型などがあり、素材は木材の他に金属製、樹脂 製などがみられる。本研究では、収納スペースや収納内容に 応じて組み換えが可能なブロック型のシェルフを制作するこ ととした。ブロック型シェルフは複数個のブロックで構成さ れるが、今回は同形状でサイズの異なるブロックをつくり、 ネスティング可能なシェルフをデザインした。ネスティング により、運搬性や家具自体の収納性に配慮したものとなる。 3.3. ネスティング式ブロックシェルフの制作

今回制作したネスティング式ブロックシェルフの構造は、 天板、地板、側板による板組み構造である。天板および地板



図3 波形単板コアパネル材を用いたネスティング式ブロックシェルフ

と側板の接合には3.1.節で述べた、波形単板コア材をL字型 の補助材にはさみこんで接合する方法を採用した。シェルフ を構成するブロックは同形状、サイズの異なる6個である。

6個のブロックで構成するシェルフの組み合わせ例を図3に 示した。高さ方向への積み上げ、幅および高さ方向への組み 合わせなど、収納内容や空間に応じた組み合わせが可能であ る。図3右下は各ブロックをネスティングした状態である。 3.4. ネスティング式ブロックシェルフの重量確認

制作した6個組ブロックシェルフの重量を測定した。その 結果、最も大きいサイズのブロック(385×385×365mm)の 重量は1.6kgであった。市販の無垢材によるオープンボック スは5.2kg、MDFは5.0kgであり、制作したブロックシェル フの方が軽量であることが確認された。

4. ハニカムコアパネル材によるスツールの制作

波形単板コア材の波の向きを90°変えるとハニカムコアパ ネル材としての利用が可能となり、厚さ方向に強度が求めら れる棚板やいすの座面といった部材としての活用が考えられ る。今回は、ハニカムコアパネル材を用い、2種類のスツー ルを制作した(図4)。いずれも図5に示したハニカムコアパ ネル材を座面に用いているが、図右は、染色を施した波形単 板コア材を用いている。波形単板コア材の波形部分を成形す る際に、単板を水に浸漬させるが、その水に染色剤を入れて 単板を染色すると図6に示したようなカラー波形単板コア材 ができあがる。波形単板コア材の成形方法を変えることなく 作製することができるという利点がある。さらに、部材にカ ラーバリエーションを持たせることにより、デザインの幅が



図4 ハニカムコアパネル材を座面に用いた2種類のスツール ※図右のスツールの座面にはカラー波形コア材を用いている





図6カラー波形単板コアパネル材

図5 ハニカムコアパネル材

広がると考える。

5. 結論と今後の課題

本研究では、木質軽量パネルが抱える厚さ方向に対する圧 縮強度の弱さや、意匠性が劣るといった問題点を解決した波 形単板コアパネルを開発した。その波形単板コアパネルを箱 物家具へ応用する方法を検討し、軽量で組み換え可能なネス ティング式ブロックシェルフを制作するに至った。また、波 の向きを90°変えて作成したハニカムコアパネル材、および 染色を施したカラー波形単板コア材を作製し、スツールの座 面に使うことで波形単板コアパネル材の適用範囲を拡大する ことができた。さらに、強度を保ちながらコア部分および部 材の接合部分の意匠性を高めたことで、家具材として十分使 用可能なパネル材を作製した点が本研究の成果である。今後 は、制作したブロックシェルフが、家具転倒の際にどの程度 ダメージを軽減できるかを探り、実用化に向けた検討を行う 予定である。

[注および参考文献]

- 三戸部健、阿部眞理、白石照美、柴沼菜穂、小幡谷英一: 波形単板コアパネルの開発と家具への適用、日本デザイン学会第59回研究発表大会概要集、日本デザイン学会、 pp.364-365, 2012
- 2) 柴沼菜穂、小幡谷英一、山内秀文:波形単板コアの圧縮 特性(II) 日本木材学会大会研究発表要旨集(CD-ROM)、 日本木材学会、2012
- 3) 剣持仁 他:家具の事典、朝倉書店、pp.322-323, 1986

リズム感を演出したトンネル壁面のパターンデザイン Pattern Design of Long Tunnel to Stage a Rhythm Feeling

永見 豊 Yutaka NAGAMI

千保 広覚 Hirosato SEMBO

Abstract

Traffic Accidents from drowsiness are often caused by the deterioration of drivers' concentration. Drowsiness results from a monotonous driving environment. Long tunnels are problematic in that they feature long stretches of monotony. It feels rhythm generally when a certain element is repeated with the same condition. On the contrary, it is monotonous and feels it when there are a few changes. Therefore relation of a pattern and rhythm was clarified when it was watched in a dynamic viewpoint. As for the interval of a repeated figure, constant agony decreases. Size of a figure and a change of a position of a perpendicular course influence a feeling of rhythm. With the result, we designed the pattern of the tunnel wall surface which directed a rhythm feeling.

Keywords: Pattern design, Sequence design, Analysis of variation

1. はじめに

自動車専用道にあるトンネルは壁に囲まれた単調な空間で あり、走行する運転手は圧迫感や飽きを感じるため、交通安 全上の改善が求められている。一般的にある要素が同一の調 子で繰り返されるとリズムが感じられ、逆に変化が少なく、 わずかに感じる程度であれば単調になるとされている¹⁾。以 前から筆者らは動的視点でのパターンと印象の関係を研究し ており、スピード感と飽き²⁾⁴⁾については実施してきたが、リ ズム感については明らかにしていない。

そこで、本研究では壁面のパターンを運転手のような動的 視点で見た場合、どのようなパターンの時にリズムを感じる か印象評価実験によりその要素を探り、リズム感を演出した トンネル壁面のパターンデザインを行う。

2. 研究方法

どの様なパターンの要素によってリズムを感じるかを探る ために、繰り返しのあるパターンを壁面に配置した空間を走 行する動面⁵⁾を作成し、印象評価実験を行い、分散分析を行っ た。印象は「リズム感」および道路空間への適用を考慮して 運転の邪魔になる印象の「煩わしさ」の2つとした。被験者 がパターンに着目しやすくするために壁面の色は黒とし、パ ターン図形は白とした。

3. 実験1 リズムの要因

3.1. 実験サンプル

道路空間で感じるリズムとして、メロディーロード⁶⁾があ る。これは、1:1:2:1:1:2:1:1:1:1:1:2の間隔で路面に溝を 入れることで三三七拍子の振動が生じ、運転手にリズムを与 えている。振動をパターンによる視覚的刺激に置き換えれば、 リズムを感じると予想した。そこで、実験1では、三三七拍 子の表現として、溝の代わりに矩形の図形を三三七拍子に配 置したドット案、心電図のように水平のラインが拍子の位置 で跳ねる、つまり波を与えたライン案を作成した(Fig. 1)。 この2案をベースとして、刺激の強弱と図形・波のサイズの 関係を探るために一拍目を大きくした案、さらに、三三七拍 子のリズムに加え、振り子の動きように緩やかに「早い」-「遅い」を繰り返す案も加えた(Fig. 2)。

以上のリズム感に関する3要素の効果と要素間の交互作用 を調べるため、実験計画法の直行表 $L_8(2^7)$ を用いてサンプル を作成し(Table 1)、リズム感では一対比較法、煩わしさで はSD法(9段階、4:とても煩わしい~4:まったく煩わし くない)による印象評価実験を行った。被験者は大学生16名、 社会人2名(内男性15名、女性3名)の計18名である。



3.2. 実験結果と考察

リズム感の一対比較データから重み付け評価点を計算し、 回帰分析によりこの評価点を表す回帰式を求めた。サンプル

^{*} 原稿受付 平成 25 年 10 月 17 日

映情学技報 VOL.36, NO.16, 映像情報メディア学会, 2012.3.9, pp.121-pp.124 ** 工学部デザイン学科

^{***} 元工学部デザイン学科

No.		要因			印象評価		
	図形	リズム構成	大きさ	リズム感	煩わしさ		
1	ドット	三三七拍子	一定	7.2	0.7		
2	ドット	三三七拍子	変化	5.3	0.6		
3	ドット	振り子	一定	20.5	0.4		
4	ドット	振り子	変化	39.0	-0.2		
5	ライン	三三七拍子	一定	0.0	-0.4		
6	ライン	三三七拍子	変化	10.5	-0.6		
7	ライン	振り子	一定	26.3	-1.2		
8	ライン	振り子	変化	53.7	-2.1		

Table 1 行表L₈(2⁷)によるサンプルと印象評価

に対応する係数⁷⁾ を評価点とした。煩わしさの評価は、SD法 の評価点の平均値とした(Table 1)。この要素ごとの印象評 価に対して、分散分析⁸⁾の結果、P値が5%以下で有意差があ るといえるのは、リズム感の印象では、「リズム構成」と「大 きさ」、それらの交互作用であった。煩わしさの印象では、「図 形」と「リズム構成」であった(Fig. 3)。



(1) 図形

図形では、ドットは煩わしさを感じないが、ラインでは煩 わしさを感じる(Fig. 4)。リズム感のP値は高く、有意差は 認められないことから、ドット案とライン案では差はほとん どないといえる。このことから、ラインよりもドットの方が 壁面パターンに相応しいといえる。

(2) 大きさ

図形の大きさは、一定よりも変化させる方がリズムを感じる(Fig. 5)。



(3) リズム構成

リズム構成は、振り子型はリズムを感じるが、煩わしさも 感じる(Fig. 6)。三三七拍子はリズムを少し感じ、煩わしさ は感じない(Fig. 7)。

(4) リズム構成と大きさ

リズム構成と大きさの交互作用は、リズム感は、三三七拍 子では大きさの要素では違いは無いが、振り子型では、変化 有りの方がリズムを感じる(Fig. 8)。





Fig. 8 リズム構成と大きさの交互作用

4. 実験2振り子型の煩わしさの改善

4.1. 実験サンプル

実験1の結果から、振り子型はリズムを感じるが、煩わし さも感じる結果となった。そこで、煩わしさを減少させる方 法を探るため、刺激を少なくすることを考え、図形の大きさ と明度、1周期のドット数の3要素に対して、3水準のラテン 方格による9通りのサンプルを作成し、印象評価実験を行っ た(Table 2)。印象評価は、リズム感と煩わしさの印象をSD 法(実験1に同じ)とした。被験者は大学生17名、社会人1 名(内男性16名、女性2名)の計18名である。

Table 2 ラテン行列によるサンプルと印象評価

		要因			印象評価		
No.	大きさ	明度	1 周期の ドット数	リズム感	煩わしさ		
1	大	高	多い	0.8	-0.9		
2	大	中	やや少ない	0.8	-0.3		
3	大	低	少ない	0.2	1.6		
4	中	高	多い	0.5	-0.6		
5	中	中	やや少ない	0.1	0.8		
6	中	低	少ない	1.3	0.6		
7	小	高	多い	-0.1	0.2		
8	小	中	やや少ない	1.3	-0.1		
9	小	低	少ない	0.5	1.4		

4.2. 実験結果と考察

印象評価得点は、SD法の評価点の平均値を用いた。分散分 析の結果、P値が5%以下で有意差があるといえるのは、リズ ム感の印象では、「リズム構成」と「大きさ」、それらの交互 作用であった。煩わしさの印象では、「図形」と「リズム構 成」であった。

(1) 明度

図形の明度は、図形と壁面の明度差が小さいほど煩わしさ を感じなくなる (Fig. 9)。



Fig.9 明度と煩わしさ

(2)1周期のドット数

1周期のドット数は、減少するほど煩わしさを感じなくな るが、リズム感も感じなくなる(Fig. 10, 11)。



Fig. 10 ドット数とリズム感 Fig. 11 ドット数と煩わしさ

5. 実験3等間隔型のリズム感の向上

5.1. 実験サンプル

実験1の結果から、三三七拍子型(等間隔のドットに休止 部分に抜けをつくった形になるので、以下、等間隔型と呼ぶ) は、煩わしさは少ないが、リズム感も低い結果となった。そ こで、実験3では、等間隔型のドットパターンで、よりリズ ムを感じる要素を探るため、変化の要素として明度、位置、

Table 3 全組み合わせによるサノフルと印象評(

		要因	印象評価		
No.	変化の 要素	リズム 構成	変化の メリハリ	リズム感	煩わしさ
1	明度	8ビート	断続型	0.8	-0.1
2	明度	8ビート	連続型	1.2	0.2
3	明度	16 ビート	断続型	0.6	-1.2
4	明度	16 ビート	連続型	1.1	-0.2
5	位置	8ビート	断続型	0.3	-0.9
6	位置	8ビート	連続型	1.6	-1.2
7	位置	16 ビート	断続型	0.4	-1.2
8	位置	16 ビート	連続型	2.2	-1.7
9	大きさ	8ビート	断続型	0.9	-1.2
10	大きさ	8ビート	連続型	0.4	-0.6
11	大きさ	16 ビート	断続型	0.6	-1.6
12	大きさ	16 ビート	連続型	0.9	-1.0

大きさの3水準、そして、リズム構成、変化のメリハリの2 要素2水準を全組み合わせの12通りのパターンの動画を作成 し、実験を行った(Table 3)。印象評価方法と被験者は実験 2と同じである。

5.2. 実験結果と考察

印象評価得点は、SD法の評価点の平均値を用いた。分散分 析の結果、P値が5%以下で有意差があるといえるのは、リズ ム感の印象の「変化のメリハリ」および「変化」と「変化の メリハリ」の交互作用であった。煩わしさはどの要素も有意 差が認められなかった。

(1)変化のメリハリ

変化のメリハリは、断続的な変化よりも連続的な変化の方 がリズムを感じる(Fig. 12)。

(2) 変化と変化のメリハリの交互作用

変化と変化のメリハリの交互作用は、断続的なメリハリで は、位置の変化のリズム感は小さいのに対し、連続的なメリ ハリでは、位置の変化のリズム感は大きい(Fig. 13)。



Fig. 12 メリハリとリズム感 Fig. 13 メリハリと変化の交互作用

6. トンネル壁面デザインの提案

トンネルのモデルケースとして、片側2車線の自動車専用 道、延長1200m、壁面の地色は白でパターンは塗装で行う空 間を設定した。壁面のパターンデザインは、煩わしさの印象 が弱い等間隔型のドットパターンとし、リズムを感じやすい 要素である、図形の位置、明度、大きさの要素を組み合わせ て、パターンのデザインを行った。また、飽きを感じさせな いために、変化の要素の組み合わせをトンネル中央になるほ ど変化を多くし、さらに色相の変化の演出も行った(Talbe 4, Fig. 14)。

Table 4 トンネルの壁面のデザインパタ	ーン
------------------------	----

入口からの		変化(カ要素	
距離[m]	明度	位置	大きさ	色相
0-40				白
40-160	高-低			黄
160-300	高-低			緑
300-550	高-低	上-下		青
550-600	高-低	上-下	大-小	赤
600-630	高-低		大-小	椵
930-1060	高-低			黄
1060-1200				白



Fig. 14 トンネル壁面のデザイン

7. おわりに

トンネル壁面にリズム感を演出し、かつ煩わしさの少ない パターンとして、四角の図形を等間隔で配置し、明度や位置 そして大きさが周期的に変化する案を提案した。今後の課題 としては、ライン型や振り子型の展開、メロディーロードの リズムとの連動が挙げられる。

トンネル空間は、東京湾アクアラインのように川崎から房 総へと異空間への導入部の役割をもっている。出口の先にあ る空間への準備や気持ちを高める演出として、本研究のトン ネル壁面のデザインが活用されれば、幸いである。

なお、本研究は平成21~23年度科学研究費補助金(挑戦的 萌芽研究、科研費番号21656128)の助成を受けたものである。

注記および参考文献

- 三井秀樹: "形の美とは何か"、NHKブックス、東京、pp.98-102 (2000)
- 2) 永見豊: "単調さの解消を目的としたトンネル壁面のシークエンスデザイン"、拓殖大学理工学研究報告、Vol.11, No. 1, pp.13-20, (2009)
- 3) 永見豊: "間接的な注意喚起を促す高速道路の路面表示デ ザイン"、日本デザイン学会デザイン学研究作品集、第 16号、pp.80-83, (2011)
- 4) Y. Nagami: "Sequence Pattern Design of Long Tunnel to Improve a Monotonous Environment", International Association of Societies of Design of Research, FF087, CD-ROM, (2009)
- 5) 動画製作にはFORUM8社製UC-win/Road ver.4を用いた。
- 6) メロディーロードとは、乗用車において室内に侵入する

車両走行音が音楽を奏でるように工夫された舗装、また はその舗装を施した道路のことである。

- 7) 山田太一郎監修: "Excelで学ぶ営業・企画・マーケティン グのための実験計画法"、オーム社、東京、pp.193-206, (2006)
- 8) 前出7)、pp.81-97, (2006)

触覚と聴覚を用いた視覚障害者のための図形パターン伝達支援システムに関する研究* A Figure Pattern Transmisson Support System using Tactile and Auditory Senses for the Visually Impaired

杉本 雅彦 Masahiko Sugimoto**

論文内容の要旨

盲学校では視覚障害児の図形教育に、触覚教材として立体 コピーやレーズライタを利用している。これは作図操作が図 形学習のための基礎的な技能として重要であるとともに、図 形に対する興味や関心を引き起こし、直観的な見方や考え方 を深め、図形についての論理的な考察を促す意識を持たせる ため、実際に図形を描いたり作ったりして表現する操作活動 が重要であるとしているためである。しかし、レーズライタ では1度描いた線を部分的に消して修正することができない 問題がある。この問題を解決するために、リアルタイムで描 画を可能とする電子レーズライタ、手指操作フィードバック による画面操作が可能な入出力機能を有する触覚ディスプレ イや、点字ディスプレイを用いた図形エディタが研究されて いる。しかし、これらの方法は、視覚障害者が頂点の多い複 雑な対称図形などを正確に入力することは難しく、入力に多 くの時間を必要とする。また、個人で購入するには高価であ る。

以上のことより、本研究では図形を作成するために、触覚 と聴覚を用いた視覚障害者のための2次元配列の位置情報に よる図形パターン伝達支援システムを提案した。このシステ ムの入出力インタフェースは、ペンタブレット上に9×9個 のポジションホールが配置されたペン入力触覚ガイドと、音 像定位による音響フィードバックである仮想音響スクリーン から構成される。入力図形は、点、線分、及びその組み合わ せであり、それらは2次元配列位置情報で作成可能なもので ある。本論文では、最初に基本となるプロトタイプシステム を設計して、評価実験を行い、簡易図形パターンを作成でき ることを示した。次に、操作性と有効性の観点からペン入力 触覚ガイドを中心にシステムを改良し、ペン入力に適した触 覚がイドの開発を行うと共に、システムの評価実験より、視 覚障害者が簡易図形を正確に短時間で入力できることを明ら かにした。

ところで、図形の対称性は図形の持つ基本的で重要な性質 であり、初等学校教育においてこの教育は不可欠である。盲 学校でも図形教育の一環として点対称や線対称の図形が用い られている。そこで、本論文では更に、視覚障害児が図形の 対称性を学ぶことを目的として、ペン入力触覚ガイド、仮想 音響スクリーン、音声ガイドを有する学習支援システムを構 築した。点対称と線対称の図形を対象に学習効果の検証を行 い、本システムが対称性の学習に有効であることを述べた。

最後に、視覚障害者に対する遠隔コミュニケーションによ る図形教育支援の可能性や、ペン入力触覚ガイドを入れ替え ることで、ミニ碁やオセロなどのボードゲームに本システム を応用できることを述べ、タブレットPC並びにスマートフォ ンなど、最新の情報機器への応用の可能性を示唆した。

本論文は6章で構成されている。以下に各章の概要につい て述べる。

第1章序論では、本研究の目的とこれまでの触覚と聴覚そ れぞれの図形情報の伝達方法の概略を説明した。

第2章では、視覚に代わる触覚と聴覚の感覚特性の優位性 を示すと共に、触覚と聴覚を融合した入出力インタフェース の特徴を述べた。また、音像定位を利用した仮想音響スクリー ンの設計法を示した。

第3章では、ペン入力触覚ガイドと仮想音響スクリーンを 使用し、視覚障害者による簡易図形パターンを作成するため の基本システムを設計した。ペン入力触覚ガイドは、アクリ ル製で仮想音響スクリーン上の9×9個の点音像に対応する マトリクス状の穴がある。このペン入力触覚ガイドをペンタ ブレット上に設置し、スタイラスペンを使用して簡易図形パ ターンを入力する。入力した簡易図形パターンは、点音像の 位置、あるいは音の移動感で図形を確認し修正することがで きる。本基本システムを用いて、点、線分、およびその組み 合わせの簡易図形パターンの作成の可能性を確認した。

第4章では、ペン入力触覚ガイドを中心に本システムの改 良を操作性と有効性の観点から実施して、評価実験を行った。 この改良により点入力時間の短縮を確認し、触覚と聴覚を利 用した視覚障害者用図形入力インタフェースを利用した基礎 実験により、視覚障害者が2次元配列で作成可能な図形を正 確に短時間で入力できることを確認した。また、線分入力の 方法を検討した結果、始点と終点による入力方法が入力精度 もよく短時間で入力できることがわかり、図形入力でも同様 であることを明らかにした。

第5章では、本システムを応用した視覚障害児が図形の対称性を学ぶ学習システムを検討した。視覚障害児に図形の説明を行う際は、学習者の手を説明箇所に誘導することが重要である。この誘導のための情報伝達に触覚と聴覚によるマルチモーダル性を取り入れ、視覚障害児が図形の対称性を学ぶことを目的とした学習システムを構築し、ペン入力触覚ガイド、仮想音響スクリーン、音声ガイドを用いた検証実験を行った。その結果より本学習システムが対称性の教育に有効であることを述べた。

第6章結論では、本研究で得られた成果を要約するととも に今後の研究課題について述べた。

^{*} 原稿受付 平成 25 年 10 月 28 日

信州大学博士学位論文

^{**} 北短・経営経済科

理工学総合研究所員及び研究課題一覧 RESEARCHERS & TITLES (平成25年度)

材料力学 笠野 英秋 越出 慎一	教 授 客員研究員	工学博士 工学博士	 ・高分子系複合材料の衝撃破壊現象の計算/実験シミュレーション ・軟らかい飛翔体の衝突による複合材料/構造の損傷解析 ・光ファイバセンサによるひずみ計測と構造ヘルスモニタリング
接着、設計 杉林 俊雄 木原幸一郎	教 授 准教授	工学博士 博士 (工学)	 ・色彩とマティエールのトレサビリティに関する研究 ・接着接合の構造物への応用 ・衝撃負荷を受ける接着接合体に関する研究
ロボット制御 香川 美仁	准教授	博士(工学)	 ・筋電位を用いたロボットの遠隔操作の研究 ・管内移動作業ロボットの研究 ・ロボット・セラピーの研究
熱物性 松永 直樹	教 授	工学博士	 ・ガスクロマトグラフ法(テイラー法)による気体の拡散係数の測定 ・蒸発管法(ステファン法)による気体の拡散係数の測定 ・バイオディーゼル燃料の物性に関する研究
流体工学 藤本 一郎 平野 孝典	教 授 助 教	工学博士 博士 (工学)	 ジェットエンジンのエアロダイナミックスに関する研究 遷音速翼列の非定常空力特性に関する研究 風車、送風機の性能向上に関する研究 電気自動車の普及と高効率化に関する研究 音声生理学的研究
機械力学 鈴木 保之	教 授	博士(工学)	 ・圧電素子やSMAを利用した機械構造物の振動抑制方法に関する研究 ・弾性ロータの釣合せに関する研究
振動、計測 道村 晴一	准教授	工学博士	 ・倒立振子の安定化制御に関する研究 ・弾性ロータの振動制御に関する研究
計算力学 吉田 勉	教 授	工学博士	 ・最適設計に関する研究 ・材料物性測定に関する研究 ・構造物に作用する外力の固有振動数による測定
機能設計 森 きよみ	准教授	博士(工学)	 ・耐熱性新素材の開発と高温物性の評価 ・エネルギー源となる植物を生産するための植物プラントシステムに関する研究

機械システム工学科

電子システム工学科

超伝導エレクトロニクス・カオス応用 吉森 茂 教 授 工学博士	 ・超伝導送電に関する研究 ・超伝導電力貯蔵に関する研究 ・テラヘルツ領域におけるジョセフソン・テトロードの応用に関する研究 ・超伝導マイクロストリップ線路に関する研究
非線形回路・非線形システム 三堀 邦彦 准教授 博士 (工学)	 ・電子回路のカオスの解析とその応用に関する研究 ・強化学習アルゴリズムとその応用に関する研究 ・マルチエージェントシステムとその応用に関する研究
通信・ネットワーク 前山 利幸 准教授 博士 (工学)	 ・人体通信に関する研究 ・ユビキタス・ワイヤレス・ネットワークに関する研究 ・携帯電話の無線性能に関する研究 ・無線中継器に関する研究
画像センシング 金田 – 教 授 工学博士	 ・光による非接触3次元画像センシングに関する研究 ・ダイヤモンドのカットデザインに関する研究
ソフトコンピューティング 小川 毅彦 教 授 博士 (工学)	 高次元ニューラルネットワークに関する研究 不良設定逆問題の解法に関する研究 自律移動ロボットに関する研究
ディジタル信号処理 杉本 公弘 教 授 工学博士	 ・ディジタル音声および画像の処理技法に関する研究 ・ディジタル音声の広帯域化技法に関する研究 ・障害者支援システム実現に関する研究
林 誠治 准教授 博士 (工学)	 ・音声通話環境での背景雑音除去および音声強調に関する研究 ・狭帯域電話音声からの高域および低域拡張手法に関する研究 ・ロボットを用いたリアルタイム動画像認識処理に関する研究
渡邊 修 准教授 博士 (工学)	 高効率画像符号化に関する研究 画像検索技術に関する研究 国際標準化(JPEG、JPEG 2000等)に関する研究
生体情報システム 川名明夫 教授 工学博士	 ・生体電気活動測定法の研究 ・生体信号解析法の研究 ・神経回路ダイナミクスの研究
医用電子情報工学 長谷川 淳 教 授 博士(工学)	 ・音響的方法による人工弁機能診断に関する研究 ・光学式生体用音響センサに関する研究 ・高空間分解能振動センサの開発に関する研究 ・振動型マイクロインジェクション法に関する研究
超音波工学 渡辺 裕二 教 授 工学博士	 超音波発生用振動体に関する研究 超音波の応用に関する研究 圧電素子の応用に関する研究

情報工学科

プログラミング言語処理 岩澤 京子 教 授 博士(工学)	 ・コンパイラの最適化技術の研究 ・プログラミング言語と環境の研究 ・自動並列化コンパイラの開発
環境電磁工学 澁谷 昇 教授理学博士	 ・電磁ノイズを考慮した設計支援技術に関する研究 ・カメラを用いた入力インターフェースに関する研究 ・自律型ロボットに関する研究
教育情報工学 佐々木 整 教 授 博士(工学)	 ・スマートディバイスを利用した学習支援に関する研究 ・拡張現実感に関する研究
計算機支援設計 高橋 丈博 教 授 博士 (工学)	 ・コンピュータを用いた回路実装設計支援技術に関する研究 ・電磁ノイズ発生メカニズムと低減技術の研究 ・画像を用いたロボット制御
計算機システム工学 早川 栄一 教 授 博士 (工学)	 ・組込みシステムを対象とした高信頼オペレーティングシステムとシステムソフトウェア環境 ・システムプログラミング教育支援環境 ・次世代コミュニケーション支援システム
数理情報工学 原田 紀夫 教 授 工学博士	 ・数理的システム理論の構築とその応用の研究(システムの超調和理論、統計力学的配置理論、並列処理の平均膨張率理論) ・調和グラフによる情報表現とその応用理論 ・人間の目的行為の数理
音響信号処理 幹 康 教 授 工学博士	 ・ヒルベルト変換を利用した遅延時間ならびに音響特性推定法 ・粒状多孔質材料の音響特性 ・時間圧縮法、時間伸長法による異常診断 ・カオスを利用した不快音シンセサイザ
高信頼性システム工学 蓑原 隆 教 授 工学博士	 ・ワンタイムアドレスを利用したIPv6通信のプライバシー向上 ・仮想ネットワークを利用したスケーラブルなハニーポットファームの実現 ・競合学習型ニューラルネットワークの耐故障化
画像工学 諸角 建 教 授 工学博士	 ・不可視情報の可視化 ・映像の持つ潜在的情報の抽出とそれを利用した認識 ・運動解析ソフトウェアの開発と各種動作解析
プログラム解析 西田 誠幸 准教授 博士 (工学)	 ・プログラム解析を利用したソフトウェアの脆弱性検出法 ・安全なWebアプリケーションの開発支援環境 ・計算機アーキテクチャの導入教育支援環境
知識処理 水野 一徳 准教授 博士(工学)	 ・知的推論のための組合せ探索アルゴリズムの開発と効率評価 ・制約充足パラダイムによる知識処理と問題解決支援 ・マルチエージェントによる複雑現象シミュレーション

感性デザイン 岡崎 章 教 授 博士 (感性科学)	 チャイルドライフ・デザインに関する研究 デザインにおける感性操作と感性評価に関する研究
色彩・造形 木嶋 彰 教 授 芸術学修士	 ・ポストモダン以降の絵画の諸動向に関する研究 ・テクスチャの感性評価に関する研究
プロダクトデザイン 竹末 俊昭 教 授	 ・デザイン発想法への価値分析手法応用 ・レーザー加工機活用のモノづくりカフェ構想
視覚造形 戸塚 泰幸 教 授	 ・考案した印刷技法を応用した銅版画の制作 ・質表現を中心とする陶作品の制作 ・造形表現材の特性研究とデザインへの応用
用品設計 阿部 眞理 准教授 博士 (工学)	 ・木材料の開発と製品への応用 ・環境配慮材料の特性研究と用途開発
ディジタルメディア 菊池 司 准教授 博士(工学)	 ・ビジュアルシミュレーションのための3次元モデルの開発に関する研究 ・マルチメディアを用いた情報デザインによる人間のコミュニケーション支援に 関する研究
コミュニティデザイン 工藤 芳彰 准教授 博士 (工学)	 ・地域資源に関する調査分析および視覚化 ・コミュニティのためのデザイン提案
視覚デザイン 小出 昌二 准教授	 ・プリントメディアによるコミュニケーションに関する表現研究 ・印刷加工を応用した平面構成に関する研究と制作
室内設計 白石 照美 准教授 博士(工学)	 ・景観および室内空間形態の知覚に関する研究 ・内装用材の特性研究とデザイン開発
シビックデザイン 永見 豊 准教授 工学修士	 ・橋梁デザインにおける機能性、経済性、優美性に関する研究 ・道路内部空間におけるシークエンス景観に関する研究

デザイン学科

基礎教育系列・その他

ユニタリ表現論 青木 茂 教 授 理学博士	・半単純対称空間上の調和解析
解析学 織田 寛 准教授 博士 (数理科学)	• Chevalley 制限定理の拡張とその応用
超高層大気物理学 巻田 和男 教 授 理学博士	•日本およびブラジル磁気異常帯で受信される銀河電波強度の比較
理論物理学 鈴木 康夫 教 授 理学博士	 ・ソフトマターに関する研究 ・物理教育に関する研究
生物工学 仁木 輝緒 教 授 理学博士	 ・植物根組織細胞の生理・形態学的研究 ・生物(細胞)死の研究 ・微生物等の殺菌法システムの開発
計測制御 池田 修 准教授 工学博士	・マルチモーダル検出認識 ・人工知能機械システム
画像解析(外国語学部) 日比 哲也 准教授 工学修士	 ・色彩情報を利用した交通標識の画像認識システムの開発 ・視覚情報を認知する自動運転支援システムの開発 ・GPSを利用した自動航法システムの開発
栽培土壤学 (拓殖大学北海道短期大学) 岡田 佳菜子 准教授 博士 (農学)	 ・水稲の養水分環境 ・水稲移植栽培への窒素質肥料の利用 ・深川市蛇紋岩質土壌における水稲初期生育不良 ・北海道における水稲直播栽培と生育環境
ヒューマンインタフェース (拓殖大学北海道短期大学) 杉本 雅彦 准教授 博士 (工学)	 ・視覚障害者のための遠隔コミュニケーション支援に関する研究 ・バーチャルリアリティ空間におけるサイバーブレーンストーミングの研究
音響情報処理 (拓殖大学北海道短期大学) 庄内 慶一 准教授 工学修士	 ・視覚障害者のための遠隔コミュニケーション支援に関する研究 ・e-learningシステムを活用した入学準備教育の研究

理工学系専任教員研究活動一覧・他 ACADEMIC REPORTS & SOCIAL ACTIVITIES (2012年4月~2013年3月含前年度未掲載分) 【研究業績および研究活動区分】 原稿及び翻訳=著書 学位論文=学論 学術論文=論文 学会等の受賞=受賞 学会誌掲載の展望・論説等=展望または論説 調査報告書=調査 新聞・専門誌への寄稿等=寄稿 技術等解説=解説 招待講演=招待 国際会議・海外・国内シンポジウム等での発表(審査付)=討論 大会口頭発表・学会研究会=口頭 学会等の運営=運営 学会誌及び各種の審査=審査 団体または企業よりの依頼製作=依頼 コンペ・団体展公募=公募 招待出品及び指名設計、依頼出品=作品 団体・個人展覧会=展示

機械システム工学科

著 者 氏 名	区分	著者,学術論文,作品等の名称	掲載誌,発行所,学会, 講演会,展覧会等の名称	発行・発表 年 月	刊 号 ペ ー ジ 分担・担当等
笠 野 英 秋	著書	第10章11節 熱可塑性プラスチック積層平板の耐高速貫通衝撃性能、 積層平板の耐高速衝撃貫通性能	自動車材料の樹脂化による軽 量化(技術情報協会)	2013	рр.780-789
B. R. Tittmann C. Miyasaka H. Kasano et. al	著書	Non-destructive evaluation of aero- space composites: acoustic microscopy	Non-destructive evaluation of polymer matrix composites (Woodhead Publishing Limited)	2013	рр. 423-448
H. Kasano H. Kamoshida K. Abe H. Kubokawa	討論	Ballistic Impact Behavior and Proper- ties of Double-ply Woven Fabrics	Proc. European Conference on Composite Materials	2012	USB
S. Sasaki H. Kasano	討論	Ballistic Performance Prediction of Three-Layered Thermoplastic Laminates	Proc. 9th Canada-Japan Workshop on Composites	2012	USB
笠 野 英 秋	報告	57th FRP CON-EX 2012 開催報告 等	強化プラスチック協会誌	2012	Vol.58, No.12
笠野英秋	解説	強度設計のための材料力学の基礎	日本テクノセンターセミナー	2012	講師
笠 野 英 秋	運運運運運	理事会 理事会 一般社団法人申請対策委員会 57th FRP CON-EX 2012 宇宙工学委員会	日本複合材料学会 強化プラスチック協会 強化プラスチック協会 強化プラスチック協会 JAXA宇宙科学研究本部	2012 2012 2012 2012 2012 2012	監事 理事 委員長 実行委員長 研究班員
H. Kasano	運営	Scientific Advisory Committee	9th Canada-Japan Workshop on Composites	2012	Member
笠 野 英 秋	運営 運営	FRP評定委員会 甲・乙種化学/機械講習・検定分科 会	日本建築センター 高圧ガス保安協会	2012 2012	評定委員 講師・専門委員
H. Kasano	運営	Editorial board	International Journal of Auto- motive Composites	2012	EB member
Y.Suzuki Y.Kagawa	論文	Vibration control and sinusoidal ex- ternal force estimation of a flexible shaft using piezoelectric actuators	Smart Materials and Structures	2012-11.01	21 (2012) 125006
Y.Suzuki	審査	投稿論文の査読	Smart Materials and Structures	2012	
平林大騎 岡田武仁 森 きよみ	口頭	エネルギー源としての植物プラント の提案	日本実験力学会分科会合同 ワークショップ2012	2012-12	講演論文集 No. 12-2, pp. 5-7
岡 田 武 仁 平 林 大 騎 森 きよみ	口頭	水耕栽培による根菜の生育に及ぼす マイクロジェットの影響	日本実験力学会分科会合同 ワークショップ2012	2012-12	講演論文集 No.12-2, pp.11-12
森 きよみ	解説	接着強度の試験法	接着の技術	2013-02	32巻,4号,pp.9-13
森 きよみ	運営 運営	研究会 研究会	解体性接着技術研究会 特定非営利活動法人接着剤・ 接差評価技術研究会	2008-04~ 2012	幹事 理事
	運営 運営	多分野交流分科会 評議員会	日本実験力学会	2005-12~ 2008-07~	主査 評議員
森 きよみ	審査	学会誌編集委員会	日本実験力学会	2008-07~	編集委員
森 きよみ	運営 運営	関東支部 評議員会	日本接着学会 日本接着学会	2012 2010-06~	幹事 評議員
吉 田 勉 山 川 雅 美 三 好 明 他3名	解説	高圧ガス保安製造責任者講習会	高圧ガス保安協会	2012-04~05	甲種、乙種講師

著 者 氏 名	区分	著者、学術論文、作品等の名称	掲載誌,発行所,学会, 講演会,展覧会等の名称	発行・発表 年 月	刊 号 ペ ー ジ 分担・担当等
吉 田 勉 山 川 雅 美 三 好 明 他3名	解説	高圧ガス保安製造責任者講習会	高圧ガス保安協会	2013-02	乙種講師
T. Yoshida Y. Takahashi T. Watanabe N. Ain	論文	Evaluation of Static Axial Stress in Round Bar by Eigen Mode Deflection	J. of Solid Mechanics and Materials Engineering	2013-06	Vol.6, No.6
T. Yoshida Y. Takahashi T. Watanabe	論文	Evaluation of Static Stress in Plate by Impact Sound	15th Int. Conf. on Experi- mental Mechanics	2013-07	CD-ROM
高橋 雄 太 吉 田 勉 渡 辺 武 司	口頭	平板に作用する面内力の衝撃音によ る測定	日本機械学会2012年度年次大 会	2013-09	

電子システム工学科

著 者 氏 名	区分	著者,学術論文,作品等の名称	掲載誌,発行所,学会, 講演会,展覧会等の名称	発行・発表 年 月	刊 号 ペ ー ジ 分担・担当等
T. Ogawa K. Nakamura H. Kanada	著書	Estimation of Distributed Generation Using Complex-Valued Network In- version with Regularization	Intelligent Control and Inno- vative Computing, (Sio Iong Ao, Dr. Oscar Castillo, and Prof. Xu Huang eds.), Springer	2012-03	Chapter 11, pp. 137-148
T. Ogawa	著書	Transformations of Image Filters for Machine Vision Using Complex- Valued Neural Networks	Human-Centric Machine Vi- sion, (Dr. Fabio Solari ed.), In-Tech	2012-04	Chapter 8, pp.143-164
T. Ogawa K. Nakamura	論文	Solution of Inverse Problem on Dis- tributed Generation Using Complex- Valued Network Inversion	Journal of Mechanics En-gi- neering and Automation	2011-11	Vol.1, No.6, pp.436-444
T. Ogawa	論文	Complex-Valued Network Inversion with Regularization for Ill-Posed Inverse Problem	Journal of Computer Tech- nology and Application	2012-06	Vol.3, No.6, pp.408-417
T. Iura T. Ogawa	討論	Quaternion Network Inversion for Solving Inverse Problems	SICE Annual Conference (SICE2012)	2012-08	pp.1802-1805
K. Kawashima T. Ogawa	討論	Complex-Valued Neural Network for Group-Movement Control of Mobile Robots	SICE Annual Conference (SICE2012)	2012-08	pp.1806-1809
中 村 恭 介 小 川 毅 彦	口頭	複素ネットワークインバージョンに よる分散電源推定と正則化	電子情報通信学会ソサイエ ティ大会	2011-09	A-2-4
中 村 恭 介 小 川 毅 彦	口頭	複素ネットワークインバージョンに よる逆問題解法と正則化	第1回コンピューテーショナ ル・インテリジェンス研究会 港協会立集	2011-09	pp.93-96
中 村 恭 介 小 川 毅 彦	口頭	複素ネットワークインバージョンに よる分散電源推定	電子情報通信学会総合大会	2012-03	A-2-5
川 嶋 恭 平 小 川 毅 彦	口頭	移動ロボットの群行動生成のための 複素ニューラルネット	電子情報通信学会総合大会	2012-03	D-2-4
井 浦 翼 小 川 毅 彦	口頭	四元数ニューラルネットワークによ る逆問題解法	電子情報通信学会総合大会	2012-03	D-2-8
井 浦 翼 小 川 毅 彦	口頭	高次元ネットワークインバージョン による逆問題解法	第2回コンピューテーショナ ル・インテリジェンス研究会 講演論文集	2012-09	рр.91-94
高根 覚 小川毅彦	口頭	複素ネットワークインバージョンに よる不良設定逆運動学解法	電子情報通信学会総合大会学 生ポスターセッション	2013-03	ISS-P-132
山 根 明 博小 川 毅 彦	口頭	自己組織型エージェントによる教室 内環境の学習	電子情報通信学会総合大会学 生ポスターセッション	2013-03	ISS-P-139
川 嶋 和 樹 金 田 一	論文	装飾用ダイヤモンドのカットデザイ ンの 3D シミュレーション	デザイン学研究 BULLUTIN OF JSSD	2013-01	Vol.60 No.1, pp.21-26
金田 一 金田 一	運営 運営 運営	IEC/TC65/SC65A国内対策委員会 IEC/SC65A/MT61512国内対策委員会 IEC/SC65E/WG2国内対策委員会	日本電気計測器工業界 日本電気計測器工業界 日本電気計測器工業界	2012-04 2012-04 2012-04	委員長 主査 主査
A. Miyamoto J. Hasegawa O. Hoshino	論文	Dynamic modulation of an orientation preference map by GABA responsible for age-related cognitive performance	Cogn Process	2012-9	Vol.13, pp.349-359
J. Hasegawa	口頭	Development of an optical vibration sensor unit for underwater use.	32th Symp. Ultrasonic Elec- tronics	2012-11	Vol.32, pp.323-324
S. Hayashi M. Sugimoto	 討論 	A Simple Approach to Tracking the Fundamental Frequency based on Correction with a Smoothing Op- eration	Proc. of the Technology Con- ferences 2012, MS 2012	2012-07	рр.393-396

著 者 氏 名	区分	著者,学術論文,作品等の名称	掲載誌,発行所,学会, 講演会,展覧会等の名称	発行・発表 年 月	刊 号 ペ ー ジ 分担・担当等
S. Hayashi M. Sugimoto	討論	Speech Enhancement based on the Sequential Noise Estimation with a Masking Property	Proc. of the Technology Con- ferences 2012, SEA2012	2012-11	pp.279-284
村 上 克 孝 林 誠 治	口頭	全波整流を用いた帯域拡張における 利得フィルタの再構成	第4回大学コンソーシアム八 王子学生発表会	2012-12	рр.172-173
林誠治	運営	東京支部学生会顧問	電子情報通信学会	2009~	
前山利幸	受賞	功労賞	電子情報通信学会 アンテナ・ 伝播研究専門委員会	2012-12	
前山利幸	運営	研究専門委員	電子情報通信学会 アンテナ・ 伝播研究専門委員会	2012-05	
前山利幸	審査	査読委員	電子情報通信学会	2012-05	
前山利幸	展示	ワイヤレス M2M	諏訪圏工業メッセ	2012-10	
ロスリナビンティア ブドゥルラザック 須 郷 剛 裕 前 山 利 幸	討論	Radio wave propagation in an HBC device including a transceiver	European alliance for innova- tion, Body Nets 2012	2012-09	pp.6-10
前山利幸	寄稿	人体通信 (HBC)とEMC	電磁環境工学情報EMC	2012-11	pp.59-68
須 郷 剛 裕ロスリナビンティアブドゥルラザック石 田 真 将前 山 利 幸	口頭	人体表面における電界分布の場所率	電子情報通信学会 医療情報 通信技術時限研究専門委員会	2012-06	2012年度第1回医療情報通 信技術研究会
駱 美 玲 林 昌 孝 前 山 利 幸	口頭	電波ビーコンシステムにおけるサー ビスエリアの評価	電子情報通信学会 アンテ ナ・伝播研究専門委員会	2012-07	信学技報, vol.112, no.149, AP2012-40, pp.57-61, 2012 年7月.
小笠原 恒 平 太 田 潤 大 越 祐 輔 前 山 利 幸	口頭	小型端末用ループアンテナの放射効 率に関する検討	電子情報通信学会 アンテ ナ・伝播研究専門委員会	2012-07	信学技報, vol.112, no.149, AP2012-62, pp.185-190, 2012年7月.
大 越 祐 輔 田 中 幸 治 小笠原 恒 平 前 山 利	口頭	携帯電話の無線性能評価における測 定不確かさに関する検討	電子情報通信学会 アンテ ナ・伝播研究専門委員会	2012-07	信学技報, vol.112, no.149, AP2012-63, pp.191-196, 2012年7月.
大 越 祐 輔 村 上 直 樹 小笠原 恒 平 前 山 利 幸	口頭	グランド板形状改良による高アイソ レーションアンテナの検討	電子情報通信学会 アンテ ナ・伝播研究専門委員会	2012-09	信学技報, vol.112, no.216, AP2012-90, pp.49-53, 2012 年9月.
K. Yotsuji S. Imai K. Mitsubori T. Saito	口頭	Basic Analysis Tools of Spike-Trains in Chaotic Spiking Oscillators	Proc. 20th Conference on Nonlinear Dynamics of Elec- tronic Systems	2012-07	pp. 274-277
K. Mitsubori I. Maezawa	口頭	A Participant Stream Model in Event Site Based on Multi-Agent System with Interaction between Walking Participants and Queues	Proc. International Symposium on Nonlinear Theory and its Applications	2012-10	pp.41-44
S. Tanaka T. Saito K. Mitsubori	口頭	A Simple Chaotic Circuit Based on Coupled Spiking Neurons	Proc. International Symposium on Nonlinear Theory and its Applications	2012-10	pp.899-902
前沢郁哉三堀邦彦	口頭	マルチエージェントシステムに基づ くイベント会場における参加者の流 れのモデル	電子情報通信学会非線形問題 研究会	2012-07	NLP2012-42

i i	著 氏	老	, , ,	区分	著者、学術論文、作品等の名称	掲載誌,発行所,学会, 講演会,展覧会等の名称	発行・発表 年 月	刊 号 ペ ー ジ 分担・担当等
豊三	福 堀	貴 邦	士彦	口頭	マルチエージェントシステムに基づ く歩行者の流れのモデルに従うデジ タル回路の設計	電子情報通信学会非線形問題 研究会	2012-07	NLP2012-43
四三斎	辻堀藤	和邦利	希彦通	口頭	カオス的スパイク発振器が呈するス パイク列の解析	電子情報通信学会回路とシス テムワークショップ	2012-07	рр. 40-43
四三斎	辻堀藤	和邦利	希彦通	口頭	2種類の発火スイッチを有するカオ ス的スパイク発振器が呈するスパイ ク列の解析手法	2012年電子情報通信学会基礎・境界ソサイエティ大会	2012-08	A-2-21
谷神三田藤生	川尾堀中坂岩	大武邦隆尚量	洋司彦博登久	口頭	強化学習ベース多船航路探索法にお ける行動選択制限の改良	電子情報通信学会非線形問題 研究会	2013-03	NLP2012-144
吉	森		茂	運営	超伝導エレクトロニクス研究専門委 員会	電子情報通信学会	$2012-5 \sim 2013-4$	委員
Shi YC Nu Mc	geru SHIN rliya hd S	MOR na Bt AHR	I ie I	論文	Secure communication application of Josephson Tetrode in THz region	Physics Procedia	2012-06	Vol.36, pp.435-440
Shigeru YOSHIMORI Faul DAOUDA Kokuton SOU		論文	Pico pulse response analysis of HTS microstrip line using two dimensional time dependent Ginzburg-Landau equation	Physics Procedia	2012-06	Vol.36, pp.417-420		
渡	辺	裕	<u> </u>	解説	強力超音波の基礎と振動ホーン設計・ 使用法	日本テクノセンター技術セミ ナー	2012-04	講師
渡	辺	裕	<u> </u>	解説	強力超音波振動系とその接合への応 用	技術情報協会技術セミナー (リチウム電池封止技術)	2012-12	講師
渡	辺	裕	<u> </u>	解説	強力超音波応用におけるホーン設計・ 製作の基礎と実際	ISS産業システムズ技術セミ ナー	2013-03	講師
渡成森	辺瀬	裕 健 きよ	二悟み	口頭	木材の超音波接合	日本音響学会講演論文集	2013-03	1385-1386

情報工学科

著 者 氏 名	区分	著者、学術論文、作品等の名称	掲載誌,発行所,学会, 講演会,展覧会等の名称	発行・発表 年 月	刊 号 ペ ー ジ 分担・担当等
岡安安香小佐永西平松夜渡 敏公文瑞力 奈律謙孝竹博 女★ 大 切 寺 大 辺	著書	よくわかる情報リテラシー	技術評論社	2013-01	7章担当
Akinori Toguchi Hitoshi Sasaki Kauznori Mizuno	討論	A Study of Improvement of Learning Contents for Practical Lessons	Proceedings of World Confer- ence on Educational Multi- media, Hypermedia and Telecommunications 2012	2012-06	pp.2935-2940
Akinori Toguch Hitoshi Sasaki Kazunori Mizuno Arimitsu Shikoda	討論	Development of a new e-Learning Contents for Improvement of Labo- ratory Courses by using the AR Technology	Proceedings of The 6th In- ternational Multi-Conference on Society, Cybernetics and Informatics	2012-07	pp.183-187
内 藤 原 町 佐 々 木 藤 春 樹 木 秋 町 を 、 町 を 、 町 を 、 町 で 本 、 を の 、 で 本 、 を の 、 の 、 の 、 の 、 の 、 の 、 の 、 の 、 の 、	口頭	絵文字メール作成アプリケーション と子供向けWeb ブラウザの開発	日本デザイン学会	2012-06	第59回研究発表大会概要 集, pp. 123-133
高 博 内 藤 真 渡 口 聡 近 七々木 整	口頭	絵文字メール作成機能を有する 子供 向けメールユーザエージェントの開発	日本教育工工学会第28回全国 大会	2012-09.17	3a-環 342-01
$ m 中 章 史 \overline{p} = \frac{1}{2} \overline{p} = \frac{1}{2} $	口頭	拡張現実を用いたWeb学習コンテン ツの開発(3)	日本教育工工学会第29回全国 大会	2012-09.17	3a-全203-02
佐々木 整	運営	IEEE	IEEE Education Japan Chapter Young Researcher Award 審査委員会		審査委員長
	運営	IEEE	IEEE Education Japan Chapter	2012-01~	Chair
	運営	情報処理学会	情報処理教育委員会 一般情 報教育委員会		幹事
	運営	電子情報通信学会	教育工学専門委員会		委員
	運営	電子情報通信学会	和文論文誌D編集委員会	2008.05~2012.05	編集委員
	運営	ICCE	ICCE 2012 Program Committee		Member
	運営	IMSCI 2012			Reviewer
	運営	EISTA 2013			Reviewer
	運営	ICETI 2013			Reviewer
	運営	2013 Bangkok International Confer- ence on Social Science		2013-01	Session Chair
	運営	教育システム情報学会	新技術開発・活用委員会		副委員長
	運営	教育システム情報学会			評議員
	運営	教育システム情報学会	研究会委員会		幹事
	運営	教育システム情報学会	新技術開発・活用委員会	2009-08~	副委員長

著氏	者 名	区分	著者,学術論文,作品等の名称	掲載誌,発行所,学会, 講演会,展覧会等の名称	発行・発表 年 月	刊 号 ペ ー ジ 分担・担当等
佐々木	整	運営	日本教育工学会	編集委員会		委員
		運営	中央職業能力開発協会	若年者ものづくり競技大会	2011-05~	「オフィスソリューション」 職種 競技委員
		運営	中央職業能力開発協会	中央試験委員	2004-10~	PCドライビング部門 委員
溢 谷 他	昇	著書	EMC概論演習	科学技術出版(株)	2012-11	分担、全13章(526ページ) 中の2章(20ページ)および 7章(22ページ)および
			JISC61000-4-20 電磁両立性 – 第 4-20 部: TEM 導波管試験	日本規格協会	2012-12	7 早(02、1) / 12日
			JISC1806-3-1 計測、制御及び試験室用の電気装置 - 電磁両立性要求事項 - 統合または遠隔信号処理機能を持っ たトランスデューサの試験配置、動 作条件、性能評価	日本規格協会	2012-12	
澁 谷	昇	解説	IEC61000 におけるイミュニテイ試験 について IEC61000 シリーズ総覧	月刊EMC、三松株式会社	2012-06	No.290, pp.13-26, June. 2012
		解説	IEC61326 シリーズ概要解説 はじめに: IEC61326 シリーズの変遷	月刊EMC、三松株式会社	2012-10.1	No.294,pp.77-79, Oct. 2012
		解説	これからのEMC	月刊EMC、三松株式会社	2013-01	No.297, p.36, Jan.2013
澁 谷他	昇	口頭	プリント基板の平面間共振を抑制す る抵抗値の検討	JIEPマイクロエレクトロニク スシンポジウム論文集	2012-09	pp.221~224, Sep. 2012
		口頭	プリント配線板プレーン間に挿入した抗 付キャパシタの消費電力への影響	第27回エレクトロニクス実装 学会春季講演大会	2013-03	pp.223~224, Mar. 2013
澁 谷	昇	運営	IEC/APC活動推進会議、ACEC分科会	日本規格協会	2012	分科会長
		運営	IEC/ACEC 会議	国際電気標準会議 (IEC)	2012	委員
		運営	IEC/TC77国内委員会	電気学会	2012	委員長
		運営	IEC/SC77B国内委員会	電気学会	2012	委員
		運営	IEC/TC65/SC65A/WG4国内委員会	日本電気計測器工業会	2012	主査
		運営	理事会	エレクトロニクス実装学会	2012	監事
		運営	電磁特性技術委員会	エレクトロニクス実装学会	2012	委員
		運営	EMCモデリング研究会	エレクトロニクス実装学会	2012	主査
		運営	論文誌	電子情報通信学会	2012	査読委員
		運営	論文誌	エレクトロニクス実装学会	2012	査読委員
		運営	EMCJAPAN企画委員会	日本能率協会	2012	委員
		運営	EMCフォーラム企画委員会	ソリューションフォーラム事 務局	2012	委員、座長
		運営	プリント配線板製造・設計技能検定 委員会(特級)	中央職業能力開発協会	2012	中央検定委員
高 橋 L. Niu T. Hubin	丈 博 ng	回頭	同軸ケーブルにツイストペアケーブ ルを接続したモデルのコモンモード 電流の検討	JIEP 超高速高周波エレクトロ ニクス実装研究会	2012-11	pp.3-8
J. W. Lee T. Takał T. Hubin	e nashi ng	討論	Closed-Form Experssions for the Radiated Emission from Multiple- Bent Signal Traces on a Printed Circuit Board in Matching Circuits	КЈЈС2012	2012-05	CD-ROM

著 者 氏 名	区分	著者、学術論文、作品等の名称	掲載誌,発行所,学会, 講演会,展覧会等の名称	発行・発表 年 月	刊 号 ペ ー ジ 分担・担当等
高橋丈博 L. Niu T. Hubing	討論	ツイストペア線のディファレンシャ ルモード伝送特性の検討	MES2012	2012-09	pp.213-216
高橋 丈博 斎藤 純 谷 由 紀夫 澁 谷 昇	討論	プリント基板の平板間共振を抑制す る抵抗値の検討	MES2012	2012-09	pp.221-224
高橋丈博 澁谷 邦 他4名	著書	EMC概論演習	科学技術出版	2012-11	3章,8章
斎藤 純 高橋 丈博 谷 由紀夫 澁谷 昇	口頭	プリント配線板プレーン間に挿入し た抵抗付きキャパシタの消費電力へ の影響	エレクトロニクス実装学会第 27 回学術講演大会	2013-03	pp.223-224
高橋丈博	運営	電磁特性技術委員会	エレクトロニクス実装学会	2012	委員
	運営	EMCモデリング研究会	エレクトロニクス実装学会	2012	幹事
	運営	第27回学術講演大会	エレクトロニクス実装学会	2012	大会実行副委員長
	運営	論文誌	電子情報通信学会	2012	査読委員
	運営	論文誌	エレクトロニクス実装学会	2012	査読委員
	運営		APEMC2012 Singapole	2012-04	論文査読
	運営	セッション2C4	MES2012	2012-09	座長
水 野 一 徳 西 原 清 一 佐々木 整	論文	グラフ彩色インスタンスの組織的生 成のための極小非可解構造の導出	人工知能学会論文誌, Vol. 28, No. 3, SP-G	2013-03	pp.279-284
Daiki Hayakawa Kazunori Mizuno Hitoshi Sasaki Seiichi Nishihara	討論	Solving Constraint Satisfaction Problems by a Population Based Cunning Ant System	The 2012 Conference on Tech- nologies and Applications of Artificial Intelligence (TAAI 2012)	2012-11	pp.205-210
	討論	A Population Based Cunning Ant System for Constraint Satisfaction Problems	The 6th International Confer- ence on Soft Computing and Intelligent Systems and the 13th International Sympo- sium on Advanced Intelligent Systems (SCIS-ISIS2012)	2012-11	pp.2082-2087
Yuko Aratsu Kazunori Mizuno Hitoshi Sasaki Seiichi Nishihara	討論	Artificial Bee Colony for Constraint Satisfaction Problems	The 6th International Confer- ence on Soft Computing and Intelligent Systems and the 13th International Sympo- sium on Advanced Intelligent Systems (SCIS-ISIS2012)	2012-11	pp.2283-2286
水 野 一 徳 西 原 清 一 佐々木 整	口頭	グラフ彩色インスタンスの組織的生 成のための極小非可解構造の導出	人工知能学会第26回全国大会	2012-06	1E1-R-1-3
	口頭	制約充足型Cunning Ant Systemの 実験的評価	第88回人工知能基本問題研究 会,人工知能学会	2013-01	рр.45-40
 荒 津 裕 子 水 野 一 徳 佐々木 整 西 原 清 一 	口頭	制約充足型 Artificial Bee Colony ア ルゴリズムの提案	情報処理学会第75回全国大会	2013-03	1S-5
坪山 宰 水野 一徳 佐々木 整 西原清 一	口頭	Swarmを用いたデマンドバスのシ ミュレーション環境の構築	情報処理学会第75回全国大会	2013-03	3V-2

著氏	者 名	区分	著者, 学術論文,	作品等の名称	掲載誌,発行所,学会, 講演会,展覧会等の名称	発行・発表 年 月	刊 号 ペ ー ジ 分担・担当等
水野	一徳	運営	論文委員会		芸術科学会	2009-05~	委員
		運営	研究会専門委員会		進化計算学会	2013-02~	委員
		審査	英文論文誌		電気学会	2012	査読
		審査	論文誌		芸術科学会	2012	査読

デザイン学科

著氏	者 名	区分	著者,学術論文,作品等の名称	掲載誌,発行所,学会, 講演会,展覧会等の名称	発行・発表 年 月	刊 号 ペ ー ジ 分担・担当等
三戸部 阿 部 眞 白 石 照 柴 沼 菜 小幡谷 英	健理美穂一	口頭	波形単板コアパネルの開発と家具へ の適用	第59回日本デザイン学会春季 研究発表大会概要集	2012-06	pp.364-365
沈 得 第 前 前 石 照 惠	正理美蓮	口頭	紐からつくられた敷物の感覚評価 および畳とファムンソクの比較	第59回日本デザイン学会春季 研究発表大会概要集	2012-06	pp.556-557
沈 得 阿部眞 白 石 照	正 理 美	口頭	マレーシアの家具産業の動向と新た な家具デザインの提案	第59回日本デザイン学会春季 研究発表大会概要集	2012-06	pp.358-359
三戸部 白 石 照 阿 部 眞 小幡谷 英	健美理一	口頭	家具固定を促す内装デザイン提案の ための基礎的研究	第59回日本デザイン学会春季 研究発表大会概要集	2012-06	pp.476-477
阿 部 真 白 石 照	理 美	口頭	波形単板コアパネルによる震災対応 軽量家具のデザイン	2012年度 拓殖大学理工学研 究所共同研究助成研究発表会	2012-06	
白 石 照阿 部 眞小幡谷 英	美 理 一	調査	家具固定を促す内装デザインと内装 建材の家具固定能評価	公益財団法人 LIXIL住生活 財団 研究助成報告書	2013-01	
阿 部 真 白 石 照	理 美	編集	デザイン学研究特集号「手から手へ」	日本デザイン学会 デザイン 学研究 特集号 7号	2013-03	担当:編集責任者
戸 塚 泰 阿 部 眞 白 石 照	幸 理 美	展示	紙でつくるあかり展	八王子市学園都市文化ふれあ い財団ギャラリーホール	2012-07	
戸 塚 泰 阿 部 眞 白 石 照	幸 理 美	展示	拓殖大学工学部デザイン学科生活デ ザインコース授業作品展示	Japan Home Show 2012(東 京ビッグサイト)	2012-11	
阿部真	理	展示	用品設計研究室研究成果展示	2012 諏訪圏工業メッセ	2012-11	
阿部真	理	運営	評議員	日本デザイン学会		
Julaila Abdul Ra Saiyo Takah Akira Kijim Shigeru Fut	ahman nashi na ruya	討論	Technology Framework on Service Design	3rd International Service In- novation Design Conference Proceeding	2012-10	pp.111-117
Julaila Abdul Ra Farhana Md. F Akira Kijim Shigeru Fut	ahman 'udzee na ruya	論文	Structure for Kawaii Trend in its Catch-up and Spread	Bulletin of JSSD Vol. 60, No.1 (2013)	2013-02	pp.33-42
滝沢<正木嶋永見部雄	仁彰豊毅	論文	可変式道路情報板に標示されるシン ボルの分かりやすさに関する検討	第32回交通工学研究発表会論 文集	2012-09	pp.203-207
Julaila Abdul Ra Farhana Md. F Akira Kijim Shigeru Fut	ahman 'udzee na ruya	口頭	Model of Catch-up and Spread on Kawaii Trend	日本デザイン学会・第59回研 究発表大会	2012-06	pp.164-165
新 井 信 工 藤 芳	頼彰	口頭	地域学習ワークショップ『わんぐら をつくろう!』の提案	日本デザイン学会第59回研究 発表大会概要集	2012-06	No.4-07
陳 工 藤 芳	楊 彰	口頭	中国の伝統的手工芸品「布老虎」に 関する意識調査	日本デザイン学会第59回研究 発表大会概要集	2012-06	No.4-08

E E	蒈 夭	老名	1 , , ,	区分	著者、学術論文、作品等の名称	掲載誌,発行所,学会, 講演会,展覧会等の名称	発行・発表 年 月	刊 号 ペ ー ジ 分担・担当等
笠 工	川藤	芳 芳	久 彰	口頭	「八王子いちょう祭り」 のサウンドス ケープ・デザイン	日本デザイン学会第59回研究 発表大会概要集	2012-06	pp.10-11
谷工	内藤	勇芳	太 彰	口頭	山梨県都留市を事例とした水資源に よる地域活性化イベントの提案	第4回大学コンソーシアム八 王子学生発表会	2012-12	рр.196-197
原工	田藤	洋芳	輔 彰	口頭	山梨県上野原市八重山を事例とした 地域学習ランブリングの提案	第4回大学コンソーシアム八 王子学生発表会	2012-12	рр.198-199
近 工	藤藤	大芳	介 彰	口頭	高尾山を事例とした地域環境学習の ためのボードゲームの提案	第4回大学コンソーシアム八 王子学生発表会	2012-12	pp.200-201
富工	澤藤	俊芳	紀 彰	口頭	知的障がい者のための歯磨き支援ア プリケーションの提案	第4回大学コンソーシアム八 王子学生発表会	2012-12	pp.206-207
I	藤	芳	彰	運営	八王子市文化遺産活用推進事業「八 王子市の文化遺産を活かした観光振 興・地域活性化事業」	文化庁「平成23年度 文化遺 産を活かした観光振興・ 地域活性化事業」	2011-07~	専門委員
I	藤	芳	彰	運営	特設理事	日本デザイン学会	2012-04~	学会誌編集・出版担当
小	出	昌	<u> </u>	審査	UCDA AWARD 2012	一般社団法人ユニバーサル コ ミュニケーション デザイン協会	2012-02~06	評価員
小	出	目	11	作品	平面構成作品	モダンアート協会主催 第62 回モダンアート展 デザイン 部門 東京都美術館、京都市 美術館、福岡市美術館	2012-04~05	
小	出	E	11	作品	平面構成作品	日本基礎造形学会 第23回博 多大会 九州産業大学美術 館・円形ギャラリー	2012-08	
小	出	E	11	作品	東京ミッドタウン・デザインハブ第 37 回企画展「JAGDA やさしいハン カチ展 Part 2」	日本グラフィックデザイナー協会企 画・運営 東京ミッドタウン・デザ インハブ 他会場多数	2013-01~	
永八王杉	見馬山	智和	豊智連雄	論文	南倉大橋の景観設計	日本デザイン学会 デザイン 学研究作品集 18号 2012	2013-03	pp.60-65
八王永杉	馬見山	智 和	智連豊雄	論文	イ・スンシン大橋の景観設計	日本デザイン学会 デザイン 学研究作品集 18号 2012	2013-03	pp.66-71
滝木永阿	沢嶋見部	正 雄	仁彰豊毅	論文	可変式道路情報板に標示されるシン ボルの分かりやすさに関する検討	第32回交通工学研究発表会論 文集	2012-09	рр.199-204
河永清中	田見宮川	明広	博豊 和浩	論文	速度抑制を目的とした路面標示パ ターンのDS評価および効果検証	第32回交通工学研究発表会論 文集	2012-09	pp.171-175
永	見		豊	運営	まちづくり専門家	財団法人東京都新都市建設公 社 まちづくり支援事業	2010-06~	
永	見		豊	依頼	まちづくり相談	清川・太陽地域再生まちづく り準備会	2010-07~	
永	見		豊	運営		八王子市公契約に関する調査 研究委員会	2010-10~	委員

基礎教育系列

I I	× 手	ゴイ イ		区分	著者, 学術論文, 作品等の名称	掲載誌,発行所,学会, 講演会,展覧会等の名称	発行・発表 年 月	刊 号 ペー ジ 分担・担当等
鈴	木	康	夫	運営	編集委員	日本物理学会「大学の物理教 育」	2012	
鈴	木	康	夫	審査	查読	日本物理学会「大学の物理教 育」	2012	18-1, 18-2, 18-3
				論文	バネと振り子の振動	数理科学	2012-12	50(12), pp.7-14
				運営	刊行委員	日本物理学会	2012	委員
				運営	JPSJ問題ワーキンググループ	日本物理学会	2012	委員
				審査	JABEE委員会	日本物理学会	2012	委員長
巻	田	和	男	論文	南米赤道域におけるイメージングリ オメータ観測	拓殖大学理工学研究報告	2012	Vol.12, No.2, pp.13-23
				論文	南大西洋磁気異常帯における高エネ ルギー電子降下の太陽周期変動	拓殖大学理工学研究報告	2012	Vol.12, No.2, pp.25-32
				論文	Latitudinal dependence of cosmic noise absorption in the ionosphere over SAMA region during the Sep- tember 2008 magnetic storm	J.Geophys. Res.	2012	A06311 1029/2011 JA017405
巻	Ξ	和	男	調査	南大西洋磁気異常帯における光学観 測、紫外線計の設置、イメージング リオメータの保守、ブラジル地球物 理学会への参加	名古屋大学太陽地球環境研究 所の助成	2012-8.12~9.16	
				調査	ブラジル磁気異常帯域での超高層大 気変動の研究	拓殖大学短期留学の助成	2013-2.3~3.17	
巻	田	和	男	発表	South America Riometer Network and Electric Fiel Mill detectors in Geomagnetic Hole	Monitoring Ionosphere over South America (ESA and INPE)	2013-2.26	ブラジル宇宙科学研究所 にて

その他

著 氏	者 名	区分	著者、学術論文、作品等の名称	掲載誌,発行所,学会, 講演会,展覧会等の名称	発行・発表 年 月	刊 号 ペ ー ジ 分担・担当等						
Osamu Ye Dua	Ikeda n	討論	A Method of Compensating Inter- reflections in Color Photometric Stereo	Proceedings of 2012 IEEE Southwest Symposium on Image Analysis and Inter- pretation (SSIAI 2012)	April 22-24, 2012	p.41-44, 立案・研究遂行・ 執筆						
Osamu Ikeda		討論	Improving Shape Reconstruction in Photometric Stereo Using Inter-re- flections Compensation and Gamma Map Control	Abstracts of Collaborative Conference on 3D Research 2012 (CC3DR 2012)	June 25–29, 2012	p.84-85, 立案・研究遂行・ 執筆						
池田	修	口頭	英語教科書を用いた微積分学の授業	日本数学会年会,工学系数学 基礎教育研究会,「国際化時 代における工学系数学基礎教 育について」	2013-03							
理工学総合研究所		理工学研究報告		表紙デザイン		拓殖大学理工学研究報告			兼発行人	吉森	茂	
----------	----	---------	-----	--------	----	------------------	---	---	------	-----	-----------	-----------
運 営 委 員		編 集 委 員							発行所	拓殖大	学理工学編	総合研究所
○吉森	茂	○林	誠治	石田	光男	第13巻 第1号				東京都	3文京区小日	目向 3-4-14
笠野	英秋	佐々オ	卞 繁	鳥井	貴彦					電話	03-3947-7	595
林	誠治	前山	利幸			平成 26 年 3 月 25 日	印	刷			(学務部研	究支援課)
原田	紀夫	水野	一徳						印刷所	株式会	社外為印刷	刊
竹末	俊昭	小出	昌二			平成 26 年 3 月 31 日	発	行				
鈴木	康夫	鈴木	賢治									

TAKUSHOKU UNIVERSIT Y

HEAD OFFICE : 34-14 KOHINATA BUNKYO-KU, TOKYO, JAPAN RESEARCH INSTITUTE OF SCIENCE AND ENGINEER I NG 815-1, TATEMACHI, HACHIOJI CITY TOKYO, JAPAN

ISSN 0919-8253

	E	BUL	LE	TIN)F
SCIENCE AND	El	NG	NE	ER	IN	G
TAKUSHOK	U	UN	IIV	ERS	SIT	Y

CONTENTS		
FULL PAPERS	Study on Starting Performance Improvement of Gyromill Wind Turbines (Effect of the Setting Angle of Blades) <i>Takanori Hirano, Ichiro Fujimoto</i>	3
	Study on Starting Performance Improvement of Gyromill Wind Turbines by Pitch Control of Each Blade <i>Takanori Hirano, Ichiro Fujimoto</i>	9
	Kosterlitz-Thouless Phase Transition in Two Dimensional Asymmetric Coulomb System	15
	Crown root primordia in Zea Mays Teruo Niki, Susumu Saito, Kiyomi Mori, Daniel K. Gladish	23
	Airglow observation of multiple wave lengths by using photodiode sensors <i>Kazuo Makita, Motoharu Takano, Mituo Hoshino,</i> <i>Yasuo Kato, Hiromasa Nozawa</i>	29
	Long-term Variations of High-energy Electron Precipitation in the South Atlantic Magnetic Anomaly by Satellite Observations and Verification of Ionospheric CNA Phenomena by the Ground-based IRIS Observations 	35
	Atmospherics Electric Field Observation at Geomagnetic Anomaly Region 	49
	Polymer Fiber-optic Interferometric Sensor and Its Application to Strain Measurement Shinichi Koshide, Hideaki Kasano, Sigeru Sasaki, Shun Yoshida, Toshio Sugimayashi, Kiyomi Mori, Akihiko Okamura, Mizah Binti Ramli, Kazunari Takamura,	
ABSTRACTS	Toshio Sugibayashi, Kiyomi Mori Evaluation of Adhesive Joint Strength by using Discoloration Value of Epoxy ResinShun Yoshida, Toshio Sugibayashi, Kiyomi Mori Akihibo Okamura Mizah Binti Ramli	59 67
	Texture Evaluation for Various Resins Subjected to Shot Blasting Process 	69
	Proposal of New Hydroponically Culture System for Root Vegetables Kiyomi Mori	71
	Water Environment Control in Indoor Plant Factory of Potatoes Cultured Hydroponically with Solid Medium	
		73
	and Bubble Jet— Kiyomi Mori, Toshiyuki Maeyama, Daiki Hirabayashi, Takehito Okada	75
	Design of Lightweight Furniture by Using Corrugated Veneer Core Panel	77
	Pattern Design of Long Tunnel to Stage a Rhythm Feeling	70
	A Figure Pattern Transmisson Support System using Tactile and Auditory	19
	Senses for the visually impaired Masahiko Sugimolo	83
RESEARCHES & TITLES ···		87
& SOCIAL ACTIVITIES		95



Vol.13 No.1 Mar. 2014