

戦略的研究基盤形成支援事業の中間報告

EXPLICIT FORMULAS FOR WHITTAKER FUNCTIONS ON CLASSICAL GROUPS

Taku ISHII*

Abstract: We give explicit recursive relations for Whittaker functions on classical groups and its application to archimedean zeta integrals.

Keywords: Whittaker functions, automorphic L -functions.

(Received September 24, 2010)

INTRODUCTION

In the theory of automorphic forms Whittaker functions play very important role. In this note we collect our recent results ([4], [2], [3]) on explicit formulas for Whittaker functions on classical groups.

Let us briefly recall the simplest case $SL_2(\mathbb{R})$. A Maass wave form f is an automorphic form on the upper half plane $\mathfrak{H} = \{z = x + \sqrt{-1}y \mid y > 0\}$, which is an eigenfunction of the Laplacian of $\mathfrak{H}$, that is, f satisfies

$$-y^2 \left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} \right) f(z) = \left(\frac{1}{4} - \nu^2 \right) f(z)$$

($\nu \in \mathbb{C}$). Then f has the Fourier expansion of the form

$$f(x + \sqrt{-1}y) = ay^{\nu+1/2} + by^{-\nu+1/2} + \sum_{n \neq 0} a_n \sqrt{y} K_\nu(2\pi|n|y) \exp(2\pi\sqrt{-1}nx),$$

where $K_\nu(z)$ is the modified K -Bessel function (= *class one Whittaker function* on $SL_2(\mathbb{R})$) and satisfies Bessel's differential equation

$$\left[\left(z \frac{d}{dz} \right)^2 - (z^2 + \nu^2) \right] K_\nu(z) = 0.$$

When $\nu \notin \mathbb{Z}$, the fundamental solution of this differential equation around $z = 0$ is $\{I_\nu(z), I_{-\nu}(z)\}$ with

$$I_\nu(z) = \sum_{m=0}^{\infty} \frac{(z/2)^{2m+\nu}}{m! \Gamma(\nu + m + 1)}$$

the I -Bessel function (= *fundamental Whittaker function* on $SL_2(\mathbb{R})$) and there is the relation

$$K_\nu(z) = \frac{\pi}{2 \sin \nu\pi} (I_{-\nu}(z) - I_\nu(z)).$$

We shall discuss explicit formulas of these special functions on higher rank groups. Our explicit formulas are applicable for archimedean theory of automorphic L -functions such as the computation of archimedean L -factors.

1. WHITTAKER FUNCTIONS FOR CLASS ONE PRINCIPAL SERIES REPRESENTATIONS

We recall the notion of Whittaker functions for class one principal series representations of real semisimple Lie groups. Let G be a real semisimple Lie group with finite center and $\mathfrak{g}$ its Lie algebra. Fix a maximal compact subgroup K of G and put $\mathfrak{k} = \text{Lie}(K)$. Let $\mathfrak{p}$ be the orthogonal complement of $\mathfrak{k}$ in $\mathfrak{g}$ and θ the corresponding Cartan involution. For a maximal abelian subalgebra $\mathfrak{a}$ of $\mathfrak{p}$ and $\alpha \in \mathfrak{a}^*$, put $\mathfrak{g}_\alpha = \{X \in \mathfrak{g} \mid [H, X] = \alpha(H)X, \forall H \in \mathfrak{a}\}$ and $\Delta = \Delta(\mathfrak{g}, \mathfrak{a})$ the restricted root system. Denoted by Δ^+ the positive system in Δ and Π the set of simple roots. Then we have an Iwasawa decomposition $\mathfrak{g} = \mathfrak{n} \oplus \mathfrak{a} \oplus \mathfrak{k}$ with $\mathfrak{n} = \sum_{\alpha \in \Delta^+} \mathfrak{g}_\alpha$. Let $G = NAK$ be the Iwasawa decomposition corresponding to that of $\mathfrak{g}$. We denote by $\mathcal{W}$ the Weyl group of the root system Δ .

Let $P = MAN$ be a minimal parabolic subgroup of G with $M = Z_K(A)$. For a linear form $\nu \in \mathfrak{a}_{\mathbb{C}}^* = \mathfrak{a}^* \otimes_{\mathbb{R}} \mathbb{C}$, define a character $\exp(\nu)$ on A by $\exp(\nu)(a) = \exp(\nu(\log a))$ ($a \in A$). We call the induced representation

$$I(\nu) = L^2\text{-Ind}_P^G(1_M \otimes \exp(\nu + \rho) \otimes 1_N)$$

the *class one principal series representation* of G . Here $\rho = \frac{1}{2} \sum_{\alpha \in \Delta^+} m_\alpha \alpha$ is the half sum of positive roots ($m_\alpha = \dim \mathfrak{g}_\alpha$).

Let η be a unitary character of N . Since $\mathfrak{n} = [\mathfrak{n}, \mathfrak{n}] \oplus \sum_{\alpha \in \Pi} \mathfrak{g}_\alpha$, η is determined by the restriction $\eta_\alpha := d\eta|_{\mathfrak{g}_\alpha}$ ($\alpha \in \Pi$). The length $|\eta_\alpha|$ of η_α is defined as $|\eta_\alpha|^2 = \sum_{1 \leq i \leq m(\alpha)} -d\eta(X_{\alpha,i})^2$ (note that $d\eta(X_{\alpha,i}) \in \sqrt{-1}\mathbb{R}$), where the root vector $X_{\alpha,i}$ is chosen as $B(X_{\alpha,i}, \theta X_{\alpha,j}) = -\delta_{i,j}$ ($1 \leq i, j \leq m(\alpha)$). Here $B(\cdot, \cdot)$ is the Killing form on $\mathfrak{g}$. In this note we assume that η is nondegenerate, that is, $\eta_\alpha \neq 0$ for all $\alpha \in \Pi$. For such η , the space

$$C_\eta^\infty(N \backslash G) = \{f \in C^\infty(G, \mathbb{C}) \mid f(ng) = \eta(n)f(g), \forall (n, g) \in N \times G\}$$

becomes a $(\mathfrak{g}_{\mathbb{C}}, K)$ -module. For a nonzero intertwining operator Φ between $I(\nu)$ and $C_\eta^\infty(N \backslash G)$

* 理工学部准教授 (ishii@st.seikei.ac.jp)

and a spherical vector $v_0 \in \pi_\nu$, we call the image $\Phi(v_0)$ the *Whittaker function for the class one principal series*. We denote by

$$\begin{aligned} \text{Wh}(\nu, \eta) \\ = \{ \Phi(v_0) \mid \Phi \in \text{Hom}_{(\mathfrak{g}_{\mathbb{C}}, K)}(I(\nu), C_\eta^\infty(N \backslash G)) \} \end{aligned}$$

the space of Whittaker functions. Because of Iwasawa decomposition, Whittaker function w is determined by its restriction $w|_A$ to A , which we call the *radial part* of w . Let $\text{Wh}(\nu, \eta)^{\text{mod}}$ be the subspace of $\text{Wh}(\nu, \eta)$ consisting of moderate growth functions. Here is the well-known results (see [7], [9]):

- $\dim_{\mathbb{C}} \text{Wh}(\nu, \eta) = |\mathcal{W}|$,
- $\dim_{\mathbb{C}} \text{Wh}(\nu, \eta)^{\text{mod}} = 1$.

Hashizume [1] constructed a basis of the space $\text{Wh}(\nu, \eta)$ by a power series $M_{\nu, \eta}$ whose coefficients are characterized by a recurrence relation coming from Casimir operators. In the next section we review the construction of $M_{\nu, \eta}$, which we call *fundamental Whittaker functions*.

The unique moderate growth Whittaker function has an integral representation introduced by Jacquet [6]:

$$W_{\nu, \eta}(g) = \int_N \eta^{-1}(n) a(w^{-1}ng)^{\nu+\rho} dn$$

where w is the longest element in $\mathcal{W}$ and $g = n(g)a(g)k(g)$ means the Iwasawa decomposition of $g \in G$. It gives a unique moderate growth Whittaker function and it is known that as a function of ν , $W_{\nu, \eta}$ converges absolutely and uniformly on $\{\nu \in \mathfrak{a}_{\mathbb{C}}^* \mid \text{Re}(\langle \nu, \alpha \rangle) > 0 \text{ for all } \alpha \in \Delta^+\}$ and can be continued to a meromorphic function. We refer the Jacquet integral *class one Whittaker function*. Following the idea of Harish-Chandra, Hashizume expressed the Jacquet integral as a linear combination of the fundamental Whittaker functions. This *factorization formula* plays important role to obtain an integral representation of class one Whittaker function.

In this paper we discuss the case of classical group $G = SL_{n+1}(\mathbb{R})$, $SO_{n+1, n}(\mathbb{R})$, $Sp_n(\mathbb{R})$ and $SO_{n, n}(\mathbb{R})$. Here $SO_{n+1, n}(\mathbb{R})$ (resp. $SO_{n, n}(\mathbb{R})$) is the special orthogonal group with respect to J_{2n+1} (resp. J_{2n}), and $Sp_n(\mathbb{R})$ is the symplectic group with respect to $\begin{pmatrix} & J_n \\ -J_n & \end{pmatrix}$ with $J_n = \begin{pmatrix} & 1 \\ & \ddots \\ 1 & \end{pmatrix}$ ($n \times n$ matrix). To describe our explicit formulas for Whittaker functions we fix some notation for coordinates on A and parameters for principal series. In our realization of G , $a \in A$ is

of the form

$$a = \begin{cases} \text{diag}(a_1, \dots, a_{n+1}) & \text{if } G = SL_{n+1}(\mathbb{R}); \\ \text{diag}(a_1, \dots, a_n, 1, a_n^{-1}, \dots, a_1^{-1}) & \text{if } G = SO_{n+1, n}(\mathbb{R}); \\ \text{diag}(a_1, \dots, a_n, a_n^{-1}, \dots, a_1^{-1}) & \text{if } G = Sp_n(\mathbb{R}), SO_{n, n}(\mathbb{R}), \end{cases}$$

with $a_i > 0$. We introduce new coordinates $y = (y_1, \dots, y_n)$ on A by $y_i = a_i/a_{i+1}$ ($1 \leq i \leq n-1$) and

$$y_n = \begin{cases} a_n/a_{n+1} & \text{if } G = SL_{n+1}(\mathbb{R}); \\ a_n & \text{if } G = SO_{n+1, n}(\mathbb{R}); \\ a_n^2 & \text{if } G = Sp_n(\mathbb{R}); \\ a_{n-1}a_n & \text{if } G = SO_{n, n}(\mathbb{R}). \end{cases}$$

The parameter ν of principal series of G is identified with the complex numbers $(\nu_1, \dots, \nu_n)$ by

$$\exp(\nu)(a) = \begin{cases} \prod_{i=1}^{n+1} a_i^{2\nu_i} & \text{if } G = SL_{n+1}(\mathbb{R}); \\ \prod_{i=1}^n a_i^{2\nu_i} & \text{otherwise.} \end{cases}$$

Note that $\sum_{i=1}^{n+1} \nu_i = 0$ for $G = SL_{n+1}(\mathbb{R})$.

2. FUNDAMENTAL WHITTAKER FUNCTIONS

In this section we give explicit formulas for fundamental Whittaker functions. We first review Hashizume's result. Let $\langle \cdot, \cdot \rangle$ be the inner product on $\mathfrak{a}_{\mathbb{C}}^*$ induced by the Killing form $B(\cdot, \cdot)$. We denote by L the set of linear functions on $\mathfrak{a}_{\mathbb{C}}$ of the form $\sum_{\alpha \in \Pi} n_\alpha \alpha$ with $n_\alpha \in \mathbb{Z}_{\geq 0}$.

For each $\lambda \in L$, we can define the rational function $c_\lambda(\nu)$ on $\mathfrak{a}_{\mathbb{C}}^*$ as follows. Put $c_0(\nu) = 1$ and determine $c_\lambda(\nu)$ for $\lambda \in L \setminus \{0\}$ by

$$(2.1) \quad \begin{aligned} & (\langle \lambda, \lambda \rangle + 2\langle \lambda, \nu \rangle) c_\lambda(\nu) \\ & = 2 \sum_{\alpha \in \Pi} |\eta_\alpha|^2 c_{\lambda-2\alpha}(\nu), \end{aligned}$$

inductively. Here we assumed $\langle \lambda, \lambda \rangle + 2\langle \lambda, \nu \rangle \neq 0$ for all $\lambda \in L \setminus \{0\}$.

We define a series $M_{\nu, \eta}(a)$ on A by

$$M_{\nu, \eta}(a) = a^{\nu+\rho} \sum_{\lambda \in L} c_\lambda(\nu) a^\lambda \quad a \in A,$$

and $(a^{\nu+\rho} = \exp(\nu + \rho)(a))$ extend it to the function on G by

$$M_{\nu, \eta}(g) = \eta(n(g)) M_{\nu, \eta}(a(g)).$$

We call the power series $M_{\nu, \eta}$ the *fundamental Whittaker function* on G . Hashizume proved the following.

Proposition 1. ([1, Theorem 5.4]) *If $\nu \in \mathfrak{a}_{\mathbb{C}}^*$ is regular, then the set*

$$\{M_{s\nu, \eta}(g) \mid s \in \mathcal{W}\}$$

forms a basis of $\text{Wh}(\nu, \eta)$. Here an element $\nu \in \mathfrak{a}_{\mathbb{C}}^$ is called regular if the following two conditions are satisfied.*

- $\langle \lambda, \lambda \rangle + 2\langle \lambda, s\nu \rangle \neq 0$ for all $\lambda \in L \setminus \{0\}$ and $s \in \mathcal{W}$,
- $s\nu - t\nu \notin \{\sum_{\alpha \in \Pi} m_\alpha \alpha \mid m_\alpha \in \mathbb{Z}\}$ for all $s \neq t \in \mathcal{W}$.

Therefore to find explicit formulas of Whittaker functions, we need to solve the recurrence relation (2.1). If we suitably fix the parameters η_α and use coordinates $y = (y_1, \dots, y_n)$ on A , then the radial parts of fundamental Whittaker functions can be written as of the form:

$$M_\nu^G(y) = y^{\rho+\nu} \sum_{\mathbf{m}=(m_1, \dots, m_n) \in \mathbb{N}^n} C_{\mathbf{m}}^G(\nu) \times (\pi y_1)^{2m_1} \dots (\pi y_n)^{2m_n}.$$

Here the coefficients $C_{\mathbf{m}}^G(\nu)$ are characterized by the initial condition $C_{(0, \dots, 0)}^G(\nu) = 1$ and the recurrence relation:

$$Q_{\mathbf{m}}^G(\nu) C_{\mathbf{m}}^G(\nu) = \sum_{i=1}^{n-1} C_{\mathbf{m}-\mathbf{e}_i}^G(\nu) + \varepsilon^G C_{\mathbf{m}-\mathbf{e}_n}^G(\nu),$$

where we denote by $\mathbf{e}_i$ the i -th standard basis in $\mathbb{R}^n$ and $Q_{\mathbf{m}}(\nu)$ and ε^G are given as follows:

$$Q_{\mathbf{m}}^G(\nu) = \sum_{i=1}^{n-1} m_i^2 + \varepsilon^G m_n^2 - \sum_{i=1}^{n-2} m_i m_{i+1} + \sum_{i=1}^{n-1} (\nu_i - \nu_{i+1}) m_i + \begin{cases} -m_{n-1} m_n + (\nu_n - \nu_{n+1}) m_n \\ \text{if } G = SL_{n+1}(\mathbb{R}); \\ -m_{n-1} m_n + \nu_n m_n \\ \text{if } G = SO_{n+1, n}(\mathbb{R}); \\ -2m_{n-1} m_n + 2\nu_n m_n \\ \text{if } G = Sp_n(\mathbb{R}); \\ -m_{n-2} m_n + (\nu_{n-1} + \nu_n) m_n \\ \text{if } G = SO_{n, n}(\mathbb{R}), \end{cases}$$

and

$$\varepsilon^G = \begin{cases} 1 & \text{if } G = SL_{n+1}(\mathbb{R}), SO_{n, n}(\mathbb{R}); \\ 1/2 & \text{if } G = SO_{n+1, n}(\mathbb{R}); \\ 2 & \text{if } G = Sp_n(\mathbb{R}). \end{cases}$$

We solve the recurrence relations above and find recursive formulas with respect to the real rank of G . For $G = SL_{n+1}(\mathbb{R})$, $SO_{n+1, n}(\mathbb{R})$, $Sp_n(\mathbb{R})$ and $SO_{n, n}(\mathbb{R})$, we write $G' = SL_n(\mathbb{R})$, $SO_{n, n-1}(\mathbb{R})$, $Sp_{n-1}(\mathbb{R})$ and $SO_{n-1, n-1}(\mathbb{R})$, respectively. For the class one principal series $I(\nu)$ of G , we associate principal series $I(\tilde{\nu})$ of G' with $\tilde{\nu} = (\tilde{\nu}_1, \dots, \tilde{\nu}_{n-1})$ as follows.

$$\tilde{\nu}_i = \begin{cases} \nu_{i+1} + \nu_1/n & \text{if } G = SL_{n+1}(\mathbb{R}), \\ \nu_i & \text{otherwise.} \end{cases}$$

Then we obtained the following.

Theorem 2. ([4], [2], [3]) *The coefficients $C_{\mathbf{m}}^G(\nu)$ can be written in terms of $C_{\mathbf{k}=(k_1, \dots, k_{n-1})}^{G'}(\tilde{\nu})$:*

$$C_{\mathbf{m}}^G(\nu) = \sum_{\mathbf{k} \leq \mathbf{m}} \frac{C_{\mathbf{k}}^{G'}(\tilde{\nu})}{P_{\mathbf{m}, \mathbf{k}}^G},$$

where

$$P_{\mathbf{m}, \mathbf{k}}^{SL_{n+1}(\mathbb{R})} = \prod_{i=1}^n (m_i - k_i)! (\nu_i - \nu_{n+1} + 1)_{m_i - k_{i-1}},$$

$$P_{\mathbf{m}, \mathbf{k}}^{SO_{n+1, n}(\mathbb{R})} = \frac{\prod_{i=1}^{n-1} (m_i - k_i)! (\nu_i + \nu_{i+1} + 1)_{m_{i+1} - k_{i-1}}}{\prod_{i=1}^{n-1} (\nu_i + \nu_{i+1} + 1)_{m_i + m_{i+1} - k_{i-1} - k_i}} \times \prod_{i=1}^{n-1} (\nu_i - \nu_n + 1)_{m_i - k_{i-1}} \times \prod_{i=1}^{n-1} (\nu_i + \nu_n + 1)_{m_i - k_{i-1}} \times (m_n - k_{n-1})! (2\nu_n + 1)_{m_n - k_{n-1}},$$

$$P_{\mathbf{m}, \mathbf{k}}^{Sp_n(\mathbb{R})} = \frac{\prod_{i=1}^{n-2} (m_i - k_i)! (\nu_i + \nu_{i+1} + 1)_{m_{i+1} - k_{i-1}}}{\prod_{i=1}^{n-2} (\nu_i + \nu_{i+1} + 1)_{m_i + m_{i+1} - k_{i-1} - k_i}} \times \prod_{i=1}^{n-1} (\nu_i - \nu_n + 1)_{m_i - k_{i-1}} \times \prod_{i=1}^{n-1} (\nu_i + \nu_n + 1)_{m_i - k_{i-1}} \times \frac{(m_{n-1} - 2k_{n-1})! (m_n - k_{n-1})!}{(\nu_{n-1} + \nu_n + 1)_{m_{n-1} + 2m_n - 2k_{n-1} - k_{n-2}}} \times (\nu_{n-1} + \nu_n + 1)_{2m_n - k_{n-2}} (\nu_n + 1)_{m_n - k_{n-1}},$$

and

$$P_{\mathbf{m}, \mathbf{k}}^{SO_{n, n}(\mathbb{R})} = \frac{\prod_{i=1}^{n-3} (m_i - k_i)! (\nu_i + \nu_{i+1} + 1)_{m_{i+1} - k_{i-1}}}{\prod_{i=1}^{n-3} (\nu_i + \nu_{i+1} + 1)_{m_i + m_{i+1} - k_{i-1} - k_i}} \times \prod_{i=1}^{n-2} (\nu_i - \nu_n + 1)_{m_i - k_{i-1}} \times \prod_{i=1}^{n-2} (\nu_i + \nu_n + 1)_{m_i - k_{i-1}} \times (m_{n-2} - k_{n-2} - k_{n-1})! \times \frac{(\nu_{n-2} + \nu_{n-1} + 1)_{m_{n-1} + m_n - k_{n-3}}}{(\nu_{n-2} + \nu_{n-1} + 1)_{\sum_{i=n-2}^n m_i - \sum_{i=n-3}^{n-1} k_i}} \times (m_{n-1} - k_{n-1})! (\nu_{n-1} - \nu_n + 1)_{m_{n-1} - k_{n-2}} \times (m_n - k_{n-1})! (\nu_{n-1} + \nu_n + 1)_{m_n - k_{n-2}}$$

with $(a)_n = \Gamma(a+n)/\Gamma(a)$, and $\mathbf{k}$ runs through such that $P_{\mathbf{m}, \mathbf{k}}^G$ do not vanish (finite sum).

3. CLASS ONE WHITTAKER FUNCTIONS

In this section we give integral representations for class one Whittaker functions. Jacquet integral of course is an integral representation for class one Whittaker function, however, it is not satisfactory form for application such as computation of archimedean L -factors of automorphic L -functions. After long calculation Stade [8] evaluated Jacquet integral on $SL_n(\mathbb{R})$ to reach an

effective recursive formula between $SL_n(\mathbb{R})$ and $SL_{n-2}(\mathbb{R})$. Further he computed L -factors of L -functions on $GL_n \times GL_n$ and $GL_n \times GL_{n-1}$. Based on Stade's result, he and the author [4] found a recursive formula between $SL_n(\mathbb{R})$ and $SL_{n-1}(\mathbb{R})$. In [2], [3], we obtain similar formulas for other classical groups, and our approach here does not based on Jacquet integrals. We use a linear relation between fundamental Whittaker functions and class one Whittaker functions given in [1]. If we set

$$W^G = \sum_{s \in \mathcal{W}} \Gamma_{s\nu}^G \cdot M_{s\nu},$$

then, up to constant (depending on ν), W^G is class one Whittaker function on G . Here

$$\begin{aligned} \Gamma_\nu^{SL_n(\mathbb{R})} &= \prod_{1 \leq i < j \leq n+1} \Gamma(-\nu_i + \nu_j); \\ \Gamma_\nu^{SO_{n+1,n}(\mathbb{R})} &= \Gamma_\nu^{Sp_n(\mathbb{R})} \\ &= \prod_{1 \leq i < j \leq n} \Gamma(-\nu_i + \nu_j) \Gamma(-\nu_i - \nu_j) \\ &\quad \times \prod_{1 \leq i \leq n} \Gamma(-2\nu_i); \\ \Gamma_\nu^{SO_{n,n}(\mathbb{R})} &= \prod_{1 \leq i < j \leq n} \Gamma(-\nu_i + \nu_j) \Gamma(-\nu_i - \nu_j). \end{aligned}$$

As in Theorem 2 we give recursive relations between class one Whittaker functions on G and G' .

Theorem 3. ([4], [2], [3]) *If we denote by $W^G(y) = y^\rho \widetilde{W}^G(y)$. Then we have following recursive relations:*

$$\begin{aligned} &\widetilde{W}_\nu^{SL_{n+1}(\mathbb{R})}(y) \\ &= \int_{(\mathbb{R}^+)^n} \prod_{i=1}^n \exp\left\{-u_i - \frac{(\pi y_i)^2}{u_i}\right\} \cdot \widetilde{W}_\nu^{SL_n(\mathbb{R})}(\tilde{y}) \\ &\quad \times \left(\prod_{i=1}^n (\pi y_i)^{2(n+1-i)} u_i^{n+1}\right)^{\frac{\nu_1}{n}} \prod_{i=1}^n \frac{du_i}{u_i}; \\ &\widetilde{W}_\nu^{SO_{n+1,n}(\mathbb{R})}(y) \\ &= \int_{(\mathbb{R}^+)^{n-1}} \prod_{i=1}^{n-1} K_{2\nu_n} \left(2\pi y_i \sqrt{(1+u_{i-1})(1+\frac{1}{u_i})}\right) \\ &\quad \times K_{2\nu_n} (2\pi y_n \sqrt{1+u_{n-1}}) \widetilde{W}_\nu^{SO_{n,n-1}(\mathbb{R})}(\tilde{y}) \prod_{i=1}^{n-1} \frac{du_i}{u_i}; \\ &\widetilde{W}_\nu^{Sp_n(\mathbb{R})}(y) \\ &= \int_{(\mathbb{R}^+)^{n-1}} \prod_{i=1}^{n-1} K_{2\nu_n} \left(2\pi y_i \sqrt{(1+u_{i-1})(1+\frac{1}{u_i})}\right) \\ &\quad \times K_{\nu_n} (2\pi y_n (1+u_{n-1})) \widetilde{W}_\nu^{Sp_{n-1}(\mathbb{R})}(\tilde{y}) \prod_{i=1}^{n-1} \frac{du_i}{u_i}; \\ &\widetilde{W}_\nu^{SO_{n,n}(\mathbb{R})}(y) \\ &= \int_{(\mathbb{R}^+)^{n-1}} \prod_{i=1}^{n-2} K_{2\nu_n} \left(2\pi y_i \sqrt{(1+u_{i-1})(1+\frac{1}{u_i})}\right) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} &\times K_{2\nu_n} \left(2\pi \sqrt{(1+u_{n-2})(1+u_{n-1})(\frac{y_{n-1}^2}{u_{n-1}} + y_n^2)}\right) \\ &\times \widetilde{W}_\nu^{SO_{n-1,n-1}(\mathbb{R})}(\tilde{y}) \\ &\times \left(\frac{y_{n-1} y_n (1+u_{n-1})}{y_{n-1}^2 + u_{n-1} y_n^2}\right)^{\nu_n} \prod_{i=1}^{n-1} \frac{du_i}{u_i}, \end{aligned}$$

where $\tilde{y} = (\tilde{y}_1, \dots, \tilde{y}_{n-1})$ with $\tilde{y}_i = y_{i+1} \sqrt{u_i/u_{i+1}}$ ($1 \leq i \leq n-2$) and

$$\tilde{y}_{n-1} = \begin{cases} y_n \sqrt{u_{n-1}/u_n} & \text{if } G = SL_{n+1}(\mathbb{R}); \\ y_n \sqrt{u_{n-1}} & \text{if } G = SO_{n+1,n}(\mathbb{R}); \\ y_n u_{n-1} & \text{if } G = Sp_n(\mathbb{R}); \\ y_n \sqrt{u_{n-2} u_{n-1}} & \text{if } G = SO_{n,n}(\mathbb{R}). \end{cases}$$

Finally we announce our recent result on a computation of archimedean L -factors.

Theorem 4. ([5]) *We have*

$$\begin{aligned} &\int_{(\mathbb{R}^+)^n} \widetilde{W}_{(\nu_1, \dots, \nu_n)}^{SO_{n+1,n}(\mathbb{R})}(y_1, \dots, y_n) \\ &\times \widetilde{W}_{(\mu_1, \dots, \mu_n)}^{SL_n(\mathbb{R})}(y_1, \dots, y_{n-1}) \prod_{i=1}^n y_i^{is} \frac{dy_i}{y_i} \\ &= \frac{\prod_{i=1}^n \prod_{j=1}^n \Gamma_{\mathbb{R}}(s + \nu_i + \mu_j) \Gamma_{\mathbb{R}}(s - \nu_i + \mu_j)}{\prod_{1 \leq i < j \leq n} \Gamma_{\mathbb{R}}(2s + \mu_i + \mu_j)}, \end{aligned}$$

and

$$\begin{aligned} &\int_{(\mathbb{R}^+)^n} \widetilde{W}_{(\nu_1, \dots, \nu_n)}^{SO_{n+1,n}(\mathbb{R})}(y_1, \dots, y_n) \\ &\times \widetilde{W}_{(\mu_1, \dots, \mu_{n+1})}^{SL_{n+1}(\mathbb{R})}(y_1, \dots, y_n) \prod_{i=1}^n y_i^{is} \frac{dy_i}{y_i} \\ &= \frac{\prod_{i=1}^n \prod_{j=1}^{n+1} \Gamma_{\mathbb{R}}(s + \nu_i + \mu_j) \Gamma_{\mathbb{R}}(2s - \nu_i + \mu_j)}{\prod_{1 \leq i < j \leq n+1} \Gamma_{\mathbb{R}}(2s + \mu_i + \mu_j)}. \end{aligned}$$

REFERENCES

- [1] M. Hashizume, Whittaker functions on semisimple Lie groups, Hiroshima Math. J. **12** (1982), 259–293.
- [2] T. Ishii, Whittaker functions on orthogonal groups of odd degree, submitted.
- [3] T. Ishii, Symplectic orthogonal theta lifts and Whittaker functions, in preparation.
- [4] T. Ishii and E. Stade, New formulas for Whittaker functions on $GL(n, \mathbf{R})$, J. Funct. Anal. **244** (2007), 289–314.
- [5] T. Ishii and E. Stade, Archimedean L -factors on $GL_n \times GL_m$ and $SO_{2n+1} \times GL_m$, in preparation.
- [6] H. Jacquet, Fonctions de Whittaker associées aux groupes de Chevalley, Bull. Soc. Math. France **95** (1967), 243–309.
- [7] J. Shalika, The multiplicity one theorem for $GL(n)$, Annals of Math **100** (1974), 171–193.
- [8] E. Stade, On explicit integral formulas for $GL(n, \mathbf{R})$ -Whittaker functions. Duke Math. J. **60** (1990), no. 2, 313–362.
- [9] N. Wallach, Asymptotic expansions of generalized matrix entries of representations of real reductive groups, Lect. Notes in Math. **1024** (1984), 287–369.

地球・地域環境影響評価と対策技術の構築

小島 紀徳^{*1}, 菅沼 秀樹^{*2}

Evaluation and Establishment of Countermeasure Technologies against Global and Local Environmental Issues

Toshinori KOJIMA^{*1}, Hideki SUGANUMA^{*2}

1. 研究の背景・目的

本研究は、標記のような広範な環境評価・対策を目的とし、たとえば地域環境に関しては土壤汚染対策や汚染物質の分解、光触媒の利用など様々な個別研究を行ったが詳細は省略し、本稿では乾燥地(沙漠)を活用した温暖化対策としての大規模植林に関する成果のみを述べる。

森林破壊や荒廃地・乾燥地の増大を防止・修復し森林を創成していくことは、地球温暖化防止に向け化石燃料からの排出抑制と共に非常に重要な課題である。本研究は、食料生産さえ困難な乾燥地(=農耕に適さない土地)での植林によるCO₂吸収・固定を目指すものである。本研究の目的は、乾燥地に植林する技術の開発・汎用化を行い、開発した技術による炭素固定能の評価、適用ポテンシャルの推定をすることである。

2. 研究の方法と実施

これまでに乾燥地におけるさまざまな植林木育成の障害条件をさまざまな技術を試行錯誤しながら適用し^[1]、植林木を成長させて大気中のCO₂を固定させている。固定した炭素量は、現地で植林木のサイズと重量の関係式(アロメトリー式)を導いて評価している^[2]。固定した炭素量は、ミクロの視点である現地調査と、マクロの視点である衛星画像による評価の関係を導くことで広域展開させている^[3]。これらの研究結果から西オーストラリア州乾燥地である Sturt Meadows における可能炭素固定量を評価し、炭素クレジット予測を行った。

3. 結果と考察

図1に裸地、植生遷移領域、アカシア林をユーカリ植林地に転換した場合の炭素排出権取引に計上可能な炭素クレジットの予測値を示す。対象地21.7万haの25%を植林地に転用すると仮定した場合、計上可能な総CO₂量は11.8 Mg・CO₂と試算された。この値は2007年の日本の総CO₂排出量の約0.9%に相当する。伐採損失によるマイナスが大きかったため、この分をバイオマスエネ

ルギーに転換するなどの対策が必要と考えられる

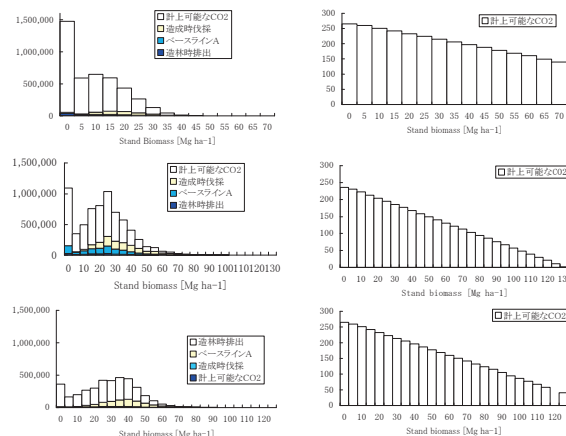


図1 炭素排出権取引に計上可能な炭素クレジットの予測

4. 結論及び今後の課題

食料生産さえ困難な乾燥地でさまざまな技術を応用して植林が可能であることを実証し、それらによる炭素クレジットを試算した。今後は経済効率・エネルギー効率・炭素固定効率の更なる向上を図り実用化を目指していく。

参考文献

- [1] Kojima, T., H. Hamano, Y. Abe, H. Tanouchi, Y. Egashira, M. Saito, J. Law, N. Takahashi and K. Yamada: "Basic data of research project on large-scale afforestation of arid land for carbon fixation near Leonora in Western Australia," *J. Arid Land Studies*, 16(3), 167-174 (2006)
- [2] Shiono, K., H. Suganuma, Y. Abe, H. Tanouchi, H. Utsugi, M. Saito, N. Takahashi, T. Kojima and K. Yamada: "Biomass growth estimation of an afforestation site and natural forests in an arid land of Western Australia," *J. Arid Land Studies*, 15(4), 251-254 (2006)
- [3] 菅沼秀樹, 伊東敏文, 小島 紀徳: "ASTER 人工衛星画像による植生分類と植物現存量の解析," *日本沙漠学会 第20回学術大会 講演要旨集*, 41-42, つくば (2009)

^{*1}: 物質生命理工学科教授(kojima@st.seikei.ac.jp)

^{*2}: 物質生命理工学科助教(suganuma@st.seikei.ac.jp)

省エネルギー超潤滑材料界面摺動予測シミュレータの開発

佐々木 成朗*

Development of simulator for evaluating shear at energy-conserving superlubric material interface

Naruo SASAKI*

1. 研究の背景・目的

近年のナノテクノロジーの発展によって微細加工のバリエーションは驚くほど多岐に渡り、マイクロマシン、ナノマシンの実用化への夢が膨らむが、現実には問題は簡単ではない。その理由はミクロの世界では表面を介して働く微視的な物理結合・化学結合が顕在化して摩擦力が極めて大きくなり、機械が動きにくくなってしまいうからである。こうしてナノテクノロジー産業の要請から、微小領域での摩擦をコントロールする研究、特に超低摩擦・超潤滑研究のニーズが発生する。そこで我々は、本プロジェクトで電子、光学、磁気、機械などあらゆるタイプのデバイス材料として注目を集めている炭素材料の同素体に着目し、六員環ネットワークで形成される界面の原子スケール摩擦・摩耗の実験的、数値的研究を進めている [1-4]。本稿ではグラフェン、フラーレンで形成された炭素ハイブリッド界面 (C_{60} 分子ベアリング系) の超低摩擦特性を調べる数値シミュレータを開発し、その異方性を調べた結果を報告する。

2. シミュレーション結果

開発したシミュレータを用いて C_{60} 分子ベアリング系の超潤滑の異方性を明らかにした (図 1 (a)) [3,4]。図 1(b) は、平均荷重 $\langle F_z \rangle = 0.27$ nN の条件下で、平均水平力 $\langle F_L \rangle$ を上層グラフェンシートの走査角度 θ の関数としてプロットしたものである。ここで $\theta = -30^\circ, 30^\circ, 90^\circ$ は、インターカレート C_{60} 分子と上下層グラフェンシートの六員環の間の整合性の良い結晶軸 $\langle 1010 \rangle$ 方向に対応している。同様に $\theta = 0^\circ, 60^\circ$ も整合性の良い $\langle 1230 \rangle$ 方向である。図 1(b) は、 C_{60} ベアリング系とグラファイト系の両方で、平均水平力 $\langle F_L \rangle$ が 60° 周期で変化する事を示している。

$\langle F_L \rangle$ は、 $\theta = 0^\circ, 60^\circ$ ではほぼゼロの極小値を取り、 $\theta = -30^\circ, 30^\circ, 90^\circ$ で極大値を取る。極めて狭い角度領域 $\theta \sim 30^\circ \pm 0.5^\circ$ を除いて、 $\langle F_L \rangle$ は約 1 pN の一定値を取る。 C_{60} ベアリング系の $\theta = -30^\circ$ でのピークの最大値 6.4 pN は、グラファイト系のピーク値 15 pN の約 40% となってい

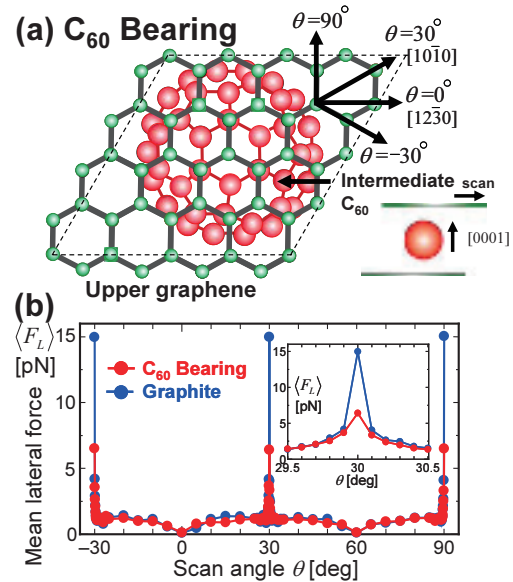


図 1 (a) C_{60} ベアリング系 (b) 摩擦力の走査方向依存性

る。このピーク値の違いは C_{60} /グラフェン界面での C_{60} 分子の回転と弾性接触の効果で説明出来る。 $\theta \sim 30^\circ \pm 0.1^\circ$ の範囲内で、 $\langle F_L \rangle$ は走査角度 θ に極めて敏感で、 C_{60} ベアリング系 (グラファイト系) では、摩擦力のピークが急激に約 60% (30%) まで減少することが分かった。このように整合性の良い領域で C_{60} ベアリング系の超潤滑特性の優位性が示された (図 1(b) の挿入図)。

3. 結論及び今後の課題

C_{60} 分子ベアリング系の超潤滑の異方性を数値シミュレーションで明らかにした。各走査方向に対する力曲線の波形とインターカレート C_{60} 分子のダイナミクスの関係を明らかにする事が次の課題である。

参考文献

- [1] N. Sasaki, N. Itamura, and K. Miura: J. Phys.: Conference Ser. 89, 012001 (2007).
- [2] N. Sasaki, N. Itamura, and K. Miura: Jpn. J. Appl. Phys. 46, L1237 (2007).
- [3] N. Itamura, K. Miura, and N. Sasaki: Jpn. J. of Appl. Phys. 48, 030214 (2009).
- [4] N. Itamura, K. Miura, and N. Sasaki: Jpn. J. of Appl. Phys. 48, 060207 (2009).

*: 物質生命理工学科教授 (naruo@st.seikei.ac.jp)

環境浄化技術の研究開発

里川 重夫^{*1}, 浦崎 浩平^{*2}

Development of Environmental Protection Technologies

Shigeo SATOKAWA^{*1}, Kohei URASAKI^{*2}

1. 研究の背景・目的

資源消費の急速な増大は、大気中への CO₂ 拡散による地球温暖化の促進や石油資源の枯渇の危機を加速させている。温暖化抑制のためには化石資源の効率的な利用を進めることが効果的であるが、地域環境に焦点を当てると、人間活動から排出される汚染物質により環境破壊が進んでいる。本研究では、CO₂ 排出量は少ないが NO_x 排出量が相対的に多いディーゼル車排ガスを対象とした NO_x 分解技術を高度化することを目的としている。

2. 研究の方法と実施

研究は実験を中心に進めており、候補となる触媒の調製と活性評価実験を繰り返している。触媒には担持金属触媒を検討しており、活性金属には銀、銅、鉄などを、担体材料にはアルミナやゼオライト類を検討している。NO_x 分解活性試験は常圧固定層流通式反応装置を製作し、触媒を充填した後、ディーゼル排ガスの特徴である酸素過剰存在下での炭化水素による NO 選択還元反応をモデルガス (NO 1000ppm, C₃H₈ 1000ppm, O₂ 10%, O₃ 0-2400ppm, He バランス) を用いて行っている。生成ガスはガスクロマトグラフやオゾン濃度計を用いて評価している。従来の研究では、モデルガス中に水素を導入すると大幅に低温での反応性が向上することが知られている [1]。これまでの研究成果として銀／アルミナ触媒を用い、排ガス中にオゾンを吹き込むことで、排ガス温度付近の低温域で NO_x が窒素に分解されていることを確認している [2]。

3. 結果と考察

図 1 に銀／アルミナ触媒を用い、オゾン濃度を変化させた時の反応温度と窒素生成量の関係を示す。オゾン非存在下では 475℃まで温度を上げないと窒素の生成は見られず、450℃までは全く活性が無いことを示している。これに対し、1200ppm のオゾンを添加すると 400℃から、2400ppm のオゾンを添加すると 300℃から窒素の生成が確認され、低温活性の向上が確認された。ディーゼル車排ガス温度は通常約 300℃といわれており、この温度

域で NO_x 分解活性が向上することは実用的な面で有用な技術といえる。オゾン自身は大変毒性の高いガスであるが、触媒を通過すると 200℃以下で分解されてしまうことから排ガス中に残存することは無いと考えられる。また、銀／アルミナ触媒以外でもオゾンによる活性向上効果は認められており、銀／アルミナ触媒に限った現象ではないことも見出している。

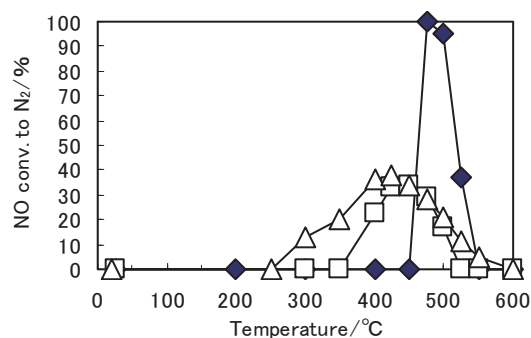


Fig. 1 Effect of ozone addition on N₂ formation over Ag/Al₂O₃; O₃ 0 ppm(◆), 1200 ppm(□), 2400 ppm(△).

4. 結論及び今後の課題

NO_x 分解触媒に関する研究は、上述のように炭化水素による還元を検討してきたが、より実用的な技術である尿素水添加による方法も検討している [3]。これらの研究開発を通して都市環境が改善されることを期待している。

参考文献

- [1] S. Satokawa, J. Shibata, K. Shimizu, A. Satsuma, T. Hattori, T. Kojima, "Promotion effect of hydrogen on lean NO_x reduction by hydrocarbons over Ag/Al₂O₃ catalyst", *Chem. Eng. Sci.*, **62**, 5335-5337 (2007).
- [2] S. Satokawa, M. Oguro, K. Urasaki, T. Kojima "Selective catalytic reduction of NO_x by hydrocarbons enhanced by ozone over Ag/Al₂O₃", 8th International Congress on Catalysis and Automotive Pollution Control, Brussels, Belgium (2009).
- [3] 里川重夫, 奥山裕貴, 浦崎浩平, 小島紀徳, "アンモニアによる NO 選択還元反応へのゼオライト種類の影響", 第 105 回触媒討論会 A 予稿集 (2010) .

^{*1}: 物質生命理工学教授(satokawa@st.seikei.ac.jp)

^{*2}: 物質生命理工学助教(urasaki@st.seikei.ac.jp)

電界を用いた植物成長環境の計測

高橋 勉^{*1}, 鈴木 誠一^{*2}

Measurement of plant growth environment in relation with electric field

Tsutomu TAKAHASHI^{*1} and Seiichi SUZUKI^{*2}

1. 研究の目的

当研究室では直流高電圧によって発生する大気圧アーク放電が土壤中に侵入してプラズマを発生させるための条件, また, プラズマが発生したときの生物に対する影響を検討している。雷の放電が土壤中でどのように伝導されるかという物理的な機構についてはほとんど分かっていない。この研究では, 擬似土壌を用いて土壌中の放電機構を解明し, それによって実際の土壌中で起きる放電現象の特性や生物との関わりを調べる。

2. 方法

本研究では擬似土壌として直径 1[mm]のガラスビーズを用いた。試料に適当な体積比で水を加えることで固体, 固体/空気/水の割合を制御し, 空気含量, バルク導電率を変えて測定を行った。擬似土壌に対して高電圧インパルス発生装置を用いて, 波高 3-4 [kV]のインパルス電圧を印加した。結果はストレージオシロスコープと写真撮影により記録した。

3. 結果

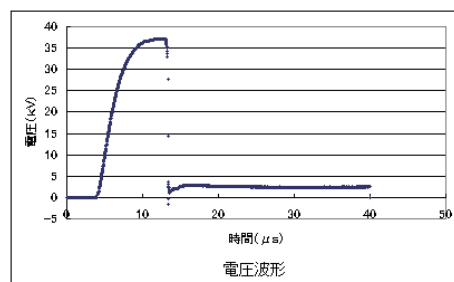
擬似土壌中では図 1 のような放電が観測された。電圧インパルスは放電開始とともにほぼ 0[V]になり, 放電電流が流れ始める。条件の違いにより, 放電が起きない場合, 放電が途中で途切れる場合など, 異なる放電様式が観察された。

4. 考察および今後の課題

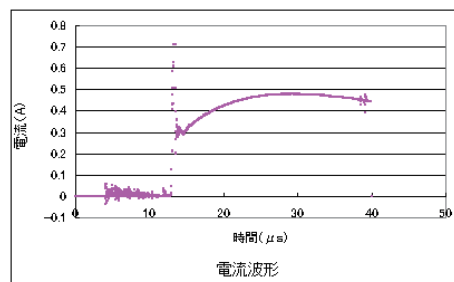
各条件と放電様式を比較した結果, 水を含む土壌のような不均質系においては, 空気のパーコレーションに依存してアーク放電とイオン伝導の 2 つの伝導機構が局所で切り替わり, 放電が土壌中を進行することが分かった。またさらにエネルギー密度が高ければ放電は空気の連続性が内領域にも侵入し得ることが示唆された。今後はさらに大電流による土壌中での放電が生物にどのような影響を与えるかを放電実験によって検討する。また電界自身が植物の生長に与える影響についても検討し, 乾燥地などの緑化に寄与することを目指す。

^{*1}: 物質生命理工学科助手(ben@st.seikei.ac.jp)

^{*2}: 物質生命理工学科准教授(seiichi@st.seikei.ac.jp)



a) 放電の電圧波形



b) 放電の電圧波形



c) 放電のアーキ

図 1 擬似土壌放電における電圧, 電流波形と土壌中のアーク放電の様子。プラズマが空気の連続領域を通り抜けている。

参考文献

- [1] 高橋 勉, 工藤 浩司, 鈴木 誠一「ガラス・ビーズを用いた擬似土壌中での放電」電気学会全国大会(福岡, 2008 Mar.)
- [2] 早川秀太郎, 高橋勉, 鈴木誠一, 「ユーカリ種子根の成長制御」日本沙漠学会 第 20 回学術大会開(筑波, 2009 May)

環境関連物質の光化学的変換反応

坪村 太郎^{*1}

Photochemical conversion of environment related materials

Taro TSUBOMURA^{*1}

1. 研究の背景・目的

本研究においては、遷移金属錯体触媒を用いて有害な有機物質を分解する系を確立することを最終目標としている。私の研究室では遷移金属を含む発光性化合物の研究を行ってきた^{1,2}。特に d 電子を 10 個含む d¹⁰ 金属種 (Pd(0), Pt(0), Cu(1), Ag(I) など) の錯体は、他の金属種の錯体に比べて長寿命の励起状態を有するものが多く^{3,4}、光化学の観点から大変興味深いにもかかわらず、その研究は Ru(II) や Ir(III) などの d⁶ 金属種の錯体に比べてはるかに遅れている。

以前ホスフィン配位子を含む Pd(0) 錯体と有機塩化物が光励起状態で反応し、脱ハロゲン反応が進行することを私共は報告しており、このことをヒントにこのような反応を触媒的に進めることを目的として研究を行った。いくつかのパラジウム錯体について試した結果、トリフェニルホスフィン PPh₃ を含む錯体を用いると、クロロトルエンの脱塩素化反応が光照射下で進行することを見いだした。

2. 実験

クロロトルエン 1mmol をジオキサンに溶かし、カリウムメトキシドなどの塩基 2mmol と錯体 0.02mmol を加え高圧水銀灯によって光照射を行った。水銀灯光はガラスフィルターによって 370nm 以下の光をカットして用いた。GC-MS にて生成物の定性、定量分析を行った。

3. 結果

触媒として [Pd(PPh₃)₄] を用いた場合、3 時間の反応でクロロトルエンの 12% がトルエンに変換されることを見いだした。水素源としてイソプロピルアルコールを添加すると収率は 15% に向上した。現時点ではこれが最高値であり、触媒の物質質量に対して何倍の生成物を得たかの指標であるターンオーバー数は 7 程度に過ぎないため、触媒の改良を行うべく努力を続けている。

ホスフィンを含む Pd(0) 錯体は酸素の存在下ではあまり安定でないことが問題点として考えられたため、ホス

フィン配位子の代替として現在注目されている N-複素環カルベン配位子を用いる研究も開始したところである。最近 N-複素環カルベン配位子とホスフィン配位子を含む錯体の合成を行い、1,3-bis(2,6-diisopropylphenyl)imidazol-2-ylidene と tri(o-tolyl)-phosphine が 1 分子ずつ配位したパラジウム錯体の単離と構造決定に成功した。この錯体は溶液中でも比較的長寿命の光励起状態を有することを確認したため、今後この錯体と関連錯体の触媒活性を検討する予定である。

表 1 クロロトルエンからトルエン生成の収率

触媒	塩基	反応時間	トルエン収率
[Pd(PPh ₃) ₄]	KOMe	3	8
[Pd(PPh ₃) ₄]	KO ^t Bu	3	12
[Pd(PPh ₃) ₄]	KO ^t Bu	6	13
[Pd(PPh ₃) ₄]	KO ^t Bu	3	15 ^a

4. 結論及び今後の課題

現在有害物質の分解については酸化チタンなど不均一系触媒を用いる研究が主流であるが、錯体触媒を用いる系でも安定な錯体の利用が可能であれば実用化への展望が開けると考えている。一般に選択性に優れると言われる不均一系触媒反応のメリットを活かした開発を目指している。

参考文献

- [1] T. Tsukuda, M. Kawase, A. Dairiki, K. Matsumoto and T. Tsubomura, *Chem. Commun.*, 46, 1905-1907 (2010).
- [2] K. Matsumoto, N. Matsumoto, A. Ishii, T. Tsukuda, M. Hasegawa and T. Tsubomura, *Dalton Trans.*, **2009**, 6795-6801.
- [3] K. Matsumoto, T. Shindo, N. Mukasa, T. Tsukuda and T. Tsubomura, *Inorg. Chem.*, **49**, 805-814 (2010).
- [4] 坪村太郎, 佃俊明, 松本健司, *Bull. Jpn. Soc. Coord. Chem.* **52**, 29-42 (2008).

^{*1} : 物質生命理工学科教授(tsubomura@st.seikei.ac.jp)

生命に学ぶ反応の効率化と生命分子の大量供給

戸谷 希一郎^{*1}

Practical Supply of Biomolecules Mediated by Biomimetic Reaction Acceleration

Kiichiro TOTANI^{*1}

1. 研究の背景・目的

糖鎖は数種類の単糖が鎖状に連なった高分子であり、生体機能を調節する重要な生命分子鎖である¹⁾。これらは高度に官能基化されており、機能性材料や疾患治療薬のシーズとして有望である。我々は糖鎖の大量供給法の開発と、これを支える次世代の要素技術として生体内反応を手本とした新しい反応制御法や活性化法の創出に取り組んでいる。また未利用糖鎖資源の有効利用についても検討を行っており、糖鎖に関する物質生産と利用を総合的に取り扱った研究を展開している。

2. 糖鎖の大量合成法の開発

一般的に糖鎖合成は保護基や活性化基を最適化した単糖ユニットの合成に多くの時間を費やす²⁾。一方、生体内糖鎖はわずか数種類の単糖で構成されている。そこで本研究では、*N*-結合型糖タンパク質糖鎖($\text{Glc}_3\text{Man}_9\text{GlcNAc}_2$) (図1)の合成をモデルとして、各

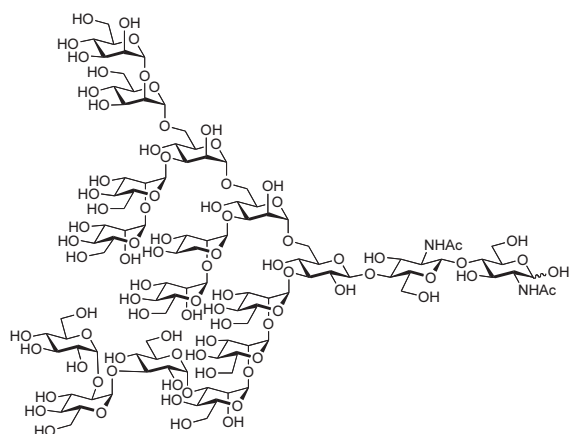


Fig 1. Structure of $\text{Glc}_3\text{Man}_9\text{GlcNAc}_2$

単糖をそれぞれ1種類の巧みにデザインした共通単糖ユニットから合成することで、大量供給に見合う合成ルートの確立を検討した。これまでにユニバーサルに脱保護可能な共通グルコースユニットと共通マンノースユニットをキログラムスケールで合成した。すべての精製は再

結晶で行い、工業化に適うルートの構築に成功した。これらの単糖ユニットは東京化成工業株式会社から研究試薬として販売が決定した。また上記のユニットを実際の糖鎖合成に展開し、標的糖鎖の部分構造(Glc_3)の構築を達成している。

3. 糖鎖の酵素反応活性化剤としての利用

生体内にはヒアルロン酸やムチンといった糖鎖関連高分子によって形成されるマトリクス構造が存在している³⁾。これらの反応場が酵素反応に与える影響を検討したところ、一部の条件でいくつかの酵素反応を著しく活性化する効果を発見した。これは毒性のない糖鎖を反応活性化試薬として利用できる可能性を示すものである。

4. 未利用糖鎖資源の有効利用

クラゲ類は夏期に大量発生し、漁業や工場操業に被害を与えている。一方、近年、これらは糖タンパク質の一種であるムチンを大量に含むことが判明した⁴⁾。我々はこれを未利用資源と考え活用する方法を模索している。これまでにミズクラゲ由来のムチンを精製し、反応添加剤や光学分離カラムへの応用、水質改善への利用を検討している。

5. 結論及び今後の課題

我々は本プロジェクトにおいて糖鎖の物質供給と利用に関し、エネルギー効率の向上と生体環境の模倣を目標として検討している。これまでに各検討課題の作業仮説を裏付ける基礎的なデータを得ることができた。今後は我々のコンセプトの一般化に向け、適用範囲の拡大と応用例の拡充を目標として研究を継続していきたい。

参考文献

- 1) R. A. Dwek, *Chem Rev.*, 96, 683 (1996)
- 2) J. T. Smoot, A. V. Demchenko *Adv Carbohydr. Chem. Biol.* 2, 161 (2009)
- 3) G. M. Fomovsky, S. Thomopoulos, J. W. Holmes *Cell Tissue Res.* 339, 19 (2010)
- 4) A. Masuda, T. Baba, N. Dohmae, M. Yamamura, H. Wada, K. Ushida *J. Nat. Prod.* 70, 1089 (2007)

^{*1}: 物質生命理工学科准教授(ktotani@st.seikei.ac.jp)

スパッタリングによる金属酸化物薄膜の高速堆積技術と物性評価

馬場 茂^{*1}, 中野 武雄^{*2}

A high-rate sputter deposition technique of metal oxides and the improvement of physical properties

Shigeru BABA^{*1}, Takeo NAKANO^{*2}

1. 研究背景

近年、金属酸化物薄膜あるいはその表面が示す新奇な特性が注目されている。薄膜物性は製造技術に依存するところが多く、我々は効率の良い製造技術と同時に優れた物性の発現を期待している。以下では、マグネシウム(Mg)およびケイ素(Si)の酸化物製膜に関する研究成果を紹介する。

2. MgO 薄膜

酸化マグネシウム(MgO)は、吸着原子の電子準位を介したオージェ過程によって高い収率で二次電子を放出するとされ、プラズマディスプレイ(PD)素子の低消費電力化を目指して多くの研究が進められている。絶縁体表面からの二次電子電流を捕集するには、表面電位を上回る電位をコレクターにかける必要がある。これまでの研究から、この電子捕集開始電圧が MgO 膜の膜厚に比例することが分かってきた。つまりある値以上の電場が印加されると MgO 薄膜中で絶縁破壊が起こり、二次電子電流が基板側から補給されるという機構である。この過程は膜および表面の構造に依存するので、特にスパッタリング製膜の場合、製膜ガス圧によって大きく変わってくることが予想される。そこで、二次電子放出率(SEE Coeff.: γ)の圧力による変化を調べたところ(Fig. 1)、1 Pa 付近で極小になることが分かった。XPS による組成解析ではガス圧が低いほど O 組成が減っているので、低圧側での γ の増加は MgO 結晶中の酸素欠陥の効果として、また高圧力側での増加は表面粗さが影響しているものと推測される。この他に、低圧力で作った膜は高い絶縁耐圧を示すことが分

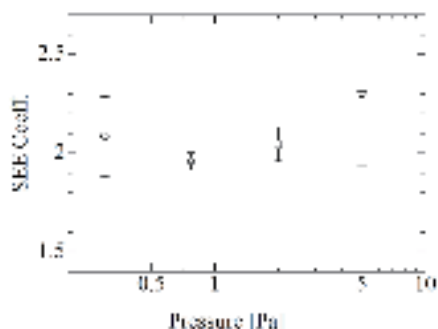


Fig. 1 MgO 膜の二次電子放出率の製膜圧力依存性

かってきた^[1]。これらの特性は、より低い消費電力で PD を AC 駆動するのに適している。

3. SiO_x 薄膜

反応性スパッタを高速で実現するには、大電力の投入と同時に多くの酸素を供給する必要がある。しかしながら、電力を増やすとターゲットの熱的負荷対策が必要となると同時にアーク放電への移行を抑止する必要がある。また、反応性製膜ではターゲット表面の酸化が進行して安定なターゲット環境の維持が困難となる。そこで、電力投入をパルス的に行うことで ON 期間のターゲットを金属モードに保ちながら、OFF 期に膜を酸化させて製膜速度を向上できないか、シミュレーションで検討した。その結果、数 L の容器に数 sccm のガスを導入するとき、0.1~1 秒のパルス電力印加によって、連続スパッタに比べて約 10 倍の高速製膜を実現できることが分かった。さらに酸素ガスも OFF 期にパルス的に導入できれば、さらに高速の製膜が可能となる。

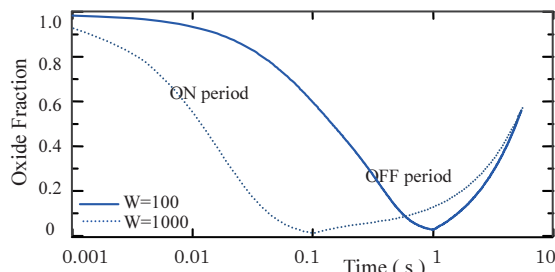


Fig. 2 Si ターゲット表面の酸化率の時間変化

4. パルススパッタ技術の今後の展望

我々は最近、パルススパッタリングにおいて膜物性を大きく制御できる「パルス OFF 期の印加電圧を調整する」技術^[2]を提案した。プラズマの点火から消滅までの動的挙動を考慮して、特に OFF 期のアフターグローによる膜表面の刺激を加減するものである。すでに金属膜形成における有効性を報告しているが、今後は反応性製膜技術に適用することを企画している。

参考文献

- [1] K. Arai, T. Nakano, S. Baba: presented in 18th IVC 2010.
- [2] T. Nakano, C. Murata, S. Baba: *Vacuum* **84**, 1368 (2010).

^{*1}: 物質生命理工学科教授 (baba@st.seikei.ac.jp)

^{*2}: 物質生命理工学科助教 (nakano@st.seikei.ac.jp)

コンクリートリサイクルプロセスの開発

山崎 章弘^{*1}, 酒井 裕香^{*2}

Development of Recycling Processes of Waste Concrete

Akihiro YAMASAKI^{*1}, Yuka SAKAI^{*2}

1. 研究の背景・目的

コンクリートは様々な特性を持ち、広く建築材料として用いられている。コンクリート建造物は数十年が寿命とされており、老朽化したものは更新され、建築廃棄物である廃コンクリートとなる。現在、我が国で排出される廃コンクリートの量は4千万トン以上に達し、今後高度成長期に建設された建物が更新時期を迎えるため、ますます増加するものと予測されている。建設リサイクル法の施行によって、廃コンクリートのリサイクル率は90%以上になっているが、その多くの割合が路盤材への再使用であり、今後有効な再利用法あるいはリサイクルプロセスの開発が望まれている。

廃コンクリートは、骨材成分（細骨材：砂類、粗骨材：小石類）および水和したセメント成分から成る混合物である。このうち、骨材成分は枯渇資源であり、これらを廃コンクリートから分離、再利用する方法は、いくつかのものが開発されており、実用化も近いものと考えられる。一方、水和セメント成分は、水酸化カルシウムおよびカルシウムシリケート化合物等の含カルシウム化合物の混合体であり、アルカリ性を示す。水和セメント成分は、廃材全体の重量の1/3を占めるにもかかわらず、その有効な利用方法が存在しない。このような状況の中で、筆者らは、水和セメント成分を用いたCO₂固定によるリサイクルプロセスについて検討を行ってきた。また、コンクリート建造物を建設する際に、大量の余剰コンクリート（コンクリートスラッジ）が発生しており、重大な問題となっている。このようなコンクリートスラッジの再利用方法についても検討を行った。

2. 廃コンクリートを用いたCO₂固定プロセス

廃コンクリート中の水和セメント成分はアルカリ性のカルシウム化合物であり、二酸化炭素と反応して炭酸塩を生成する。たとえば、一成分であるCa(OH)₂は、



の反応式に従って炭酸カルシウムを生成する。この反応は、温暖化対策としてのCO₂の炭酸塩化による固定反応そのものであり、廃コンクリートを利用したCO₂固定プロセスとなる。筆者らは、酸（硝酸、酢酸など）あるいは高圧CO₂を利用するプロセスの加速化について詳細な検討を行った。それに基づき、CO₂固定化プロセスとしてのエネルギー面、CO₂固定量の面からの評価を行った。また、同じく温暖化ガスであるフロン類の熱分解プロセスへの廃コンクリートの適用についても検討を行った。

3. コンクリートスラッジによるCO₂固定およびリン回収材の開発

コンクリートスラッジは、水和が不十分なセメント成分と骨材成分の混合物であり、水とのスラリー状で排出される廃棄物である。このコンクリートスラッジに水を加えることで、カルシウム分をカルシウムイオンCa²⁺の形で抽出した後、抽出溶液に対してCO₂を含む排ガスを導入することで、前述の炭酸化反応を起こさせ、二酸化炭素固定を行うプロセスを提唱、構築した。当該プロセスの実証のため、東京大学、日本コンクリート(株)と共同で、容量1m³スケールベンチプラントを制作し、実際にCO₂固定プロセスの検証を行った（NEDO補助金補助事業）。さらに、Ca₂₊抽出後も残渣が比較的多くのカルシウム分を含み、かつ大比表面積の材料となることに着目し、排水中のリン回収剤としての利用可能性について検討した。その結果、既存の材料に比べて高速なリン回収速度をもつことを示すことができた。さらに、リンとの反応によってヒドロキシアパタイト（HAP）がスラッジの粒子表面に形成されることを確認し、優れた重金属およびフッ化物イオン吸着能を持つことを明らかにした。

4. まとめと今後の展望

廃コンクリートのリサイクルに関しては、さらなるCO₂固定の高効率化を目指す。また、コンクリートスラッジ利用に関しては、スケールアップしたプラントによる実証実験に取りかかる予定である。

^{*1}: 物質生命理工学科教授(akihiro@st.seikei.ac.jp)

^{*2}: 物質生命理工学科研究員(y_sakai@st.seikei.ac.jp)

資源利用の最適化

池上 敦子^{*1}

Optimization of Resource Utilization

Atsuko IKEGAMI^{*1}

1. 研究の目的

時間、人、車両、コンピュータ、電力、スペース、データ等、利用できる量に制約のある資源を有効に利用できるように方策を数理最適化の視点で議論する。特に、解の評価が難しい(尺度が複数存在するような)問題に対して、解空間を把握できるような方法を提案することを目的とする。

2. 研究計画の概要

2.1 コスト最小化を達成する経路探索

解空間をネットワーク構造で表現し、鉄道網や道路網だけでなく、意味的なネットワークにおいても動的計画法を適用して最適経路や複数最良経路を求めることにより、解空間把握に利用する。

2.2 人的資源利用の最適化

医療、介護において、限られた人材でサービスの質を守るための勤務表作成を対象にし、支援システムの開発を行いながら、解空間把握のためのツールを提案する。

2.3 データ復元

復元不可能と思われる圧縮データを有効利用するために、復元方法を検討する。

3. 研究課題の進捗状況

3.1 最適経路探索

鉄道運賃計算に利用する最適経路探索において、意味的なネットワークを構築して利用することで大幅な計算時間削減に成功した[1]。また、ネットワーク上、指定経由点を含む最短経路(閉路を含まないもの)を求める方法を提案した。そして、距離に対する上下制限付き経路列挙や最適経路探索、さらにはK最短経路アルゴリズムを複数構築し、比較検討を行った。

3.2 解空間ネットワークの構築

ナース・スケジューリング[2]を対象に、解の評価尺度を意識したモデルや新しいアルゴリズムを構築し、計算実験等を行った。最適解が知られていなかった問題に対しても最適解を得ることに成功した。また、加工工程[3]やナース・スケジューリングの解空間ネットワークを構築し、K最短経路を求めて組み合わせることにより、

新たなネットワークを構築した。

3.3 web 版の訪問介護勤務表作成支援システムの構築

Microsoft Excel をベースとしたプロトタイプシステムを構築し、評価実験や現場調査を繰り返すことにより、このシステムに基づくweb版の勤務表作成支援システムを構築した[4]。

3.4 データ復元アルゴリズムの構築

厳密解法に加え、局所探索に基づく解法の適用を検討し、計算実験を行った[5]。

4. 今後の展望

経由点付き最短経路探索の考え方は、短い切り口での領域分割等にも応用できる。また、多数の良解を一瞬で把握できるようなK最短経路ネットワーク(図1参照)は、「解空間把握」や「解の複数表示」「解の修正」といった目的のための必須ツールになりうると考える。



図1 JR「東京-吉祥寺」最短1000経路ネットワーク

参考文献

- [1] 山口拓真, 森田隼史, 池上敦子, 菊地丞, 中山利宏「利用鉄道会社数の制約を考慮した最安運賃経路探索」電子情報通信学会論文誌 D, Vol. J93-D, pp. 426-434, 2010
- [2] 池上敦子「ナース・スケジューリング」オペレーションズ・リサーチ, Vol. 54, pp. 401-407, 2009
- [3] 笠原和夫, 石森茂, 池上敦子「最短経路問題を利用した加工工程支援システムの開発(第一報)ー最短加工時間を与える加工順序の解析ー」精密工学会(掲載待ち)
- [4] 足立幸子, 村野真吾, 池上敦子, 宇野毅明「訪問介護勤務表作成を支援する Web-based システムの構築」スケジューリング・シンポジウム, pp. 157-161, 2009
- [5] 田辺亮平, 山田篤彦, 池上敦子, 上野玄太, 土谷隆「衛星観測プラズマデータ復元問題に対する数理計画アプローチ」スケジューリング・シンポジウム, pp. 297-300, 2009

^{*1}: 情報科学科教授(atsuko@st.seikei.ac.jp)

調査および実験データの統計解析法の開発

岩崎 学^{*1}

Development of Statistical Data Analysis Methods for Experiments and Observational Studies

Manabu IWASAKI^{*1}

1. 支援事業における役割

本支援事業に対し、私は自らの専門である統計学ならびに統計的データ解析法の立場から、各種データの統計解析法の開発およびその統計的な性能評価という方法的側面、ならびに様々な研究分野における実際のデータ解析の実践という応用的側面の両方で関わっている。本稿では、これまでの研究成果を述べると共に今後の研究計画について簡単に触れる。

2. これまでの研究成果

2008年から2010年までに公開した査読つき学術論文および著書を踏まえながらこの期間における研究活動を概観する。

第一には、ここ10年程度興味をもって研究してきた成果を、最終的に本支援事業の援助を受け[10]として刊行したことが挙げられる。本書は、一般の統計の書物ではあまり扱われていないカウントデータに的を絞ったもので、特にゼロ過剰なモデルを扱った点が他書にない特徴である。本支援事業における種々のデータ解析で用いられることを期待する。その他の方法的な成果としては[1], [4], [5]がある。これらは、主として実際のデータ解析では不可避な不完全データの解析法を扱っていて、論文ではテスト理論への応用法について主として述べているが、一般的な方法論であることから各分野への応用も可能である。

応用の論文としては、臨床化学関係([2], [3])、新薬開発([6], [7], [8])、放射線物理([9])があり、いずれも統計いえとして研究に関わったものである。

3. 今後の研究計画

現在最も力を入れているテーマは統計的因果推論である。特に観察研究における因果推論では、処置への個体の割付けがランダムに行えないことから、処置効果の判定に種々のバイアスの混在が不可避となる。バイアスを除去するための方法論が最近急速に進みつつあることから、それらを踏まえた統計解析法を提案していきたいと考えている。

参考文献 (2008 - 2010)

- [1] Kawata, Y. and Iwasaki, M. (2008) Assessment of non-normality in pretest-posttest research under screening of the pretest score. *Journal of the Japanese Society of Computational Statistics*, 21, 31-44.
- [2] 平野哲夫・岩崎 学 (2008) Excelによる応答曲面法(RSM)の解析(II). 臨床化学, 37, 308-316.
- [3] 平野哲夫・岩崎 学 (2008) 乳酸デヒドロゲナーゼ(LD)活性測定の至適条件の Response Surface Methodology (RSM) の応用の試み. 臨床化学, 37, 292-299.
- [4] 岩崎 学・大道寺香澄 (2009) ゼロ過剰な確率モデルとそのテスト得点の解析への応用. 行動計量学, 36, 25-34.
- [5] 河田裕一・岩崎 学 (2009) 不完全データに基づく平均への回帰を考慮したテストデータの解析. 日本テスト学会誌, 5, 41-51.
- [6] Kawamori, R., Iwasaki, M., et al. (2009) Efficacy and safety of insulin glulisine in Japanese patients with type 1 diabetes mellitus. *Diabetes, Obesity and Metabolism*, 11, 891-899.
- [7] Kawamori, R., Iwasaki, M., et al. (2009) Effects of insulin glulisine as mono- or add-on therapy in patients with type 2 diabetes mellitus. *Diabetes, Obesity and Metabolism*, 11, 900-909.
- [8] Shigematsu, T., Iwasaki, M., et al. (2009) Long-term Cinacalcet HCl treatment improved bone metabolism in Japanese hemodialysis patients with secondary hyperparathyroidism. *American Journal of Nephrology*, 29, 230-236.
- [9] Furukawa, Y., Iwasaki, M. and Tanaka, A. (2010) A practical method for determining minimum detectable values in pulse-counting measurements. *Analytical Sciences*, 26, 259-265.
- [10] 岩崎 学 (2010) カウントデータの統計解析. 朝倉書店.

^{*1}: 情報科学科教授 (iwasaki@st.seikei.ac.jp)

室内環境制御のためのリアルタイム意思決定プログラムの実装

岡本 秀輔^{*1}

Implementation of a real-time decision making program to control indoor conditions

Shusuke OKAMOTO^{*1}

1. 研究概要

大学における研究室内環境や教室環境は、コンピュータネットワーク、組み込み機器、空調、プロジェクトなどによって便利になってきている。しかし、それらは統合されていないために室内全体や大学全体でこれらを効率よく制御できる状態にはなっていない。統合されていないこれら環境資源に対し、運用指針を与えるソフトウェアツールの開発が研究対象である。特に、ユビキタスマバイル環境を意識した、ユーザ参加型の省エネルギーと快適環境作りのためのプログラミングおよびソフトウェアツールのあり方について研究を進めてきた。

2. 研究の位置づけ

戦略的研究基盤形成支援事業に参加する他の研究員によって進められる、携帯電話、スマートフォンによるユビキタス環境と各種センサーと次世代ネットワークによるセンサーネットワーク環境を想定し、その中で集められた情報を制御情報としてリアルタイムに処理するシステムを本研究の対象とした。また、リアルタイム意思決定プログラムにおいて、得られた情報から最良の答えを導き出すには、ある種の論理的な保証が必要となる。これには組合わせ最適化を専門とする他研究員と共同して開発を進め、最適値とのずれの範囲とリアルタイム性を保証するデッドラインとのトレードオフについて検討を始めている。

3. 研究成果

本支援事業における現状までの研究成果は以下の2つに分けられる。

・管理データの動的再割り当てシステム

ユビキタス環境とセンサーネットワーク環境から得られる情報の処理をMOG(マルチユーザ・オンライン・ゲーム)の処理に対応させて、システム作りを行った。つまり、モバイルユーザからの情報がゲームに参加するユーザアバタの情報であり、センサーから情報がNPC(ノン・プレイヤー・キャラクター)の情報への対応付けである。ユーザ(またはユーザアバタ)は時刻の変化により総数

が変化し、また、ホットスポットとなるユーザが集中する場所も変化する。そこで、本システムは、省エネを考慮して、マルチサーバでこれらの情報を処理し、動的に管理データの再割り当てを行うことで、不要なサーバを休止できることをめざした。本システムの成果は、査読付き国際会議論文として発表し、英語論文誌への採録が決定している。

・ロボット制御簡易プログラミング環境

別々に設置された室内環境装置を統合化するには、各装置の状態を考慮したプログラミングモデルが必要である。さらに、そのプログラミングにおいては運用方針の変更によって簡易に設定が変えられることが望ましい。そこで、状態遷移図を用いたロボット制御プログラミング環境を構築し、その評価を行った。本システムの成果は、査読付き国際会議論文として発表を行っている。

4. 今後の見通し

管理データの動的な再割り当てにおいて、割り当て変更ごとの最適性についての検討を進めている。現状では、全体のモデル化を終えて、サンプルデータによる評価を行っている。また、マルチサーバによる省エネ化については、クラウドコンピューティング環境の使用を想定し、エネルギー消費と運用コストの関係を明らかにする予定である。

参考文献

- [1] M. Kohana, S. Okamoto, M. Kamada, and T. Yonekura : "Evaluation of a Dynamic Data Allocation Method for Web-based multi-server MORPG System," IEICE Transactions, Vol.E93-D, No.12, (2010.12 掲載予定)
- [2] M. kohana, S. Okamoto, M. Kamada, T. Yonekura : "Dynamic Data Allocation Scheme for Multi-Server Web-based MORPG System," 2010 IEEE 24th International Conference on AINA Workshops, pp.449 - 454, (2010.4)
- [3] Y. Takehara, S. Okamoto, M. Kamada, T. Yonekura : "Customizability of A Robot Control Programming Environment," The 10th International Conference on Computers, Communications and Systems, pp.67-72, (2009.11)

^{*1} : 情報科学科准教授(okam@st.seikei.ac.jp)

自律分散型センサグリッドにおけるデータ収集基盤方式

小口 喜美夫^{*1}

Environmental Information Transfer System Using Distributed Autonomous Sensor Grid

Kimio OGUCHI^{*1}

1. 研究の背景・目的

本課題は、様々なセンサ群と情報通信技術を利用した人と環境に優しい空間づくりを目的とし、特に、データ収集用ネットワーク構成法の研究を目的としている。

技術課題には、ネットワークアーキテクチャ、ネットワーク規模とネットワーク構成ノード（デバイス）の関係、トラヒックマネジメント、QoS（伝送品質、障害復旧等）等があり、本期間中には、①フォトリック（光）バックボーンの基本構成、②センサネットワーク構成、③センサとデータ転送法、について検討を行い、以下の結果が得られた。

2. 結果

一般的なネットワーク構成には、wireless と wired があるが、室内の壁や他の電磁波発生機器からの影響を考慮すると wireless には課題がより多く存在するため高速のバックボーンネットワークには wired が望ましい。また、その際の使用媒体としてメタリックと光があるが、利用可能帯域・将来のサービス拡張性等から光が望ましい。本検討では、フォトリックバックボーンの基本構成として、小規模なビル/家に適用するためのネットワークトポロジ（バス/スター/リング）を、使用媒体の伝送損失、ネットワーク規模、使用波長数から比較検討した。現在利用可能なデバイス特性等から光パス損失特性を計算し実現の可能性を明らかとした。その結果、スターは総ケーブル長が最も長いものの想定するネットワーク規模では優位に構成が可能である。バス・リングは総ケーブル長が比較的短い、使用光デバイスの損失特性により構成可能ネットワーク規模に制限がある。今後一部の光デバイスの試作により信頼性の高いリング構成の実現が可能かどうかの検討を行い、最終的なネットワーク構成を決定する予定である[1]。

人と環境に優しい空間づくりのために取得が必要と考えられる環境情報には、室内の温度・湿度・風速、また、外部の気温・天候・日照などがある。一般的には、それぞれの対象情報に関連するセンサを用いれば十分であるが、今回テストベッドとして検討した本学大学図書館の

ような構造の場合、大規模な開放型の空間（アトリウム）があり、この空間には上述のセンサ設置が困難となる。このため、新たに遠赤外カメラ（以下、FIR カメラ）による温度取得の可能性を検討した。実験により FIR カメラの視野をアトリウムの壁面にセットすることにより、高さ方向の温度分布（実験例では 3.9℃差）を取得でき、多数の個別センサを設置しなくとも環境情報が取得可能なことが判明した[2]。この結果から、今後通常のセンサ群と FIR カメラを含むハイブリッド型のセンサネットワーク構成の検討を進める。

上記①とは異なり、既存の建物内に新規のネットワーク（ケーブル）を構築することが困難な場合がある。そのため電力線を用いた通信（コンセント間）の可能性を実験的に検討した。様々な実験系構成（複数のメーカーの PLC[Power Line Communication]モデム、最大 50m までの電力線長、途中でブレーカの有無、UDP/TCP）によりデータ転送スループットを測定した結果、構成によってはスループットが低下するが、最低約 50Mbit/s を確保可能なことが判明した[2]。ただし、本学大学図書館内での実験により、電力線の配置により通信困難なコンセントが存在することも判明した。今後の具体的なテストベッド構築時の課題とする。

3. 結論及び今後の課題

これらの成果と今後検討予定の課題の成果をベースとして具体的なテストベッド構築を検討する。

参考文献

- [1] K. Oguchi, T. Sakai, D. Hanawa, "WDM Passive Networks Design for Small Wavelength-count in Local Area/Home Applications", Proc. of 33rd Int. Conf. on Telecomm. and Signal Processing, pp.363-366, 2010.
- [2] D. Hanawa, H. Yamamoto, T. Koide, T. Shoji, K. Suzuki, S. Yamakawa, I. Watanabe, K. Oguchi, "Sensor Network for Creating Comfortable Environment in University Libraries", J. of the Chinese Institute of Engineers, Vol.33, No.5, pp.645-652, 2010.

^{*1} : 情報科学科教授(oguchi@st.seikei.ac.jp)

通信を考慮したタスクスケジューリング問題の高速解法の研究

甲斐 宗徳^{*1}

Development of High Speed Solving Methods for Task Scheduling Problem Taking Account of Communication Overhead

Munenori KAI^{* 1}

1. 研究の背景・目的

タスクスケジューリング問題の最適解を求めるためには、分枝限定法を用いた全探索の必要があるが、この問題は強 NP 困難な組合せ最適化問題であることが知られている[1]。このタスクスケジューリング問題を分散メモリ型マルチプロセッサモデルにおける並列処理に適用すると、タスクの依存関係に応じてプロセッサ間に通信時間が発生する。通信時間を考慮したタスクスケジューリング問題では、通信の組合せが強 NP 困難な問題をさらに複雑化してしまうことになる。

本稿では、タスクグラフを元のままで取り扱う全探索解法では求解に膨大な時間がかかるため、部分的にタスクグラフをグループ化してグループの内側と外側の並列性の両方を独立に扱うことで組合せ数を大幅に減少させて探索時間を縮小するための方法と、通信を考慮した下限値の導出法の2つのアルゴリズムを提案し、その評価結果について報告する。

2. 通信を考慮した下限値

タスクスケジューリングでの枝切り操作では、任意のタスクから出口タスクまでの最短距離（下限値）を使用する。従来下限値は各タスクの処理時間だけを元に算出されており、タスク間の通信は考慮されていなかった。通信を考慮した精度の高い下限値を求められれば、これを枝切りに使用することでスケジューリングの性能向上が期待できる。そこで通信を考慮したタスクの下限値の算出方法を考案した。ただし先行・後続タスクのプロセッサへの割当てにおいてすべての通信の生じ方を考慮することは、それ自体が組合せ最適化問題になってしまう。そこで下限値計算が複雑化しないようなヒューリスティック条件を設定して計算を簡略化し、従来に比べて精度の高い下限値を単時間で算出可能とした[2]。

図1は新しい下限値を利用してサンプルタスクグラフのスケジューリングにかかる探索時間の削減率である。全探索時間の削減率はタスクグラフに依存するが、通信を考慮した下限値を使用して全体平均で全探索時間が22.15%削減された。

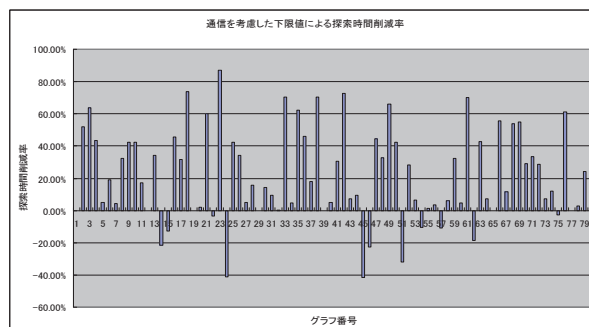


図1 探索時間評価の結果

3. 自動マクロ化アルゴリズム

新たにマクロタスク成立判定アルゴリズムを提案し、タスクグラフ中のマクロ化可能なタスク群を見つけることができるようになった。アルゴリズムの詳細は文献[2]を参照されたい。ランダムに生成したタスクグラフに対し、自動マクロタスク化アルゴリズムの適用前と適用後で探索時間の比較を行った結果を表1に示す。

表1 アルゴリズム適用による探索時間の削減

タスク グラフ	自動マクロ タスク化	探索時間 (sec.)	マクロタスク化に 要した時間(sec.)
例1	適用前	18.860	
	適用後	0.890	0.070
例2	適用前	268.640	
	適用後	21.540	0.010
例3	適用前	1425.800	
	適用後	300.010	0.040

4. 今後の課題

本研究は実応用に向けたタスクスケジューラの開発である。実用的に許される範囲で下限値の精度を上げていく必要があるとともに、自動マクロ化の条件についても様々なタスクグラフ形状に適用可能なように洗練していく必要がある。

参考文献

- [1] 笠原博徳, “並列処理技術”, コロナ社, 1991
- [2] 宇都宮 雅彦, 塩田 隆二, 甲斐 宗徳「通信を考慮したタスクスケジューリング問題の探索解法のための高速化手法」FIT2010 第9回情報科学技術フォーラム, 第1分冊, pp. 233-237, 2010. 9

^{*1}: 情報科学科教授(kai@st.seikei.ac.jp)

状況に応じて自律的に最適形態に変化するネットワーク化技術の研究状況

栗林 伸一^{*1}, 長名 保範^{*2}

Research report on network technology of changing to optimal configuration according to network conditions autonomously

Shin-ichi KURIBAYASHI^{*1}, Yasunori OSANA^{*2}

1. 研究の背景・目的

ユビキタスネットワークやクラウドコンピューティングなど、様々なサービスをネットワーク経由で提供する形態が今後ますます広がってくるものと考えられる。その結果、サーバとネットワークの電力使用量自体も大幅に増加することが懸念されている。本研究は、サーバおよびネットワークの状況に応じて最適形態に変化することにより、電力使用量の削減を図ることを目的としている。具体的には、サーバとネットワークの連携によりICT総体としての電力使用量を削減する技術、サーバ代理応答（プロキシ）の範囲を拡大させサーバ電力使用量を削減する技術、を中心に検討を進めている。本報告は、現時点までの検討状況と今後の進め方をまとめたものである。

2. ICT総体としての電力使用量削減技術

(1) サーバおよびネットワークが個々に省エネ対策を実施するのではなく、両者が連携することによりICT総体としての電力使用量の削減を図ることが可能である。現時点までに、ICT総体としての電力使用量を削減するためにサーバ側とネットワーク側で収集しやりとりすべき情報とそれを交換するための信号シーケンスを明らかにした（図1）。また、ネットワーク機器の管理データとして新たに電力使用量を追加し、それをもとにネットワーク全体の電力使用量を収集する方式を明らかにした。さらに、測定した交流トラフィック量と定期的に調査するパケット転送経路情報をもとにネットワーク全体の電力使用量を各利用企業に簡易に按分する方式を明らかにした。詳細は文献[1]を参照のこと。

今後は、利用可能な総電力量に制約があることも考慮し、エンドシステムとネットワークで連携してICT総体の電力使用量および発電量を削減する方式を検討していく予定である。

(2) スリープ状態にある機器数およびスリープ継続時間を増加させることにより電力使用量を削減することが可能である。そのため、サーバおよびネットワーク機器を可能な限り集約するための指針を明らかにした。今後、それを踏まえた集約アルゴリズムを提案し、その有効性を明らかにしていく予定である。

3. サーバ省エネのための代理応答（プロキシ）範囲拡大技術システム構築

プロキシ機能の設置箇所ならびに代理応答の対象となるプロトコル種別を拡大させることにより、サーバをスリープ状態にする時間を長くしサーバのトータル電量使用量の削減を目指す。現時点までに、簡易評価を行い、従来よりも最大で30%~50%程度サーバのスリープ時間を長くできる可能性を確認している（図2）。詳細は文献[2]を参照のこと。現在、提案方式を実現するための高機能NICの設計・実装を進めている（図3）。評価に必要な機能の実装を全て完了した段階で提案方式の実現性と

有効性を明らかにしていく予定である。

参考文献

- [1] Kenichi HATAKEYAMA, Yasunori OSANA and Shin-ichi KURIBAYASHI, "Reducing total energy consumption with collaboration between network and end systems", 国際会議NBIS2009, (2009.8)
- [2] 長名, 栗林: "代理応答・処理の範囲拡大によるサーバ電力使用量削減方式の提案", 電子情報通信学会ICM研究会, ICM2009-45 (2010.3)

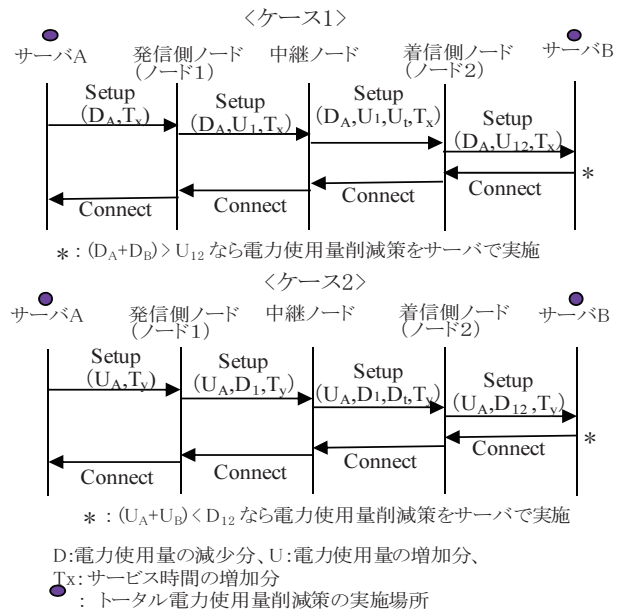


図1. サーバとネットワークで連携して電力使用量を削減するために信号シーケンス例

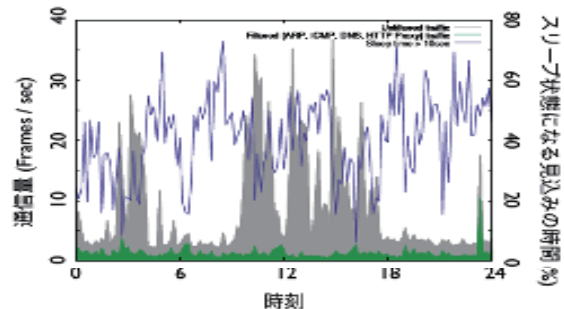


図2. 代理応答するプロトコル範囲とスリープ状態になる見込み時間の関係

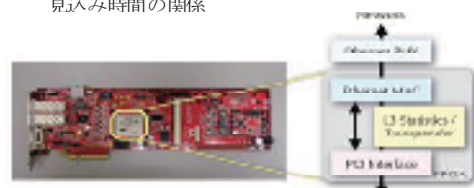


図3. FPGAベースのNIC評価ボード

^{*1}: 情報科学科教授 (kuribayashi@st.seikei.ac.jp)

^{*2}: 情報科学科助教 (osana@st.seikei.ac.jp)

現行デジタル放送規格と準互換性を持つ動画像符号化方式

杉山 賢二^{*1}, 相良 直哉^{*2}

Video Coding Method with Semi-Compatibility for the Digital Broadcast Standard

Kenji SUGIYAMA^{*1}, Naoya SAGARA^{*2}

1. 研究の背景・目的

地上波アナログ放送の終了にみられるように映像機器の技術革新は著しい。しかし、システム更新や併設は装置廃棄や消費電力の点で環境上望ましくない。そこで、デジタル放送等でのシステム変更による損失を軽減するため、現行の標準受像での画質劣化を最小限に抑えながら、新受像では大幅に画質改善できる準互換システムを提案する。従来機器も継続して使用でき、新機器に交換すれば画質改善された映像を得ることができる。

2. 符号化効率改善技術

互換性を保ちながら完全規格準拠から若干逸脱し、より大きな効率・画質改善を得るとのコンセプトで、以下の手法を提案・検討した。その結果、1), 2), 4) 手法の組み合わせで大きな改善が得られた。

- 1) イントラピクチャへの画像間処理導入：新受信での改善が大きい、標準受像での劣化も比較的大きい[1-4]。
- 2) インターピクチャへの量子化誤差適応加算：新受信での改善は少ないが、標準受像でも改善される[5, 6]。
- 3) 適応プリ・ポストフィルタによる主観画質改善：適応制御方法に問題があり、再検討を要する[7]。
- 4) 原画像参照によるエンコーダ符号化効率改善：画像タイプによってはかなり改善される[8-10]。

3. 新動画像フォーマット

符号化用画像フォーマットとして、原色をフレーム順次で持つシーケンシャルカラー方式の提案を行なった[11]。これは、符号化効率改善のようにビットストリーム準拠の改善ではないが、中間機器の変更によりディスプレイの交換無しで実効解像度を改善できるものである。

4. むすび

現行方式との互換性を考慮しながら、効率や再生画質を改善可能な符号化手法を提案・検討した。今後は、シーケンシャルカラー方式の符号化や、ディスプレイ内での通常画像への変換方法について重点的に研究を進める。

参考文献

- [1] 有住正央・相良直哉・杉山賢二：「I ピクチャを効率改善した符号化の標準方式互換性」画像符号化シンポジウム(PCSJ2008), P2-12, pp. 31-32, 2008. 11
- [2] M. Arizumi, N. Sagara, K. Sugiyama: "Improvement of I-Picture Coding Using Inter-Picture Processing", Proc. of International Workshop on Advanced Image Technology (IWAIT2009), P5-11, 2009.1
- [3] K. Sugiyama, N. Sagara, M. Arizumi: "Improvement of I-Picture Coding Using Inter-Picture Processing", Proc. of Picture Coding Symposium (PCS2009), 19 (PS-1), 2009.5
- [4] 杉山賢二・相良直哉・有住正央：「画像間処理でI ピクチャ効率を改善した動画像符号化」電子情報通信学会論文誌, Vol. J92-D, No. 10, pp. 1702-1704, 2009. 10
- [5] M. Arizumi, N. Sagara, K. Sugiyama: "Improvement of B-Picture Coding Using Inter-Picture Processing", Proc. of International Workshop on Advanced Image Technology (IWAIT2010), P5-11, 2010.1
- [6] K. Sugiyama, N. Sagara, M. Arizumi: "Coding Efficiency Improvement Using Inter-Picture Processing of Quantization Error", Proceedings of Picture Coding Symposium (PCS2010), 2010.12 (Accepted)
- [7] 室本大賀・相良直哉・杉山賢二：「符号化前後フィルタの制御によるH. 264の主観画質改善」第3回イメージメディアクウォリティとその応用ワークショップ(JIQA2009), 10, pp. 66-70, 2009. 9
- [8] 室本大賀・相良直哉・杉山賢二：「適応的に原画像を参照画像とするフレーム間予測符号化」画像符号化シンポジウム(PCSJ2009), P5-17, pp. 109-110, 2009. 10
- [9] T. Muromoto, N. Sagara, K. Sugiyama: "Inter-Picture Predictive Coding with The Quantization Error Control of Reference Picture", Proc. of International Workshop on Advanced Image Technology (IWAIT2010), P5-10, 2010.1
- [10] T. Muromoto, N. Sagara, K. Sugiyama: "Video Coding with Original Picture as the Reference Picture", Proceedings of Picture Coding Symposium (PCS2010), 2010.12 (Accepted)
- [11] 杉山賢二：「動画像フォーマットの考察とシーケンシャルカラー方式の提案」電子情報通信学会イメージメディアクウォリティ研究会, IMQ2010-004, pp. 25-30, 2010. 5

^{*1} : 情報科学科教授(sugiyama@st.seikei.ac.jp)

^{*2} : 情報科学科助教(sagara@st.seikei.ac.jp)

低電力大規模分散システムの研究

滝沢 誠^{*1}

Research of low electric power large-scale distributed system

Makoto Takizawa^{*1}

1. はじめに

情報システムは、クラウド・コンピューティング、P2P オーバレイ・ネットワークに代表される大規模分散システムとなり、情報システムの形態が変化してきている。一方、情報システムの評価基準であるスループット、応答時間、帯域、信頼性、可用性といったこれまでの評価基準に加えて、新たに「エコ」の概念が重要となってきた。Google のサーバ・センタに代表されるように、クラウド・コンピューティングのデータ・センタの電力低減のための種々の試みがなされてきている。一方、対等で自律的なプロセス(ピアという)が互いに協調動作を行う完全分散型のシステムとして P2P(peer-to-peer)モデルがある。本研究では、P2P(peer-to-peer)システムを取り上げ、消費電力を低減する分散処理方式を研究することが目的である。

2. 成果

P2P 型分散システムは、複数の対等なプロセス(ピアと呼ぶ)から構成され、中央制御プロセスが存在しない。このため、各ピアは、自分自身で意思決定を行わねばならない。ピアは、Web 等の要求を他のピアに発行する。要求を発行するピアをクライアント・ピア、要求を受けるピアをサーバ・ピアとする。クラウドモデルと異なり、クライアント・サーバの関係は相対的である。

分散システムでの応用は、トランザクション型と通信型の二種に大別できる。トランザクション型応用では、サーバ・ピア内の CPU 資源が種に消費される。例として、Web 応用がある。通信型応用では、主に、サーバの通信資源が消費される。

本研究では、各サーバ・ピア全体の消費電力を実測することにより、消費電力モデルを検討した。トランザクション型モデルでは、処理されるトランザクション数に消費電力が非依存な単純(simple)モデルと依存する多階層(multi-level)モデルを考案した。前者は単一 CPU のパソコンに対応し、後者は多コアの多 CPU のサーバ・コ

ンピュータに対応している。また、通信型モデルでは、消費電力は通信速度に依存することを実験から明らかにし、その関係を明らかにした。また、トランザクション型と通信型の応用に対して、時間制約を保障しながら消費電力を低減できるサーバ・ピアの選択アルゴリズムを開発し、シミュレーションにより評価を行った。この結果、従来からのラウンド・ロビン(RR)方式に対して、消費電力を低減できることを示した。シミュレーションには、本プロジェクトで導入したサーバ Sun Blade を利用した。また、クライアントとの時刻同期のためにタイムサーバを用いた。また、センサー・ノードの低電力化のために、Mica Mote の基礎データを収集している。さらに、P2P ネットワーク内での、各ピア間の信用可能性の定量化、ピア間での不正な情報流の防止方式も研究している。

3. 今後の課題

シミュレーションによる評価結果をもとに、以下の研究を行う予定である。

- サーバ・ピア選択アルゴリズムを改良し、実機での評価を行う。
- 大規模 P2P ネットワークでのサーバ・ピア間の信用可能性を考慮した低電力化アルゴリズムの研究。
- コンピュータに加えて、無線センサー・ノードを含めた大規模分散システムを検討する。

参考文献

1. Aikebaier, and Makoto Takizawa, A Model for Reducing Power Consumption in Peer-to-Peer Systems, *IEEE Systems Journal*, Vol.4, Issue.2, pp.221-229, 2010.5.
2. Tomoya Enokido and Makoto Takizawa, "A Legal Information Flow (LIF) Scheduler Based on Role-based Access Control Model," *International Journal of Computer Standard and Interfaces (CSI)*, Vol.31, No.5, pp.906-912, 2009.9

^{*1} : 情報科学科教授(makoto.takizawa@st.seikei.ac.jp)

会話エージェントを利用した直感的ユーザインタフェースの研究開発

中野 有紀子^{*1}

Developing Intuitive User Interfaces using Conversational Agents

Yukiko NAKANO ^{*1}

1. 研究の背景・目的

情報機器を利用・活用できる人と、そうでない人との間に情報の格差が生まれる情報デバイドの問題が重視されており、この問題を軽減するために、より直感的に使用できるユーザインタフェースの研究・開発が望まれている。本研究では、人間と同等の身体表現を持ち、音声言語と身振り・手振り、視線等により、人とコミュニケーションできる人工物である会話エージェントの研究・開発を通して、「人にやさしい」情報環境の構築を目指す。具体的には、本プロジェクトにおいて、以下の2つの研究課題に重点的に取り組んでいる。

2. 生体計測情報による会話状態の理解

会話エージェントによる商品説明を聞いている時のユーザの注視行動のパターンを、アイトラッカにより計測し、注視対象遷移 3-Gram として表現し、クラスタリングすることにより、会話に積極的に参加しているか否かを判定する機構を構築した。さらに、この機構を対話システムに組み込むことにより、会話の途中でユーザの関心が低下すると、「何か質問はありますか」、「次の話題に移りますか」といった声掛けを行うことができる自律的な会話エージェントが実現した(図 1)。本システムの評価を行った結果、会話参加態度推定機能をもつ会話エージェントとインタラクションする場合において、エージェントに対するユーザの印象が向上し、会話関心低下の頻度は減少した。これは、適切なタイミングでのシステムからの声掛けはユーザの会話関心低下を防ぎ、ユーザの発話を促す効果を持つことを示唆する結果である[1]。今

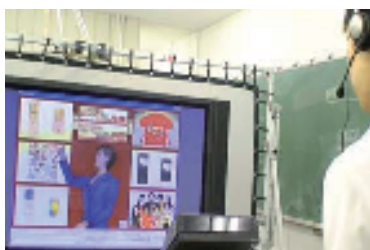


図 1：会話参加態度を認識する会話エージェント

後は、頭部姿勢や全身姿勢等、さらに計測する行動の種類を増やし、それらのコミュニケーションシグナルとしての意味を、会話の言語的文脈に照らしながら確率的な推論を用いて解釈することにより、ユーザとシステムとのコミュニケーションの「質」の推定方法を検討してゆく予定である。

3. エージェントにおける適切な身体的表現の生成

ユーザの非言語シグナルを理解することに加え、エージェント自身が適切な非言語行動を行うことは、ユーザとの円滑なコミュニケーションには不可欠である。一方、非言語行動は言語行動により規定されていることが分かっている。例えば、ジェスチャーは発話の強調点で使用される。このような背景のもと、我々はテキストを入力とし、テキスト内の言語情報をから、エージェントのアニメーションスケジュールと、合成音声を用いて発話音声を作成するシステムを開発している[2]。本システムでは、セカンドライフ等の仮想空間で、ユーザがチャットテキストを入力すると、その発話内容に応じてアバターのジェスチャーを自動的に生成することが可能になる。現在は、成蹊大学の仮想空間において、案内エージェントの実装に取り組んでいる(図 2)。



図 2：仮想空間案内エージェント

参考文献

- [1] Nakano, Y.I. and Ishii, R. Estimating User's Engagement from Eye-gaze Behaviors in Human-Agent Conversations. in *2010 International Conference on Intelligent User Interfaces (IUI2010)*, pp. 139-148, Hong Kong, 2010.
- [2] 塚本剛生, 中野有紀子 日本語文章へのジェスチャー自動付与による仮想世界アバターの実現, 第 72 回情報処理学会全国大会, 5V-9, 2010.

^{*1}：情報科学科准教授(y.nakano@st.seikei.ac.jp)

センサネットワークを用いた位置情報測定システムの検討

村上 仁己, 樋口 政和

A Study of Location-Aware System by Using Sensor Network

Hitomi MURAKAMI*¹, Masakazu HIGUCHI*²

1. 研究の背景・目的

現在, 様々な情報コンテンツやサービスを「いつでも・どこでも・誰にでも」利用可能とするユビキタスネットワークの研究開発が盛んに進められている。ユビキタスサービスを実現する構築基盤 (ユビキタスクラウド) の中では膨大な数のセンサやタグが人や物に埋め込まれ, 大量の情報が飛び交うことになる。この膨大な情報を無尽蔵に扱えばネットワークの破綻や膨大なコストがかかることになるであろう。また, センサ情報は, 携帯電話の GPS のように時間的に場所を移動するという時空間的ダイナミクスな特徴を持つ。

本研究では, ユビキタスクラウドに対する時空間的な挙動を考慮したトラフィックモデルを統計学・確率論・待ち行列理論の観点から提案する。そして, ユビキタスクラウドの最適設計を目的にトラフィックの理論的評価を行なう。

2. ユビキタスクラウドの構成要素

ユビキタスクラウドを設計する上で重要と考えられる要素は, (1) 発生する情報量 (2) 情報発生源の移動性 (3) ネットワーク帯域 (4) 処理時間 (5) 情報品質 などである。従来のネットワークとユビキタスクラウドの一番の違いはユーザの動きの要素, すなわち(2)が含まれていることである。本稿では, その点に特化したトラフィックモデリングの一検討について述べる。

3. ユビキタスクラウドのモデリング

本研究では, ユーザの移動に伴うトラフィックの発生を図1のようにモデル化する。ある時間において, ユーザはサービスを開始し, 移動しながら, ある時間間隔でそのときに一番近いアクセスポイントにおいて, 情報を送信あるいは受信する。そして, ランダム時間の経過後, サービスが終了するものとする。

また, ネットワーク領域毎の統計量を空間パラメータとして導入する。例えば, 人口密度による地域毎のサービス開始率の変化や, ユーザの地域間の移動による地域毎のトラフィックの発生量の変化などが想定できるが,

それらに対応するためのパラメータである (図2)。

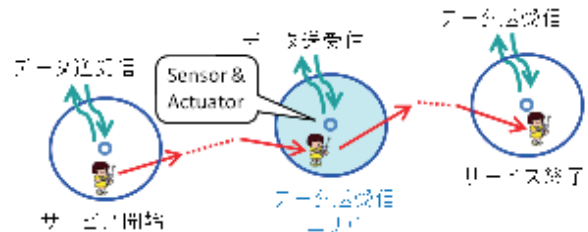


図1 情報発生源の移動性

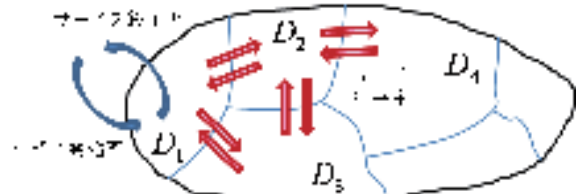


図2 地域毎の空間パラメータ

4. トラフィック解析

上記のモデルに基づいたトラフィック解析の一例を述べる。トラフィックの時間的平衡状態および空間的平衡状態からトラフィック量の分布に関する以下の微分方程式を導出することができる¹⁾。

$$\frac{dp_n^{(k)}(t)}{dt} = -p_n^{(k)}(t) \sum_{v \in N} (\lambda_v^{(k)} + \mu_v^{(k)}) + \sum_{v=1}^n p_{n-v}^{(k)}(t+h) \lambda_v^{(k)} + \sum_{v \in N} p_{n+v}^{(k)}(t+h) \mu_v^{(k)}$$

ただし, $p_n^{(k)}(t)$ は領域 D_k において時間 t におけるトラフィック量が n になる確率であり, $\lambda_v^{(k)}$ と $\mu_v^{(k)}$ はそれぞれ, v のトラフィック量が D_k に流入する割合と流出する割合を表す。上記の微分方程式を解くことにより, D_k におけるトラフィック量の分布を求めることができる。

5. 今後の課題

本稿では, ネットワーク帯域や処理時間, 情報品質などの要素を考慮しない最も単純なモデルを提案し, 簡単なトラフィック解析を行なうことで, この分野にアプローチするための足掛かりを得た。今後は, より複雑な状況を想定し, より現実的なモデルを提案していく。

参考文献

- [1] Shuji Kawasaki, Masakazu Higuchi, Hitomi Murakami, On Modeling Ubiquitous Cloud: Estimation of Traffic, WSEAS TRANSACTIONS on MATHEMATICS, vol.8, Issue 9, pp.530-540, 2009.

*¹: 情報科学科教授(hi-murakami@st.seikei.ac.jp)

*²: 情報科学科博士研究員(m-higuchi@ejs.seikei.ac.jp)

大容量データを扱う逐次処理のための コンピュータクラスタにおける高速仮想メモリシステム

緑川 博子^{*1}

A Fast and Large Virtual Memory System on Computer Clusters for Sequential Applications

Hiroko Midorikawa^{*1}

1. 研究の背景・目的

最近の 64bitOS の普及に伴い、広大なアドレス空間（現状でも 256TB）が利用可能になり、従来はファイルで扱っていた大容量データも、メモリ上に直接展開して扱うことが可能になった。これは科学技術計算、バイオインフォマティクス、データベースなどの大容量データ処理に大きな恩恵をもたらす。本研究では、この巨大アドレス空間を生かし、コンピュータのローカル物理メモリサイズを超える大容量データを扱う逐次処理を可能にするため、ネットワークで結ばれた複数の遠隔コンピュータのメモリを利用して、あたかも単一の巨大なメモリがローカルに存在するかのような大容量仮想メモリ環境を提供するソフトウェアシステムを構築する。従来、ローカルメモリサイズを超える仮想メモリの実現には、ローカルに接続されたハードディスクが用いられてきたが、最近の高速ネットワークの性能向上により、むしろ遠隔コンピュータのメモリにアクセスするほうがハードディスクにアクセスするよりも高速になっている。このような背景により、本研究では OS 仮想メモリシステムとは独立に、一般ユーザレベルの権限で容易に用いることのできる大容量仮想メモリシステムを構築し、様々な応用ベンチマークによる性能評価の結果[1]、従来研究に比べ高安定動作するだけでなく、高性能、高移植性、高可用性を実現できることを世界に先駆けて示した[2]。

2. 大容量高速仮想メモリシステムとコンパイラ

本研究の大容量高速仮想メモリ(DLM)は、図1に示すように、クラスタ上における並列システムとして実現される。ユーザの逐次プログラムを実行する計算ノード、この計算処理にネットワークを介してメモリを提供する複数のメモリサーバノードから成る。ユーザには、並列プログラミングの知識が不要で、逐次 C プログラムを提供するだけで、専用コンパイラ（本研究で構築）により、自動的にクラスタをメモリ資源として利用するための並列プログラムに自動変換される。ノード間通信はソケット(TCP/IP)や、通信媒体を選ばず可搬性の高い MPI

通信も用意しており、MPI バッチシステムで運用される汎用のオープンクラスタを、安価にメモリ資源として用いることができる。すで

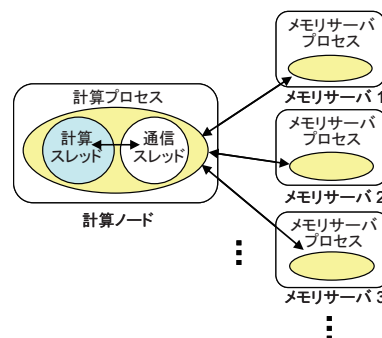


図1 クラスタにおける大容量高速仮想メモリ

に、高速ネットワーク Myrinet 接続（40Gbps）による汎用クラスタ（東大 T2K, ha8000）上で、実際の応用ベンチマークによる性能評価を行った[1][2]。

3. メモリクラウドシステム

1 クラスタ内にとどまらず、WAN に接続されたクラスタ群の中から、負荷状況を考慮して、自動的に最適なクラスタとメモリサーバノード、計算ノードを選択して実行を行う、メモリクラウドシステムの構築も行っている。現在、全国 17 大学を結ぶ WAN クラスタ群実験システム（InTrigger）での稼働実験を行っている[3]。これによりユーザは、本研究で構築したポータルサイトから全国どこからでも、大容量データを処理するプログラムを自分の PC から投入することが可能となる。

3. 今後の予定

マルチコア CPU を生かしたマルチスレッドプログラムへの対応や高速通信プロトコル、ページ置き換えアルゴリズムなどの高性能化について研究を進めている。

参考文献

- [1] 緑川博子, 斉藤和広, 佐藤三久, 朴泰祐: "クラスタをメモリ資源として利用するための MPI による高速大容量メモリ", 情報処理学会論文誌 ACS, Vol.2, No.3, pp.15-36, 2009
- [2] H. Midorikawa, K.Saito, M.Sato, T.Boku: "Using a Cluster as a Memory Resource: A Fast and Large Virtual Memory on MPI", Proc. of IEEE Int. Conf. on Cluster Computing (CLUSTER2009), pp.1-10, 2009
- [3] 鈴木悠一郎, 緑川博子: "分散大容量メモリ DLM の WAN 接続クラスタ群への適用 ―クラスタ・サーバ自動選定システムの提案―", SACSIS2010, pp.173-174, 2010

^{*1}: 情報科学科助教 甲斐研究室 (midori@st.seikei.ac.jp)

大気圧プラズマを用いた有機物分解装置の研究

齋藤 洋司^{*1}

A Study on Atmospheric Plasma System for Decomposition of Organic Compounds

Yoji SAITO^{*1}

1. 研究の背景・目的

近年、環境問題の原因となっている有害な揮発性有機物質(VOCs)について、低濃度ガスに有効なプラズマ法による分解処理の検討がなされている。

本研究では、低消費エネルギーで効率良く VOCs を分解することを目的として、従来使用してきた大気圧プラズマ装置に改良を加えて実験を行った [1]。被処理ガスに暴露される内部電極を従来のステンレスからチタンに替えて、分解処理能力向上を試みた。チタンの酸化物であるチタニアには光触媒効果のある TiO_2 が知られている。プラズマ放電によって発生する紫外線によって光触媒効果が期待できる。そこで、本研究では電極材料によるベンゼン分解のエネルギー効率の改善がみられるか、また、プラズマ放電によってチタン電極にできるチタニアが光触媒効果を有するか検討した。

2. 実験方法

図1の実験装置を使用しベンゼン蒸気の処理を行った。ベンゼンと乾燥空気の混合気体を放電管内に流し込み、放電管に周波数約12kHzの高電圧約13kVp-pを印加し、混合気体をプラズマ化することにより気体中のベンゼンを処理した。ここで、内部電極材料としてステンレスまたはチタンを用い、内部電極内にヒーターを入れて温度調節を行った。消費電力はデジタルパワーメーターで測定した。処理後の混合気体中のベンゼン濃度をガククロマトグラフィー (GC) で測定した。

3. 実験結果

消費電力30Wと40Wにおいてベンゼン分解処理した場合の分解率の電極依存性について評価した。図2にベンゼンの分解率の温度特性における電極依存性を示す。温度が上昇すると分解率が高くなることが確認された。30WのときはTi電極の方がステンレス電極に比べ、高分解率を得た。40Wの場合は、分解率が飽和したため、有意な差は見られなかった。

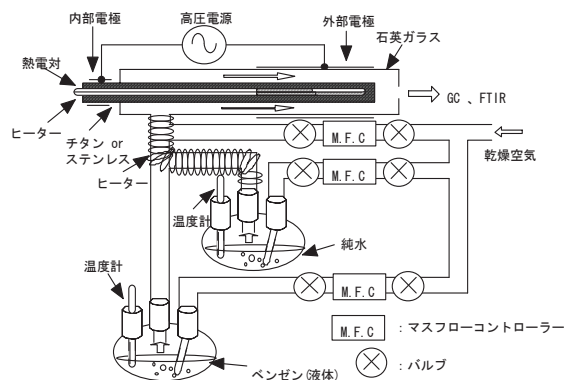


図1 実験装置概略図

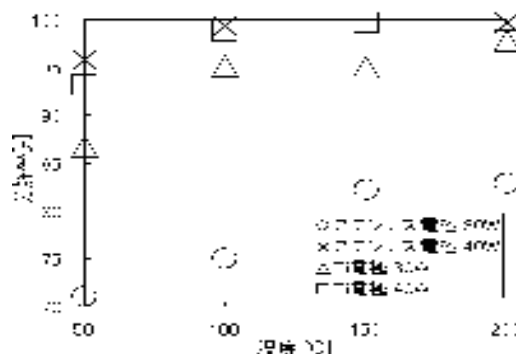


図2 ベンゼン分解率の温度依存性

4. 結論及び今後の課題

同じ消費電力、放電管温度では、ステンレス電極に比べてチタン電極の方が高分解率を得た。チタン電極表面にはプラズマ放電によって酸化膜が成長し、それが光触媒作用を有するためと考えられる [2]。今後、さらに省エネルギー化を図る必要があり、触媒効果の向上、電極形状に対する検討を行い、高効率化を目指す。

参考文献

- [1] 齋藤, 五十嵐, 大久保「大気圧バリア放電によるトルエン分解と副生成物質生成に及ぼす酸素・水蒸気濃度および電極温度の影響」, 材料の科学と工学, 2007年
- [2] 岩村(俊), 岩村(泰), 長田, 齋藤「大気圧プラズマを用いたベンゼン分解の電極材料依存性」, 日本材料科学会学術講演大会予稿集, 2010年

^{*1}: エレクトロメカニクス学科教授(yoji@st.seikei.ac.jp)