

独立行政法人 科学技術振興機構
戦略的創造研究推進事業
チーム型研究 (CREST)
追跡評価用資料
(追跡調査報告書)

研究領域 「環境低負荷型の社会システム」
(1995～2002)
研究総括 茅 陽一

**戦略的創造研究推進事業チーム型研究
研究領域「環境低負荷型の社会システム」
追跡評価用資料**

〔目次〕

第1章 総論	1
1. 1 追跡評価の目的.....	1
1. 2 研究領域の特徴.....	1
1. 3 研究領域における全研究課題の研究の継続・発展状況.....	2
1. 4 研究から生み出された科学技術的、社会的、経済的な効果・効用及び波及効果	3
第2章 研究領域における全研究課題の成果と継続・発展状況	7
2. 1 研究課題「東アジアにおける酸性物質及びオゾンの生成と沈着に関する観測と環 境影響評価」(研究代表者：秋元 肇).....	9
2. 2 研究課題「自立都市をめざした都市代謝システムの開発」(研究代表者：柏木孝夫)	12
2. 3 研究課題「都市ヒートアイランドの計画制御システム」(研究代表者：久保幸夫)	15
2. 4 研究課題「CO2 倍増時の生態系の FACE 実験モデリング」(研究代表者：小林和彦)	18
2. 5 研究課題「森林衰退に係る大気汚染物質の計測、動態、制御」(研究代表者：佐久 川弘).....	21
2. 6 研究課題「環境低負荷型の高分子物質生産システムの開発」(研究代表者：土肥義 治).....	24
2. 7 研究課題「環境影響と効用の比較評価に基づいた化学物質の管理原則」(研究代表 者：中西準子).....	27
2. 8 研究課題「微生物機能強化による水環境修復技術の確立」(研究代表者：前川孝昭) 31	
2. 9 研究課題「サンゴ礁における CO2 固定バイオリクター構築技術の開発」(研究代 表者：茅根 創).....	35
2. 10 研究課題「地球環境保全のための国際的枠組みのあり方」(研究代表者：佐和隆 光).....	39

2. 1 1	研究課題「新世代型低負荷環境保全技術による廃棄物のエネルギー化・再資源化」(研究代表者:野池達也)	42
2. 1 2	研究課題「社会実験地における循環複合体の構築と環境調和技術の開発」(研究代表者:盛岡 通)	46
2. 1 3	研究課題「微生物を活用する汚染土壌修復の基盤研究」(研究代表者:矢木修身)	50
2. 1 4	研究課題「アイソトポマーの計測による環境物質の起源推定」(研究代表者:吉田尚弘)	54
2. 1 5	研究課題「質の利用を中心にすえた新しい都市水代謝システムの構築」(研究代表者:渡辺義公)	58
2. 1 6	研究課題「都市交通の環境負荷制御システムの開発」(研究代表者:岩田規久男)	62
2. 1 7	研究課題「農山村地域社会の低負荷型生活・生産システムの構築」(研究代表者:合田素行)	65
2. 1 8	研究課題「低環境負荷エネルギー用複合機能構造材料の開発」(研究代表者:香山 晃)	68
2. 1 9	研究課題「途上国に適合する連鎖反応を利用した乾式脱硫プロセスの開発」(研究代表者:定方正毅)	71
2. 2 0	研究課題「セラピューティック煉瓦造住宅の住環境効果」(研究代表者:松藤泰典)	75
2. 2 1	研究課題「高温空気燃焼技術を用いた廃棄物・石炭高効率発電」(研究代表者:吉川邦夫)	79

第3章 研究から生み出された科学技術的、社会的、経済的な効果・効用及び波及効果 (※詳細調査対象 10 課題)

3. 1	研究課題「東アジアにおける酸性物質及びオゾンの生成と沈着に関する観測と環境影響評価」(研究代表者:秋元 肇)	83
3. 1. 1	研究の継続・発展	83
3. 1. 1. 1	プロジェクト期間中の研究の展開	
3. 1. 1. 2	プロジェクト終了後の研究の発展	
3. 1. 2	科学・技術の進歩に貢献する成果	85
3. 1. 3	成果の応用に向けての発展と社会的・経済的な効果・効用に繋がる取り組み	87
3. 1. 4	参加研究者の活動状況	88

3. 2 研究課題「自立都市をめざした都市代謝システムの開発」(研究代表者: 柏木孝夫)	90
3. 2. 1 研究の継続・発展	90
3. 2. 1. 1 プロジェクト期間中の研究の展開	
3. 2. 1. 2 プロジェクト終了後の研究の発展	
3. 2. 2 科学・技術の進歩に貢献する成果	91
3. 2. 3 成果の応用に向けての発展と社会的・経済的な効果・効用に繋がる取り組み	92
3. 2. 4 参加研究者の活動状況	92
3. 3 研究課題「環境低負荷型の高分子物質生産システムの開発」(研究代表者: 土肥義治)	94
3. 3. 1 研究の継続・発展	94
3. 3. 1. 1 プロジェクト期間中の研究の展開	
3. 3. 1. 2 プロジェクト終了後の研究の発展	
3. 3. 2 科学・技術の進歩に貢献する成果	95
3. 3. 3 成果の応用に向けての発展と社会的・経済的な効果・効用に繋がる取り組み	96
3. 3. 4 参加研究者の活動状況	99
3. 4 研究課題「環境影響と効用の比較評価に基づいた化学物質の管理原則」(研究代表者: 中西準子)	101
3. 4. 1 研究の継続・発展	101
3. 4. 1. 1 プロジェクト期間中の研究の展開	
3. 4. 1. 2 プロジェクト終了後の研究の発展	
3. 4. 2 学・技術の進歩に貢献する成果	104
3. 4. 3 成果の応用に向けての発展と社会的・経済的な効果・効用に繋がる取り組み	105
3. 4. 4 参加研究者の活動状況	108
3. 5 研究課題「地球環境保全のための国際的枠組みのあり方」(研究代表者: 佐和隆光)	110
3. 5. 1 研究の継続・発展	110
3. 5. 1. 1 プロジェクト期間中の研究の展開	
3. 5. 1. 2 プロジェクト終了後の研究の発展	
3. 5. 2 科学・技術の進歩に貢献する成果	112

3. 5. 3	成果の応用に向けての発展と社会的・経済的な効果・効用に繋がる取り組み	113
3. 5. 4	参加研究者の活動状況	113
3. 6	研究課題「アイソトポマーの計測による環境物質の起源推定」(研究代表者：吉田尚弘)	114
3. 6. 1	研究の継続・発展.....	114
3. 6. 1. 1	プロジェクト期間中の研究の展開	
3. 6. 1. 2	プロジェクト終了後の研究の発展	
3. 6. 2	科学・技術の進歩に貢献する成果.....	116
3. 6. 3	成果の応用に向けての発展と社会的・経済的な効果・効用に繋がる取り組み	117
3. 6. 4	参加研究者の活動状況	117
3. 7	研究課題「質の利用を中心にすえた新しい都市水代謝システムの構築」(研究代表者：渡辺義公)	119
3. 7. 1	研究の継続・発展.....	119
3. 7. 1. 1	プロジェクト期間中の研究の展開	
3. 7. 1. 2	プロジェクト終了後の研究の発展	
3. 7. 2	科学・技術の進歩に貢献する成果.....	122
3. 7. 3	成果の応用に向けての発展と社会的・経済的な効果・効用に繋がる取り組み	123
3. 7. 4	参加研究者の活動状況	124
3. 8	研究課題「都市交通の環境負荷制御システムの開発」(研究代表者：岩田規久男) サブテーマ「電気自動車の開発」(グループリーダー：清水浩)	125
3. 8. 1	研究の継続・発展.....	125
3. 8. 1. 1	プロジェクト期間中の研究の展開	
3. 8. 1. 2	プロジェクト終了後の研究の発展	
3. 8. 2	科学・技術の進歩に貢献する成果.....	127
3. 8. 3	成果の応用に向けての発展と社会的・経済的な効果・効用に繋がる取り組み	129
3. 8. 4	参加研究者の活動状況	130
3. 9	研究課題「高温空気燃焼技術を用いた廃棄物・石炭高効率発電」(研究代表者：吉川邦夫)	131

3. 9. 1	研究の継続・発展	131
3. 9. 1. 1	プロジェクト期間中の研究の展開	
3. 9. 1. 2	プロジェクト終了後の研究の発展	
3. 9. 2	科学・技術の進歩に貢献する成果	134
3. 9. 3	成果の応用に向けての発展と社会的・経済的な効果・効用に繋がる取り組み	135
3. 9. 4	参加研究者の活動状況	136
3. 10	研究課題「微生物機能強化による水環境修復技術の確立」(研究代表者：前川孝昭)	131
3. 10. 1	研究の継続・発展	131
3. 10. 1. 1	プロジェクト期間中の研究の展開	
3. 10. 1. 2	プロジェクト終了後の研究の発展	
3. 10. 2	科学・技術の進歩に貢献する成果	134
3. 10. 3	成果の応用に向けての発展と社会的・経済的な効果・効用に繋がる取り組み	135
3. 10. 4	参加研究者の活動状況	136

第1章 総論

1. 1 追跡評価の目的

CREST 事業は、「科学技術創造立国」をめざし、明日の科学技術につながる知的資産の形成を図ることを目的とし、大学や国立試験研究機関などの研究ポテンシャルを活用しつつ、重点化した基礎研究を推進するものとして平成7年度に発足した。その後平成14年度には、国の科学技術政策や社会的・経済的ニーズを踏まえ、国が定めた戦略目標の達成に向けた基礎的研究を推進する戦略的創造研究推進事業として再編成されて今日に至っている。CREST の研究は研究総括のマネジメントのもと、研究総括と領域アドバイザーの助言を得て、研究代表者を中心とした研究チームを複数編成して推進される。

CREST 事業は平成20年度までに発足した58研究領域のうち、既に28研究領域が5年間の研究実施期間を終了し、成果の展開期に入っている。基礎研究の推進を目的とするCREST においては、研究成果の学術的な評価を得ることや研究結果が実用化などに発展するには、一定の期間が必要になると思われる。このためJST では、領域終了から5年経過を目途に「研究終了後一定期間を経過した後、副次的効果を含めて研究成果の発展状況や活用状況等を明らかにし、事業及び事業運営の改善に資すること」を目的とする追跡調査を実施することとした。

CREST 事業がスタートした平成7年度に発足し平成14年度に終了した「環境低負荷型の社会システム」領域を取り上げて、追跡調査を行い当該領域において実施された各課題に関して、(1) 研究成果から生み出された社会的・経済的な効果・効用及び波及効果、(2) 科学技術の進展への貢献を明らかにすることを目的とするものである。

1. 2 研究領域の特徴

平成7年度に新しい研究推進事業としてCREST 研究プログラムが発足し、7つの研究領域が設定されたが、本研究領域「環境低負荷型の社会システム」はその1つとしての歴史的とも言うべき研究領域である。

本研究領域は、地球変動のメカニズムの解明とその予測、環境への影響の把握、環境保全関連技術の確立等により人間の諸活動の環境への負荷の低減を目指す「環境にやさしい社会の実現」という戦略目標の下に設定された。このような非常に広い分野をカバーする戦略目標に対して、研究領域としては、人類と環境との調和を目指し、環境汚染の計測・評価、環境の保全や改善、これらを実現していくための社会システムに関する研究を対象として推進された。

このような背景から、本研究領域を特徴付ける重要な点は、採択する研究課題を純然たる自然科学技術系研究に限定せず、経済学などの社会科学系の研究も包含し、更に、基礎研究・要素技術研究に限定せず、システム研究も重要視した点である。このような広い視点と特徴を持つCREST 研究領域は、その後10年余のCREST 研究プログラムの展開の中では

とんど皆無と言ってよい。

こうした研究領域の特徴から、平成7年度～9年度に採択された21の研究課題は、極めて多岐に亘る。これらの研究課題を、研究領域のねらいに対応して、4つのカテゴリーに分類した。

- ①環境計測・評価技術
- ②環境対応技術
- ③環境低負荷技術
- ④社会システム

このようなカテゴリーへの分類も含めて、表1.1に全研究課題とその特徴を示す。各研究課題は「環境低負荷型の社会システム」を構成する何らかの社会システムを対象としているが、それらは多岐に亘り、また、各研究課題の研究内容も非常に多様な広い分野に及ぶ。採択された研究課題の多くは自然科学系科学技術のものであるが、社会科学そのもの乃至その要素の強い研究課題も含まれている。

1. 3 研究領域における全研究課題の研究の継続・発展状況

本研究領域における全研究課題の研究の継続・発展状況を示すデータとして、科学技術論文、特許出願、研究助成金などを、別冊の「添付データ」に示した。

自然科学技術系研究においては、研究成果を示す尺度の1つとして発表論文数が広く用いられる。「添付データ」から集計して、表1.2には、研究課題毎に、プロジェクト期間中、およびプロジェクト終了後5年間において発表された論文数として、次のデータを示した。

- ① プロジェクト期間中論文数として、研究終了時に研究者により報告書に記載された研究課題全体としての発表論文総数
- ② プロジェクト期間中論文数として、今回の調査により、Thomson-Reuters社のデータベース“Web of Science”において収録されている雑誌へ投稿されたものだけに絞って検索して得られた研究課題全体としての論文総数
- ③ プロジェクト期間中論文被引用数平均値として、今回の調査により、“Web of Science”によって検索して得られた②の全論文の被引用数の1論文当たり平均値
- ④ プロジェクト終了後5年間の論文数として、今回の調査により、研究代表者を著者として含む発表に絞って、“Web of Science”によって検索して得られた論文総数
- ⑤ プロジェクト終了後5年間の論文被引用数平均値として、今回の調査により、“Web of Science”によって検索して得られた④の全論文の被引用数の1論文当たり平均値

Thomson-Reuters社データによる発表論文においては、同社のデータシステムにおいて選定された雑誌に掲載された論文のみが取り上げられるため、国際的に認知度の低い国内雑誌などへの発表論文はカウントされない。本研究領域の研究課題には社会科学系の研究も含まれており、このような研究に対しても Thomson-Reuters社データを用いることが適切であるかどうかは疑問であり、更にはそもそも発表論文総数というものが研究評価の基準

として適切であるかどうか疑問視されている。そのような疑問点はあるが、分野の異なる研究の成果を横並びにして比較する定量的指標が他に見いだせないことから、各研究課題の研究の特徴を同一基準でのデータにより示すという意味も含めて、本データを示した。

同じように「添付データ」から集計して、表 1.2 には、研究課題毎に、プロジェクト期間中、およびプロジェクト終了後約 5 年間に於いて出願された特許数として、次のデータも示した。

- ⑥ プロジェクト期間中論文数として、研究終了時に研究者により報告書に記載された研究課題全体としての出願特許総数
- ⑦ プロジェクト期間中特許数として、今回の調査により、Thomson-Reuters 社のデータベース “Derwent Innovation Index” によって検索した結果得られた、研究課題全体としての出願特許総数
- ⑧ プロジェクト終了後 5 年間の特許数として、今回の調査により、研究代表者を発明者として含む特許に絞って、“Derwent Innovation Index” によって検索して得られた特許総数

本研究領域のように、自然科学系でも基礎的な研究、更に社会科学系の研究が多く含まれている場合、出願特許数というデータを示すことはあまり意味がないが、ここでは、各研究課題の研究の特徴を同一基準でのデータにより示すという意味で、データを示した。

本研究領域の研究課題を 4つのカテゴリーに分類した中で、発表論文数及び出願特許数という指標から見る限りでは、総じて、「社会システム」に分類される研究の発展状況が乏しく、一方、「環境計測・評価技術」、「環境対応技術」、「環境低負荷技術」に分類される自然科学技術系の研究においては、その半数以上が顕著な研究の発展を示していることが出来る。

また、表 1.3 には、各研究課題の研究の継続・発展状況を示す参考データの 1つとして、公的研究費の獲得状況を示した。

1. 4 研究から生み出された科学技術的、社会的、経済的な効果・効用及び波及効果

本研究領域を構成する 21 の研究課題の内、特徴的な 9 研究課題を選定して、詳細調査を行った。この 9 課題の研究から生み出された科学・技術の進歩に貢献する成果、応用に向けての発展、更に社会的、経済的な効果・効用に繋がる取り組みを中心に、本研究領域から生み出された科学技術的、社会的、経済的な効果・効用及び波及効果について以下に述べる。

(1.4.1) 「環境計測・評価技術」のカテゴリーの研究

- ① 研究課題「環境影響と効用の比較に基づいた化学物質の管理原則」（研究代表者：中西準子）

本研究課題の成果は、研究領域の中で最も重要なものの 1つであると考えられる。環境

影響の総合評価として、リスク削減効果とそれに伴う削減費用とを比較したベネフィット／リスク＝B／Rを基に政策の効率や優劣を評価すべきことを示した。また、同族化合物の中の主成分を明らかにすることにより、燃焼起源、農薬起源などの汚染源推定が可能であることをダイオキシンなどの実例で示した。プロジェクト終了後、産業技術総合研究所に化学物質リスク管理研究センターが新設されて研究は更に発展した。リスク／ベネフィット評価手法の開発、多くの化学物質についての詳細リスク評価書の策定・公開、リスクについての社会の合意形成を可能とすべくリスク評価支援ツールの開発と公開、等が進められた。本研究は我が国のリスク研究を先導する役割を果たした。

② 研究課題「アイソトポマーの計測による環境物質の起源推定」(研究代表者：吉田尚弘)

本研究課題では、多原子分子中のアイソトポマー(同位体分子種)の存在度を従来よりも桁違いに高精度で分析する新しい技術を開発し、この技術を二酸化窒素、メタンなどの様々な環境物質及びその前駆体に適用して、これら環境物質の起源、生成の過程と環境、生成後の変質、消滅などの履歴を明らかにすることに成功した。本研究により、地球温暖化ガスの発生・消滅などのサイクルを正確に記述するための基礎が確立された。本解析法は、日本発の新たな環境物質解析法として国際的にも注目され、我が国が世界に先駆けて新しい科学技術の領域を拓いた特筆すべき事例と言えよう。

③ 研究課題「東アジアにおける酸性物質及びオゾンの生成と沈着に関する観測と環境影響評価」(研究代表者：秋元肇)

本CREST研究は、大気汚染の研究をアジアという視点に広げたわが国初の研究であり、東アジアという広域を舞台としての酸性物質とオゾンの長距離輸送と生成・消滅を、始めて明らかにした。それまで、広域の大気汚染の研究は欧米が主導していた状況の中で、本CRESTは、東アジア各地に実際にリモートステーションを設置して通年連続観測などの研究を実際に行った初めての研究であり、世界的な観点でも価値ある成果を生んだと同時に、アジア大気汚染の研究への新しい流れを作ったといえることができる。本研究の発展として、「東アジア酸性雨モニタリングネットワーク(EANET)」が日本のイニシアチブにより組織されるなどの成果を生んでいる。

(1.4.2) 「環境対応技術」のカテゴリーの研究

① 研究課題「質の利用を中心にすえた新しい都市代謝システムの構築」(研究代表者：渡辺義公)

本CREST研究は、用途に応じた水質の水を必要な量だけ都市に供給し、不足分を自然との生態学的調和と再利用を考慮して対応する新しい都市水代謝システムの構築を目指した。特に、このシステムを、従来の考え方の大規模集中型のシステムとしてではなく、個別の都市地域毎の分散型として構築し、飲用水系と非飲用水系などそれぞれの用途に適切な質の

水を循環させるなど、水循環の新しい概念を提示した。CREST研究期間中は、分離膜を用いた精密浄水システムなど、システム構想の実現に必要な要素技術の確立に重点をおいて研究開発が進められたが、プロジェクト終了後は、小規模分散型水処理システムの構築に発展し、実際にパイロットプラントが建設されて、実証試験が進められている。

② 研究課題「微生物機能強化による水環境修復技術の確立」(研究代表者：前川孝昭)

水中の窒素源を硝化・脱窒により除去し、炭素源をメタン発酵により除去する微生物の機能強化のために、微生物の増殖を助ける栄養塩・微量金属を多孔質セルロースやマグネタイトを含むスラッジ・ビーズなどに担持させて、常時供給し続ける技術を開発した。また、水環境修復に関わる複数の微生物の混合培養による微生物間の相乗・阻害効果の積極的利用、藍藻類と藻類の栄養塩競合による有害藻類の生長阻害の積極的利用、などを研究した。開発された技術は、国内外において、乳牛や豚の糞尿処理用メタン発酵槽、地下水や井戸水の硝酸態窒素除去、河川や湖沼の水浄化、等の実証試験に供され、良好な結果を示した。本CRESTの成果は、前川研究代表者を代表取締役とする大学発ベンチャー(有)筑波バイオテック研究所に発展した。

(1.4.3) 環境低負荷技術のカテゴリーの研究

① 研究課題「環境低負荷型の高分子物質生産システムの開発」(研究代表者：土肥義治)

ポリエステルなどの生分解性プラスチックは、従来、化学合成により製造されていたのに対して、本研究は、遺伝子組換え手法などを適用して微生物の発酵生産機能を使った生分解性プラスチック生産技術を開発し、且つ再生可能な糖や植物油などのバイオマスを原料として用いるという、新しい科学技術の分野を拓いた。本研究は、また、日本の生分解性プラスチックの研究を牽引する役割を果たした。本CRESTの成果は、(株)カネカによりバイオポリマーの製品化へ発展した。

② 研究課題「都市交通の環境負荷制御システムの開発」

サブテーマ「電気自動車の開発」(グループリーダー：清水浩)

清水教授の研究は、CREST研究としては例の少ない、応用・製品化への展開を明確に据えた開発研究である。1つの方針に従って、着実に電気自動車としての応用技術の積み上げが行われてきた。CREST研究では特に、8輪駆動大型乗用車という新規な設計が行われ、また、リチウムイオン電池が実際に搭載され、電気自動車KAZ(Keio Advanced Zero-Emission Vehicle)が試作された。この試作車は最高速度311キロという世界最高の性能を実証した。CREST研究終了後、本研究は更に、大学発環境ベンチャービジネスとも言うべき複数企業とのコンソーシアムに発展し、電気自動車Eliica(Electric Li-ion Battery Car)が開発されて、エネルギー効率が高いだけでなく、乗り心地、加速感、広さなどにおいても、内燃機関自動車を上回るセダン型電気自動車として注目を集めている。

③ 研究課題「高温空気燃焼技術を用いた廃棄物・石炭高効率発電」（研究代表者：吉川邦夫）

セラミックス球を充填する新しい方式の灰溶融ガス化炉を用いて、固体燃料を高温空気によって一段階でガス化し、溶融灰分は炉外に取り出し、生成ガスから熱回収を行った後に、環境汚染物質を除去、得られた低カロリー燃料ガスの一部を燃焼させて高温熱交換器にてガス化用の高温空気/水蒸気を生成し、残りの燃料ガスを高温空気燃焼低NO_x ボイラでの蒸気発生やエンジン発電機での発電に利用するMEET (Multi-staged Enthalpy Extraction Technology: 多段階熱抽出技術)システムを開発した。微粉炭および微粉碎した木質ペレットを燃料として4トン/日規模のMEET試験装置の運転試験を実施し、コージェネレーションシステムとしての可能性を実証した。更に、より小型のシステムとして、MEETシステムのガス化部分を一段ガス化ではなく、従来の熱分解ガス化炉をベースとして、生成される熱分解ガス中のタール分を高温水蒸気/空気の混合気で改質する二段ガス化方式のSTAR-MEETシステムを考案し、試験プラントの建設・運転により実証に成功した。

本CREST研究の成果は、大学発ベンチャー（株）エコミート・ソリューションズに発展した。

(1.4.4)「社会システム」のカテゴリーの研究

① 研究課題「地球環境保全のための国際的枠組みのあり方」（研究代表者：佐和 隆光）

本CREST研究は、我が国において、地球環境保全のための国際的枠組みを科学的に取りあげた初めての試みということができる。二酸化炭素排出低減を国際的規模で進めるための制度としての排出権取引、共同実施、クリーン開発メカニズムなどについて、我が国としては初めて本格的に経済学的意味についての研究に取り組み、それ以降、このような分野の研究が我が国において盛んに行われるようになるためのさきがけとなった。気候変動枠組み条約締約国会議がCOP3（京都会議）以降開催される毎に、研究成果を発表し、政策決定に影響を与えるべく情報発信を行った。

② 研究課題「自立都市をめざした都市代謝システムの開発」（研究代表者：柏木孝夫）

本CREST研究では、都市を一つの代謝系とみなす観点から、エネルギー、水、物質、大気を循環系とし、さらに生態系を含めた土地利用、インフラ整備の点から緑地や都市計画も要素として考慮して、これらを総合的に組み合わせた都市シミュレータを開発した。このシミュレータのシステム構成要素として、エネルギー、交通、水供給処理、廃棄物処理などのサブシステムも開発された。本「都市シミュレータ」は、研究期間中には、八王子市を対象として実際の解析に適用され、その後も、利用可能な状態で保管されている。今後、環境保全のための政策として、地方自治体の都市計画の中で環境負荷を総合的に明らかにすることが重要となれば、本「都市シミュレータ」は大きく注目されると予想される。

表 1-1. CREST研究領域「環境低負荷型の社会システム」追跡調査 研究課題一覧表

採択年度	研究代表者	研究課題	研究課題の特徴							詳細調査実施
			対象とする社会システム	研究分野	研究における社会科学的要素	研究の分類				
						環境計測・評価技術	環境対応技術	環境低負荷技術	社会システム	
平成7年度	秋元 肇	東アジアにおける酸性物質及びオゾンの生成と沈着に関する観測と環境影響評価	農村・森林・都市	大気汚染		○				○
	柏木 孝夫	自立都市をめざした都市代謝システムの開発	都市	エネルギー・水・廃棄物					○	○
	久保 幸夫	都市ヒートアイランドの計画制御システム	都市	気象			○			
	小林 和彦	CO2倍増時の生態系のFACE実験モデリング	農業	農業生産		○				
	佐久川 弘	森林衰退に係る大気汚染物質の計測、動態、制御	森林利用	大気汚染		○				
	土肥 義治	環境低負荷型の高分子物質生産システムの開発	工業生産	再生可能技術				○		○
	中西 準子	環境影響と効用の比較評価に基づいた化学物質の管理原則		化学物質管理		○			△	○
前川 孝昭	微生物機能強化による水環境修復技術の確立	都市	水汚染			○				
平成8年度	茅根 創	サンゴ礁におけるCO2固定バイオリアクター構築技術の開発	海洋利用	資源利用		○				
	佐和 隆光	地球環境保全のための国際的枠組みのあり方	全般	経済システム	◎				○	○
	野池 達也	新世代型低負荷環境保全技術による廃棄物のエネルギー化・再資源化	都市	廃棄物リサイクル			○			
	盛岡 通	社会実験地における循環複合体の構築と環境調和技術の開発	都市・農村	循環システム	△				○	
	矢木 修身	微生物を活用する汚染土壌修復の基盤研究	都市(主として)	土壌汚染			○			
	吉田 尚弘	アイトポマーの計測による環境物質の起源推定	全般	環境物質		○				○
	渡辺 義公	質の利用を中心にすえた新しい都市水代謝システムの構築	都市	水利用			○		△	○
平成9年度	岩田 規久男	都市交通の環境負荷制御システムの開発	都市	交通システム	○				○	
	清水 浩 (共同研究者)	サブテーマ:電気自動車開発	"	交通システム (電気自動車)				○		○
	合田 素行	農山村地域社会の低負荷型生活・生産システムの構築	農村	環境低負荷システム	○				○	
	香山 晃	低環境負荷エネルギー用複合機能構造材料の開発	工業生産	エネルギー効率向上				○		
	定方 正毅	途上国に適合する連鎖反応を利用した乾式脱硫プロセスの開発	工業生産	廃棄物処理			○			
	松藤 泰典	セラピューティック煉瓦造住宅の住環境効果	都市	環境低負荷住宅				○		
	吉川 邦夫	高温空気燃焼技術を用いた廃棄物・石炭高効率発電	都市	エネルギー効率向上				○		○

表 -1-2. CREST「環境低負荷型の社会システム」全研究課題の論文数、論文被引用数平均値、特許数、成果の展開

採択年度	No.	研究代表者	研究課題名	プロジェクト期間中(課題全体)					プロジェクト終了後(研究代表者のみ)			特筆すべき成果の展開
				研究報告書記載		データ検索			データ検索			
				論文数(*1)	特許数(*2)	論文数(*3)	被引用数平均値(*4)	特許数(*5)	論文数(*6)	被引用数平均値(*7)	特許数(*8)	
平成7年度	H7-1	秋元 肇	東アジアにおける酸性物質及びオゾンの生成と沈着に関する観測と環境影響評価	40	1	34	21	1	55	7	---	アジア規模の汚染評価
	H7-2	柏木孝夫	自立都市をめざした都市代謝システムの開発	45	---	4	8	4	17	4	---	都市シミュレータ開発
	H7-3	久保幸夫	都市ヒートアイランドの計画制御システム	33	---	2	25	---	8	1	q	シミュレーション結果提供
	H7-4	小林和彦	CO2倍増時の生態系のFACE実験モデリング	19	2	9	25	1	13	3	---	基礎技術構築
	H7-5	佐久川弘	森林衰退に係わる大気汚染物質の計測、動態、制御	42	---	13	9	1	26	5	---	計測データ提供
	H7-6	土肥義治	環境低負荷型の高分子物質生産システムの開発	96	7	74	29	8	150	10	5	企業による製品化
	H7-7	中西準子	環境影響と効用の比較評価に基づいた化学物質の管理原則	170	---	68	15	---	52	5	---	リスク管理の原則確立
	H7-8	前川孝昭	微生物機能強化による水環境修復技術の確立	44	19	15	9	12	37	3	16	ベンチャー起業と実証化
平成8年度	H8-1	茅根 創	サンゴ礁におけるCO2固定バイオリアクター構築技術の開発	55	3	28	9	3	21	4	1	サンゴ礁の現象解明
	H8-2	佐和隆光	地球環境保全のための国際的枠組みのあり方	253	---	14	9	---	26	4	---	国際会議への発信
	H8-3	野池達也	新世代型低負荷環境保全技術による廃棄物のエネルギー化・再資源化	64	9	24	17	5	114	4	16	研究データ提供
	H8-4	盛岡 通	社会実験地における循環複合体の構築と環境調和技術の開発	24	---	---	---	---	---	---	---	研究データ提供
	H8-5	矢木修身	微生物を活用する汚染土壌修復の基盤研究	87	7	34	19	6	90	7	15	基礎技術構築
	H8-6	吉田尚弘	アイトポマーの計測による環境物質の起源推定	82	6	22	22	3	121	10	2	革新的評価法開発
	H8-7	渡辺義公	質の利用を中心にすえた新しい都市水代謝システムの構築	91	5	45	19	4	41	5	7	パイロットプラント実証
	平成9年度	H9-1	岩田規久男 (含 清水浩)	都市交通の環境負荷制御システムの開発 (含 サブテーマ:電気自動車開発)	20	40	1	3	27	---	---	14
H9-2		合田素行	農山村地域社会の低負荷型生活・生産システムの構築	14	---	---	---	---	---	---	---	事例調査結果提供
H9-3		香山 晃	低環境負荷エネルギー用複合機能構造物の開発	222	23	46	18	14	122	3	---	新材料実用化試験
H9-4		定方正毅	塗上体に適合する連鎖反応を利用した乾式脱硫プロセスの開発	60	11	22	11	10	26	3	3	新プロセス基礎確立
H9-5		松藤泰典	セラピューティック煉瓦造住宅の住環境効果	20	11	1	1	8	1	1	5	実験住宅にて実証
H9-6		吉川 邦夫	高温空気燃焼技術を用いた廃棄物・石炭高効率発電	18	7	8	2	9	27	2	4	ベンチャー起業と実証化
(合計)				1499	151	464	---	116	947	---	88	---

- (*1) プロジェクト期間中論文数: 研究終了報告書に記載された研究課題全体としての発表論文総数
- (*2) プロジェクト期間中特許数: 研究終了報告書に記載された研究課題全体としての出願特許総数
- (*3) プロジェクト期間中論文数: Thomson-Reuters社のデータベース“ Web of Science” において収録されている雑誌へ投稿されたものだけに絞った研究課題全体としての論文総数(今回の調査による)
- (*4) プロジェクト期間中論文被引用数平均値: (*3) の全論文の被引用数の1論文当たり平均値(“ Web of Science” による今回の調査)
- (*5) プロジェクト期間中出願特許数: Thomson-Reuters社のデータベース“ Derwent Innovation Index” によって検索した研究課題全体としての特許総数(今回の調査による)
- (*6) プロジェクト終了後5年間の論文数: 研究代表者が著者として含む発表に絞って、“ Web of Science” によって検索した論文総数(今回の調査による)
- (*7) プロジェクト終了後5年間の論文被引用数平均値: (*6) の全論文の被引用数の1論文当たり平均値(“ Web of Science” による今回の調査)
- (*8) プロジェクト終了後5年間の特許数: 研究代表者を発明者として含む特許に絞って、“ Derwent Innovation Index” によって検索した特許総数(今回の調査による)

第2章 研究領域における全研究課題の成果と継続・発展状況

表 2.1 研究領域「環境低負荷の社会システム」の研究代表者と研究課題

〔平成7年度〕

No.	テーマNo	研究代表者	研究課題名
2.1	H7-1	秋元 肇	東アジアにおける酸性物質及びオゾンの生成と沈着に関する観測と環境影響評価
2.2	H7-2	柏木孝夫	自立都市をめざした都市代謝システムの開発
2.3	H7-3	久保幸夫	都市ヒートアイランドの計画制御システム
2.4	H7-4	小林和彦	CO2 倍増時の生態系の FACE 実験モデリング
2.5	H7-5	佐久川弘	森林衰退に係る大気汚染物質の計測、動態、制御
2.6	H7-6	土肥義治	環境低負荷型の高分子物質生産システムの開発
2.7	H7-7	中西準子	環境影響と効用の比較評価に基づいた化学物質の管理原則
2.8	H7-8	前川孝昭	微生物機能強化による水環境修復技術の確立

〔平成8年度〕

No.	テーマNo	研究代表者	研究課題名
2.9	H8-1	茅根 創	サンゴ礁における CO2 固定バイオリアクター構築技術の開発
2.10	H8-2	佐和隆光	地球環境保全のための国際的枠組みのあり方
2.11	H8-3	野池達也	新世代型低負荷環境保全技術による廃棄物のエネルギー化・再資源化
2.12	H8-4	盛岡 通	社会実験地における循環複合体の構築と環境調和技術の開発
2.13	H8-5	矢木修身	微生物を活用する汚染土壌修復の基盤研究
2.14	H8-6	吉田尚弘	アイソトポマーの計測による環境物質の起源推定
2.15	H8-7	渡辺義公	質の利用を中心にすえた新しい都市水代謝システムの構築

〔平成9年度〕

No.	テーマNo	研究代表者	研究課題名
2.16	H9-1	岩田規久男	都市交通の環境負荷制御システムの開発
2.17	H9-2	合田素行	農山村地域社会の低負荷型生活・生産システムの構築
2.18	H9-3	香山 晃	低環境負荷エネルギー用複合機能構造材料の開発
2.19	H9-4	定方正毅	途上国に適合する連鎖反応を利用した乾式脱硫プロセスの開発
2.20	H9-5	松藤泰典	セラピューティック煉瓦造住宅の住環境効果
2.21	H9-6	吉川邦夫	高温空気燃焼技術を用いた廃棄物・石炭高効率発電

本研究領域における全研究課題のリストを表 2.1 に示す。

各研究課題毎の研究の継続・発展状況を示すデータとして、全研究課題についての研究期間中及び研究終了後の下記データを、別冊の「添付データ」に収録した。

- ① 科学技術論文
- ② 特許出願
- ③ 研究者のプロジェクト前後の職位
- ④ 受賞歴
- ⑤ 基調講演・招待講演
- ⑥ 研究助成金

本章では以下、各研究課題毎に、次の項目に従って、研究の位置づけと成果とをまとめた。

- (1) 研究のねらい
- (2) 研究課題の設定
- (3) 研究開始当時の世界の研究水準
- (4) 発想の独創性と課題の必然性
- (5) 研究の達成度

2. 1 研究課題「東アジアにおける酸性物質及びオゾンの生成と沈着に関する観測と環境影響評価」(研究代表者：秋元 肇) [H7-1]

[研究代表者]

秋元 肇 東京大学 先端科学技術研究センター 教授 (参加当時)

海洋科学技術センター 地球研究フロンティア研究システム 領域長 (終了時)

独立行政法人海洋研究開発機構 地球環境フロンティア研究センター

大気組成変動予測研究プログラムディレクター (現職)

[研究期間] 平成 8 (1996) 年 1 月～平成 13 (2001) 年 3 月

※ 詳細調査対象課題

(1) 研究のねらい

- ・ 東アジア (北東アジア及び東南アジア) の経済発展に伴い、環境影響物質の放出量は急速に増加、特に対流圏におけるオゾンと酸性物質の増加現象がみられる。
- ・ 東アジアにおける対流圏オゾン及び酸性物質の時間的・空間的変動と要因を定量的に明らかにし、その植生影響の可能性を推定する。

(2) 研究課題の設定

- ・ 二つの研究サブテーマを設定し、サブグループを設置した。
 - サブグループ①「オゾンの長距離輸送過程及び光化学的生成消滅機構の解明」
(東京大学先端科学技術研究センターグループ)
グループリーダー：秋元肇 東京大学先端科学技術研究センター教授 (当時)
 - サブグループ②「大気汚染物質の新しい測定法の開発と長距離輸送の実態解明」
(慶應義塾大学理工学部グループ)
グループリーダー：田中茂 慶應義塾大学理工学部助教授 (当時)
- ・ 研究戦略としては以下の 2 つの手法を組み合わせた。
 - ① リモートステーション (沖縄、隠岐、八方、利尻など国内 4 拠点、ロシア・モンディ、中国・黄山、タイ・スリナカリン及びインタノン) における通年連続観測の実施
 - ② 新しい大気化学測定機器の開発
- ・ 本研究で必要となった計測装置は、以下の 8 つである。
 - ① HO_x ラジカル測定装置 (東京大学)
 - ② PAN 測定装置 (東京大学)
 - ③ 硝酸ガス測定装置 (東京大学)
 - ④ 無機ハロゲンガス測定装置 (東京大学)
 - ⑤ 酸性・塩基性ガス測定装置 (慶應義塾大学)

- ⑥ アルデヒド測定装置（慶応義塾大学）
- ⑦ 無機ハロゲンガス測定装置（慶応義塾大学）
- ⑧ 過酸化水素測定装置（慶応義塾大学）

（3）研究開始当時の世界の研究水準

- ・ 大気中における酸性物質は「酸性雨」として広く認識され、測定機器の開発や生成・消滅機構の解明などの研究が進んでいた。一方、対流圏オゾンの増加現象が与える深刻な影響については認識されていなかったため、その現象を解明するための研究は十分進んでおらず、大気測定に必要となる測定機器も開発されていなかった。

（4）発想の独創性と課題の必然性

- ・ 東アジアの経済発展に伴う工業化により、対流圏におけるオゾンと酸性物質が急速に増加している。
- ・ 大気化学の見地から、また植生に対する影響を検討するにあたっては、対流圏オゾンの生成と酸性物質、両者が共存することの相乗効果を考慮する必要がある。
- ・ 大気中における酸性物質の増加については、酸性雨として広く一般に認識されているのに対し、対流圏オゾンの増加についてはほとんど認識されていない。
- ・ オゾンの増加が続いた場合、酸性物質の沈着と相まって、極めて深刻な環境影響をもたらす可能性がある。
- ・ 本課題は、これまで十分認識されなかった対流圏オゾン及び酸性物質の時間的・空間的変動を明らかにすることがねらいである。新しい大気化学測定機器を開発し、オゾンの長距離輸送過程及び光化学的生成消滅機構の解明とその要因を定量的に明らかにし、その植生影響の可能性を推定するというアプローチをとっている。

（5）研究の達成度

- ・ 大陸由来の酸性物質の生成と沈着に関するデータが年間を通じて得られた。オゾンの長距離輸送過程及び光化学的生成消滅機構が解明されたことで、対流圏内の光化学過程のモデル化及びその実証データに関して、大気化学の分野では断片的な観測が多いなか、通年観測データが多く、酸性物質について得られたことは大きな意義がある。
- ・ 当初計画した大気化学測定機器の開発にも成功しており、測定結果の信頼度は高い。これまでにない OH ラジカル・硝酸イオンなどの測定装置を開発、世界に発信できた。
- ・ AOT40 (Accumulated Exposure Over Threshold of, 40ppb) による測定は高い評価を得た。
- ・ 共同研究者からは、集中観測による大気汚染物質の分析（国立環境研究所、大阪府立大学工学部など）、または酸性物質沈着の分析（慶応義塾大学理工学部）などについて、また大陸における観測拠点において、ロシア、中国、タイなどの研究者から必要なデータ

提供、協力を得ることができ、優れた研究成果につながった。

研究課題を構成するサブグループ毎の成果は次のように要約される。

サブグループ① 「オゾンの長距離輸送過程及び光化学的生成消滅機構の解明」(東京大学)

- ・ オゾンの長距離輸送過程及び光化学的生成消滅機構の解明を実施した。
- ・ リモートステーションにおける通年観測の結果、東アジアにおける気塊は、大きく「ユーラシアバックランド気塊」、「北東アジア地域汚染気塊」、「太平洋気塊」、「南シナ海気塊」、「インド洋気塊」に分けられることがわかり、それぞれのオゾン濃度、季節変化の特徴が明らかとなった。
- ・ 特に、中国、韓国などの北東アジア地域汚染気塊により、夏季には月平均で約 20 ppbv のオゾンが生成されていることが初めて定量化された。
- ・ 大気光化学反応メカニズム解明のため、レーザー誘起蛍光法による HOx ラジカル、負イオン化学イオン化法による PAN、HN03、Cl₂/Br₂ の高感度/高精度測定装置を新たに開発し、これらを用いた観測が行なわれた。
- ・ 集中観測では、特に、HOx ラジカルの直接測定によるオゾンの光化学反応理論の検証を行い、海洋大気境界層における大気光化学プロセスになお未知の過程が含まれることが明らかになった。

サブグループ② 「大気汚染物質の新しい測定法の開発と長距離輸送の実態解明」(慶応大学)

- ・ 大陸からの酸性物質の長距離輸送とその結果である沈着について研究が進められた。
- ・ 本研究では、東アジアから放出された酸性化物質の越境汚染の実態を把握し、それらの輸送過程における生成・沈着のメカニズムを解明することを目的として、1997～2000 年の期間、沖縄、隠岐、利尻の日本近海の離島において通年観測を実施し、大気中の酸性物質と酸化性物質の測定を行なった。
- ・ 酸性・塩基性ガス、(HCl、HN03、SO₂、NH₃)、無機ハロゲンガス (Cl₂、Br₂)、アルデヒド (HCHO、CH₃CHO)、過酸化水素等の大気観測のために、拡散スクラバーのガス成分捕集装置とイオンクロマトグラフまたは液体クロマトグラフの分析装置とを組み合わせた自動連続測定装置を新たに開発した。これらの測定装置は、本研究の目的達成を可能にした。

これらの結果から、沖縄における大気中の硫黄酸化物の半数以上は中国大陸から長距離輸送されることが明らかになっている。

2. 2 研究課題「自立都市をめざした都市代謝システムの開発」(研究代表者: 柏木孝夫) [H7-2]

[研究代表者]

柏木 孝夫 東京農工大学 工学部 教授 (参加当時)

東京農工大学大学院 工学研究科 教授 (終了時)

東京工業大学 統合研究院ソリューション研究機構 教授

大学院 理工学研究科 教授 (現職)

[研究期間] 平成 8 (1996) 年 1 月～平成 13 (2001) 年 3 月

※ 詳細調査対象課題

(1) 研究のねらい

- ・ 今後のエネルギー消費や環境負荷排出の中心は都市部になると予測され、都市を環境調和型に移行させることが大きな課題である。
- ・ 本研究ではこれらの課題解決を目指し、①環境低負荷型都市を構築するための省エネ、省資源的要素技術の開発、②環境負荷特性を把握するためのシミュレーション手法の開発、③環境負荷型都市の計画立案を支援する都市シミュレータの開発、などの開発を目的とした。

(2) 研究課題の設定

- ・ 都市を一つの代謝系とみなす観点から、循環系をエネルギー、水、物質、大気の 4 要素とし、さらに生態系を含めた土地利用、インフラ整備の点から緑地や都市計画も要素として位置付けた。都市代謝系を分析するために、以下の項目を設定した。
- 1) エネルギーシステムグループ (東京農工大学工学部柏木研究室・秋澤研究室・亀山研究室、住環境計画研究所)
 - ・ 都市エネルギーモデル・カスケード技術・太陽エネルギー技術
 - ・ 集合住宅における電力消費実態調査
 - 2) ハウス・蓄熱グループ (北海道大学落藤研究室、北海学園大学佐々木研究室)
 - ・ ローエネルギーハウスの建設と評価・中長期蓄熱システムの開発
 - 3) 資源リサイクルグループ (東京農工大学工学部細見研究室)
 - ・ 水リサイクル技術
 - ・ 低環境負荷型コンポスト化
 - 4) ライフスタイルグループ (名古屋大学井村研究室)
 - ・ 都市インフラのライフスタイルアセスメント評価
 - ・ 環境意識と省エネ行動

- ・ 都市の熱環境シミュレーション
- 5) 都市計画グループ（東京農工大学永井研究室）
- ・ 低公害自動車のシミュレーションモデル廃プラスチック分別技術の開発
- 6) 都市シミュレータグループ（東京農工大学柏木研究室、アジア航測、エックス都市研究所）
- ・ +都市シミュレータの概念設計、モデル都市の評価
- ・ 都市シミュレータの開発
- ・ 樹木による大気汚染物質の除去効果の評価

（3）研究開始当時の世界の研究水準

- ・ 個々の要素技術に関しては様々な国で取り組まれた事例はあったが、自立型都市を目指した研究は世界に存在しなかった。

（4）発想の独創性と課題の必然性

- ・ 本研究は、自立型都市を目指して、都市の多様な環境側面を支えている要素を再評価すると共に、それらの技術的な解決策を最終的に都市シミュレーターとして完成させ、環境負荷を最小限とする社会システムを提言しようとするものであり、非常に幅広い技術の集合体である。
- ・ 個々の要素技術については世界に先行した事例は存在したものの、全体的なコンセプトに基づく研究は世界に存在しなかった。今後の経済発展に伴い、都市のあり方が世界中で問題になることは明らかなので、課題の必然性は極めて高いと考えられる。

（5）研究の達成度

- ・ 開発した都市シミュレータは、個別の要素技術に関しては環境負荷低減に資する技術を開発あるいは可能性を評価したもので、有望と見込めるものについてはその結果を技術的なパラメーターとして組み込んだものとなっている。
- ・ 本シミュレータでは、開発したシステム評価モデルを都市シミュレータに集約し、GISデータベースと連結して実際に利用可能なものとしてパソコン上に実現している。また、グラフィカルな表示機能を持ち、3次元画像による都市景観表示、各種シミュレーション結果の空間的な表示、アニメーション表示、施策シナリオ間の効果差分表示、環境負荷排出状況表示などを可能としている。

研究課題を構成するサブグループ毎の成果は次のように要約される。

サブグループ①エネルギーシステムグループ

- ・ コージェネレーションや低温排熱利用など都市でヒートカスケーディングを実現するための技術開発・評価としてカーナサイクル、多段型吸着冷凍機、溶液輸送型吸収冷

凍機、太陽集光用非結像フレネルレンズ、真空式氷蓄熱等に関する研究を行った。

- ・ エネルギー需要側の把握のため、集合住宅の電力消費実態調査を行い、専用部分だけでなく共用部分の消費実態を明らかにした。

サブグループ②ハウス・蓄熱グループ

- ・ 太陽エネルギーや地中熱を利用して抜本的にエネルギー消費を抑制したローエネルギーハウスを北海道大学構内に実際に建築し、その性能を評価した。
- ・ その結果、従来の住宅に比べ外部から投入されるエネルギーが 1/8 にできることを実証した。

サブグループ③資源リサイクルグループ

- ・ 雨水再利用のための消毒技術、下水汚泥の消滅処理技術、下水処理水を利用した野菜・花卉栽培による高次処理技術を実証した。
- ・ 廃プラスチックの比重差選別機の性能評価を行い、実ゴミに対して十分な塩化ビニールの選別性能を実証した。

サブグループ④ライフスタイル評価グループ

- ・ 道路・鉄道・下水道など社会インフラ整備に関する LCA を実施するとともに、地域レベルを対象とした LCA 評価サブモデルを開発し、パソコン上に実現した。

サブグループ⑤都市計画グループ

- ・ 道路整備、共通需要抑制、大量交通機関利用など都市内交通政策が省エネ・環境負荷低減に与える効果を評価した。また、交通量推定サブモデルとして整備した。電気自動車、ハイブリッド自動車の走行状態をモデル化し、都市内走行シミュレーションによって燃費関数を推定した。

サブグループ⑥都市シミュレータグループ

- ・ GIS データベースを基盤とし、エネルギー、水利用、廃棄物、交通、雨水流出、熱環境、緑地アクセシビリティ、緑地連続性評価サブモデルを結合した都市シミュレータを設計、開発し、パソコン上に実現した。
- ・ ケーススタディ都市として八王子を選び、GIS データ、パーソントリップデータ、都市施設情報等を入力し、具体的な政策の評価を実施した。

2. 3 研究課題「都市ヒートアイランドの計画制御システム」(研究代表者：久保幸夫) [H7-3]

[研究代表者]

久保 幸夫 元 慶應義塾大学環境情報学部 教授

(成果とりまとめ 三上岳彦 東京都立大学大学院理学研究科 教授)

[研究期間] 平成 8 (1996) 年 1 月～平成 12 (2000) 年 6 月 (中止)

(1) 研究のねらい

- ・ 東京、上海、バンコックの東アジアの巨大都市を選定し、リモートセンシングと気象観測からヒートアイランドの発生メカニズムを探るとともに、ヒートアイランドの緩和方法の研究を課題としている。

(2) 研究課題の設定

サブグループ①グラウンドモニタリング (高密度地上観測網) による UHI 実態解明 (三上岳彦 * 東京都立大学大学院理学研究科 教授)

サブグループ②高精度衛星画像リモートセンシングによる UHI 実態解明 (柴崎 亮介 東京大学空間情報科学研究センター 教授)

サブグループ③モデル作成と UHI 数値シミュレーション (一之瀬 俊明 国立環境研究所 主任研究員)

サブグループ④都市的土地利用制御による UHI 緩和計画 (岡部 篤行 東京大学空間情報科学研究センター 教授、福井 弘道 慶應義塾大学総合政策学部 助教授)

- ・ 東京、上海、バンコックの 3 大都市のヒートアイランド実態解明のために観測ネットワークの設置を行った。
- ・ 東京においては、23 ヶ所に風向、風速、気温、湿度の自動計測装置を設置し、電話回線を利用してデータ回収を実施するシステムを構築した。このほか 80 ヶ所に温湿度計測のデータロガーを設置した。上海の観測は華東師範大学、バンコックは AIT、チュラロンコン大学などを観測拠点とした。

(3) 研究開始当時の世界の研究水準

- ・ ヒートアイランドは先進国で、かつ人口密集度の高い地域に生じるものであり、わが国が世界に先駆けて直面した問題である。このため発足当時、世界でヒートアイランドを直接的に対象とした研究はほとんどなかった。

(4) 発想の独創性と課題の必然性

- ・ ヒートアイランドの原因としては、人工排熱の増加と地表面被覆の人工化に加えて、緑地や水面の減少による蒸発散量の減少や、沿岸地帯の埋め立てによる海風侵入効果の低下など、いくつかの要因が複合している。しかも、こうしたヒートアイランド現象は、中高緯度に位置する欧米よりも、比較的低緯度に多くの都市があるアジアにおいて深刻な問題を生じている。
- ・ しかし、アジアの諸都市におけるヒートアイランドの実態については不明な点が多く、その緩和策に関してもほとんど研究がなされていない。今後の経済発展にともない、都市のヒートアイランドは広範なアジア地域で重要問題となるので、世界における必須の課題である。

(5) 研究の達成度

- ・ ヒートアイランドを中心とする都市熱環境の計測を行うとともに、それに大きく影響を与えている人工排熱と土地利用に関して計測・調査を行い、モデルを作成した。
- ・ 人工排熱源の移転再配置や気候緩和策（緑化など）について数値シミュレーションを行い、熱環境において負荷の低い構造をもつ都市へと誘導する方策を検討した。
- ・ 本研究を遂行するに当たり、下記の4つのサブグループを組織した。
- ・ 東京首都圏に設置した120カ所の高密度気温観測データ（空間平均偏差）の補正值に主成分分析を適用して、上位2成分の固有ベクトル分布と成分スコアの日変化パターンを季節別に解析した。
- ・ また、東京首都圏を対象に、夏季と冬季の典型日を選び、局地気象モデルを用いて、気温や風の場の再現と熱環境緩和効果を定量的に評価する数値シミュレーションを行った。その結果、夏季の場合、人工排熱の20%削減では、早朝の都心部で -0.22°C の気温低下が認められたが、日中はほとんど効果がないこと、そして都市部における緑地の10%増加で、日中の都心北部で -0.3°C 以上の効果が認められた。
- ・ さらに、都市部の建物屋上を緑化することで、都心北部では -1°C 以上の気温低下が認められた。一方、東京湾の約半分を埋め立てて市街地化すると、海風の移流効果が減じて、都心部では日中の気温が 2°C 以上上昇する結果となった。
- ・ 試験的に衛星データから緑被率を算出して設定した地表面パラメータを用いて、夏季典型日の東京圏における気温と風の場を数値シミュレーションによって再現した。その結果、緑化によって都の北部で $1\sim 2^{\circ}\text{C}$ 程度の気温低下効果が現れているが、都心から湾岸部ではほとんど変化のないことが明らかになった。
- ・ 都市内土地利用については、望ましい配置をエネルギー消費という観点から検討を行った。仮想都市を想定し、その内部の土地利用配置から、一心型都市、四心型都市、十六心型都市、及び一心型空地混在都市の4つに、都市内の全メッシュですべての土地利用が均一に混在する「用途混在型都市」を加えた5つの土地利用配置に対して、局地気象

モデルによる数値シミュレーションを行った。

- その結果、都市内エネルギー消費の観点からは用途混在型都市が最も望ましく、一心型空地混在都市、十六心型都市、四心型都市、一心型都市の順でエネルギー消費が増大することが明らかになった。
- 街区スケールに関しては、熱帯地域のバンコクの中心地に対して、建物配置の効果を定量的に評価するシミュレーションを行った。

2. 4 研究課題「CO2 倍増時の生態系の FACE 実験モデリング」(研究代表者：小林和彦) [H7-4]

[研究代表者]

小林 和彦 農業環境技術研究所 気象管理科 主任研究官 (参加当時)
独立行政法人 農業環境技術研究所 室長 (終了時)
東京大学大学院 農学生命科学研究科 教授 (現職)

[研究期間] 平成 8 (1996) 年 1 月～平成 13 (2001) 年 3 月

(1) 研究のねらい

- ・ 大気中の CO₂ 濃度は、氷河期が約 1 万年前に終わって以来、およそ 280 ppmV (1 ppmV は、体積比率で 100 万分の 1) 前後で推移していたが、18 世紀後半から上昇を始め、20 世紀後半には、石炭・石油などの化石燃料の燃焼による CO₂ 放出により、約 550 ppmV になると予想される。
- ・ ここでは、アジアに特徴的な生態系である水田について、大気 CO₂ 増加がイネの生長とコメ生産性、そして水田生態系の物質やエネルギーの流れに及ぼす影響を、FACE (Free-Air CO₂ Enrichment) 実験とモデリングによって解明することを目的とした。
- ・ 水田の大気 CO₂ 濃度を FACE (Free Air CO₂ Enrichment: 解放系大気 CO₂ 増加) 装置によって高め、イネを始めとする水田生態系の構成要素および要素間の相互作用が、高 CO₂ によりどう変化するかを、実験的に解明する。
- ・ 実験結果を用いて、イネの成長と生態系の数字モデルを作り、将来の高 CO₂ の影響を予測する。

(2) 研究課題の設定

次の 4 つのサブグループを設置し、それぞれ研究課題を設定した。

サブグループ①FACE システム開発 (小林 和彦 農業環境技術研究所 室長)

サブグループ②イネ生長影響解析 (岡田 益己 東北農業試験場 上席研究官)

サブグループ③水田生態系影響解析 (吉本 真由美 農業環境技術研究所 主任研究官)

サブグループ④モデリング・データ解析 (小林 和彦・独立行政法人 農業環境技術研究所 室長)

(3) 研究開始当時の世界の研究水準

- ・ これまでにも FACE のシステムは世界に多数存在した。ただし、イネに適応する事例はなかった。

- ・ 既存の CO₂ 希釈、空気吹き込み方式の FACE に対して、純 CO₂ 放出型で空気吹き込みを行わない日本独自の方式を開発した。

(4) 発想の独創性と課題の必然性

- ・ 世界の主要な農作物、樹木等で FACE の成果がデータベース化されており、イネに関して知見が皆無であった状態を、ともかくイネに関する FACE の結果を出すことで、FACE 研究者の列に我が国の研究者が肩を並べた意義は十分認められる。
- ・ 本研究により世界で初めて開発された純 CO₂ 放出型 FACE は、その後イタリアのポプラ FACE やアメリカのダイズ FACE に採用され、より自然な状態での FACE 実験に役立っている

(5) 研究の達成度

- ・ 本研究によって得られた結果の意義は、以下の 2 点に集約される。①今までの温室やチャンバーを使った実験では完全に払拭できなかったアーティファクトの無い実験条件で、CO₂ 濃度上昇が植物の生長に及ぼす影響を定量的に解明した。②FACE におけるインタクトな生態系で、CO₂ 濃度を上昇させた時に生じる変化を明らかにした。

研究課題を構成するサブグループ毎の成果は次のように要約される。

サブグループ①FACE システム開発

- ・ 米国 FACE はブローア効果の問題とされるが、ブローア無しでも効率的に CO₂ を拡散させることに成功し、予備希釈しない CO₂ ガスを直接空气中に吹き出す純 CO₂ 放出型 FACE 装置を世界で初めて開発した。30 秒間平均 CO₂ 濃度が平均 87%の確率で、目標値の±20%以内であり、目標精度に達した。

サブグループ②イネ生長影響解析

- ・ 一枚の葉の光合成に始まり、各器官の生長、土壌からの養分吸収・分配、植物体バイオマスの形成、葉の展開と光エネルギーの捕捉、穂の形成、そしてコメ生産に至る過程の CO₂ 増加による変化を、FACE とチャンバー実験で測定した。
- ・ 個葉光合成では、CO₂ 濃度上昇に対する光合成の順化は生育段階によって異なり、稈や穂の急速な生長に伴って葉の窒素濃度が低下し、光合成速度が低下するとともに、特に FACE では生長が促進されるため窒素濃度がより低下する結果生じる。
- ・ 群落光合成・呼吸は高 CO₂ 濃度で促進されたが、促進率は生育の初期 40%程度、出穂期頃までにほぼゼロ、それ以後は高 CO₂ 濃度でむしろ減少した。
- ・ 窒素の吸収と分配では、高 CO₂ 濃度で炭水化物生成が促進されるために、幼穂分化期までの窒素の吸収が促進され、その結果モミがたくさんできるが、モミが生長を始めると多量の窒素が必要とし、吸収可能な窒素の総量は高 CO₂ 濃度で変わらない。

サブグループ③水田生態系影響解析

- ・ 大気 CO₂ 濃度の上昇はイネの生長を促進し、根のバイオマス量増加、結果として根分泌物や脱落根として土壤に供給される炭素量が増える。
- ・ 水田生態系の物質やエネルギーの流れ、微生物の活動などを、直接にあるいはイネの生長を通して間接的に変化させる。メタン放出量の変化に関しては、FACE 実験、クライマートロン・チャンバー実験ともに、CO₂ 濃度上昇が水田からのメタン放出を相当程度促進する結果となった。
- ・ 土壤微生物の変化に関しては、窒素制約下では、CO₂ 濃度上昇によって窒素固定活性が大きく高まることが観測された。炭素循環においては、FACE では水面の植生、水中の藻類の生長促進により、CO₂ 交換速度の違いが生じた。

サブグループ④モデリング・データ解析

- ・ 実験結果を統計的に解析し、イネの生長プロセスモデルを検証した。収量増加率が 15% の場合に、80%以上の確率で有意差を検出できるように実験計画を立て、毎年の実験で得られた誤差分散の情報を利用して、FACE リング内のサブプロットへの面積割り当てをより効率的なものにすることが出来た。
- ・ イネの生長プロセスモデルについては、すでに確立されている既存モデルの IGBP、GCTE の ORYZA1 と、京都大学の SIMRIW の適用と改良を行い、バイオマス量と窒素保有量の推移をシミュレートできた。

2. 5 研究課題「森林衰退に係る大気汚染物質の計測、動態、制御」(研究代表者：佐久川弘) [H7-5]

[研究代表者]

佐久川 弘 広島大学 総合科学部 助教授 (参加当時)

広島大学 総合科学部 教授 (終了時)

広島大学大学院 生物圏科学研究科 教授 (現職)

[研究期間] 平成 8 (1996) 年 1 月～平成 13 (2001) 年 3 月

(1) 研究のねらい

- ・ 全国各地の森林衰退に係わる汚染物質の計測を行い、さらにその動態および制御に関する大気化学的、気象学的解析を行う。又、土壌環境の調査や樹木への生理活性に立ち入って調査・解析する。この研究により、大気汚染物質が森林に与える影響の評価を踏まえた、新たな大気環境基準の提案に寄与する。

(2) 研究課題の設定

森林衰退のメカニズムについて、1) 大気汚染と湿性及び乾性沈着(雨、霧、露、ガス、エアロゾル)の輸送・拡散経路と気象要素の関連性を、野外観測と数値計算から検討するとともに、2) 森林生態系、とくに樹冠部から土壌にかけての影響物質の沈着量と化学変化過程の野外における定量化と、3) 衰退過程にある野外の樹木の生育状態、とくに光合成生産や葉内成分・生理活性の診断、そして、4) 影響物質の樹木に対する曝露による衰退過程の実験的検証を行った。

次の4つのグループを作り、研究を分担した。

- ・ 広島大学研究グループ：瀬戸内海沿岸山林を主に担当
- ・ 熊本県立大学研究グループ：九州山岳地域を担当
- ・ 名古屋大学研究グループ：丹沢・大山(曝露実験)を主に担当
- ・ 神奈川大学研究グループ：丹沢・大山(野外観測)を主に担当

(3) 研究開始当時の世界の研究水準

- ・ 森林衰退のメカニズムについては、オゾン由来の活性化酸素について精力的に研究が進められているが、完全に解明されておらず、十分説得力を持ったデータの蓄積、及び解析が望まれる状況にあった。
- ・ 世界・日本における酸性雨、酸性物質の森林衰退系への影響については、相当な研究蓄積があり、本研究でいくつかの見べき新規なデータが得られているが、過去の蓄積を塗り替えるような新しい知見が得られたわけではない。

- ・ 森林衰退の主因、及びその衰退機構も含めた植生の衰退メカニズム全般については、原因物質の絞込みや化学反応等の推定等なされており、一定のインパクトとみなし得るが、確実視できる結論を得るまでには尚複数の分野にまたがる多くの研究と討論がなされる必要がある。

(4) 発想の独創性と課題の必然性

- ・ 森林衰退と大気汚染との関連性及び原因解明を、全国各地の気象学、大気化学、分析化学、植物生態学、植物生理学、微生物学の研究者達と共同で行なった点に独創性がある。
- ・ 森林衰退は今後の環境問題の中でももっとも深刻な問題の一つであり、世界的に見ても重要課題である。

(5) 研究の達成度

- ・ 樹木の衰退が顕著に見られる全国4地点、丹沢・大山、乗鞍岳、瀬戸内海沿岸広島地区、九州山岳地域の大气汚染物質とその動態に関する測定データは蓄積された。
- ・ 一方、大気汚染による衰退と病害虫や森林管理の有無との相互作用に関する研究も実施し、相乗効果を評価した。その結果、瀬戸内アカマツへのマツノザイセンチュウなどの病害虫の影響は二次的で、主として大気汚染/酸性霧等により活力度が低下した樹木に限られると推定した。日本の各地で現在顕在化している森林衰退は、1960～1970年代当時の硫黄酸化物主因の急激な衰退に比し緩慢とはいえ確実に進行しており、今後国内においては窒素酸化物排出量のいっそうの削減を図ることが重要であるし、また同時にアジア諸国においても硫黄酸化物排出量並びに窒素酸化物排出量の削減を強力に推し進めることが重要であると結論した。

研究課題を構成するサブグループ毎の成果は次のように要約される。

サブグループ①瀬戸内海沿岸山林（主にアカマツを対象）

- ・ 極楽寺山の都市側山林では、汚染物質の中で窒素酸化物が特にアカマツの衰退と対応した分布を示し、都市側低標高地域で窒素酸化物濃度が高く、衰退が顕著であった。光合成の制限がアカマツ衰退に関わっていることが実験により裏付けられた。
- ・ 液相中で過酸化水素、鉄、硝酸、亜硝酸などから光化学的に発生するヒドロキシルラジカル(OHラジカル)に注目し、極楽寺山都市側斜面の数マイクロモラー毎時間程度のOHラジカルが実際にアカマツの生理活性に与える変化を曝露実験で検証した。瀬戸内沿岸アカマツの衰退に液相OHラジカルが関与していることを強く示唆した。

サブグループ②丹沢・大山研究（主にモミを対象）

- ・ 神奈川県丹沢山系の大山モミ原生林の衰退の原因を分析した。窒素酸化物から生成した硝酸酸性霧による酸性物質の沈着量が、標高の高い地域では降雨と同等または上回る量

であり、酸性霧の影響を詳細に解析した。

- ・ 葉面積あたりの窒素・マグネシウム・クロロフィル含有量、葉内の活性酸素消去系酵素活性は、いずれも衰退地で低く、活力低下を示した。
- ・ pH3以下の霧が毎年一定頻度で発生している(680mでは年間に延べ120時間程度)が、温室内において同程度の酸性霧をモミ苗木に暴露した場合、新芽の成長抑制等が起こることを検証した。
- ・ 窒素酸化物による酸性霧がモミ枯れの主因であるとほぼ断定できた。また、大気から硝酸やアンモニア等の窒素含有化合物が森林に過剰に沈着していることが示された。

サブグループ③乗鞍岳(シラビソ他を対象)

- ・ 乗鞍岳亜高山帯森林衰退の重要な要因として大気汚染物質を想定し、大気汚染物質と森林衰退の因果関係について調べた。
- ・ 5種の側鎖脂肪酸と、直鎖状C20脂肪酸を分析し、土壌劣化の進行を確認した。SO₂・NO_xの多くは人為的起源と推定された。衰退に直接関与する汚染物質の種類やその起源、また衰退の機構に関しては、本研究では未解明である。

サブグループ④九州山岳地域(主にヤクタネゴヨウを対象)

- ・ 九州山岳地域の中で、国内起源の大気汚染の影響をほとんど受けない屋久島を選び、大陸起源の汚染物質の植生への影響をヤクタネゴヨウについて調査した。
- ・ ヤクタネゴヨウの立ち枯れが見られる屋久島西部林道周辺(島の北西部)では、ヤクタネゴヨウの純光合成速度やクロロフィル含量が減少、マグネシウムなどの栄養元素溶脱が見られた。葉面及び土壌の酸性化が進行しており、島の北部で採取した降水は冬季に低pH、高硫酸濃度で、大陸の影響と見られた。

2. 6 研究課題「環境低負荷型の高分子物質生産システムの開発」(研究代表者：土肥義治) [H7-6]

[研究代表者]

土肥 義治 理化学研究所 高分子化学研究室 主任研究員 (参加当時・終了時)
理化学研究所 理事 (現職)
東京工業大学 名誉教授 (現職)

[研究期間] 平成 8 (1996) 年 1 月～平成 13 (2001) 年 3 月

※ 詳細調査対象課題

(1) 研究のねらい

- ・ 生物の物質生産機能を利用して、再生可能な炭素資源 (糖、植物油など) や二酸化炭素から優れた性能や特異な機能をもつ高分子物質を生産する、持続可能な高分子物質生産システムの確立をめざす。

(2) 研究課題の設定

体制としては、理化学研究所の集中研究の体制とした。

- ① ポリエステル生合成の遺伝子工学に関する研究
- ② 高分子加水分解酵素の構造と機能に関する研究
- ③ 高分子結晶の構造と機能に関する研究
- ④ 生分解性高分子の材料設計に関する研究

課題としては

- ・ 地球環境と調和する持続可能な社会実現の科学技術の一つとして、微生物の物質生産機能を利用して、再生可能な植物系資源 (糖、植物油) から有用な高分子物質を生産する基盤技術を開発する。
- ・ 核酸、タンパク質、多糖、ポリイソプレノイドにつづく第 5 の生体高分子として注目され始めたバイオポリエステルについて、重点的に研究する。

(3) 研究開始当時の世界の研究水準

- ・ 再生可能な植物系資源から有用な高分子物質を生産する技術は皆無であり、本研究が世界の初の試みとして実施された。

(4) 発想の独創性と課題の必然性

- ・ 微生物の高分子物質合成反応に関与する酵素群と遺伝子構造の解析を進め、遺伝子工学

的、及び代謝工学的手法により、合目的構造の新規バイオポリエステルを生合成する手法を開発する発想はこれまでにない全く独自のものである。

- また、遺伝子操作により特定のバイオポリエステルを高効率で生産する微生物や植物の育種のための基礎研究も行った。この点に関する独創性も高く評価できる。
- 今後の「環境を考慮した高分子物質の生産」の課題では、必然的にとりくまねばならないものであり、課題の必然性は極めて高いと言える。

(5) 研究の達成度

- 新規ポリエステルを生合成する数種のポリエステル生産菌の探索に成功した。更に関与する酵素の遺伝子取得、構造、機能の解析を通して、合目的構造の分子設計に基づく生合成手法の開発、構造制御による物性、分解速度のコントロールの研究等、着実に成果をあげた。
- バイオポリエステルの生合成では、ポリエステル生合成系酵素の構造と機能を分子レベルで明らかにし、共重合ポリエステルの自在合成を可能にした。バイオポリエステルの高性能材料化を目指し、生分解性脂肪族ポリエステルの単結晶の表面構造と物性及び酵素分解性との相関関係を分子・原子レベルで解明した。
- 生分解速度の制御技術開発では、高分子材料の微生物分解における微生物酵素の作用機構を分子レベルで明らかにし、加水分解酵素の構造と機能を研究した。
- これら一連の研究を生物学と高分子科学との異分野の研究者の共同作業で行った。
- 全体として、有用な高分子物質の基礎素材（ポリエステル）の生合成過程を生物化学的に解明し、生物工学的に改良して得られた成果は、科学的及び技術的な両面において相当なインパクトを与えるものである。実用化への見通しも得られており、更なる研究発展が期待される。

研究課題を構成するサブグループ毎の成果は次のように要約される。

サブグループ①新規ポリエステルの生合成と高生産生物の育種

- 優れた物性と生分解性をもつバイオポリエステルを生産する3種の微生物（*Aeromonas caviae*、*Pseudomonas* sp. 61-3、*Comamonas acidovorans*）のポリエステル生合成系酵素遺伝子を取得し、機能を解析し、ポリエステル合成酵素（PhaC）とモノマー供給系酵素（PhaJ）の大量生産方法を確立した。
- フィルム成形用の低密度ポリエチレン（LDPE）と類似な物性をもつ共重合ポリエステルの、植物油から高効率（80 wt%）で生産する遺伝子組換え微生物（*Ralstonia eutropha*）の分子育種に成功した。
- 超高分子量（300万～2000万）のポリ[(R)-3-ヒドロキシブタン酸]（P(3HB)）を合成する遺伝子組換え大腸菌（*E. coli*）の分子育種に成功した。ポリエステル合成酵素遺伝子（PhaC）とモノマー供給系酵素遺伝子（PhaA、PhaB）を導入した遺伝子組換え *E. coli*

は、糖から超高分子量の P(3HB) を生合成し、乾燥菌体重量あたり 75 wt% 蓄積した。

サブグループ②生分解性ポリエステル材料設計と機能開発

- ・ バイオ (共重合) ポリエステルの分子構造及び固体構造と物性との相関関係を明らかにし、バイオポリエステルをベースとした生分解性ポリマーアロイの高性能化及び相構造制御について検討した。各種の脂肪族ポリエステルの単結晶を作製して、それらの結晶構造を解析し、その単結晶を用いて酵素分解反応を行い、結晶表面への酵素吸着及び酵素分解反応過程を含むポリエステルの酵素分解機構を明らかにした。

サブグループ③ポリエステル加水分解酵素の構造解析と機能解明

- ・ 熔融一等温結晶化法で調整した P(3HB) 及びその共重合体のフィルムを用いて、ポリエステル分解酵素による酵素分解反応を行い、酵素分解速度と固体構造との相関を調べた。得られた知見から、高分子材料の生分解速度を制御する方法を考案した。

2. 7 研究課題「環境影響と効用の比較評価に基づいた化学物質の管理原則」(研究代表者：中西準子) [H7-7]

[研究代表者]

中西 準子 横浜国立大学 環境科学研究センター 教授 (参加当時・終了時)

独立行政法人産業技術総合研究所

化学物質リスク管理研究センター センター長 (現職)

[研究期間] 平成 8 (1996) 年 1 月～平成 13 (2001) 年 3 月

※ 詳細調査対象課題

(1) 研究のねらい

- ・ 化学物質の利用による環境リスクとベネフィットの両者を考慮して、化学物質の管理原則を導き出すための基礎となる科学的なフレームワークを提出する。
- ・ リスク評価手法の開発と事例研究を通じて、各種解析手法を開発する。
- ・ 本研究の最終的な目的は、開発した評価手法や具体例を今後の環境政策に科学的な根拠を持たせることに資することにある。

(2) 研究課題の設定

主たる研究参加者

益永 茂樹 横浜国立大学環境科学研究センター 教授

田中嘉成 横浜国立大学環境科学研究センター 客員助教授

岡 敏弘 福井県立大学経済学部 教授

巖佐 庸 九州大学理学部 教授

主な課題を「リスク評価手法開発」、「事例研究」、「発生源解析」の3つに設定した。

研究体制としては

横浜国大グループ：

- ・ 評価手法の開発
- ・ ひとの健康リスク評価手法の開発
- ・ リスク・ベネフィット解析に基づく最終評価の考え方
- ・ 環境中動態解析、リスク評価 (事例研究)
- ・ 実測 (モニタリング)
- ・ 予測のためのモデリング
- ・ それに基づく曝露評価とリスク評価
- ・ 発生源解析

九州大グループ：

- ・ 生態リスク評価手法の開発

(3) 研究開始当時の世界の研究水準

- ・ 個々の技術の世界水準との比較では、傑出したものとは言えないが、環境規制はそれぞれの国の特性にマッチしたものであることが必須であり、日本の実情に対する有効な提言を提供している。

(4) 発想の独創性と課題の必然性

- ・ 純粋に科学技術の面での独創性よりも、リスクを数量的に検討し評価するアプローチが確立されているため、科学的・行政的にインパクトを与えるものであることが独創性と評価できる。
- ・ 特筆すべき点は、本研究の成果であるリスク評価に基づく管理基準の評価は、今後新たに発生する可能性のある化学物質のリスク評価と管理基準の制定に重要な役割をはたすことが期待できる点である。

(5) 研究の達成度

- ・ 研究成果は、リスクを数量的に検討し評価するアプローチが確立されているため、科学的そして行政的にインパクトを与えるものである。
- ・ ダイオキシンの発生源解析においては、主要な発生源として焼却のほかに、過去の水田除草剤の影響があることを初めて見出した。このことは、ダイオキシンのリスク評価に新しいインパクトを与えた。
- ・ 特に、ダイオキシン、内分泌攪乱性物質についての研究では、この研究の独自性、先進性、有効性を証明できた。
- ・ 全体として、本研究は、環境中での化学物質の影響を真摯に調べるという点では基礎研究であるが、一方では実践的、政策的な科学的側面を有していると言える。

研究課題を構成するサブグループ毎の成果は次のように要約される。

サブグループ①リスク評価手法開発

- ・ リスク評価については、異種のリスク評価が可能な共通尺度として、人間の健康リスク評価のために損失余命 (LLE) を、生態リスク評価のために種の絶滅確率を提案し、その手法開発と応用を研究目標とした。
- ・ 人間の健康リスクについては、損失余命 (LLE) という尺度を用いて異種のリスクについての評価法を開発し提案した。
- ・ 生態リスク評価についての研究は、九州大学理学部を主体に研究が進められた。種の絶滅確率を尺度とすることを目標にして研究が進められた。絶滅確率については、絶滅危惧種については $1/T$ を、安定な生物集団に対しては $\log T$ 、または T を採用するこ

とが提案された。

- ・ 生態リスクについては、種間相互作用を考慮した CASM モデルを琵琶湖、諏訪湖へ適用し、化学物質規制への利用を提案した。また、食物連鎖を通じた上位栄養段階にある生物へのリスク評価モデルも構築し、それを用いてリスク評価を行なった。
- ・ リスク・ベネフィット解析においては、環境対策等の削減費用とそれに伴うコストを比較して、B/R 比=ベネフィット/リスクの大小で、その政策の効率を評価し、効率のよい政策を選択するという化学物質管理原則を提案した。

サブグループ②事例研究

- ・ 横浜国立大学環境科学研究センターにおいて、下記のような事例研究が行なわれた。その中で、具体的な解析手法を開発し、提案している。
- ・ **【ダイオキシン類の解析】**最も広範囲に事例研究が行なわれたのは、ダイオキシン(多塩素化ジベンゾダイオキシン/多塩素化ジベンゾフラン) についてであった。この研究の特徴は、有害性がないとされているコンジェナーについても分離定量し、解析に用いたこと、コンジェナー毎の物理化学的な性質の違いを考慮した解析を行ったことである。生物圏動態では、プランクトンから魚類までの食物連鎖上での栄養段階との関連、さらには鳥類(カワウなど) への蓄積とそのリスク評価などの研究が行われた。また、発生源解析では、東京湾、宍道湖などの底質の分析を通して、主要な発生源として焼却の他に水田除草剤があることを見出した。新しく見出したこれらの発生源は、ダイオキシンのリスク評価に大きな影響を与える因子となっていることを明らかにした。人の健康リスク評価を行い、胎児に対するリスクも評価した。リスクマネジメントでは、焼却炉のダイオキシン対策のリスク・ベネフィット解析を行い、施策の妥当性を検討した。
- ・ **【自動車排ガス由来のベンゼン】**常時モニタリングの結果をインターネットで広報すると同時に、その結果を用いて全国のベンゼン濃度を推定し、リスク評価を行った。それをもとにベンゼン削減策のリスク・ベネフィット解析を行った。
- ・ **【アマゾン流域の水銀汚染】**アマゾン流域の水銀汚染について、現地調査を基に水銀によるリスクの推定を行った。
- ・ **【DDT によるセグロカモメ、ハイタカに対するリスク評価】**DDT によるセグロカモメ、ハイタカに対するリスク評価を行った。生態リスクは、生息地消失換算リスクという尺度で評価した。DDT 禁止政策についての、リスク・ベネフィット解析を行った。
- ・ **【絶滅危惧種 15 種について期待多様性損失を算出】**中池見湿地(福井県) 開発に伴う絶滅危惧種 15 種について、期待多様性損失を算出した。これは、個々の生物リスクではなく、生態系全体のリスクを表現したものである。リスク・ベネフィット解析も行なった。
- ・ **【愛知万博予定地の開発のリスク】**愛知万博予定地の開発に伴う絶滅危惧種 27 種の

絶滅リスク増加分を算出した。

- ・ 【安全、環境対策の費用効果分析】 85 の安全、環境対策の費用効果分析（リスク・ベネフィット解析）を行った。
- ・ 【LLE を用いた日本人のリスク評価】 13 の物質（ディーゼル排出物、ベンゼン、ホルムアルデヒド、ラドン、クロロピロフォス、トルエン、キシレン、ヒ素、クロルデン、DDT、ダイオキシン、カドミウム、水銀）について、LLE を用いて日本人のリスクを評価し、比較した。

サブグループ③発生源解析

- ・ 上記の事例研究において、環境情報から発生源を推定する解析手法を開発し、①ダイオキシンの発生源、②ベンゼンについての PRTR データの検証、③関東域ダイオキシン排出量推定、④工業地帯におけるプロピレンの発生源、のような例について応用した。

2. 8 研究課題「微生物機能強化による水環境修復技術の確立」(研究代表者:前川孝昭) [H7-8]

[研究代表者]

前川 孝昭 筑波大学 農林工学系 教授 (参加当時・終了時)

筑波大学農林工学系 名誉教授 (現職)

(有)筑波バイオテック研究所 代表取締役 (現職)

[研究期間] 平成 8 (1996) 年 1 月～平成 13 (2001) 年 3 月

(1) 研究のねらい

- ・ 水環境の汚染原因である窒素の除去に係わる硝化・脱窒菌の機能向上を、菌体をとりにまく、環境的制約、微生物間阻害や相乗作用など混合培養系の秩序の解明と遺伝子修飾により達成を図る。
- ・ さらに、生態系を工学的に制御するバイオレメディエーション技術を含めた生態工学の確立と熱帯・温帯地域への適正化技術の開発をめざす。

(2) 研究課題の設定

主たる研究参加者

松村正利 筑波大学応用生物化学系 教授

稲盛 悠平 国立環境研究所 総合研究官

宮崎 龍雄 千葉大学理学部 教授

中原 忠篤 筑波大学応用生物化学系 教授

- ・ 遺伝子等の組換えを行わず、微生物の持つ機能を最大に引き出す手法の開発を中心課題に設定した。

下記の 5 つのグループで研究を実施した。

筑波大学 前川グループ

- ・ 微生物機能強化のための誘導手法とその遺伝的固定化
- ・ 生物間競争を利用した水環境修復技術

筑波大学 松村グループ

- ・ 点源汚染の微生物による水環境修復技術の確立
- ・ 生物間競争を利用した水環境修復技術

千葉大学

- ・ 生物間競争を利用した水環境修復技術

東北大学

- ・ 点源汚染の微生物による水環境修復技術の確立

国立環境研究所

- ・ 微生物機能強化のための誘導手法とその遺伝的固定化

(3) 研究開始当時の世界の研究水準

- ・ バイオレメディエーション自体は世界の各国で実施されている。発足当時の段階でも欧米では「バイオレメディエーション」を事業とする研究開発型ベンチャーが存在していたので、発足当時の世界の研究水準はわが国よりも高かったと言える。ただし、わが国で直面している「水環境汚染」に関しては世界ではそれほどの実績はなかった。

(4) 発想の独創性と課題の必然性

- ・ 上記のように広くバイオレメディエーションという範囲では世界に数多くの先行事例が存在したが、本研究で対象とした技術は日本の特殊性に根ざした解決策の探求という面で独創性がある。
- ・ 水や土壌の汚染はわが国においても今後、広がることが予測されているので、本研究は今後の環境技術の中で重要な位置づけを与えられる。

(5) 研究の達成度

- ・ 新規な担体の考案としては、栄養塩を担体に抱括固定化させることによって、微生物へ微量金属や栄養塩を担体表面から除放させ、微生物の増殖を促進させた。
- ・ メタン発酵では、中温菌から冷温菌の馴養による特性の変化ならびに機能強化を検討し、寒冷地用無加温メタン発酵の実用化の手掛かりを得た。さらに担体に関する発展として、常磁性体を混合させることでリアクターの安定運転のための制御を可能にし、固定床型バイオリアクターの特徴を改善した。
- ・ 積層網状体及び多孔性コンクリートブロックを浄化システムとして、茨城県江戸崎町の全長 190 m の生活廃水路に設置し、浄化実験を実施した。窒素源、炭素源については満足すべき結果を得たが、処理が困難とされるリンに関しては、活性酸素を活用した電気化学的処理を開発援用して、ほぼ処理の目標を達成した。
- ・ 中国雲南省昆明市の富栄養化湖の改善について国際共同実験を行ない、効果的な成果を収めた。また、嫌気性メタン発酵にも応用し、北海道別海町研修牧場において2年間の連続運転を行なった。
- ・ 全体として、水処理技術上の改良点が多く得られているので、河川処理技術への一定のインパクトとなり得る。

研究課題を構成するサブグループ毎の成果は次のように要約される。

サブテーマ①微生物機能強化のための誘導手法とその遺伝的固定化

- ・ 【中温メタン菌の冷温馴養過程の解析とその機能強化】寒冷地におけるメタン発酵装置が使えるメタン菌の馴養を目標として、栄養塩を包括した担体を作製し、その表面に低温域から採取したメタン菌を付着させ、活性の維持を図りながら、低温での家畜糞尿廃水の固定床型メタン発酵処理を検討した。
- ・ 【冷温メタン菌による CO₂ 固定能力と最適培地の関係】CO₂/H₂ 資化性メタン菌活性とビタミン B12 含有濃度との関係を明らかにし、ビタミン B12 の高効率生産を可能にした。
- ・ 【生物・物理・化学的因子の制御による微生物細胞の活性化・機能強化】混合培養系の中で、微生物間の相互作用下での輪虫類と物理化学的因子との関係を解析し、輪虫類を生物処理反応槽へ高密度に定着させるための操作方法を開発した。
- ・ 【硝化・脱窒菌の遺伝子修飾による細胞機能強化】増殖速度が速く分子育種が容易な従属栄養性硝化細菌の探索を行ない、硝化能と好気脱窒能を併せ持つ菌株の分子育種に成功した。

サブテーマ②点源汚染の微生物による水環境修復技術の確立

- ・ 【固定化硝化菌及び脱窒菌による硝化・脱窒速度の高効率化】淡水及び海水系での硝化・脱窒で、多孔性セルロース担体及び起毛性担体（ポリエステル担体）の安定性と効率性を確保するための諸要件を確立した。
- ・ 【腐生連鎖を組み込んだ微生物群集の有機物分解機能強化】活性汚泥及び生物膜にみられる腐生連鎖において、分解効率の高い特定種で構築した微生物生態系により、水質浄化機能の強化を図った。

サブテーマ③生物間競合を利用した水環境修復技術

- ・ 【水環境修復用微生物機能強化混合培養システムの開発とその利用】複数の微生物を同時に培養し、利用する“混合培養法”を確立するために、微生物混合培養系における微生物間相互作用の解析装置の開発を行ない、緑藻－細菌の混合培養系の解析では、クロレラとCC-1との直接接触や付着で、クロレラはゲル状粘着物質の体外への分泌を増大し、CC-1の増殖を促す事が判明した。
- ・ 【固定化硝化・脱窒菌の生態系利用による環境修復】霞ヶ浦に流入する生活排水路に浄化施設を設置し、排水路中の微生物の機能を引き出し、硝化・脱窒機能を強化し、汚濁成分の除去効率向上を図った。窒素源については、全窒素の除去率で平成9年、平成10年、平成11年を通じて30%以上、また炭素源については、多孔性コンクリートブロック区に固定化担体を充填した除去率は42%～58.3%に達するものとなった。
- ・ 【デン池水質改善用微生物固定化・水生植物併用型水質浄化装置実験】富栄養化が著しく進行している中国の雲南省にあるデン池の「緑豆渠」で、生活排水の浄化を検討した。

ホテイアオイを用いて、微生物固定化・水生植物併用型水浄化システムを構築した。アンモニア態窒素、亜硝酸態及び硝酸態窒素、全窒素の全般に渡り除去率 60%強の安定した結果を得た。

- ・ **【生分解性樹脂の分解による硝化・脱窒菌の機能向上】**包括固定化法による廃水処理で、リアクター外部からの磁力操作で担体の浮上、リアクターの閉塞を解消した。また、電気化学的処理による酸化作用を応用して、有機廃水の処理法を開発し、メタン発酵脱離液は 30 分間で脱色できた。

2. 9 研究課題「サンゴ礁における CO2 固定バイオリクター構築技術の開発」(研究代表者：茅根 創) [H8-1]

[研究代表者]

茅根 創 東京大学大学院 理学系研究科 助教授 (参加当時・終了時)

東京大学大学院 理学系研究科 准教授 (現職)

[研究期間] 平成 8 (1996) 年 12 月 1 日～平成 13 (2001) 年 11 月 30 日

(1) 研究のねらい

- ・ サンゴ礁は、光合成/石灰化を通じて活発に炭素 (CO₂) 循環に関わっている。本研究は、サンゴ礁生態系についてフィールド調査を行い、CO₂ 循環を明かにすることにより物質循環モデルを構築することを目的としている。
- ・ サンゴ礁における CO₂ 循環のメカニズムと、それがサンゴ礁生態系と地形の維持にどのように関わっているかを明らかにして、CO₂ 吸収ポテンシャルを評価し、これに基づいてサンゴ礁における大きな CO₂ フラックスを CO₂ 固定のために活用する方策を提案することが研究の狙いである。

(2) 研究課題の設定

主たる研究参加者 小池 勲夫 東京大学海洋研究所 教授

宮島 利宏 東京大学海洋研究所 助手

山室 真澄 産業技術総合研究所 主任研究員

山本 正伸 北海道大学大学院地球科学研究科 助教授

野崎 健 産業技術総合研究所 主任研究員

下記の 4 つのグループで研究を遂行した。

炭酸系・モデル構築・環境変動グループ

- ・ 東京大学理学系研究科
- ・ 国立環境研究所

栄養塩グループ

- ・ 東京大学海洋研究所
- ・ 工業技術院・資源環境技術総合研究所

有機物グループ

- ・ 工業技術院・地質調査所
- ・ 西海区水産研究所
- ・ 海洋バイオテクノロジー研究所

システム・制御グループ

- ・ 工業技術院・電子総合研究所
- ・ 工業技術院・計量研究所

(3) 研究開始当時の世界の研究水準

- ・ 本研究はサンゴ礁生態系についてフィールド調査を行い、CO₂ 循環を明らかにすることにより物質循環モデルを構築することを目的としているが、このような観点からの研究は世界に存在しなかった。

(4) 発想の独創性と課題の必然性

- ・ 上記の研究の状況に鑑み、具体的に CO₂ 循環を明らかにすることにより物質循環モデルを構築することをターゲットとして点は、独創的な研究として評価される。
- ・ 地球環境問題の中でも「CO₂ 循環にもとづく物質循環モデル」の解明は重要課題であり、この重要性はプロジェクト発足当時よりもはるかに増大している。
- ・ サンゴ礁について、炭素循環メカニズムの解明が進んでいることが評価できる。計測装置の開発についても評価できる。
- ・ 計測システム手法の確立の結果、世界ではじめて自動、通年観測に成功し、CO₂ 収支などを主体としてサンゴ礁について組織的なデータ、知見を得たことは発想の独創性の成果として評価できる。

(5) 研究の達成度

- ・ 従来のサンゴ礁研究の問題点であった測定が少数・短時間という点を解消するため、サンゴ礁に適した測定システムの開発を行なった。
- ・ 次に、開発した測定システムによって、異なる二つの型のサンゴ礁、石垣島の裾礁とパラオ諸島の堡礁とにおいて、サンゴ礁の生物群集代謝と CO₂ 変動との関係を明らかにする研究計画とした。
- ・ 期間中に起こった大規模な白化によって劣化したサンゴ礁では光合成機能が低下し、CO₂ 放出になることを観測している。
- ・ 最終的には、生産された有機物の分解・保存過程、栄養塩循環、海水流動モデル、地形形成プロセス、サンゴ群集の維持機構に関する成果に基づいて、CO₂ 固定に資するとともにサンゴ礁生態系・地形を維持できるサンゴ礁のデザイン提案を試みた。

研究課題を構成するサブグループ毎の成果は次のように要約される。

サブテーマ①測定システムの開発

- ・ 海中中の CO₂ 濃度を計測するための可搬式の自動連続計測装置を開発した。これらの計測器を搭載した総合型計測システム「クレスト号」(小型船上に設置)を石垣島白保サンゴ礁上に係留して、1998年9月～1999年9月窓の1年間の CO₂ 変動について通年観測

に成功した。

- ・ 評価結果に基づいて、パラオ諸島においては、海底設置型の観測システムを開発して通年観測に成功をおさめた。この結果、海水の炭素系をフローで高精度自動計測が可能となった。
- ・ 本研究で開発した CO₂ 計測システムと連続炭酸系測定システムによって、サンゴ礁における CO₂ と生物群集代謝の通年観測に世界ではじめて成功した。これら CO₂ と炭酸系計測システムは海洋における CO₂ 変動の観測に広く適用可能である。

サブテーマ②CO₂ 吸収ポテンシャル評価と循環メカニズムの解明

- ・ 上記測定システムによって、石垣島とパラオ諸島のサンゴ礁において、CO₂ とサンゴ礁群集代謝、物理量の通年観測を行なった。本研究期間中の 1998 年夏に、エルニーニョによってもたらされた高温水による地球規模のサンゴ礁の白化が起こった。これによって、逆に、健全なサンゴ礁の CO₂ 吸収ポテンシャルを評価することができた。
- ・ 石垣島、パラオ諸島ともに、サンゴ群集が卓越する状態での礁原の群集純生産は 100-130mmolCm⁻²日⁻¹ に低下した。この低下量は石灰化の低下量を上回り、CO₂ 濃度も劣化時には上昇したことが確認された。
- ・ サンゴ礁礁原の群集純生産は、基本的には光によって規定されることが示された。炭素系の計測から代謝量を見積もる方法を確立した。また、サンゴ礁の CO₂ 変動は、光合成と呼吸とに規定されて変動し、正味の吸収・放出は群集純生産に対応する。さらに年間の CO₂ 変動は水温に対応し、これに群集代謝が重なってサンゴ礁海水の CO₂ 変動が決定されることが明らかになった。

サブテーマ③CO₂ 固定促進とサンゴ礁のデザイン

- ・ サンゴ群集の劣化による光合成の劣化量は、400-500gCm⁻²年⁻¹ にあたる。本研究で観測した群集純生産量は、礁原生態系のすべての消費を差し引いた値であるから、陸上生態系でいう純生産 (Net Primary Production) ではなく、生態系純生産 (Net Ecosystem Production) に相当する。生態系純生産は、成長期の森林の最大値である 500gCm⁻²年⁻¹ 程度 (極相林では 0) であるから、サンゴ礁はすべての生態系の中で最大規模の光合成速度を持つ。サンゴ礁の劣化による生態系純生産の正味のロスは、0.1GtonC年⁻¹ にあたる。劣化によるロスが森林の消失のようにストックのロス (消失時だけのもの) でなく、フラックスのロス (毎年の吸収フラックスロス) であることから、地球規模の炭素循環に与える影響はきわめて大きい。本研究によって、健全なサンゴ礁の維持は CO₂ 吸収にあたることが示された。
- ・ 森林では、生産量を主に系内に植物体の形で蓄積するが、サンゴ礁では主に溶存有機炭素の形で形外に移行する。生産された有機物は、炭酸塩粒子に効率的に保存することが示された。有機物の分解実験から、溶存有機物には易分解性と難分解性のもの

があることがわかった。

- こうした成果に基づいて、サンゴ礁において生産された有機物を炭酸塩などの微粒子に吸着・沈降させて効率的に深海に隔離する手法を提案した。
- 群集代謝を規定する要因と栄養塩循環、海水流動モデルに基づいて、光合成によるCO₂固定機能を最適化するためのサンゴ礁デザインを提案した。さらに、サンゴ礁地形がサンゴ礁生態系の維持に果たしている役割を評価して、地形形成プロセスに基づいて将来の環境変動(海面上昇、温暖化)に対して、サンゴ礁地形維持のために必要な石灰化量を見積もった。
- サンゴ礁の維持機能に関する成果に基づいて、サンゴ礁を作る保全・修復のための基礎的知見を示した。

2. 10 研究課題「地球環境保全のための国際的枠組みのあり方」(研究代表者：佐和隆光) [H8-2]

[研究代表者]

佐和 隆光 京都大学経済研究所 教授 (参加当時)
京都大学経済研究所 所長 (終了時)
立命館大学大学院政策科学研究科 教授 (現職)
京都大学 経済研究所 特任教授 (現職)

[研究期間] 平成 8 (1996) 年 12 月 1 日～平成 13 (2001) 年 11 月 30 日

※ 詳細調査対象課題

(1) 研究のねらい

- ・ 1997 年の第 3 回気候変動枠組み条約締結会議(COP3)で CO2 削減目標が定められ、京都メカニズムと称される枠組みが議定書として定められた。わが国が本目標を達成するためには、開発すべき技術の検討・評価を踏まえた、国際協力の枠組み作りが必要となる。
- ・ 本研究では、技術評価を行い、すでに提案されている国際協力の枠組みの長短と実現可能性を理論的かつ実証的に解明し、効率的かつ公正な国際協力の枠組みを構想し提案することを目的とした。

(2) 研究課題の設定

主たる研究参加者

今井 晴雄 京都大学経済研究所 教授
江崎 光男 名古屋大学大学院国際開発研究科 教授
森 俊介 東京理科大学工学部経営工学科 教授

下記の 3 つのグループで研究を遂行した。

- ・ 国際制度グループ：京都議定書に盛り込まれた排出権取引、共同実施、クリーン・ディベロップメント・メカニズム (CDM) 等の国際制度の設計とそれらが及ぼす経済影響の評価、国内制度と関連の吟味等について。
- ・ 国際協力グループ：アジアの経済発展と温暖化対策に関わる国際協力について。アジアの研究者を招聘し共同研究を遂行する。CDM と ODA の関わり、途上国のコミットメント、技術移転、資金援助等が問題となる。
- ・ 技術戦略グループ：既存温暖化対策の技術の費用と効果、及び未完の温暖化対策の技術の費用・効果と実用化の時期等についてのデータ整備、二酸化炭素の海底貯蓄技術の完成が及ぼす影響、費用最小化という意味での最適エネルギー供給、対策のタイム

ングの問題等について。

(3) 研究開始当時の世界の研究水準

- ・ CDM に関する理論的、実践的研究は世界で活発に行われていた。これに対してわが国の研究実績は極めて乏しかった。
- ・ 本研究の実施により、世界の研究水準との差を大きく縮めたと言える。

(4) 発想の独創性と課題の必然性

- ・ なかでもクリーン開発メカニズム (CDM) については制度設計と有効活用のための国際協力あり方を検討した。50 年ないし 100 年の時間幅で、エネルギー・環境関連の技術開発戦略のあり方について、いくつかの有意な結論を導いた。
- ・ 技術開発の不確実性、技術の組み合わせの最適化、技術開発の費用対効果分析、等々の視点から、ユニークな環境技術開発戦略を提案した。
- ・ CDM に関する日本、中国、韓国の共同研究は、机上の理論に止まる事のない実証的研究として、中韓、政府・産業関係者の幅広い関心を集めた。
- ・ 排出権取引の実効性に関するゲーム理論的検証は、国内初の試みとして評価できる。

(5) 研究の達成度

- ・ 国際制度設計においては、理論的分析の成果として、実験経済学を中心に国際的な認知を得ている。
- ・ 京都会議 (COP3: 気候変動枠組み条約第 3 回締約国会議: 1997. 12) で採択された、京都議定書 (Kyoto Protocol) について、排出権取引や共同実施の経済学的意味と意義についての研究を進め「排出権取引等の制度設計」を行なった。
- ・ 第 4 回気候変動枠組み条約締結会議 (COP4) をはじめとして、第 5 回気候変動枠組み条約締結会議 (COP5) の準備会合、本会議等で報告された。

研究課題を構成するサブグループ毎の成果は次のように要約される。

サブグループ①国際制度グループ

- ・ 実験経済学や、ゲーム理論の手法等を用いて、排出権取引、共同実施、クリーン開発メカニズムの制度設計に関する理論的究明を行なった。
- ・ CDM に関する日本、中国、韓国の共同研究を行い、CDM における投資国となりうる日本のような先進国、CDM のホスト国として多様な投資機会をもつ中国のような途上国、近い将来、先進国となる可能性の高い韓国のような国が、それぞれの利害をすり合わせて、お互いに納得のゆく CDM の制度設計を考える上での要件を究明した。

サブグループ②国際協力グループ

- ・ 中国に的を絞り、中国への技術移転がもたらすであろう二酸化炭素の排出削減効果の評価、それがもたらすであろうマクロ経済影響の評価、中国のエネルギー消費と二酸化炭素排出量の予測、等々を行い、エネルギー・環境面での日中間国際協力の可能性とその効能を数量的に明らかにした。
- ・ 世界の工業生産の一大拠点となるであろう中国の二酸化炭素排出量を必要最小限にとどめるための、CDM 有効活用の、日本と中国の双方を利する国際協力のあり方を提案した。

サブグループ③技術戦略グループ

- ・ 50 年ないし 100 年の時間幅で、エネルギー・環境関連の技術開発戦略のあり方について、専門家の聞き取り調査や、最適化モデル分析をとおして、いくつかの有意な結論を導いた。
- ・ 技術開発に不可避的につきまとう成否の不確実性、利用可能な技術の組み合わせの最適化、技術開発に世する費用の負担、技術開発の費用対効果分析、等々の新しい視点を適宜取り込むことにより、環境技術開発戦略について独自提案を導いた。

2. 1 1 研究課題「新世代型低負荷環境保全技術による廃棄物のエネルギー化・再資源化」(研究代表者：野池達也) [H8-3]

[研究代表者]

野池 達也 東北大学 工学部 教授 (参加当時)

東北大学大学院 工学研究科 教授 (終了時)

日本大学大学院 総合科学研究科 教授 (現職)

[研究期間] 平成 8 (1996) 年 12 月 1 日～平成 13 (2001) 年 11 月 30 日

(1) 研究のねらい

- ・ 都市廃棄物の易分解性廃棄物(廃水、生ゴミ、汚泥)と難分解性廃棄物(廃プラスチック)について、その再資源化およびエネルギー化を行う。
- ・ 易分解性廃棄物は、水素発酵で水素ガスを回収し、残渣は、重金属除去ののちコンポスト化する。廃プラスチックは化学製品等に資源化する。

(2) 研究課題の設定

主たる研究参加者

高島 寛生 東北大学大学院 工学研究科 助手

水野 修 東北大学大学院 工学研究科 助手

遠藤 銀郎 東北学院大学 工学部 教授

西野 徳三 東北大学大学院 工学研究科 教授

- ・ 本研究は当初、都市活動から排出される廃棄物のエネルギー化・再資源化を図る上で、物質循環が可能である有機性廃棄物および廃プラスチックに焦点を絞り、エネルギー化・再資源化技術の開発を行うとした。
- ・ 有機性廃棄物は水素発酵プロセスで水素ガスを回収し、残渣は生物学的重金属除去工程で重金属を除去した後にコンポスト化することを狙った。

下記の 7 つのグループで研究を実施した。

- ・ 野池研究グループ (東北大学、二相式水素生産プロセス)
- ・ 奥脇研究グループ (東北大学、都市プラスチック廃棄物のエネルギー化・再資源化)
- ・ 土木研究所研究グループ (建設省土木研究所、水素発酵残渣への重金属蓄積機構の解明)
- ・ 遠藤研究グループ (東北学院大学、重金属耐性能の遺伝子工学を用いた強化)
- ・ 海田研究グループ (岩手大学、水素発酵残渣からの重金属溶出技術の確立)
- ・ 西野研究グループ (東北大学、遺伝子工学を用いたコンポスト細菌の機能強化)
- ・ 大村研究グループ (東北大学、病原細菌・ウイルス・原虫および毒性物質の安全性評

価)

(3) 研究開始当時の世界の研究水準

- ・ 「有機性廃棄物からのエネルギー回収」「発酵と光合成を組み合わせた2相式プロセスで水素生成」という面では、世界がターゲットであった。この点で世界の研究水準もわが国と同様の水準にあったと言える。
- ・ 現実に、本研究で水俣湾から採取した水銀耐性菌のトランスポゾン上におけるイントロンや水銀耐性遺伝子 mer オペロンの存在を世界ではじめて明らかにしたが、その論文が GENE (1999, 234, IF2. 461) に掲載され、米国やロシアアカデミーの著名な科学者のリファレンスを受けている。

(4) 発想の独創性と課題の必然性

- ・ 「有機性廃棄物からのエネルギー回収」「発酵と光合成を組み合わせた2相式プロセスで水素生成」という意欲的な目的を掲げた。この意味で発想の独創性は評価できる。
- ・ 今後、廃棄物問題はどの国でも深刻化することが明瞭であり、課題の必然性も高いと評価される。
- ・ ただし、エネルギー収支やコスト的な側面からも、エネルギー回収の実際技術として活用される目途を得るには至っていない。

(5) 研究の達成度

- ・ 水素発酵の乳酸菌による阻害、光合成細菌の水素生成における、青色光照射効果など、いくつかの発見が報告されているが、特筆すべき新事実の発見とはいえない。コラーゲン等の蛋白系高温コンポスト菌の単離は、難分解有機廃棄物コンポスト化の有効な手段として特許出願している。又、遺伝子水平伝達を環境浄化または有害物質処理に応用する新しい概念を特許出願している。
- ・ 有機性廃棄物から水素発酵を持続的に行なわせるには至らず、まず対象をオカラに限定して水素発酵に取り組んだ。
- ・ このプロセスでは、第1水素生成槽に有機性廃棄物を投入、水素ガスを回収した後、残渣をコンポスト工程に投入する。コンポスト工程では、コラゲナーゼなどの酵素を添加して、難分解性物質の分解を促進させる。
- ・ 第1水素生成槽から流出した有機酸およびアルコールを含む排水は、第2水素生成槽において、光合成細菌が有機酸およびアルコールを分解して水素を発生させる。第1水素生成槽および第2水素生成槽から回収された水素はエネルギー回収率理論値42.9%に対し、実験値16.9%を得ている。
- ・ 廃プラスチックは、高温NaOH水溶液を用いた混合廃プラスチックの湿式処理により、ダイオキシン等の有機塩素化合物の副生を伴わずに、塩素系プラスチックの脱塩処理

が可能であることを明らかにした。

- PET 樹脂は加水分解により、原料モノマーであるテレフタル酸に化学転換する。塩ビ材料に可塑剤として添加され、環境ホルモンであるフタル酸エステルをフタル酸とアルコールに加水分解できることを明らかにした。本処理法では、重金属は容易に浸出する。

研究課題を構成するサブグループ毎の成果は次のように要約される。

サブテーマ①有機性廃棄物の水素発酵

- コンポスト工程を導入した二相式水素生成プロセスの開発を行った。第1水素生成槽では、主に炭水化物の分解過程から水素が生成される。揮発性脂肪酸、乳酸、アルコールなどの代謝産物は、第2水素生成槽において、紅色非硫黄光合成細菌を主とする混合培養系により分解され、水素が生成される。繊維物質など難分解物質残渣は酵素添加の高温コンポスト工程によって分解を促進する。有機性廃棄物に含まれる重金属検知のための遺伝子センサーを水銀について略見通しを得た。
- オカラ、フスマ、米糠、厨芥、製麺工場排水などの有機性廃棄物からの嫌気性細菌による水素発酵について検討した。このとき、それぞれ 2.54、1.73、1.29、0.35、1.47mol / mol-hexose の水素収率が得られた。pH に関しては、最適 pH はそれぞれ 8.0~9.0、5.0~5.5 であることを見出した。オカラからの水素発酵を行った際、水素発酵から乳酸発酵に転じて水素発酵が停止する水素発酵阻害の抑制として低温熱処理（60~90℃）の有効性を確認した。光合成細菌による水素生成に関しては、実用性の観点から低級揮発性脂肪酸を主成分とした非滅菌人工基質を用いて、紅色非硫黄細菌を主とする光合成細菌混合微生物系による連続的水素生成に成功した。青色光の照射によって、光合成細菌の増殖を阻害する酸素発生微生物の増殖が抑制されることを見出した。

サブテーマ②水素発酵残渣のコンポスト化

- 難分解性有機質としてコラーゲンと脂質にターゲットを絞り、これらの有機質の分解を高温条件下で長期間にわたって安定に作用する耐熱性酵素を幅広く探索した。その結果、土壌から耐熱性コラーゲン分解酵素生産菌を、また当研究室の保存株から耐熱性コラーゲン分解酵素をそれぞれ見だし、その遺伝子を取得した。耐熱性コラーゲン分解酵素遺伝子をクローニングしてその1次構造を明らかにした結果、これまで例のない、新しいタイプのコラゲナーゼであることを明らかにし、特許出願した。

サブテーマ③重金属を検知する遺伝子センサーの開発

- 水銀耐性を獲得するための一連の遺伝子群 (Mercury resistance module) はトランスポゾン上に存在することを明らかにした。
- トランスポゾンまたはイントロンを細菌種間で水平伝達させることによって、実際の

汚染環境中およびバイオリクター中で本来その中に生息する細菌に水銀除去遺伝子等を転移させて浄化機能を発現させる方法として、新たに In-vitro 分子育種法という技術概念を特許出願した。

サブテーマ④廃プラスチックのエネルギー化・再資源化

- ・ 高温NaOH水溶液を用いた混合廃プラスチックの湿式処理により、ダイオキシン等の有機塩素化合物の副生を伴わずに、塩素系プラスチックの脱塩処理が可能であることを明らかにした。
- ・ PET樹脂は加水分解により、原料モノマーであるテレフタル酸に容易に化学転換が可能である。また、塩ビ材料に可塑剤として添加され、環境ホルモンであるフタル酸エステルをフタル酸とアルコールに加水分解できることを明らかにした。本処理法では、重金属は容易に浸出する。

2. 1 2 研究課題「社会実験地における循環複合体の構築と環境調和技術の開発」（研究代表者：盛岡 通）〔H8-4〕

〔研究代表者〕

盛岡 通 大阪大学 工学部 教授（参加当時）

大阪大学大学院 工学研究科 教授（終了時・現職）

〔研究期間〕平成 8（1996）年 12 月 1 日～平成 13（2001）年 11 月 30 日

（1）研究のねらい

- ・ 本研究は、社会実験地において、物質代謝(Metabolism Balance)と製品連鎖(Product Chain)の計測、分析、評価を行い、循環社会を形成する技術的、組織的、社会的制度次元の要素を明らかにすることを試みている。
- ・ 社会実験地としては、産業工場循環、農工連携、都市集積更新の各循環複合体について具体的な設定を行っている。
- ・ これらの社会実験地で見出された循環型社会形成に有効な社会システム要素の効果について評価を試み、より広域の社会システムへの展開についての枠組み提示を目指している。

（2）研究課題の設定

主たる研究参加者

藤田 壮 大阪大学大学院工学研究科 助教授

内藤 正明 京都大学大学院工学研究科 教授

城戸 由能 京都大学大学院工学研究科 助教授

吉田 登 和歌山大学 助教授

竹林 征雄 荏原製作所 副センター長

酒井 寛二 大阪大学先端科学研究センター 客員教授

- ・ 領域における物質代謝収支の分析(代謝分析)と製品連鎖を分析(製品連鎖分析)を進めることにより、循環型社会の特性分析、環境効率を高め得る方策を検討する。
- ・ 産業工場循環(荏原製作所藤沢工場エコインダストリアルパーク)、農工連携循環(コープこうべフードシステム)、都市集積更新(大阪中之島地区を対象)の3つを社会実験地として分析する。
- ・ それらの実験地研究間の総合化検討などを行い、実験地でのマイクロ分析をより広域の社会モデルへ展開するためのマクロ研究の枠組みの検討を試みる。

次の5つのグループで研究を実施した。

- ・ 評価研究グループ（京都大学）

- ・ 企画研究グループ（大阪大学）
- ・ 産業工場循環研究グループ（荏原製作所）
- ・ 農工連携循環研究グループ（京都大学）
- ・ 都市集積更新研究グループ（大阪大学）

（３）研究開始当時の世界の研究水準

世界と水準を競う性格の研究ではなく、我が国固有の環境問題を社会的に解決する道筋を研究するものである。

（４）発想の独創性と課題の必然性

- ・ 循環複合体研究がめざすのは、循環型の技術システムを提案し試行する過程で、新たな技術課題を発見するとともに、社会経済的、制度的な側面で解決する必要のある課題を明らかにする実践的なアプローチである。
- ・ 本研究で取り上げた研究課題は、今後、社会的要請は高まると判断できるので、将来の実用に向け、システム、法制度、経済性などを加味した総合的な手法への展開が期待される。

（５）研究の達成度

わが国では、循環型社会の構築を目指して物質収支からみた廃棄物削減やリサイクルへの取り組み、循環型社会形成にむけた法的枠組みへの取り組みなどを進められている中で、本研究がインパクトを与えることが期待される。

大別すると本研究は「循環複合体の 3 つの実験地研究」と「循環複合体の統合研究」に分けられる。

I. 循環複合体の 3 つの実験地研究

サブグループ毎の成果は次のように要約される。

サブテーマ①産業工場研究

産業工場研究では、藤沢工場エコ・インダストリアル・パークを実験地の対象地区として選び、産業工場で循環を形成する技術システムと合わせて経済、組織、社会のシステム要素を明らかにするとともに、その循環形成の効果を評価した。

- ・ 工業用ポンプについての製品マネジメント政策の設計

製品連鎖を通じて環境効率を向上させるために、製品製造（素材、構造）や使用時の駆動・制御方法に工夫をもたせるエコデザイン、メンテナンスで寿命延長を図る戦略、解体時の効率を向上させる DFD（易解体設計）戦略を設計した。

- ・ ポンプが利用されている業務ビルでの環境エンジニアリング・サービス

業務系ビルでのポンプの製品マネジメント施策についてのシミュレーションをおこない、

製品のアップグレードとメンテナンスを組み合わせることにより、資源消費を削減しつつエネルギー効率も高めて、経済的にも有利であることを明らかにした。

- ・ 藤沢エコ・インダストリアル・パークでの物質代謝マネジメント(内容省略)
- ・ 環境－経済モデルによる産業機械での循環形成効果の算定(内容省略)

サブテーマ②農工連携研究

農工連携研究では、食品の製造、流通、販売の段階で発生する副産物、廃棄物を再資源化する循環型のフードシステムと食品工場ゼロエミッションに焦点をあてて、有機野菜を対象とする循環型社会の技術と社会システムをデザインしてその効果を明らかにした。

- ・ 有機野菜の循環型の流通システムの効果分析

流通業が消費者と生産者をむすびつけ、副産物や廃棄物についても責任をもって資源循環型へと変えてゆく安心と安全の食を提供するフードシステムを設計した。

- ・ 循環システムの形成を促進する消費者の購入行動分析

農産物流通の指標財としてトマトを取り上げて、仮想市場法（CVM法）により購入表明価格を調べ、その上で実店舗での販売実験を行った結果、表明された意識と行動の差異があることを明らかにし、循環型農産物の流通拡大の戦略を得た。

- ・ 循環型農園のゼロ・エミッションの受け皿としての展開(内容省略)
- ・ 有機物の代謝マネジメントの類型化(内容省略)

サブテーマ③都市集積更新研究

都市の構造物とそれに付属した装置や製品の供給、運用（利用）、および解体・廃棄の過程を通して、環境負荷を製品のライフ（物としての生涯）を通じて小さくする戦略的な方向性を示して、その循環形成の効果を明らかにした。

- ・ 都市構造物とその部材の製品連鎖マネジメント

動脈側の生産システムに関する施策、静脈側の再生システムに関する施策、構造物の供用・維持・管理システムに関する施策の代替的なオプション体系を構築して、コンクリートの再生骨材利用、環境配慮型設計としてのフレキシブル・インフィル設計、メンテナンスによる長寿命化による環境効果を明らかにした。

- ・ 都市ライフサイクルの環境負荷評価プログラムの構築

都市や地区スケールで、幅広い施策を将来の更新をシナリオで描いて、そのうちでも効果的と判断される施策を先導的に誘導するための、都市構造物を対象とするライフサイクルの環境負荷の算定プログラムを構築した。

- ・ 都市空間の代謝マネジメントでの施策オプションのフレーム(内容省略)
- ・ 都市における長期的な都市空間構造の誘導による環境負荷削減効果(内容省略)

II. 循環複合体の統合研究

循環複合体のコンセプトを一般に展開するために二つの研究をおこなった。

サブテーマ① 循環複合体の評価研究

- ・ 循環複合体の評価研究では、ライフサイクル・アセスメントと環境効率を中心とする定量化の算定と指標のツールを構築している。さらに、公益機能を含む環境費用を関係主体に配分して、具体的な連携と組織構成の方向性を描くために、循環の効果と費用を主体別に割りふる環境会計と環境勘定の体系を構築した。

サブテーマ② 企画研究

- ・ 企画研究では、循環複合体構築の支援システムとして、事業所や自治体が資源循環の材料、製品、装置、そして再生用途などを含んで、ユーザーが循環型のシナリオの代替案を選択していくプロセスのフレームを作成し、それを手順書（ガイド）として構築した。
- ・ 開発したガイドは、3つの実験地で代表的な指標製品をとりあつかった例を具体的に示しつつ、循環構築の意思決定をみちびくフレームをユーザーに示したうえで、利用者が構想と計画の要素を入力して、代替的なシナリオを構築し、その環境効率や事業費用を評価するといったツールを合わせ持っている。

2. 1 3 研究課題「微生物を活用する汚染土壌修復の基盤研究」(研究代表者: 矢木修身) [H8-5]

[研究代表者]

矢木 修身 環境庁国立環境研究所地域環境研究グループ 総合研究官 (参加当時)
東京大学大学院 工学系研究科 教授 (終了時)
日本大学大学院 総合科学研究科 教授 (現職)
東京大学大学院 工学系研究科 附属水環境制御研究センター 教授 (現職)

[研究期間] 平成 8 (1996) 年 12 月 1 日～平成 13 (2001) 年 11 月 30 日

(1) 研究のねらい

- ・ 揮発性有機塩素化合物および重金属などで汚染された土壌を、微生物を用いて修復するための基盤技術を開発する。
- ・ すなわち、バイオレメディエーション技術の実用化における重要課題である浄化微生物の開発、浄化技術の有効性、さらに、使用微生物の環境中における挙動、生態系に及ぼす影響、有害物質の生成等の安全性評価技術の開発等、修復技術を確立する。

(2) 研究課題の設定

主たる研究参加者

岩崎 一弘 国立環境研究所 主任研究員
古川 謙介 九州大学大学院農学研究院 教授
大竹 久夫 広島大学大学院先端物質科学研究科 教授
中村 邦彦 国立水俣病総合研究センター 室長
宮 晶子 株式会社荏原製作所研究開発部 参事二級

次の5つの課題を設定した。

- ・ 分解能強化微生物の開発
- ・ 土壌中における微生物の挙動解析
- ・ 微生物センサー機能を活用する有害物質モニタリング手法の開発
- ・ 分子生態学的手法を用いる生態影響評価システムの開発
- ・ 大型土壌・地下水シミュレータによるバイオレメディエーション技術の適応性の評価。

次の5つのグループで研究を遂行した。

- ・ 東大・国環研矢木グループ (有機塩素化合物、無機水銀分解微生物の単離・育種など)
- ・ 九大古川グループ (遺伝子工学を活用する有機塩素化合物分解菌の育種)
- ・ 広大大竹グループ (微生物センサー機能を活用する有害物質のモニタリング手法の確

立)

- ・ 水俣中村グループ (有機水銀分解菌の単離と諸性質の解明)
- ・ 荏原宮グループ (浄化微生物の検出法、分子生態学的手法による生態影響評価および環境修復エンジニアリング手法の開発)

(4) 発想の独創性と課題の必然性

- ・ 土壌・地下水汚染の有機塩素化合物及び重金属汚染に対し、クロロエチレン類、水銀化合物類を中心に、有用微生物の探索・分解能の強化、土壌中における微生物の挙動、有害物質モニタリング、生態影響評価および適応技術評価を実施してきた。これらを総合的に評価する研究はこれまでにないものであり、独創性が評価できる。
- ・ 対象汚染物質は、トリクロロエチレン(TCE)、トリクロロエタン(TCA)、ポリクロロエチレン(PCE)、ポリクロロビフェニール(PCB)、塩化第二水銀、有機水銀等である。これらの物質は我が国に存在する土壌汚染の原因物質であり、我が国で実施する必然性として評価できる。
- ・ 分解能強化では、サブユニット遺伝子の相互交換を経てハイブリッド構築による分子育種等、遺伝子工学手法も活用している。

(5) 研究の達成度

有機塩素化合物、有機水銀等の有害物質分解の細菌発見・改良という科学的成果は、ほぼ、目標どおり達成されているが、その成果を土壌修復へ技術的に応用する面に、今後の研究の余地を残している。

研究課題を構成するサブグループ毎の成果は次のように要約される。

サブテーマ①分解能強化微生物の開発

- ・ TCE をよく分解するメタン酸化細菌 *Methylocystis* sp. M 株を用いるバイオレメディエーション技術を確立した。M 株は 50mg / l の TCE を分解できること、分解能は可溶性メタンモノオキシゲナーゼ (sMMO) に由来すること、また sMMO は α 、 β 、 γ の 2 個ずつのサブユニットからなるマルチコンポーネント酵素であることを明らかにし sMMO の遺伝子の全塩基配列を解読した。
- ・ TCA 分解菌の分離・同定と諸性質を明らかにし、ビフェニル資化菌 *Pseudomonas pseudoalcaligenes* KF707 株と、トルエン資化性菌の両酵素のサブユニット遺伝子を相互に置換して種々のハイブリッドを構築し、遺伝子のハイブリッド化は、新たな形質の発現に有効であることを明らかにした。PCE 脱クロル化菌 *Desulfitobacterium* sp. Y51 を分離した。PCB 分解力の異なる二つの菌株、*P. pseudoalcaligenes* KF707 株と *Burkholderia cepacia* LB400 株のビフェニルジオキシゲナーゼのサブユニット遺伝子をシャフリングシキメラ構造を構築し分解能の著

しい増大を確認した。水俣湾から分離したグラム陰性の水銀耐性菌について 1mg / 1 のメチル水銀の分解能力を確認し、有機水銀及び無機水銀の除去の可能性を明らかにした。

サブテーマ② 土壌中における微生物の挙動解析

- ・ M 株のみに特異性を有する最適プライマーの組み合わせを見だし反応液当たり 1 ～ 5 細胞までの検出を可能にした。従来、計数に 1 ヶ月を要したものが、今回開発した PCR 法を用いることにより数時間で計数が可能となった。
- ・ 塩化第 2 水銀還元菌 *P. putida* PpY101 / pSR134 の水銀耐性遺伝子 (mer オペロン) の一部を標的 DNA とし、反応チューブ (50 μ l) 当たり 1 ～ 5 細胞までの検出を可能とした。

サブテーマ③ 微生物センサー機能を活用する有害物質のモニタリング手法の開発

- ・ 運動性を有する細菌のセンサー機能を利用し、迅速高感度毒性試験法を開発した。
- ・ TCE 及び TCE 分解生産物であるクロラール、トリクロロエタノール、トリクロロ酢酸等の毒性を短時間で測定できた。また *P. aeruginosa* のアミノ酸、リン酸、O₂ のセンサー遺伝子の同定に成功した。

サブテーマ④ 分子生態学的手法を用いる生態系影響評価システムの開発

- ・ 微生物のポピュレーションダイナミクスによる生態系影響評価手法を開発した。
- ・ メタン酸化細菌を対象とした場合、16S rRNA 遺伝子、及び膜結合型と可溶性メタンモノオキシゲナーゼの *pmoA*、*mmoX*、*mmoB* 遺伝子に特異的なプライマーで PCR 及び PCR 産物の DGGE 分析を行い、土壌中におけるメタン酸化細菌に関する優先種の生態的特性の把握を可能にした。

サブテーマ⑤ 大型土壌・地下水シュミレーターによるバイオレメディエーション技術の適応性の評価

- ・ TCE 汚染不飽和土壌の浄化方法として、M 株を汚染土壌中に直接注入して混練する手法をライシメータを用いて評価した。
- ・ M 株を添加した試験区では急激な TCE の減少が認められ、25 時間後には検出限界以下のレベルに達し、M 株の有効性が確認された。大型ライシメータ (1m × 2m × 1.5m) に川砂及び地下水を充填し、TCE 及び M 株の挙動さらに M 株の浄化効果を検討した。1g の M 株は 0.1g の TCE を分解でき、TCE 汚染土壌・地下水の浄化に有効であることが判明した。
- ・ M 株について、人への安全性に関する経口、経気道、経皮、静脈内、皮膚への毒性試験ならびに生態系影響に関する魚、ミジンコ、藻類、土壌生態系への影響を調べ、

環境への影響はほとんどないものと認められた。

2. 1 4 研究課題「アイソトポマーの計測による環境物質の起源推定」(研究代表者：吉田尚弘) [H8-6]

[研究代表者]

吉田 尚弘 名古屋大学 大気水圏科学研究所 助教授 (参加当時)

東京工業大学大学院 総合理工学研究科 教授 (終了時・現職)

東京工業大学 フロンティア創造共同研究センター 教授 (現・併任)

[研究期間] 平成 8 (1996) 年 12 月 1 日～平成 13 (2001) 年 11 月 30 日

※ 詳細調査対象課題

(1) 研究のねらい

- ・ 環境に多種存在するアイソトポマー (isotopomer : 同位体分子種) の自然存在度を計測して環境物質の起源を定量的に推定する。物質循環の量的変化の中身を理解することで、環境変化の原因解明、温暖化ガスの収支の定量化などを実現する。
- ・ 質量分析法とレーザー分光法の新たな計測法を設計・開発し、環境試料への適用を図り、メタン・一酸化二窒素などの地球温暖化ガスとその前駆体について国内外重要試料の解析を行う。

(2) 研究課題の設定

- ・ 質量分析法開発グループ、レーザー分光法開発グループ、環境適用グループ、解析法開発グループに分かれ、4 グループが有機的にリアルタイムで討論・情報交換しながら、研究開発を進めた。

サブグループ①「質量分析法開発グループ」(東京工業大学大学院総合理工学研究科・(株)日立製作所)

グループリーダー：小泉英明 日立基礎研究所 所長 (当時)

→ 質量分析法の設計・開発・性能評価を担当

サブグループ②「レーザー分光法開発グループ」

(慶應義塾大学理工学部・東京工業大学大学院総合理工学研究科、アンリツ(株))

グループリーダー：上原喜代治 慶應義塾大学理工学部物理学科 教授 (当時)

→ レーザー分光法調査・設計・実験・光源開発・システム設計・性能評価を担当

サブグループ③「環境適用グループ」 (京大大学生態学研究センター・東京工業大学大学院総合理工学研究科・北海道大学低温科学研究所、北海道大学理学部地球惑星科学科)

グループリーダー：和田英太郎 京大大学生態学研究センター 教授 (当時)

→ 大気・海洋・陸域環境適用を担当

サブグループ④「解析法開発グループ」

(東京工業大学大学院総合理工学研究科・京都大学生態学研究センター・慶應義塾大学理工学部・(株)日立製作所、京都大学大学院情報学研究科、三菱総合研究所)

グループリーダー：吉田尚弘 東京工業大学大学院総合理工学研究科教授 (当時)

→ 総括、解析法開発・アイソトポマー分別様式の解析・グローバルボックスモデルの改良を担当

(3) 研究開始当時の世界の研究水準・技術水準

- ・ 従来の同位体分析は、混合物、あるいは分子全体について、単一元素の同位体比を計測・解析するのが一般的であり、同位体の組み合わせで一分子に多種存在するアイソトポマーの自然存在比を精密に計測、定量化する技術はほとんどなかった。

(4) 発想の独創性と課題の必然性

- ・ アイソトポマー (同位体分子種) は同位体を含む分子種であり、元素や分子内位置の組み合わせにより、地球温暖化気体分子には 10 程度程度のアイソトポマーが存在し、対象性の低い分子や高分子ほど、指数関数的に多種存在する。
- ・ アイソトポマーは、その環境物質の複雑な履歴を記憶している。
 - ① 起源物質はどのような自然物質、あるいは人間活動起源物質であるか
 - ② どのような過程・環境で生成されたか
 - ③ 生成後にどのように変質したか
 - ④ どのような過程・環境で消滅しているのか など
- ・ 本研究は「アイソトポマーの情報を定量的に測定する」というまったく新しいコンセプトによるもので、新たな質量分析法 (フラグメンテーション法と高分解能法) とレーザー分光法の 2 つの計測法の開発を目指した。
- ・ 確立された分子レベルのアイソトポマー解析の評価法を地球温暖化ガスに適用し、自然起源の生成・消滅メカニズムの同定・定量的解析を行い、温暖化現象などを解明することができる。

(5) 研究の達成度

- ・ アイソトポマー計測による“日本発の新たな環境物質解析法”を確立した。
- ・ アイソトポマーの自然存在度を利用して環境物質の起源に関する質的情報を読み取る解析手法を開発。この情報を定量的に読みとる新しいコンセプトの物質解析法として、新たな質量分析法とレーザー分光法の 2 つの計測法を開発した。
- ・ 地球温暖化ガスとその関連物質のアイソトポマーを計測・解析し、その起源とサイクルを正確に推定する方法を確立した。
- ・ 国内外の測定ネットワークを利用して地球規模での物質収支を解明するために、自然起

源レベルでの解明を可能とするような試料の入手、分析、解析を行い地球規模での生成・消滅メカニズムの同定と寄与を評価した。

- ・ アイソトポマーの地球規模でのマスバランス計算を行い、温暖化ガスの収支の定量化に有用であることを示した。
- ・ アイソトポマー解析法は将来観測が進むことで必ず有効な指標を与えるポテンシャルの高い評価法であるとして IPCC 報告書に本論文が引用された。
- ・ 日本発の新たな環境物質解析法として注目され、国際原子力機関 (IAEA) の「質量分析とレーザー分光法による計測と標準物質に関する有識者会議」(1999 秋)にて、モニタリングの標準物質について提言し、答申をまとめた。
- ・ IAEA 主催の第 3 回同位体技術利用環境変化研究国際会議 (2001.4) において、アイソトポマー・セッションを IAEA、JST で共催した。2001 年 7 月には横浜において 1st International Symposium on Isotopomers (第 1 回国際アイソトポマー会議)を JST 主催、IAEA およびヨーロッパ連合 (European Commission) 共催で開催した。その後、隔年で日欧米で開催されるに至っている。

① 質量分析法開発

- ・ 目標分解能 10,000、測定相対精度 10^{-4} の同位体質量分析 (MS) 法を開発した。イオン種間の感度差を低減する計測技術、最大エントロピー法などのデータ処理技術を導入し、測定精度を向上した。環境物質計測では GC より溶出する試料の検出時間が 2~5 秒と非常に短時間であり、イオン加速電源を含めた各電源高速化と高安定化を図り、従来方式より精度を 1 桁以上向上させた。CO₂ 測定時には、GC 導入低分解能、GC 導入高分解能とも、ほぼ当初目標に近い段階となった。連続導入時には、測定時間により精度が異なり、検出器を安定化して、測定時間 30-240 分で目標精度となった。アイソトポマー計測のための質量分析法の国内特許を取得し、外国特許を出願した。
- ・ 等質量数でミリマス程度の質量差しかないものに加えて、等質量のアイソトポマー計測は原則として質量分析計では不可能であった。それらの同位体比計測にはフラグメンテーション法という新たな分子内同位体分布のための計測法を考案し、旧来の同位体質量分析法に導入し可能にした。既存の精密同位体計測用 MS を改造し (以降、改造型 MS)、試料導入部を改良し、GC/MS システム (連続フロー型 MS) として構築して、環境中の地球温暖化ガスの極微量高精度計測を実現した。高分解能 MS およびレーザー分光法とともに開発したすべてのハードを駆使して環境試料の計測を行った。

② レーザー分光法開発

- ・ 質量が同じまたは非常に近い分子間の区別が困難な質量分析法の弱点を補う方法として、同位体シフトにより異なる、光の吸収強度の比較から同位体存在比を決定するレーザー分光法を開発した。CH₄ の ¹³C については 0.1 パーミル以内の測定精度と確度を実現

し、重水素の存在度の計測も可能とした。確度に関しても質量分析法との相互較正を行い、 CH_4 の ^{13}C およびD、 N_2O の ^{15}N アイソトポマー、 ^{18}O の各々で測定精度内での確度の一致を確認した。アイソトポマー計測のための吸収分光分析法の国内外特許各々2件を出願した。

③ 環境適用

- ・ 既存の精密同位体計測用MSを改造し（以降、改造型MS）、GC/MSシステム（連続フロー型MS）として構築して、環境中の地球温暖化ガスの極微量高精度計測を実現した。高分解能MSおよびレーザー分光法とともに開発した装置を駆使して環境試料の計測を行った。現在および過去の複数地点（波照間島、三陸、名古屋・横浜の都市大気、国内・タイ・イタリアの水田、タイ・シベリアの湿地、英国草地土壌、スウェーデン、南極、南極の万年雪（firn）に保存された大気）の対流圏・成層圏大気を分析し、大気中の CH_4 と N_2O アイソトポマーの時空間分布とその支配要因を明らかにした。北西太平洋、ハワイ沖、インド洋、黒海、琵琶湖内湖、アドリア海沿岸域において採取した海水試料の分析により、海洋起源の CH_4 と N_2O のアイソトポマー組成を明らかにした。また鉛直分布が海域によって異なる特徴を示すこと、そのメカニズムを明らかにした。 CH_4 の起源物質である酢酸や、シンク競合物質である非メタン炭化水素などのアイソトポマーによる解析を行って、各化合物のソースの変動などを定量的に明らかにし、 N_2O の成層圏における分布を示した。

④ 解析法開発

- ・ N_2O について、18ボックスモデルに詳細化し、さらにアイソトポマーを組み込んだモデルを作成して、過去百年間に濃度上昇とともに、検知しうる大きなアイソトポマーの変動を予測した。南極万年雪に閉じこめられた過去の大気の観測結果は、この内容と調和的であることを確認した。

2. 15 研究課題「質の利用を中心にすえた新しい都市水代謝システムの構築」(研究代表者：渡辺義公) [H8-7]

[研究代表者]

渡辺 義公 北海道大学 工学部 教授 (参加当時)

北海道大学大学院工学研究科 教授 (終了時)

北海道大学環境ナノ・バイオ工学研究センター 特任教授 (現職)

[研究期間] 平成 8 (1996) 年 12 月 1 日～平成 13 (2001) 年 11 月 30 日

※ 詳細調査対象課題

(1) 研究のねらい

- ・ 現代の都市水代謝を支えている近代上下水道は、構造的な渇水と水質汚濁に対処できず破綻しようとしている。
- ・ 本研究は、用途に応じた水質の水を必要な量だけ都市に供給し、不足分を自然との生態学的調和と水再利用を考えて対応する新しい都市代謝システムを構想している。
- ・ 本研究は、そのための技術的あい路となっている要素技術について、ブレークスルーを試みるものである。

(2) 研究課題の設定

主たる研究参加者

岡部 聡 北海道大学大学院 工学研究科 助教授 (現在、教授)

木村 克輝 北海道大学大学院 工学研究科 助手 (現在、准教授)

但野 利秋 北海道大学大学院 農学部 教授

岩本 正和 東京工業大学 資源化学研究所 教授

平林 集 株式会社日立製作所中央研究所 主任研究員

分離膜を用いた高度上水システムの開発、ハイブリッド下水処理システム、新しい吸着剤に関する基礎研究、リン回収のための基礎研究、高度水質計測システムの開発などから構成されている。下記の 4 つのグループが研究を分担して実施した。

- ・ 渡辺グループ (北海道大学大学院工学研究科、ハイブリッド型用廃水処理システムの開発など)
- ・ 但野グループ (北海道大学大学院農学研究科・東京農業大学、リンのリサイクルのための機能性酵素の利用)
- ・ 岩本グループ (有害物質除去のための新しい吸着剤の開発)
- ・ 平林グループ (株式会社日立製作所、高感度水質計測システムの開発など)

(3) 研究開始当時の世界の研究水準

- ・ 本研究での個々の要素技術は科学的にそれぞれインパクトがある。要素技術に関しては発足当時には世界でも全く研究されていなかった。
- ・ この研究で実施された要素技術開発のうち、特に、膜ろ過の開発、利用に関する研究は高く評価できる。膜ろ過に技術については、生物膜と分離膜を組み合わせた高浄水処理システム、ハイブリッド膜システムによる高度浄水処理、オゾン耐性 MF 膜による浄水などの研究、ろ過膜のファウリング機構など研究が精力的になされた点が評価できる。国際的にも評価が定着したものと評価できる。

(4) 発想の独創性と課題の必然性

- ・ 用途に応じた水質の水を必要な量だけ都市に供給し、水文サイクルのフラックスの不足分を自然との生態学的調和と水再利用を考えて対応する新しい都市水代謝システムを構想した。
- ・ 飲料用途の水については河川上流部や地下水などの清澄な水源を用い精密な浄水処理をして供給し、総需要中の大部分を占める非飲料系の用水は高度な下水処理と処理水貯留によって都市近傍に創出した水源を用いる。限られた水資源の有効利用として、極めて合理性の高い発想である。
- ・ 今後、日本および開発途上国で水をめぐる問題は深刻化するので、必然性のある研究と言える。

(5) 研究の達成度

主な要素技術として、①膜ろ過による浄水プロセスの高度化、②ハイブリッド下水処理システムの構築と効率化、③下水処理汚泥の有効利用・リサイクル(リンの回収、リン肥料化)、④微量溶解性有害物質(ヒ素、農薬)除去のための吸着剤の開発と高感度水質計測技術の開発などを計画した。

研究課題を構成するサブグループ毎の成果は次のように要約される。

サブテーマ①分離膜を用いた精密浄水システム関係

(i) 分離膜を用いた精密浄水システム

次世代型精密固液分離法としての膜分離が汎用的水処理プロセスとなるには、膜ファウリングの制御と有機・無機性溶解成分への対応が課題である。

本研究でこれまでに得た主な研究成果は以下の通りである。

- ・ 粉末活性炭循環型浸漬 MF 膜処理システム
- ・ 膜分離と生物学的酸化を組み合わせた回転平幕装置
- ・ 硫黄脱窒菌と膜分離を組み合わせた硝酸除去プロセス

- ・ フミン質による膜ファウリング機構の解明とモデル化
- ・ 傾斜管沈殿部を持つ噴流攪拌固液分離槽を前処理とした膜処理システム
- ・ 新しいオゾン耐食膜による高度浄水処理システム
- ・ エアースクラビングと逆流洗浄を組み合わせた膜洗浄法
- ・ 農薬、ヒ素等の溶解性有害物質を除去できる振動型 NF 膜分離装置

(ii) 凝集・高速固液分離・生物酸化・膜分離を組み合わせたハイブリッド下水システム

再利用水源の創出と下水からのリン回収を考慮して、多用されているアルミニウム系に代わる新しい鉄系の凝集剤 (Poly-Silicato-Iron, PSI) を用いた凝集沈殿と膜分離活性汚泥法を組み合わせたハイブリッド下水処理システムを構想し、パイロットプラントにより実証を行なった。

- ・ オンサイト使用のための PSI 製造法
- ・ 下水の凝縮沈殿処理装置としての傾斜管沈殿部を持つ噴流攪拌固液分離装置
- ・ 回転平膜による膜分離活性汚泥装置
- ・ 超電導磁石を用いた高速凝集磁気分離システム
- ・ 前凝集沈殿処理による膜分離活性汚泥法の効率化
- ・ 膜分離活性汚泥法における膜ファウリング機構
- ・ 植物根が分泌する酵素と有機酸による凝集沈殿汚泥からのリンの化溶化現効果

(iii) ハイブリッド下水処理のための生物膜の機能と構造の解析

これまでの下水処理膜はブラックボックスとして取り扱われてきた。しかし、生物膜の機能を強化してハイブリッド下水処理に組み込む新たな生物膜処理プロセスを開発するには、生物膜内に存在する微生物群の生態学的構造とその機能の関係を明らかにする必要がある。本研究では、生態学的構造を解析するために、16SrDNA クローニング法、16SrDNA 標的蛍光 DNA プローブを用いた FISH 法、DGGE 法等の分子生物学的手法を適用した。また、生物膜内 in situ での微生物活性を高い空間分解能で解析するために、 NH_4^+ 、 NO_2^- 、 NO_3^- 、 S_2^- 、 O_2 、pH を測定する微小電極を開発した。これらの新規手法を用いて都市下水生物膜内の炭素・窒素・硫黄の循環経路と下水中の有機物と窒素の除去過程の関係を明らかにした。これらの新知見は生物膜法の飛躍的發展を可能とする。

- ・ 都市下水生物膜内における硫酸塩還元細菌の population dynamics と硫酸塩還元活性分布
- ・ FISH 法と微小電極を用いた硝化細菌生物膜の生態学的構造と機能の原位置解析
- ・ 生物膜内における物質移動機構
- ・ AOC と Biofilm Formation Potential を指標とした配水管内の細菌再増殖能評価

サブテーマ②下水処理汚泥中リンの農地還元のための植物根分泌有機酸と酸性ファスファターゼ (APase) の遺伝子解析、機能評価

リン資源の枯渇に対応するために、下水に含まれるリンを回収して、植物が保持する難溶解性リンの可溶化機能(植物が分泌する酵素と有機酸の作用)を用いて食料生産のためにリサイクル利用するための研究を行なった。

- ・ ルーピン根から分泌される APase と有機酸の根圏における分布と有機態リン酸化合物分解能
- ・ ルーピンにおける分泌性 APase の分泌能と合成部位の解析
- ・ ルーピンにおける分泌性 APase 遺伝子の解析
- ・ 下水汚泥からのクエン酸と APase による難溶解性リンの可溶化
- ・ リサイクルリンの施肥効果

サブテーマ③溶解性有機・無機有害物質の除去を目的とした水処理用新素材の開発

膜ろ過でも除去できない溶解性の有機・無機有害物質の除去を目的とした新しい吸着剤及び低水温時において著しく活性が低下するマンガ酸化細菌の作用を補うためのマンガン空気酸化触媒を開発し、水処理におけるその有効性を検証した。

- ・ 農薬吸着剤としてのシリカ系メゾ多孔体の合成とその特性解析
- ・ ヒ素・リン・クロム・セレン吸着剤としてのジルコニウムメゾ構造体の合成と特性解明
- ・ 活性炭と Pt を材料としたマンガン空気酸化触媒の合成と特性解明

サブテーマ④水環境中の微量の各種農薬の一斉分析を目的とした高感度水質計測システムの開発

水環境には微量の各種農薬が存在し、いわゆる環境ホルモンとしての作用が問題視されている。本研究では、親水性農薬を含む各種農薬を高感度で一斉に分析する技術の開発を目指した。また、発ガン性消毒副生成物やカルキ臭の生成を抑えるために、水道水の残留塩素濃度を高感度でモニタリングできる超小型の測定システムを開発を目指した。

- ・ 農薬一斉分析のためのソニックスプレー噴霧器を用いたプラズマイオン源質量分析システム
- ・ 残留塩素連続モニタリングのためのマイクロ水質分析システム

2. 16 研究課題「都市交通の環境負荷制御システムの開発」(研究代表者：岩田規久男) [H9-1]

[研究代表者]

岩田 規久男 上智大学 経済学部 教授 (参加当時)

学習院大学経済学部 教授 (終了時・現職)

[研究期間] 平成9(1997)年11月1日～平成14(2002)年10月31日

※ 詳細調査対象課題

(1) 研究のねらい

- ・ 都市交通による環境負荷を最適水準まで低減するための税(自動車関連税、炭素税等の環境税)、ロードプライシング、土地利用等の諸施策について具体的提言を行なう。
- ・ 都市交通を考慮した一般均衡モデル、車種選択行動モデル、首都高サービス需要関数、首都圏土地利用と自動車交通一体化モデル等を構築、検証すると同時に、高性能・高機能の電気自動車を開発する。

(2) 研究課題の設定

主たる研究参加者

上田 孝行 東京工業大学工学部 助教授

石田 東生 筑波大学社会工学系 教授

八田 達夫 東京大学空間情報科学研究センター 教授

清水 浩 慶應義塾大学 教授

- ・ 都市交通による混雑や環境負荷の軽減を、発生原因に社会的費用を賦課する経済的インセンティブと、負荷軽減の工学技術の総合効果で実現する環境負荷制御システムを開発するため、次の三つのグループと課題を設定した。
- ・ (1) 炭素税等の環境税や混雑料金制度の導入による環境汚染物質排出量削減の評価(経済グループ)、
- ・ (2) 土地利用とロードプライシングによる都市交通制御のあり方(首都圏・環境グループ)、
- ・ (3) 魅力的かつ低コストの電気自動車を開発(電気自動車グループ)

(3) 研究開始当時の世界の研究水準

- ・ 経済グループ、電気自動車グループの成果は当時の研究水準に比較して、世界のトップクラスの水準と評価できる。

- ・ 首都圏・環境グループの課題はそれぞれの国で取り組まれている課題であるが、我が国固有の条件に対応した研究として実施した意味で世界水準であったと言える。

(4) 発想の独創性と課題の必然性

- ・ 交通経済モデルを構築し、課題等の政策効果を定量的に推定している。日本及び、首都圏の状況を把握するのにかなり有効なものと評価できる。
- ・ 都市問題はエネルギー環境問題とからんで重要である。このモデルは都市交通モデルとしても、或いは、新しい都市像検討の第1ステップのモデルとしても重要である。
- ・ 十分、高性能の電気自動車を製作できた。しかし、新しい電気自動車としての成果は大きい、現在の自動車と、そのインフラにどう組み込めるかという課題にまでは接近していない。
- ・ 三つの個別課題は夫々に、かなり、独創的な研究であり、国内外で類例は少なく、得られた成果は評価できる。

(5) 研究の達成度

研究課題を構成するサブグループ毎の成果は次のように要約される。

サブグループ① 経済グループ

応用一般均衡交通モデルを構築し、炭素税の二酸化炭素排出削減効果を推定

- ・ 国土交通省の運輸部門の二酸化炭素排出削減目標 [1990年比で17%増] を達成するための炭素税額 (11.0~11.4[万円/tC])
- ・ ガソリン価格と軽油価格の必要な値上げ幅
- ・ 低公害車の購入補助率の評価 (6.4%引き上げで二酸化炭素排出量を削減目標水準以上に削減)

車種選択による燃料税格差解消による窒素酸化物と二酸化炭素の排出削減効果を推定

- ・ 軽油課税のガソリン並課税引き上げで、NOx 排出量 7.7%、CO2 排出量 0.6%減少、ディーゼル車のシェア 5.7%に低下
- ・ ガソリン課税の軽油並課税引き下げで、NOx 排出量 2.3%、CO2 排出量 1.2%増加、ディーゼル車シェア 7.5%に低下

サブグループ② 首都圏・環境グループ

- ・ 混雑する道路を走る自動車は有害物質をより多く排出するから、通常環境税に加えて、ロードプライシングにより道路混雑を緩和して排出を抑制する。
- ・ 首都圏の環状8号線内に流入する車に対するロードプライシング (以下環八課金) の効果を分析し、便益と費用を明らかにした。
- ・ 第一に、都心の通過交通迂回と都心の道路混雑軽減による排出抑制の直接的便益、第

二に、都市のコンパクト化と、土地利用変化による交通量削減と排出削減。副次効果としてコンパクト化による都市の生産性向上である（容積率2割引き上げで都心12区全体で26.5兆円の地価上昇）環八課金は混雑料金や、ロードプライシングにより土地利用の変化を通して、さらに大幅な排出削減をもたらすことを示した。

サブグループ③ 電気自動車グループ

電気自動車を内燃機関自動車の改造車としてでなく、ゼロから設計し、電気自動車にふさわしい車体構造を創案した。又高性能化が可能な要素技術を車体構造に組み込み高性能で、かつ新しい特長を付加した電気自動車を開発した。

車体構造としては

- (a) 車輪の中にモーターを組み込むインホイールドライブ
- (b) 床下の約15cmの厚さの中空のフレームに電池等の主要部品を挿入する、コンポーネントビルトイン式フレーム
- (c) 小径8車輪を特殊なバネ形式で結ぶ、タンデム・ホイール式サスペンションを特徴とする。

また、高性能リチウムイオン電池、モーターの高効率化、及び速度コントローラーの損失を抑えるインテリジェントパワーモジュールにより性能向上をはかり、最高速度311km/h、0-400m加速時間15.3秒、100km/hでの一充電走行距離が300kmを実現した。又車室空間が著しく広く、平らで低い床面を形成し、加速時、悪路走行時、旋回時の高い水準の乗り心地を可能にした。原油を一次エネルギーとした発電を経由して、充電した当電気自動車を走らせた場合、内燃機関自動車で直接燃焼させて走行させた場合に比べ、当電気自動車は約3分の1のエネルギーで走行可能であることを明らかにした。

2. 17 研究課題「農山村地域社会の低負荷型生活・生産システムの構築」(研究代表者：合田素行) [H9-2]

[研究代表者]

合田 素行 農業総合研究所 農業構造部 環境経済研究 室長 (参加当時)
農林水産省 農林水産政策研究所 国際政策部 部長 (終了時)
鳥取環境大学 環境政策学科 教授 (現職)

[研究期間] 平成 9 (1997) 年 11 月 1 日～平成 14 (2002) 年 10 月 31 日

(1) 研究のねらい

農村地域において

- ・ 環境低負荷の生活・生産 (部分) システム
- ・ モノの動き (生産活動・体制、交易)
- ・ 情報の動き (市場との関係)
- ・ それらを支える人の動き (制度、価値観)

をシステムとして把握し、そのシステムを実際の地域社会に埋め込むための条件を明らかにして、環境低負荷型地域社会モデルを構築する。

(2) 研究課題の設定

主たる研究参加者

両角 和夫 東北大学大学院 教授
西澤 栄一郎 法政大学 助教授
田上 貴彦 CREST 研究員

- ・ 研究課題としては「実態調査」「改善案の提案と環境負荷評価」を設定し、対象とする地域としては「土幌町」「三春町」「沖永良部島」を代表地点として設定した。
- ・ 主として地域有機性資源を中心に現状と地域の問題点を明らかにし、物質収支とエネルギー収支を含む実態を総合的に把握した。

(3) 研究開始当時の世界の研究水準

- ・ 本研究の課題は世界中のそれぞれの国で、自国の条件に合わせた環境システムの課題として取り組まれている。わが国の条件を考慮に入れた取り組みとして、発足当時の世界の研究水準と同程度であったと考えられる。

(4) 発想の独創性と課題の必然性

- ・ 本研究は、持続可能な農山村のあり方を、地域資源としての有機性資源を可能な限り利

用することによって外部から当該地域への投入を少なくすること、そして地域内活動により環境に出される負荷を少なくすることを意味する「自足性 Self-Contained-ness」の概念のもとに、提案することを目標とした。

- この概念はわが国においては独創的な発想と考えられる。また、環境問題の深刻化に伴い地域ごとに解決を図ろうとする「自足性 Self-Contained-ness」の考え方は将来の有力なアプローチ方法である。
- 「自足性：Self-Containedness」の環境低負荷型地域システムを念頭に、代表的な3つの地域について現状調査を行い、各地域の特性に適応した環境低負荷型地域社会を想定した分析を行っている。

(5) 研究の達成度

代表的な3地点の環境という視点からの実態は、ある程度総合的に捉えられたものの一般的な農村事例調査に止まった。

- 当初の低負荷型生活・生産システムの構築という大きな目標に対する具体的な提案には至らず、主張するところの持続型農村というコンセプトが、代表的3地点の全てで、経済的に不成立であった。
- 有機資源の活用を中心に改善案を組み立てたが、いずれも、環境低負荷という意味で、現状と比較した場合、取り立てて有効なものとはならなかったのみならず、経済的なメリット等を生み出すことが出来なかった。
- バイオマスプロジェクトにかける比重が大きいが、バイオマスを本格的に展開する上での技術的検討、或いは社会制度上の新しい枠組み等の提案等、一步踏み込んだ独自の貢献には至らなかった。

研究課題を構成するサブグループ毎の成果は次のように要約される。

サブテーマ①実態調査

- 北海道中札内村・更別村、山形県長井市、長野県白田町、鹿児島県屋久島において実態調査を行うとともに、日本各地における自足的社会の可能性をもつ地域に関する情報を収集・整理した。
- 士幌町、三春町、沖永良部島を代表地点として、主として地域有機性資源を中心に現状と地域の問題点を明らかにし、物質収支とエネルギー収支を含む実態を総合的に把握した。バイオマス量（ふん尿などの廃棄物だけでなく農林畜産物を含む）の資源賦存、利活用度の現状とポテンシャル（家畜ふん尿の排出形態、液肥等の処理など）、需要に対する供給可能量について、推定・評価を行った。有機資源の活用という意味で、得られた結果を、窒素について例示すると、窒素の需要量ポテンシャルとしての供給量と需要量は、士幌町でそれぞれ、2593.7t-N、3924.8t-N、三春町137.9t-N、145.8t-N及び、沖永良部島で526.1t-N、924.2t-N等である。バイオガス化、バイオマス利用の2つの

技術については、社会システム面での検討事例の多いドイツ、デンマーク、スウェーデン等の実情を調査した。

サブテーマ②改善案の提案と環境負荷評価

- ・ 現状の環境負荷を評価し、有機資源の活用を中心とする、いくつかの選択肢からなる改善案を組み立て、改善を実施した後の環境負荷をLCA手法により評価した。
- ・ 【土幌町】畜産農家を主とする土幌町では、バイオガスプラントを中心とするオプションを、次のように設定した。「1. 町内の酪農家のうち、比較的大規模な農家10戸が個別のプラントを建設し、エネルギーを利用する」、「2. 町内の酪農・畜産農家のうち、150頭以上を飼養する農家全てで個別のプラントを建設し、エネルギーを利用する」、「3. 町内全ての酪農・畜産農家の飼養する全ての牛の糞尿を一箇所に集約し、バイオガスプラントでエネルギー化する」
- ・ 以上について、LCAを行うと環境負荷は大いに低減するが、富栄養化インパクトはほとんど変わらない。
- ・ バイオガスプラントによる発電単価は、現状買電を大きく上回るので単純には経済的に割に合わない。余剰電力、余剰熱の活用や、糞尿処理費との相殺を考慮するなどの工夫が必要になる。
- ・ 【三春町】農業に関連する有機性資源の有効利用をオプションとして選択し、林野・農地を利用するバイオマスエネルギー、家畜糞尿や生ごみを利用するバイオガスエネルギー及び堆肥の生産に関連するものを対象とした。
- ・ 一般家庭から排出される有機性残渣を堆肥化利用水稻の不作付地にエネルギー作物を作付し、エネルギーとして利用、及び林野のバイオマスもエネルギーとして利用する等を組み合わせて環境負荷を評価した。木質バイオマス発電により温暖化負荷を減少させるというオプションは、追加的に投入が必要なエネルギー・資材の増加によって、その効果が相殺されてしまうので環境負荷に関しては現状維持か、或いは若干増加という結果しか得られなかった。
- ・ 【沖永良部島】沖永良部島では、エネルギーとして、森林および耕作放棄地・不作付地の利用可能性が大きく、肥料としては農業副産物をマテリアル利用していくことが考えられる。
- ・ 農業に関連の深いバイオマスエネルギーの利用をオプションとして取り上げ、「1. さとうきび残渣からのエネルギー利用」、「2. さとうきびを木質系バイオマス栽培に変換し、エネルギー利用」、「3. その他花卉類まで木質系バイオマス栽培に変換してエネルギー利用」等の選択肢を組み合わせて評価した。
- ・ 酸性化、温暖化、富栄養化、及び人体毒性等の環境負荷は低減するが経済的費用は現状より増える。

2. 18 研究課題「低環境負荷エネルギー用複合機能構造材料の開発」(研究代表者：香山 晃) [H9-3]

[研究代表者]

香山 晃 京都大学 エネルギー理工学研究所 教授 (参加当時)

京都大学 エネルギー理工学研究所 教授 (現職)

[研究期間] 平成 9 (1997) 年 11 月 1 日～平成 14 (2002) 年 10 月 31 日

(1) 研究のねらい

- ・ エネルギー変換効率の向上とコスト低減・高信頼化を狙い、SiC/SiC 複合材料の苛酷環境特性や信頼性の向上に代表される高性能化、及び成形・接合・気密被覆等の技術開発により、高効率エネルギー変換システム実現の技術基盤形成を行なう。

(2) 研究課題の設定

主たる研究参加者

加藤 雄大 京都大学エネルギー理工学研究所 助教授

野田 哲二 ナノマテリアル 研究主幹

阿部 信行 大阪大学接合科学研究所 助教授

岡村 清人 大阪府立大学工学部 教授

- ・ 研究課題としては「SiC/SiC 複合材料の開発研究」「W/W 複合材料の開発研究」の 2 つの課題を設定した。

下記の 4 つのグループで研究を実施した。

- ・ 【京都大学エネルギー理工学研究所】材料システム総合開発評価グループ (応用設計、製造プロセス統合力学物性評価、熱・電磁特性評価、耐環境性付与、理論・モデリング、PIP プロセス開発)
- ・ 【京都大学エネルギー理工学研究所・金属材料技術研究所】CVI グループ (CVI プロセス開発・高度化及び高純度複合材料の作製プロセス開発)
- ・ 【京都大学エネルギー理工学研究所・大阪大学接合科学研究所】表面改質・接合グループ (耐環境性表面改質及び接合技術開発)
- ・ 【京都大学エネルギー理工学研究所・大阪府立大学工学部】プリカーサー開発グループ (新規プリカーサーの開発及び基礎研究)

(3) 研究開始当時の世界の研究水準

- ・ この研究で取り上げた課題はそれぞれ当時の世界の研究水準のトップクラスであり、研究の実施によってその地位を確固としたものにするを意図した。

(4) 発想の独創性と課題の必然性

- ・ エネルギー変換システムにおける変換効率の向上と構造簡略化によるコスト低減・高信頼化のために、炭化珪素 (SiC) 基セラミックスの、耐熱性材料の開発、苛酷環境特性や信頼性の向上、及び成形・接合・気密化等の技術開発を行った点に発想の独創性が認められる。

(5) 研究の達成度

- ・ 国際水準を抜く、特性の複合材料を得ることが出来た。国際的な連携のなかで、ブレークスルーとも評すべき成果を挙げており、科学的にも、又応用的に見ても国際レベルの研究として貢献度が高い。
- ・ セラミックス複合材料プロセスの開発、ナノ・マイクロ構造とマクロ特性や耐環境特性との相関の解明、環境影響損傷過程の理論的解析、機能附与の原理実証、各種評価技術の開発、実用機器における材料システムとしての共存性の評価等を実施した。
- ・ 炭化珪素繊維で強化された炭化珪素基複合材料 (SiC/SiC 複合材料) を中心に、タングステン合金繊維により強化されたタングステン基複合材料 (W/W 複合材料)、及びそれらの複合化要素部材の開発やこれらを用いるシステム要素の設計・製作・特性評価等を行った。開発した材料からモデル・システムを構成し、エネルギー変換機能と構造メンバーとしての力学特性ならびに耐久性能を実証し、高品位な基盤エネルギー・システムの見通しを得た。

研究課題を構成するサブグループ毎の成果は次のように要約される。

サブテーマ①SiC/SiC 複合材料の開発研究

- ・ 各国の先進エネルギーシステムの概念設計において、SiC/SiC 複合材料の開発は、大型プロジェクトと研究室レベルでの基礎研究に大別されるが、設計で想定されている材料特性には不十分な、又は欠落している要素が多く、更には基本的な工学技術基盤の未整備等、本格的な使用検討を進めるには未成熟な状態であったので SiC/SiC 複合材料開発の主たる課題を、基礎製造プロセス開発、特性評価ならびに複合機能構造化に設定した。
- ・ 基礎製造プロセスの開発は、複合材料及びその構成要素の本質的な高性能化をはかり、新しい強化繊維の開発、マトリックスの製造法や特性制御法の開発、繊維-マトリックス界面制御の高度化、積層法、3方向強化材料の製造法等の開発ならびに高度化を実施し、繊維-マトリックス界面の最適化を行った。
- ・ 特性評価は、強度特性を中心とし、物理特性、化学特性の基礎的評価に加えて、原子レベルでのマイクロ構造解析 (特に繊維-マトリックス界面を対象とする) や、中性子照射効果及びその複合場の効果などエネルギー材料に特有の環境因子に対する応答を研究

した。材料の評価においては、複合材料の微視的レベルでの基礎特性やエネルギーシステムにおける諸環境因子の効果に関する評価法を体系化し、標準化した。成形技術と接合技術の開発を進め、応用を想定した部品を試作し、実物大の製造技術の実証にも成功した。

サブテーマ②W/W複合材料の開発研究

- W/W複合材料は、1500°C以上の超高温での使用に耐え得ること、複合材料化により低温脆性を回避可能なこと、熱伝導性に優れること、スパッタ損耗性に優れること、及び、中性子照射環境で使用した場合の長期的な誘導放射能レベルが極めて低いこと等、他の材料では代替できない魅力的な性能を有しながら、エネルギーシステムへの適用性は未知数であり、設計概念、要素技術共に既存技術の改善の範囲にあったので、本研究で取り上げた。
- W/W複合材料開発においては、第一段階として複合材料設計概念の実証を行い、第二段階において複合材料製造プロセスの検討および、プロセス実証試験を行った。
- 特性評価としては、物理特性、化学特性及び強度特性の基礎的特性の評価、原子レベルでのマイクロ構造解析、複合材料構成要素に対する中性子照射効果及びその複合場の効果等、基礎的な検討での可能性を実証した。
- 上記2つのサブテーマを実施した結果、超耐熱・耐環境性セラミックス複合材料プロセス技術（ナノ・インフィルトレーション遷移共晶相〈NITE〉プロセス：特許出願中）の開発に成功し、既存の工業材料では望めなかった高温強度・耐酸化性・信頼性・気密性・接合性・コスト効率等を極めて高い水準で満足するSiC基セラミックス複合材料の製造を実証した。入口温度1700°Cを超えるガスタービン実現の1ステップとなるもので、産業用エネルギー機器や大型輸送機器、その他の熱利用機器への適用により、エネルギーの生産・変換・貯蔵・輸送・利用に関わる効率や安全性の改善、環境負荷の低減が見込める。

2. 19 研究課題「途上国に適合する連鎖反応を利用した乾式脱硫プロセスの開発」(研究代表者: 定方正毅) [H9-4]

[研究代表者]

定方 正毅 東京大学大学院 工学系研究科 教授 (参加当時・終了時)

工学院大学 教授/東京大学 名誉教授 (ご逝去)

[研究期間] 平成9(1997)年11月1日~平成14(2002)年10月31日

(1) 研究のねらい

- ・ 年々深刻化する中国はじめ途上国の酸性雨問題を解決するために、先進諸国がこれまでに開発した脱硫技術の途上国への技術移転が試みられているが、高コストと水を大量に使用する湿式プロセスが主流であるため、ほとんど普及が進んでいない。このため中国などに適合する脱硫技術として、水の消費量の少ない、有価な副生成物を生みだすことのできる節水型の脱硫プロセスが求められている。
- ・ 本研究は、上記条件を満足する脱硫プロセスとして、ラジカル反応を原理とする連鎖反応を利用した乾式脱硫プロセスを提唱し、その開発を目指している。また並行して、設備コストの約1/3化、水の不使用、有価副生成物(石膏など)の生成、省エネルギー、運転の簡易化などを実現できる脱硫方法として、微小液滴内ラジカルイオン反応による液相酸化反応、ならびに新規脱硫剤(FRASH)による脱硫プロセス(TTプロセス)の研究を進めた。

(2) 研究課題の設定

主たる研究参加者

越 光男 東京大学大学院工学系研究科 教授

徐 旭常 清華大学熱能工程系 教授

西岡 将輝 東京大学大学院工学系研究科 助手

原野 安土 群馬大学工学部 講師

水野 彰 豊橋技術科学大学エコロジー工学系 教授

金 熙濬 豊橋技術科学大学エコロジー工学系 助教授

次の5つのサブグループを組成して課題を遂行した。

- ・ 気液反応グループ(群馬大学)
- ・ 気固反応グループ(放電)(豊橋技術科学大学)
- ・ 気固反応グループ(TTプロセス)(東京大学)
- ・ プロセス化グループ(東京大学、精華大学、東洋エンジニアリング)
- ・ 均相反応グループ(東京大学)

(3) 研究開始当時の世界の研究水準

- ・ 年々、深刻化する中国はじめ途上国とその影響を受ける国での酸性雨問題を解決するために、わが国をはじめとする先進諸国がこれまで開発した脱硫技術を途上国へ技術移転する試みがなされているが、高コストと水を大量に使用する湿式プロセスが主流であるため、ほとんど成功していない。
- ・ 石炭燃焼を多用している発展途上国の多くが半乾燥・乾燥地にあるので、それらの地域では、節水型又は乾式脱硫プロセスは最も望ましい技術である。
- ・ 発展途上国の経済発展に伴い、本研究で対象とした脱硫プロセスは今後益々ニーズが高まり、本研究を契機とし、技術の普及が進むものと思われる。

(4) 発想の独創性と課題の必然性

- ・ 連鎖反応を利用した脱硫方法は世界でもいまだ達成されてない高いレベルの研究課題であったが、これを研究室レベルではあるが成し遂げたことを高く評価したい。科学的・技術的インパクトについても大きいと評価する。

(5) 研究の達成度

- ・ 本研究では、まず上記条件を満足する脱硫プロセスとして節水型の脱硫プロセスの開発を行っている。また、その研究成果を取り入れたパイロットプラント製作とそれを用いた実証試験を実行した。
- ・ また、本研究では、併行して世界でいまだ達成されていない連鎖反応を利用した乾式脱硫反応を見いだす基礎研究を進めた。すなわち、これまで電子ビーム脱硫、脱硝反応（および硫酸イオン溶液中内反応）で示唆されている $\text{SO}_2 \rightarrow \text{SO}_3$ の連鎖反応サイクルを抽出してイオン、ラジカルを吹き込むことにより、これを積極的に生ぜしめ排ガス温度 600-800K の範囲で、 SO_2 の迅速な酸化を具体化できる反応の発見を目指した。

- ・ 5年間のプロジェクトの得られた代表的な成果としては、

- 1) 低コスト水膜脱硫プロセスの開発
- 2) 水中放電による SO_2 吸収溶液自動再生型の高効率脱硫法の開発
- 3) 乾式脱硫プロセス（TTプロセス）の開発
- 4) HO_2 ラジカル吹き込みによる低温での脱硫連鎖反応の予測と実証

を挙げるができる。

本研究のグループごとの成果は次のごとくである。

研究課題を構成するサブグループ毎の成果は次のように要約される。

サブグループ①気液反応グループ

- ・ 微小液滴とその液滴内酸化反応を利用してSO₂の吸収速度および量を増加させることにより、現行の湿式脱硫法より格段に水処理量の少ない脱硫法の開発を目指し実験を行った。実験としては酸化剤等を添加した微小液滴を静電微粒化により生成しSO₂の取り込み量の測定を行った。
- ・ 液内で酸化反応を起こすことでSO₂の吸収が促進し、特に過酸化水素の添加により脱硫率は著しく向上した。その際の噴霧した液量と処理ガス量の比は0.31/Nm³と従来の湿式脱硫法の1/10程度の水量で処理できることを明らかにした。

サブグループ②気固反応グループ（放電）

- ・ 本研究では非平衡プラズマを用いたSO₂除去プロセスを検討した。主目的はSO₂にNOが共存することによるSO₂とNO除去の相乗効果の可能性の追及、そしてNH₃など添加剤を必要としない、もしくはNH₃の使用を最小限に留めたシステムの検討を行った
- ・ 液体の中にアンモニウムイオン(NH₄⁺)が存在することはSO₂の液体中への吸収に効果的であることより、NO₃⁻からのNH₄⁺生成を検討した。鉄電極を用いた電気分解および放電を用いることにより液体中のNO₃⁻からNH₄⁺生成が可能であった。放電を用いたときのNH₄⁺収率は $3.09 \times 10^{-3} \text{mol/C}$ であり、電気分解を用いた場合($1.58 \times 10^{-6} \text{mol/C}$)と比較して1000倍の効率を示した。NO₃⁻溶液にH₂O₂が共存する場合、電気分解ではNH₄⁺生成が阻害されたが放電を用いた場合は阻害されなかった。またSO₄²⁻が共存する場合、NH₄⁺生成の阻害は観察されなかった。これは放電場に液膜を形成させた湿式反応器を用いることにより、NO_xの吸収によるNO₃⁻からNH₄⁺生成が可能であることを示した。

サブグループ③気固反応グループ（TTプロセス）

- ・ 石炭灰フライアッシュと生石灰CaOから、新規脱硫剤FLASHの開発に成功した。開発された脱硫剤は、純粋な一般的な乾式脱硫剤であるCa(OH)₂に比べ、4～5倍の脱硫活性を有する。この脱硫剤を循環流動層型反応器に投入して脱硫実験を行ったところ、最大83%の脱硫率を達成することができた。さらにNOの代わりにNO₂を吹き込むことで、さらに石膏含有率の高い副生成物を生産できることも明らかになっている。この反応機構について研究を進めたところ、NO_xが脱硫剤表面上で触媒的な働きをし、Ca(OH)₂、CaCO₃とSO₂との反応速度を向上させていることが明らかになった。

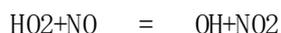
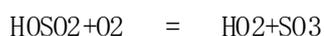
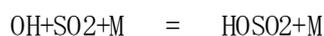
サブグループ④プロセス化グループ

- ・ 東京大学で提案されたTTプロセス・ラボスケール実験での良好な結果を受け、中国・清華大学内にTTプロセスのパイロットプラントが建設された。

- ・ 内径 20cm、高さ 5.5m の循環流動層を用いて実用化・スケールアップに向けたデータ収集が行われた。脱硫実験では、最大で 82% の脱硫率を達成できた (Ca/S=3)。またガス流速 1.9m/s が最適流速であること、広い SO₂ 濃度に渡り安定した脱硫性能を示すことが確認できた。脱硫剤の活性も、ラボスケールで作られた脱硫剤に比べ低いため、脱硫剤調整工程を見直すことで脱硫率の更なる改善が見込まれる。

サブグループ⑤均相反応グループ

- ・ 各種燃焼炉からの排ガス中に含まれる SO₂ を気相連鎖反応により効率よく SO₃ に酸化する反応系を見出すために、詳細化学反応機構を構築した。多くの燃焼炉の排ガス温度領域 (600-800K) においては、SO₃ は熱力学的には SO₂ より安定である。この温度領域において、少量の NO 存在下において、NO と SO₂ の NO₂ と SO₃ への同時酸化が以下の連鎖反応により可能となる。



- ・ これらの連鎖反応系を阻害する HO₂+OH=H₂O+O₂などの連鎖停止反応の寄与を抑制するための条件を反応シミュレーションにより検討した。この連鎖反応系を開始させるためには連鎖担体となる化学種 (OH または HO₂) を発生させる必要がある。
- ・ ラジカル発生のためのいくつかの添加物について検討した結果、HN₃ がラジカル発生剤として適当であることを見出した。100ppm の HN₃ 添加により、典型的な排ガス条件下で 10% 程度の SO₂ を SO₃ に変換することができることを実証した。

2. 20 研究課題「セラピューティック煉瓦造住宅の住環境効果」(研究代表者：松藤泰典) [H9-5]

[研究代表者]

松藤 泰典 九州大学 工学部 教授 (参加当時)

九州大学大学院 人間環境学研究院 教授 (終了時)

北九州市立大学 国際環境工学部長 (現職)

[研究期間] 平成 9 (1997) 年 11 月 1 日～平成 14 (2002) 年 10 月 31 日

(1) 研究のねらい

この研究は、世界初の高耐震煉瓦造住宅の開発に関する研究である。この目的のため本研究は、耐久性、快適性、省エネルギー性、経済性などの優れた特徴を有する完成度の高い中空壁工法による湿式工法煉瓦造住宅(例：オーストラリアにおける煉瓦造住宅)を、その特徴をすべて生かしつつ、地震国である我が国に適用可能とするための技術的課題の解決を目指す。

具体的なターゲットとしては

- 1) 我が国の蒸暑環境に適した省エネシステム
- 2) 競争力のあるイニシャルコスト
- 3) 高いライフサイクルアセスメント(LCA)

を有する煉瓦造住宅モデルの開発を特徴とする。

(2) 研究課題の設定

主たる研究参加者

渡邊 俊行 九州大学大学院人間環境学研究院 教授

林 徹夫 九州大学大学院総合理工学研究院 教授

小山 智幸 九州大学大学院人間環境学研究院 助教授

山口 謙太郎 九州大学大学院人間環境学研究院 講師

木村 邦夫 産業総合技術研究所九州工業技術研究所 室長

達見 清隆 科学技術振興事業団 研究員

中村 美紀子 科学技術振興事業団 研究員

サブグループとして、

- ・ 材料・構法・施工グループ (九州大学、麻生セメント(株)、(株)エヌエムビー、産業技術総合研究所など)
- ・ 動的解析グループ (九州大学)
- ・ 室内環境グループ (九州大学、熊本大学、(財)熊本テクノポリス財団、北九州市立大学)

など)

に分けて進められた。具体的なサブテーマは次のとおりである。

- ・ 凌震(りょうしん)構造 (Construction of Tiding over Vibration)
- ・ 空気循環式パッシブシステム
- ・ 煉瓦造住宅のライフサイクルアセスメント
- ・ 石炭灰煉瓦
- ・ スラリーコンクリート
- ・ 印象評定

(3) 研究開始当時の世界の研究水準

本研究は、世界初の高耐震煉瓦造住宅の開発に関する研究である。もともと煉瓦造は煉瓦を積み上げることによって構造物を構築する技術であり、耐震性をもたせることは原理的に難しいという宿命があった。

(4) 発想の独創性と課題の必然性

- ・ 上記の状況の中で、煉瓦造住宅における「高い耐震性・省エネルギー性」を実現しようとする点に最大の発想の特徴がある。
- ・ わが国では煉瓦造住宅自体はそれほど大きなシェアを持っているわけではないが、耐震性が保証されれば普及する可能性は大いに存在する。その場合に「省エネルギー性」を併せて実現できるならば、環境志向の住宅システムとして有望となる。この意味で課題としての必然性があると言える。

(5) 研究の達成度

- ・ 本研究は、研究代表者が提唱した高い耐震性・省エネルギー性を実現できる DUP 乾式工法を用いた煉瓦造住宅の開発、その煉瓦造住宅についてのライフサイクルコスト分析及びライフサイクルアセスメント、また、煉瓦造住宅の持つ生理的・心理的スコア化を研究対象とした。
- ・ 主たる研究成果としては、従来の湿式煉瓦造住宅などモルタルを用いて組積する構造に対して、「異質の材料を接着しない」という構造原理を見出し、乾式工法が可能であることを実証した。この構法による構造体は極めて高い耐震性と 90%を超えるリユース率を有する。この構法による二重中空層を有する煉瓦造住宅で、平均気温とほぼ同じフラットな室温変化と空気循環式パッシブシステムの併用によって、30%を超える省エネ性を実現した。セラピー性に関しては、相対的に高い印象評定を得た。
- ・ 研究は、研究期間 5 年を考慮して、オーストラリアの煉瓦造住宅の標準工法として完成度の高い中空壁工法による煉瓦造住宅をベースモデルとして進められた。
- ・ 本研究は、研究代表者が環境低負荷型建築の基本原則と定義した「異質の材料を接着し

ない構造」で、ベースモデルに、高い耐震性を付与することを前提条件として、

- 1) 我が国の蒸暑環境に適した省エネシステム
- 2) 競争力のあるイニシャルコスト
- 3) 高いライフサイクルアセスメント (LCA)

を有する煉瓦造住宅モデルの開発を特徴とする。

研究課題を構成するサブグループ毎の成果は次のように要約される。

サブグループ①凌震(りょうしん)構造 (Construction of Tiding over Vibration)

- ・ リユース率の高い構造を求めるプロセスにおいて「異質の材料を接着しない」という構造原理を見出した。この構造は、耐震構造、制振構造、免震構造の何れとも異なる構造原理を有するので凌震構造と命名した。凌震構造の原理を実現した具体例が SRB-DUP (Steel Reinforced Brick construction by Distributed Unbond Prestress theory) である。個体要素が脆性的であるのも関わらず、部材全体としては鋼構造に類似した高い強度と変形性能を示す。面外方向で 100gal. の振動に耐えた。
- ・ これらの性能の客観的評価として、日本建築総合試験所の技術性能証明を得た。これによって、モルタルを用いない乾式工法で煉瓦造などの組積構造に高い耐震性を付与するとともに、そのリユース率 90%超を実現した。

サブグループ②空気循環式パッシブシステム

- ・ 煉瓦の蓄熱性に着目して、SRB-DUP をベースとした二重中空層 (Double Cavity Wall) を有する空気循環式パッシブシステムを開発した。エアコンを運転しない状態で、SRB-DUP は高気密高断熱住宅と同様のフラットな室温変化と、高気密高断熱住宅より低い室温水準を実現した。このシステムを用いた場合、終日運転時の電力消費量は、約 30% 低減できた。

サブグループ③煉瓦造住宅のライフサイクルアセスメント

- ・ 本研究では、ライフサイクルエネルギー (LCE) とライフサイクル二酸化炭素 (LCCO₂) により LCA を行った。また、本研究で用いるシミュレーションの入力データ作成の簡略化を目的として GUI (Graphical Use Interface) を用い、簡易 CAD による入力インターフェースを有する DUP 煉瓦造住宅の LCA 評価プログラムを開発した。
- ・ また、在来軸組、木造ツーバイフォー、内断熱 RC 造、外断熱 RC 造、湿式煉瓦造、DUP 煉瓦造、SRB-DUP パッシブ煉瓦造の住宅についての LCC、LCE、LCCO₂ 比較を行った結果、SRB-DUP 煉瓦造は他の工法に比べて優れていることを明らかにした。

サブグループ④石炭灰煉瓦

- ・ 産業廃棄物である石炭灰を主原料とし、乾式工法による煉瓦造住宅用の煉瓦を開発する

ために、目標値を吸水率 5wt%以下、圧縮強度 200MPa 以上に設定し、原料の選定、配合割合及び焼成条件について研究がなされた。

- 基本となる原料として、九州電力株式会社の苓北、松浦、大村石炭火力発電所から提供された7種類の石炭灰と試作品の焼成を引き受けた荒木窯業株式会社の赤煉瓦原料粘土を用いた。
- 焼成した結果、異なった原材料から生成する石炭灰の化学組成は、例えば、SiO₂ : 49.3-76.2wt%、Al₂O₃ : 11.9-30.8 wt%、Fe₂O₃ : 1.7-9.0wt%、CaO : 0.4-12.1wt%と大きくばらついていたにも関わらず、多くの試料は吸水率 5wt%以下を達成した。吸水率 5wt%以下の試料の圧縮強度はすべて 200MPa 以上を達成した。
- また、石炭灰を主原料とした石炭灰煉瓦の多色性について、ラボ段階であるが、原料の選定、配合割合及び焼成条件について検討し、赤煉瓦原料粘土を用いて色彩に及ぼす因子を明らかにした。石炭灰の中赤外線領域における反射率は、コンクリートなどに比較して高い。
- 高精度煉瓦は、最終的に、耐久性が高く工事性のよい形状を得た。また、その研削条件、第2期実験棟での施工性確認などについても検討を実施し、実用化にむけた知見を得た。

サブグループ⑤スラリーコンクリート

- 産業廃棄物である石炭灰を安定化処理を行ってスラリーとしてコンクリートに大量に混合する技術および調合剤を開発した。高強度でかつ極めて高い中性化抑制およびアルカリ骨材反応抑制効果を有することを明らかにした。

サブグループ⑥印象評定

- 煉瓦造住宅の印象評定についての研究が実施した。1)煉瓦造住宅、2)煉瓦壁、3)煉瓦パターンの各レベルで、他の外壁材料・住宅と比較して、主に印象評価実験を通して考察を行った。

全体として、研究代表者は、自ら提唱した乾式煉瓦造住宅について、煉瓦造住宅本来が特徴とする耐久性、主要部材である煉瓦の高いリサイクル性、省エネルギーに貢献できる大きい熱容量、セラピー性などに、我国に導入する際に必要な耐震性、省エネルギー性などの特性を付加した実験棟を設計し、また、実際に建設した。シミュレーション計算、要素実験などを通じて耐震性などの実証確認を行うと共に、この実験棟において、省エネルギーについては煉瓦造住宅にふさわしいパッシブシステムにより電力消費量を約 30%低減できることを示した。

2. 21 研究課題「高温空気燃焼技術を用いた廃棄物・石炭高効率発電」(研究代表者：吉川邦夫) [H9-6]

[研究代表者]

吉川 邦夫 東京工業大学大学院 総合理工学研究科 助教授 (参加当時)
東京工業大学 総合理工学研究科 教授 (終了時)
東京工業大学 フロンティア研究センター 教授 (現職)

[研究期間] 平成9(1997)年11月1日～平成14(2002)年10月31日

※ 詳細調査対象課題

(1) 研究のねらい

- ・ 本プロジェクトは、約1,000℃に予熱された高温の空気及び水蒸気を用いて、低質な固体燃料に対しても燃焼に伴う環境負荷を最低限に抑えながら高効率の発電が行なえる、安価かつコンパクト、しかも信頼性の高い画期的な発電システム(MEETシステム)の開発を目的とするものである。
- ・ 灰溶融ガス化MEETでは、投入される固体燃料の中の可燃分は、約1,000℃に予熱された高温空気によりガス化され、灰分は溶融状態で取り出されて無害化される。一方、高温水蒸気/空気改質方式MEET(STAR-MEET)では、固体燃料は約600℃の高温空気です熱分解ガス化され、発生ガス中に含まれるタール分を約800℃の高温水蒸気/空気によって一酸化炭素及び水素に改質することを目指している。

(2) 研究課題の設定

主たる研究参加者

小林 宏充 慶応義塾大学法学部 講師
守富 寛 岐阜大学大学院工学研究科 教授
義家 亮 岐阜大学大学院工学研究科 助手
成瀬 一郎 豊橋技術科学大学工学部 助教授
氣駕 尚志 石川島播磨重工業エネルギーシステム事業部 課長
持田 晋 日本ファーンエス工業燃焼機事業本部 課長
山下 慶次郎 東芝電力・産業システム技術開発センター 主務
辻 和時 三井三池製作所環境事業本部 副本部長
Ashwani K. Gupta 米・メリーランド大学 教授
C.C. Pian 米ミシシッピ州立大学 上級研究員

次の10のサブグループで研究を実施した。

- ・ MEET 実証研究グループ

- ・ 高温燃焼ガス分析グループ
- ・ 灰・NO_x挙動研究グループ
- ・ 高温空気燃焼解析グループ
- ・ 高温熱分解研究グループ
- ・ 溶融灰研究グループ
- ・ 燃焼・ガス化グループ
- ・ 高温空気燃焼グループ
- ・ 高温ガス精製研究グループ
- ・ MEET フィールドテストグループ

(3) 研究開始当時の世界の研究水準

- ・ 廃棄物を原料に発電を行う技術は種々存在しているが、日量数トンの小規模な廃棄物処理設備で発電機能を備えているシステムは皆無であった。とりわけ廃棄物は、その発生パターンが分散的であり、廃棄物の輸送に伴う様々な問題を考えると廃棄物の発生場所でエネルギーに転換することが必要であるが、この条件を満たしつつ実用的な要請に耐えられる技術は世界に存在しなかった。
- ・ 研究終了後、特に開発途上国で実用化が進行しつつあるのはこのような背景が強く影響している。開発途上国では大規模集中の廃棄物処理システムは機能しないからである。

(4) 発想の独創性と課題の必然性

- ・ 廃棄物は、その発生パターンが分散的であり、廃棄物の発生場所でエネルギーに転換することが有効であるが、この条件を満たしつつ実用的な要請に耐えられる技術は世界に存在しなかった。
- ・ この課題を解決し、実用に耐えうる小規模な廃棄物発電のシステムを世界に提案し実証した意義は大きく、今後の環境問題、エネルギー問題の解決にとって重要なテーマであると言ってよい。

(5) 研究の達成度

- ・ 灰溶融ガス化 MEET システム及び STAR-MEET システムの実証プラントをそれぞれ製作し、実証運転を行って、性能を実証した。
- ・ 本研究は、研究代表者が提唱した高温空気燃焼技術を用いた廃棄物・石炭高効率発電システムについての実証的研究である。このシステムでは、高い発熱量の燃料ガスを得るために経済性の点で問題となる酸素を使用せずに、1000℃程度に予熱された高温空気あるいは高温水蒸気で固体燃料をガス化し、その発生ガスを利用する。低環境負荷かつ低コストの小型ガス化発電システム (MEET システム) である。本研究では、石炭、各種廃棄物、バイオマスなどの固体燃料を対象とした。

- このシステムでは、ガス化炉内で高温空気あるいは高温水蒸気でガス化された固体燃料から、高温の粗ガスが生成され、灰分はガス化炉内で高温焼成灰あるいは熔融灰となって炉外に取り出される。粗ガスは、熱回収を行った後に、ガス精製によって、環境汚染物質（塩素、硫黄、煤塵、重金属など）を除去し、発熱量が 1000~1500kcal/Nm³ 程度の低発熱量のクリーンな燃料ガス（低カロリーガス）を得る。得られた燃料ガスの一部を燃焼させて高温熱交換器にてガス化用の高温空気/水蒸気を生成し、残りの燃料ガスを高温空気燃焼低NO_xボイラでの蒸気発生やエンジン発電機での発電に供することを構想している。

研究課題を構成するサブテーマ毎の成果は次のように要約される。

サブテーマ①灰熔融 MEET システムの実証研究

- 燃料供給量が 200kg/日規模の MEET-I 装置、燃料供給量が 4t/日規模の MEET-II 装置および、燃料供給量が 2t/日規模の MEET-S 装置で、順次技術実証を行った。
- 本プロジェクトの中核設備である MEET-II 装置の主要な開発対象要素機器は、ペブル床ガス化炉、高温空気加熱器、高温空気燃焼ボイラ、混焼ディーゼルエンジン発電機である。微粉炭および微粉碎した木質ペレットを燃料とする実験を実施して、各要素機器の性能実証および、システムとしての運転実証を行った。その結果、灰熔融を行いながら、目標とする 1000kcal/Nm³ 以上の発熱量を持つクリーンなガスの生成に成功した。
- 得られた各機器の性能から MEET-II 規模のシステム全体の熱効率を評価したところ、ペブル床ガス化炉のチャーリサイクルを実施すれば、75%という高い熱効率（電力 16%、回収熱 59%）を持つ、コージェネレーションシステムが実現できることを明らかにした。

サブテーマ②STAR-MEET システムの実証研究

- MEET システムのガス化部分を一段ガス化ではなく、既存の熱分解ガス化炉をベースとして、生成される熱分解ガス中のタール分を高温水蒸気/空気の混合気で改質するという二段ガス化方式の STAR-MEET システムを考案し、実証プラント（処理容量 50kg/時）を建設した。
- 本実証プラントでは、ゴム端材、木屑、廃塗料かす、ポリエチレンフィルム、皮革屑、パルプスラッジ、RDF、肉骨粉など、様々な廃棄物の実験を行ったが、廃棄物の性状に応じて、600~1700kcal/Nm³ の発熱量を持つクリーンな改質ガスが得られ、混焼ディーゼルエンジンでの軽油との混焼比率を調整することにより、どのような発熱量のガスであっても、安定した高効率発電が可能であることを実証した。

サブテーマ③高温場での固体燃料の熱分解ガス化挙動の研究（高温熱分解研究グループ）

- 廃棄物の種類に応じて、その熱分解挙動は大きく異なる。本研究では、熱天秤（TGA）と示差熱計（DSC）を用いて、種々の昇温速度の下で、窒素雰囲気中で、ポリエチレン、

ポリプロピレン、ポリスチレン、ポリ塩化ビニルおよびセルロースの熱分解実験を行った。

- ・ その結果、これらの物質の熱分解に必要なエネルギー量は、各物質が持つ化学エネルギーの量に比べて極めて小さく、熱分解ガス化が廃棄物からのエネルギー抽出手段として有効であることを確認した。

サブテーマ④ 溶融炭酸塩を用いた高温ガス精製方式の研究

- ・ MEET システムの発電効率を向上させるためには、なるべく生成ガスを高温で精製することが望ましい。そこで、溶融炭酸塩膜を用いた新規な高温ガス精製方式を考案し、その原理検証を行った。
- ・ これは、溶融炭酸塩膜の片面に硫化物を含むガス化ガスを、裏面に CO_2 と H_2O を含むキャリアガスをそれぞれ流通させて、ガス化ガス中の硫化物を硫化物イオンとして膜を通し、キャリアガス中に移動し搬出するもので、従来よりコンパクトなガス精製システムが期待できる。
- ・ 実験の結果、濃度 0.7% の供給硫化物が 50% 以上脱硫されること、キャリアガス側の CO_2 と H_2O の分圧をガス化ガス側よりも高くすることにより硫化物を少なくとも 2 倍以上濃縮して除去可能であることを実証した。

サブテーマ⑤ 高温燃焼排ガス中からの有害ガス・微量金属の分離回収に関する基礎研究

- ・ 本研究では、燃焼ガス中に含まれる微量重金属等の有害物質に対して、放出挙動の評価、連続モニタリング技術の開発、捕捉剤粒子を用いた分離回収技術の開発、等に関する基礎研究を行った。また Ca 系鉱物に関わる塩化水素の吸収・放出特性を明らかにした。

サブテーマ⑥ 高温固体燃料反応場における灰・ NO_x の挙動解明に関する研究

- ・ 本研究では、MEET システムの高温空気燃焼ボイラにおける窒素含有化学種を含むガス化ガスの高温空気燃焼場での NO_x 生成特性および石炭・廃棄物等の高温空気部分燃焼・ガス化プロセスにおける灰の挙動に関して焦点を合わせ基礎的な研究を実施した。

第3章 研究から生み出された科学技術的、社会的、経済的な効果・効用及び波及効果（9 研究課題についての詳細調査結果）

3. 1 研究課題「東アジアにおける酸性物質及びオゾンの生成と沈着に関する観測と環境影響評価」（研究代表者：秋元 肇）

3. 1. 1 研究の継続・発展

3. 1. 1. 1 CREST 研究終了までの研究の展開

1990 年代までの我が国の大気汚染に関する研究は日本に限定した研究であり、東アジアを対象とする大気汚染の研究は、本 CREST 以前には NASA による航空調査の取り組み以外にはなかった。NASA によるこの調査には、日本からは秋元肇、近藤豊が参画し、この研究分野の先駆けとなった。この研究が、本 CREST 研究提案につながるものとなった。本 CREST 研究は大気汚染の研究をアジアという視点に広げたわが国初の研究であり、酸性物質とオゾンの東アジアという広域を舞台として長距離輸送と生成・消滅を始めて明らかにした。

研究は、東京大学先端研グループ（秋元教授）によるサブテーマ 1「オゾンの長距離輸送過程及び光化学的生成消滅機構の解明」、及び慶応義塾大学理工学部グループ（田中教授）によるサブテーマ 2「大気汚染物質の新しい測定法の開発と長距離輸送の実態解明」の共同研究として進められた。2つのサブテーマに共通して、①リモートステーション（日本国内からの汚染源の影響がない沖縄、隠岐、八方、利尻の国内4拠点、及び、ロシア・モンディ、中国・黄山、タイ・スリナカリン、同・インタノン）における通年連続観測、②新しい大気化学測定機器の開発と製作された機器を用いた野外集中観測、の2つの手法を組みあわせるという研究手法が用いられた。

リモートステーションにおける通年観測の結果、東アジアにおける気塊は、大きく「ユーラシアバックランド気塊」、「北東アジア地域汚染気塊」、「太平洋気塊」、「南シナ海気塊」、「インド洋気塊」に分けられることがわかった。オゾン濃度については、これが長距離輸送によって支配されていることが明らかとなり、特に、中国、韓国などを通過した「北東アジア地域汚染気塊」においては、夏季には月平均で約 20 ppbv のオゾンが生成され、そのオゾン濃度はわが国の環境基準値（1 時間平均値 60ppbv）をしばしば超えることが初めて定量化された。また、植生に対するオゾンの光合成活性影響評価指数 AOT40 については、森林植生に対する臨海レベルを 2 倍以上上回っていることが分かった。酸性物質に関しては、沖縄における大気中の硫黄酸化物の半数以上は中国大陸から長距離輸送されることが明らかになった。

新たに開発された HOx ラジカル高感度/高精度測定装置、アルデヒド自動連続測定装置などを用いて、大気光化学反応メカニズム解明のための野外集中観測が行われた。光化学反応理論によるモデル計算値と実測値とは、沖縄ではほとんど一致したのに対して、隠岐、利尻では計算値が実測値を 2 倍以上上回るなど、海洋大気境界層における大気光化学プロ

セスにはなお未知の過程が含まれることが明らかになった。

3. 1. 1. 2 プロジェクト終了後の研究の発展

CREST 研究後の新たな展開の1つは、プロセス研究からモデル化への発展であった。この背景には、秋元研究代表者が CREST の最終年度に、東大先端研から地球フロンティアシステム（現職の海洋研究開発機構大気組成変動予測プログラムの前身）に移籍したことがある。東大先端研では観測を主体に研究を行ってきたが、地球フロンティアシステムでは観測よりもモデル化が研究の主体となった。その対象としては

- ①NO_x、オゾンのような短寿命物質
- ②CO₂、CH₄、N₂Oのような長寿命物質

があり、それぞれについてのモデリングが開始された。後者については、東北大・中沢教授を兼務の研究者として得た。

CREST 研究後の新たな展開の他の1つとしては、中国内部での観測がある。CREST 研究当時、中国内部が「ブラックボックス」になっているという問題は意識されていたものの、中国内部での観測を実現することは困難であった。しかしながら、大気汚染物質の発生源で観測をすることは必要欠くべからざることであり、その後、ようやく実現することができた。

図 3.1.1 は CREST 後の研究成果の一例である。北半球の各大陸における最近 30 年間の NO_x の排出量の推移を示している。北米(米国・カナダ)及びヨーロッパ域(ロシア・中近東を含む)からの NO_x 放出量は、1980 年代以降 25~28Tg/yr と同程度でほぼ横ばいで推移していたが、1990 年以降ヨーロッパからの排出量は排出規制により明らかに低下している。これに対しアジア(東・東南・南アジア)からの放出量は 1970 年代には他の大陸に比して顕著に少なかったが、その後増加し続け、1990 年代の半ばには北米、ヨーロッパを凌駕するに至っている。この傾向は少なくとも今後 20 年間にわたり持続するものと思われる。

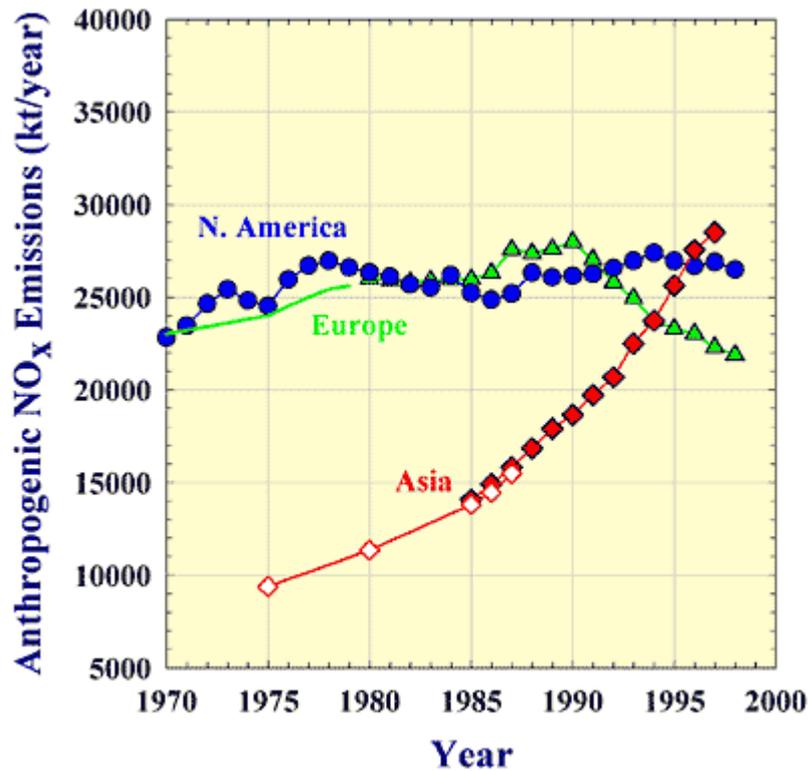


図 3.1.1 北米(米国/カナダ)、ヨーロッパ(ロシア及び中近東を含む)、アジア(東・東南・南アジア)における人為起源 NO_x 排出量の変化

(M. Naja, H. Akimoto and J. Staehelin, J. Geophys. Res, 108, 10.1029/2002JD002477, 2003 を修正)

3. 1. 2 科学・技術の進歩に貢献する成果

(1) グローバル大気汚染という新しい概念の構築

広域の大気汚染の研究は欧米が主導しており、欧州では 1980 年代後半からアジアに着目した大気汚染研究が行われていたのに対して、日本では 1990 年代初めまで大気汚染に関しては自国に限定した研究のみが行われていた。本 CREST は、わが国の大気汚染研究として、東アジアに着目し実際に研究を行った初めての研究であり、これまで知られていなかった多くの現象を明らかにして世界的な観点でも価値ある成果を生んだと同時に、アジア大気汚染の研究への新しい流れを作ったといえる。

本 CREST 以降、アジアのような大陸規模にとどまらず、半球規模、全球規模で大気汚染を捉える視点の重要性が認識されるようになった。「大陸間輸送」、「半球汚染」などの概念の定着と、実際の半球規模での研究への取り組みは、本 CREST 研究が築いたアジア大気汚染の延長上に拓かれたといえる。

(2) 東アジア酸性雨モニタリングネットワークサイト

3. 1. 3 成果の応用に向けての発展と社会的・経済的な効果・効用に繋がる取り組み

3. 1. 3. 1 成果の応用に向けての発展

共同研究者である慶大・田中茂教授のグループは、本 CREST において多孔質テフロンチューブを用いた拡散スクラバー法による大気中酸性・塩基性ガス (HCl, HNO₃, SO₂, NH₃)、アルデヒド (HCHO, CH₃CHO)、窒素酸化物 (NO_x)、過酸化水素 (H₂O₂) の自動連続測定装置を(株)島津製作所と共同で開発した。この装置は、沖縄、隠岐、利尻等、及び海洋科学センター調査船・みらいに設置され、大気汚染ガス成分濃度の長期間自動連続測定に用いられ、東アジアの越境大気汚染の実態が明らかにされた。

開発された大気中酸性・塩基性ガス自動連続測定装置は、半導体製造のクリーンルームでのガスモニタリング装置として横河電機(株)により製品化され、2000 年空気清浄協会・技術賞を受賞した。又、2003 年 4 月には、ミニチュア拡散スクラバーによる空気汚染ガスの簡易測定装置が第 15 回申小企業優秀新技術新製品賞・優秀賞を(株)ガステックと共同で受賞した。

一方、上記の学術的研究を基礎として、拡散スクラバー法を用いた新たな有害ガス除去処理技術の実用的研究が三機工業(株)等の企業とで共同開発として進められた。その研究成果として、2001 年に「環境賞」優良賞 (日立環境財団、日刊工業新聞主催、環境省後援) を受賞することとなった。2002 年より、本技術に関して、文部科学省・大学発ベンチャー創出事業、経済産業省・即効型地域新生コンソーシアム研究開発事業の研究プロジェクトが開始された。今後、様々な生活・生産環境を対象として、この拡散スクラバー法による空気清浄技術が国内外で広く利用され普及することが期待される。



図 3.1.3 三機工業株式会社より販売されている
空気中のホルムアルデヒドを除去する湿式空気浄化装置「エアロスクラバー」

3. 1. 3. 2 社会的、経済的な効果・効用に繋がる取り組み

東アジア (北東アジア及び東南アジア) の経済発展に伴う工業化は、環境影響物質の放

出量を急速に増加させ、この地域に大きな影響を与えている。そうした大気質変化の具体的な例が、対流圏におけるオゾンと酸性物質の増加現象である。この内、大気中における酸性物質の増加は酸性雨として知られているのに対して、対流圏オゾンの増加については一般にはほとんど認識されていない。

(1) 酸性雨に関する取り組み

酸性雨は、その原因物質の発生源から数千キロメートル離れた地域にも被害を及ぼすことが知られており、国を越えた地球規模の環境問題の一つであるため、酸性雨問題の解決には各国が協調して取り組む必要がある。すでにヨーロッパでは、1979年に長距離越境大気汚染条約が締結され、酸性雨の状況の監視・評価、酸性雨原因物質の排出削減対策などが着実に進められている。更に、他の大陸からのオゾンを見做すことができないために先進国でも環境基準を達成できない現状があり、北半球全体でオゾン量を低減させるべきであるという議論から、半球大気汚染タスクフォースが発足した。当時加盟していなかったアジア諸国に呼びかけた結果、この2～3年はアジアの行政官がワークショップやタスクフォース会議に参加するようになってきている。日本から発信できるデータとして本CREST研究における成果は大きな貢献をしている。

(2) 光化学オキシダント・対流圏オゾン検討会

日本国内でNO_xやVOCが低減してきているのに対して、オゾンは増加傾向にある。越境汚染に由来すると考えられ、環境省も問題意識を抱き、問題として取り上げるようになった。

近年、日本における光化学オキシダントの濃度レベルは上昇傾向を示し、更に光化学オキシダント注意報の発令地域が広域化している。これらの要因としては、大陸間や大陸内における大気汚染物質の輸送、光化学オキシダント前駆物質の排出量の変化、気象状況の影響等が指摘されているが、それらの寄与は明確にされていない。こうした状況を踏まえ、環境省では2007年7月に学識経験者らによる「光化学オキシダント・対流圏オゾン検討会」を設置し、光化学オキシダント及び対流圏オゾンの濃度レベルの上昇要因を明らかにすることとした。本検討会の座長は秋元肇氏が務めている。

現在、本分野における最新の知見について検討を行っており、その一環として論文や報告書のレビューを行っており、その中には本CREST研究でのアウトプットも多く含まれている。

3. 1. 4 参加研究者の活動状況

参加研究者の活動状況は次の通りである。

(1) 教授昇進：

田中茂 慶応義塾大学理工学部応用化学科(1998)

(2) 学位取得者(東京大学理学博士, PhD)：

- ・クポン・ポチャナート：1998. 9 Mondy で観測、CREST で約 3 年間 PD、フロンティア PD を経て、現在 JAMSTEC 研究員
- ・ウサ・サルマ：1999. 3 ネパールで VOC 測定、現在米国
- ・持田陸宏：1999. 3 名大准教授
- ・谷本浩志：2001. 3 国立環境研究所アジア共生 G
- ・定永宗靖：2002. 3 大阪府大・助教、測定装置を作製して沖縄で測定

(3) 受賞

参加研究者の主な受賞は次の通りである。

- ・金谷有剛 日本化学会奨励賞，大気化学研究会奨励賞 (2007)
- ・谷本浩志 大気化学研究会奨励賞 (2006)
- ・持田陸宏 大気化学研究会奨励賞 (2008)

3. 2 研究課題「自立都市をめざした都市代謝システムの開発」(研究代表者: 柏木孝夫)

3. 2. 1 研究の継続・発展

3. 2. 1. 1 プロジェクト期間中の研究の展開

本 CREST 研究では、都市を一つの代謝系とみなす観点から、エネルギー、水、物質、大気を循環系とし、さらに生態系を含めた土地利用、インフラ整備の点から緑地や都市計画も要素として考慮して、これらを総合的に組み合わせた都市シミュレータを開発した。このシミュレータのシステム構成要素として、エネルギー、交通、水供給処理、廃棄物処理などのサブシステムも開発された。併せて、外部からのインプットを抑制した自立型都市のための要素技術として、ローエネルギーハウス、低温水での冷凍機などについての技術開発が行なわれた

開発された都市シミュレータは、地理情報システム GIS (Geographic Information System) を基本エンジンとし、図 3.2.1 のソフトウェア構成からなる。

この都市シミュレータを用いて、八王子市を実例として、自立都市としての解析を行い、その機能を実証した。

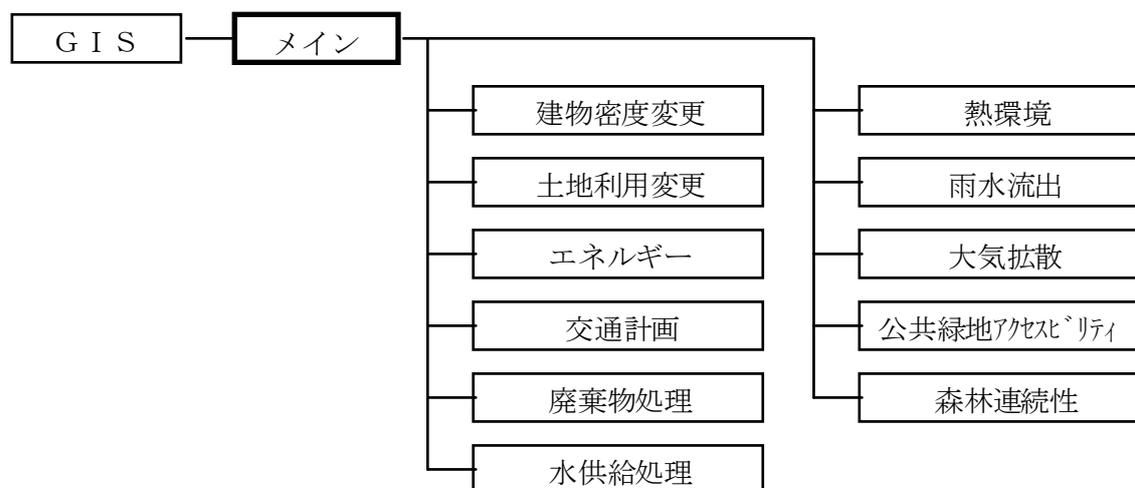


図 3.2.1 都市シミュレータのソフトウェア構成

3. 2. 1. 2 プロジェクト終了後の研究の発展

2002 年度 (平成14年度) 21 世紀COE プログラムの「学際、複合、新領域分野」において、東京農工大学「新エネルギー・物質代謝と生存科学の構築」(経済性・安全性を主眼とした農工融合型物質エネルギー代謝と生存科学体系の構築) が採択された。本COE プログ

ラムでは、同大学生物システム応用科学教育部を中核拠点として堀尾正毅教授がリーダーを務め、地球規模から、国、地域、家庭まで、文明の持続的な進化と、生存の方向を考え直すものとして、以下の三つの研究実践を進めている。

- a. 環境エネルギー新産業技術の展開
- b. 地域（圏域）計画の策定支援
- c. 持続型文明と文化の創造

本COE プログラムのベースには、柏木教授の「都市シミュレータ」の成果があり、堀尾教授のグループは、廃棄物をターゲットとしたシステムの開発を行っている。同プログラムは、知識の共有・運用のために、Web ベースプラットフォーム「ペガサス (PEGASUS)」を開発、廃棄物・未利用資源、自然エネルギー等の利用計画などをデータベース化した。このサイトを通じて情報が全国の多様なユーザに公開され、それを専門家がチェック・認証することで、成長していくシステムの構築を考案されている。



図 3.2.2 東京農工大学 21 世紀 COE プログラム「新エネルギー・物質代謝と生存科学の構築」におけるWeb ベースプラットフォーム「ペガサス (PEGASUS)」

3. 2. 2 科学・技術の進歩に貢献する成果

従来、我が国では、エネルギー、廃棄物処理、水処理、熱環境、などの個別要素毎にシミュレーションを行うシステムは開発されていたが、米国における総合的なシミュレーションによる都市計画などと比較して、大きな遅れを取っていた。それに対して、本 CREST 研究は、都市を一つの代謝系とみなす観点を明確にし、系全体をシステムとして解析する

ことが出来るシミュレータを実際に実現させたことに大きな特徴がある。シミュレーションにより、環境調和型の都市を設計・構築するという本 CREST の試みは、我が国としては、非常に画期的な研究であった。更に、柏木研究代表者自ら東京都庁の都市計画局に赴き、通常は公表される機会はほとんどない GIS データを実際に入手し、これを基礎情報として、八王子という実在の都市を事例としてシミュレーションを実行したことも、これまでにない試みであった。

3. 2. 3 成果の応用に向けての発展と社会的・経済的な効果・効用に繋がる取り組み

本 CREST による「都市シミュレータ」は、研究期間中には、八王子市を対象として実際の解析に適用された。その後、本シミュレータは、アジア航測株式会社が管理しており、基礎的なツールは全て揃っていて、いつでも計測可能な状態にある。

研究期間終了後は、残念ながら、他の地方自治体に本シミュレータが利用された例はない。この理由は、八王子市のシミュレーションには約 500 万円の費用がかかっており（ほぼ全て人件費）、自らこの費用を負担してシミュレーションを行おうという地方自治体が現れないためである。

今後、環境保全のための政策として、地方自治体の都市計画の中で環境負荷を総合的に明らかにすることが義務づけられれば、本「都市シミュレータ」へのニーズは非常に高くなると予想される。

3. 2. 4 参加研究者の活動状況

(1) 研究代表者・グループリーダー

柏木研究代表者は、本 CREST 研究当時は、東京農工大学大学院 工学研究科 教授であったが、現在は、東京工業大学 統合研究院ソリューション研究機構 教授（兼）大学院 理工学研究科 教授として活躍している。（現職）

「ハウス・蓄熱グループ」のグループリーダーを務めていた落藤教授は現在、北海道大学名誉教授、および株式会社北海道熱供給公社・代表取締役の任にあり、引き続き「ローエネルギーハウス」について研究活動を実施している。

(2) CREST 研究員・その他の研究員

柏木研究室は、現在、修士課程 12 名、博士課程 15 名（外国人を含む）の指導をしている。これまでに 100 人程度の研究者を輩出しており、そのうち約 2 割が CREST 事業で取り組んだ都市代謝の研究に携わり、残り 8 割はもうひとつの柱である吸着・吸収冷凍システム、熱交換の高効率化などの課題に取り組んでいる。

当時、東京農工大学の柏木研究室に助教授として所属していた秋澤淳氏は、現在、同大学 生物システム応用科学府 生物システム応用科学専攻の教授の任にある。CREST 事業の成果を引き継ぎ、エネルギーの効率的利用、再生可能エネルギーの効果的利用などについて

研究活動を実施している。秋澤教授は、柏木教授が CREST 期間中に出願した 4 件のうちの 3 件の特許に名を連ねている。

同じく助教授だったシャハ・ビデュット (Saha Bidyut) 氏は、現在、九州大学 総合理工学研究院 エネルギー物質科学部門 エネルギー有効利用工学で准教授の任にあり、柏木研究室の吸着・吸収冷凍システム、熱交換の高効率化の研究に引き続き取り組んでいる。

CREST 研究員として参画していた濱本芳徳氏は、現在、九州大学 工学研究院 機械科学部門 熱工学の准教授を務めており、「都市シミュレータ」のメンテナンスなどを担当している。

同じく CREST 研究員だった韓国のヨンテカン (Yong Tae Kang) 氏は、柏木教授が CREST 期間中に出願した 4 件のうちの 1 件の共同出願人である。現在、韓国・キョンヒ大学の准教授を務めている。

柏木研究室にバングラディッシュから留学していたカン・チュウドウリィ・アマヌル・アラム氏は、柏木教授が CREST 期間中に出願した 4 件のうちの 3 件の特許に名を連ねている。現在は英国・ケンブリッジ大学に所属している。

3. 3 研究課題「環境低負荷型の高分子物質生産システムの開発」（研究代表者：土肥義治）

3. 3. 1 研究の継続・発展

3. 3. 1. 1 プロジェクト期間までの研究の展開

本 CREST 研究の研究代表者である土肥義治氏は、高分子化学、特に高分子のリビング重合を専門とする研究者として研究キャリアをスタートしたが、1984 年、東京工業大学・資源化学研究所化学環境工学専攻の助教授に就任した後、環境と調和した化学工学として、再生可能な糖や植物油などのバイオマスを原料とし微生物の発酵生産を利用した新しい生分解性高分子の研究に着手した。これが本 CREST 研究の芽となるものであったが、この研究は世界に先駆けるものであった。1987 年、土肥教授は、微生物と炭素源の組み合わせを工夫することによって、共重合ポリエステルであるポリヒドロキシアルカン酸(PHA)の生合成に成功し、世界中から大きな注目を浴びた。

1991 年、土肥教授は理化学研究所に移籍した。これによって、土肥教授の本来の専門である化学に加え、分子生物学・遺伝子工学の研究者と共同して、学際的な異分野融合の研究を進めることができるようになり、本研究は飛躍的な発展を遂げた。

1996 年から開始された本 CREST 研究においては、核酸、タンパク質、多糖、ポリイソプレノイドにつづく第5の生体高分子として注目され始めたバイオポリエステルについて重点的に研究を実施し、次のような研究の展開があった。

優れた物性と生分解性をもつバイオポリエステルを生産する3種の微生物のポリエステル生合成系酵素遺伝子を取得、機能を解析した。それらを組み込んだ遺伝子組換え微生物の分子育種に成功し、最も高効率な菌では乾燥菌体重量あたり 80 wt% という大量の共重合ポリエステルを体内に蓄積することを示し、安価な植物油などから高性能バイオプラスチックを生産する実用化プロセスの基盤技術を開発した。また、遺伝子組換え大腸菌により超高分子量のポリエステル合成に成功し、菌の培養条件によって分子量も 300 万～2000 万の範囲で調整可能であることを示した。従来のバイオポリエステルでは延伸処理が困難であったため物性に限界があったが、この超高分子量ポリエステルを用いることによりフィルムあるいは繊維に延伸処理を行うことが可能となり、引張強度（延伸倍率 400%以上）が従来の 40MPa から 100MPa に向上し、破壊伸びも 50%以上と向上するなど、優れた物性が発揮されることを実証した。

3. 3. 1. 2 プロジェクト終了後の研究の発展

(1) JST発展研究(SORST)

本 CREST 研究は、科学技術振興機構の継続課題として、平成 7 年度 CREST 採択課題の発展研究(SORST)に認定され、更なる発展を遂げた。

科学技術振興機構 戦略的創造研究推進事業 発展研究(SORST)

「高性能バイオプラスチック生産システムの確立」

研究代表者：土肥 義治 理化学研究所 理事

研究期間：平成 13 年 3 月 1 日～平成 17 年 3 月 31 日

この SORST 研究では、CREST で注目された 3 種の微生物のポリエステル生合成系酵素の構造と機能の相関について研究が行われた。同酵素を合目的に改質するために、進化工学の手法が用いられ、酵素遺伝子に部位特異的の変異を施し、細胞内でポリエステルを合成させた後、ハイスループットスクリーニングにより目的の変異クローンを選別するシステムを確立することができた。また、遺伝子組換え大腸菌を用いて糖や植物油などの再生可能資源から高強度繊維や高性能フィルムの加工に適したポリエステルを高効率で生産する、発酵生産プロセスの開発が行われた。更に、生分解性の高強度繊維や高性能フィルムの基盤技術として、材料の構造を分子レベルで制御して最適な物性を発現させる技術の研究開発、及び、ポリエステルフィルムの生分解制御技術の研究開発が行われた。

発酵遺伝子組換えにより、微生物だけでなく植物に対してもポリエステル生産応力を与えることが可能であり、図 3.3.1 には、タバコにおける研究成果の例を示す。

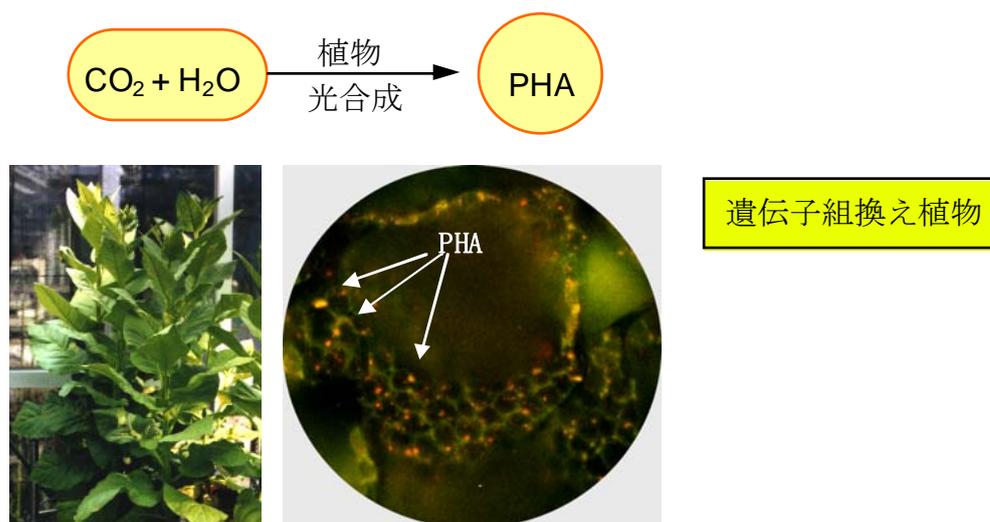


図3.3.1 発酵遺伝子組換えタバコにおけるポリエステル（PHA）生産

3. 3. 2 科学・技術の進歩に貢献する成果

従来の生分解性プラスチックは化学合成により製造されていたのに対して、本研究は、生物の物質生産機能を利用して生分解性プラスチックを生産し、且つ再生可能な糖や植物油などのバイオマスを原料として用いるという、新しい科学技術の分野を拓くものであった。

1990 年代以降、生分解性プラスチックの基礎研究・応用研究が世界各国で盛んになる中、土肥教授の研究は、日本の生分解性プラスチックの研究を牽引するものでもあった。

1989年には企業48社による「生分解性プラスチック研究会」が創設され、同研究会の主催で1990年、第1回「生分解性プラスチック会議」が東京で開催され、16カ国300人以上が参加した。現在は「日本バイオプラスチック協会」として、「生分解性プラスチック」と「バイオマスプラスチック」（総称：バイオプラスチック）の普及促進と技術開発を目的として活動している。

1991-92年、高分子学会には「エコマテリアル」部会が設置された。

高分子研究で最も権威のある国際雑誌である *Macromolecules* から分かれて、2000年には *Biomacromolecules* が創刊された。土肥教授はその創設メンバーの一員を務めた。*Biomacromolecules* は高い評価を受け、インパクトファクターも高い雑誌に発展している。

CREST 期間中の1998年に”International Symposium on Biological Polyhydroxyalkanoates (ISBP 98)”を開催し、また、SORST期間中の2003年に、”First International Conference on Bio-based Polymers (ISBP 2003)”を開催して、世界中のバイオプラスチックの研究者が集まる場を創成した。

このように、本研究は、“バイオプラスチック”という新しい科学技術の分野の構築に重要な役割を果たし、それは、本プロジェクトがこの分野における新しい雑誌の創刊、国際会議の創設などの成果を生み出していることに現れている。土肥教授の主導的な活躍により、本分野において日本の存在感は大きなものとなり、世界の技術をリードすることが可能となった。

尚、本研究は、バイオプラスチックの研究開発においては高分子科学と分子生物学という異分野の研究者が一体となった共同研究が非常に重要であることを示した。現在、バイオプラスチックの研究室や研究チームは、欧米、日本を中心に世界に数多くあるが、高分子科学者と分子生物学者とが同一グループを形成して研究を推進しているのは本研究の理研・東工大チームがほとんど唯一であり、同研究チームはバイオプラスチック研究の国際中核研究室となっている。

3. 3. 3 成果の応用に向けての発展と社会的・経済的な効果・効用に繋がる取り組み

3. 3. 3. 1 成果の応用に向けての発展

(1) バイオプラスチックの生産技術

本研究は、再生可能な糖や植物油などのバイオマスを原料とし、微生物の発酵生産を利用して、生分解性高分子を生産する、環境低負荷型のバイオポリエステル生産システムの開発を目指して進められた。CREST-SORSTの9年間の研究により、研究成果の応用に向けて次のような成果が得られた。

- ① バイオポリエステル生合成関連酵素遺伝子を組み込んだ遺伝子組み換え微生物の育種が可能となり、植物油からバイオポリエステルを生産する基盤技術が確立された。
- ② 生合成関連酵素の構造と機能の相関が研究され、酵素の重合活性や基質特異性を制御する基礎技術が開発された。

- ③ 遺伝子組み換え大腸菌を用いて糖から超高分子量バイオポリエステル合成が可能となり、冷延伸技術の適用により、高強度の生分解性ポリエステル繊維の作成が可能となった。
 - ④ バイオポリエステルの生分解性制御技術が開発された。
- これらの各要素技術を更に高度化・最適化することにより、今後、バイオポリエステルの応用が進むと期待される。

(2) バイオプラスチックの規格化

バイオプラスチックのような新しい材料が世の中に受け入れられ、商品として広く使われるためには、規格化が重要である。産業界の立場からは、国際規格において主導的立場をとりうることは産業の国際競争力構築のために極めて重要である。土肥教授は、バイオプラスチックに関する JIS 規格作成の委員長を務め、更に、国際規格 ISO においても主導的役割を果たしている。また、土肥教授がボランティアで IUPAC に働きかけ、2006 年にバイオプラスチックの用語の統一のための分科会が設立された。

(3) バイオプラスチックのライフサイクルアセスメント (LCA)

SORST 研究において、バイオポリエステルの生産プロセスに関する LCA として、投入エネルギー量及び排出二酸化炭素量の計算を行った。バイオポリエステルの生産プロセスにおけるこれらの数値は、汎用プラスチックの生産プロセスにおける数値と比較して顕著に低く、前者が環境低負荷型のプロセスであることが示された。

このライフサイクルアセスメントに関する発表は注目を集め、カネカが本格参入してきたのもこれがきっかけであった。

3. 3. 3. 2 社会的・経済的な効果・効用に繋がる取り組み

(1) (株)カネカによるバイオポリマーの実用化展開

(株)カネカが CREST-SORST の成果をベースに、更に JST「独創的シーズ展開事業」により、植物油脂を原料に使ったバイオポリマーの実用化を進めている。同社のニュースリリースを示す。

世界初。100%植物由来で軟質性、耐熱性を有するバイオポリマーを本格展開
株式会社カネカ 広報室（2009年2月6日）

株式会社カネカ（本社：大阪市、社長：菅原公一）は、植物油脂を主原料とするポリエステル系バイオポリマーである「カネカ PHBH（仮称）」（3-ヒドロキシ酪酸と3-ヒドロキシヘキサノ酸の共重合ポリエステル）の事業を本格展開する。隣接する用地を取得して拡張した高砂工業所（兵庫県高砂市、工業所長：叶 敏次）の敷地内に、2010（平成22）年稼働を目標にPHBH製造技術の検証及び開発用ポリマー生産実証設備を設置する。生産能力は年産約1000トンで、設備投資及び研究開発に関わる投資額は約25億円。マーケットの動向を見極めながら、数年後に年産1万トン、更に生産設備を段階的に増強し最終的には売上高100億円以上の事業に育てる方針である。尚、当事業は独立行政法人科学技術振興機構の「独創的シーズ展開事業」の委託開発事業として採択された。

当社が物質特許を保有しているPHBHは、再生可能資源である植物油脂等のバイオマスを主原料とし、土肥義治理化学研究所理事との共同研究による菌株育種、培養技術によって微生物体内にポリマーを高度に蓄積させ、それを精製して取り出すクリーンプロセスで生産する。更に食糧には使用されないバイオマスを主原料とする製造技術確立にも目処を得ている。PHBHは日常の使用条件下では安定である一方、生分解性が優れ、自然環境の嫌気性・好気性いずれの雰囲気下でも短期間で分解され、最終的には炭酸ガスと水になる。100%植物由来であるため化石資源由来のポリマーと比べ、二酸化炭素の増加が抑制され、地球温暖化防止への貢献が可能である。

またPHBHは、共重合体の3-ヒドロキシヘキサノ酸の比率が増加するにつれて柔軟な性質が出てくるため、共重合比率をコントロールすることで、硬質から軟質まで幅広い物性を示し、ポリエチレンやポリプロピレンに類似の物性も実現可能である。バイオポリマーとして用途が広がってきている硬質のポリ乳酸（PLA）に比べ、優れた耐熱性、生分解性、耐加水分解性、水蒸気バリア性を有し、100%植物由来で軟質性、耐熱性を有する生分解性ポリマーとして世界初の実用化となる。主な用途としては、フィルム・シート、発泡体、射出成型品、繊維などに加工して、農業・土木資材、自動車内装材、電気機器、ボトル・容器、サニタリー用品、一般包材などへの利用が期待される。

バイオポリマーは、地球温暖化の原因である二酸化炭素の排出量削減や環境保全に貢献するとして急速に注目を浴びており、その需要は2007（平成19）年で約87000トンと、今後も世界市場で年率20%の成長が期待されている。特にこれまで実用化されていなかった100%植物由来の軟質系ポリマーへの要望が強く、当社としては、まずPHBHの優れた特徴を活かし、農業用マルチフィルムなど軟質フィルム用途を中心に本格展開する。

(2) 米国・ADM 社によるバイオポリエステル生産

米国・ADM 社（穀物メジャー）が、MIT からのスピノフ企業・メタボリックス社と共同で、年産 15,000 トンのバイオポリエステル製造プラントを建設した。2008 年秋から生産を開始している。これは、土肥教授が 1987 年に特許を取得した 4HB 共重合体で、理研からメタボリックス社にライセンスしていたものである。その特許が切れるのを待っての生産販売である。

(3) 今後期待されるバイオプラスチックの実用化

生分解性プラスチックの現状での生産量は、年間 5 万トン程度である。このレベルの生産量では、品質が安定し、コストが低減するためにはやや不十分である。2 億トンといわれる世界のプラスチック生産量に対して、将来、10%程度をバイオプラスチックが占めるようにならなければならないことが期待される。

本研究の特徴である生物由来のプロセスにより、化学合成によるものより生体適合性に優れたバイオプラスチックが得られる可能性が大きい。人工皮膚、人工臓器、人工骨などにこのような材料を活用できれば、生体適合性に優れた材料として治療に広く利用されると期待される。

生分解性材料としての特徴を活かして、抜糸の不要な手術用縫合材料などとして特に利用が期待される他、魚網や釣り糸として、自然環境に放置しても環境汚染や危険を避けうる環境低負荷型の材料としての利用が期待される。更に、生分解性に優れた材料であることから、従来のプラスチックとは全く異なる廃棄物収集・処理システムの構築を可能とすると期待される。不燃物ゴミの量は激減し、また、発生元での分散型微生物処理などの処理システムの構築も考えられる。

常温・常圧の微生物生産プロセスによるバイオプラスチックの工場生産ラインは、従来の化学合成による生産ラインと比較して、省エネルギーと環境負荷の観点から極めて優れたものであると予測される。

3. 3. 4 参加研究者の活動状況

(1) 研究代表者・グループリーダー

土肥義治氏は参加当時、理化学研究所高分子化学研究質の主任研究員であった。現在は、理化学研究所理事の任にあり、東京工業大学名誉教授である。

(2) CREST 研究員

CREST 研究員として 6 名が参加し、現在、その内 2 名が理化学研究所研究員である。その他 4 名の現職はそれぞれ、東京大学大学院農学生命科学研究科准教授、東京工業大学大学院総合理工学研究科准教授、熊本県立大学環境共生学部准教授、東京電力（株）技術開発研究所である。それぞれ、現在、世界中で活躍している。

CREST-SORST と一連の研究として推進された本研究は、環境低負荷型の社会の実現に繋がる夢のあるバイオプラスチックの研究として、本プロジェクトに参加した研究者だけではなく、この分野の若手研究者にも大きな影響を与えたと考えられる。

3. 4 研究課題「環境影響と効用の比較評価に基づいた化学物質の管理原則」(研究代表者：中西準子)

3. 4. 1 研究の継続・発展

3. 4. 1. 1 プロジェクト期間までの研究の展開

本 CREST 研究以前に、中西研究代表者が東京大学工学部都市工学科及び環境安全センターにて長年取り組んできた研究は、我が国の環境リスク研究のさきがけとなるものとして注目され始めていた。1995 年に横浜国立大学環境科学研究センターに危機管理分野が新設され、中西氏はそこに教授として迎えられ、同時に共同する教授ポストも増設されて、研究環境が整うこととなった。

1996 年に中西教授を研究代表者とする提案が CREST に採択され、横浜国立大学環境科学研究センターを中心とし、九州大学・巖佐教授を共同研究者とするチームにより、本格的な環境リスク評価の研究が開始された。研究の全体構想は図 3. 4. 1 のようなものであった。

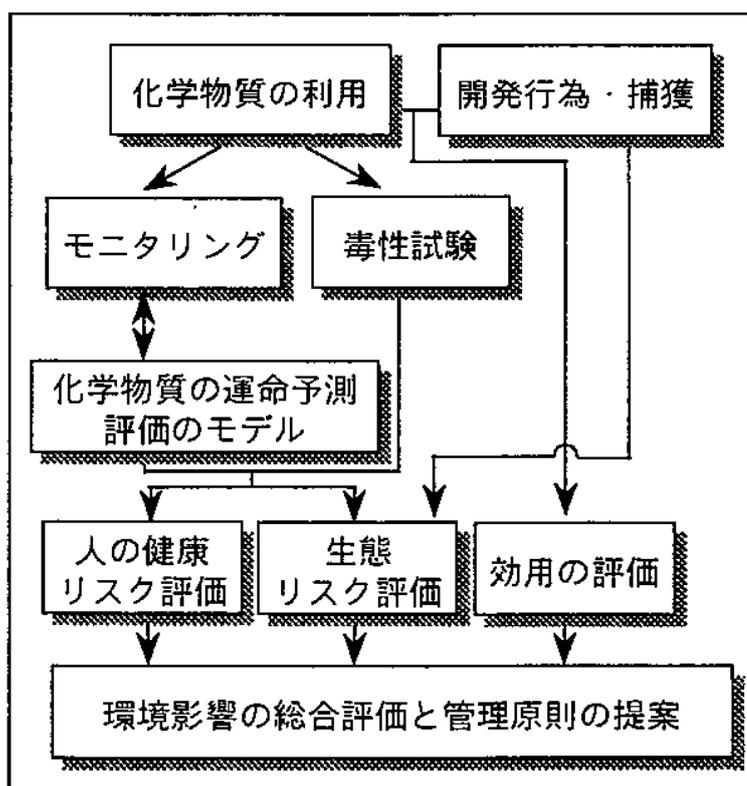


図 3. 4. 1 CREST研究「環境影響と効用の比較に基づいた化学物質の管理原則」の全体構想

研究は、工学、経済学、生態学の視点を統合して進められ、評価手法開発と事例研究とが行われた。評価手法開発の1つとして人の健康リスク評価の研究が行われ、損失余命 LLE (Loss of Life Expectancy) を用いる評価手法により、異種のリスク (発癌と神経系障害、

など)を比較評価することを可能とした。特に、致死的なリスクだけではなく非致死的なリスクについても同じ尺度で評価することが可能となった。生態リスク評価の研究としては、ある種が絶滅に至るまでの時間Tに対する化学物質の影響を算出することを可能とした。生態リスク評価の指標としては、どういう生態系を保全したいかという目標によって、 $\Delta(1/T)$ 、 $\Delta T/T$ 、 $\Delta \log T$ のいずれかが適当であることを示した。環境影響の総合評価としては、リスク削減効果とそれに伴う削減費用とを比較したベネフィット/リスク=B/R比を算出し、それを基に政策の効率や優劣を評価出来ることを示した。

事例研究としては、特に、ダイオキシン類についての研究が最も広範囲に行われ、上記評価手法が適用されると共に、事例研究の中から多くの解析手法が生み出された。取得サンプル毎に、ダイオキシン類の同族化合物136種類(但し、塩素数4以上)の内83種類までの分析を行い、主成分を明らかにすることにより、燃烧起源、農薬起源などの汚染源推定が可能となった。

3. 4. 1. 2 プロジェクト終了後の研究の発展

(1) 産業技術総合研究所化学物質リスク管理研究センターにおける研究

2001年3月にCREST研究が終了した後、同年4月につくばに独立行政法人産業技術総合研究所(産総研)が発足し、その中に化学物質リスク管理研究センター(CRM)が設立され、中西研究代表者がセンター長に就任した(3年間、横国大との兼任)。このセンターのミッションは、化学物質の利用と規制に関する意思決定がそのリスクとベネフィットを勘案して合理的に行われる社会を作るために評価・解析の科学と技術を開発することであった。この理念と手法は、化学物質以外のすべての技術利用に応用できるものである。

中西センター長は、CRMの活動目標として次の3点を掲げた。

- ・手法開発：リスク評価手法、ベネフィット評価手法の開発。
- ・評価書：実例として、30物質についての詳細リスク評価書の策定・公開・活用。
- ・「読み書きそろばん」：行政、事業者、市民がリスク・ベネフィット解析に基づく意思決定ができるようにリスク評価支援ツールを開発し公表。

この研究センターの設立にはCREST研究メンバーが多く参加した。CRMは予定されていた7年間の時限を終え、2008年4月1日からは「安全科学研究部門」(部門長：中西準子)に改組された。

(2) NEDO「化学物質のリスク評価およびリスク評価手法の開発」

CRM設立と同時に中西センター長はNEDO「化学物質総合評価管理プログラム」の「化学物質のリスク評価およびリスク評価手法の開発」プロジェクトのプロジェクト・リーダーとして、このプロジェクトを推進した。研究推進の中心を担ったのは産総研CRMであった。

このプロジェクトでは、30物質についての詳細リスク評価書の策定を目標として掲げて研究が進められた。詳細リスク評価書とは、EU式の約束に基づくリスク評価書とも、米国

式の検証型のリスク評価書とも異なる、我が国独自のリスク評価書を目指したもので、次の条件を満たすものとして策定された。

- ・ 国民一人一人が自分の住んでいる場所のリスクを知ることが出来る。
- ・ 国全体でリスクの人口分布が分かる。
- ・ 反論に耐えるだけの検証が必要。

(3) 新技術・物質のリスク評価

産総研内部重点研究として「新技術のリスク評価—ナノテクノロジーのケース研究」(2005～2007年度)が発足し、同時に基準認証研究開発事業「ナノ粒子の安全性評価方法の標準化」(2005～2007年度)が開始された。更に並行して NEDO プロジェクト「ナノ粒子の特性評価手法の研究開発」(2006～2011年度)が推進された。この NEDO プロジェクトには産総研内の 6 ユニットと 4 大学が参加し、5 年間の研究予算は約 20 億円である。このプロジェクトでは「新技術のリスク評価—ナノテクノロジーのケース研究」と「ナノ粒子の安全性評価方法の標準化」が研究されている。

その他、2006 年度から太陽光発電研究センターと共同で太陽電池についてリスク評価研究が開始された。また、石油産業活性化センター(資源エネルギー庁)からの委託で ETBE(バイオ系ガソリン添加燃料)のリスク評価研究も開始された。

(4) OECD 関係への展開

OECD 第 38 回化学品合同会議「工業生産されたナノ材料の人の健康と環境への安全性に関する問題点に関する特別セッション」(2005 年 6 月、パリ)において、ナノテクノロジーの特別セッションが設置され、中西研究代表者が講演を行った。ここでは、従来のナノテクノロジー研究の中でナノ材料のキャラクタリゼーションとなる計測が行われていない、という点を問題を提起した。計測なしに有害性を評価することなどは意味がない点を特に主張し、国際的な同意が得られるに至っている。ナノテクノロジーのリスクに関する研究は世界で既に 10 数年以上行われてきたが、改めてキャラクタリゼーションや不純物の精密測定に立ち返るという意味で、ナノリスク研究を再スタートさせたことになる。

同年の OECD のワークショップ「工業生産されたナノ材料の安全性」(2005 年 12 月、ワシントン DC)では、中西センター長がリスク評価の観点から日本全体の戦略やプロジェクトの 5 年間のロードマップを示し、日本のナノ研究の全体像を発表した。これには非常に大きな反響が得られた。

OECD の下に設置されている工業ナノ材料安全部会では、14 のナノマテリアルについての物性や有害性に関するデータセットを作成するためにスポンサーを募ることになった。その会議において、日本はフラーレン、単層ナノチューブ(SWCNT)、複層ナノチューブ(MWCNT)について、米国環境保護庁(以下 EPA)と共にデータセットの作成を実施するとして手を挙げた。(その後、カナダからオファーがあり、当初米国の分担分とされていた仕事の一部を

さらにカナダが分担することになった。) 日本の分担分は中西センター長をプロジェクト・リーダーとする NEDO プロジェクトが主体となって実施することとなっている。

このような流れを受けて、2008 年には OECD/AIST 共同シンポジウムが開催された。

3. 4. 2 科学・技術の進歩に貢献する成果

我が国におけるこれまでのリスク評価は安全性証明の観点からのみ行われていた。それに対して、本CREST研究は、化学物質の利用に際して、単なるリスク評価に止まらずリスク管理の原則確立を目指して、リスク削減効果とそれに伴う削減費用とを比較したリスク・ベネフィット解析を提唱する画期的なものであった。

我が国より健康リスク評価の進んでいる米国においても、行われていたのは死亡数など致死的な事象だけを対象とすることが多かった。近年、単なる死亡数ではなく、損失余命 LLE (Loss of Life Expectancy) を指標とする考え方が Harvard 大学などから出てきたが、ここにおいても、病気の種類による違いなどはほとんど考慮されていなかった。それに対して、中西センター長のチームが開発した手法は、病気毎にLLEが異なることを考慮し、また、非致死的なリスクについても同じ尺度で評価を行い、LLEを用いた異種のリスクの比較評価を可能とした。生態リスク評価に関しても、不可能に近いと思われていた種の絶滅リスクの評価を可能とした。中西教授自らが述べているように、本CRESTは、我が国の「リスク研究の始まりを作ったといえよう。

本CREST研究の成果が、科学物質のリスク管理手法として新しい流れを作り出す国内外で注目されるものであったことは、次の事象に示されている。

(1) Chemosphere 誌特集号発刊

CREST プロジェクトの期間中に4回の国際シンポジウムが開催され、海外の著名な研究者が招待された。この最後のシンポジウム(第4回、2001年1月開催)に講演者として招待した Martin van den Berg 氏の働きかけにより、有害物の環境動態、環境影響では最も広く読まれているジャーナルである Chemosphere 誌の2003年10月4号に、本CREST 発表論文15報が一挙に特集として掲載された。

(2) 一般書籍・ハンドブックの刊行

2003年に日本評論社から「環境リスク学—不安の海の羅針盤—」が発刊され、2005年の「毎日出版文化賞」と「日経BP・BizTech 図書賞」を受賞した。

同じく2003年、中西準子、蒲生昌志、岸本充生らCRESTプロジェクトメンバーが編者になった「環境リスクマネジメントハンドブック」(朝倉書店)が発刊された。

NEDO 受託研究「化学物質総合管理プログラム・化学物質リスク評価及びリスク評価手法の開発プロジェクト」(2001~06年度)のテーマ「リスク評価、リスク評価手法の開発及び管理対策の削減効果分析」と産総研独自の研究資金で行われてきた成果を基に、丸善にて、「化学物質管理リスクの評価と管理」シリーズが刊行された。

3. 4. 3 成果の応用に向けての発展と社会的・経済的な効果・効用に繋がる取り組み

3. 4. 3. 1 成果の応用に向けての発展

(1) リスク評価普及のためのツール開発

多くの人々がリスク評価を行い、また教育を受けるためには共通の書き方や計算手法が必要であり、そのためのツールとして CRM では大気濃度推定ソフト (ADMER) や Risk Learning というソフトを開発し希望者に配布している。

①ADMER (Atmospheric Dispersion Model for Exposure and Risk Assessment) 開発—
排出量と気象条件から日本の各地域における化学物質の大気中濃度を計算

従来、化学物質の暴露およびリスクは、観測データのみに基づいて評価されていた。しかし、評価すべき物質の数が多く、対象となる地域が広い場合に、十分な空間解像度で暴露やリスクの評価を実施するには、莫大な費用と労力を要していた。そこで、化学物質の大気中の濃度を、排出量と気象条件から計算するソフトウェアである ADMER (正式名称：産総研—曝露・リスク評価大気拡散モデル (National Institute of Advanced Industrial Science and Technology - Atmospheric Dispersion Model for Exposure and Risk Assessment : AIST-ADMER) を 2002 年に開発した。

ADMER は以下の機能を備えている。

- 気象データの作成・確認
- 化学物質排出量データの作成・確認
- 化学物質大気中濃度及び沈着量の計算
- 曝露人口の推計
- 計算結果図化
- 計算結果ヒストグラム表示

2007 年に公開した Ver2.0 では、空間解像度を最高 100m にまで向上させ、市区町村内など細かい領域での暴露評価が可能になった。しかしながら、実際に細かい領域で用いると、背景の地図にも解像度の高さが必要となることから、対応する地図データが高価であるなど一般ユーザーの方々が利用するには不便さがあった。

2008 年 3 月にバージョンアップされた ADMER Ver.2.5 では、Google Earth™ の衛星写真上での濃度マップ表示、並列計算処理による高速化、操作性の向上、気象庁アメダスデータのダウンロード機能の搭載などの改良を行った。Google Earth™ を利用した大気汚染濃度の公開は、米国では 2007 年から行われてきたが、日本では初めてのものである。

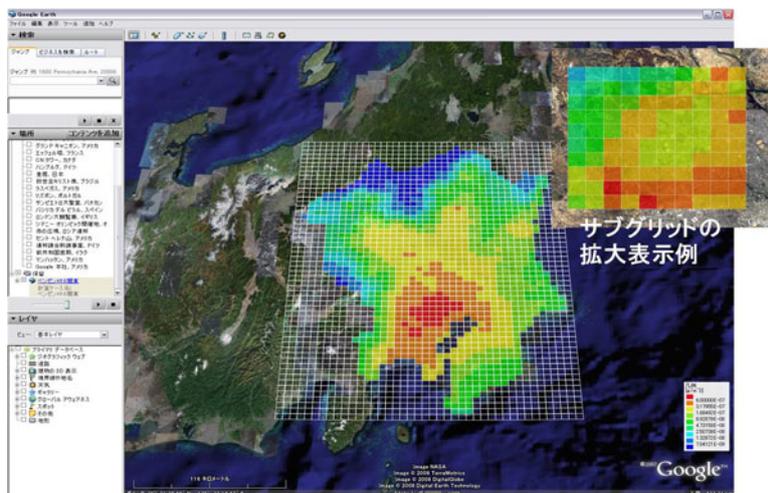


図 3.4.2 ADMER Ver. 2.5 での Google Earth™ を用いた大気中のベンゼン濃度分布表示の例
日本各地を 5km×5km の基本グリッドに分割し、この解像度で濃度分布が表示される。グリッドを入れ子構造にして、基本グリッドの中を、1km×1km、500m×500m、100m×100m のサブグリッドに分割して詳細な濃度分布の表示もできる。

ADMER を利用することにより、評価可能な地域や物質の数が飛躍的に増加し、どのような発生源が高濃度・高リスクの要因となっているのか、定量的に評価できるようになった。また新規物質など観測データがない場合の推定、さらには将来と過去等の推定など、社会経済的評価に不可欠な要素を解析することも可能となった。

ADMER は 2003 年に Web サイトで公開して以来、自治体や企業を中心に 3000 人を超えるユーザー登録があり、同種のソフトウェアとしてはわが国で最も普及している。ADMER は NEDO 「化学物質総合評価管理プログラム」(NEDO からの受託研究「リスク評価、リスク評価手法の開発及び管理対策のリスク削減効果分析」の一環として行われた) の代表的な研究成果の一つであり、同プログラムで実施されたほとんどすべてのガス状物質の初期および詳細リスク評価に利用されているほか、国や自治体での環境政策、教育機関、企業などさまざまなところで用いられている。

②ヒトの健康リスク評価ツール Risk Learning 開発

Risk Learning は、リスク評価の専門家以外の人でも容易に使用できることを目指したヒトの健康リスク評価ツールである。暴露を評価する際には、『化学物質の発生源は多様である』『暴露には、様々な媒体が関与する』『暴露濃度、摂取量、吸収量は変動する』等の問題があり、実態に即した暴露を推計することがリスク評価における重要なポイントとなる。

Risk Learning では、化学物質 (PRTR 法対象 76 物質 (追加ファイルにより合計 90 物質)、汚染媒体 (屋内外空気、表層水等 11 媒体)、濃度、暴露シナリオ (33 の暴露の道筋)、暴露対象者 (平均的日本人男性/女性) をプルダウンメニューで選択または設定することにより、汚

染媒体と暴露の道筋の多様な組合せの中から暴露とリスクを推計することが可能となっている。

この開発は NEDO「リスク評価、リスク評価手法の開発及び管理対策のリスク削減効果分析（クロスメディアアプローチによる環境媒体と摂取媒体中濃度の解析手法の開発）」の一環として行われた。

3. 4. 3. 2 社会的な効果・効用

本CREST研究は基礎研究であるが、直ちに実践的な側面を持ち、特に、環境政策の効率や優劣の評価という点で、社会的なインパクトの極めて大きい研究であった。重要な一例としては、CREST研究において、実環境のダイオキシンの状態から発生源を推定する研究が行われた。宍道湖や東京湾の底泥の分析結果は、水田除草剤などの農薬を起源とする残留ダイオキシンの濃度が非常に高いことを示し、旧厚生省により既に示されていた「ダイオキシンの主な発生源はごみ焼却炉であり小型炉は規制すべき」という施策は誤りであったことを明らかにした。1997年10月の朝日新聞「論壇」に掲載された中西研究代表者による「ごみ処理対策の方向誤るな」というタイトルの投稿は、この研究成果を基に環境政策の誤りに警鐘を鳴らしたもので、当時、多方面から大変な驚きと、関係方面からの強烈な反発とをもって迎えられた。本CREST研究が環境政策の是正に貢献した一例である。

中西研究代表者の提唱した、リスク削減効果とそれに伴う削減費用とを比較し、リスクとベネフィットの管理を行うという考え方は、それまでの我が国の安全のみを重要視する考え方に対して、画期的な評価指標を提供した。この考え方は、広くは費用対効果という概念のさきがけとなるものであり、単に化学物質のリスク管理に止まらず、広範なリスク管理一般に通用する方法論であり、今後発生すると予測される様々なリスク管理の問題の解決や施行すべき政策の策定に大きな貢献をすると期待される。

リスク評価の目的の1つは、出来るだけ専門的な知識と技術を動員し、新しい評価手法を開発して、リスクを定量的に評価することであるが、同時に重要な目的として、リスクについての社会の合意形成がある。後者のためには、評価プロセスの透明化と、このプロセスへの国民の参加と理解が不可欠である。このために、2. 4. 3で述べたように、本研究成果のリスク評価ソフトウェアが公開されている。現状では、これらのソフトウェアを利用しているのはリスク評価分野に関係する大学研究者や、現実に環境管理の問題を抱えている企業担当者や自治体職員である。今後は、このようなリスク評価が、高校、大学、社会人教育などの場で広く素養として教育されていくことが望まれる。

3. 4. 4 参加研究者の活動状況

当研究プロジェクトのメンバー構成

		工学		生物		評価手法開発と マネジメント
		実測	モデリング	フィールド	理論	
横浜国大 環境研 経営学部 九州大学 その他の大学 工技院	環境研	村林敏行 花井善道 吉武英昭	益永茂樹	産原一裕 伊藤公紀 金子信博 小池文人	田中嘉成	中西準子
	経営学部					鈴木邦雄
	九州大学				巖佐 康 箱山 洋 中丸麻由子	
	その他の大学	梶原秀夫	東海明宏		松田裕之	岡 敏弘
	工技院		吉田喜久雄		宮本健一	藤生昌志 岸本充生

(1) 研究代表者

中西研究代表者に、環境リスク管理学研究への貢献に対して、2003年紫綬褒章が贈られた。中西研究代表者はこの受賞の意義について「何よりも良かったのは、環境リスク管理学を一つの学問分野として認めてもらえたこと」（環境リスク学、p. 71）と述べている。

(2) CREST 中核メンバーの現況

益永茂樹氏は工業技術院資源環境技術総合研究所（現在の独立行政法人産業技術総合研究所主任研究官から横浜国立大学 環境科学研究センター助教授として、横国大に新設された中西研究室に加入し、CREST プロジェクト中に教授に昇任して、現在、横浜国立大学大学院環境情報学府環境リスクマネジメント専攻担当である。

東海明宏氏は、岐阜大学助教授から横浜国立大学 環境科学研究センター助教授に転籍し、北大助教授、CRM 主任研究員を経て、CREST プロジェクト終了後には CRM チーム長に昇任し、2008 年から阪大教授である。

田中嘉成氏はカナダのマックギル大学生物学科研究員（カナダ政府有給研究員）から横国大客員助教授に転籍し、CREST 特別研究員を経て、2002 年中央大教授に昇任して、現在、環境リスク研究センター生態リスク評価研究室室長である。CREST プロジェクトでは生態リスク研究の理論面で貢献した。

松田裕之氏は CREST プロジェクトに九州大学理学部助教授として参画し、1996 年東京大学海洋研究所に転籍し、2003 年から横浜国立大学大学院教授となった。1993 年九州大学理学部、1996 年東京大学海洋研究所、2003 年横浜国立大学大学院教授、現在に至る。

(3) CREST 若手メンバーの現況

蒲生昌志氏は CREST 研究の代表的成果の一つである「日本における化学物質のリスクランキング」を示した。日本人が受けている化学物質によるリスクの大きさを比較したもので、異種のリスクを“損失余命”という尺度で統一的に評価することでリスクの大小を比較可能にした。蒲生氏は資源研から CREST に参画し、CREST 終了後から CRM に転籍し、現在後継組織の化学物質リスク管理研究センターのリスク管理戦略研究チームチーム長である。

中丸麻由子氏は、CREST 研究員 (PD) として参画した。ニューヨーク州ロングアイランドにおける DDT の水中濃度とセグロカモメの絶滅確率の増分を示すなど、化学物質の生態系への影響を絶滅リスクで具体的に計算して評価するという CREST プロジェクトの主要な研究成果を生み出した。CREST プロジェクト中に“The Evolution of Social Interaction in a Spatially Structured Population.” (空間構造の社会的相互作用の進化への影響について) の学位論文により学位 (博士 (理学)) を取得し、静岡大学工学部助手 (2000-2005) を経て、現在、東工大大学院社会理工学研究科価値システム専攻准教授を務めている。

CREST プロジェクト当時東大院生であった櫻井健郎氏は、初めて主成分分析法を適用してダイオキシン発生源を解析し、研究に貢献した。現在は国立環境研の主任研究員である。

3. 5 研究課題「地球環境保全のための国際的枠組みのあり方」(研究代表者:佐和隆光)

3. 5. 1 研究の継続・発展

3. 5. 1. 1 プロジェクト期間までの研究の展開

1992年にリオデジャネイロにて国連環境開発会議が開催され、そこで国際気候変動枠組み条約が採択されて以来、地球環境保全の意識が高まりを見せてきた中で、1997年1月にCREST研究領域「環境低負荷型の社会システム」が発足した。佐和研究代表者が中心となる本CREST研究は、排出権取引、共同実施、クリーン開発メカニズムなどの二酸化炭素排出低減のための制度について、その設計や経済学的意味についての研究を提案していたが、それらは、ほぼ1年後に開催された京都会議(COP3:気候変動枠組み条約第3回締約国会議:1997.12)における京都議定書(Kyoto Protocol)で記載される重要な議題を先取りすることとなった。

本CREST研究は、①国際制度グループ、②国際共同研究グループ、③技術戦略研究グループの3つのサブグループの体制で研究が推進された。

国際制度グループでは、実験経済学や、ゲーム理論の手法等を用いて、排出権取引、共同実施、クリーン開発メカニズムの制度設計に関する理論的研究を行ない、経済学的意味と意義についての成果を呈示した。CDMに関する日本、中国、韓国の共同研究は、机上の理論に止まる事のない実証的研究として進められ、CDMの制度設計を考える上での要件を提示した。

国際共同研究グループでは、中国に的を絞り、中国への技術移転がもたらすであろう二酸化炭素の排出削減効果の評価、それがもたらすであろうマクロ経済影響の評価、中国のエネルギー消費と二酸化炭素排出量の予測、等々を行い、エネルギー・環境面での日中間国際協力の可能性とその効能を数量的に明らかにした。

技術戦略研究グループでは、50年ないし100年の時間幅で、エネルギー・環境関連の技術開発戦略のあり方について、専門家の聞き取り調査や最適化モデル分析より研究し、環境技術開発についてのシナリオと技術評価を示した。

3. 5. 1. 2 プロジェクト終了後の研究の発展

(1) KSI (京都サステイナビリティ・イニシアチブ)

佐和研究代表者は統括ディレクター補佐(昨年まで統括ディレクター)を担当している。このKSIプロジェクトは科学技術振興調整費のサステイナビリティ学連携研究機構(IR3S)の一環に位置付けられ、CRESTの成果を引き継いだものである。

KSIは、今後重要なテーマとなる「持続可能性」を実現するための学問体系、「サステイナビリティ学」の構築を進めるために設立された京都大学の研究・教育のための組織で、1研究科(地球環境学堂)、7研究所(経済研究所、人文科学研究所、東南アジア研究所、化学研究所、エネルギー理工学研究所、生存圏研究所、防災研究所)で構成される。

自然科学と社会科学を融合する組織の壁を越えた柔軟な教育・研究システムという特色は CREST のノウハウを継承するものである。気候変動対策の経済的・技術的分析にもとづく環境政策も重点課題の一つに位置づけており、この点でも CREST 研究の流れを組んでいる。

(2) 21 世紀 COE プログラム「先端経済分析のインターフェイス拠点の形成」

佐和研究代表者は 2003 年～2005 年まで 21 世紀 COE プログラム「先端経済分析のインターフェイス拠点の形成」の拠点リーダーおよび事業推進担当者：環境・医療・通信研究グループを務めた。これは経済学の各分野領域間のインターフェイスに加え、社会、自然人文社会諸科学とのインターフェイスという 3つのインターフェイスを作り上げることを狙ったものである。

(3) “Global Conference on Global Warming”

2008 年、イスタンブールで開催された Global Conference on Global Warming 2008 (GCGW-08) に Keynote Speaker として、佐和研究代表者及び CREST プロジェクトメンバーであった今井晴雄氏が招聘された。他に、CREST メンバーの秋田、新沢も参加した。

<http://www.gcgw.org/ocs/index.php?conference=gcgw&schedConf=gcgw08&page=schedConf&op=keynote>



図 3.5.1 21 世紀 COE プログラム「先端経済分析のインターフェイス拠点の形成」

3. 5. 2 科学・技術の進歩に貢献する成果

(1) 我が国における地球環境保全のための国際的枠組みに関する研究の本格化

地球環境保全、持続的発展、二酸化炭素排出低減、等の概念が、1980年代後期から欧米を中心に盛んに議論され研究されるようになる中、我が国はこの動きに大きく取り残された。本 CREST 研究は、その中で、我が国において、地球環境保全のための国際的枠組みを科学的に取りあげた初めての試みということができる。二酸化炭素排出低減を国際的規模で進めるための制度としての排出権取引、共同実施、クリーン開発メカニズムなどについて、我が国としては初めて本格的に経済学的意味についての研究に取り組み、それ以降、このような分野の研究が我が国において盛んに行われるようになるためのさきがけとなったと評価することができる。また、本研究分野は、環境という自然科学技術系分野と経済学とを融合させた新しい文理融合領域を拓いたと評価することが出来る。

本 CREST の成果をまとめたモノグラフ“International frameworks and technological strategies to prevent climate change”は気候変動に関する国際的取り組みの教科書の一つにはなっている。

(2) 環境経済・政策学会の設立

1995年12月、環境経済・政策学会（Society for Environmental Economics and Policy Studies、略称 SEEPS）が「経済学、政策学および関連諸科学を総合し、環境と経済・政策の関わりについて理論的・実証的な研究活動、ならびに国際的な研究交流を促進」することを目的に設立された。当初は10人程度であったが、現在では約1300名規模になっている。この学会には旧 CREST メンバーが殆ど加入している。

(3) World Congress on Environmental and Resource Economics

2006年7月、“The 3rd World Congress on Environmental and Resource Economics”（第3回環境経済学世界大会）が京都国際会館で開催され、世界中の環境経済学者が集い、最新の研究成果について報告と議論が行われた。環境経済学世界大会は4年毎に開催される世界の環境経済学研究の研究発表大会で、これまで、1998年にイタリア・ベニスにて第1回の会合が、2002年にアメリカ・モンレーで第2回の会合が開催されてきた。パチャウリ IPCC 議長による講演や市民公開形式によるシンポジウム「ポスト京都議定書の国際的枠組み」が開催されるなど、温暖化防止に向けた取り組みをどのように進めていくべきかについて、主に経済学的な観点から活発な議論が交わされた。小池環境相大臣（当時）や黒川清日本学術会議会長（当時）らに加え、秋篠宮が参加し開会宣言を行った。ロイヤルファミリーの参加は海外からの注目を更に高めることとなった。日本国民が環境活動の国際会議を正式に認知した表れとも評価できる。この会議参加者数は1200～1300名にものぼり、また日本での開催にもかかわらず、日本人が約300名の参加に対して外国人が約1000名の

参加という外国人参加比率の高さも特筆できる。

3. 5. 3 成果の応用に向けての発展と社会的・経済的な効果・効用に繋がる取り組み

本 CREST 研究は、二酸化炭素輩出削減を先進諸国に義務づけた京都議定書を画期的な成果とする立場に立ち、それを支援する情報発信を精力的に行った。ブエノスアイレスでの COP4 (1998 年) では地球環境戦略研究所や環境庁と連携してワークショップを開催し排出取引実験の結果等を発表、翌年ボンで開催された国連気候変動枠組み条約補助機関会合では排出取引メカニズム維持の意義を広報宣伝、同じくボンで開催された COP5 (1999 年) ではワークショップを開催し CDM のメカニズム設計の問題点を洗い出し、ハーグで開催された COP6 (2000 年)、マラケシュで開催された COP7 (2000 年) でも排出取引実験に関し成果を発表した。マラケシュの COP7 が最終決着の場となり、京都メカニズムが米国を除く参加国の合意を得て、批准を段階へと進むに至ったが、これに対して、佐和研究代表者を中心とする研究広報活動はいささかの貢献をなしたと考えてよいであろう。

我が国の各種の政府審議会・委員会においても CREST 研究成果に基づく政策提言が行われ、京都メカニズムへの政府見解に少なからず影響を与えた。例えば、環境庁では 1998 年 1 月、京都議定書・国際制度検討会（座長：佐和隆光京都大学経済研究所長）が設置され京都議定書で新たに定められたメカニズム（排出量取引、共同実施、クリーン開発メカニズム）に関する国際制度のあり方が検討された [環境庁報道発表資料 <http://www.env.go.jp/press/press.php?serial=593&mode=print>、1998]。

CREST メンバーは、太陽光発電の定着や排出権取引をめぐる動きに向けて、日本国民の環境意識の変革に貢献を行ってきている。例えば、Sustainable Development の概念は世界の中では早くから注目されてきたが、日本の姿勢ははるかに遅れたものであった。このような状況の中で CREST に参加した研究者が経済学、国際政治学、工学の様々な分野で地道に活動を続けて現在の国民の意識状況を作り上げるのみ貢献してきたと言えよう。

佐和研究代表者は、その後、交通政策審議会、中央環境審議会の各委員として、学術的な立場から地球環境保全のための取り組みに関する提言を重ねてきており、それらは我が国の政策に影響を及ぼしてきた。

3. 5. 4 参加研究者の活動状況

佐和隆光研究代表者は、2007 年 11 月に紫綬褒章を受賞した。

CREST 研究員だった早田裕一は 2000 年日本社会情報学会賞 CREST を受賞した。更に CREST で取り組んだ CDM 研究を基に実際にオペレーションエンティティに関する会社を起業した。この会社は国連からも認定されている。

3. 6 研究課題「アイソトポマーの計測による環境物質の起源推定」(研究代表者：吉田尚弘)

3. 6. 1 研究の継続・発展

3. 6. 1. 1 プロジェクト期間までの研究の展開

吉田教授は、東工大における博士論文研究以来、一貫して同位体化学の研究に携わってきた。従来の研究が、単一元素の同位体 (isotope) の違いにのみ注目したものであったのに対して、吉田教授は、分子内の異種の原子の同位体の組み合わせからなる同位体分子種 (isotopomer) に着目した。環境物質におけるアイソトポマーに関する研究は、1986 年の文部科学省科学研究費補助金 (科研費) に始まり、その成果が本 CREST 研究において大きく発展した。

多原子分子には通常10種類以上のアイソトポマーが存在し、特に環境物質の場合、その存在度には、物質の起源、生成の過程と環境、生成後の変質、消滅などの履歴が記録されている。しかしながら従来、物質の中のアイソトポマーの存在度を定量的に把握することは非常に困難であった。本CREST研究によって、新たな質量分析法 (フラグメンテーション法と高分解能法) 及びレーザー分光法が開発された。特に、高分解能質量分析装置の開発においては、従来の高分解能質量分析装置の質量分解能が200程度、精度が1パーセント程度であったのに対して、新たな立体2次2重収束質量分析器を開発することにより質量分解能5000において精度1パーミルを目指し、この目標を達成した。これにより、アイソトポマーの存在度の情報を定量的に読みとることが可能となった。この解析評価法を、環境物質の中でも重要な温暖化ガス、特に N_2O 、 CH_4 などのアイソトポマー存在比の分析に適用して、地球上の複数地点の大気中及び海水中におけるそれらの環境物質の生成・消滅の現象解明を可能とする基礎を築いた。

3. 6. 1. 2 プロジェクト終了後の研究の発展

(1) JST 発展研究 (SORST)

本 CREST 終了後、平成 13 年度に、吉田教授の研究は次のようなテーマで CREST の発展研究 (SORST) に採択され、更に発展を遂げた。

科学技術振興機構 戦略的創造研究推進事業 発展研究 (SORST)

「アイソトポマーによる温暖化気体ソース・シンクの定量的評価」

研究代表者：吉田尚弘 教授

研究期間：平成 14 年 4 月 1 日～平成 19 年 3 月 31 日

この研究において、アイソトポマーの計測法が更に高度なものに発展した。レーザー分光法について、CREST 研究では、近赤外領域のレーザーを利用していたが、分子の検出感度を向上させるために、中赤外領域のレーザーを利用した分光分析法の開発が進められた。また、アイソトポマー解析評価法の適用が、 N_2O 、 CH_4 の他、 CO_2 、 H_2O などより多くの種類の

環境物質に拡大された。研究対象としても、気球、航空機、研究船、及び地上の観測により、地球上各地の大気、海水、陸水、土壌、生物などを試料として進められた。温暖化ガスのソース・シンクとして、工業起源及び農業起源の計測・解析も行われた。図 3.6.1 は成果の 1 例を模式的に示したもので、東部熱帯北太平洋の海中にて、一酸化二窒素のアイソトポマー $^{15}\text{N}^{14}\text{N}^{16}\text{O}$ 、 $^{14}\text{N}^{15}\text{N}^{16}\text{O}$ 、 $^{14}\text{N}^{14}\text{N}^{18}\text{O}$ の存在比の深度による変化を計測し、 N_2O の生成・移動・消滅の機構を明らかにした研究成果である。

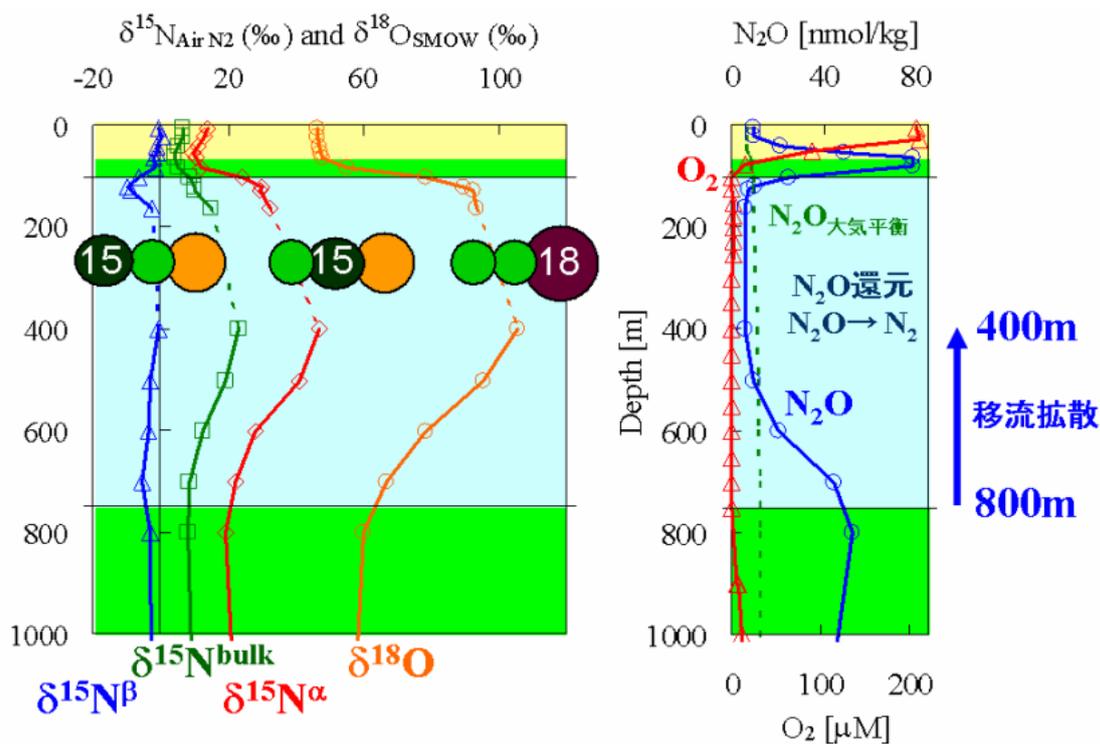


図 3.6.1 東部熱帯北太平洋の海中 N_2O 濃度及びアイソトポマー比の深度による変化

(2) 21 世紀 COE プログラム

東京工業大学が、平成 16 年度の文部科学省「21 世紀 COE プログラム」に指定され、吉田教授はアイソトポマー研究での成果を活用し、環境班リーダーとして、地球・生命の起源の探究に携わっている。

文部科学省 21 世紀 COE プログラム「地球：人の住む惑星ができるまで」

事業推進担当者：高橋栄一 教授 外 18 名

東京工業大学 理工学研究科地球惑星科学専攻

このプログラムでは、SORST の研究を補完するような研究並びに教育が推進され、特に、極限環境におけるアイソトポマー分別、及び光合成における生合成・代謝系のアイソトポマーによる解析が進められた。

(3) CREST 研究領域「水の循環系モデリングと利用システム」

また、平成 13 年度に発足した CREST「水の循環系モデリングと利用システム」において、永田俊京大教授が研究代表者を務める研究課題「各種安定同位体比に基づく流域生態系の健全性／持続可能性指標の構築」に吉田教授は共同研究者として貢献するとともに、アイソトポマーによる環境物質の履歴研究を更に発展させている。

3. 6. 2 科学・技術の進歩に貢献する成果

本研究は、アイソトポマー存在度を従来よりも桁違いな高精度で定量的に測定することにより、環境物質の履歴を明らかにするという新しい概念と手法を創出した。この分析・解析法の適用により、温暖化ガスの発生・消滅のメカニズムの同定とそれらの寄与の評価が可能であることを示し、温暖化ガスのサイクルを正確に記述するための基礎が確立された。

本研究の顕著な成果として、2000年5月のNature 誌に掲載された論文¹⁾において、大気中のアイソトポマーの存在度を初めて定量的に計測し、地球規模でのマスバランス計算を行い、本方法が温暖化ガスの収支の定量化に有用であることを示した。本論文は世界的に注目され、アイソトポマー解析法は、将来広く観測が行われるようになれば有効な指標を与えるポテンシャルの高い評価法であるとの評価を受けて、IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change 2001 ; 1年毎にホームページ上で更新され、5年おきに刊行される「気候変化に関する政府間パネル」) に引用された。

1) Yoshida N, Toyoda S, “Constraining the atmospheric N₂O budget from intramolecular site preference in N₂O isotopomers”, Nature 405(6784), pp 330-334 May 18 2000

本解析法は、日本発の新たな環境物質解析法として国際的にも注目された。1999年秋に国際原子力機関 (IAEA) で開催された「質量分析とレーザー分光法による計測と標準物質に関する有識者会議」において、吉田教授は日本代表として招待され、モニタリングの標準物質についての提言を行い、答申とりまとめに貢献した。

2001年4月にウィーンでIAEAが主催した第3回同位体技術利用環境変化研究国際会議において、吉田教授は「アイソトポマー・セッション」の創設を提案してその議長を務め、会議全体はUNESCO IEAとともにJSTが共催した。この会議をプレコンファレンスと位置付けて、2001年7月には、吉田教授が主導して、1st International Symposium on Isotopomers (第1回国際アイソトポマー会議) がJSTの主催、IAEAおよびヨーロッパ連合 (European Commission) 共催で開催された。その後、同国際会議は、2003年にイタリアで第2回、2006年に米国で第3回、2008年に日本科学未来館で第4回が開催された。このシンポジウムには14カ国、120人程度が参加し、活動は発展している。第5回はオランダ・デンマークとの共催での実施が決定している。

このように、アイソトポマーの計測により環境物質の履歴を明らかにする計測・解析法は、

我が国発の新しい科学技術の流れを作ったとすることができる。

尚、吉田研究室では、自然に存在する水素 (H)、炭素 (C)、窒素 (N)、酸素 (O)、硫黄 (S) の安定同位体について、ナノモル (nmol) からサブ・ナノモル (sub-nmol) の分子に存在する 10^{-4} ~ 10^{-2} の重安定同位体、およびその組み合わせで存在する 10^{-2} ~ 10 ピコモル (pmol) のアイソトポマーを、 10^{-5} ~ 10^{-6} の精度で計測・解析することができる。以下の4つのアイソトポマー計測により、地球上のすべての安定同位体の測定が可能であるが、この4つの手法すべてを実施できるのは、世界にただひとつ、吉田研究室のみである。

- ① 多元素同位体解析 (Multi isotope analysis)
- ② 分子内同位体分布 (Intramolecular site preference)
- ③ 非質量依存同位体分析 (Non-mass-dependent Fractionation)
- ④ 複数同位体置換分子種 (Multi isotope substituted species)

3. 6. 3 成果の応用に向けての発展と社会的・経済的な効果・効用に繋がる取り組み

- ・ 新たな質量分析法(フラグメンテーション法と高分解能法)とレーザー分光法による“アイソトポマー計測”は、環境、食品、診断応用に幅広い用途が期待される。
- ・ 地球温暖化ガスのアイソトポマー計測により、自然起源の生成・消滅メカニズムが解明できれば、温暖化の抑制に大きな貢献ができる。
- ・ 欧州では、すでにワインの成分を NMR (核磁気共鳴) で分析して、真贋分析を実施することが義務付けられているが、アイソトポマー計測の導入により、詳しい状況を分析することができる。このような食品の真贋分析、食品の機能の向上などに活用することが期待される。
- ・ 安定同位体を用いた低負荷の疾病診断などにも有効と考えられている。
- ・ 現時点では企業との共同はあまり活発でないが、今後、多岐にわたる企業・機関が、積極的に実用化研究(商用機開発)を進めることが見込まれる。

3. 6. 4 参加研究者の活動状況

(1) 研究代表者

平成8年、CREST事業に採択された時点では、吉田教授は名古屋大学大気水圏科学研究所の助教授で、研究室は助手一名のみ、実質的には、吉田教授ひとりで活動を開始した。「アイソトポマー計測」は、吉田教授が大学院時代から取り組みたいと願っていたテーマであった。

東京工業大学大学院改組の際に招聘されて、平成10年4月に移籍し、吉田教授、ポスドク2名、秘書1名で、研究をスタートした。

プロジェクト終了時点では、東京工業大学大学院総合理工学研究科教授であったが、現在では加えて、同大学フロンティア創造共同研究センター教授の任にある。

(2) グループリーダー

- ・ 小泉英明氏は、プロジェクト終了時には(株)日立製作所基礎研究所所長であり、現在は(株)日立製作所中央研究所フェローである。現在も、科学技術振興機構社会技術研究開発センター事業に研究総括として参画するなど、民間企業に所属しながら、公的研究機関との積極的な連携を図っている。
- ・ レーザー分光法開発グループの上原喜代治教授は、終了時と同じ慶應義塾大学で、名誉教授の任にある。
- ・ 環境適用グループの和田英太郎教授は、終了時は京大大学生態研究センター教授だったが、現職は独立行政法人海洋研究開発機構地球環境フロンティア研究センター・生態系予測変動研究プログラムディレクターである。“アイソトポマー解析”の評価法を地球温暖化ガスに適用することで、自然起源の生成・消滅メカニズムの同定・定量的解析が可能となり、温暖化現象を解明することができる。CREST 事業の成果を活かし、生態系の解明、変動の予測の研究も展開しうることが窺える。
- ・ 解析法開発グループのグループリーダーは研究代表者の吉田教授で前述のとおりである。

(3) CREST 研究員

- ・ 環境適用グループに 3 名の CREST 研究員が所属していた。終了時は 3 名とも東京工業大学大学院総合研究理工学研究科に所属していた。吉田教授と同じ研究科であり、京都大学の和田教授をリーダーとしながらも、緊密な連携をとっていたことが窺える。
- ・ 現在、吉田研究室メンバーは 31 名（教員 8 名、スタッフ 2 名、学生 21 名）で、在籍者は 6 カ国から来ている。次年度はさらに米国、スイス ETH（チューリッヒ工科大学）から研究者を受け入れる予定。
- ・ CREST/SORST 事業から輩出された主な人材の内訳は、教授 1 名、助教授 3 名、講師 2 名（うち海外 1 名）、助教 3 名、技術員 1 名（海外）、研究員 3 名、ポスドク 3 名である。

3. 7 研究課題「質の利用を中心にすえた新しい都市水代謝システムの構築」(研究代表者：渡辺義公)

3. 7. 1 研究の継続・発展

3. 7. 1. 1 プロジェクト期間中の研究の展開

本 CREST 研究は、総需要中の大部分を占める非飲用系の用水には、高度な下水処理と処理水貯留によって都市近傍に創出した水源を用い、飲料用途の水については河川上流部や地下水などの清澄な水源を用いて精密な浄水処理をして供給する新しい都市水代謝システムの構築を構想したものであった。CREST の 5 年間では、このような構想の実現に必要な要素技術の確立に重点をおいて、研究開発が進められた。

主な要素技術開発の成果は次の通りである。

① 分離膜を用いた精密浄水システム

膜分離による精密固液分離が次世代の精密浄水プロセスとして実用されるための基礎として、膜ファウリングの制御と有機・無機性溶解成分処理に関する研究を行った。

② 凝集・高速固液分離・生物酸化・膜分離を組み合わせたハイブリッド下水システム

再利用水源の創出と下水からのリン回収を考慮して、多用されているアルミニウム系に代わる新しい鉄系の凝集剤(Poly-Silicato-Iron, PSI)を用いた凝集沈殿と膜分離活性汚泥法を組み合わせたハイブリッド下水処理システムを構想し、パイロットプラントにより実証を行なった。

③ ハイブリッド下水処理のための生物膜の機能と構造の解析

分子生物学的手法の適用により、生物膜内に存在する微生物群の生態学的構造とその機能の関係を明らかにした。また、 NH_4^+ 、 NO_2^- 、 NO_3^- 、 S_2^- 、 O_2 、pH を測定する微小電極を開発し、生物膜内 *in situ* での微生物活性を高い空間分解能で解析することを可能とした。これらの新規手法を用いて都市下水生物膜内の炭素・窒素・硫黄の循環経路と下水中の有機物と窒素の除去過程の関係を明らかにした。これらの研究成果により、これまでブラックボックスとして取り扱われてきた生物膜の機能を強化してハイブリッド下水処理に組み込む新たな生物膜処理プロセスの開発が可能となった。

④ 下水処理汚泥中リンの農地還元のための植物根分泌酵素と有機酸の作用の研究

将来のリン資源の枯渇に対応するために、下水に含まれるリンを回収して農地に還元し食料生産にリサイクル利用すべく、植物根分泌有機酸と酸性ファスファターゼ(APase)による難溶解性リンの可溶化機能に関して、遺伝子解析、機能評価の研究を行なった。

⑤ 溶解性有機・無機有害物質の除去を目的とした水処理用新素材の開発

膜ろ過でも除去できない溶解性の有機・無機有害物質の除去を目的とした新しい吸着剤ジルコニウムメゾ構造体、シリカ系メゾ多孔体を開発し、また、低水温時において著しく活性が低下するマンガン酸化細菌の作用を補うためのマンガン空気酸化触媒を開発して、水処理における有効性を検証した。

⑥ 水環境中の微量の各種農薬の一斉分析を目的とした高感度水質計測システムの開発

水環境に微量に存在する各種農薬を高感度で一斉に分析する技術の開発、及び、発ガン性消毒副生成物やカルキ臭の生成を抑えるために水道水の残留塩素濃度を高感度でモニタリングできる超小型の測定システムの開発を行った。

3. 7. 1. 2 プロジェクト終了後の研究の発展

(1) 文部科学省 21 世紀 COE プログラム「流域圏の持続可能な水・廃棄物代謝システム」

北海道大学が、平成 15 年度の文部科学省「21 世紀 COE プログラム」に指定され、渡辺教授は拠点リーダーとして、対象とする範囲をすべての「流域圏」に拡大し、CREST の研究成果を発展させた。

同プログラムでは、北海道大学 工学研究科都市環境工学専攻の渡辺義公教授外 19 名を事業推進担当者として、将来の世界的な水不足を回避し、持続可能な発展に貢献するために、伝統的な 3 つの学問領域（環境工学・土木工学・資源工学）と、先端的学問分野（バイオテクノロジー・ナノテクノロジー）を融合して、“流域圏の持続可能な水・廃棄物代謝システム”構築のための、新たな“環境・社会工学 (Socio-Environmental Engineering)”の学問領域の確立を目指した。ドイツ・カールスルーエ研究所や米国・アリゾナ州立大学、オランダ・デルフト工科大学など、海外の研究機関とも交流し、成果を上げた。

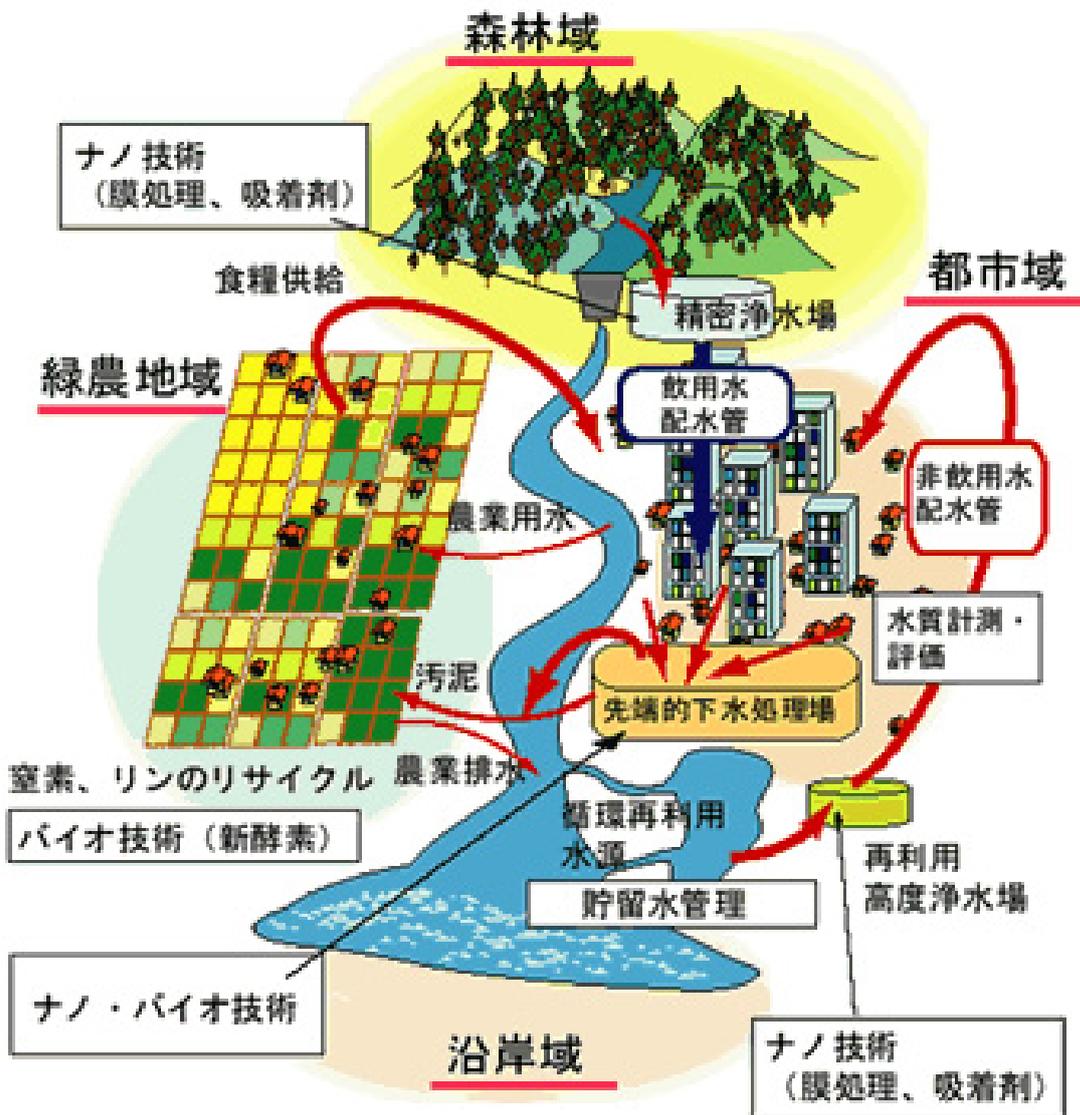


図 3.7.1 北海道大学 21 世紀 COE プログラムにおける流域圏の持続可能な水代謝システム

(2) 北海道大学「環境ナノ・バイオ技術国際研究センター」創設

2008 年 4 月、北海道大学では、COE プログラム終了（平成 19 年度）にあたりこれまでの成果を引き継いで、グローバル COE を意識した学内共同研究拠点として「環境ナノ・バイオ技術国際研究センター」が設置され、渡辺教授は初代センター長に就任した。

同センターは、「環境ナノ・バイオ技術」に関する研究・教育の全学的展開、実験研究に関する学内インフラ整備、そこから生まれる研究・教育成果の国際的発信を行い、さらなる国際的な取り組みと世界へ向けた研究・教育成果の発信、それを可能にするより豊かな学内外の共同研究体制の確立、などを目指している。

(3) リン回収・再利用システム提案

このような研究開発を経て、現在、水循環システムとして、特にリンの回収・再利用に関して、次のようなシステムが提案されている。

- ①下水を凝集沈殿処理、②リン含有凝集汚泥分離、③膜分離嫌気性消化槽処理、④リン含有ろ過水取り出し、⑤リン吸着槽（ジルコニア・メゾ構造体による吸着・脱着）でのろ過、⑥高純度・高濃度リン溶液抽出、⑦肥料としての利用。

3. 7. 2 科学・技術の進歩に貢献する成果

構造的な渇水・水質汚濁からの脱却を果たすべく、用途に応じた水質の水を必要な量だけ都市に供給し、水文サイクルのフラックスの不足分を自然との生態学的調和と水再利用を考えた新しい都市水代謝システムの構築を CREST 研究は目指した。特に、このシステムを、従来の考え方の大規模集中型のシステムとしてではなく、個別の都市地域毎の分散型として構築し、飲用水系と非飲用水系などそれぞれの用途に適切な質の水を循環させるなど、水循環の基本的な考え方を根本から覆す新しいコンセプトからなっている。下水処理水を河川や海域に捨てるための「不純物除去」の考え方から脱却し、水資源、および下水に含まれる資源（リンなど）の「回収・再利用」に展開する新しい概念の確立を目指した。（“From Removal to Recovery and Reuse”）

このようなシステム構築とそれに必要な要素技術の開発を目指して、渡辺教授のリーダーシップの下、伝統的な 3 つの学問領域（環境工学・土木工学・資源工学）と、先端的学問分野（バイオテクノロジー・ナノテクノロジー）を融合して、「流域圏の持続可能な水・廃棄物代謝システム」構築のための「環境・社会工学 (Socio-Environmental Engineering)」という新しい学問領域が開拓された。

このような新領域・潮流の創出を具体的に示す事柄として、下記のような事実を挙げる事が出来る。

渡辺教授は、膜分離技術を核とした先端的水処理システムに関する「International Membrane Technology Workshop」を主導し、世界トップクラスの研究者を招聘した国際会議が 6 回開催された。

さらに 2004 年以降、渡辺教授は、IWA（国際水協会）主催の会議で Keynote Speaker を 5 回務めている。

研究グループに属する岡部聡氏は、2007 年 7 月、“The U.S. Environmental Protection Agency (EPA) Microbial Source Tracking” の Invited Speaker として招聘された。同氏は、平成 19 年度日本学術振興会賞を受賞した。

同じく、田中信寿・松藤俊彦両氏は、埋立廃棄物層内の各物質の挙動解明、焼却灰の溶出特性・安定化処理の検討結果に基づき、適正な廃棄物の処理システムを提案し、土木学

会論文賞を受賞した。

第3期科学技術基本計画（平成18年度～）の重点分野のひとつ「環境」では、渡辺教授の意見が取り入れられ、水資源確保の重要性に関し次のような提言がなされている。

政策目標：健全な水環境と持続可能な水利用を実現する

研究領域：水・物質循環と流域圏研究領域

研究プログラム：対策・管理のための適正技術

「国際的に普及可能で適正な先端水処理技術」

成果目標：膜や微生物群を利用した水処理技術

3. 7. 3 成果の応用に向けての発展と社会的・経済的な効果・効用に繋がる取り組み

3. 7. 3. 1 研究成果のプロジェクト終了後の応用に向けての発展

CREST事業の支援により、実証試験のためのパイロットプラントを建設したが、十分な安全性の確保ができず、期間中にはパイロットプラントは稼働できなかった。

その後、“要素技術”が“システム”として組み上がり、安全な稼働が保証できる状況になり、現在ではパイロットプラントで実証試験を行い、実際のシステム導入に非常に向け、活用されている。

“小規模分散型の水処理システム”に対する関心は高く、具体的に複数の地方自治体から、すでに引き合いがあり、導入が検討されている。

3. 7. 3. 2 社会的・経済的な効果・効用に繋がる取り組み

本研究において適用の進められたセラミックス系の分離膜 Monolith Ceramic Membrane、や、第3世代の凝集剤（PSI）は、既に市販されるに至っている。

但し、本システム自体は、複数の自治体から引き合いがあり、導入が検討されているものの、従来のシステムと根本的に基本概念の異なるシステムであり、本格的なシステム導入には、未だ時間がかかるとセラミックス系の分離膜 Monolith Ceramic Membrane は、や、第3世代の凝集剤（PSI）は、既に市販されるに至っている。

複数の自治体から引き合いがあり、導入が検討されている。システム導入には、新たな機器・設備などが必要で、導入の検討が進めば、企業も関連部材の開発・供給に真剣に取り組むようになると考えられる。

本研究の目指す高機能分離膜を適用した水循環システムの構築は、将来予測される水資源問題に対して、安定で安全な水資源の確保を可能とすると期待される。

下水を下水処理場まで運搬して一括して処理し、大規模なエネルギー消費を伴う従来のシステムと比較して、本研究による小規模分散型の水処理システムの実現は、環境負荷を大幅に低減させると期待される。また、水循環だけではなく、従来は廃棄物として分離・処分していた下水中のリンなどの有用成分を取り出し、資源として回収することは、資源

保全システムとしても重要である。

(経済的な波及効果)

本研究による小規模分散型の水処理システムは、従来の下水道などの大きなインフラ建設を不要とし、公共事業に大きな経済的効果を及ぼす。

特に本システムは、我が国よりも水資源問題がより深刻な諸外国において、より大きな効用を持つと考えられる。我が国の分離膜技術は世界のトップレベルにあり、日本企業が分離膜の世界市場の約 7 割を占めている。本システムが次世代において世界で広く取り入れられるシステムとなれば、我が国にとって国際競争力の強い大きな市場になると期待される。

3. 7. 4 参加研究者の活動状況

(1) 研究代表者・グループリーダー

渡辺教授は、CREST 研究後も北海道大学教授として研究を指導、2008 年 4 月からは、北海道大学内に新設された「環境ナノ・バイオ技術国際研究センター」の初代センター長を務めている。また、CREST での研究を含めたこれまでの水処理工学における研究に対して、2008 年 9 月に International Water Association(IWA)の IWA Award for Outstanding Contribution to Water Management and Science (Science 部門)を受賞し、この賞が 1988 年に創設以来、日本を含めたアジアからの最初の受賞者となった。

但野教授は、終了時に所属していた東京農業大学応用生物化学で、嘱託教授を務め、北海道大学名誉教授でもある。渡辺教授との連携による CREST 研究の成果が評価されたことが窺える。さらに社団法人日本有機資源協会技術委員会委員長を務め、CREST でグループリーダーを務めた“リンのリサイクルのための機能性酵素の利用”について、研究を進展させている。

“超伝導磁石を用いた高速凝集磁気分離システムの開発”のグループリーダーだった高木武夫氏は、終了時には(株)日立製作所機械研究所主管研究員であったが、現在は東北公益文科大学公益学部公益科教授である。

(2) CREST 研究員

渡辺グループの CREST 研究員笠原伸介氏は事業期間中に大阪工業大学助手になり、現在準教授である。

但野グループの CREST 研究員和崎氏は、終了時には北海道大学大学院農学研究所所属で、現在は、同研究科作物栄養学研究室の博士研究員である。CREST でのリンのリサイクルに関する成果を進展させている。現在、静岡大学農学部準教授である。

岩本グループの CREST 研究員有谷氏は、終了時は北海道大学触媒科学センター所属だったが、現在は埼玉工業大学工学部の准教授である。生命環境化学科・環境浄化研究室に加

え、応用化学科・応用無機化学研究室に所属しており、無機材料・生体材料を環境浄化に活かす研究を展開している。

尚、CREST 研究後の 21 世紀 COE 研究拠点では、英語特別コースを設置し、環境・社会工学における世界のトップレベルの人材育成が行われた。

3. 8 研究課題「都市交通の環境負荷制御システムの開発」(研究代表者：岩田規久男) サブテーマ「電気自動車の開発」(グループリーダー：清水浩)

[グループリーダー]

清水 浩 慶応義塾大学環境情報学部教授 (参加当時)
慶応義塾大学環境情報学部教授 (終了時)
慶応義塾大学環境情報学部教授兼政策・メディア研究科委員 (現職)

3. 8. 1 研究の発展

3. 8. 1. 1 研究プロジェクト期間中の研究推進

岩田規久男・学習院大学経済学部教授を研究代表者とするCREST研究課題「都市交通の環境負荷制御システムの開発」では、次の3つのグループが設けられ、研究が推進された。

- ①経済グループ
- ②首都圏・環境グループ
- ③電気自動車開発グループ

これは、当初は社会科学系及び工学系の別個の研究として提案されたところを、採択側からの要請で1つのチームに融合して研究が進められたという経緯による。最適な都市交通サービスの水準を達成するためには、土地利用を制御することによって都市交通に伴う混雑と環境汚染を減少させるような都市を作るとともに、都市交通の利用者(混雑と環境汚染の発生原因者)に社会的費用を負担させることが必要であり、これによって、電気自動車などの低公害車が費用面で有利になるためその開発と利用が促進される、との考え方に立って、社会科学的手法と環境負荷軽減に役立つ工学的技術とを融合することによって、都市交通に伴う混雑や環境負荷の軽減を実現するための、環境負荷制御システム構築を目指し、研究が開始された。

①経済グループでは、炭素税等の環境税や混雑料金制度の導入による環境汚染物質排出量削減の評価が行われた。②首都圏・環境グループでは、道路混雑を緩和して排出を抑制する目的で、首都圏に流入する車に対するロードプライシング(課金)を行う効果を分析し、便益と費用を明らかにした。③電気自動車開発グループでは、電気自動車にふさわしい車体構造を創案し、高性能化が可能な要素技術を車体構造に組み込んで、高性能かつ新しい特長を付加した電気自動車を開発した。

3グループによる研究は、それぞれに国内では類例の少ない研究であり、成果を挙げた。しかしながら、当初掲げた都市交通の環境負荷制御システムの構築という全体としての総合的な成果には至らなかったと言わざるを得ない。

本研究チームでは、研究プロジェクト終了後、グループ同士が共同しての研究の継続・発展は見られなかった。そのため、ここでは、3グループの内、特にその後の研究の展開の顕著な③電気自動車開発グループに絞って、研究プロジェクトから生み出された科学技

術的、社会的・経済的な効果・効用及び波及効果について、追跡調査を行った。

3. 8. 1. 2 サブテーマ「電気自動車の開発」の研究の発展

電気自動車開発グループのリーダーである慶應義塾大学・清水教授は、1976年に国立公害研究所（現・公立環境研究所）においてレーザーレーダーの研究者として研究歴をスタートさせたが、電気自動車の重要性に気付いて研究分野を大きく転換させ、1997年からは慶應義塾大学にて研究を発展させ、30年に亘って電気自動車一筋に研究を進めている。本CREST研究において、電気自動車 KAZ（Keio Advanced Zero-Emission Vehicle）を開発したが、これは、清水教授の一連の電気自動車開発の中では、7台目となる G-Car と位置づけられる。本CREST研究に至るまでに、清水教授は下記の電気自動車試作を行ってきた。

① A-Car（1983年）

スバルレオーネの2つの前輪に既成の電動モータを取り付け。

② B-Car（1983年）

電動オートバイ。CFRPをボディに使用、前後2輪にモーター組み込み、鉛蓄電池使用。

③ C-Car（NAV）

新日本製鐵、東京 R&D と共同開発した2ドア4輪乗用車。インホイールモーター（車輪の中にモーター組み込み）採用。希土類磁石をモーターに使用。ボディはCFRP。最高速度120キロ、1充電走行距離250キロ。

④ D-Car（IZA）

東電との共同開発。インホイールモーター採用。最高速度176キロ、1充電走行距離270キロ（時速100キロ定速走行）。

⑤ E-Car

12トンハイブリッド高所作業車。

⑥ F-Car（Luciole）

振興調整費により開発。床下電池レイアウト、後輪内インホイールモーター式超小型車。太陽電池搭載。最高速度150キロ。

⑦ G-Car（KAZ）（1997年～2002年）

CREST研究にて開発。8輪駆動大型乗用車。リチウムイオン電池搭載。最高速度311キロ、時速100キロまでの加速時間7秒。

本CREST終了後、清水教授は更に、いわば大学発環境ベンチャービジネスを立ち上げ、複数企業とのコンソーシアムにより、8台目の電気自動車 Elica（Electric Li-ion Battery Car）を開発した。これは、8輪駆動4人乗りセダンにて、世界最高の最高速度370キロ、1充電走行距離300キロを達成した。



35

図 3.8.1 CREST 研究後の電気自動車開発の成果 Eliica

3. 8. 2 研究成果の科学技術の進歩への貢献

(1) 新しい概念の構築

地球規模の二酸化炭素排出における自動車の寄与の大きさは今や広く認識されているが、清水教授はその重要性に早くから気付いた一人であった。究極の再生可能エネルギーは太陽エネルギーであり、人類にとっての次世代エネルギーシステムは太陽光発電を中心としたシステムとなるべきであり、そのシステムの中では自動車は電気自動車でなければならない、というのが清水教授の基本的考えである。電気自動車という概念は古くからあり。エネルギー効率に関しても理論的には電気自動車の方が内燃機関エンジンの自動車よりも優れていることも知られている。しかしながら現実には、電気自動車は性能が低く、極く限られた用途でしか使われていない。その理由は、現在までの電気自動車の全ては、内燃機関搭載の自動車の基本構造の中で単に原動機を置き換えたものに過ぎないからである。電気自動車のあるべき姿を追求して、内燃機関自動車の暗黙の常識を離れて、全く新しい電気自動車の設計と開発が、清水教授により追求された。真に電気自動車が市民権を得るためには、従来の内燃機関自動車を駆逐するレベルまで広く使われなければならない。そのような観点から、電気自動車の目指すところとしては、単にエネルギー効率が良いだけでは不十分であり、乗り心地、加速感、広さという3つの価値においても、従来の自動車を凌ぐものでなければならない、というのが清水教授の考えである。

(2) 電気自動車の新しい設計思想の構築

従来の内燃機関搭載自動車の基本構造を離れた新しい設計により、図 3.8.2 のような基本構造の電気自動車が開発された。

- ① インホイールモーター
- ② コンポーネントビルトインフレーム
- ③ タンデムホイールサスペンション

インホイールモーター

モーターをすべての車輪に挿入

- ・高効率
- ・軽量化
- ・有効空間拡大



コンポーネントビルトイン式フレーム

電池、インバーター、コントローラーを床下に収納

- ・軽量化
- ・低重心化
- ・有効空間拡大

タンデムホイールサスペンション

2つの車輪のバネ系が油圧パイプで結合

- ・乗り心地向上
- ・コーナリング速度向上
- ・有効空間拡大



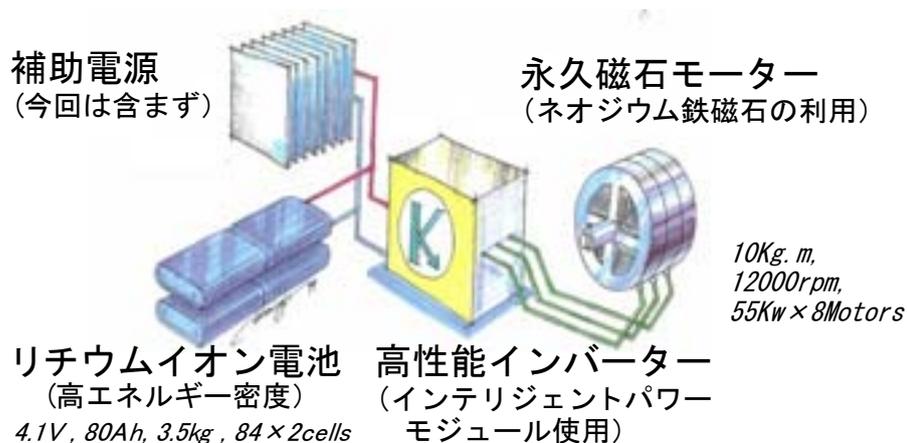
集積台車という新しい概念の車体

図 3.8.2 新しい設計の電気自動車の開発

(3) 先端要素技術のシステム化

その間に、電気自動車の性能を大きく向上させる重要な先端要素技術の開発が日本を中心に進展し、これらの技術のシステム化と電気自動車への適用が進められた(図 3.8.3)。

- ① 高エネルギー密度のリチウムイオン電池
- ② ネオジウム鉄磁石を利用した永久磁石モーター
- ③ インテリジェントパワーモジュールを使用した高性能インバーター



省エネ、高性能化、長寿命化

日本でしか開発できない先端要素技術

図 3.8.3 電気自動車の性能を向上させる先端要素技術の開発

3. 8. 3 成果の応用に向けての発展と社会的・経済的な効果・効用に繋がる取り組み
清水教授の研究は、CREST 研究としては例外的と言うべく、応用・製品化への展開を明確に据えた開発研究である。2. 8. 1. 2に示したように、1つの方針に従って、着実に電気自動車としての応用技術の積み上げを行っている。3つの重要な基本技術であるインホイールモーター、コンポーネントビルトインフレーム、タンデムホイールサスペンション、また、自動車としての性能を上げるために重要な先端的要素技術であるリチウムイオン電池、ネオジウム鉄磁石モーター、高性能インバーターをそれぞれの試作自動車において逐次取り入れ、実証している。その結果、エネルギー効率が高いだけでなく、乗り心地、加速感、広さなどにおいても、内燃機関自動車を上回るセダン型電気自動車の開発に成功した。

自動車という製品は、製品の量産効果、エネルギー源補給や保守点検のインフラ、その他の観点から、商品として成り立つためには数 10 万台以上の規模で市場を占める必要のある製品で、他の多くの新製品のように少量ずつ徐々に市場を得ていく性格のものではない。本プロジェクトにより開発された電気自動車は、現在の内燃機関自動車とは、技術の体系の視点からも、製品戦略の観点からも、容易には相容れないものと言わざるをえず、清水教授自らが述べているように、いわゆる「死の谷」は広く深い。この電気自動車が本格的に市場に受け入れられる時期が来るとすれば、それは恐らく、化石燃料資源の枯渇や地球温暖化が誰の目にも明らかな深刻さを加え、従来の内燃機関自動車の問題点と限界が明確となる将来であろう。逆に、人類にとって危機的なそのような将来が来るとすれば、我々

はそれに対する問題解決の手段を備えていなければならないとも言うことができる。

一方、自動車産業の裾野は広く、自動車技術の波及するところは大きい。本プロジェクトの電気自動車の実用化の大きな鍵はリチウムイオン電池のコストにあるが、電池メーカーにとっては、自動車用という非常に大きな市場が開けることは、経済性に優れたリチウムイオン電池を開発する大きなインセンティブとなる。その意味から、本研究成果の波及効果として、自動車用に限らず、広く人類の未来のための再生可能エネルギーの中核となる電池技術の開発の加速に若干なりとも貢献していると考えられよう。

3. 8. 4 参加研究者の活動状況

本 CREST における電気自動車開発グループのメンバーからは、多くの人材が育っている。例示すれば、当時の東京大学・堀洋一助教授は現在教授に、同じく岩手大学・笠場孝一助手は準教授に、慶應義塾大学・大前学専任講師は準教授に、大学院生であった松ヶ浦史郎氏は東京大学助手を経て海洋研究開発機構研究員に、また、当時の大学院生が、現在、自動車会社で電気自動車開発などに活躍している。

3. 9 研究課題「高温空気燃焼技術を用いた廃棄物・石炭高効率発電」（研究代表者：吉川邦夫）

3. 9. 1 研究の継続・発展

3. 9. 1. 1 プロジェクト期間中の研究の展開

本 CREST 研究では、従来大型設備でしか実現できなかった廃棄物発電と熱供給を小規模な設備でも可能にする“小型廃棄物ガス化発電”の研究開発を行った。廃棄物は未利用資源であり、単なる廃棄物処理ではなく高付加価値の製品に転換すべきであるという考えに基づき、低質な固体燃料に対しても燃焼に伴う環境負荷を最低限に抑えながら高効率の発電が行なえる安価、コンパクトかつ信頼性の高い画期的な発電システム(MEET システム)の開発を目指すものであった。従来、日本では廃棄物の焼却処理が主流であったが、焼却処理は価値ある物を何も生み出さず、自治体を含む排出者は高い処理費の負担が求められる。これに対して本研究は、廃棄物から妥当なコストで利用しやすいエネルギー資源を得て、廃棄物処理費に対して相対的に生成物の販売収入を大きくし、民間の収益事業として廃棄物が適切に有効利用されることを目指すものである。

1995 年当時、吉川研究代表者は MHD (Magneto-Hydro-Dynamics) 発電の研究開発に携わっていたが、同研究開発は 90 年代においては縮小傾向にあった。その折に MHD 発電の共同研究相手から、当時 NEDO の大型プロジェクトとして研究開発が行われていた「高温空気燃焼技術」という新技術を紹介された。これは、工業炉の燃焼排ガスが持つ熱エネルギーを蓄熱体を經由して燃焼空気に伝達することによって、約 1000℃の高温空気を生成し、高温空気による低酸素燃焼場を形成して、省エネルギー、低 NOx、機器のダウンサイジングの同時達成を目指すものであった。

(1) MEET システムの開発

「高温空気燃焼技術」の固体燃料への応用は、燃焼ガス中の灰分による蓄熱体の閉塞の問題から、技術開発のハードルが高く、吉川研究代表者は、約 1 年の試行錯誤を経て、1996 年秋に「高温空気で固体燃料をガス化し、精製した後にそのガスの一部を燃焼させて高温空気を生成する」という着想を得た。このシステムは MEET (Multi-staged Enthalpy Extraction Technology：多段階熱抽出技術)システムと命名された。提案されたシステムでは、ガス化炉内で固体燃料を高温空気あるいは高温水蒸気でガス化して高温の粗ガスを生成し、灰分はガス化炉内で高温焼成灰あるいは溶融灰として炉外に取り出し、粗ガスからは、熱回収を行った後に、ガス精製によって環境汚染物質（塩素、硫黄、煤塵、重金属など）を除去して、発熱量が 1000～1500kcal/Nm³程度の低発熱量のクリーンな燃料ガス（低カロリーガス）を得る。得られた燃料ガスの一部を燃焼させて高温熱交換器にてガス化用の高温空気/水蒸気を生成し、残りの燃料ガスを高温空気燃焼低 NOx ボイラでの蒸気発生

やエンジン発電機での発電に供する。

1997年に本CREST研究領域にて吉川研究代表者の提案が採択され、本格的な研究がスタートした。研究開発計画としては、プラント機器開発のスケールアップの一般的な進め方に従い、先ず、燃料処理容量200kg/日程度のMEET-I装置での基礎実験を行い、その結果を踏まえて、燃料処理容量4トン/日規模のMEET-II装置を建設し、5年かけて技術実証を行い、その後、実用規模のMEET-III装置で実用化を図る計画であった。CREST研究では、このうちMEET-IIまで進むことを計画した。MEET装置の試作・運転試験と同時に、それを構成する要素機器であるペブル床ガス化炉、高温空気加熱器、高温空気燃焼ボイラ、混燃ディーゼルエンジン発電機の研究開発が進められた。微粉炭および微粉碎した木質ペレットを燃料とする実験を実施して、各要素機器の性能実証および、システムとしての運転実証を行い、その結果、灰溶解を行いながら、目標とする1000kcal/Nm³以上の発熱量を持つクリーンなガスの生成に成功した。得られた各機器の性能からMEET-II規模のシステム全体の熱効率を評価した結果、ペブル床ガス化炉のチャーリサイクルを実施すれば、75%という高い熱効率（電力16%、回収熱59%）を持つコージェネレーションシステムが実現できることを示した。

（2）STAR-MEET(Steam/Air Reforming-MEET)システムの開発

上記MEET-Iシステムの研究開発の過程で、そのコンパクトさが注目を集め、従来にない小型の廃棄物発電システムであるということでNHKや新聞で紹介され、全国から照会が殺到した。これは、従来の大手メーカーによる焼却炉は日量数百トンレベルの大量廃棄物処理を対象としているのに対して、日量数トン～数百キロレベルの少量廃棄物の処理へのニーズがあり、特に、廃棄物の発生源で小規模に発電できるシステムが求められていることを反映したものであった。当時のダイオキシンの社会問題化という世相もこのニーズの高まりに拍車を掛けていた。

このような小型の廃棄物発電システムへのニーズが大きいことを考慮して、吉川代表研究者は、1999年に、当初の計画にはなかったSTAR(Steam/Air Reforming)-MEETシステムを新たに提唱し、開発を進めた。MEETシステムが固体燃料を高温空気により灰溶解一段ガス化する方式であったのに対して、STAR-MEETでは、既存の熱分解ガス化炉をベースとして、生成される熱分解ガス中のタール分を高温水蒸気/空気の混合気で改質するという二段ガス化方式を採用した。2ヶ月間で特許出願を行い、種々の廃棄物を用いた基礎試験によって目処を立てた後、2000年秋には大学内に本格的な実証プラント（処理容量50kg/時）を建設した。このような研究計画の変更や研究予算の執行が可能となるためには、JSTプロジェクトの柔軟さが有効に作用したとすることが出来る。このSTAR-MEETシステム・実証プラントにより、MEETシステムでは利用が困難であった様々な廃棄物を用いて実験を行った結果、廃棄物の性状に応じて、600～1700kcal/Nm³の発熱量を持つクリーンな改質ガスが得られ、混焼ディーゼルエンジンでの軽油との混焼比率を調整することにより、どのような

発熱量のガスであっても、安定した高効率発電が可能であることを実証した。

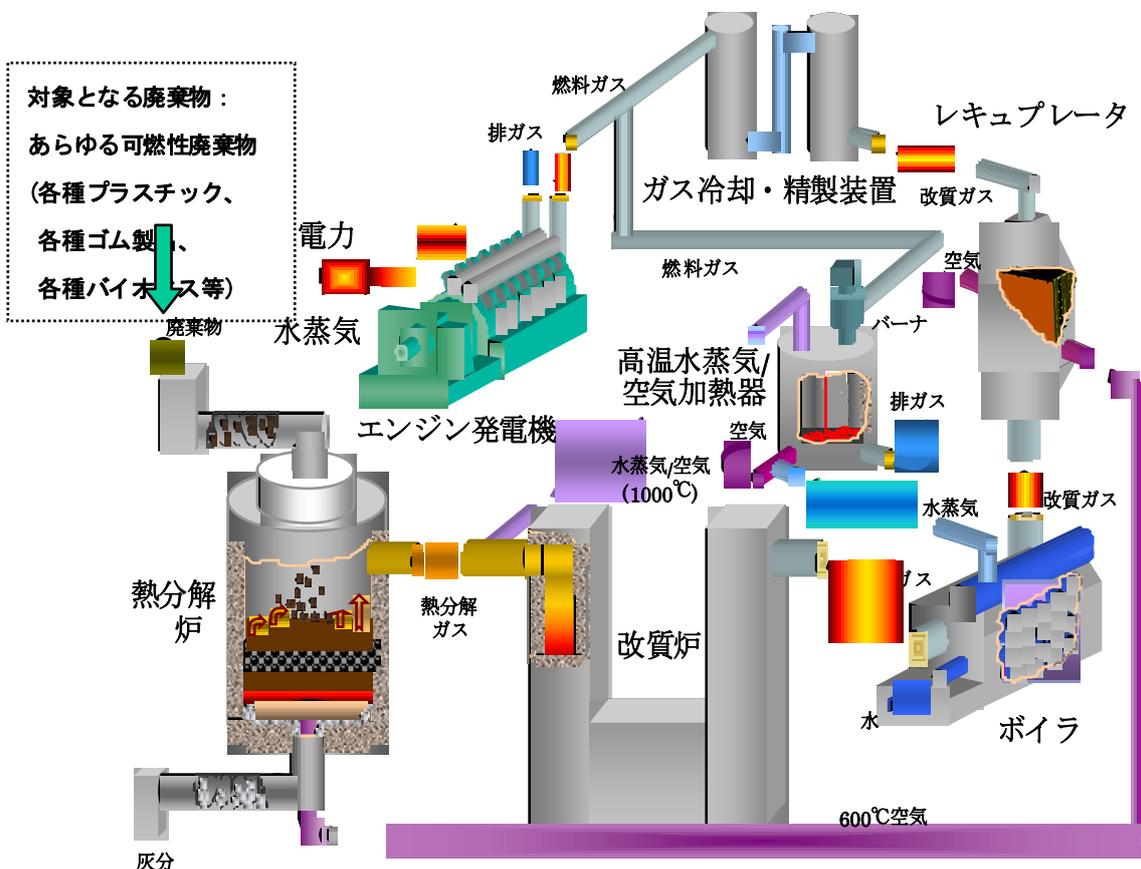


図 3.9.1 廃棄物ガス化発電 STAR-MEET システム

3. 9. 1. 2 プロジェクト終了後の研究の発展

CREST 後の研究の発展として、吉川教授は、東京工業大学フロンティア研究センターで、「廃棄物・バイオマスの革新的エネルギー資源化技術の総合的開発」として、これまでの集大成といえる研究を展開している。CREST 終了時のガス化発電技術に加え、固体燃料製造技術、液体燃料製造技術、水素製造技術等の研究開発に成功している。

① 水素製造技術

1000°C以上の超高温水蒸気でバイオマスを直接ガス化、および廃プラスチックの熱分解ガスを触媒層内で水蒸気改質することにより、50%以上の水素濃度の燃料ガスの製造に成功した。空気を使用しないためコンパクトで高カロリー値のガスが製造でき、天然ガス代替燃料になりうると期待される。

② 固体燃料製造技術

高温・高圧の飽和水蒸気（200℃・20気圧）の作用下で、様々な廃棄物を加水分解することによって微粉炭状の固体燃料に転換する。石炭火力やセメントキルンで石炭と混焼することで、石炭使用量の削減も可能である。廃棄物の分別が不要であり、発展途上国などでの利用に適している。

③ 液体燃料製造技術

触媒による改質で廃プラスチックから高品質油が製造でき、1トン／日程度の小規模設備でも実用化が可能な技術の開発に成功した。

一方、生成油の水洗いが不要なドライ方式のバイオディーゼル燃料製造プロセスを開発し、排水処理が不要であるため、廃食油から世界最高水準のバイオディーゼル燃料が製造でき、その製造コストは20円／リッターと安価となると試算される。

更に、石油系燃料（軽油・重油など）に水をエマルジョン化して10-30%程度加えたエマルジョン燃料を工業用ボイラに適用した結果、乳化剤の使用を不要とし、従来知られていた低NOx、低煤塵といった低環境負荷効果に加えて、省エネルギーをも同時に達成しうることを明らかにした。

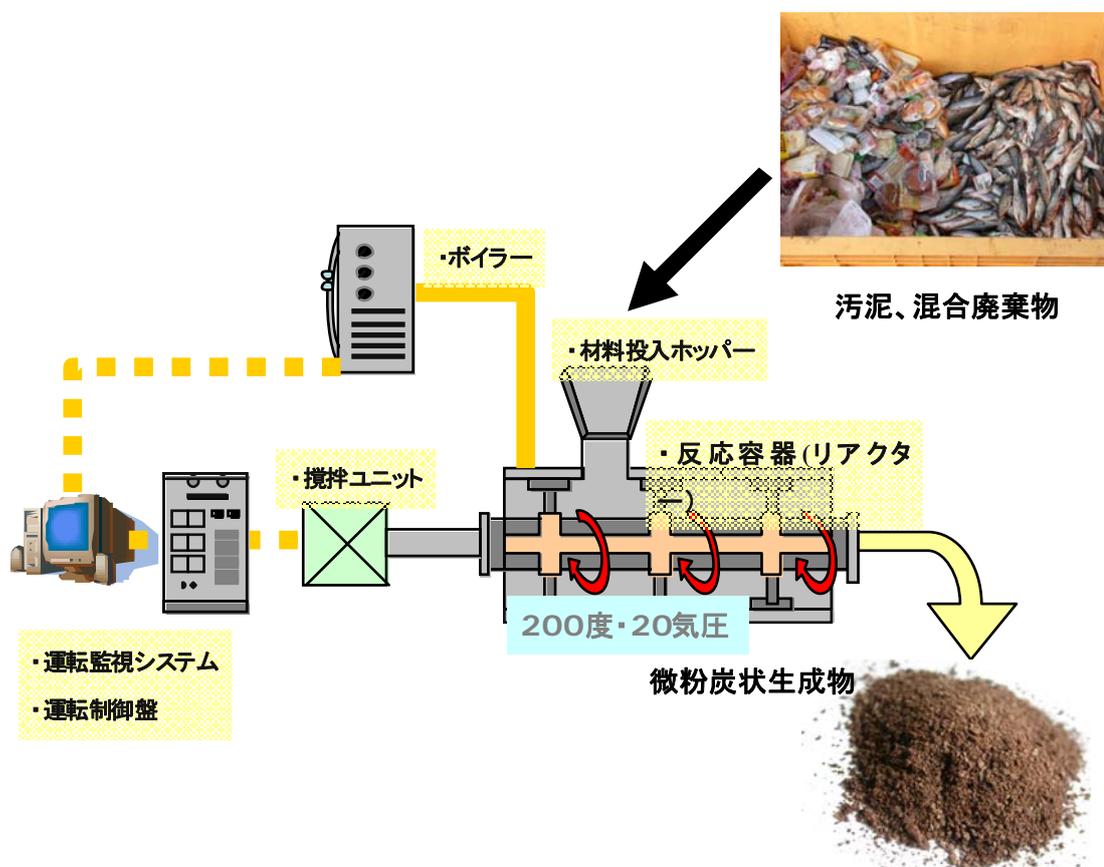


図 3.9.2 固体燃料製造技術

3. 9. 2 科学・技術の進歩に貢献する成果

吉川研究代表者は、本 CREST 研究で、廃棄物・バイオマスなどの環境負荷の高い固体燃料に適用可能な、高効率、低環境負荷かつ低コストの小型ガス化発電システム (MEET: Multi-staged Enthalpy Extraction Technology) の開発を提案し、実証に成功した。セラミック球を充填したペブルベッド型灰溶融式ガス化炉、燃焼ガスで高温に予熱した空気を用いる高温空気燃焼ボイラ、低加圧ガス・軽油混焼ディーゼルエンジンなどは、研究開始当時としては、いずれも新しい技術への挑戦であり、また、固体廃棄物と石炭とを燃料として用いる方式も新規なシステムであった。また、従来の大型集中式の廃棄物処理ではなく、小型分散型の廃棄物処理システムである STAR-MEET (Steam/Air Reforming-MEET) システムの開発も、システム設計思想として重要な挑戦であった。本 CREST 研究において、廃棄物などを「未利用資源」と捉え、それを付加価値の高いエネルギー資源に転換する、将来の循環型・持続型技術システムを目指す重要な新技術への挑戦が行われたとすることができるであろう。この技術は、更に、「廃棄物・バイオマスの革新的エネルギー資源化技術の総合的開発」として、ガス化発電技術に加え、固体燃料製造技術、液体燃料製造技術、水素製造技術の開発に発展している。

3. 9. 3 成果の応用に向けて発展と社会的・経済的効果・効用に繋がる取り組み

本 CREST 研究期間中に、吉川教授は(株)エコミート・ソリューションズ(東京都千代田区)というベンチャーを設立した。2000年7月から人事院は国立大学教官非常勤役員の兼業を認可するようになったが、吉川教授はその8月に認可を受けており、同社は大学発ベンチャーの創世記に属すると言える。同社は、廃棄物ガス化発電(STAR-MEET)システムを中核に、個別企業を対象に、廃棄物に最適な処理システムの構築、導入計画立案・基本設計、詳細設計を手掛けている。同社は、CREST 研究終了後、JST より STAR-MEET 実証プラントの貸与を受けた新興プランテック(株)と共に、STAR-MEET システムの本格的な実用化研究に着手し、乾燥鶏糞を燃料とするガス化発電に適用した。こうした研究成果に基づいて、新興プランテック(株)は複数の企業と共同で、NEDO バイオマスフィールド実証事業(平成16年度~20年度)を受託し、岐阜県の養鶏場内に STAR-MEET 方式ガス化発電実証装置を設置した(図 3.9.2)。同設備による実証運転では、7万羽の鶏舎から排泄される鶏糞を利用して60kWの発電に成功した。この研究開発の成果に対して、新興プランテック(株)は、平成20年度のかながわ新エネルギー賞を受賞している。



糞乾燥装置

(鶏の体温を利用し含水率70% → 15%)



電気利用 → 鶏舎の電力
排熱利用 → 糞乾装置補助熱源

図 3.9.3 STAR-MEET システムによる鶏糞ガス化発電実証設備

3. 9. 4 参加研究者の活動状況

(1) 研究代表者・グループリーダー

本研究課題では、10 のグループのうち、4 グループのリーダーを企業の研究者が務めた。

吉川教授は、参加当時は、東京工業大学大学院総合理工学研究科の助教授だったが、現在は同研究科の教授で、同時にフロンティア研究センターに所属している。

成瀬一郎教授は、終了時は豊橋技術科学大学工学部の助教授だったが、現在は、名古屋大学大学院工学研究科の教授である。義家亮准教授は、終了時は岐阜大学工学部の助手であったが、現在は、名古屋大学大学院工学研究科の准教授である。また、吉川教授の下の博士課程学生であった加藤義孝助教は、現在、大分大学工学部で助教を務めている。小林宏充准教授は、慶應義塾大学法学部の専任講師から准教授になった。

企業からのグループリーダーは、現職を追跡するのが困難である。氣駕尚志氏は、財団法人石炭エネルギーセンター(JCOAL) 技術開発部担当部長を務めているが、あとの3名は、引き続き企業に所属していると考えられる。

現在、吉川研究室には、6 カ国から 14 名の留学生がおり、ほぼ全ての留学生が、博士課程に在籍しているか進学する予定である。その多くが、吉川教授の小型廃棄物処理システムを是非母国に紹介したいということで、文部科学省の国費奨学金を得て来日した学生達である。廃棄物処理が深刻な発展途上国からの学生が多く、強いインセンティブが働いていることが伺える。

3. 10 研究課題「微生物機能強化による水環境修復技術の確立」(研究代表者：前川孝昭)

3. 10. 1 研究の継続・発展

3. 10. 1. 1 プロジェクト期間中の研究の展開

水域の窒素汚染問題において、汚染水域の水環境修復を微生物の持つ機能の強化によって達成する浄化技術を開発した。遺伝子等の組換えを行わず、微生物の持つ機能を最大に引き出す手法の開発を中心課題に設定した。

新規な担体の考案としては、栄養塩を担体に抱括固定化させることによって、微生物へ微量金属や栄養塩を担体表面から除放させ、微生物の増殖を促進させた。メタン発酵では、中温菌から冷温菌の馴養による特性の変化ならびに機能強化を検討し、寒冷地用無加温メタン発酵の実用化の手掛かりを得た。さらに担体に関する発展として、常磁性体を混合させることでリアクターの安定運転のための制御を可能にし、固定床型バイオリアクターの特徴を改善した。積層網状体及び多孔性コンクリートブロックを浄化システムとして、茨城県江戸崎町の全長190 mの生活廃水路に設置し、浄化実験を実施した。窒素源、炭素源については満足すべき結果を得たが、処理が困難とされるリンに関しては、活性酸素を活用した電気化学的処理を開発援用して、ほぼ処理の目標を達成した。また、この担体を河川床に設置し硝化と脱窒を行なわせ、これに植物体(ホテイアオイ)を用いてリンとアンモニア態窒素の吸収を行なうことで、高い除去能力を併用させた。中国雲南省昆明市の富栄養化湖の改善について国際共同実験を行ない、効果的な成果を収めた。また、嫌気性メタン発酵にも応用し、北海道別海町研修牧場において、40 m³のメタン発酵槽で40頭分の乳牛糞尿廃水を処理し、2年間の連続運転を行なった。水中の窒素源を硝化・脱窒により除去し、炭素源をメタン発酵により除去する微生物の機能強化のために、微生物の増殖を助ける栄養塩・微量金属を多孔質セルロースやマグネタイトを含むスラッジ・ビーズなどに担持させて、常時供給し続ける技術を開発した。また、水環境修復に関わる複数の微生物の混合培養による微生物間の相乗・阻害効果の積極的利用、藍藻類と藻類の栄養塩競合による有害藻類の生長阻害の積極的利用、などを研究した。開発された技術は、国内外において、乳牛や豚の糞尿処理用メタン発酵槽、地下水や井戸水の硝酸態窒素除去、河川や湖沼の水浄化、等の実証試験に供され、良好な結果を示した。

3. 10. 1. 2 プロジェクト終了後の研究の発展

(1) 21世紀 COE プログラム「複合生物系応答機構の解析と農学的高度利用」

平成14年度の文部科学省21世紀COEプログラムにて筑波大学を拠点とする「複合生物系応答機構の解析と農学的高度利用」が採択された。前川教授は、この中で拠点リーダーの1人を務め、「複合生物系の応答解析とバイオリメディエーション」のテーマを担当して、本CRESTの研究成果を発展させた。

(2) 都市エリア産学官連携促進事業「霞ヶ浦南岸新興都市エリア」

文部科学省都市エリア産学官連携促進事業の平成14年度の実施地域の1つとして「霞ヶ浦南岸新興都市エリア」が採択された。これは、家庭生ゴミと家畜排泄物を混合したバイオマスを効率的に嫌気発酵させてその過程で発生するメタンガスを燃料とするコジェネレーションを行う技術の開発を目指したプロジェクトで、(財)茨城県科学技術振興財団をとりまとめ機関として、「産」としてはバイオレックス(株)、(株)シントー、全国農業協同組合連合会、(株)フードサイクルシステムズが、「学」としては筑波大学が、「官」(＝国公立研究機関)としては(独)国立環境研究所、(独)農業・生物系特定産業技術研究機構、茨城県公害技術センター、茨城県畜産センターが参加した。このプロジェクトは、前川教授による本CREST研究の成果を展開させたもので、その中核となる生ゴミ・家畜糞尿バイオマスエネルギー化技術として、筑波大学が生ゴミと家畜糞尿の最適混合によるメタン発酵の高効率化・低コスト化技術の研究開発、前川教授の指導の下、(株)シントーがバイオガス燃焼型スターリングエンジン発電システムの開発、バイオレックス(株)が電気化学的水処理法によるメタン発酵残液浄化技術の開発を担当した。本方法によるバイオガスエネルギーの回収・発電のためのモデルプラントが建設され、実証実験が行われた。

本プロジェクトの成果は、更に、平成17年に開設された「霞ヶ浦環境科学センター」に引き継がれ、霞ヶ浦の水質浄化に向けた産学官連携の事業が継続されている。

3. 10. 2 科学・技術の進歩に貢献する成果

微生物による水浄化は古くから行われていた技術であり、また、バイオマスエネルギーという概念は世界的に早くから提唱されていたものである。それに対して、本CREST研究の意義は、家庭生ゴミと家畜排泄物という廃棄物をバイオマスと捉えて、単なる抽象的提言ではなく、発酵という微生物を活用した技術によって、水浄化と共にエネルギー源であるメタンガスへの転化を高効率に実施できることを実証したことにある。上記「プロジェクト終了後の研究の発展」で述べたように、本CREST研究の成果を基に、廃棄物をバイオマスと捉えてバイオガスエネルギーの回収と利用を行う科学技術の流れが本格化したといえることができる。

3. 10. 3 成果の応用に向けての発展と社会的・経済的な効果・効用に繋がる取り組み

(1) (有) 筑波バイオテック研究所

平成16年度に本CRESTの成果を基に、前川研究代表者を代表取締役とする大学発ベンチャー(有) 筑波バイオテック研究所が設立された。設立の目的は、前川孝昭代表取締役の40年近くに及ぶ大学での教育、研究の経験、成果を社会に還元すべく、専門分野であるバイオ

マス、食品プロセス工学の研究成果を基に、循環型社会の実現を図る一役を担うというものである。

大学発ベンチャーの多くが事業化では苦戦している中で、同研究所は下記を業務内容として、活発に事業を展開している。

- ・地球温暖化防止を図るバイオエコ燃料の製造・販売、燃焼機器ならびに関連原材料の製造・販売。
- ・非食料バイオマス資源より、飼料や固体・液体・ガス燃料の製造と技術開発。
- ・マルチバイオエコ燃料に対応できる熱電併給型スターリングエンジン、小型タービン発電機を日本及び東南アジアで販売。
- ・バイオエコ燃料として、藻類からの油及び残渣をそれぞれ液体燃料及び飼料とする培養・加工システムの技術開発ならびに製造・販売および技術指導。

同研究所は、また、米国 **Origin Oil Inc.** との協同研究開発により、高性能フォトバイオリアクターによる微細藻類の高速生産と燃料油の製造も事業化している。

3. 10. 4 参加研究者の活動状況

研究代表者の前川孝昭名誉教授はその後、日本水処理生物学会論文賞を受賞、現在、(株)筑波バイオテック研究所の代表取締役を務める他、シンガポール政府化学工学研究所顧問教授を務めている。分担研究者の稲森悠平は福島大学教授、西村修は東北大学教授、杉浦則夫は筑波大学教授、張振亜は筑波大学教授を務め、また、CREST 研究員であった李文奇は中国水利・水電科学研究院上席研究員、李柏旻は台湾屏東科技大学助教授、黒島光昭は栗田工業(株)勤務、藤田和男は岡山県庁勤務、鈴木啓太郎は(独)食品総合研究所研究員を務め、それぞれ活躍している。