

フィールドサイエンス

Journal of Field Science

No. 11 2013



東京農工大学農学部附属広域都市圏
フィールドサイエンス教育研究センター

平成25年 3月

フィールドサイエンス 第11号

目次

総説

- 1 人と動物の関係の認知科学的理解／武田庄平

原著

- 7 数種リン資源の作物生育に対する有効性／ミントウ ミントウ エイ・松村昭治

研究資料

- 15 先島諸島からのオカダンゴムシの初記録／唐沢重考
- 19 社会的養育環境がアリの体サイズに与える影響：異種間ブルード交換実験によるエピジェネティック効果の検証—アリにおけるエピジェネティック効果—／吉原由紀子・小山哲史・佐藤俊幸
- 31 スギ・ヒノキ人工林溪流における水生生物の生息状況—東京農工大学フィールドミュージアム唐沢山における事例—／渡邊祐介・五味高志・布川雅典・境 優

総説

人と動物の関係の認知科学的理解

武田 庄平

Cognitive Aspects in Human-Animal Relationships

Shohei TAKEDA

Human-animal relationship is one of the medium for Human-human relationship. We usually relate to other peoples via medium ; this relation is called as triad relationship. Triad relationship is made up of social intelligence and technical intelligence. Our human's Umwelt is not same as other live's Umwelt, but we are comprehensible to other live's Umwelt with a medium of theory of mind. These human's higher cognitive abilities are based on our huge cerebral cortex, which adapted and still remain at the hunter-gatherer period of 12 thousand years ago. We live in latest world with older style of cognition, so we must relate to with other to think globally.

Key words : human-animal relationships, social intelligence, triad relationships, theory of mind, Umwelt

人と動物の関係性について考えることは、人と人との関係を考えるための媒介項である。このことは、人と動物と人との三項関係性においてどのようにうまく関わるかという社会的知性および技術的知性という知性を用いてうまく動物と関わることを通じて他者との関係性をもうまくやって行くことで理解される。また私たち人間にとって意味ある環境は他の生物と必ずしも共有している訳ではないことを環世界概念を援用することで認識し、そのような認識をもてるのはごくわずかな生物種に過ぎないが、その一つが私たち人間であり、そのことを可能にしているのが私たちが有するところの理論というものである。ところの理論によって私たちは、他の生物の立場に立って考えることもできる。このようなことを可能にしている基礎は私たちの大きな大脳皮質ではあるが、私たちの大脳皮質は狩猟採集時代からほとんど変化していない古い認知機能のままであり、私たちが無理なく認識できる集団のサイズも150人程度のごく小さな集団であり、地球規模での思考をするには無理があるが、個別の地域的な思考を繋いでいくことで人類としての可能性は示唆される。

キーワード：人と動物の関係、社会的知性、三項関係、ところの理論、環世界

私たち人間は生物学的には人間以外の生き物とながった存在である。私たちは生き物であり、その意味で他の生物と同様に自然の体系の中の一生物として捉えることが可能である。私たちと他の生物とはつながっているのだから、私たち人間は自分達以外の相手を理解し得るのだろうか。例えば、私たち人間は人間以外の存在を認識できているのだろうか。また人間以外の存在の意味を理解できるのだら

うか。私たち人間は自分達を取り巻く他者（人間・動物・植物）と理解しあえるのだろうか。私たち人間は人間以外の存在と何かを共有し得るのだろうか。そして人間同士でも、異文化を認識し、理解し得るのだろうか、などなどと素朴な疑問はいくつでも尽きることなく沸いてくる。

また、人間と自然との共生とか人間と人間との共生といったことをよく耳にするし口にするが、共生

とは一体何であろう。誰かと仲良くすることなのだろうか。共生ということばを文字通り捉えれば、共に生きるないし生かすこととなる。いずれにせよ、共にあることが前提となるが、この共にあるということとは、単に同時に無関係に存在するというのではなく、お互いに何らかの関係をもって存在するというに違いない。つまり共生とは、二者間以上での関係性あるいは相互作用を意味していると捉えられる（武田，2007）。つまり共生とは、私たち人間とそれ以外の生物とが相互に認識し理解しあっていることを前提とした概念であると言える。

共生とは、同種個体間での関係性、即ち人間と人間—つまり私とあなた（自己と他者）—との関係性が基本となり、この人間同士での関係性を成立させる媒介的關係として人間と自然との共生という関係性があるといえる（武田，2007）。つまり、自然は人間と人間とをつなぐための媒介項としての機能を有し、自然は人間同士の相互作用あるいはコミュニケーションのための社会的道具として位置づけられる。社会的道具とは、食物などの物に対して働きかけるために使用される道具ではなく、他者への働きかけという社会的な文脈で使用される道具を指す（松沢，1999）。私たち人間は他者との関係性という文脈に従って、このような道具をいろいろと使いこなしている。例えば、盆暮れの進物は、相手構わず他者に施しをするのではなく、贈る側にとっては自分が相手とよい関係を保とうとする意図的な行為の道具として使用されている。もちろん、そんな媒介項を使用せずとも、よき関係を築き得ると思えるだろうが、現実には色々なモノが私たちの関係性に介在している。人間の社会関係においてはモノを二者間に介在させることで、両者間の関係はモノを介しての間接的な関係になり一見複雑化するように思えるが、実はモノという共通項を両者が共有し、それを媒介とすることにより、両者の関係性はより明確になる。このように、自己と他者の間にモノを介在させる関係を、三項関係（triad relationships）という。松沢（1999）は、知性（インテリジェンス，intelligence）を環境に適應するように生物がその行動を調整する能力として定義し、三項関係を用いて知性を捉えるための図式を提唱した（図1）。この図式では、素朴に自己中心的世界としての自己と外界を設定し、さらに細かくは自己と他者（自己にとっての同種他個体）と物体（生物・非生物を含めた他者以外の存在）の三者を設定する。そして、

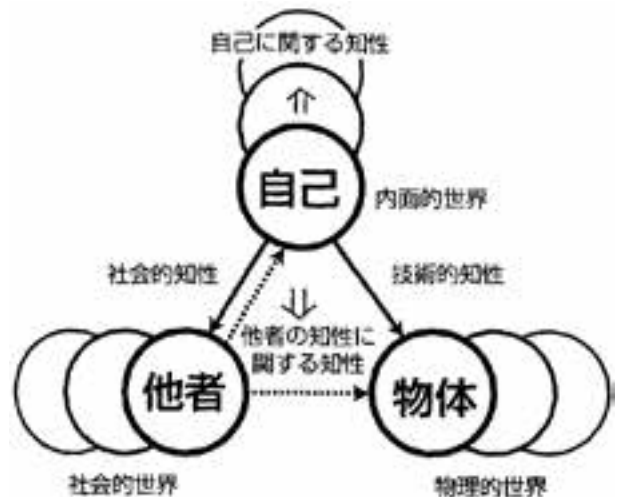


図1. 知性を自己・他者・物体の三項関係で捉える図式（松沢，1999）

自己が他者や物体を知覚しそれに働きかける、そのかかわり方として知性を捉えた。知性は自己と他者のかかわり方としての社会的知性と、自己と物体のかかわり方としての技術的知性に大別される。

社会的知性の進化を、ByrneとWhitenは、マキャベリの知性（Machiavellian intelligence）仮説（Byrne & Whiten, 1988；Whiten & Byrne, 1997）として説明している。この仮説によれば、私たちを含めた霊長類の知性は、競争的な場面で他者を欺いたり、操ったり、出し抜いたりすることを通じて進化したと考えられ、その意味で知性の根源は、権謀術数にあると言える。つまり社会的知性の発生過程を調べることは、知性の発生過程を調べることとも言えるほど社会的知性は私たち人間にとっては重要な知性であると言える。

社会的知性は、もちろん他者と競争する場面では、駆け引きすることや欺くことや出し抜くこととして発揮されるが、一方で他者と協力する場面でも発揮され、例えば相手を手伝ったり思い遣ったり利他的な行動として発揮される。そしてそれだけでなく、もっと複雑な場面として競争する相手とも別の競争相手を倒すために同盟関係を結ぶという打算をも生み出す知性でもある。そして、いずれの場面においても他者の行動を予想することを必要とする。要するに社会という枠組みでいかにうまく振る舞っていかるといふ生存をかけた知性である。

人間と人間の共生、人間と自然の共生とは、まさに人間としての自己と人間としての他者との共生という関係（かかわり方）であり、人間としての自己と自然としての物体との共生という関係（かかわり

方)に違いない。その意味で、共生という概念はまさしく自己と他者や自然とのかかわり方としての知性を意味している。

共生ということを考える際、社会的な生き物としての人間というものを前提とする限りにおいて最も肝要なことは、人間と人間の共生である自己と他者とのかかわり方としての知性であると考えられる。この知性は、自己と自然とのかかわり方を他者が理解すること、他者と自然とのかかわり方を自己が理解することといった他者の知性に関する知性を通じて、自己=自然=他者という三項関係を成立させる。つまり、自己と他者との自然とのかかわり方の互いに共有された知性として人間と自然の共生というものを成立させることとなる。また、人間と自然の共生を通じたフィードバック的關係として、自己=他者のかかわり方としての知性としての人間と人間の共生は質的変貌をとげると考えられる。

このような図式に基づいて、私たち人間同士と自然との関係性を捉えようと、図2のような関係性を描出することができないだろうか。つまり畜産農家は、牛や豚や鶏などの家畜動物(野生動物ではないが、広い意味で自然的存在と捉えられうる)を飼育し、それらを牛肉・豚肉・鶏肉・鶏卵等に加工されたものを消費者たる私たちは購入し食べる。畜産農家は自身が飼育する家畜動物をできるだけ高品質な商品として市場に送出手のために家畜を飼育するという技術的知性による関わりを行い、その関わりを通じて畜産農家から直接食肉を買い取る業者があり、その業者が何らかの加工を行った食肉製品をさらに次の卸業者が買い取り、その後その業者が直接消費者に販売する精肉店やスーパー等の小売業者に納入し、その肉を商品として消費者は購入する。直接的関係としては、商品としての精肉を媒介項として小売業者と消費者との関係性が成立し、さらに直接的ではないが、数珠つなぎ的あるいは入れ子的関係で生産者である畜産農家と消費者との関係性も生じる。その際の媒介項は見た目の形態は変容すれども家畜そのものである。

また媒介項が動物園や水族館で飼育展示されている動物(展示動物)であったならどうであろう。動物園・水族館の動物を飼育展示している動物園・水族館の経営者や運営者は、それら動物を観覧しにくる来園者に対して何らかのメッセージを発信している。それは理想的には自然や生命に対する理解であろうが、時に単なる珍しいものの展示にとどまる場

合もある。しかしいずれにせよ、展示動物という媒介項を通じて動物園と来園者の関係性は、単に施設運営者と利用者というだけのものではなく、メッセージの発信者と受信者という有機的関係性を構築することになるし、うまくすれば来園者は動物園をはるかに乗り越えて遠くアフリカの草原や南アメリカの熱帯雨林へと、その思いが飛ぶことさえある。

さらに、製薬会社や化粧品会社の新製品開発のための実験に供されているいわゆる実験動物について考えると、薬や化粧品の消費者である私たちと実験動物とは直接には関わらないが、製品化された商品には彼らの見えない存在がある。そのような形で私たちと関係性を結ばせているのは、企業等の実験研究施設で動物実験を行う研究者の技術的知性による。この知性とは、例えば実験動物にある薬剤を投与して生起させる生理的反応である。この生理的反応性をさらに敷衍して最終的には私たち人間に投与すべき薬剤や化粧品が開発され、それを消費者たる私たちは購入し利用している。

私たちが無理なく自然な存在であると認識しやすい野生動物と私たちとの関係性はどうかであろう。野生動物は、広い意味では保護・保全すべき自然であろうが、局地的にみると必ずしもそうとも言えない。野生動物による耕作物の食害等の被害にあっている農家にとっては、たとえそれが天然記念物であっても稀少動物であっても駆除すべき有害鳥獣以外の何者でもない。だから地元では駆除するか、できなければいかに里に来させないかに頭を悩ませる。これはこれで技術的知性として捉えられる。一方で、そのような直接的被害にはあっていない都市生活者にとっては、天然記念物も希少動物も当然守るべき自然であり、現代においては生物多様性保全という錦の御旗もあり、そのようなものをいかに守るべきかについて頭を悩ませる。それはそれで別の技術的知性であるが、地元にとっては迷惑な話かもしれない。その齟齬のある関係性においてどうやってうまくやっていけるのかというのが社会的知性である。

私たちと生活空間を共有するいわゆるペット動物も単に家庭内での存在として収まっているのではなく、都市生活者の私たちを相互につなぐ役割を果たしている。私たちの家庭にいる犬の朝晩の散歩は、単に屋外での運動や排泄を行わせるという目的にとどまらず、散歩ルート上で出会う別の犬やその飼い主との交流や時には回避もあろう。いずれの場合で

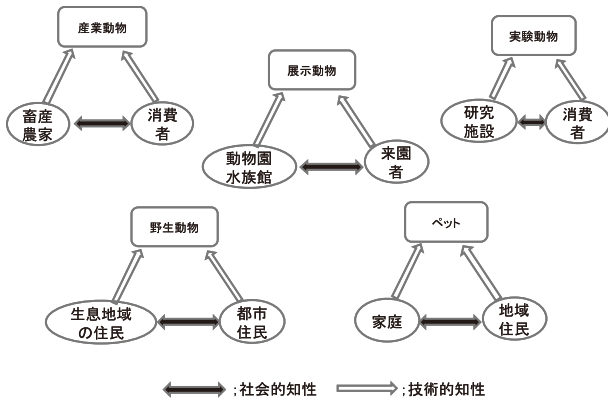


図2. 動物を媒介項とした人間と人間との関係性（社会的知性）の図式

あっても、自分たちが犬を飼っていないければ、出会わないし、例え道端で出会ったとしても見ず知らずの他人として一瞥もくれない相手であろう。それが犬という媒介項を介して全くの他人が挨拶し会話する関係を結ぶ。地域的つながりが弱いと言われがちな都会地であってペットなる存在は私たち人間を互いにつなぐボンドの役割をも担っていると言える。

このような私たち人間同士をつないでくれる存在は単にそれにとどまるものではなく、もちろんそれ自体として独立した一つの個を成立させるものでもある。その個という存在を私たち人間以外にも明確に意識させることになる概念として、フォン・ユクスキュルとクリサート (von Uexküll, J. & Kriszat, G., 1934) が提唱した「環世界 (Umwelt)」というものがある。環世界とは、主体が知覚できる外界に作用することと、外界が主体に作用することによって生み出される相互作用的な統一体のことを指す。生物それぞれに主体というものを認め、それぞれの主体はいわゆる環境 (Umgebung) の中の諸物に意味を与えることによりそれぞれの環世界を構築するのである。つまり、ある主体にとっての環世界は、その主体が知覚できない外界を含めたいわゆる環境 (Umgebung) の部分に過ぎないのである。それゆえ環世界と環境とは異なり、環境とは、ある主体のまわりに単に存在している客観的に記述される世界であるとされる。

この立場に立つと、主体としての私たち人間は、人間的環世界に住んでおり、私たち人間が知覚できない環世界に住んでいる主体もいるということを認めなければならない。つまり、それぞれの生物にそれぞれの主体を認めることになる。これは一見公平で簡単そうなことだが、私たち人間は放っておけばともすると自分達を中心にして物事を捉えるので、

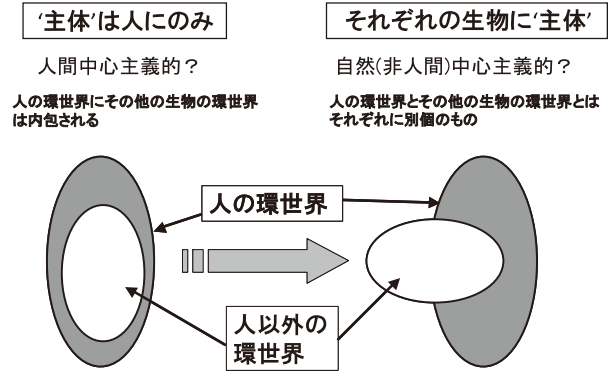


図3. 人間と人間以外の生物の環世界の捉え方

よほど意図的に人間以外の生物に主体を認めなければ、意外に困難なことであると言える。そして、ある意味人間中心主義的自然観といえるかもしれないが、主体を人間にのみ認めると、私たち人間の環世界にその他の生物の環世界は内包されることになり、私たちの環世界が全ての生物の環世界を代表するので、私たち中心で物事を考えることでも特に問題はないとも言える。一方で、ある意味自然 (非人間) 中心主義的自然観では、それぞれの生物に主体を認める。そうすると、人間の環世界とその他の生物の環世界とはそれぞれに別個のものとして捉えられ、それぞれの生物にそれぞれの環世界というものがあるということになり、私たち人間にとっては直接には認識できないような世界を認めなければならない。これらのことをまとめると図3のような関係として捉えられる。

とは言え、私たち人間にそれぞれの生物主体がどのような環世界を構築しているのかを一体どのようにして知り得ることができるのかという疑問が生じる。

少なくとも人間や類人猿 (特にチンパンジー、ボノボ、ゴリラ、オランウータンなど) は、その程度の差こそあれ「心の理論 (Theory of Mind)」というものを持っているといわれている。このことを最初に提唱した Premack & Woodruff (1978) によれば、自己および他者の目的・意図・知識・信念・思考・疑念・推測・ふり・好みなどの内容が理解できるのであれば、その動物または人間は心の理論をもつといえる。少なくとも私たち人間は他者的立場に立って考えてみるのが可能である。ということはもちろん心の理論を有するといえるし、それゆえ人間以外の生物の環世界についても理解を示すことができるともいえる。もちろんたとえ理解できなくても、自分自身が他者を理解しようとする態度をと

れるかどうかは別問題である。そして、たとえそのような態度をとってみても、やはりそれぞれにそれぞれの環世界に住んでいることには何の変わりもない。しかもそれは、人間とそれ以外の生物との間にあるばかりではなく、実は同じ人間同士にも見られる。例えば、私たちにはどうしても納得できない異文化の習慣があったり、使用する言語が違うだけで互いに理解しあえない場合もある。それでも私たち人間同士は互いにうまくやっとうとする傾向がある。このような傾向は、まさに前述の社会的知性が発揮される場面であろう。

ところで、私たち人類の認知能力は約一万年前と比べると変わっていないと言われている。約一万年前といえば、農耕定住生活が始まったとされる時代である。一説によれば、もっと旧く約3万年前には狩猟採集の片手間に小規模な農耕は既に開始されていたとも言われている (Tudge, 1998) が、いずれにせよ非定住型の小集団による狩猟採集生活中心の時代に比べると、農業のおかげで年間を通じて安定的に食料資源を確保できるようになったために、集団の規模も人口も格段に増大していった。Tudge (1998) によれば、1万年前の世界の人口はわずか800万人程度であったであろうと考えられるのが、紀元前後には1億から3億人の間に増大した。そして西暦2000年頃には60億人に、さらに2012年には71億人に迫る勢いで指数関数的に増加している。

集団規模が大きくなる、人口が増えるということは、生物の環境に対する適応という観点からみると正しく適応的であると言えるので、人類の発展を意味していたことは確かである。その観点からだけ農業を捉えると農業は人類発展の立役者であったと言える。とは言え、物事は一面的にだけ捉えられるものではないので、農業は人類がそれまでみられなかった規模で計画的に環境を制御することの始まりであり、今日的な環境問題とりわけ自然破壊の原罪であるとも言える。そればかりではなく、農業は男尊女卑の起源ともされる。Fisher (1992) は、農業の始まりが、狩猟採集生活では相応の役割を担っていた女の地位を落とししめるものであり、とりわけ鋤(すき)の発明が女の地位の失墜に拍車をかけたことと主張している。その理由は、鋤は女の力で扱える道具ではないため、生活の第一の担い手は男となり、女は二次的な仕事に甘んじなければならなくなったとされる。しかし現代においては、農業に限らずあらゆる労働の場面においては、技術の力によって身

体的力を必要とせず、男女の差異はなくなったと言える。人類史において、女性はその地位を一度失ったと言えるが、男女に存在する差異は生物学的機能差に過ぎず、それは社会的優劣の問題には何ら反映され得ないものである。

さて、この農業による定住がもたらした人口の爆発的増大による集団規模の大型化は私たち人間社会に問題をもたらしたと言える。

Dunbar (1996) は、霊長類の脳の特に新皮質と呼ばれる部分の脳全体に占める体積比と群れの規模とが相関関係にあることを見出した。つまり新皮質の体積比が大きければ大きいほどその種の群れのサイズは大きいということである。これを人類に当てはめると、人類の新皮質は全体の80%を占めていて、体積比は4:1になる。霊長類での結果からシュミレートすると、人類の集団サイズは約150人ということになる。この150人という数字は、現代都市生活者の感覚では予想外に小さいと言えるが、これは都市全体の人口の問題なのではなく、自身が属している集団で、互いに顔と名前が判別できる顔見知り集団のサイズを指す。そう考えると私たちの社会における集団規模は意外にも150人を大きく超えるものは少ない。例えば、学校や組織、家庭などの単位集団では、150人よりも大きなサイズになると、大抵は学校の学級編成や会社の部課などの小さな下位集団が形成される。

このように私たち人間の集団サイズの認知特性は約1万年前の狩猟採集生活から農耕定住生活への移行期から変わることなく続いている。狩猟採集生活の集団に適応したそのままを引き継いでいると考えられるかなり古い認知様式で、現代の大規模社会に生きていることになる。

“Think global, act locally” という地球環境問題に対する標語があるが、上述の通り私たちが無理なく認識できる範囲はたかが150人程度の小規模集団でありごく狭い範囲の地域である。地球規模での認知能力はない。このままではただの謳い文句で終わってしまう。私たちは、local (“そう広くはない地域社会”とこのことばを捉えておく) には活動できるし、そういう範囲のことについての認知能力は十分あるといえる。だから、地に足の着いた地域での活動を重ねること、他者のそれと繋げることで、結果的には地球規模でものを考えることにつながっていくのではないか。その意味でこの標語は、“Act and think locally, think global” (地域で考え活動す

れば、地球規模で考えることになる)と言換えるのが、私たち人間の認知能力を反映した現実的な標語であるといえるだろう。個人では能力の限界があるが、私たちには個人をつないでいく力がある。その力を発揮すれば、私たちは、例え行ったこともない地球の反対側で起こっている問題に対しても対処することができるだろう。そのような能力を私たちは有している。それをいかにうまく発揮していくことができるのかが、私たちに課せられた課題であり、その課題を解いていかなければ、私たち人類の将来には希望が見えないものとなる。

引用文献

- Byrne, R. and Whiten, A.: Machiavellian Intelligence: Social Expertise and the Evolution of Intellect in Monkeys, Apes, and Humans. Oxford Science Publications, UK, 1988 (藤田和生・山下博志・友永雅己(監訳)『マキャベリの知性と心の理論の進化論』, ナカニシヤ出版, 2004)
- Dunbar, R.: Grooming, Gossip and the Evolution of Language. Faber & Faber, 1996. (松浦俊輔・服部清美(訳)『ことばの起源』, 青土社, 1998)
- Fisher, H. E.: Anatomy of Love. W. W. Norton, NY, 1992. (吉田利子(訳)『愛はなぜ終わるのか』, 草思社, 1993)
- 松沢哲郎: 心の進化; 比較認知科学の視点から. 科学, Vol. 69, No. 4: 323-332, 1999.
- Premack, D. and Woodruff, G.: Does the Chimpanzee Have a Theory of Mind? Behavioral and Brain Sciences, 1: 515-526. 1978.
- 武田庄平: 認知科学的「共生」論, 『共生社会システム学序説』, 矢口・尾関(編), 青木書店, 65-88, 2007.
- Tudge, C.: Neanderthals, Bandits and Farmers; How Agriculture Really Began. Orion Publishing, UK, 1998 (竹内久美子(訳)『農業は人類の原罪である』, 新潮社, 2002)
- von Uexküll, J. and Kriszgat, G.: Streifzüge durch die Umwelten von Tieren und Menschen. S. Fischer Verlag GmbH, Frankfurt am Main, 1934 (日高敏隆・野田保之(訳)『生物から見た世界』, 思索社, 1970, 新訳(岩波文庫版); 日高敏隆・羽田節子(訳)『生物から見た世界』, 岩波書店, 2005)
- Whiten, A. and Byrne, R.: Machiavellian Intelligence II: Extensions and Evaluations. Cambridge University Press, UK, 1997 (友永雅己・小田 亮・平田 聡・藤田和生(監訳)『マキャベリの知性と心の理論の進化論II』, ナカニシヤ出版, 2004)

原 著

数種リン資源の作物生育に対する有効性

ミントウ ミントウ エイ^{*1}・松村 昭治^{*2†}

Availability of Several Phosphorus Resources for Crop Growth

Myint Myint AYE^{*1}, Shoji MATSUMURA^{*2†}

The use of commercially available phosphorus (P) fertilizers is limited in developing countries due to their prohibitive cost. It is important to examine the availability of various P sources, including materials recovered from wastewater and crop residue, to meet crops' requirement. A greenhouse pot experiment was conducted at the Field Science Center, Tokyo University of Agriculture and Technology. Upland rice (*Oryza sativa* L. cv. Norin No.1) and tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill. cv. Momotaro T93) were grown in volcanic ash soil (Silic Andosols, Melanudands, pH 6.04). Four sources of P were used: calcium dihydrogenphosphate monohydrate (Ca-P), ammonium magnesium phosphate hexahydrate (MAP), aluminum phosphate (Al-P), and plant residue (Re-P) of crotalaria (*Crotalaria spectabilis* Roth.). In consideration of evaluating the availability of poorly-soluble compounds, MAP and Al-P, the former three sources were mixed with soil at a rate of 750 mg P₂O₅ pot⁻¹, which corresponds to 750 kg P₂O₅ ha⁻¹, but Re-P was applied at a rate of 108 mg P₂O₅ pot⁻¹ due to large residue volumes. Duplicate plant and soil samples were collected at 40, 70 and 100 days after planting (DAP), and plant phosphorus content and available soil phosphorus were determined. Phosphorus recovery rates (PRR) were then calculated. Growth responses of upland rice to P-sources were in the sequence Ca-P>Al-P>MAP>Re-P>control, while the tomato's responses were in the sequence Ca-P>MAP>Al-P>Re-P>control. Through the three sampling times, the sequences of P uptake by upland rice and tomato from the amendments and soil were the same as their growth response sequences. Remaining available P in soil decreased inversely related to the increase of crop-absorbed P. Ca-P and Re-P were higher than MAP and Al-P in PRR for both crops across the three sampling events. It was concluded that although Ca-P was the most effective source for both crops, MAP, Al-P, and Re-P sources were also available for crops' growth. It became clear that upland rice and tomato had different compatibilities to the P sources. Upland rice has a higher capacity to take up and use Al-bound P than tomato; however, tomato was more efficient in absorbing and using MAP than upland rice. Ca-P and Re-P sources were more useful than MAP and Al-P for crop P recovery. From a standpoint of efficient use of various P resources, in addition to the direct use of waste-derived P, developing the P recycling system, in which farmers can use the accumulated P in soil by incorporating the crop residues like upland rice and tomato that have characteristic abilities of P uptake, is expected.

Key words : phosphorus availability, aluminum phosphate, MAP, crop residue phosphate, upland rice, tomato

開発途上国においてはリン酸肥料は高価格であるために使用量は十分でない。そこで、下水からの回収リ

Received : Sep. 5, 2012; Accepted : Dec. 4, 2012

^{*1} 東京農工大学大学院農学府, 現在: 44, Kanthaya Road, YanKyaw Quarter, Magway, Myanmar

^{*2} 東京農工大学農学部 Faculty of Agriculture, Tokyo University of Agriculture and Technology

† 連絡担当著者: 松村昭治 Correspondence to: Shoji MATSUMURA, Faculty of Agriculture, Tokyo University of Agriculture and Technology, 3-5-8 Saiwai-cho, Fuchu, Tokyo 183-8509, Japan

ンや作物残渣中のリンのような様々なリン資源の有効性を検討することが重要である。この目的のために、東京農工大学農学部FSセンターのビニールハウスにおいて、黒ボク土 (Silic Andosols, Melanudands, pH 6.04) を用い、陸稲 (*Oryza sativa* L. cv. Norin No. 1) とトマト (*Lycopersicon esculentum* Mill. cv. Momotaro T93) のポット栽培試験を行った。試験区には4種類のリン資源を用いた；リン酸二水素カルシウム (Ca-P), アンモニウムマグネシウムリン酸 (MAP), アルミニウムリン酸 (Al-P), およびクロタラリア (*Crotalaria spectabilis* L.) 作物残渣 (Re-P)。難溶性である MAP と Al-P の肥効を評価することを考慮して、前3者の施用量は $750 \text{ mg P}_2\text{O}_5 \text{ pot}^{-1}$ ($750 \text{ kg P}_2\text{O}_5 \text{ ha}^{-1}$ に相当) としたが、Re-P は含有率が低いために $108 \text{ mg P}_2\text{O}_5 \text{ pot}^{-1}$ とした。播種後40, 70および100日目に作物と土壌を採取し、乾物重、リン含有率および土壌の可給態リンを測定した。陸稲の生育は $\text{Ca-P} \geq \text{Al-P} > \text{MAP} > \text{Re-P} > \text{対照区}$ の順であったが、トマトでは $\text{Ca-P} \geq \text{MAP} > \text{Al-P} > \text{Re-P} > \text{対照区}$ となり、いずれの資材もリン資源としての効果は認められたが、陸稲とトマトで資材に対する反応が異なることが明らかとなった。土壌の可給態リンは作物による吸収量が多いほど低下していた。施肥リンの回収率の点からみると、Ca-P と Re-P が MAP や Al-P よりも高かった。資源有効利用の観点からすれば、廃棄物回収リンの直接利用に加え、陸稲やトマトのようなリン吸収力に特徴のある作物を栽培して土壌蓄積リンを吸収させ、その残渣を積極的に利用するリン循環利用システムの技術開発が望まれる。

キーワード：リンの有効性、アルミニウムリン酸、MAP、作物残渣含有リン酸、陸稲、トマト

INTRODUCTION

The use of commercially available phosphorus (P) fertilizers in developing countries is limited by their prohibitive cost (Hammond et al. 1989). The average recovery of P fertilizer through cropping is very low, ranging between 15 and 20% (Krishna 2003). P is a relatively immobile soil macronutrient, and its use for plant growth is therefore dependent on its solubility, and soil and plant properties. It is important to examine the availability of various phosphorus resources, including materials recovered from wastewater and crop residues, to meet crop requirements.

Adequate P supplied to plants stimulates early plant growth and hastens maturity. The rate of P uptake appears to have a marked influence on the plant growth rate at deficient to optimum P concentrations in soil solution (White 1971). Soil P tests alone are insufficient in determining responses, because their empirical values may only reflect nutrient availability indirectly. Soil P value is useful only when they are correlated with crop responses (Sanchez 1976).

Ammonium magnesium phosphate hexahydrate (MAP) is one form of phosphate recovered from sewage or food industry wastewater. It is desirable to use such recovered phosphorus, and necessary to

optimize agroecosystems to be less dependent on high inputs while maintaining productivity and soil fertility, to minimize negative environmental effects.

In arable soils, especially volcanic ash soils that have large amounts of aluminum-bound phosphorus (Al-P), the physicochemical Al-P combination has little availability to plants. Only some kinds of plant root exudates can dissolve Al-P to take it up. Availability of such a water-insoluble phosphate may be associated with crop uptake ability. In tropical cropping systems, a better understanding of P transformations and short-term P cycling during decomposition of incorporated residues is pertinent (Salas et al. 2003). Crop residues are particularly beneficial for maintaining or increasing soil organic matter (SOM) content and for enhancing soil biological activity. Incorporation of residues from plants that dissolve and uptake Al-P may directly shift the equilibrium between soil P fractions towards plant-available fractions (Horst et al. 2001). Applications of commercial P fertilizer is impossible for the most resource-poor farmers in the tropics and subtropics, especially on soils with high P retention. Under such conditions, integration of such crop species and/or cultivars and fertilizer application is a key element of sustainable cropping systems (Lynch 1998).

Our knowledge of the behavior of different plant species in response to various P resources, including materials recovered from waste water and crop residues, is still limited. The objectives of this study were (1) to evaluate the availability of various P resources including crop residue to crop growth, and (2) to study the ability of crops to take up and use P from the various sources.

MATERIALS AND METHODS

Location and soil

A greenhouse pot experiment was conducted at the Field Science Center, Tokyo University of Agriculture and Technology (TUAT). Volcanic ash soil (Silic Andosols, Melanudands) was collected from TUAT experimental fields, air-dried, and passed through a 2 mm sieve. Each plant pot received 400 g of the soil. Soil pH was measured in distilled water (1 : 2.5) and available soil-P was determined by the Bray's method (Olsen and Sommers 1982). Soil pH and the available soil P were 6.04 and 3.8 mg P kg⁻¹, respectively.

Materials and growing condition

Four P sources were used : calcium dihydrogen phosphate monohydrate [Ca(H₂PO₄)₂ · H₂O] (Ca-P), ammonium magnesium phosphate hexahydrate [NH₄MgPO₄ · 6 H₂O] (MAP), aluminum phosphate [AlPO₄] (Al-P), and the residue of a green manure (Re-P); a control (C) without P was included. Re-P was prepared in 1 cm lengths by cutting the tops of crotalaria (*Crotalaria spectabilis* Roth), which were harvested from TUAT experimental fields. Neubauer pots, 112 mm in inner diameter and 66 mm in depth, were used for the experiment. Four days prior to planting, in consideration of evaluating the availability of poorly-soluble compounds, MAP and Al-P, the former three sources were mixed with soil at a rate of 750 mg P₂O₅ pot⁻¹, which corresponds to 750 kg P₂O₅ ha⁻¹, but Re-P pots were applied with crotalaria residue at a rate of 108 mg P₂O₅ pot⁻¹ due to the low P concentration resulting in

vegetation's large volume. And then nitrogen and potassium were applied at the rate of 750 mg N pot⁻¹ as (NH₄)₂SO₄ and 750 mg K₂O pot⁻¹ as K₂SO₄ to the pots of Ca-P, MAP and Al-P treatments. For Re-P, (NH₄)₂SO₄ and K₂SO₄ were amended at the rate of 359 mg N pot⁻¹ and 698 mg K₂O pot⁻¹, respectively, considering the residue N and K₂O contents. All amendments were mixed with 400 g of air-dried soil in each pot.

Two kinds of crops, upland rice (*Oryza sativa* L. cv. Norin No.1) and tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill. cv. Momotaro T-93) were sown in six pots for each treatment. These two crops were used because rice is staple food of Myanmar, and tomato is also an important horticultural crop in the country. Five seeds of each crop were grown in each pot. This high density was adopted so that available phosphorus derived from the materials was immediately and thoroughly absorbed. Soil moisture was maintained at near field capacity by adding 100 ml of distilled water whenever the soil surfaces dried.

Sampling and analyses

Duplicate plant and soil samples were taken at 40, 70 and 100 days after planting (DAP). At each sampling event, all plants were photographed for visual assessment, and then plant samples were removed and roots were washed carefully of soil, before being oven-dried at 60°C for 48 hours and then their dry weights measured. Dry samples were milled to powder and decomposed by the Kjeldhal method (Mizuno and Minami 1980), and the P concentration was determined by the Vanadate-molybdate method. Absorbed P from soil and the amendments was estimated by subtracting seed P content from the whole P content of pot plants.

After the plant samples were removed, soil from each pot was air-dried and the remaining available P in (RAP) was determined by the Bray's method.

The crop phosphorus recovery rate (PRR, %) was calculated as :

$$\text{PRR (\%)} = \frac{(\text{Absorbed P from an amended pot}) - (\text{Absorbed P from the control pot})}{(\text{Amount of added P})} \times 100$$

Analysis of variance and comparison of means between treatments were conducted using statistical methods and analyses advocated by Chao (1969). The relationship between P absorbed by crops and RAP was determined using nonlinear regression and correlation analysis (Gomez and Gomez 1984).

RESULTS

Crops' dry weight and phosphorus uptake responses to various phosphorus resources

The difference in upland rice growth response to the tested materials became clear at 70 DAP, and was more pronounced at 100 DAP (Fig. 1A, Fig. 2 A). In Ca-P plots, upland rice grew well at 40-100 DAP. Although the initial growth at 40 DAP in Al-P plots was inferior to that of Ca-P plots, the growth rate increased gradually and the dry matter became equivalent to that of Ca-P plots at 100 DAP. The growth of upland rice in MAP plots was significantly

inferior to those of Ca-P and Al-P plots. The growth of upland rice in Re-P plots was lowest except for control, but it cannot be compared simply with the others, since there were only small P dosages in the plots. The upland rice grew gradually even in the control.

P uptake by upland rice approximated the dry matter transition (Fig. 3A). Uptake in Ca-P and Al-P plots similarly changed with time and culminated at 100 DAP. On the other hand, P uptake in MAP and Re-P plots at 70 and 100 DAP was significantly lower than that in the former two plots.

The dry matter of tomato supplied with various P sources changed in the sequence Ca-P>MAP>Al-P>Re-P>Control. There was no significant difference between Ca-P and MAP (Fig. 1B) through 100 DAP. Tomato P uptake from the various sources showed a similar trend to that of the dry matter, and as a result shows that tomato absorbed P from MAP as

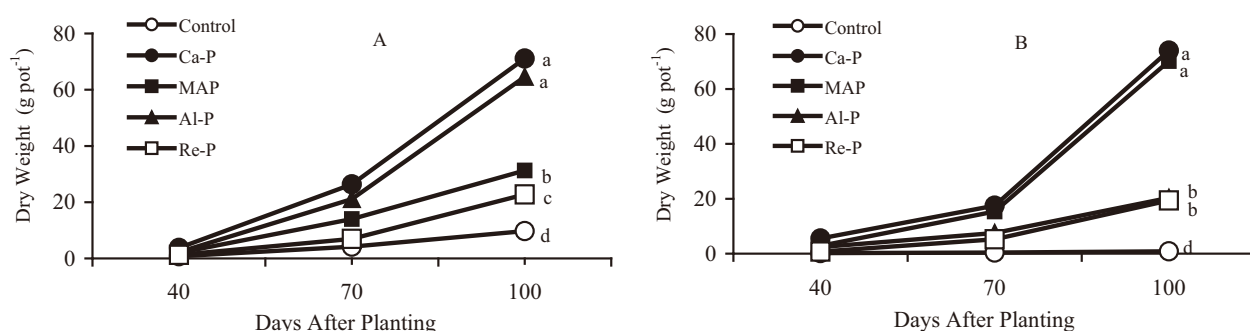


Fig. 1 Effects of various phosphorus sources on the dry weight of upland rice (A) and tomato plants (B). C ; control, Ca-P ; calcium dihydrogenphosphate monohydrate, MAP ; ammonium magnesium phosphate hexahydrate, Al-P ; aluminum phosphate, Re-P ; crotalaria residue. Different letters indicate significant difference at $P < 0.05$ (Fisher's PLSD)

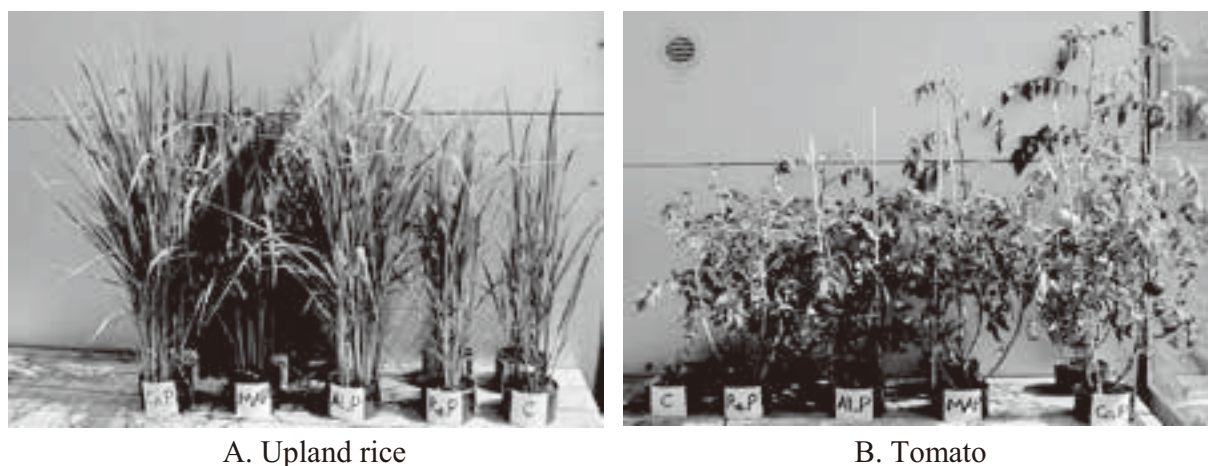


Fig. 2 Visual observations of growth of upland rice (A) and tomato (B) at 100 days after planting. C ; control, Ca-P ; calcium dihydrogenphosphate monohydrate, MAP ; ammonium magnesium phosphate hexahydrate, Al-P ; aluminum phosphate, Re-P ; crotalaria residue

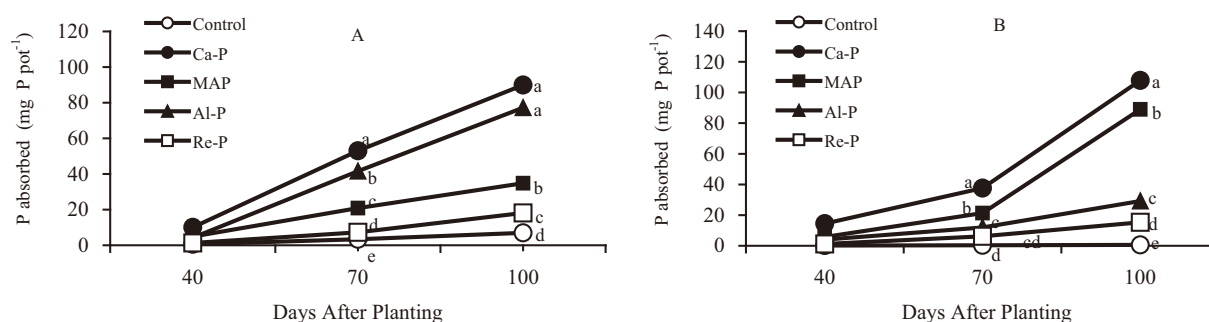


Fig. 3 Phosphorus uptake from soils applied with various phosphorus sources by upland rice (A) and tomato (B) C; control, Ca-P; calcium dihydrogenphosphate monohydrate, MAP; ammonium magnesium phosphate hexahydrate, Al-P; aluminum phosphate, Re-P; crotalaria residue. Different letters indicate significant difference at $P < 0.05$ (Fisher's PLSD)

much as from Ca-P (Fig. 3B). P uptake from Al-P was significantly lower than Ca-P and MAP. For Re-P plots, the growth of both crops was low, but this does not necessarily mean that the effectiveness of Re-P is also low because the application rate was small due to the low P content, as mentioned above.

Recovery rate of phosphorus from various phosphorus sources

Although the P recovery rate (PRR) from Ca-P by upland rice was remarkably high at 40 DAP, the rate from Al-P increased rapidly at 70 DAP, and that from Re-P also increased at 100 DAP and then

Table 1. Phosphorus recovery rate (%) by upland rice from different phosphorus sources

P-sources	Days after planting		
	40	70	100
Ca-P	2.58 a	14.72 a	25.32 a
MAP	1.14 bc	4.63 d	8.5 c
Al-P	0.97 c	10.62 b	21.43 b
Re-P	1.42 b	7.34 c	23.65 ab

Different letters in a row indicate significant differences at 5% level.

Table 2. Phosphorus recovery rate (%) by tomato plant from different phosphorus sources

P-sources	Days after planting		
	40	70	100
Ca-P	3.86 a	10.1 a	32.77 a
MAP	1.48 b	5.5 b	27.03 c
Al-P	1.01 c	3.05 c	8.73 d
Re-P	1.81 b	10.92 a	31.37 b

Different letters in a row indicate significant differences at 5% level.

these further increased to >20% except for MAP (Table 1). PRR from MAP by upland rice was significantly low.

For tomato, PRR at 40 DAP was significantly high only in the Ca-P plot, but the Re-P plot caught up the Ca-P plot at 70 DAP (Table 2). In addition, PRR from MAP increased rapidly at 100 DAP, and all reached to about 30% except for the Al-P plot. PRR from Al-P by tomato was significantly low. The PRR from Re-P was second highest after Ca-P.

Remaining available phosphorus (RAP) in soil after harvest

For both crops, the soil RAP concentrations were over 80 mg P kg⁻¹ at 40 DAP in each treatment except for control, and then decreased gradually, while in the control plot it was <12 mg P kg⁻¹ over 100 days (Fig. 4A, 4B). For upland rice RAP was highest (160 mg P kg⁻¹), in Al-P plot at 40 DAP, but it decreased quickly below that of MAP plot at 70 DAP (Fig. 4A). Conversely, RAP of Ca-P plot was already low (80 mg P kg⁻¹), at 40 DAP. RAP in upland rice plots decreased rapidly at 70 DAP (Fig. 4A), but a similar change was not seen for tomato (Fig. 4B).

DISCUSSION

Difference of plant compatibility to P forms

Upland rice absorbed a lot of P from Al-P as much as Ca-P (Fig. 3A). It is well known that upland rice has the ability to absorb P combined with aluminum (Al-P). For example, it is reported that Al-P had high availability in upland rice cultivation (Otani and Ae 1996; Prochnow et al. 2003). In our experiment, every phosphorus source was effective

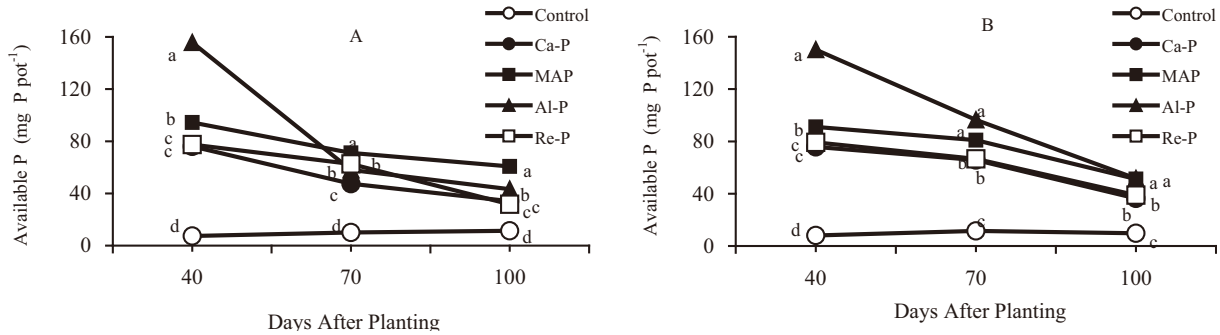


Fig. 4 Changes in available phosphorus in soil applied with various phosphorus sources affected by the cultivation of upland rice (A) and tomato (B). C ; control, Ca-P ; calcium dihydrogenphosphate monohydrate, MAP ; ammonium magnesium phosphate hexahydrate, Al-P ; aluminum phosphate, Re-P ; crotalaria residue. Different letters indicate significant difference at $P < 0.05$ (Fisher's PLSD)

for the growth of upland rice, with Ca-P and Al-P having the largest effects. On the other hand, it is noteworthy that the effectiveness of MAP is equivalent to Ca-P for tomato growth (Fig. 1B) and P uptake (Fig. 3B). No reference was found about this finding, although there was a report that the other kind of sewage-derived product, the recycled calcium phosphate, showed almost the same effect as Ca-P on the P uptake of maize grown in Andosol and Red soil (Tsujiimoto et al. 2007).

The upland rice grew slightly even in the control, but the control tomato showed typical symptoms of P deficiency (Fig. 2B), confirming that tomato is very sensitive to P content of the growing medium. It is clear that the P supply was a limiting factor for growth in both crops, because the correlation coefficient R^2 between dry matter and the P absorption of all plots is 0.938 for upland rice and 0.979 for tomato.

Despite both Al-P and MAP were water-insoluble, the former led to a fertilizer response in upland rice equivalent to superphosphate, and the latter stimulated tomato growth. However, the early growth in Al-P and MAP plots was inferior to that in Ca-P. Tisdale and Nelson (1975) reported that a high solubility in water may be desirable for establishment and early growth stages of crops. As Russell (1973) reported, it may take time to transform insoluble forms of phosphate to labile phosphate pool in soil.

Although superphosphate, in which P is water-soluble, has been used generally in crop cultivation,

it has a disadvantage in that it reacts rapidly with aluminum or iron in soil where the phosphate adsorption force is strong, and P becomes unavailable by next growing season. The result of our experiment suggests that crops are able to use efficiently water-insoluble P which is more stable than superphosphate, although the efficiencies depend on the kind of crop. The delay in early growth can be overcome by addition of small amounts of superphosphate at planting time.

P recovery rate (PRR) from plant residue

The PRR from Re-P was second highest after Ca-P (Table 2). We suggest that the high PRR from Re-P was due to the slow release of P from the incorporated crop residue, being mineralized by soil microorganisms, and the quick uptake before the released P is adsorbed to soil particles. If crop roots are in the organic matter, slowly-released P will be absorbed easily rather than being adsorbed onto soil particles. When the residues are placed on the soil surface as a mulching material instead of incorporation, the decomposition rate further slows down and PRR will become much higher (Friesen et al. 1997). As the effective mechanism of organic matter, Ghosal et al. (2011) discussed that organic matter on decomposition releases organic molecules, which form complexes with Fe and Al ions thereby blocking the sites which are mainly responsible for fixation of phosphorus. Some kinds of plant with high P retention might absorb P from poorly soluble forms in soil. The further development of technologies to exploit green manure residues as a

P resource for succeeding crops is expected.

Relationship between RAP in soil and P uptake by crops

Since the above-ground dry matter and the P uptake of upland rice at 100 DAP were high in both Ca-P and Al-P plots, we suggest that P in the Al-P plot existed in available form at the beginning of the experiment and then immobilized gradually, while from the beginning of the experiment in the Ca-P plot upland rice had rapidly absorbed P from soil-fixed P. Upland rice could have taken up P from reaction products such as Al-P or Fe-P.

The result of Fig. 4 suggests that upland rice absorbed much higher amounts of Al-P than did tomato. Since the maximum RAP at 100 DAP was recorded in the MAP plot for both crops, the P availability of MAP seems to last for a relatively long period.

RAP in Re-P plot decreased gradually and the changing patterns and levels accorded well with P uptake for both crops (Fig. 4). In the soil condition where available P was not in excess, it seems that the mineralized P derived from crop residues via microorganisms is effectively taken up by crops before it adsorbs onto soil particles.

The relationship between RAP and crop P uptake can be represented as an exponential function, with a significant correlation coefficient ($R^2 = 0.877$, $P < 0.01$) (Fig. 5). As P uptake increased, RAP decreased. However, Fig. 5 also shows that low levels of RAP ($< 30 \text{ mg P kg}^{-1}$) cannot be absorbed, suggesting that not all P fractions extracted by the Bray's method can be absorbed. This discrepancy may be due to the difference in the chemical extraction method and the plant physiological absorption

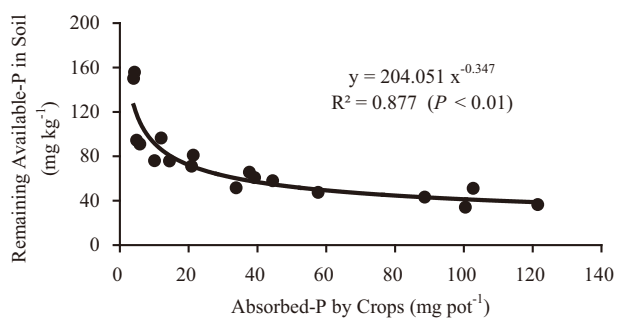


Fig. 5 Relationship between remaining available phosphorus in soils and phosphorus uptake by crops

mechanisms.

CONCLUSION

Although Ca-P had the highest availability in the cultivation of upland rice and tomato over 100 days, we showed that MAP, Al-P and Re-P were also available to crops to some extent. The recovery rate of Re-P in particular was high after Ca-P. It is important that Re-P remains in soil, and a part of it may derive from fixed P which is in an unavailable form to general crops. In this experiment, we tested crotalaria residue, Re-P, as a green manure. If another type of residue, which has stronger affinity for P, were used, it could absorb unavailable P able to supply succeeding crops. This is the most cost-effective application in the study region, in which a lot of P accumulates in soil, and it would be an effective method not only in the area where the phosphate adsorption force is strong in the volcanic ash soils, but also in regions where fertilizers cannot be used economically, such as in developing countries.

The effectiveness of the tested P sources differs according to the type of crop. We showed that upland rice has remarkably high ability to take up Al-combined P compared with tomato, while tomato is sensitive to P deficiency but it has the strong ability to absorb P from MAP.

From a standpoint of efficient use of P resources, the use of recovered P sources such as Re-P and MAP should be applied widely. Utilization of the recovered resources will reduce production costs and facilitate environmental preservation. To promote such a move, further research is necessary on the relationship between the characteristics of crop species (e. g. the difference between upland rice and tomato), and the types and properties of the recovered P resources.

Acknowledgment : The author, Aye, is immensely grateful to Japan International Cooperation Agency (JICA) and Japan International Cooperation Center (JICE) for a financial assistance in the form of a scholarship.

REFERENCES

- Chao LL (1969) Statistical inference-hypothesis testing. In : Statistics methods and analyses. International student edition, McGraw-HILL, NY, pp 215-237
- Friesen DK, Rao IM, Thomas RJ, Oberson A, Sanz JI (1997) Phosphorus acquisition and cycling in crop and pasture system in low fertility soils. In : Ando T, Fujita K, Mae T, Matsumoto H, Mori S, Sekiya J (ed) Plant nutrition - for sustainable food production and environment. Kluwer Academic Publishers, the Netherlands, pp 493-498
- Ghosal P, Chakraborty T, Banik P (2011) Phosphorus fixing capacity of the oxic rhodustalf alfisol soil in the Chotanagpur plateau region of Eastern India. *Agricultural Sciences* 2 (4) : 487-490
- Gomez KA, Gomez AA (1984) Statistical procedures for agricultural research. Wiley & Sons, Singapore, pp 388
- Hammond LL, Chien SH, Roy AH, Mokuwunye AU (1989) Solubility and agronomic effectiveness of partially acidulated phosphate rocks as influenced by their iron aluminum oxide contents. *Fertilizer Research* 19 : 93-98
- Horst WJ, Kamh M, Jibrin JM, Chude VO (2001) Agronomic measures for increasing P availability to crops. *Plant Soil* 237 : 211-223
- Krishna, KR (2003) The agrosphere - nutrient dynamics, ecology and productivity - . Science Publishers, Inc, Plymouth, UK, pp 18-19
- Lynch J (1998) The role of nutrient-efficient crops in modern agriculture. *Crop Production* 1 : 241-264
- Mizuno N, Minami M (1980) A rapid pretreatment method by using sulfuric acid-hydrogen peroxide for determining N, K, Mg, Ca, Fe, Mn in crops. *Japanese Journal of Soil Science and Plant Nutrition* 51 : 418-420 (in Japanese)
- Olsen SR, Sommers LE (1982) Phosphorus. In : Page AL, Miller RH, Keeney DR (ed) Methods of soil analysis, Part 2. Second edition, American Society of Agronomy, Madison WI, pp 416-418
- Otani T, Ae N (1996) Phosphorus (P) uptake mechanisms of crops grown in soils with low P status. I. Screening of crops for efficient P uptake. *Soil Science and Plant Nutrition* 42 : 155-163
- Prochnow LI, Chien SH, Taylor RW, Carmona G, Henao J, Dillard EF (2003) Characterization and agronomic evaluation of single superphosphates varying in iron phosphate impurities. *Agronomy Journal* 95 : 293-302
- Russell EW (1973) The residual value of phosphatic fertilizers. In : Soil conditions and plant growth. Tenth edition, Longman Group Limited, London, pp 594-602
- Salas AM, Elliott ET, Westfall DG, Cole CV, Six J (2003) The role of particulate organic matter in phosphorus cycling. *Soil Science Society of America Journal* 67 : 181-189
- Sanchez PA (1976) Soil fertility evaluation. In : Properties and management of soils in the tropics. Wiley-Interscience, NY, pp 295-335
- Tisdale SL, Nelson WL (1975) Soil and fertilizer phosphorus. In : Soil fertility and fertilizers. Macmillan Publishing Co., NY, pp 233
- Tsujimoto R, Noami Y, Ikumi Y, Suzuki T, Ae N (2007) Phosphorus availability of recycled calcium phosphorus produced from sewage sludge. *Japanese Journal of Soil Science and Plant Nutrition* 78 : 245-252
- White RE (1971) Studies on mineral ion absorption by plants. II. The interaction between metabolic activity and the rate of phosphorus uptake. *Plant Soil* 38 : 509-523

研究資料

先島諸島からのオカダンゴムシの初記録

唐沢 重考

First record of *Armadillidium vulgare* (Crustacea, Isopoda)
from Sakishima Islands, Southern Japan

Shigenori KARASAWA

This study is the first record of *Armadillidium vulgare* from Sakishima Islands, Southwestern Japan. *A. vulgare* has been found on Miyako Airport in Miyakojima Island only, although I have collected isopods from 134 sites in Sakishima Islands. This species may be introduced into Miyako Airport by airplanes from Okinawajima Island.

Key words : introduced species, *Armadillidium vulgare*, Sakishima Islands

日本の南西端に位置する先島諸島においてオカダンゴムシが初めて確認されたので報告を行った。これまでに先島諸島134地点においてワラジムシ類の採集を行った結果、宮古島の宮古空港内でのみオカダンゴムシの分布が確認された。本種の宮古空港への侵入経路としては、近年、定着が確認された沖縄島から飛行機により運ばれたことが考えられる。

キーワード：外来種，オカダンゴムシ，先島諸島

はじめに

先島諸島は、沖縄県の宮古島列島以南の島々の総称で、代表的な島として宮古島、石垣島、および、西表島などが挙げられる。おおよそ北緯24度から26度あたりに位置するこれらの島々は、1月の平均最低気温（1981～2010年）が16度以上と温暖な地域であり（気象庁 HP ; <http://www.jma.go.jp/jma/index.html>），森林生態系にはシイ類やカシ類を優占種とした亜熱帯林が成立する（Kira, 1991）。また、これら先島諸島とその北の沖縄島の間には、ケラマギャップと呼ばれる水深1000 mの深みがあるため、第四期の氷期の海面の低下した時期においてもこれらの島々は陸続きしなかったと考えられている（木村, 2002）。そのため、先島諸島の生物相は、その多様性が高いだけでなく、沖縄島以北の生物相とは異なることが知られている（太田・高橋, 2006）。したがって、先島諸島の生物を保全し

ていくことは、琉球列島全体の生物多様性を保全する上で極めて重要である。

人為的に自然分布域以外に持ち込まれた生物は外来生物と呼ばれ、在来の生態系や生物多様性、さらには人の健康や生産活動に望ましくない影響を及ぼすことがある（多紀, 2008）。周囲を海に囲まれ生物の交流が妨げられることで独自の生物が進化した先島諸島の島々においても、近年の交通網の発達により、様々な外来生物が持ち込まれつつあり、それらによる在来の生物相への悪影響が懸念されている。例えば、石垣島には、特定外来種に指定されているオオヒキガエル *Bufo marinus* が定着しているが（多紀, 2008），その胃からは200種以上の無脊椎動物や小型脊椎動物が確認され（太田, 2001），在来生物の絶滅が危惧されている。したがって、豊かな自然の残る先島諸島の生態系と生物多様性を保全する上で、外来種の侵入、定着、および、在来生物への影響を正確に把握し、適切な処置を行うことは緊

急を要する課題である。

甲殻綱等脚目ワラジムシ亜目（以下、ワラジムシ類）に属する動物は、一般的にはワラジムシやダンゴムシと呼ばれ、最も親しみやすい動物の一つである。これらの動物は、自然界では、落ち葉を食べ、それらの物理的破碎を行うことで、有機物の分解に貢献すると考えられている (Zimmer, 2002)。現在、日本から140種以上のワラジムシ類が報告されているが (布村, 1999)、それらのうち、少なくとも7種は外来種であると考えられている (布村, 2007)。このうち、ホソワラジムシ *Porcellionides pruinosus* は熱帯からも知られており (Dangerfield and Telford, 1990)、日本では本州中部以南から先島諸島までの広い範囲でみることができ (布村, 1999)。一方、本州で最も普通にみることのできるオカダンゴムシ *Armadillidium vulgare* は、これまで沖縄県には分布していないと思われていたが (Nunomura, 1990)、高橋・宮竹 (2012) により、沖縄島においてもオカダンゴムシが定着していることが報告され、この報告が日本におけるオカダンゴムシの南限であるとされた。

しかし、筆者は、2006年以降、琉球列島のワラジムシ類の多様性を解明する目的で、先島諸島においてワラジムシ類の調査を行ってきたが、2012年9月に、宮古島においてオカダンゴムシを発見した。これが先島諸島における本種の初報告となり、かつ、現時点のオカダンゴムシの日本における南限となるため、本論文にて報告を行う。

材料と方法

2006年6月から2012年9月に、与那国島の19地点、西表島の69地点、石垣島の27地点、宮古島の15地点、池間島の2地点、および、来間島の2地点にてワラジムシ類の採集を行った (図1)。調査地点には、住宅地や道路沿いなどの人工的な環境、原生的および二次的な照葉樹林、松林、牧草地・畑地、および、海岸が含まれている。採集は、1名、もしくは、2名で行い、1地点につき最低10分以上、落ち葉の中、倒木や石の下などを採集した。採集したワラジムシ類は、素手、もしくは、吸虫管で採集し、99.5%エタノールにて固定し室温で保管した。その後、ワラジムシ類は、実体顕微鏡下で科レベルに分類し、適宜、プレパラート標本を作製し、生物顕微鏡による観察を行った。全標本の種レベルの分類作業は終了していないが、科レベルの分類は終了

している。オカダンゴムシは明瞭な種分類の表徴を有しており (結果および考察を参照)、誤同定する可能性は極めて低い。

結果および考察

与那国島、西表島、石垣島、および、宮古島の合計134地点にて調査を行った結果、全地点でワラジムシ類が採集されたが、オカダンゴムシは、宮古島の宮古空港内のみで発見された (図1)。筆者は、モモタマナ *Terminalia catappa* の根元から雄7個体と雌4個体を採集したが (図2, 3)、空港内の落葉下から広く確認できることから、本種は宮古空港内の落葉下に広く分布していると考えられた。一方、オカダンゴムシの発見地点から約100~500 m離れた宮古空港周辺の道路3地点でも調査を行ったが、それらの地点からはオカダンゴムシは発見されなかった。日本からは体を丸めることのできるワラジムシ類としては、ハマダンゴムシ科 Tyllidae, コシビロダンゴムシ科 Armadillidae, および、オカダンゴムシ科 Armadillidiidae の種が報告されてい

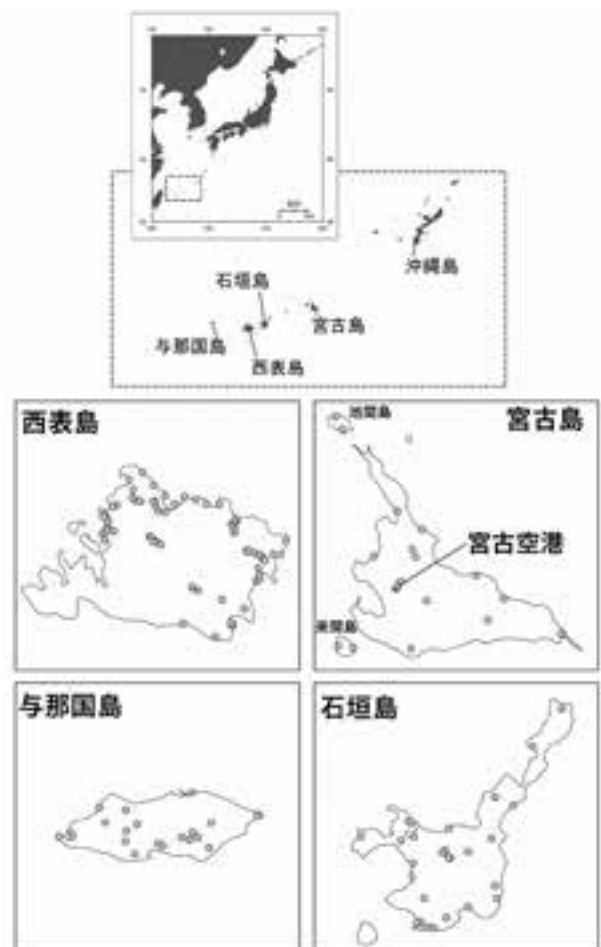


図1. 先島諸島におけるワラジムシ類の調査地点 (丸点で示す)。



図2. 宮古空港内におけるオカダンゴムシの採集地点.



図3. 宮古空港において採集されたオカダンゴムシの側面(A), 頭部正面(B), 頭部上面(C), および, 尾部後方(D). スケール: 2 mm.



図4. 宮古空港において採集されたオカダンゴムシの第1腹肢内肢(A), および, 第1胸脚(B)の走査型電子顕微鏡写真. スケール: A, 200 μ m; B, 500 μ m.

る (布村, 1999)。日本におけるこれら3科は, 腹尾節の形態により容易に分類することができ, オカダンゴムシの属するオカダンゴムシ科は腹尾節が後方に向かい狭くなる特徴を持っている (図3 D)。さらに, オカダンゴムシ科の種として日本からは, オカダンゴムシとハナダカダンゴムシ *Armadillidium nasatum* の2種がこれまでに報告されている

が, この2種は頭部中央の突起の形態により区別することができる (図3 B, C)。第1腹肢内肢, および, 第1胸脚の形態も観察したが, これらの形態もオカダンゴムシの特徴を有していた (図4)。オカダンゴムシが採集された地点からは, 他に, タテジマコシビロダンゴムシ *Venezillo russoi* (本種の学名の使用には疑問が残っているが, ここでは布村 (1999) を参考に便宜的に学名を付す), ホソワラジムシ, モリワラジムシ属の一種 *Burmoniscus kathamandius* が採集された。

オカダンゴムシと同様に外来種であるホソワラジムシは, 与那国島, 西表島, 石垣島, および, 宮古島の人工的環境に広く分布し, 特に, 石垣島の石垣空港内や市街地には高密度で生息していた (唐沢, 未発表データ)。本種の本来の生息地は地中海沿岸と考えられているが (Schmalfuss, 2004), 熱帯の人工的な環境下でも生息しており (Dangerfield and Telford, 1990), 日本においても本州中部以西でよく見つかることから (布村, 1999), 本種は熱帯から暖温帯において定着しやすい傾向があると思われる。

人為的に環境が改変され, かつ, 人の移動が大きい環境に外来種は定着しやすいと言われている (鷲谷, 2007)。定量的な解析は今後の課題であるが, 筆者の経験では, 先島諸島におけるホソワラジムシの分布パターンは, 上記の予測と一致するようと思われる。一方, 本州では, オカダンゴムシは住宅地などの人工的環境に依存して分布しており (寺田, 1995), 上記の予想と分布パターンがほぼ一致しているが, 本調査の結果, 先島諸島では宮古空港内のみで発見された。2012年10月における宮古空港に着陸する飛行機の出発空港を調べたところ, 石垣空港, 多良間空港, および, 羽田空港がそれぞれ1便で, 那覇空港が17便と圧倒的に多い。過去の航空事情は調べていないが, この割合にそれほど大きな違いはないと考えられる。また, 宮古空港と同様に島外から人や物資が運び込まれる平良港でもワラジムシ類の調査を行っているが, これまでにオカダンゴムシは採集されていない。これらを踏まえ, 宮古空港で発見されたオカダンゴムシは, 近年, 沖縄島に定着したと考えられるオカダンゴムシが (高橋・宮竹, 2012), 那覇空港から出発した飛行機に入り込み, 宮古空港に侵入したと考えるのが妥当であろう。2012年9月時点, 宮古島において空港以外では発見されていないオカダンゴムシであるが, 同じ外

来性のワラジムシ類であるホソワラジムシは、宮古島内において広く分布していることから、今後、オカダンゴムシもまた宮古島内で分布域を広げる可能性が高い。また、宮古空港と同様に一日に10便以上の那覇空港出発の飛行機が着陸する石垣空港にも、今後、オカダンゴムシが侵入する可能性が高い。

先島諸島におけるワラジムシ類の種分類は非常に混乱しており (Karasawa, 2012; Karasawa and Honda, 2012), その本来の多様性は未だに不明である。また, Karasawa and Honda (2012) は, 先島諸島に広く分布するモリワラジムシ属の一種 *B. ocellatus* が, 島間で遺伝的に分化していることを明らかにし, 広域分布種であっても遺伝的多様性の保全の観点からは, それぞれの島の集団の保全が不可欠であることを示した。オカダンゴムシが在来ワラジムシ類へ及ぼす影響については不明な点が多いが, 先島諸島の在来ワラジムシ類の多様性を保全する上において, 本地域におけるオカダンゴムシやホソワラジムシなどの外来性ワラジムシ類のモニタリングは不可欠であり, 本資料が今後のモニタリングの助けになれば幸いである。

謝辞

本調査の一部は, 琉球大学熱帯生物圏研究センター「平成24年度共同利用研究・共同利用研究会」の助成金によって行った。

引用文献

- Dangerfield, J. M. and Telford, S. R. (1990) Breeding phenology, variation in reproductive effort and offspring size in a tropical population of the woodlouse *Porcellionides pruinosus*. *Oecologia* 82: 251-258.
- Karasawa, S. (2012) *Cubaris iriomotensis*, a junior synonym of the pantropical species *Cubaris murina* (Crustacea: Isopoda: Oniscidea). *Edaphologia* 91: 21-30.
- Karasawa, S. and Honda, M. (2012) Taxonomic study of the *Burmoniscus ocellatus* Complex (Crustacea, Isopoda, Oniscidea) in Japan shows genetic diversification in the Southern Ryukyus, Southwestern Japan. *Zoological Science* 29: 527-537.
- 木村政昭 (2002) 琉球弧の成立と古地理. 琉球弧の成立と生物の渡来, 木村政昭編著, 206 pp, 沖縄タイムス社, 沖縄: 19-54.
- Kira, T. (1991) Forest ecosystems of East and Southeast Asia in a global perspective. *Ecological Research* 6: 185-200.
- Nunomura, N. (1990) Studies on the terrestrial isopod crustaceans in Japan V. Taxonomy of the families Armadillidiidae, Armadillidae and Tylidae, with taxonomic supplements to some other families. *Bulletin of the Toyama Science Museum* 13: 1-58.
- 布村 昇 (1999) 等脚類. 日本産土壌動物—分類のための図解検索, 青木淳一編著, 1076 pp, 東海大学出版会, 東京: 569-625.
- 布村 昇 (2007) オカダンゴムシは外国から来た生物. 土壌動物学への招待—採集からデータ解析まで, 日本土壌動物学会編, 261 pp, 東海大学出版会, 神奈川: 223-227.
- 太田英利 (2001) 両生爬虫類の世界で起こっていること. 移入・外来・侵入種—生物多様性を脅かすもの, 川道美枝子・岩槻邦男・堂本暁子編著, 321 pp, 築地書館, 東京: 162-180.
- 太田英利・高橋亮雄 (2006) 琉球列島および周辺島嶼の陸生脊椎動物—特徴とその成り立ち—. 美ら島の自然史—サンゴ礁島嶼生態系の生物多様性, 琉球大学21世紀COEプログラム編集委員会編, 435 pp, 東海大学出版会, 東京: 2-15.
- Schmalfuss H. (2004) World catalog of terrestrial isopods (Isopoda: Oniscidea). http://www.oniscidea-catalog.naturkundemuseum-bw.de/cat_terr_isop.pdf
- 高橋祐衣・宮竹貴久 (2012) 沖縄島へのオカダンゴムシの侵入とダンゴムシ類の分布. *沖縄生物学会誌* 50: 83-91.
- 多紀保彦 (2008) 日本の外来生物. 479 pp, 平凡社, 東京.
- 寺田美奈子 (1995) ダンゴムシの飼育と観察. 土の中の生き物, 青木淳一・渡辺弘之監修, 183 pp, 築地書館, 東京: 96-105.
- 鷲谷いづみ (2007) 外来種の定着と侵略性の生態的要因. *Nippon Suisan Gakkaishi* 73: 1117-1120.
- Zimmer, M. (2002) Nutrition in terrestrial isopods (Isopoda: Oniscidea): an evolutionary, ecological approach. *Biological Reviews* 77: 455-493.

研究資料

社会的養育環境がアリの体サイズに与える影響：
異種間ブルード交換実験によるエピジェネティック効果の検証
—アリにおけるエピジェネティック効果—

吉原由紀子・小山 哲史・佐藤 俊幸[†]

Effect of social breeding environment to the body size of ants :
a test of epigenetic effects using inter-specific cross-fosterling experiments

Yukiko YOSHIHARA, Satoshi KOYAMA and Toshiyuki SATOH[†]

To clarify the social breeding environment affects phenotypes, especially body size of offspring, we performed inter-specific cross-fosterling brood rearing experiments by using a polygynous smaller ant species, *Camponotus yamaokai* and a monogynous larger ant species, *C. nawai*. As a result, body size of *C. nawai* reared by *C. yamaokai* became smaller than usual size. It was suggested that not only genetic factors but also epigenetic social rearing environments also affect body size of offspring.

Key words : social environment, ants, epigenesis, body size, cross-fosterling

養育環境の違いが、育てられる個体の表現型、特に形態形質に与える影響について明らかにすることを目的に、多女王制でより小型のヤマヨツボシオアリと単女王制でより大型のナワヨツボシオアリを用い、未成熟個体を入れ替え育てさせる交叉哺育実験を行った。その結果、より体サイズの小さいヤマヨツボシオアリに育てられたナワヨツボシオアリのワーカーの体サイズが通常より小さくなることが分かった。体サイズが遺伝的要因だけでなくエピジェネティックな要因、ワーカーという社会的な養育環境の違いによって影響を受けることが示唆された。

キーワード：社会環境、アリ、エピジェネシス、体サイズ、交叉保育

1. はじめに

体サイズは動植物の生活史特性に影響する重要な形質のひとつである (Stearns 1992)。社会性動物では、体サイズは、性選択におけるオス間闘争やメスの配偶者選択、血縁選択における繁殖個体と不妊個体の分化など、社会的な相互作用に影響し、したがってその種の交配様式やコロニーの社会構造にも関連する (Bourke & Franks 1995 ; Lindenfors & Tullberg 1998)。それらの複雑な社会組織のため、社会性昆虫は体サイズ変化の原因と結果を研究する

上で特に興味深い対象である (Oster & Wilson 1978 ; Bourke & Franks 1995 ; Burd 2000 ; Emlen & Nijhout 2000)。

社会性昆虫において、個体の体サイズとカースト (女王, ワーカーなど) は、遺伝子だけではなく、母性効果、環境要因、コロニーの社会的な状態など、ブルード (未成熟個体) が育てられる環境的な要因の影響を受けるかもしれない (Wheeler 1986 ; Bargum et al. 2004 ; Fjerdingstad 2005 ; Schwander et al. 2005)。

ブルードの養育環境、特に社会環境の重要な要素

2012. 12. 17受付 ; 2012. 12. 19受理

東京農工大学大学院農学研究院 Institute of Agriculture, Tokyo University of Agriculture and Technology

[†] 連絡担当著者：佐藤俊幸 Correspondence to: Toshiyuki SATOH, 東京農工大学大学院農学研究院 〒183-8509 東京都府中市幸町 3-5-8

は、養育を担当するワーカーによって構成される。ワーカーはブルードを保護し、給餌を行うが、育てるブルードの数や性比、与える餌資源の質や量の配分を操ることができる (Chapuisat & Keller 1999; Meunier et al. 2008)。したがって、繁殖の主導権を巡るコロニー内コンフリクト (Chapuisat & Keller 1999; Meunier et al. 2008)、繁殖カーストとワーカー・カースト、あるいは小型ワーカーと大型ワーカーのどちらを生産するかなど社会的な規制 (Rosenheim et al. 1996)、および女王やワーカー、幼虫といった巣仲間間の相互作用による間接的な遺伝的影響 (Linksvayer 2006) は、コロニーのメンバーの体サイズに影響するかもしれない。

雌アリが、不妊の働きアリになるか、それとも繁殖能力のある女王に成長するかを決定するのは、遺伝的に決定される例も報告されているが (*Pogonomyrmex*; Hölldobler 1976)、一般に遺伝的なものではなくむしろ環境的なものである。カーストにかかわらずなく、コロニーの中のどの雌アリも同じ遺伝子を持っている。遺伝子は女王にも働きアリにもなれる潜在能力を与えており、これを制御している環境要因は種によって違いさまざまな種類がある。ひとつは幼虫が受け取った餌の量と質であり、そのほかに幼虫が成長するときの巣の温度も関係がある。また、女王の存在の如何も重要な要因である (Hölldobler & Wilson 1997)。

いくつかの亜社会的、真社会的な種における、直接的、遺伝的母親効果を避ける一つの強力なアプローチとしては、cross-fostering (交叉哺育) がある (Cheverud 1984; Agrawal et al. 2001など)。産卵後に交叉哺育を行うことで親由来の影響と子供由来の影響を区別することができ (Agrawal et al. 2001)、真社会性動物においては、繁殖者、養育者、子供のそれぞれによる影響を区別することができる。しかし、子供が母体内にいる間の親子間の相互作用の影響については、完全には除去しきれないことに注意が必要である。交叉哺育による研究の一つの限界は、遺伝効果の見積もりが常に里子に出される以前の効果によって複雑化されることである (Lynch & Walsh 1998)。だが、アリにおける重量や性比については、実験前の効果については無視できると合理的に仮定することができる。操作前の幼虫の重量は成虫の重量を予測しないし、カースト決定は操作後に起こることが知られているからである (Wesson 1940)。

今回の実験においては、女王の存在しない実験コロニーを作成し、コロニーにおけるワーカーとブルードの数やワーカーに与える餌、温度条件といった環境を統一し、ワーカーを同種あるいは異種の異コロニーのワーカーと入れ替え、交叉哺育を行った。それにより、ワーカーによる餌の与え方や、もしくは幼虫による餌のねだり方の違いが幼虫の育ち方に与える影響について調べた。もしも成長したブルードのカーストや体サイズの違いが見られたならば、ワーカーによる餌の与え方や幼虫による餌のねだり方の違いといった後天的な養育環境の違いに起因する要因、言い換えればエピジェネティック (epigenetic) な要因による影響が見られたといえる。また、交叉哺育法を用いることにより、体サイズに与える影響が、ワーカー側の要因 (間接的効果) によるものなのか、それともブルード側の栄養要求の違いに起因するのか (直接的効果) を判別することができる。

本研究ではアリの成長における環境要因、特に異種のワーカーに養育させた場合の養育環境の違いが育てられるブルード表現型、特に形態形質に与える影響について明らかにすることを第一の目的として、交叉哺育、すなわち異種のブルードを交換した飼育実験を行った。合わせて異種のブルードを受け入れるかどうか、種によるパターンの違いも検討した。

2. 試料と方法

供試虫

オオアリ属 (*Camponotus*) の2種のアリ、ウメマツオオアリ亜属 (*Myrmamblys*) のヤマヨツボシオオアリ (*C. yamaokai*) 並びに姉妹種のナワヨツボシオオアリ (*C. nawai*) を用いた。

ヤマヨツボシオオアリは体長3.5~4.5 mm。体色は黒色で前胸は赤褐色、脚は褐色。腹部第1、第2節背板にはそれぞれ一対の白色円紋がある。樹上営巣性でナワヨツボシオオアリに類似するが、本種では大型、小型働きアリともに複眼がより突出し、頭部のサイズもそれぞれ小さいことで区別される。また腹柄節が小型働きアリでは側方から見てより薄く、大型働きアリでは背方から見てより薄くかつ左右に広い (Terayama & Satoh 1990)。本州、四国、九州に分布する。ナワヨツボシオオアリは単雌性で海岸付近に生息し、8月に結婚飛行が行われるのに対して、本種は多雌性でより内陸に生息し、新女王

は巢内で冬を越し、翌年の5月に巢内交配し、コロニーは巢分かれて増殖する (Satoh 1989)。

ナワヨツボシオオアリ (*C. nawai*) は体長4~4.5 mm, 体色は黒色で、前胸は赤褐色から黒褐色, 脚は褐色。腹部第1, 第2背板にはそれぞれ一對の白色円紋がある。ただしこの円紋は個体変異に富み, 良く発達するものからほとんど消失するものまである。側方から見て前伸腹節背縁は直線状, 腹柄節は薄い。日本の本州の中部以南に分布する。樹上営巢性で、枯れ枝等に巣をつくり, 8月に結婚飛行が見られる。ヤマヨツボシオオアリが多雌性で巢内交配, 巢分かれ繁殖し, また平野部から山地にかけて分布するのに対して, 本種は単雌性で海岸近くの林内に生息し, 巢外で交尾した女王が単独で越冬しコロニーを創設する (Satoh 1989)。

コロニー採集

ヤマヨツボシオオアリの採集は, 2008年2月に東京都八王子市のFM多摩丘陵の常緑広葉樹林内にて, および2009年2月に埼玉県狭山市の早稲田大学狭山キャンパスの常緑広葉樹林内で行った。ナワヨツボシオオアリの採集は2008年4月ならびに2009年3月に静岡県下田市の常緑広葉樹林内で行った。枝内部の巣を探すために, 枯れ枝を折り, 巣の存在を確認した場合, その周辺の枝も注意深く採集した後, 枝を実験室内に持ち帰った。実験室内で枝をバレット上で解体し, コロニーごとにプラスチックボックスに入れて飼育した。餌には10%スクロース水とタンパク質人工飼料 (ビーハッチャー: (株)日本配合飼料) を用いた。

飼育実験

若齢幼虫を同種他巢のワーカーや異種のワーカーに育てさせる, 交叉哺育デザインを用いて飼育を行った。方法は Linksvayer (2006), Meunier et al (2009) を参考とした。それぞれの組み合わせにおいて30匹のワーカー (うち25匹が小型ワーカー, 5匹が大型ワーカー。これは野外条件における比率と同程度である) と20匹の若齢幼虫によって構成される実験コロニーを用意した。図1のようなプラスチックのケース (縦23 mm×横75 mm×深さ17 mm) で飼育を行った。組み合わせは, ヤマ同巢 (コントロール), ヤマ⇒ヤマ (他巢), ヤマ⇒ナワ, ナワ同巢 (コントロール), ナワ⇒ナワ (他巢), ナワ⇒ヤマの6通りである (表1)。矢印の左側 (太字) が

幼虫を育てさせた側, 矢印の右側が幼虫を提供した側の種である。全期間を通じて25℃の恒温室で飼育を行った。プラスチックケースは段ボール箱に入れて内部を暗くし, 野外の光条件に近づけた。飼育は2009年3月2日に開始し, 投入した若齢幼虫が一通



図1. 実験コロニーの様子。左からワーカー (30匹), 幼虫 (20匹), エサの区画。

表1. 飼育組み合わせ。数値は実験コロニーの数。
() 内は投入ブルード数。
ブルード側

	同巢	同種異巢	異種
ワーカー側			
ヤマ	14 (280)	7 (140)	7 (140)
ナワ	14 (280)	7 (140)	7 (140)

合計56コロニー (全投入幼虫数は1120匹)

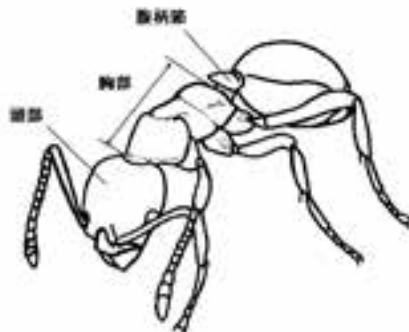


図2. アリ全体像 (小型ワーカー)。

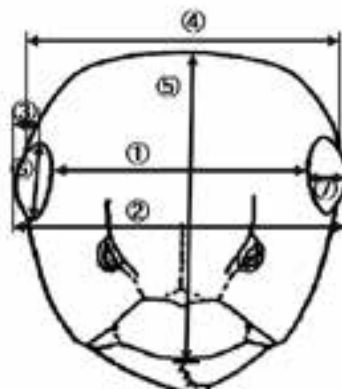


図3. アリの頭部と測定部位: ①目の内側の幅, ②目の外側の幅, ③目の高さ (厚さ), ④頭幅, ⑤頭長, ⑥目長径, ⑦目短径, ⑧触角長 (図には載せていない)。

*アリ類画像データベース2008年版 CD-ROM より引用

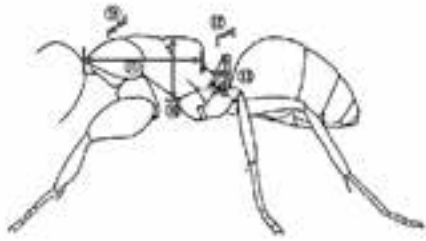


図4. アリ胸部、腹柄節、腹部の側方像と測定部位：
⑨前胸幅、⑩背中高、⑪背中長、⑫腹柄節幅、
⑬腹柄節高、⑭腹柄節厚。

* アリ類画像データベース2008年版 CD-ROM より引用

り羽化した8月21日に終了した。

それぞれの実験コロニーについて、ワーカーが卵を養育しているか、また成長の様子についての観察を一週間に3回行い、常に十分に水と餌があるようにした。観察の際に新たにワーカーによる産卵が発見されたら、随時その卵を取り除いた。幼虫が羽化したものについてはそのカーストについて記録を行い、羽化したものについては、実体顕微鏡下で①目の内側の幅、②目の外側の幅、③目の高さ(厚さ)、④頭幅、⑤頭長、⑥目長径、⑦目短径、⑧触角長、⑨前胸幅、⑩背中高、⑪背中長、⑫腹柄節幅、⑬腹柄節高、⑭腹柄節厚の各項目について計測した(図2, 3, 4参照)。

3. 結果

1) 受入状況と羽化数

巣ごとの受け入れの状況は表2のようになった。ナワ(異なるコロニー)⇒ナワとナワ同巣で差が見られないため、合わせてナワが育てたナワとした。ヤマ⇒ヤマとヤマ同巣についても同様に差が見られないため、合わせてヤマが育てたヤマとした。

単単位で受け入れの可否について、ヤマが育てたヤマとナワが育てたヤマを比較すると有意差が見られ、ナワは有意にヤマを受け入れにくかった(Fisherの正確確率検定(両側検定)、以下同じ： $p=0.0107$)。受け入れの可否についてヤマが育てたナワとナワが育てたナワを同様に比較すると、差が見られなかった($p=0.2500$)。受け入れの可否についてヤマ⇒ナワとナワ⇒ヤマを比較したところ、有意差は見られなかった($p=0.5594$)。

受け入れ巣数と羽化巣数の比較を行った。ヤマが育てたヤマとナワが育てたヤマの比較をおこなったところ差は見られず、ヤマとナワでヤマの羽化させやすさに違いはなかった($p=0.6330$)。ヤマが育てたナワとナワが育てたナワについても同様であった($p=0.4728$)。また、ヤマ⇒ナワとナワ⇒ヤマを比較したところ有意差は見られなかった($p=$

表2. ブルードの受け入れ、蛹化、羽化の状況。矢印の左側(太字)が幼虫を育てさせた側、矢印の右側が幼虫を提供した側の種。

ワーカー側 ⇒ブルード側	受入巣/実験巣数 (割合%)	蛹化巣/実験巣数 (割合%)	羽化巣/実験巣数 (割合%)
ヤマ⇒ナワ	6 / 7 (86)	3 / 7 (43)	3 / 7 (43)
ヤマ⇒ヤマ	7 / 7 (100)	6 / 7 (86)	6 / 7 (86)
ヤマ同巣	14 / 14 (100)	9 / 14 (64)	8 / 14 (57)
ナワ⇒ヤマ	4 / 7 (57)	1 / 7 (14)	1 / 7 (14)
ナワ⇒ナワ	7 / 7 (100)	7 / 7 (100)	7 / 7 (100)
ナワ同巣	14 / 14 (100)	14 / 14 (100)	14 / 14 (100)
ヤマに育てられたヤマ	21 / 21 (100)	15 / 21 (71)	14 / 21 (67)
ナワに育てられたナワ	21 / 21 (100)	21 / 21 (100)	21 / 21 (100)

表3 ブルードの受け入れ状況(個体)。

ワーカー側 ⇒ブルード側	蛹化数/投入ブルード数 (割合%)	羽化数/投入ブルード数 (割合%)
ヤマ⇒ナワ	14 / 140 (10)	7 / 140 (5)
ヤマ⇒ヤマ	35 / 140 (25)	27 / 140 (19)
ヤマ同巣	39 / 280 (14)	31 / 280 (11)
ナワ⇒ヤマ	3 / 140 (2)	1 / 140 (0.7)
ナワ⇒ナワ	51 / 140 (36)	35 / 140 (25)
ナワ同巣	126 / 280 (45)	90 / 280 (32)

表4 羽化したブルードのカースト。

羽化したブルードの数	小型	大型	女王	オス	全体	投与したブルード数
ヤマ⇒ナワ	5	0	0	2	7	140
ヤマ⇒ヤマ	27	0	0	0	27	140
ヤマ同巢	29	2	0	0	31	280
ナワ⇒ヤマ	0	0	1	0	1	140
ナワ⇒ナワ	24	4	0	7	35	140
ナワ同巢	58	15	0	17	90	280
全体	143	21	1	26	191	1120
ヤマに育てられたヤマ	56	2	0	0	58	420
ナワに育てられたナワ	82	19	0	24	125	420

1.0000)。

投入した計1120匹の幼虫のうち、小型ワーカーが143匹、大型ワーカーが21匹、女王が1匹、オスが26匹羽化に至った。小型ワーカーはナワ⇒ヤマ以外のいずれの組み合わせでも羽化したが、大型ワーカーはヤマ同巢、ナワ⇒ナワ、ナワ同巢でのみ、女王はナワ⇒ヤマでのみ、またオスはヤマ⇒ナワ、ナワ⇒ナワ、ナワ同巢でのみ羽化した。

次に個体単位で比較を行った(表3)。ヤマ⇒ヤマとヤマ同巢において、羽化しやすさ ($p=0.0561$) や各カーストになりやすさ ($p=0.49361$) について有意差が見られないため、合わせてヤマに育てられたヤマとした。ナワ⇒ナワとナワ同巢についても羽化しやすさ ($p=0.2771$) や各カーストになりやすさ ($p=0.5777$) において同様に有意差が見られず、合わせてナワに育てられたナワとした。

ヤマに育てられたヤマとヤマ⇒ナワを比較したところ、ヤマは異種を有意に育てなかった ($p=0.0126$)。同様に、ナワに育てられたナワとナワ⇒ヤマを比較したところ、ナワも有意に異種を育てなかった ($p<0.001$)。ヤマとナワを比較すると、ヤマの方が異種を育てやすい傾向が見られた ($p=0.0670$)。

各カーストへのなりやすさについての比較も行った(表4)。ナワのブルードはヤマに育てられてもナワに育てられてもカースト分化に変化は見られなかった ($p=0.5827$)。ヤマが育てたヤマとナワが育てたナワを比較すると、有意にナワの方が大型ワーカーを育てやすかった ($p=0.0064$)。ヤマに育てられたヤマとナワに育てられたナワでは有意にナワに育てられたナワの方にオスが多く見られた ($p=0.0011$)。1例ではあるが、女王が羽化したのはナワにヤマのブルードを育てさせた場合だけで

あった。

2) 形態

小型ワーカーはヤマ⇒ナワ(5匹)ヤマ⇒ヤマ(27匹)、ヤマ同巢(29匹)、ナワ⇒ナワ(24匹)、ナワ同巢(58匹)の組み合わせで羽化が見られた。ナワ⇒ヤマでは小型ワーカーは見られなかった。実体顕微鏡下で各形態項目について計測した(図2, 3, 4, 5)。

ナワ⇒ナワとナワ同巢、ヤマ⇒ヤマとヤマ同巢で部位によっては有意差が出て、合わせることができなかった。ナワ⇒ナワとナワ同巢で有意差が出たのは、目短径(ならべかえ検定, 以下同じ: $p=0.0269$)、頭長($p=0.0139$)、前胸幅($p=0.0311$)、触角長($p=0.0163$)、背中高($p=0.0031$)、腹柄節厚($p=0.0331$)であり、すべてナワ⇒ナワの方が大きかった。ヤマ⇒ヤマとヤマ同巢で有意差が出たのは、目長径($p=0.0467$)、目短径($p=0.0030$)、触角長

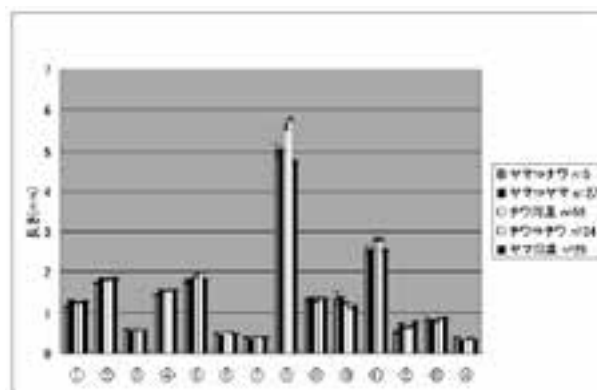


図5. 飼育実験で羽化した小型ワーカーの形態の実測値(平均値と標準偏差): ①目の内側の幅, ②目の外側の幅, ③目の高さ(厚さ), ④頭幅, ⑤頭長, ⑥目長径, ⑦目短径, ⑧触角長, ⑨前胸幅, ⑩背中高, ⑪背中長, ⑫腹柄節幅, ⑬腹柄節高, ⑭腹柄節厚。

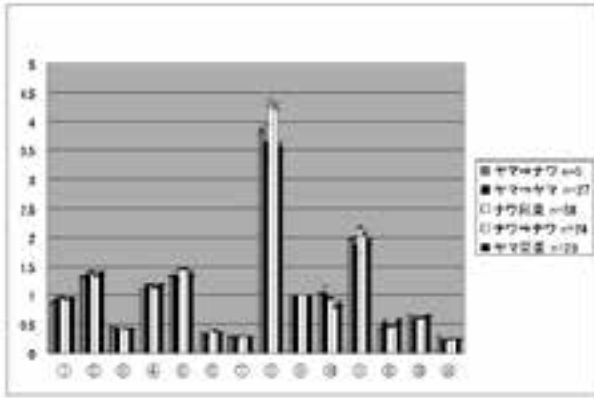


図6. 小型ワーカーの計測値を標準化。縦軸は実測値 / 前胸幅。番号は図5に同じ。

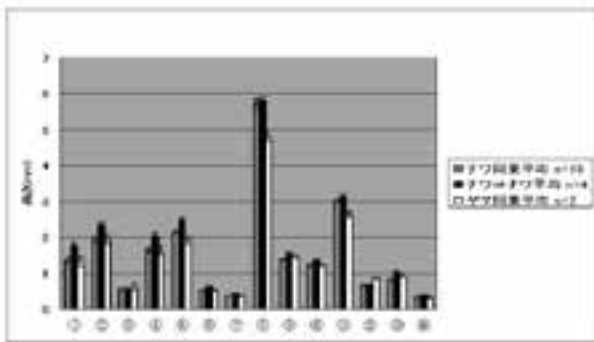


図7. 飼育実験で羽化した大型ワーカーの形態の実測値：番号は図5に同じ。

($p=0.0245$), 背中高 ($p<0.0001$) であり, 目長径, 目短径についてはヤマ同巢の方が大きく, 触角長, 背中高についてはヤマ⇒ヤマの方が大きかった。

ヤマ⇒ナワとナワ⇒ナワを比較したところ, 目の厚みは, ヤマ⇒ナワの方がナワ⇒ナワに比べて有意に厚く ($p=0.0226$), 頭長はヤマ⇒ナワの方がナワ⇒ナワに比べて有意に短く ($p=0.0037$), 触角長は, ヤマ⇒ナワがナワ⇒ナワに比べて有意に短く ($p<0.001$), 他の部位については有意差が見られなかった。

ナワ⇒ヤマとヤマ⇒ヤマについては, ナワ⇒ヤマにおいて小型ワーカーが羽化しなかったために比較ができなかった。

また, 計測した各項目について, 前胸幅で除して標準化した (図6)。ヤマ⇒ナワとナワ⇒ナワを比較したところ, 実測値では有意差が見られた目の厚み・頭長・触角長において, ともに有意差は見られなかった。つまりプロポーションとしては大きな変化はなかったといえる。

大型ワーカーについて。ヤマ同巢 (2匹), ナワ⇒ナワ (4匹), ナワ同巢 (15匹) の組み合わせで羽化が見られた。実体顕微鏡下で各形態項目につい

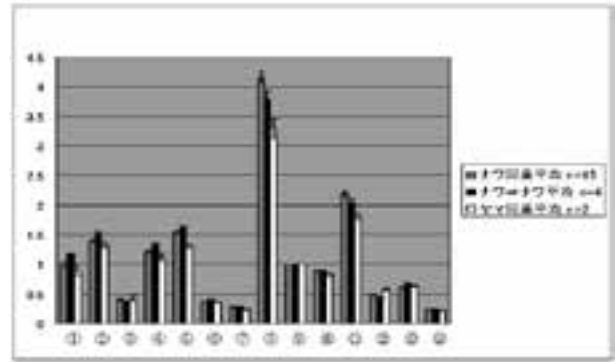


図8. 大型ワーカーの計測値を標準化。縦軸は実測値 / 前胸幅。番号は図5に同じ。

て計測した (図2, 3, 4, 7)。

大型ワーカーの羽化が得られた3つの組み合わせについて比較検討したところ, 以下のことがわかった。頭幅 (目含む) は, ナワ⇒ナワが有意に大きいかその傾向があり (ナワ同巢とナワ⇒ナワ間の Kruskal-Wallis 検定, 以下同じ: $p=0.0097$, ナワ⇒ナワとヤマ同巢: $p=0.0598$, ナワ同巢とヤマ同巢: $p=0.8305$), 頭長は, ナワ⇒ナワが有意に大きいかその傾向があり (ナワ同巢とナワ⇒ナワ: $p=0.0418$, ナワ⇒ナワとヤマ同巢: $p=0.0598$, ナワ同巢とヤマ同巢: $p=0.2434$), 目長径は, ナワ⇒ナワが有意に大きいかその傾向があり (ナワ同巢とナワ⇒ナワ: $p=0.0211$, ナワ⇒ナワとヤマ同巢: $p=0.0598$, ナワ同巢とヤマ同巢: $p=0.8842$), 触角長はヤマ同巢が有意に短い傾向があり (ナワ同巢とナワ⇒ナワ: $p=0.8099$, ナワ⇒ナワとヤマ同巢: $p=0.0598$, ナワ同巢とヤマ同巢: $p=0.0396$), 前胸幅はナワ同巢はナワ⇒ナワより有意に小さく (ナワ同巢とナワ⇒ナワ: $p=0.0474$, ナワ⇒ナワとヤマ同巢: $p=0.4228$, ナワ同巢とヤマ同巢: $p=0.2120$), 背中高は, ヤマ同巢が小さい傾向が見られ (ナワ同巢とナワ⇒ナワ: $p=0.4956$, ナワ⇒ナワとヤマ同巢: $p=0.0534$, ナワ同巢とヤマ同巢: $p=0.1018$), 腹柄節幅はヤマ同巢が大きい傾向がみられ (ナワ同巢とナワ⇒ナワ: $p=0.4942$, ナワ⇒ナワとヤマ同巢: $p=0.0534$, ナワ同巢とヤマ同巢: $p=0.0473$), 腹柄節高は, ナワ⇒ナワの方がナワ同巢よりも有意に大きかった (ナワ同巢とナワ⇒ナワ: $p=0.0310$, ナワ⇒ナワとヤマ同巢: $p=0.4228$, ナワ同巢とヤマ同巢: $p=0.2763$)。

また, 計測した各項目について, 前胸幅で除して標準化した (図8)。いずれの部位, 組み合わせに

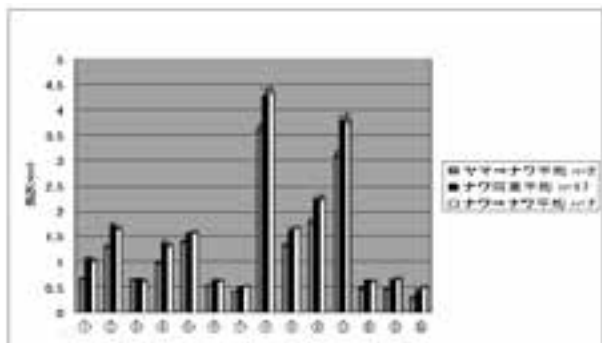


図9. 飼育実験で羽化したオスの形態の実測値：番号は図5に同じ。

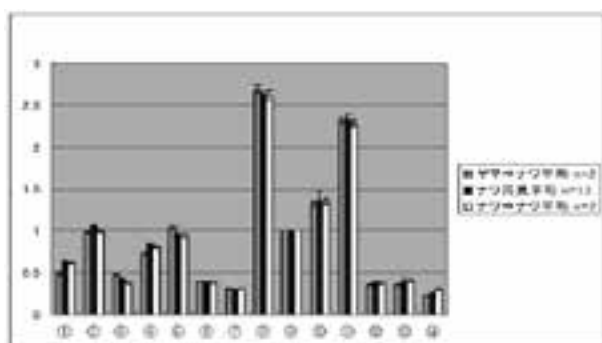


図10. オスの計測値を標準化。縦軸は実測値/前胸幅。番号は図5に同じ。

についても有意差は見られなかった。各部位の大きさとしては違いが見られるものの、プロポーションとしては大きな違いがないといえる。

オスについて。ヤマ⇒ナワ (2匹), ナワ⇒ナワ (7匹), ナワ同巣 (17匹) の組み合わせで羽化が見られた。実体顕微鏡下で各形態項目について計測した (図2, 3, 4, 9)。

目の厚み, 目短径, 腹柄節以外で, ヤマ⇒ナワが他の組み合わせに比べて小さい傾向が見られた。そのうち, 頭幅 (ヤマ⇒ナワ: $p=0.0238$, ナワ⇒ナワとナワ同巣: $p=0.9018$, ヤマ⇒ナワとナワ⇒ナワ: $p=0.0299$) については有意であった。

また, 計測した各項目について, 前胸幅で除して標準化した (図10)。目の厚みは, ナワ⇒ナワよりヤマ⇒ナワの方が有意に厚かった (ナワ⇒ナワとヤマ⇒ナワ間のならべかえ検定: $p=0.0278$), つまりヤマに育てられたものの方が目が厚くなった。

4. 考 察

直接効果, 間接効果共に多くの分類群でサイズの変異に貢献していることと共に, 体サイズの遺伝的要素については多くの生物で明らかにされている (Roff 1997など)。社会性昆虫のサイズの変異の遺

伝的背景に関する先行研究は, 社会的な環境の影響を示唆している (Goodisman et al. 1999など)。母親効果や血縁社会効果の体サイズへの影響の遺伝可能性の推定に関する近年の研究は, 社会環境が強く体サイズに影響し, さらには社会環境が遺伝的背景をもつことを確かめている。

体サイズとは対照的に, 社会性昆虫において, カーストや性への遺伝的影響は普段考えない (Crozier & Pamilo 1996)。カースト決定は, 環境要因に応じて条件付で起こるとみなされる (たとえば栄養の質や量など)。単数性単為生殖において, 性は卵が受精したかどうかで決まり, 社会性昆虫の性比のモデルは一般的にコロニーサイズや巣仲間の血縁度といった社会的要因が焦点とされる (Crozier & Pamilo 1996; Pamilo 1982; Roisin & Aron 2003; Helms et al. 2005)。しかしながら, カーストへの直接的遺伝要素 (Kerr 1950; Winter & Buschinger 1986; Julian et al. 2002; Volny & Gordon 2002), 女王の多型性 (Buschinger 2005), ワーカーの多型性 (Hughes et al. 2003; Rheindt et al. 2005など) が多くの社会性昆虫の分類群で明らかにされた。さらに, ミツバチのコロニーにおいて, 亜科の構成員の各個体がワーカーと対比して女王を飼育する可能性に影響を与えることがわかっており (Page et al. 1989; Robinson et al. 1994), カースト比の血縁社会的遺伝的分散を示唆している。他の研究では, アリにおいてももとの性比の母親効果による遺伝的分散が明らかにされ (Passera et al. 2001; Rosset & Chapuisat 2006), ミツバチの巣箱内でつくられた蜂の巣内のオスの割合は, ワーカーコントロールの影響を受ける形質であるが, 遺伝可能性が示されており (Page et al. 1993), 性比への血縁社会の遺伝的分散を示唆している。これらの研究は, 近年の研究結果とともに, カースト比や性比への直接的遺伝的影響と間接的遺伝的影響が以前考えられていたよりも大きいかもしれないことを示唆している (Linksvayer et al. 2006)。

4-1) ブルードの受け入れやすさについて

ヤマの方が異種を受け入れやすいが, ヤマもナワも受け入れてしまえば異種, 同種にかかわらず育てる傾向がある。ヤマの方が異種を受け入れやすいのは多女王制の影響かもしれない。ヤマは多女王制のため, 同巣内に複数の女王から生まれたブルードが存在するので, 体表の化学物質の違いに基づく巣仲間識別がより困難と推測されるために, 異種をも受

け入れやすいのかもしれない。反対に、ナワは単女王制であるために、ワーカーの巣仲間識別が厳しく、結果としてより異種を受け入れにくいのだと考えられる。実験を通して、ヤマもナワも同種異巣を受け入れている様子が見られた。

4-2) 各カーストへのなりやすさについて

ナワのブルードはヤマに育てられてもナワに育てられてもカースト分化に変化は見られなかったが、ヤマが育てたヤマとナワが育てたナワを比較すると、有意にナワの方が大型ワーカーを育てやすかった。ヤマとナワのブルードでは栄養要求量が異なり、ナワのブルードの方がよりワーカーに給餌を要求すること、一方でナワよりもヤマのワーカーの方がより給餌を制限して少なく栄養を与える傾向があること、2つの要因の相互作用が、このような違いをもたらすのかもしれない。1例だけではあるが女王が羽化したのはナワのワーカーにヤマのブルードを育てさせた場合だけだったことは、ナワのワーカーのブルードへの栄養供給量が基本的にヤマのそれより高いからかもしれない。

ヤマに育てられたヤマとナワに育てられたナワでは、有意にナワに育てられたナワの方にオスが多く見られた。これはナワが単女王制で巣外交配を行うためにオスを多く産出することと一致する。

4-3) 環境要因がブルードの形態形質に与える影響について

ヤマ⇒ナワとナワ⇒ナワの小型ワーカーについて形態を比較したところ、ヤマに育てられたナワのほうが小型化している傾向が見られた。ナワ⇒ヤマとヤマ⇒ヤマの組み合わせにおいて差異が出なかったのにもかかわらず、ヤマ⇒ナワとナワ⇒ナワの組み合わせにおいて差異が出ていたことから、この後天的な違いはブルード側の栄養要求量の違いによる要因と、ワーカー側の給餌制限による要因の両方が考えられる。ナワに育てられたヤマとヤマに育てられたヤマで差異が出なかったのは、ヤマのブルードは栄養要求量が少なく、ワーカー側はブルードの要求に応じて給餌したために成長に違いが現れなかったのであろう。反対に、ヤマ⇒ナワとナワ⇒ナワの小型ワーカーについて形態を比較したところ、ヤマに育てられたナワのほうが小型化している傾向が見られたのは、ワーカー側の給餌制限によるものだと考えられる。つまり、ナワのブルードに対してヤマのワーカーが給餌を制限して行ったために、ナワのブルードは小型化してヤマの形態に近づいたのではな

いか。自然状態において、ヤマの小型ワーカーはナワよりも小さく、目が突出する傾向があることから、ナワのヤマ化が起こったといえる。多女王制で複数の女王が産卵するためワーカーあたりの幼虫数が多いヤマでは (Satoh 1989)、幼虫も栄養要求を控え、ワーカーも給餌を制限し、ナワに比べより小型のワーカーが生産され、そのかわり育てられるワーカー数を最大化するようなシステムが進化しているのかもしれない。前胸幅で除して標準化し、プロポーションを比較したところ、大きな違いが見られなかった。このことから、体サイズの違いは見られなかったもの、形態についての大きな変化はみられなかったことがわかる。エピジェネティックな社会的養育環境の変化は、ワーカーの形態というよりは体サイズにより大きく影響したものと考えられる。

大型ワーカーについて。腹柄節幅における違いについては、元来ヤマの方がナワよりも広いため (Terayama & Satoh 1990)、妥当な結果であるといえる。羽化した大型ワーカーは全体的にナワ⇒ナワの方がナワ同巣よりも大きい傾向が見られた。同様の傾向が小型ワーカーでも見られたので、ナワのブルードは異巣のワーカーに対してより栄養要求量が大きく、かつ/または、ナワのワーカーは異巣のブルードに対しより制限せずに栄養を供給するのかもしれない。このメカニズムや意義については現段階では不明だが、巣内環境、特にコロニー固有の臭いの違いがブルードとワーカーのインタラクションに何らかの変化をもたらしたのかもしれない。ヤマ⇒ヤマとヤマ同巣に関しては、そのような傾向は見られなかった。サンプル数が少ないために差が出なかったのかもしれないため、今後よりサンプル数を増やして実験を行うことで比較ができるようになるであろう。また、計測した各項目について、前胸幅で除して標準化した (図8)。いずれの部位、組み合わせについても有意差は見られなかった。各部位の大きさとしては違いが見られるものの、プロポーションとしては大きな違いがないといえる。

オスについて。ヤマ⇒ナワが全体的に小さかったのは、ヤマのワーカーがナワのワーカーに比べて栄養を制限してブルードに与えているからかもしれない。これについては、ヤマがブルードである組み合わせにおいてオスが得られなかったため、ブルード側の栄養要求量によるものなのかどうかは判別できないが、小型ワーカーや大型ワーカーの結果と照らし合わせるとワーカー側の給餌制限による可能性が

高い。また、計測した各項目について、前胸幅で除して標準化しプロポーションを見ると、目の厚みは、ナワ⇒ナワとヤマ⇒ナワで有意に異なり、ヤマに育てられたナワの方が目が厚くなった。これは、ヤマの方が給餌を制限したために頭部が小さくなり、結果として目の突出が大きくなった、すなわちオスもヤマ化した可能性を示唆する。小型ワーカーや大型ワーカーではプロポーションに変化が現れなかったのに対しオスで変化が見られたことから、オスが形態においてエピジェネティックな変化をより受けやすい可能性がある。ナワ⇒ナワとナワ同巢については違いが見られなかったのは、同種であれば異巢・同巢の区別なく同じように育てられているからだといえる。この点については小型ワーカーや大型ワーカーにおける傾向とは異なる。オスのブルードは環境が変わってもワーカーに対する栄養要求量が変わらなく、かつ／または、ワーカー側のオスに対する栄養供給に環境の変化は影響しないために、体サイズに変化が見られないのかもしれない。

自然状態においてヤマの方がナワに比べやや小型であることと照らし合わせると、この2種のアリの体サイズの違いの要因の1つはブルードに与えられる栄養量によるものであるといえる。さらに、交叉哺育によって成長に変化が見られたことから、ブルードの大きさに与える社会的要因による影響は大きく、カースト分化だけでなく同じカースト内の体サイズやプロポーションの違いにもエピジェネティックな変化がアリにおいて起こるといえることが示された。ヤマヨツでは多女王制のため複数の女王が産卵し、ワーカーあたりのブルード数が単女王制のナワより多く、幼虫もワーカーも栄養要求・供給を制限するようなメカニズムが進化したため、今回のエピジェネティックな効果の違いが得られたのではないかと。本実験において、体サイズが、遺伝的要因だけでなく環境要因、すなわち養育する側のワーカーという社会的な環境の違いによって影響を受けることがわかった。交叉哺育法によって後天的な影響について確認することができたといえる。今後、サンプル数を増やしていけば、社会的な要因がブルードの成長に与える影響について更なる研究が可能であろう。また、野外においても、巢内の社会的な環境が変化していくことで、遺伝的分化のみならず形態形質の分化もより大きくなり、いずれは種の分化につながる可能性も示唆される。

謝辞

採集にあたり協力してくださった動物行動学研究室の諸氏、施設を貸してくださった筑波大学下田臨海実験センターの皆様、複数回にわたり快くアリの採集をさせてくださった早稲田大学人間科学部の大堀聡先生、東京農工大学FM多摩丘陵の原宏教授にお礼申し上げます。また、本研究をまとめるにあたり様々な助言をくださった研究室の先輩方、同期、後輩の皆様感謝いたします。

引用文献

- Agrawal A.F., Brodie III E.D. & Wade M.J. 2001. On indirect genetic effects in structured populations. *Am. Nat.* 158 : 308–323.
- Bargum K., Boomsma J. J. & Sundstroem L. 2004. A genetic component to size in queens of the ant, *Formica truncorum*. *Behav. Ecol. Soc.* 57 : 9–16.
- Bourke A. F. G. & Franks N. R. 1995. *Social evolution in ants*. Princeton University Press, Princeton, NJ.
- Burd M. 2000. Body size effects on locomotion and load carriage in the highly polymorphic leaf-cutting ants *Atta colombica* and *Atta cephalotes*. *Behav. Ecol.* 11 : 125–131.
- Buschinger A. 2005. Experimental evidence for genetically mediated queen polymorphism in the ant species *Myrmecina graminicola* (Hymenoptera: Formicidae). *Entomol. Gen.* 27 : 185–200.
- Chapuisat M. & Keller L. 1999. Testing kin selection with sex allocation data in eusocial Hymenoptera. *Heredity* 82 : 473–478.
- Cheverud J. M. 1984. Quantitative genetics and developmental constraints on evolution by selection. *J. Theor. Biol.* 110 : 155–171.
- Cheverud J. M. & Moore A. J. 1994. Quantitative genetics and the role of the environment provided by relatives in behavioral evolution. In : Boake C. R. B., ed. *Quantitative Genetic Studies of Behavioral Evolution*. Chicago : University of Chicago Press : 67–100.
- Crozier R. H. & Pamilo P. 1996. *Evolution of social insect colonies : sex allocation and kin selection*. Oxford Univ. Press, New York.
- Emlen D. J. & Nijhout H.F. 2000. *The development*

- and evolution of exaggerated morphologies in insects. *Ann. Rev. Ent.* 45 : 661–708.
- Fjerdingstad E. J. 2005. Control of body size of *Lasius niger* ant sexuals : worker interests, genes and environment. *Mol. Ecol.* 14 : 3123–3132.
- Goodisman M. A. D., Mack P. D., Pearse D. E. & Ross K. G. 1999. Effects of a single gene on worker and male body mass in the fire ant *Solenopsis invicta* (Hymenoptera : Formicidae). *Ann. Entomol. Soc. Am.* 92 : 563–570.
- Helms K. R., Reuter M. & Keller L. 2005. Sex-ratio conflict between queens and workers in eusocial Hymenoptera : mechanisms, costs, and the evolution of split colony sex ratios. *Evolution* 59 : 2626–2638.
- Hölldobler B. 1976. Recruitment behavior, home range orientation and territoriality in harvester ants, *Pogonomyrmex*. *Behav. Ecol. Sociobiol.* 1 : 3–44.
- Hölldobler B. & Wilson E. O. 1997. 邦訳「蟻の自然誌」(辻和樹, 松本忠夫 訳) p.57. 朝日新聞社
- Hughes W. O. H., Sumner S., Van Borm S. & Boomsma J. J. 2003. Worker caste polymorphism has a genetic basis in *Acromyrmex* leaf-cutting ants. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* 100 : 9394–9397.
- Julian G. E., Fewell J. H., Gadau J., Johnson R. A. & Larrabee D. 2002. Genetic determination of the queen caste in an ant hybrid zone. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* 99 : 8157–8160.
- Kerr W. E. 1950. Genetic determination of caste in the genus *Melipona*. *Genetics* 35 : 143–152.
- Lindfors P. & Tullberg B. S. 1998. Phylogenetic analyses of primate size evolution : the consequences of sexual selection. *Biol. J. Linn. Soc.* 64 : 413–447.
- Linksvayer T. A. 2006. Direct, maternal, and sibsocial genetic effects on individual and colony traits in an ant. *Evolution* 60 : 2552–2561.
- Lynch M. & Walsh B. 1998. Genetics and analysis of quantitative traits. 1st ed. Sinauer Associates, Sunderland, MA.
- Meunier J., West S. A. & Chapuisat M. 2008. Split sex ratios in the social Hymenoptera : a meta-analysis. *Behav. Ecol.* 19 : 382–390.
- Meunier J., West S. A. & Chapuisat M. 2009. The determinants of queen size in a socially polymorphic ant. *J. Evol. Biol.* 22 : 1906–1913.
- Oster G. F. & Wilson E. O. 1978. Caste and ecology in the social insects. Princeton University Press, Princeton, NJ.
- Page Jr. R. E., Robinson G. E. & Fondrk M. K. 1989. Genetic specialists, kin recognition and nepotism in honeybee colonies. *Nature* 338 : 576–579.
- Page Jr. R. E., Fondrk M. K. & Robinson G. E. 1993. Selectable components of sex allocation in colonies of the honeybee (*Apis mellifera* L.). *Behav. Ecol.* 4 : 239–245.
- Pamilo P. 1982. Genetic evolution of sex ratios in eusocial Hymenoptera : allele frequency simulations. *Am. Nat.* 119 : 638–656.
- Passera L., Aron S., Vargo E. L. & Keller L. 2001. Queen control of sex ratio in fire ants. *Science* 293 : 1308–1310.
- Rheindt F. E., Strehl C. P. & Gadau J. 2005. A genetic component in the determination of worker polymorphism in the Florida harvester ant *Pogonomyrmex badius*. *Insectes Soc.* 52 : 163–168.
- Robinson G. E., Page Jr. R. E. & Arensen N. 1994. Genotypic differences in brood rearing in honey bee colonies : context specific? *Behav. Ecol. Sociobiol.* 34 : 125–137.
- Roff D. A. 1997. Evolutionary quantitative genetics. Chapman and Hall, New York.
- Roisin Y. & Aron S. 2003. Split sex ratios in perennial social Hymenoptera : a mixed evolutionary stable strategy from the queen's perspective? *Am. Nat.* 162 : 624–637.
- Rosenheim J. A., Nonacs P. & Mangel M. 1996. Sex ratios and multifaceted parental investment. *Am. Nat.* 148 : 501–535.
- Rosset H. & Chapuisat M. 2006. Sex allocation conflicts in ants : when the queen rules. *Curr. Biol.* 16 : 328–331.
- Satoh T. 1989. Comparisons between two apparently distinct forms *Camponotus nawai* Ito (Hymenoptera : Formicidae). *Ins. Soc.* 36 : 277–292.
- Schwander T., Rosset H. & Chapuisat M. 2005. Division of labour and worker size polymorphism in

- ant colonies : the impact of social and genetic factors. *Behav. Ecol. Soc.* 59 : 215–221.
- Stearns S.C. 1992. *The evolution of life histories*. Oxford University Press, Oxford.
- Terayama M. & Satoh T. (1990). A new species of the genus *Camponotus* from Japan, with notes on two forms of the subgenus. *Jap. J. Entomol.* 58(2) : 405–414.
- Volny V.P. & Gordon D. M. 2002. Genetic basis for queenworker dimorphism in a social insect. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* 99 : 6108–6111.
- Wesson L. G. 1940. An experimental study on caste determination in ants. *Pshyche* 47 : 105–111.
- Wheeler D. E. 1986. Developmental and physiological determinants of caste in social Hymenoptera : evolutionary implications. *Am. Nat.* 128 : 13–34.
- Winter U. & Buschinger A. 1986. Genetically mediated queen polymorphism and caste determination in the slave-making ant, *Harpagoxenus sublaevis* (Hymenoptera ; Formicidae). *Entomol. Gen.* 11 : 125–137.

研究資料

スギ・ヒノキ人工林溪流における水生生物の生息状況

—東京農工大学フィールドミュージアム唐沢山における事例—

渡邊 祐介^{*1†}・五味 高志^{*1}・布川 雅典^{*2}・境 優^{*1}

Macroinvertebrates in headwater streams of Japanese cypress and Japanese cedar forests: A case study in Field Museum Karasawayama

Yu'usuke WATANABE^{*1†}, Takashi GOMI^{*1}, Masanori NUNOKAWA^{*2} and Masaru SAKAI^{*1}

We collected drifting and benthic invertebrates in headwater streams of Japanese cypress and Japanese cedar forests in Field Museum (FM) Karasawayama. We collected 2318 individuals representing 44 taxa of drifting invertebrates, and 2239 individuals representing 46 taxa of benthic invertebrates. Chironomidae dominated in both drifting and benthic invertebrates, followed by *Nemoura* spp. and *Dixa* spp. Because these dominant groups are known to prefer sandy and muddy substrate, our streams tended to be depositional environment of organic matters and fine sediment.

Keywords: benthic invertebrate, conifer plantation, drifting invertebrate, headwater catchment

フィールドミュージアム唐沢山 (FM 唐沢山) 内の20年生から50年生のスギ・ヒノキ人工林流域において、2011年4月から12月にかけて流下水生生物および底生水生生物を採集し、それらの種数と捕獲個体数を記録した。44分類群、2318個体の流下水生生物と、46分類群、2239個体の底生生物が捕獲された。流下生物の種数が底生生物の出現種数と比較して少ないことから、流下生物は河床に生息している底生生物の一部が流下してきたものであることが分かった。これらの種のうち、最も個体数が多かったのはユスリカ科 (Chironomidae) であり、その次にオナシカワゲラ属 (*Nemoura* spp.) やホソカ属 (*Dixa* spp.) が確認できた。これらの種は砂泥質を好んで生息することから、本研究調査溪流は有機物や細粒土砂が堆積しやすいといった特徴があると判断できた。

キーワード: 底生生物, スギ・ヒノキ人工林, 流下生物, 上流域

1. はじめに

山地上流域の水生昆虫群集は、溪流内の生息環境のみならず、河畔林などの周辺環境からも影響を受けている (Gregory et al., 1991)。落葉・落枝といった河畔林から供給される他生性有機物が殆どを占め、これらが溪流内における重要なエネルギー源であることがわかっている (Fisher and Likens,

1973)。また、倒木の供給によって淵・カバー構造が形成または改変されることで、流下してくるリターや土砂を捕捉し、長期にわたって河床地形に影響を与えている (Nakamura and Swanson, 1993)。水生昆虫群集には、摂食嗜好性の違いから河川へ供給された有機物をより細かい有機物へと変える分解者や、溪流内で生産された藻類を餌とするもの、より高次の捕食者などがあり、溪流環境や河畔林から

2012. 12. 19受付; 2012. 12. 25受理

^{*1} 東京農工大学農学府国際環境農学専攻 (Department of International Environmental and Agriculture Science, Tokyo University of Agriculture and Technology, Fuchu, Japan)

^{*2} 北海道大学農学院環境資源学専攻 (Division of Environmental Resources, Hokkaido University, Sapporo, Japan)

† 連絡担当著者: 渡邊祐介 Correspondence to: Yu'usuke Watanabe, 東京農工大学農学府国際環境農学専攻 〒183-8509 東京都府中市幸町 3-5-8

の餌資源の量により優占する種数や現存量が異なることが報告されている (Cummins, 1974)。このことから、山地上流域の森林管理や河川管理においては、溪流環境の保全のみならず河川と河畔域の相互作用も検討する必要がある。

東京農工大学農学部附属広域都市圏フィールドサイエンス教育研究センター (略称 FS センター) は大学に属していた演習林や農場などの統合により 2002 年 4 月に発足し、首都圏に 8 箇所フィールドミュージアム (以下 FM) を持つ。そのうち、FM 大谷山, FM 草木, FM 唐沢山, FM 秩父では長期モニタリングとして、哺乳動物, 鳥類, 爬虫類, 樹木, 渓流水質などの観測が 1960 年頃から行われている (岸, 2003)。しかし、水生生物については石井ら (2002) や村田ら (2007) による採集記録があるものの、哺乳動物, 鳥類, 爬虫類のような継続した調査は行われていないのが現状である。水生生物は種数や現存量からも河川生態系において重要な位置を占めているとともに (竹門, 1997), 河畔林から供給される落葉・落枝といった有機物の供給量や森林管理などによる植生変化が水生生物に影響を与えることから、継続した観測データが必要である。そこで、本研究では FM 唐沢山の小溪流を対象に、2011 年 4 月から 12 月までに観察された水生生物の出現種と出現個体数を報告する。また、2011 年に観察された出現生物相と 2002 年の FM 唐沢山の観測事例 (石井ら, 2002) について比較を行った。

2. 調査地概要と方法

2.1 調査地

本研究は栃木県佐野市に位置する FM 唐沢山の 2 林班 (17.1 ha), 3 林班 (8.9 ha), 6 林班 (2.5 ha) の小溪流で行った (Fig. 1)。FM 唐沢山は標高が 90 ~ 290 m の範囲にあり, AMeDAS 佐野の 1981 年から 2010 年の平均降水量は 1244.7 mm であり, 平均気温は 13.9°C であった。2011 年 1 月 1 日から 2011 年 12 月 31 日までの総降水量は 1064.8 mm であった。それぞれの流域では、流域末端に観測区間を設置した。また、2 林班流域 (以下 K2) では 3 箇所, 3 林班流域 (以下 K3) では 1 箇所について、観測地点から上流部の支流域に入れ子状の観測点を設置した。K2 および K3 流域は 20 年生から 50 年生のスギ・ヒノキが優占しており, 6 林班流域 (以下 KR) では 100 年生の広葉樹の天然林が優占していた。それぞれ、溪流に隣接する箇所まで植生が見られた。優占する林床植生はアオキ (*Aucuba japonica*) であった。

調査対象区間の溪流幅は 0.5 ~ 1 m であった。平均水深は 5 cm であり, 調査区間には階段状地形や淵なども見られた。各調査区間の平均河床勾配は K2 と KR では約 20%, K3 では約 15% であった。おもな河床材料は中礫 (16 cm ~ 64 cm) であり, 河床内には径 50 cm 以上の巨礫も存在している。K2 および K3 流域の末端では流量観測を行っており, 両流域において流出は降雨に対して急激に増加する

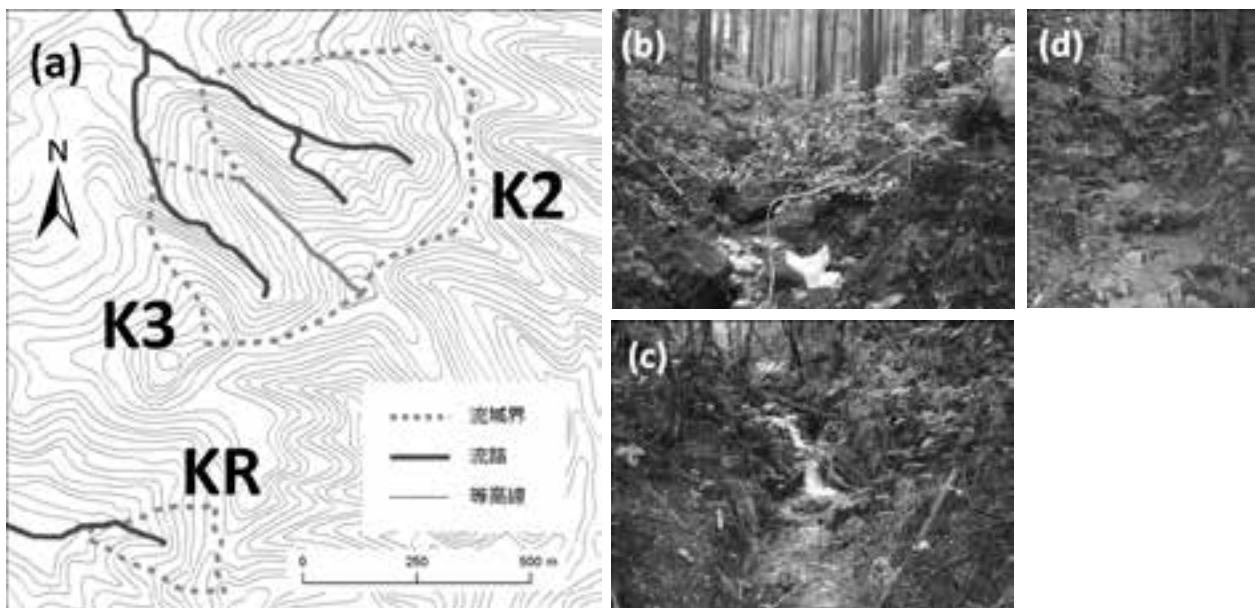


Fig. 1. FM 唐沢山における調査流域概要

(a) : 調査流域地図, (b, c, d) : 各流域における溪流の概観 (b: K2, c: K3, d: KR)

傾向が見られた。流出の低減は緩やかであり、岩盤からの流出があると思われた。

2.2 採集方法

各溪流では、流下水生生物と底生生物を採集した。流下水生生物については長さ1.1 m、幅45 cm、0.25 mm メッシュのネット（以下、ドリフトネット）を溪流内に設置し、採集した。2日間を1セットとし、各調査地点で2011年3月31日～4月1日、5月10日～11日、6月21日～22日、8月4日～5日、9月6日～7日、10月3日～4日、11月4日～5日、12月14日～15日の計8回調査を行った。調査期間は無降雨期間かつ降雨後の流出が比較的安定した時期を選んだ。設置箇所の右岸と左岸をそれぞれ土嚢で溪流の流れを抑制し、直径20 cmの塩ビパイプに水流を集め、パイプの先端にドリフトネットをゴムバンドで固定した。ドリフトネット末端から漏れないように、折りたたんだ後クリップで留めた（Piccolo and Wipfli, 2002）。設置時間は水生昆虫の流下量が多い夜間を含むように、概ね24時間前後とした（Anderson and Lehmkuhl, 1968）。採集した流下生物は、ドリフトネットに入れたまま低温状態で実験室に持ち帰った。実験室ではドリフトネットを脚立に吊り下げ、スプレーを用いて有機物と生物を洗い流し、ジップロックに入れて冷蔵保存した。

底生生物は、25×25 cmのコドラート付サーバーネット（メッシュサイズ0.25 mm）を用いて採集した。季節変化を考慮し、2011年5月31日、8月6日、12月16日の3回調査を行った。各流域の流域末端から50 m程度の上流区間（上流の流下調査地点との間）の瀬・淵をそれぞれ3か所選択し、計18か所を調査地点とした。本対象流域は山地上流域であり、可児（1944）による瀬と淵の定義と一致しない場合もあるが、相対的に水深が浅く流速が早い箇所を瀬、水深が深く流速が遅い箇所を淵とした。各調査箇所ではサーバーネットを河床に固定し、コドラート内の河床の砂礫を含む約3 cm程度をサーバーネット内にかき入れた。採集された底質のうち数十 cmの礫については、ブラシを用いて礫表面に付着している水生昆虫や有機物を擦り落とした。採集された細粒物質と水生生物はサンプル袋に保存し、クーラーボックスに入れ、低温状態で実験室に持ち帰った。

2.3 室内作業

流下および底生生物サンプルは複数の白いトレーに分け、肉眼で確認できる大きさの生物のみピンセットで取り除き、99.5%エタノールで固定した。そのため、肉眼で確認できない幼齢個体などについては本研究の対象としなかった。固定した生物のうち、水生生物のみ双眼実態顕微鏡を用いて種類同定を行い、個体数をカウントした。流下生物には陸域由来の生物種も含まれるが、今回は解析の対象としなかった。種類同定は、川合（1985）、丸山ら（2000）、川合・谷田（2005）、吉富ら（1999）、林（2007）、緒方・中島（2006）を用いて可能な限り分類を行った。

バイオマス量である乾燥重量は、頭幅長または体長から算出することができる（Smock, 1980; Benke et al., 1999; Miyasaka et al., 2008）。ただし、従来の研究で頭幅長または体長と乾燥重量の関係式が得られていない幾つかの種については、頭幅長または体長を計測後、乾燥重量を計測した。水生生物の頭幅長または体長を顕微鏡用マイクロルーラー MR-1、MR-2（ケニス株式会社製）を用いて計測した。乾燥重量は定温乾燥機を用いて60℃で24時間乾燥させた後に0.1 mgまで計測した。

3. 調査結果

調査期間を通じて水生生物は全体で37科54分類群4557個体採集された。そのうち、流下生物では33科44分類群2318個体、底生生物では32科46分類群2239個体が確認された。また、底生生物を瀬淵別にみると、淵では28科37分類群1767個体、瀬では31科42分類群472個体が確認された（表1, 2）。また、流下生物では8月、9月、10月において382～571個体と、他の月と比較して多くの個体が採集された。一方、底生生物では8月において淵で116個体、瀬で45個体であり、他の月と比較して採集された個体数は少なかった。

捕獲した水生生物のうち、ユスリカ科（Chironomidae）が最も多く、流下生物で567個体（全体の24.5%）、底生生物では淵で888個体（全体の50.3%）、瀬で176個体（全体の37.3%）出現していた。採集方法別にみると、コカゲロウ属（*Baetis* spp.）やオナシカワゲラ属（*Nemoura* spp.）は流下サンプルでそれぞれ274個体、405個体と他の種と比べて比較的多く採集された。しかし、底生生物サンプルではコカゲロウ属は2個体、オナシカワゲラ

属29個体のみ採集された。一方、フタスジモンカゲロウ (*Ephemera japonica*) やオニヤンマ (*Anotogaster sieboldii*) は底生生物調査において、それぞれ269個体と107個体採集されたが、流下生物調査ではフタスジモンカゲロウは7個体、オニヤンマは3個体のみであった。

4. 考 察

本調査結果では、ユスリカ科をはじめとするハエ目の捕獲数が著しく多かった。これは、捕獲の際に用いた網のメッシュサイズの違いによるものと考えられた。石井ら (2002) では網目のサイズが2 mm × 3 mm のものを用いており、本調査と比較大きい個体のみが採集されていた。そのため、一般的に体長が10 mm 以下、頭幅長が1 mm 未満であるユスリカ科は、8月において石井ら (2002) では3個体であるが、本研究では17個体採集された。また、個体サイズが3 mm 以上の種のみに着目してみると、石井ら (2002) と本調査結果ではフタスジモンカゲロウ、オニヤンマ、ヨツメトビケラ (*Perisoneura paradoxa*)、オナシカワゲラ属、オオカクツツトビケラ (*Lepidostoma crassicorne*) といった分類群が共通して出現しており、類似した結果になった。しかし、石井ら (2002) ではウエストントビイロカゲロウ (*Paraleptophlebia westoni*) が17個体採集されていたのに対し、本調査結果ではトビイロカゲロウ科全体でも採集されたのはわずか1個体であった。トビイロカゲロウの捕獲個体数に差が生じた原因として、2011年7月12日から7月31日にかけて期間内降雨が274 mm、最大日雨量が177.6 mm という大規模な降雨イベントによって洪水攪乱が生じたためではないかと推測される。

コカゲロウ属やフタスジモンカゲロウなど採集方法によって捕獲数が大きく異なる分類群があることがわかった。Anderson and Lehmkuhl (1968) や Piccolo and Wipfli (2002), Kobayashi et al. (2010) などの流下水生生物の先行研究を比較しても、本研究の流下水生生物と同様に、オナシカワゲラ属、コカゲロウ属、トビイロカゲロウ属の一種 (*Paraleptophlebia* sp.), ユスリカ科、ブユ科 (Simuliidae) が多く確認されている。平水時において、水生生物は、捕食者からの退避、餌資源の獲得、生息分布の分散を目的として流下を開始している (Brittain and Eikeland, 1988)。生物相の活動が活発になる夜間に流下生物個体数が増加する傾向にも

あるのも、このような生物の動きを反映していると言える (Waters, 1961; 大串・斎藤, 1963)。そのため、オナシカワゲラ属、コカゲロウ属、トビイロカゲロウ属などは、遊泳能力が高いことから、流水中で活発に移動しており、流下個体数が大きくなったと考えられた。以上のことから、流下水生生物サンプルは底生生物の種組成を完全に反映しているわけではなく、流下しやすい分類群が多く採集されるという傾向がある。そのため、溪流内の水生生物群集の種組成を調査する目的ではドリフトネットによる流下生物採集よりもサーバーネットによる底生生物採集の方が適していると考えられる。しかし、FM 唐沢山のような小規模な溪流の場合や調査の頻度が高い場合では、底生生物採集よりも溪流内の攪乱を抑えた調査が流下生物採集では可能であるといった利点が考えられた。

従来の山地上流域を対象とした研究 (Piccolo and Wipfli, 2002; 石綿・斎藤, 2007; Kobayashi et al., 2010) では、ヒラタカゲロウ科 (Heptageniidae) やマダラカゲロウ科 (Ephemerellidae) が確認されているが、本研究ではヒラタカゲロウ科が出現せず、マダラカゲロウ科は1個体のみであった。この結果は石井ら (2002) でも同様であった。また、造網型 (net-spinner) のトビケラの出現数も少なかった。マダラカゲロウ科や造網型のトビケラは、河床に浮き石などの空隙構造があり、かつ河床が比較的安定した状態で優占することが報告されている (津田, 1962; 石綿・斎藤, 2007)。一方、本研究で瀬淵ともに多く出現したユスリカ科やフタスジモンカゲロウは、砂泥質を好適な生息環境とすることが Benke et al. (1984) や川合 (1985) によって示されている。これらのことから FM 唐沢山では瀬・淵ともに河床に砂泥質が堆積することで空隙構造が十分に発達しない傾向があり、その結果として、前述の先行研究にあるような山地上流域の溪流と異なる水生生物群集の種構成が見られたと考えられた。このような変化は地質などに関連があると思われることから、今後、地質構造の違いによる水生昆虫群集の違いなどの比較も重要であると考えられた。

5. まとめ

今回の調査は、月に1回または季節に1回という頻度で調査を行ったため、FM 唐沢山の水生生物の生息状況を詳細に見ることが出来たと思われる。1年を通してユスリカ科やフタスジモンカゲロウをは

表1. FM 唐沢山における流下水生生物目録と捕獲個体数

種名		4月	5月	6月	8月	9月	10月	11月	12月	合計
[Ephemeroptera カゲロウ目]										
Baetidae	コカゲロウ科									
<i>Baetis</i> spp.	コカゲロウ属	11	7	8	24	54	128	25	17	274
Leptophlebiidae	トビイロカゲロウ科									
<i>Paraleptophlebia westoni</i> (Imanishi)	ウエストントビイロカゲロウ	0	2	5	18	0	7	0	0	32
<i>Paraleptophlebia</i> sp.	トビイロカゲロウ属の一種	20	2	3	0	0	0	36	3	64
Ephemerellidae	マダラカゲロウ科									
<i>Cincticostella nigra</i> (Ueno)	クロマダラカゲロウ	0	1	0	0	0	0	0	0	1
Ephemeridae	モンカゲロウ科									
<i>Ephemera japonica</i> (McLachlan)	フタスジモンカゲロウ	0	0	0	2	2	2	1	0	7
[Plecoptera カワゲラ目]										
Nemouridae	オナシカワゲラ科									
<i>Nemoura</i> spp.	オナシカワゲラ属	4	2	24	168	162	35	4	6	405
<i>Amphinemura</i> spp.	フサオナシカワゲラ属	3	0	8	54	52	9	0	0	126
Perlidae	カワゲラ科									
<i>Niponiella limbatella</i> (Klapalek)	ヤマトカワゲラ	0	0	0	1	2	0	0	0	3
[Megaloptera ヘビトンボ目]										
Corydalidae	ヘビトンボ科									
<i>Parachauliodes japonicus</i> (McLachlan)	ヤマトクロスジヘビトンボ	0	0	1	0	0	0	0	1	2
[Hemiptera 半翅目]										
Gerridae	アメンボ科									
<i>Metrocoris histrio</i> (B. White)	シマアメンボ	0	0	1	0	0	0	0	0	1
[Coleoptera 鞘翅目]										
Dytiscidae	ゲンゴロウ科									
<i>Hydroglyphus japonicus</i> (Sharp)	チビゲンゴロウ	0	0	0	1	1	0	0	0	2
Ptilodactylidae	ナガハナノミ科									
Ptilodactylidae gen. sp.	ナガハナノミ科の一種	0	0	0	1	1	0	0	0	2
Psephenidae	ヒラタドロムシ科									
<i>Macroeubria lewisi</i> (Nakane)	チビマルヒゲナガハナノミ	0	0	0	0	2	0	1	0	3
Dryopidae	ドロムシ科									
<i>Elmomorphus brevicornis</i> (Sharp)	ムナビロツヤドロムシ	0	3	2	0	2	1	1	0	9
Elmidae	ヒメドロムシ科									
<i>Neorihelmis kurosawai</i> (Nomura)	クロサワドロムシ	0	0	2	0	0	0	0	0	2
Elmidae gen. spp.	ヒメドロムシ科	0	1	1	1	1	1	0	0	5
<i>Zaitzeviaria ovata</i> (Nomura)	マルヒメツヤドロムシ	0	0	1	2	0	12	10	0	25
[Tricoptera トビケラ目]										
Lepidostomatidae	カクツツトビケラ科									
<i>Lepidostoma crassicorne</i> (Ulmer)	オオカクツツトビケラ	4	4	0	16	4	2	0	1	31
Philopotamidae	カワトビケラ科									
Philopotamidae gen. sp.	カワトビケラ科の一種	0	0	18	21	13	2	1	0	55
Hydropsychidae	シマトビケラ科									
<i>Diplectrona</i> sp.	ミヤマシマトビケラ属の一種	0	3	6	14	15	17	12	2	69
Rhyacophilidae	ナガレトビケラ科									
<i>Rhyacophila</i> spp.	ナガレトビケラ属	1	0	0	1	6	0	0	0	8

Odontoceridae	フトヒゲトビケラ科									
<i>Psilotreta kisoensis</i> (Iwata)	フタスジキソトビケラ	3	0	1	0	0	2	1	1	8
<i>Perissoneura paradoxa</i> (McLachlan)	ヨツメトビケラ	2	0	0	0	1	0	0	1	4
[Odonota トンボ目]										
Epiophlebiidae	ムカシトンボ科									
<i>Epiophlebia superstes</i> (Selys)	ムカシトンボ	0	0	0	1	1	1	0	0	3
Cordulegastridae	オニヤンマ科									
<i>Anotogaster sieboldii</i> (Selys)	オニヤンマ	0	0	0	1	1	0	0	1	3
Aeshnidae	ヤンマ科									
<i>Planaeschna milnei</i> (Selys)	ミルンヤンマ	0	1	0	0	0	0	0	0	1
[Diptera 双翅目]										
Tipulidae	ガガンボ科									
Cylindrotominae sp.	シリプトガガンボ亜科の一種	0	0	0	1	1	0	0	0	2
<i>Dicranota</i> sp.	<i>Dicranota</i> 属の一種	0	0	0	0	4	1	0	0	5
<i>Antocha</i> sp.	ウスバガガンボ属の一種	0	0	0	0	1	0	0	0	1
<i>Tipula</i> sp.	ガガンボ属の一種	0	5	1	4	2	9	1	0	22
Eriopterini spp.	ホシヒメガガンボ族	0	0	0	0	4	0	0	0	4
Psychodidae	チョウバエ科									
<i>Pericoma</i> sp.	<i>Pericoma</i> 属の一種	0	0	2	0	0	0	0	0	2
Athericidae	ナガレアブ科									
<i>Asuragina caerulescens</i> (Brunetti)	クロモンナガレアブ	0	0	0	0	1	0	0	0	1
Ceratopogonidae	スカカ科									
Ceratopogonidae gen. sp.	スカカ科の一種	0	1	2	3	13	0	0	0	19
Simuliidae	ブユ科									
Simuliidae gen. sp.	ブユ科の一種	75	26	10	0	0	3	2	2	118
Dixidae	ホソカ科									
<i>Dixa</i> spp.	ホソカ属	5	21	98	11	21	123	35	11	325
Chironomidae	ユスリカ科									
Orthocladiinae spp.	エリユスリカ亜科	23	99	56	10	38	46	16	7	295
Tanypodinae spp.	モンユスリカ亜科	9	4	2	10	40	151	3	0	219
Chironominae spp.	ユスリカ亜科	1	0	1	2	46	0	2	1	53
Stratiomyidae	ミズアブ科									
Stratiomyidae gen. sp.	ミズアブ科の一種	0	0	0	0	0	1	1	0	2
Diptera (pupa)	双翅目蛹	0	0	0	0	5	5	1	0	11
Unknown	不明	0	0	0	0	0	0	1	0	1
[Oligochaeta 貧毛綱]										
Oligochaeta	貧毛綱	0	0	0	0	14	0	1	0	15
[Decapoda 十脚目]										
<i>Geothelphusa dehaani</i> (White)	サワガニ	0	4	2	5	4	8	2	0	25
[Tricladida ウズムシ目]										
Dugesidae gen. sp.	サンカクアタマウズムシ科 の一種	15	2	1	10	10	5	5	2	50
[Hirudinea ヒル綱]										
Hirudinea	ヒル綱	0	0	0	0	3	0	0	0	3
合 計		176	188	256	382	527	571	162	56	2318

表2. FM 唐沢山における底生水生生物目録と捕獲個体数

種名	学名	和名	淵				瀬				総合計
			5月	8月	12月	合計	5月	8月	12月	合計	
[Ephemeroptera カゲロウ目]											
Baetidae		コカゲロウ科									
	<i>Baetis</i> spp.	コカゲロウ属	0	0	1	1	0	1	0	1	
Leptophlebiidae		トビイロカゲロウ科									
	<i>Paraleptophlebia westoni</i> (Imanishi)	ウエストントビイロカゲロウ	1	0	0	1	0	0	0	0	
	<i>Paraleptophlebia</i> sp.	トビイロカゲロウ属の一種	16	1	61	78	3	0	5	8	
Ephemeridae		モンカゲロウ科									
	<i>Ephemera japonica</i> (McLachlan)	フタスジモンカゲロウ	97	44	71	212	34	13	10	57	
[Plecoptera カワゲラ目]											
Nemouridae		オナシカワゲラ科									
	<i>Nemoura</i> spp.	オナシカワゲラ属	17	1	4	22	0	5	2	7	
	<i>Amphinemura</i> spp.	フサオナシカワゲラ属	0	0	0	0	0	3	6	9	
Perlidae		カワゲラ科									
	<i>Neoperla</i> sp.	フタツメカワゲラ	0	0	16	16	0	0	3	3	
	<i>Niponiella limbatella</i> (Klapalek)	ヤマトカワゲラ	1	0	0	1	4	0	0	4	
[Megaloptera ヘビトンボ目]											
Corydalidae		ヘビトンボ科									
	<i>Parachauliodes japonicus</i> (McLachlan)	ヤマトクロスジヘビトンボ	0	1	0	1	1	0	0	1	
[Coleoptera 鞘翅目]											
Ptilodactylidae		ナガハナノミ科									
	Ptilodactylidae gen. sp.	ナガハナノミ科の一種	4	1	1	6	5	0	1	6	
Psephenidae		ヒラタドROMシ科									
	<i>Macroebria lewisi</i> (Nakane)	チビマルヒゲナガハナノミ	0	0	5	5	2	0	2	4	
Dryopidae		ドROMシ科									
	<i>Elmormorphus brevicornis</i> (Sharp)	ムナビロツヤドROMシ	0	0	0	0	1	1	0	2	
Elmidae		ヒメドROMシ科									
	Elmidae gen. spp.	ヒメドROMシ科	5	0	22	27	4	0	3	7	
	<i>Zaitzeviaria ovata</i> (Nomura)	マルヒメツヤドROMシ	0	0	0	0	2	0	1	3	
[Tricoptera トビケラ目]											
Polycentropodidae		イワトビケラ科									
	<i>Paranyctiophylax</i> sp.	キソイワトビケラ属の一種	0	0	0	0	0	2	8	10	
	<i>Plectrocnemia</i> sp.	ミヤマイワトビケラ属の一種	0	0	20	20	0	0	0	20	
Lepidostomatidae		カクツツトビケラ科									
	<i>Lepidostoma crassicorne</i> (Ulmer)	オオカクツツトビケラ	5	8	4	17	6	2	5	13	
	Lepidostomatidae gen. sp.	カクツツトビケラ科の一種	0	0	0	0	0	0	2	2	
Philopotamidae		カワトビケラ科									
	Philopotamidae gen. sp.	カワトビケラ科の一種	1	0	0	1	5	2	0	7	
Hydropsychidae		シマトビケラ科									
	<i>Parapsyche</i> sp.	シロフツヤトビケラ属の一種	0	0	0	0	0	0	1	1	
	<i>Dipletrona</i> sp.	ミヤマシマトビケラ属の一種	2	0	4	6	14	1	17	32	
Rhyacophilidae		ナガレトビケラ科									
	<i>Rhyacophila</i> spp.	ナガレトビケラ属	0	0	0	0	4	0	0	4	
Goeridae		ニンギョウトビケラ科									
	<i>Goera japonica</i> (Banks)	ニンギョウトビケラ	0	0	0	0	1	0	0	1	
Odontoceridae		フトヒゲトビケラ科									
	<i>Psilotreta kisoensis</i> (Iwata)	フタスジキソトビケラ	0	2	2	4	2	0	0	2	
	<i>Perissoneura paradoxa</i> (McLachlan)	ヨツメトビケラ	10	6	5	21	0	1	3	4	

Unknown	不明	1	0	0	1	0	0	0	0	1
[Odonota トンボ目]										
Cordulegastriidae	オニヤンマ科									
<i>Anotogaster sieboldii</i> (Selys)	オニヤンマ	40	21	29	90	8	2	7	17	107
Gomphidae	サナエトンボ科									
<i>Strylogomphus suzukii</i> (Oguma)	オジロサナエ	2	1	4	7	0	0	1	1	8
Aeshnidae	ヤンマ科									
<i>Planaeschna milnei</i> (Selys)	ミルンヤンマ	1	4	7	12	0	1	1	2	14
Aeshnidae gen. sp.	ヤンマ科の一種	0	1	0	1	0	0	0	0	1
[Diptera 双翅目]										
Tipulidae	ガガンボ科									
<i>Dicranota</i> sp.	<i>Dicranota</i> 属の一種	0	0	2	2	1	0	5	6	8
<i>Antocha</i> sp.	ウスバガガンボ属の一種	0	0	0	0	1	0	0	1	1
<i>Tipula</i> sp.	ガガンボ属の一種	2	1	1	4	5	0	0	5	9
Hexatomini sp.	クロヒメガガンボ族の一種	0	0	1	1	0	0	0	0	1
Eriopterini spp.	ホシヒメガガンボ族	21	0	33	54	13	0	2	15	69
Psychodidae	チョウバエ科									
<i>Pericoma</i> sp.	<i>Pericoma</i> 属の一種	0	0	0	0	0	0	6	6	6
Athericidae	ナガレアブ科									
<i>Asuragina caerulescens</i> (Brunetti)	クロモンナガレアブ	0	0	1	1	0	0	0	0	1
Ceratopogonidae	ヌカカ科									
Ceratopogonidae gen. sp.	ヌカカ科の一種	19	2	21	42	0	0	13	13	55
Simuliidae	ブユ科									
Simuliidae gen. sp.	ブユ科の一種	4	0	0	4	15	0	0	15	19
Dixidae	ホソカ科									
<i>Dixa</i> spp.	ホソカ属	3	0	11	14	1	0	2	3	17
Chironomidae	ユスリカ科									
Orthoclaadiinae spp.	エリユスリカ亜科	75	11	163	249	14	0	108	122	371
Tanypodinae spp.	モンユスリカ亜科	186	1	222	409	18	0	12	30	439
Chironominae spp.	ユスリカ亜科	118	3	109	230	8	2	14	24	254
Diptera (pupa)	双翅目 (蛹)	2	0	0	2	0	1	0	1	3
Unknown	不明	1	0	2	3	0	0	0	0	3
[Oligochaeta 貧毛綱]										
Oligochaeta	貧毛綱	27	3	154	184	7	0	4	11	195
[Decapoda 十脚目]										
<i>Geothelphusa dehaani</i> (White)	サワガニ	8	0	1	9	2	2	1	5	14
[Tricladida ウズムシ目]										
Dugesiiidae gen. sp.	サンカクアタマウズムシ科 の一種	0	4	0	4	0	2	0	2	6
[Hirudinea ヒル綱]										
Hirudinea	ヒル綱	4	0	0	4	0	4	0	4	8
[Isopoda 等脚目]										
Asellota sp.	ミズムシ亜科の一種	0	0	1	1	1	0	0	1	2
合 計		673	116	978	1767	182	45	245	472	2239

表3. 頭幅長または体長と乾燥重量の関係式

和名	学名	N	a ^{*1}	b ^{*1}	r ²	Length (mm)		Type ^{*2}
						Mean ± SD	Range	
サワガニ	<i>Geothelphusa dehaani</i>	32	0.0637	3.1801	0.96	12.66 ± 6.40	4.00–26.00	HW
		32	0.0705	3.4059	0.96	15.78 ± 8.32	4.25–30.50	BL
オニヤンマ	<i>Anotogaster sieboldii</i>	39	0.3815	3.0031	0.98	4.37 ± 2.89	0.65–9.65	HW
		39	0.0056	2.8218	0.97	21.91 ± 15.46	3.15–50.30	BL
オナシカワゲラ属	<i>Nemoura</i> spp.	10	0.3100	3.1508	0.62	0.69 ± 0.21	0.65–1.25	HW
		10	0.0087	2.0149	0.71	5.67 ± 2.00	3.10–8.30	BL
ミヤマシマトビケラ属の一種	<i>Diplectrona</i> sp.	23	1.2077	2.3140	0.46	1.02 ± 0.19	0.65–1.30	HW
カワトビケラ科の一種	Philopotamidae gen. sp.	17	0.6369	2.4351	0.36	0.77 ± 0.14	0.50–1.00	HW
ヨツメトビケラ	<i>Perisoneura paradoxa</i>	15	1.9659	3.1797	0.79	1.15 ± 0.41	0.35–1.65	HW
		14	0.0104	2.4271	0.92	10.41 ± 5.28	2.10–20.25	BL
ヒメドロムシ科	Elimidae gen. spp.	7	2.2181	1.8028	0.67	0.39 ± 0.13	0.15–0.55	HW
		7	0.0014	3.2649	0.69	5.64 ± 1.32	3.55–8.05	BL
ナガハナノミ科の一種	Ptilodactylidae gen. sp.	12	3.9490	1.7534	0.63	0.83 ± 0.35	0.25–1.40	HW
		12	0.0019	2.6340	0.66	16.00 ± 5.94	7.90–31.50	BL
チビマルヒゲナガハナノミ	<i>Macroebria lewisi</i>	9	1.8565	1.1818	0.29	0.33 ± 0.14	0.20–0.60	HW
		10	0.0353	1.6516	0.56	4.92 ± 1.63	2.05–7.30	BL
ミルンヤンマ	<i>Planaeschna milnei</i>	14	0.3567	3.2386	0.83	3.03 ± 1.51	0.70–5.45	HW
		13	0.0135	2.4952	0.85	15.03 ± 8.46	1.85–31.00	BL
フタツメカワゲラ	<i>Neoperla</i> sp.	17	0.2872	2.1817	0.42	1.66 ± 0.58	1.05–3.10	HW
		13	0.0875	1.3647	0.25	5.60 ± 2.70	2.75–12.95	BL
ホシヒメガガンボ族	Eriopterini spp.	4	0.0244	-1.1009	0.32	0.21 ± 0.07	0.15–0.30	HW
		4	0.0034	2.0748	0.59	6.16 ± 1.57	4.45–8.10	BL

*1 頭幅長または体長と乾燥重量の関係式は $Y=aX^b$ で表わすことができる (Smock, 1980ほか)。

*2 頭幅長または体長のどちらを関係式の X に使うかを示した。(HW:頭幅長, BL:体長)

じめとする砂泥質を選好する種が多く出現するといったように、他の山地上流域における先行研究とは異なる傾向が見られた。しかし、夏季に台風による降雨流出イベントがあったことや調査林分の一部では50%列状間伐による森林施業が行われていたことから、捕獲個体数から季節変化による変動を抽出することはできなかった。今後調査を継続することでFM唐沢山の水生生物群集について種組成や季節変動、森林間伐が水生生物に及ぼす影響評価などを明らかにしていく必要がある。

6. 謝 辞

本研究はJST/CREST「荒廃人工林の管理により流量増加と河川環境の改善を図る革新的な技術の開発」による支援を受けた。また、小林草平さんをはじめ水生昆虫談話会の方々には水生昆虫の種類同定を指導していただいた。FM唐沢山のスタッフである熊倉充さんには現地調査で便宜をはかっていただいた。最後に東京農工大学の森林保全学研究室および森林利用システム学研究室の皆様には現地調査の補助をしていただくとともに、多くのご助言をいただいた。ここに記して感謝の意を表したい。

引用文献

- Anderson N. H. and Lehmkuhl D. M. (1968) Catastrophic drift of insects in a woodland stream. *Ecology*, 49 (2): 198–206.
- Benke A. C., Van Arsdall T. C., Gillespie D. M., and Parrish F. K. (1984) Invertebrate productivity in a subtropical blackwater river: The importance of habitat and life history. *Ecological Monographs*, 54 (1): 25–63.
- Benke A. C., Huryn A. D., Smock L. A., and Wallace J. B. (1999) Length-mass relationships for freshwater macroinvertebrates in North America with particular reference to the Southeastern United States. *Journal of North American Benthological Society*, 18 (3): 308–343.
- Brittain J. E. and Eikeland T. J. (1988) Invertebrate drift - A review. *Hydrobiologia*, 166: 77–93.
- Cummins K. W. (1974) Structure and function of stream ecosystems. *BioScience*, 24 (11): 631–641.
- Fisher S. G. and Likens G. E. (1973) Energy flow in

- Bear Brook, New Hampshire : An integrative approach to stream ecosystem metabolism. *Ecological Monographs*, 43 : 421-439.
- Gregory S. V., Swanson F. J., McKee W. A. and Cummins K. W. (1991) An ecosystem perspective of riparian zones. *BioScience*, 41 (8) : 540-551.
- 林成多 (2007) 島根県産水生甲虫類の分布と生態. ホシザキグリーン財団研究報告, 第10号 : 77-113.
- 石井隆寛, 桑原繁, 桑原誠, 内田武次, 熊倉充 (2002) 東京農工大学フィールドミュージアム (FM) における底生水生昆虫の生息状況 (2002). *フィールドサイエンス*, 2 : 31-36.
- 石綿進一, 齋藤和久 (2007) 堂平沢およびワサビ沢の底生生物. 丹沢大山総合調査報告書 : 328-331.
- 可児藤吉 (1944) 溪流性昆虫の生態. 編集 : 古川晴男, 「昆虫」上, 研究社, 東京.
- 川合禎次 (1985) 日本産水生昆虫検索図説. 東海大学出版会, 神奈川県.
- 川合禎次, 谷田一三 (2005) 日本産水生昆虫 - 科・属・種の検索 -. 東海大学出版会, 神奈川県.
- 岸洋一 (2003) 東京農工大学フィールドサイエンス・センターにおける長期モニタリング. *フィールドサイエンス*, 3 : 49-53.
- Kobayashi S., Gomi T., Sidle R. C. and Takemon Y. (2010) Disturbance structuring macroinvertebrate communities in steep headwater streams : Relative importance of forest clear-cutting and debris flow occurrence. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 67 : 427-444.
- 丸山博紀, 高井幹夫, 谷田一三 (2000) 原色川虫図鑑. 全国農村教育協会, 茨城県.
- Miyasaka H., Genkai-Kato M., Miyake Y., Kishi D., Izumi K., Doi H., Ohba S. and Kuhara N. (2008) Relationships between length and weight of freshwater macroinvertebrates in Japan. *Limnology*, 9 : 75-80.
- 村田健輔, 小林哲也, 宮井遼平, 谷脇徹, 桑原誠, 岸洋一 (2007) FM 草木と FM 府中苗圃の昆虫相. *フィールドサイエンス*, 6 : 7-39.
- Nakamura F. and Swanson F. J. (1993) Effects of coarse woody debris on morphology and sediment storage of a mountain stream system in western Oregon. *Earth Surface Processes and Landforms*, 18 : 43-61.
- 緒方健, 中島淳 (2006) 福岡県のヒメドロムシ. ホシザキグリーン財団研究報告, 第9号 : 227-243.
- 大串竜一, 斎藤洋子 (1963) 河川流下物の生態学的研究. *日本生態学会誌*, 13(1) : 28-35.
- Piccolo J. J. and Wipfli M. S. (2002) Does red alder (*Alnus rubra*) in upland riparian forests elevate macroinvertebrate and detritus export from headwater streams to downstream habitats in southeastern Alaska? *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 59 : 503-513.
- Smock L. A. (1980) Relationships between body size and biomass of aquatic insects. *Freshwater Biology*, 10 : 375-383.
- 竹門康弘 (1997) 溪流における水生昆虫の住み場所保全. *砂防学会誌*, 50(1) : 52-60.
- 津田松苗 (1962) 水生昆虫学. 北隆館, 東京.
- Waters T. F. (1961) Standing crop and drift of stream bottom organisms. *Ecology*, 42 : 532-537.
- 吉富博之, 白金晶子, 疋田直之 (1999) 矢作川水系のヒメドロムシ. 矢作川研究, No.3 : 95-116.

投稿規程が変わりました。次号（No.12, 2014年3月発行予定）掲載の原稿は、下記の新しい規程にそってお寄せ下さい。

投 稿 規 程

「フィールドサイエンス」(英文名: Journal of Field Science) は、東京農工大学農学部附属広域都市圏フィールドサイエンス教育研究センターの年報誌で、原則として年1回発行される。

本誌には、広くフィールドサイエンスに関する研究成果などを掲載する。

1. 目的

フィールドサイエンスに関する研究成果などを公表し、その発展に寄与する。

2. 投稿者

東京農工大学に所属する者およびフィールドサイエンスに関心をもつ者。

3. 原稿の種類と内容

- (1) 論文: 研究報告で他誌に未発表のもの。
- (2) 資料: 測定・観察記録などで、他誌に同一形態・形式で発表したものを除く。
- (3) 総説・解説: フィールドサイエンスに関するレビュー、実験・調査方法の解説など。
- (4) その他: 編集委員長の依頼にもとづく記事など。

4. 原稿の使用言語と長さ

- (1) 原稿に使用する言語は日本語または英語とする。
- (2) 原稿は、別に定める執筆要領に従って作成し、刷り上がり20ページ以内とする。

5. 投稿手続き

原稿は、編集ができない状態にした電子媒体に次の項目を記した送り状を添えて、編集幹事に提出する。

- (1) 著者・所属機関・所在地・連絡担当著者と連絡先
- (2) 表題
- (3) 原稿枚数(図、表および写真を含む)
- (4) 原稿の種類

- (5) 別刷希望部数

6. 原稿の採否

- (1) 原稿の採否は編集委員長が決定する。
- (2) 編集委員長は、原稿の採否に関して、編集委員ほか、しかるべき査読者から意見を求めることがある。
- (3) 編集委員長は、必要に応じて著者に原稿の修正を求めることがある。

7. その他

- (1) 英語原稿は、あらかじめ英文校閲を行うこととする。
- (2) 著者は、原稿の採用決定後、最終原稿の編集ができない状態にした電子媒体と編集可能な電子媒体を編集幹事に提出する。
- (3) 別刷は、50部を無料とし、希望部数の50部を超える部分は著者の実費負担とする。

執 筆 要 領

1. 論文

- (1) 日本語原稿: 1) ~ 3) を1ページ, 4) を2ページ, 5) を3ページ以降とし, 6) は5) と区分する。なお, 7) は後述のとおり1枚ずつ別葉とする。
 - 1) 表題
 - 2) 著者(ふりがな)・所属機関・所在地・連絡担当著者と連絡先
 - 3) ランニングタイトル(日本語)
 - 4) 要旨・キーワード(日本語)
 - 5) 本文(はじめに, 材料と方法, 結果, 考察などに原則として区分する)
 - 6) 引用文献
 - 7) 図, 表および写真
- (2) 英語原稿: 1) ~ 3) を1ページ, 4) を2ページ, 5) を3ページ以降とし, 6) は5) と区分する。なお, 7) は後述のとおり1枚ずつ別葉とする。
 - 1) 表題
 - 2) 著者・所属機関・所在地・連絡担当著者と連絡先
 - 3) ランニングタイトル(英語)
 - 4) 要旨・キーワード(英語)
 - 5) 本文(Introduction, Materials and Methods,

Results, Discussion などに原則として区分する)

6) 引用文献

7) 図, 表および写真

2. 資料, 総説・解説およびその他

本文の区分などについては, 必ずしも論文の形式に準じなくてもよい。

3. 用語等

- (1) 日本語原稿は, 横書きとし, 編集可能な電子媒体で1ページあたりおおむね40字×25行で作成する。
- (2) 英語原稿は, 編集可能な電子媒体で1ページあたりおおむねアルファベット60字×25行で作成する。
- (3) 動物・植物等の日本名, 外来語および原語によらない外国の地名・人名はカタカナとする。学名は国際表記にしたがうこととする。
- (4) 用語は, 原則として文部省(文部科学省)編「学術用語集」に使われているものを用いる。
- (5) 単位は国際単位系(SI)を用いることが望ましい。

4. 要旨・キーワード

- (1) 日本語要旨はおおむね500字以内に, 英語要旨はおおむね300語以内にまとめる。
- (2) キーワードは日本語, 英語とも5個以内とする。

5. 引用文献

- (1) 引用文献は著者名のアルファベット順に記載し, 本文の該当箇所に(著者, 年号)または著者(年号)のように明示する。
- (2) 雑誌の場合は, 著者(年号): 表題. 雑誌名, 巻または号(通巻ページでないものは巻号): 引用ページとする。
- (3) 単行本の場合は, 著者(年号): 引用箇所

表題. 書名, 編者名(編), 引用ページ, 発行所, 所在地とする。

引用文献の書き方(例)

文献は本文中に引用されたものすべてを記載する。雑誌名は原則として, 省略しないで表記する。

(a) 雑誌

田中阿歌磨・星野隆一(1933): 択捉島湖沼踏査概況及其の湖沼形態, 水の理化学的所見. 陸水学雑誌, 3: 1-19.

Birge, E. A. and Juday, C. (1934): Particulate and dissolved organic matter in inland lakes. Ecological Monograph, 4: 440-474.

(b) 単行本

小林繁男(1993): 熱帯林土壌のせき悪化. 熱帯林土壌, 真下育久(編), 280-333, 勝美堂, 東京.

Syrett, P. J. (1962): Nitrogen assimilation. Physiology and Biochemistry of Algae, Lewin, R. A. (ed.), 171-188, Academic Press, New York.

6. 図, 表および写真

(1) 図(写真は図として取り扱う)

- 1) 図(写真)の題名および注は図(写真)の下に書く。
- 2) 図(写真)は1枚ごとに別葉とし, 図(写真)番号の表示は, 図1. または Fig. 1. のようにする。本文中で図(写真)番号を示すときも同様とする。

(2) 表

- 1) 表の題名は表の上に, 注は表の下にそれぞれ記載する。
- 2) 表は1枚ごとに別葉とし, 表番号の表示は, 表1. または Table 1. のようにする。本文中で表番号を示すときも同様とする。

附 則

この規程は, 平成25年4月1日から施行する。

フィールドサイエンス編集委員会

編集委員長	島田 順	東京農工大学農学部 FS センター長, 教授
編集委員	松田 和秀	FS センター准教授
	渡辺 直明	FS センター助教
	鈴木 馨	FS センター准教授 (編集幹事, kaoru@cc.tuat.ac.jp)
	伴 琢也	FS センター准教授
	松村 昭治	FS センター准教授
	金勝 一樹	生物生産学科准教授
	川合 伸也	応用生物科学科准教授
	伊豆田 猛	環境資源科学科教授
	白木 克繁	地域生態システム学科准教授
	藤川 浩	共同獣医学科教授
事務局	五十嵐 明	府中地区事務部事務長補佐 (FS 担当)

Editorial Committee of Journal of Field Science

Editor-in-Chief

Jun SHIMADA Director of Field Science Center, Professor of Tokyo University of Agriculture and Technology

Editorial Board

Kazuhide MATSUDA Associate Professor of Field Science Center
Naoaki WATANABE Assistant Professor of Field Science Center
Kaoru SUZUKI Associate Professor of Field Science Center (Managing Editor, kaoru@cc.tuat.ac.jp)
Takuya BAN Associate Professor of Field Science Center
Shoji MATSUMURA Associate Professor of Field Science Center
Motoki KANEKATSU Associate Professor, Dept. of Biological Production
Shinya KAWAI Associate Professor, Dept. of Applied Biological Science
Takeshi IZUTA Professor, Dept. of Environmental and Natural Resource Sciences
Katsushige SIRAKI Associate Professor, Dept. of Ecoregion Science
Hiroshi FUJIKAWA Professor, Cooperative Dept. of Veterinary Medicine

Management Office

Akira IGARASHI Chief of Field Science Center Office

平成25年 3月 5日 印刷
平成25年 3月12日 発行

発行所 東京農工大学農学部附属 FS センター
〒183-8509 府中市幸町 3-5-8 ☎042-367-5798
印刷所 電算印刷株式会社
〒390-0821 松本市筑摩 1-11-30 ☎0263-25-4329



Journal of Field Science

No. 11

Mar, 2013

Review

- 1 Cognitive Aspects in Human-Animal Relationships / S. TAKEDA

Originals

- 7 Availability of Several Phosphorus Resources for Crop Growth / M. Myint AYE, S. MATSUMURA

Research materials

- 15 First record of *Armadillidium vulgare* (Crustacea, Isopoda) from Sakishima Islands, Southern Japan / S. KARASAWA
- 19 Effect of social breeding environment to the body size of ants : a test of epigenetic effects using inter-specific cross-fosterling experiments / Y. YOSHIHARA, S. KOYAMA and T. SATOH
- 31 Macroinvertebrates in headwater streams of Japanese cypress and Japanese cedar forests : A case study in Field Museum Karasawayama / Y. WATANABE, T. GOMI, M. NUNOKAWA and M. SAKAI

FIELD SCIENCE CENTER, TOKYO UNIVERSITY OF
AGRICULTURE AND TECHNOLOGY
Fuchu, Tokyo 183-8509, Japan