

遺伝子改変作物と除草剤抵抗性雑草

世界の食料生産のための新技術の利点と問題点（日豪セミナー）

宇都宮大学野生植物科学研究センター 米山 弘 一

はじめに

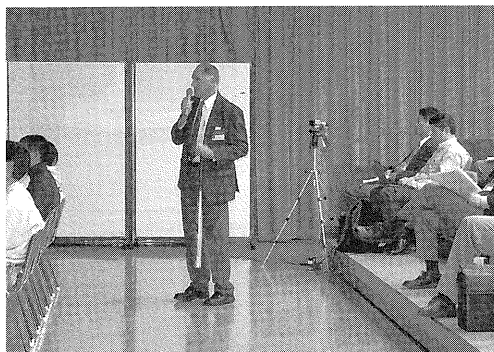
2001年11月5日～7日に、宇都宮大学大学会館を会場として「遺伝子改変作物と除草剤抵抗性雑草：世界の食料生産のための新技術の利点と問題点」というテーマで日豪セミナーを開催した。このセミナーは日本学術振興会の2国間共同事業の補助金を得て開催したものである。本稿ではセミナーの講演内容について簡単に紹介する。なお、講演内容の詳細については、セミナーのプログラムとアブストラクトがセンターのホームページからPDFファイルでダウンロードできますので、そちらをご参照ください。
(<http://crwp.mine.utsunomiya-u.ac.jp>)

プログラムに沿って

基調講演

セミナーの第1日目は、日本側開催責任者の宇都宮大学竹内安智教授による開会の挨拶の後、

2題の基調講演が行われた。基調講演では、セミナーのテーマ全体に関わる除草剤抵抗性雑草の歴史的背景について、オーストラリア側開催責任者である西オーストラリア大学の Stephen B. Powles教授および農業環境技術研究所の伊藤一幸博士が、それぞれオーストラリアおよび日本の事例を中心に解説した。農家の経営規模が日本とオーストラリアでは数百倍から千倍程度異なるため、雑草防除に対する基本的な認識に大きな隔たりが感じられたが、2人の演者が共に強調されたのは多様性である。特にオーストラリアでは、栽培規模の広大さからして手取り除草はもちろん不可能であるが、機械除草に比べて除草剤による化学的防除はるかに効率的かつ経済的であることと、登録されている農薬の種類が比較的少ないことなどが雑草防除の多様性を狭めてしまい、その結果として世界で有数の除草剤抵抗性雑草保有国になった経緯は



Powles教授の講演風景



伊藤博士とPowles教授

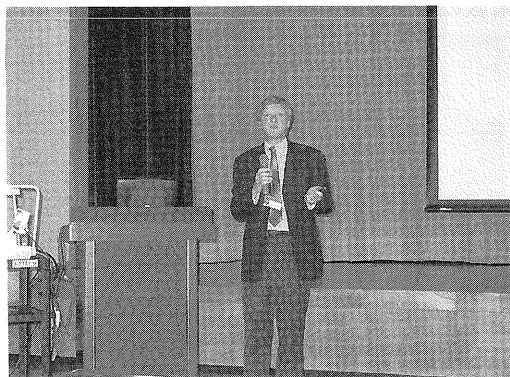
興味深くまた示唆的であった。すなわち、雑草防除も特定の手段・手法に偏重すること avoided、複数の可能なオプションを効果的に組み合わせることによって、環境に付加の少ない持続的な農業が可能である。今後とも雑草防除における除草剤の重要性は変わらないが、現在利用されている除草剤の有用性を持続させるためにも、より多様性に富んだ雑草防除体系を目指すことが望ましい。

セミナーでは基調講演以外に4つのセッションが設けられた。以下、セッションごとに要約する。

セッション1：除草剤抵抗性の基礎

このセッションでは3名の演者に除草剤抵抗性の基礎に関する話題提供をお願いした。

Richard T. Roush 準教授（アデレード大学）は、現在、オーストラリアの雑草管理システム共同研究センター（Cooperative Research Center for Weed Management System, CRC Weed）の責任者である。Roush 準教授は北米、オーストラリアなどにおける除草剤耐性（遺伝子改変）作物の現状について紹介した。特に、遺伝子改変作物について危惧されている食品としての安

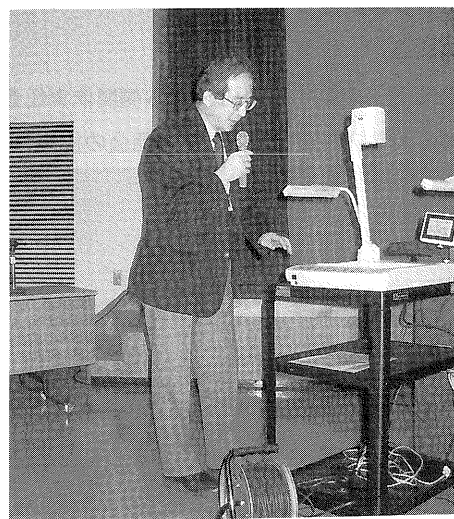


Preston 博士

全性、除草剤使用量の増加、近縁野生種への遺伝子の流出などについて具体的に説明され、その危惧の大部分が誤解に基づくものであることを明確に示した。

続いて同じくアデレード大学の Christopher Preston 博士が、除草剤抵抗性のメカニズムと遺伝様式について詳細に解説した。抵抗性のメカニズムは、標的酵素の変異、代謝解毒能力の上昇、作用部位への移行の阻害、隔離などが知られているが、一つの種が複数の抵抗性メカニズムを併せ持つことによって、作用機作の異なる除草剤に対する抵抗性を獲得している例が示され、そのような多重抵抗性雑草を優占化させないために、多様性を利用すべきであると強調した。

神戸大学の大川秀郎教授は、ヒトのP450遺伝子を植物に導入するというユニークな手法で除草剤耐性作物を作出している。すでにゲノム解析が終了したシロイヌナズナの例をみても、植物のP450種は限られているので、薬物代謝能力の優れた別の生物由来のP450遺伝子を植物に組み込むことは、新しい手法として注目される。



大川教授

大川教授も指摘しているように、P450は植物ではファイトアレキシン生合成などの二次代謝にも深く関わっているため、P450遺伝子を組み込んだ遺伝子改変作物では、その耐病性などが変化する可能性も否定できない。

セッション2：現状の把握（今、何が起きているのか）

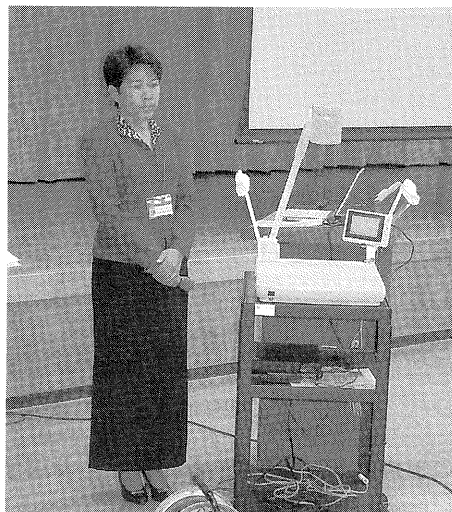
このセッションでは、前半でタイ、韓国、マレーシアの研究者が、それぞれの国における除草剤抵抗性雑草の現状を、後半では新進気鋭の



竹内教授とSuwanaketrnikom教授(タイ)

若手研究者が、ALS阻害剤抵抗性の分子機構、分子生物学に基づく抵抗性雑草の分類とその発生様式、Protox阻害剤抵抗性の分子機構についての最新の知見を紹介した。

タイ国農業省のChanya Maneechote博士は、タイ国における除草剤抵抗性雑草について例を挙げて解説した。例えばプロパニルおよびブタクロール抵抗性イヌビエ(*Echinochloa crus-galli*)の出現が異なった地域で確認されており、シハロホップなどのようなACCase阻害剤抵抗性パイオタイプも顕在化してきた。これらはいずれも異なった作用機作を有する除草剤であり、その抵抗性の程度（10倍以下）からすると、代謝能力の上昇による抵抗性メカニズムを獲得したも



Maneechote博士(タイ)

のと考えられる。

韓国全北大学の全載哲教授は、韓国における除草剤使用に伴う雑草草種の変遷などの歴史的背景から説明した。1970年代から1年生雑草を防除対象として除草剤が広範に使用されるようになり、その結果として多年生草種が優占化したこと。多年生雑草防除のために導入されたスルホニルウレア系除草剤（ALS阻害剤）が、ごく短期間のうちに抵抗性雑草の出現を促したことなど、その状況は我が国と極めて類似している。水田におけるALS阻害剤抵抗性雑草が最も重要な問題であるが、畑地ではパラコート抵抗



Preston博士と全教授(韓国)



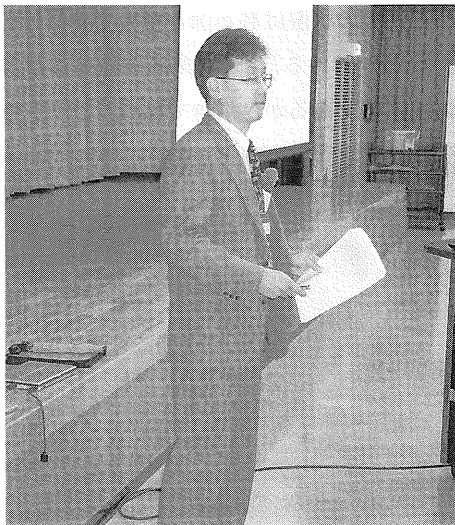
会場風景

性のヒメムカシヨモギ (*Erigeron anadensis*) が報告されているだけである。

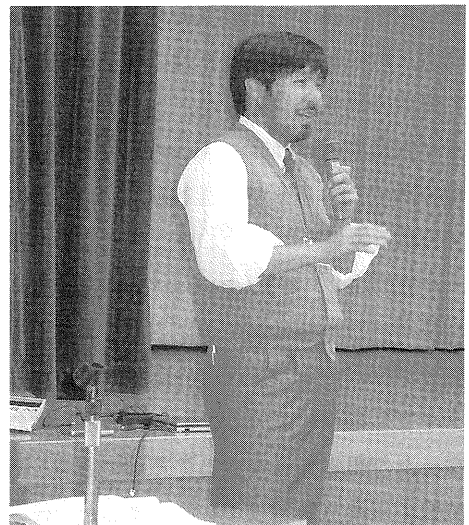
SyngentaのKee Fui Kon博士はマレーシアにおける除草剤抵抗性の例として、マレーシアの代表的な雑草であるオヒシバ(*Eleusine indica*)とイヌビエ(*Echinochloa crus-galli*)を比較して解説した。オヒシバでは数種類の異なった作用機作を有する除草剤に対して抵抗性バイオタイプの出現が報告されており、ACCase阻害剤抵抗性バイオタイプではターゲットサイトの変異が起きていた。さらに、世界で2番目の例となるグリホサート抵抗性バイオタイプが確認さ

れ、その抵抗性メカニズムもターゲットサイトの変異であった。このようにマレーシアでは他の国と同じようにオヒシバでは複数の作用機作の異なる除草剤に対する抵抗性バイオタイプが出現しているのに対して、イヌビエでは、他の国とは異なり、除草剤抵抗性バイオタイプが出現していない。その理由として、栽培体系、防除体系に基づく淘汰圧の違いを挙げている。選択肢が多ければ多いほど多様性が保たれ、淘汰圧が相対的に低下し、その結果として抵抗性バイオタイプの出現が防止(遅延)されると結論している。

クミアイ化学工業の清水 力博士は、ALS阻害剤抵抗性の分子機構について、イネのALS遺伝子に関する研究を中心に解説した。イネのALS遺伝子完全長のクローニングは単子葉植物ではトウモロコシに次いで2番目である。さらにイネ培養細胞からビスピリバック耐性株を選抜し、耐性ALSの変異部位を解析した結果、2ヵ所のアミノ酸変異が確認された。この変異により、ビスピリバックなどのピリミジンカルボン酸(PC)だけではなく、スルホニルウレア(SU),



清水博士



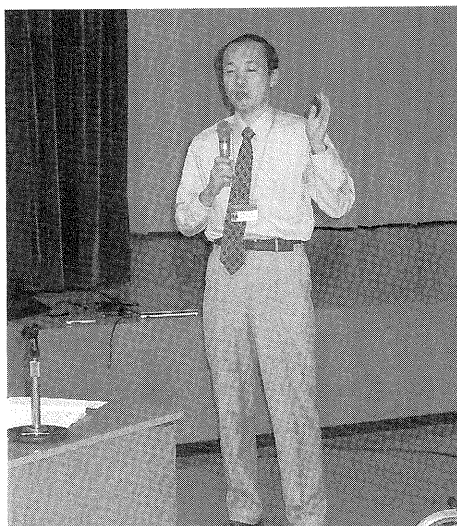
芝池博士

イミダゾリノン (IMI) に対しても抵抗性を示すが、PCに対する感受性が最も低下していた。その他、植物の新しい遺伝子操作手法の有用性についても言及した。

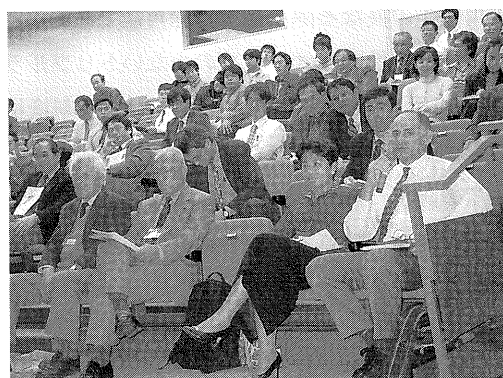
農業環境技術研究所の芝池博幸博士は、除草剤抵抗性雑草の分子分類学の観点から、ALS阻害剤 (SU剤) 抵抗性バイオタイプの出現が報告されているアゼトウガラシ (*Lindernia micrantha*) について、日本国内の12群落から採取した66個体のALS遺伝子をinter-simple sequence repeat (ISSR) マーカーによるクラスター解析を行った。その結果、66個体は23の多型遺伝子座を有する40のISSR表現型に分類された。興味深いことに、抵抗性バイオタイプの群落ではISSR表現型がほぼ単一であるのに対して、感受性バイオタイプの群落では多様性に富むことが明らかとなった。系統樹で比較しても同様な結果が得られた。なお、同雑草の除草剤抵抗性はALS遺伝子上の特定のアミノ酸 (179番目のプロリンのグルタミンあるいはセリンへ) の変異に由来するものである。以上の結果は、抵抗性バイオタイプは隔離された地域で個別に出現し、種子あるいは花

粉の伝播によって拡散したことを示唆している。

奈良先端科学技術大学院大学の蔡 晃植博士はProtox阻害剤抵抗性の分子機構について解説した。蔡博士らの選抜したProtox阻害剤耐性タバコ培養細胞YZI-1Sは、フタルイミド系Protox阻害剤S23142に対して野生株の150倍程度の耐性を示す。Protox遺伝子をクローニングして塩基配列を調べた結果、葉緑体およびミトコンドリアに存在する2種のProtox遺伝子とともにアミノ酸変異は認められなかった。そこでmRNAの定量を行ったところ、YZI-1Sでは、ミトコンドリアのProtox遺伝子のmRNAが野生株の10倍のレベルで発現していることが判明した。すなわち、YZI-1Sの示す抵抗性は、ミトコンドリアのProtoxの過剰発現に由来することを明らかにした。また、ハウレンソウのProtox-II遺伝子は翻訳の過程で大きさの異なる2種類の遺伝子産物を生じ、それぞれが葉緑体とミトコンドリアに輸送されることも示した。



葵博士



会場風景

セッション3：マネージメント

2日目の最後のセッションでは、除草剤抵抗性雑草のマネージメントを取り上げた。

最初にアデレード大学のGurjweel S. Gill博士が、オーストラリアのコムギ栽培とインドのイネ・コムギ栽培における抵抗性雑草のマネー



Gill博士

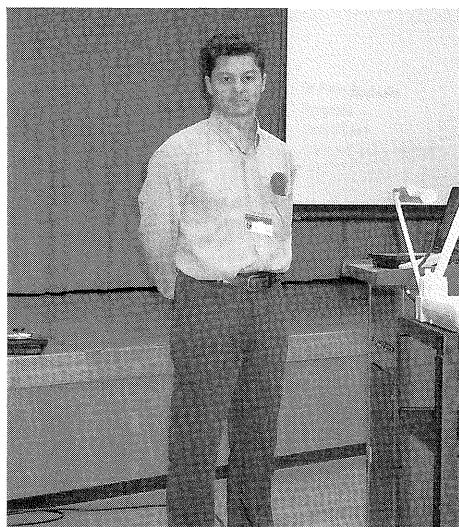
ジメントについて報告した。オーストラリアの農業は、放牧のための草地と作物栽培のローテーションが多いが、春季の放牧はライグラスなど抵抗性種を含む雑草の発生抑制に効果的である。しかし、羊毛価格の低下によってヒツジの放牧が敬遠されている。抵抗性バイオタイプは作用機作の異なる除草剤で防除可能であることから、抵抗性バイオタイプの少ないトリフルリンなどがALS阻害剤およびACCase阻害剤抵抗性雑草の制御に利用されている。その他、種子生産の防止、焼却、秋耕、収穫時における雑草種子の捕獲、雑草との競合に勝る作物品種の利用など、除草剤を用いないマネージメントについても解説した。一方インドの場合は、単一作が急速に進行した結果、それまでイソプロロチュロンで防除可能であったヨシ類(*Phalaris* spp.)が抵抗性を獲得した。その制御に向けて、新除草剤の導入、作物のローテーション（コムギ・イネ）、不耕起期栽培など、いくつかの取り組みが行われている。

東北農業研究センターの内野 彰博士は、ALS阻害型除草剤抵抗性の迅速判定法について解説



内野博士

した。その手法の詳細についてはすでに雑草学会などでも報告されているのでご存知の方も多いと思われるが、ALS活性に基づくアセトインの蓄積を評価するものである。水田雑草への適用に際して、種々の改良を加え、有効な診断法を完成した。当然ではあるが、現場で利用可能な迅速判定法が普及することによって、抵抗性バイオタイプが優占化する前に防除することが可能であろう。



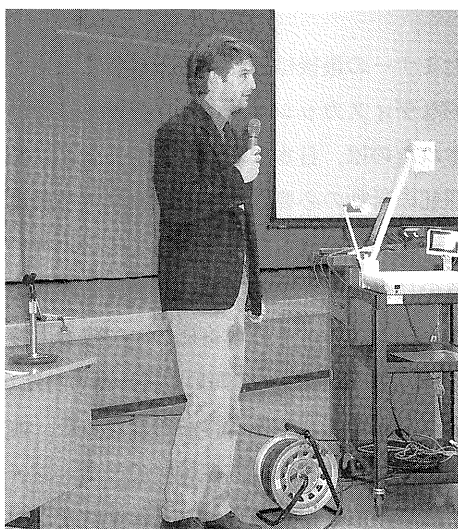
Boutsalis博士

SyngentaのPeter Boutsalis博士は、除草剤抵抗性雑草に対する除草剤開発企業側からの取り組みを紹介した。現在すでに存在する除草剤抵抗性雑草を制御するための重要なオプションとして、①新しい作用機作の除草剤の開発、②現在の除草剤の有効性を持続させる、③対話（開発側と利用側の相互の情報交換）を提示した。その中でも特に③について、欧米ではHerbicide Resistance Action Committee (HRAC)が重要な役割を果たしていることを強調した。除草剤抵抗性雑草の優占化の原因の一部が、情報不足あるいは誤解に基づくものであり、このままで推移すれば、現在有効な除草剤の多くが近い将来利用できなくなる可能性が高い。その意味において、十分な情報公開と啓蒙・普及が重要であることは間違いないであろう。

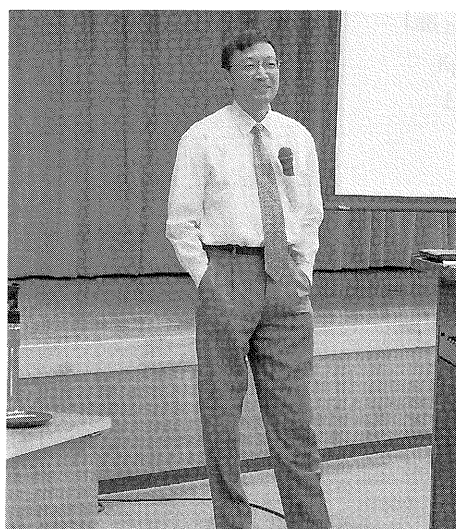
2日目の最後の講演者となった西オーストラリア大学のRick Llewellyn博士は、オーストラリアの農家が除草剤抵抗性雑草のマネジメントとしてどのような取り組みをするのか（あるいはしないのか）について解説した。Llewellyn博士が調査したのはオーストラリアのコムギ栽培

地帯の132人の農民である。そのうち60%が除草剤抵抗性雑草を彼らの圃場に確認しており、その大部分がALS阻害剤およびACCase阻害剤抵抗性ライグラスであった。ほとんどの農家で除草剤以外の手法による雑草防除法を取り入れていたが、その多くが短期的な経済効果が期待できる手法であった。一方、抵抗性雑草の発生圃場を所有する農民は、収穫時に雑草種子を捕獲する、作物が完熟した時点で非選択性除草剤を処理して雑草の種子生産を防止するなど、抵抗性雑草制御に向けた取り組みを行っていた。しかし、経済的に見合う効果が期待できない場合には、抵抗性雑草の問題は先送りされてしまい、長期的観点からの抵抗性雑草発生予防策の導入に対しては否定的であった。いずれにしても、短期的な経済効果を優先する農民は、いずれ新しい除草剤が登場することを期待し、コストのかかる総合防除に積極的に取り組むという姿勢ではない。この点において、総合防除の重要性についての教育・啓蒙が重要であろう。

3日目は最初に前日のセッション3の続きと



Llewellyn博士



汪 光熙博士

して、京都大学大学院の汪 光熙博士が除草剤抵抗性の遺伝と花粉によって媒介される遺伝子伝播について解説した。ミズアオイ (*Monochoria korsakowii*) のSU剤抵抗性は単一の優性核遺伝子によって支配されているが、その抵抗性遺伝子の感受性パイオタイプへの伝播様式を検討した結果、平均して36%がハチによって媒介されていることを明らかにした。このような花粉による抵抗性遺伝子の伝播は、植物種、受精のメカニズム、開花時の気象条件などによって影響されるが、遺伝様式を解明するとともに圃場試験のデータを収集して、遺伝子伝播のモデルを構築することが重要であると結論している。

最終セッション：今後のマネージメント

最後のセッションでは、農業環境技術研究所の與語靖洋博士が、セミナーの総括に基づいて、今後の問題点、解決策の展望について講演した。與語博士も指摘されているように、除草剤抵抗性雑草にはリスクはあるがメリットは無い。また、除草剤耐性遺伝子改変作物については今のところ農民と開発・供給会社以外にメリットは

無いものと考えられている (Roush博士が述べているように、実際には農民のメリットは開発会社より大きい)。

繰り返しになるのでリスクの詳細については言及しないが、セミナーから6ヶ月以上が経過しているので、別の観点からメリットを挙げることは可能である。除草剤抵抗性雑草の出現がもたらした最大のメリットは、除草剤の作用機構に関連する植物の分子生物学、分子生理学の発展である。実際に、除草剤は植物に特徴的な代謝機能の特異的阻害剤として、植物生理学研究の発展に大きく寄与した。さらに、除草剤抵抗性の分子機構の解析研究は、阻害剤受容部位の構造および機能の解明につながっている。今のところ、実際の農業へのフィードバックは皆無といえるが、近い将来、これらの研究成果に基づいた農業技術が利用されるようになるであろう。さらに、遺伝子改変作物については、ゴールデンライスなどの例にみられるように、除草剤耐性作物の作出技術開発の過程で得られた研究成果が、着実に実用化されつつある。



與語博士

セミナーの最後は総合討論ということで、全体的なディスカッションの場を設けた。特に指摘されたのは、日本を含めたアジア地区におけるHRACの活動の必要性である。欧米では農薬メーカーがHRACを通じた啓蒙活動を活発に行っているのに対して、アジア地区におけるHRACの活動は低調である。その理由について日本人参加者(特に企業関係者)への問いかけも行われたが、残念ながら明確な回答は得られなかった。前述したように、除草剤抵抗性雑草のマネージメント、除草剤耐性作物さらには遺伝子改変作物についての安全性と危険性について、日本でも、

学会や企業が個別にではなく、HRACなどを通じて組織的に協力・協調して啓蒙・広報活動を行う方が効率的であり、混乱が少ないと思われる。

おわりに

セミナーの参加人数は約150名で、そのうちオーストラリアからの6名を含む計20名程度が国外からの参加者であった。セミナー会場の収容人数との関係もあって、参加人数は限られたが、その分、参加者の間で活発な議論が交わされ、有意義な情報交換が行われた。本セミナーを契機として、日本におけるHRACの活動が活性化されることを期待している。例えばオーストラリアでは、除草剤を作用機作で分類し、それに関連した抵抗性雑草出現リスクをリストアップした表がHRACから公開されており、さらに、除草剤のパッケージには、作用機作の分類コードが明記されている。日本では除草剤は混合剤として市販されているので類似の表を作成する

こと自体が困難かもしれないが、不可能ではないであろう。

謝辞

最後になりましたが、本セミナーを開催するに当たって、資金的にサポートして頂いた日本学術振興会および宇都宮大学、学会誌にプログラムやセミナー開催のお知らせを掲載頂いた日本雑草学会、日本農薬学会、植物化学調節学会、植調誌に深く感謝致します。また、講演依頼をご快諾頂き、ご講演頂いた講師の先生方および座長をお引き受け頂いた先生方には心からお礼申し上げます。特に伊藤一幸博士、松本 宏博士（筑波大）にはプログラム作成時からご協力頂きました。さらに本セミナー開催に際してその準備段階からお手伝い頂いた熊田秀治君（現在、三菱化学）を始めとする宇都宮大学卒業生、在学生の皆さんに感謝します。



懇親会の記念写真