沙漠における粉体工学

Powder Technology in Desert

小 島 紀 徳

Toshinori KOJIMA

Key Words : Desert Technology, Carbon Fixation, Afforestation, Water Management, Global Warming

はじめに

粉体工学会誌に沙漠学会と沙漠に関することを掲載させていただくこととなった。沙漠は土、砂といった粉体から出来ていることは事実である。また、鳴き砂、とか飛砂とか、風紋とか、沙漠に粉体工学を見いだしている研究者の方もおられる。だから、と理屈をつけて無理矢理話を作っていくという方法も無いわけではないが、筆者自身研究を進めて行く上で、あるいは沙漠学会の発足の経緯をみると、この両者は全くといって良いほど関係はなかったのである。結局、元来関係ないものとして、歴史を追って話を進めて行くのがもっとも素直だろう。

まず、筆者の粉体関連の研究テーマを紹介させていただくことにする。ついで沙漠と筆者の研究テーマとの関わり、そして沙漠学会とは、を説明することにしよう。

そして、最近、プロジェクト化した沙漠での CO₂ 固定。この背景を理解していただくためには CO₂ 問題にも言及せねばなるまい。そして最後に、やはり本稿を書かせていただく機会を与えて頂いたことに敬意を表して、沙漠と粉体工学とを結びつける努力だけはしてみよう。(注：後述の日本沙漠学会ではサバクのサに砂ではなく沙をあてている。その理由の一つは中国では沙漠という字を用いているからであるが、それ

よりも、沙漠とは砂があるところとは限らない、すなわち土漠、岩石沙漠などもある、しかしどれも水が少ないところである、すなわち沙、と言われると、妙に納得してしまうのである。以下ではそのまま、沙漠と記載することにする。)

1. 粉を扱う

博士論文(1981)まではもっぱら水溶液系の、膜を用いた固定化酵素やイオン分離、あるいは金属抽出といったテーマをやっていた。博士号とは足の裏の米粒である、とは粉体工学分野の某S教授のお言葉である。取らないと気持ち悪いが取っても食えるわけではない。そこで化学工学ではあるが全く異なる分野の研究室にもらわれて行くこととなる。

そこでのテーマは流動層、石炭ガス化、石炭燃焼、コークス化。そして流動層 CVD による多結晶シリコンの製造がテーマに加わり、本学に移動(1987)後も引き続き実施して行くことになる。特にジェットニング流動層は、灰溶融石炭ガス化、多結晶シリコンに適用しうることから、モデル化とともにジェット内の現象解析を進めて行った。もう一つの流れは、多結晶シリコンから始まった微粉材料。CVD あるいは流動層という枠にとらわれず、様々な手法と材料と装置に展開していった。装置としてはプラズマ CVD、気流層なども、また反応も CVD のみならず固気反応なども使い、要求される物性を有する複合粒子として、窒化珪素や炭化珪素、窒化アルミなどの合成や珪藻土焼成を行ってきた。これらの過程は、それらの合成に必要な装置の改良でもあった。さらには、CVD を用いた金属薄膜(実際には微粒子の堆積物とも考えられる)の調製による高温水素分離膜の合成と膜反応器による反応分離の実証にも発展した。これらに関する総説を、引用文献^{1)~4)}としてあげておく。

1999年10月21日受付

成蹊大学工学部工業化学科

(〒180-8633 武蔵野市吉祥寺北町3-3-1) TEL 0422-37-3750

<著者紹介>

昭和50年東大工学部化学工学科卒、東大講師、昭和62年成蹊大講師、助教授を経て平成6年から教授。工学博士。研究テーマを一言で言えば、プロセスの高効率化と環境負荷低減に関する研究。具体的には本文参照。平成3年化学工学会論文賞、平成9年日本エネルギー学会進歩賞受賞等。

2. 環境問題と沙漠そして沙漠学会の発足

もともと化学工学を目指した理由は、公害対策技術を学びたかったからである。しかし、化学工学は手法の学問であり、対象が汚染物質でも高付加価値物質でも同じことである。生物反応の応用を考え、酵素反応に行ったまでは自らの意志は入っていたが、その先は流されるままであった。本学移動後に、自らのテーマとして考えたいと思ったことは、CO₂問題および新エネルギー、そして沙漠化であった。そしてこれらは三位一体となってそれからのテーマを徐々に構成していったのである。

本学にアジア太平洋研究センターという組織がある。このプロジェクトとして、沙漠化に取り組むこととなった。メンバーも素人ばかりであった。なんせそのプロジェクトのリーダーが私であったのだから。沙漠化といっても、対象はタイ東北部で、沙漠化というより塩類化と言った方が正しい。とはいえ、沙漠化を aridification とすればこれも立派な沙漠化である。確かに降雨量は少なくないのであるが、樹木の過剰伐採が原因で、地下水中の塩水が地表に上り、地表に塩が噴くようになる。一度塩を噴くと、農地はもちろん植林もできなくなる。まさしく沙漠化である。このあたりは地下に岩塩層があり、地下水中に塩分を多く含む。木が生えているときには木が水を吸い、地下水位を下げているのであるが、木が無くなると地下水位が上昇し、毛管現象で塩水が上がってくるのである。このような現象は決してまれなわけではなく、乾燥地、というより半乾燥地、すなわち毛管で地表まで水が上がるようなところでよく見られる。また、塩類化は、少しでも塩類を含んだ水を灌漑に使うなら、いずれ生じる現象である。日本のように降雨量が多く、水の動きが地表から地下へという方向のところを除けば、非常に多くの穀倉地帯が塩類化の可能性を有するのである。

今から10年ほど前に、日本沙漠学会が発足した。そもそも沙漠学とは何であろうか。日本学術会議としては、地理学の一部として位置づけられているが、ことはそう単純ではない。農学あり、工学あり、気象学あり、医学あり、文学あり---と数え上げればきりが無い。これらの複合的なというか横断的というか、の分野の集まりとして沙漠学なるものが位置づけられる。粉体工学が工学の、それも化学工学や機械工学の一部として、あるいは応用的にみれば、薬学、材料工学などに展開できるということとは根本的に違うよう

に思われる。沙漠という題材に対して、従来の様々な観点からの学問がどう寄与できるかを競っているし、必要な対象に関しては各分野の枠をはずして融合せねばならない。もちろんその中に粉体工学があっても良いし、その寄与するところも探せばいくらでもある。地球上の陸地以外の所だけを対象とした分野を除けば、無関係な分野はないとも言えよう。地球というリングを切り分けた、その一部であるのだから。

そんなファジーな学問分野での、決して大きくはない（会員数；数百人）学会の、活動のよりどころは、結局いかに交流するか。もちろんまずは顔である学会誌と会報。そのことは最後に述べよう。最近著者も関わって大きく変化したからである。

学会員にとってもっとも重要な行事は通常5月頃に開かれる年次大会。このときにあわせて、評議員会、総会が開かれる。昨年は5月に土佐、高知工科大学で行われた。高知の「うまいもの--まずは、かつおのたたきを大皿で!!」。乾燥地と国際協同のシンポ。研究発表。そして飛び入りの土佐日記。みんな学会誌に載っている（はず）。

秋は毎年、10-11月にシンポジウム。今年は「月の沙漠」で有名な千葉県・御宿。11/19～シナイ半島の「沙漠・人・文化」をテーマに行われる。なかなか理想と現実とはかけ離れてしまう。かくいう筆者は、口実を付けて、実はさぼってしまうことになる予定である（実際さぼりました）。

それらの間をぬって、フォーラムが年4回開催されている。通常、午後一番で理事会。そして講演会で2時間。最後は、夜まで編集委員会。

その中で、ある意味で特殊なこと。分科会活動。沙漠学会のような、あって、無いような、分野の中で、どう独自性を出してゆくか？学会発足時から活動していたのは、後述の沙漠工学と、そして乾燥地農学である。そして、バイオビレッジ分科会は、沙漠学会から独立し、「日本バイオビレッジ協会：建設構想を沙漠化した地域に実現することを目的としたNGO」（連絡先 TEL/FAX：03-3947-5578, GFB03365@nifty.ne.jp, 代表：長浜直）となった。日本から最も近いホルチン沙漠にあるウタンタラ村（中国内モンゴル自治区）の沙漠化した地域を選定。地元政府から25年間（1996～2020年）無償で借り受けた500haの第一段階がほぼ終了、第二段階としてウタンタラ村全体8,000haを対象に「バイオビレッジ建設」を進めようとしている。詳しくは上記に。

乾燥地農学分科会。松本 聡代表。筆者も名前だけ

入れていただき、貴重な情報をいろいろ提供していただいている。沙漠誌分科会も活動を始めようとしている。次に、著者の属している沙漠工学分科会の紹介をさせていただこう。

3. 沙漠工学と Desert Technology

その意味で沙漠工学とは海洋工学のようなセンスで考えればよいのだろうか、さらには海洋と異なり、土着の民族もいる。自然の脅威の中にも人が自然と共生している。

沙漠学会の発足と同時に発足した沙漠工学研究分科会もこの十年間、大きく変わってきた。代表者も理研の遠藤勲氏からスタートし、現在は筑波大学農林工学系の安部征雄氏に交代している。活動内容も広がっていった。沙漠工学分科会の中心メンバーの手による2冊の図書⁶⁾、幾多の講演会の内容の多くも、沙漠学会誌「沙漠研究」に掲載されている(例えば⁷⁾)。

そして国際的な活動として Desert Technology があげられる。第1回は、アリゾナ大学と本研究会とが中心となり米国で開催されたものであるが、詳細な記録は残されていない。第2回は1993年にハワイ島コナで開催され、講演内容は沙漠研究に掲載されている。ここまでは国際会議とは言っても日米2国間での研究交流といった位置づけであった。そして1995年10月に、Desert Technology 3⁸⁾(第3回国際沙漠技術会議、議長:小島)が山梨県で開催され、十数カ国から122名が参加する名実共に国際会議が開催された。続いて第4回は1997年にオーストラリアで開催された⁹⁾。これらの Proceedings は沙漠研究の特集号として刊行された。そして1999年10月9日(原稿執筆時)現在、米国 Reno で開催されている第5回会議に参加している。

さてその沙漠がなぜ筆者の中で CO₂ 問題と関連するようになったのか。地球温暖化とは何かをまず簡単に説明することにしよう。

4. 地球温暖化と CO₂ 対策

地球温暖化(詳しくは拙著¹⁰⁾参照)、いや普通は気候変動の問題といわれているが、これらによる乾燥化、洪水、食料生産への影響、海面上昇、植生変化、病気などが心配されている。そもそも温室効果ガスとは?。よく地球に熱をためる働きをするといわれているが本当に熱が貯まるのだろうか?。実際地球の平均温度が上がるのであるから、その分の熱は貯まることは間違いがないのだが、その熱量は一日に受ける熱量

に比べればわずかで、計算上は全く同じ量の熱が宇宙に放出されるとして考えても良い。そう考えるとむしろ温室効果ガスは、地表から、一定温度の宇宙に熱を放出するのを妨げる抵抗の役割をしているのであって、太陽から受けた熱を同量宇宙に放出するには地上温度が上昇するしか無い、と考えた方が良いかもしれない。温室効果ガスがもし無ければ、地球は-18℃になるといわれている。

温室効果ガスとしては、フロン、メタン、亜酸化窒素もあるが影響は CO₂ に比べ小さい。メタン、亜酸化窒素は、エネルギー利用の他、農地や自然環境からも放出される。これらはさておき、二酸化炭素放出の主因は、化石燃料である。実際現在は化石燃料等を燃焼することにより発生する割合が3/4以上で、森林破壊によるものが残りである。

1997年に京都で開催された COP3 では、先進国全体で5.2%、日本は6%、アメリカは7%、EUでは8%の CO₂ (メタンや NO₂ を含む。フロン類については、モントリオール議定書で削減が明記されているフロン類に代わり今後生産が伸びると考えられるガスに限定されている)を、1990年を基準にして2010年位(±2年)までに減らすということで合意がなされたのである。まだ十分な枠組みは合意形成がなされていないものの、先進国間の協力による削減分を分割してカウントする共同実施、あるいは途上国援助による削減を先進国分としてカウントできるクリーン開発メカニズム、そして削減割り当て分に到達しなかった場合に未到達分を、目標以上に到達できた他の国から購入できるという排出権市場などの考え方も導入される見込みである。

このような背景から、あと10年という短期での COP3 での合意の可能性を見ると少なくとも日本については目標が達成できるとは思えない。もし達成できるとすれば日本の経済が今以上に壊滅的な状況になった場合か、原子力立地が進んだ場合だけだろう。1996年現在で CO₂ は既に10%近く排出量が増えており、これから十数%も減らす必要がある。実際には景気の影響で現在、若干は減ってはいるが。また、COP3 で対象になっている代替フロンは、その使用量の増加が見込まれており、実際大きく増大している。

しかし、原子力(軽水炉)や天然ガスへのシフトは、これらの資源が決して豊富ではなく、石油と同様であることから、数百年で考えた資源量の問題からは小手先の対策といわざるを得ない。一方自然エネル

ギーや高速増殖炉は先が見えない。従って最も現実的かつ有効な対策は高効率化、省エネルギーということになってしまう。例えば発電分野では、この50年間に、効率は30%から40%へと進歩した。しかし、この先10年でそう急激な向上は望めない。省エネについても、オイルショックの際に産業界が急激な省エネを進めた実績があるが、しかしそれ以上の省エネが可能かという点には疑問がある。特に、現状のエネルギー価格の下では、決して自然に入ってくるようなものとは思えない。トヨタのプリウスにしても、燃費は半分としても、元はなかなか取れない(ガソリン価格を $\text{¥}100$ 円、生涯走行距離を10万キロ、 $\text{¥}10\text{km}$ が20kmになったとして、儲かるのはたった50万円)。

このような状況を打開する方策として、 CO_2 の回収隔離技術がいくつか提案、研究開発されている。分離回収は可能である。しかしそれをどこにどう隔離するか。 CO_2 はエネルギーから出るゴミだとすれば、これを資源として再利用することはナンセンスである(化学的変換のためには、 CO_2 が排出された際に得られたエネルギー以上のエネルギーを投入する必要がある。そのようなエネルギー源があるのであれば、直接そのエネルギーを用い、 CO_2 の排出を大元から断てばよいのである。微生物を用い、いずれ分解するしかない化合物を合成することも同様である)。海洋処分は海洋環境の点から反対が大きいし、まだ確実とは言えない。地中処理は地球規模では可能性はあるが日本国内では困難との見方が大きいようである。なによりこれらはよけいなエネルギーを使う技術であり、二酸化炭素問題がもしなかったとすれば、できればやりたくない技術である。これらの CO_2 回収固定技術は、後悔する対策技術として位置づけられる。

5. なぜ二酸化炭素問題を沙漠で解決するのか

先ほど、 CO_2 排出の主因はエネルギーであると記した。しかし、歴史的にはむしろ森林破壊による方が大きかったといわれている。地球の中の炭素循環において、定常状態では森林は二酸化炭素を吸収しているわけではない。なお、新聞で、アマゾンが地球の肺と良く書かれているが、少なくとも二酸化炭素問題に関しては、定常状態(CO_2 濃度が増える前)では、アマゾンの森林はアマゾンのすべての生物の肺(そしてエネルギー源)といえるが、地球の肺とはいえない。人間が、生物として呼吸により排出している二酸化炭素量は炭素換算で年間数億トンであるが、これはもともと

農地などで大気から固定されたものであり、大気中の濃度の増大にはならない。

しかし、農地を、森林を切り開いて作るなら、森林破壊により CO_2 が放出される。逆に、新たに植林すれば、その植林により、地上にため込まれた炭素量だけは、大気中から二酸化炭素として除かれていることになる。なお、大気中の CO_2 濃度が増えたために、木が太り、単位面積あたりの炭素保持量が増えているという報告もあるが。

もちろん現在でも CO_2 増大の一因となっている森林破壊を防ぐことが、まず要求される。しかし、前述のようにそれは食糧とか換金作物を作るためである。その背景を変えて行くことが必要なのであるが、工芸屋としては指をくわえるしかない。農地を森林に(農地にある炭素量は、森林に比べて少なそうであることは理解できよう。ちなみに、ケナフは成長が早く、 CO_2 もたくさん吸収する、というたい文句がある。もちろんそれから出来る紙の分、森林破壊を防げるなら結構なことであるが、森林をケナフ畑に置き換えるのはナンセンスである)というのはもちろん非現実的である。そこで生産性の低い沙漠に木を、ということになる。これなら技術者が出る幕もありそうである。

6. 大規模植林による炭素固定の考え方と研究プロジェクト

ここで、沙漠化は、それ自身が地球環境問題、それも餓死者という面から最も人類に多大な被害を与えてきた重要な問題である。この解決は、従来多くの科学・技術者の手により試みられてきたが、例えば灌漑農業が新たな塩害を引き起こしてきたように、システムの評価・予測無しには、むしろ事を難しくするともいえる。

私たちが目指しているものは以下の通りである。二酸化炭素問題という長期的評価関数を持ちながら、沙漠・乾燥地を、沙漠化防止、利用、緑化という様々な視点から眺め、水を中心とするシステム構築を行い、いかに炭素固定、エネルギー生産に活用すべきかという地球工学的テーマを追求するもので、従来とは異なるアプローチを行おうとするものである。研究チームを構成する研究者は、専門分野としては農林、土壌、生態、電気、エネルギー、さらにはこれらをまとめる立場としてシステムと広く、様々な専門分野から成る。さらには、沙漠を有する国の食糧・農業問題や開発意欲と、先端技術が融合することが望まれる分野でもある。そのため、外国人研究者をも組み込み、国際

的共同体制を構成している。

乾燥地大規模植林による CO₂ 固定は、数年前からの調査研究に端を発する。はじめにスタートしたのは、平成4年からのガス協会/RITE（委員長：東大茅教授、現慶応大学）の調査研究^{11, 12)} であり、RITE/NEDO（委員長：東大小宮山教授）の調査研究^{13, 14)} へと引き継がれ、平成8年度にシナリオを提案¹⁵⁾ して終了した。これらの委員会では、現実の乾燥地の状況を鑑み、植林の際に問題となる事項を列举すると共に、特に関心の高い水のコントロールに関する技術的な蓄積が図られた。さらには降雨増大のための条件なども、気候、気象の観点から検討された。これらの過程で、まず調査、研究が可能かつ最適な対象地は西オーストラリア（当初は中近東などもあげられていたし、最後まで中国の可能性も検討されたが、決め手はやはり共同研究の行いやすさである）に絞られていった。また、これらの地域の詳細な公表データが集められ、1次データに基づく独自の気象解析なども行われた。

上記と並行して、平成7年度からは化学工学会/NEDO（委員長：東大山田教授、現信州大学）によるCO₂の生物学的固定に関する調査研究がスタートした。ここでは植林も含む主要な生物学的CO₂固定法の横並び評価が行われた^{16, 17)}。この過程で、最も現実的な技術的解決法として乾燥地植林が、また将来に向かっての検討が必要な事項として貧栄養海域への施肥法がクローズアップされ、次の調査研究対象となった^{18, 19)}。いずれも、CO₂の吸収というより、陸上あるいは海洋中の炭素保持量を上げることが目的であることに注意されたい。なお後述のように、植林については既に研究としてのスタートが切られており、本年度は海洋が中心となった調査が進められている。

これらの調査では、植林については上記のRITE/NEDOでの検討結果も参考に、また前出の安部氏あるいは小島との今までの研究交流の実績から、西オーストラリア Kalgoorlie で研究活動を行っている A. Williams らとの共同調査が開始され、また現地研究者が1名ほぼ専任としてこれに加わるに至った。研究グループも、ほぼこの段階で固まってきたと考えられる。これまでも共同で調査研究を実施してきた静岡大学や工技院の研究所、企業からの参加者に加え、森林総研、大阪大学なども研究グループに加わっていただくこととなった。調査サイトも Kalgoorlie からさらに内部（降雨量も減少し約220mm/y）に入った Leonora 近郊の Sturt Meadow Station 内に限定し

（とは言っても40km四方にもわたる広大な貧植生地域である）、詳細な調査を開始した。

しかしながら、このようないわゆる調査だけでは、必要性和、可能性あるいは予想される効果はいうことが出来ても、結局の所、紙の上の検討にしかすぎない。この段階まで至ってもう少し具体的な、効果が定量的に予測できる手法を提案すべきとの結論に至った。

いわゆる大規模な研究プロジェクトの立ち上げが必要との合意に至ったものである。上記の研究グループを中心に、何度かのチャレンジの後、平成10年秋から、山田教授を代表として、科学技術庁の戦略的基礎研究の枠組みの中でプロジェクトが開始されるに至ったのである。以下では我々が考える研究内容を簡単に紹介することにする。

7. 研究の目的

既に概要は理解していただいていると思うが、再度繰り返す。炭素固定のための条件はまずその規模である。炭素保持量をどこまで大きく出来るか、対象地域はどの程度あるかである。いくら純一次生産速度が大きくとも、全炭素保持量が小さくては意味が無い。乾燥地の植林の場合には、対象面積が大きいこと、およびこれを緑化することで、単位面積当たりの固定炭素量が大きいこと、しかしながらこの時、水の確保の問題が第一であり、その大部分を人工的に作るとすればエネルギー的には収支が取れなくなることなどが指摘される。特に、土壌物性を制御することにより、得た降水をいかに有効に利用するかをシステムとして確立することが重要である。さらに、水の制御を行う際に、従来技術でも問題となったように、水の移動に伴う塩類の挙動をも制御することが不可欠である。本研究ではまず、これらを定量的にとらえるために、土壌中の水・塩の移動シミュレーションを基礎に置き、これを対象地域に適用するという手法をとる。

対象地域としては西オーストラリアの降雨量が220mm程度の地域（レオノラ）とする。本地域における、気象、水分、土壌、植生に関する基礎データは、既に数百ページのレポートとして、現地共同研究者の手によりまとめられている。さらに、数年間の調査を通して樹種による蒸散量の違いの実験的検討を行い、生態系の生産速度が蒸発散量のほぼ3/2乗に比例すること、従って集水することにより、同一の全水量でも全域としての炭素固定能が増大する可能性があることが明確化されてきた。加えて、200km四方程度の規

図1 本研究におけるシステム：従来技術との違い

模の植林を行うことで、蒸散した水分が、再度当該地域への降雨となってリサイクルされることも、検証した。

そのほか、本研究グループでは、LCA手法による植林に要するエネルギー解析・得失の定量化、バイオマスエネルギーの利用可能性の検討、植林における太陽電池利用、塩類の能動的捕集手法の開発、カラム内の水分・塩分移動解析、乾燥地における大気中水分移動のモデル化、水移動解析手法の開発などの研究を実施してきている。これらを更に発展させ、対象地での対策を定量的に策定すると共に、実際に水条件、栄養塩条件の異なる条件下で種々の樹種を植え、その生育を観察する。

このような、積み上げ的研究の他に、既に蓄積されている現地条件下における現状植生の炭素保持量、成長量、あるいは土壌条件などの基礎データから直感的に妥当と思われる対策も、試験的に施し、その効果を解析して行く。

8. 本研究プロジェクトの概要--従来技術との違い

本調査で検討・提案する緑化によるプロジェクトとは、沙漠、乾燥地を緑化し、あるいは植生を回復させることにより、単位面積当たりの炭素固定量を増大させること、またその効果を定量的に評価するものである。特に、水・塩循環の制御を行うことにより、最小の投入エネルギー量に対して最大の炭素固定量を得ることを目的とするものである。

まず提案のプロジェクトの全体概念を、従来手法と比較して図1に示す。確かにこれまで多くの沙漠緑化プロジェクトが行われてきたが、それらは、当該地域における定量的解析に基づくものではなく、単一技術により、経験的に、短期的視点で行われたものが多い。その結果、樹種の選択が不適切であるために水供

給が不足したり、実際オーストラリアでもみられるように、バンク（土木工事により水を集める）の形成がほとんど効果を生みだしていなかったり、さらには乾燥地での農業でよく見られるケースであるが、過剰な灌漑が深刻な塩類集積を招いた例などもある。また、耐乾性、耐塩性などをバイオテクノロジーで付与するとの試みもみられるが、革新技術になるには至っていない。

本研究では、現地調査に基づき、基礎データを水・塩収支（シミュレーター）に組み込み、これに基づいて、土壌構造の改良・水の移動制御に関する提案を行うと共に、条件に適した樹種を開発・選択する。これを基に現地での実証を経て、炭素固定能の評価を行うものである。このような、明確な評価関数を設定することにより、将来展望を有する技術評価がはじめて可能となる。

さらには、将来展望としては、自立可能な森林生態系を確立し、これからの余剰バイオマスによるエネルギー生産によりエネルギー収支を改善し、これを再び水・塩の制御に用いるあるいはエネルギープランテーションの可能性も検討する。一部の土地は、農作物に利用することも可能となり、経済的自立をも図りうる。このような大規模な植林により、当該の広域における気象変化も可能となり、降雨量の増大による森林面積の拡大も期待できる。

9. 本研究提案の核となる水・塩移動シミュレーション

乾燥地で最も問題となる、水・塩の制御を行うためには、必要水量、耐塩性を定量的に評価すると共に、具体的提案の基礎となる水および塩移動シミュレーションモデルが必要となる。本研究ではシミュレーションを核にし、最適な水制御法を提案する。本提案で実

図2 シミュレーションモデルの概要と関連

施するシミュレーションの適用範囲は、次の3段階に分類できる。これを図2に示す。

まず第一に、ミクロな解析であり、まず1次元解析から進める。土壌表面からの蒸発、土壌中の水分移動を高さ方向に解析する。このシミュレーション実施に必要な情報は、表面からの蒸発ポテンシャル、土壌の保水性であり、入力データとしては降水パターン、地下水位、土壌および地下水の有する塩分量である。本解析では、汎用的なプログラムを用い、それぞれの対象地域における、ミクロな土壌・地形構造に適合するパラメーターを入力して解析する。これらの気象・土壌に関する詳細な基礎データは、現地調査により行うと共に、土壌物性については、一部日本でも測定を行う。ついで、ミクロな2次元の解析であり、上記の1次元モデルに樹種の効果を入れる。適用範囲は半径がメートルオーダーの規模であり、各樹種の生育に必要な要水量、各樹種の根からの吸水量、速度等がデータとして必要となる。

これらのモデルの妥当性は、現地水分分布および実験室データにより確認するとともにモデルの改良を行う。さらにこれらの結果から、水を制御する際の土壌構造の改善提案を行う。また、2次元構造の解析から、塩類の集積を防ぐ水供給法あるいは積極的に土壌中の塩分を回収するための手法が提案される。

第二の規模のシミュレーションは、対象地域における地理的状况をも含めた水平方向のマクロ(10～100km規模)な2次元モデルである。必要なデータは、対象地域に特化した地形、現実の水の動きであ

り、これをシミュレーションに入力する。併せてこれらの考察から、改善提案がなされるが、提案自身をもこのシミュレーションの入力とし、その効果の予測を出力として得る。しかしながらこのシミュレーションの適用範囲は、あくまでも水、塩の移動である。炭素固定能の増大の予測のため、樹種を対象とした林学的考察も行う。

この規模のシミュレーションの実証は、現地で行う。現地での降雨後の土壌水分経時変化測定結果に加え、実証試験結果をシミュレーション結果と比較しながら、シミュレーション自身を改善し、汎用性を高める。大規模植林により、炭素固定量の増大ばかりではなく、樹木の吸水により前述の地表水、地下水のマクロな挙動に影響を与える。前述のシミュレーションの入力の変更により、その影響の予測を行う。

大気中のマクロな水蒸気の収支(図2右下)については、次項で述べる。

10. 本提案研究の詳細：各研究項目間の関連

詳細な各項目間の関連を図3に示す。以下では本図を解説しながら、研究内容を説明する。

(1) 炭素固定能の増大の予測と確認：樹種の選択
各樹種により、その生育速度、生育に必要な土壌、水、塩環境は大きく異なる。これらを統一的に整理することにより、上記の環境に適合して最も大きな炭素固定能を得られる樹種が決定される。データは、本研究グループ内で精力的に調査してきたが、不十分な点がある。上記の水収支と適応した、環境と炭素固定量

図3 提案の研究内容

との実験的検討（既に開始）と共に、現地に既に生育している樹種の、炭素固定量と環境条件との関係を整理する。特に、季節変動により、気温の変化とあいまって、降水量の変化が生じる。これに対応するため、地形・土壌の改造により、ある程度の土壤水分制御は可能となるが、さらに人工的な貯水、造水、地下水の利用の必要性が生じる。この点も樹種に大きく依存する。

併せて、上述のように実際に土壌、水、塩環境を、シミュレーションからの予測により改善した際の、炭素固定能への効果を、実際に現地において実験的に測定する。

(2) 大規模植林がマクロな大気中の水収支（気象）に与える影響の評価（図2右下）

蒸散量の増大は、当該地域からの流出水量を減少させ、大気中の水蒸気量を増やし、大気のマクロな

水収支にも大きく影響を与える。その結果として、200km 程度以上の規模で見れば、降水量にも影響を与える。従来行ってきたシミュレーションをさらに発展させ、精度が高い予測モデルを確立する。

(3) システムとしての緑化による CO₂ 対策としての効果の評価

上記の土壌、地形構造の改善、植林、あるいは一次的な貯水、場合によっては太陽熱などを用いた造水、さらには地下水の汲み上げにはエネルギーを要する。これを化石燃料によりまかなうとすれば、当然 CO₂ の発生があり、仮に太陽エネルギーを利用するとしても、設備製造過程からの CO₂ 発生がある。

一方、炭素固定量の増大ばかりではなく、エネルギーの観点からは、余剰生産の活用によるバイオマスエネルギー生産も可能であり、これを必要エネルギーとして植林に利用することにより、システム全体とし

て CO₂ 固定量を増大させることも可能である。

最後に、上記のすべてについて、エネルギーの観点も含め、LCA 手法を用いた二酸化炭素問題対策としての総合評価を行う。併せて、農業生産との複合化の可能性も検討する。

(4) 最終到達目標と他地域への適用

本提案は対象地域を限定したものであるが、CO₂ 問題との観点から言えば、場所に限定されず、種々の条件下での緑化・炭素固定の最適化を策定するとともに、その効果を全地球的に評価することが必要である。CO₂ 問題からみた植生回復に関するプロセスシミュレータの開発が本提案の最終目的である。様々な地域において本手法を適用し、その拡張性を確認する必要がある。対象国との位置関係、対象国の気象・地理的条件、対象国の経済・政治状況を考慮し、次なる候補を策定して行く必要があろう。

11. 沙漠技術研究のこれから

上記のプロジェクトがスタートしてもう1年以上たってしまった。その間、山田研究代表だけは研究全体のとりまとめや現地とのやりとりといった雑務に追われながらも、それぞれが山田代表の指導力の下で自由な発想をもって着々と成果を上げつつある。平成11年春には、何と当該地にモンスーンが訪れ、まれにしかこない集中的な降雨の影響も一部データとして納めることが出来た。あるいは実証については、現状では全く植生のない数 ha の地域に、バンクを形成して水を集め、その水をハードパンを突き抜けて捕集する、等の大規模な対策も実施し始めている。結局、理

屈よりやってみなければと言う研究代表の意思の表れであると思う。これまでの成果は、もちろん研究グループ内では泊まり込みなどでの検討がなされてきたが、平成12年春には東京で開催予定の化学工学会で、関連するシンポジウムを開催することとなっている。

一方、沙漠学会では、小島は今沙漠研究誌の編集責任者という大役を仰せつかっている。学会設立後に刊行が始まった本学会誌は、会報である「おあしす」を併合し、本巻から年4回の刊行となった。10周年を来年迎え、本学会とともに大きな変貌を遂げつつある。沙漠工学会については安部会長の下で、忙しいときには休みを入れながらも、ほぼ定期的に会合を開いている。前述の国際会議 Desert Technology については、次回は2年後、中国でという方向で動き始めるようである。

さて最後に粉体工学との関わり。いろいろと書いてきたが、結局はじめに約束した関わりを、やはり整理できずに本稿を終わることになりそうである。ただ、例えば沙漠緑化のための土壌改良材開発においては、多孔質で吸着比表面積が大きい粉体材料物性が要求される。さらにその土の中での挙動についての予測についても、これまでの粉関係のつまらないと思っていた「常識」が、新鮮な輝きをもって役立つ場面もある。大地の粉も面白い、というより地球が我々の肩にかかっていると思うと一言い過ぎかもしれないがそんなつもりでいれば--どうもやるべきことはいくらでもありそうである。

引用文献

- 1) 小島紀徳, 木村 匡: “流動層工学の新分野への応用 (特集: 流動層技術の高度利用)”, ケミカルエンジニアリング, **37** (11) 925-930 (17-22) (1992)
- 2) 小島紀徳, 上宮成之: “CVD 法による新素材, 材料開発 (特集: 新素材材料開発)”, ケミカルエンジニアリング, **38** (5) 434-438 (74-78) (1993)
- 3) 小島紀徳, 英 敬信: “多結晶シリコン粒子製造のシミュレーション (特集: 注目される化工シミュレーション)”, ケミカルエンジニアリング, **40** (2) 148-153 (52-57) (1995)
- 4) 小島紀徳, 羅 春華: “流動層工学 (21 世紀の化学工業を支える単位操作)”, ケミカルエンジニアリング, **44** (1) 37-42 (1999)
- 5) 安部征雄, 小島紀徳, 遠山征雄編: “沙漠物語”, 森北出版 (1994)
- 6) 遠藤 勲, 安部征雄, 小島紀徳編: “沙漠工学”, 森北出版 (1998)
- 7) 日本沙漠学会沙漠工学分科会編: “小特集沙漠工学分科会第9回講演会および第10回記念講演会”, 沙漠研究, **9** (1) 79-80 (1999)
- 8) Kojima, T., K. Tanji and I. Endo (ed.): “Proceedings of Desert Technology III (Oct. 15-20, 1995, Fuji Motosuko Hotel)”, J. Arid Land Studies, **5S** (1995)
- 9) Ferguson, B., A. Williams and G. Bradley (ed.): “Proceedings of Desert Technology IV (Sept. 21-26, 1997, Kalgoorlie, W. A.)”, J. Arid Land Studies, **7S** (1998)
- 10) 小島紀徳: “二酸化炭素問題ウソとホントー地球環境・温暖化・エネルギー利用を考える”, アグネ承風社 (1994)
- 11) CO₂ 対策としての砂漠緑化技術調査研究会: “植林による CO₂ のグローバル固定化システム, 中間報告書”, 地球環境産業技術研究機構, 日本ガス協会 (1993)
- 12) CO₂ 対策としての砂漠緑化技術調査研究会: “砂漠緑化技術開発の基本構想, 最終報告書”, 地球環境産業技術研究

機構，日本ガス協会（1994）

- 13) 地球環境産業技術研究機構：“大規模緑化にともなう気候変化に関する調査”，NEDO-GET-9401（1995）
- 14) 地球環境産業技術研究機構：“大規模緑化にともなう気候変化に関する調査（II）”，NEDO-GET-9513（1996）
- 15) 地球環境産業技術研究機構：“大規模緑化の実現化シナリオ作成に関する調査”，NEDO-GET-9637（1997）
- 16) 化学工学会：“平成7年度生物的 CO₂ 固定に関する調査報告書”，NEDO-GET-9515（1996）
- 17) 化学工学会：“平成8年度生物的 CO₂ 固定に関する調査報告書（II）”，NEDO-GET-9638（1997）
- 18) 化学工学会：“平成9年度乾燥地，貧栄養海域を利用した生物的 CO₂ 固定に関する調査報告書”，NEDO-GET-9701（1998）
- 19) 化学工学会：“平成10年度乾燥地，貧栄養海域を利用した生物的 CO₂ 固定に関する調査報告書”，NEDO-GET-9802（1999）