

粘土膜の開発

—— 出会いの側面から見た本格研究シナリオ ——

蛸名 武雄

粘土を主成分にした膜の本格研究事例を紹介する。粘土は環境にやさしく、国内でも豊富に採れる資源である。これを膜化することにより耐熱ガスバリア材料として利用することができ、持続可能な産業に寄与できると期待される。粘土膜の発明から実用化にいたる過程の技術開発、広報、知的財産、技術移転の方法を述べるとともに、人あるいはグループの出会いが開発にどのように生かされてきたか分析する。さらに統合開発型イノベーションモデルによってコンソーシアムの有効性を議論する。

1 粘土を用いた膜

これまでガスバリアフィルムは、主にプラスチックをベースとして製造されてきた。そのガスバリア性は完璧なものとはいえず、耐熱性及びガスバリア性能の向上のため、粘土などがフィラーとして少量添加された「粘土プラスチックナノコンポジット材料」が研究されてきた。この材料は一般的に少量の粘土の添加で明確なガスバリア性の向上が得られる。そこで、従来フィラーとして少量使われてきた粘土を添加物としてではなく、主材料とした緻密な膜にすると、飛躍的に耐熱性およびガスバリア性が向上するのではないかとの逆転の発想に基づき、2003年に粘土からなる耐熱性ガスバリア膜の開発を始めた^{[1][3]}。

粘土の結晶は厚み約1 nm (100万分の1 mm) の薄い板状のものである。この薄い結晶を何万枚も緻密に重ね合わせて取り扱い可能な厚みの膜に成形したものが、「クレースト Claist[®]」と名づけた粘土膜である。クレーストは、高温条件下で、酸素や水素ガスに対する高いガスバリア性を有して曲げることができる。作り方はキャスト法と呼ばれ、粘土の分散液をトレーなどの中で乾燥させ、乾燥後トレーの底から剥がすという簡単な方法である。粘土の製膜性を調べるため、種々の粘土を用いた成膜実験を行った。その結果、水に分散しやすく、水をゲル化させやすい「スメクタイト」と呼ばれる粘土が製膜性に優れていることが分かった^[4]。スメクタイトは天然にはベントナイトと呼ばれる鉱物に30から70%程度含まれている。ベントナイトはそのままで鑄物砂の粘結材、建設現場における掘削泥水、ダムや廃棄物処分場の遮水層などとして用いられている。国内の産出量は約45万トン/年であ

り、バージンPETの国内企業生産量にほぼ等しい。このうちの半分以上が東北地方の鉱山から産出している。ベントナイトからスメクタイトの分離・精製は、水に分散し、沈降しない分散液部分を過熱乾燥する、水簸という方法で行われる。

粘土が膜になるということは粘土を対象に研究を行っている者にとっては新しい知見ではない。粘土の結晶構造をエックス線回折法によって解析する場合、ガラス板上に粘土分散液をキャストした配向試料を用いることは一般的な手法である^[5]。粘土膜をガラス板から剥離することはできず自立膜^[6]にはならないが、マサチューセッツ工科大学のアーネスト・ハウザー教授は1938年に粘土による自立膜を報告している^[6]。想定される用途としては包装材料など、つまり紙の代替のようなものであった。このように粘土の膜材料としての潜在的な可能性が示されていたが、どうやらほとんど製品化には至らなかったようである。それは競合材料としての紙の性能と経済性に対して、優位性を認めるような用途が見つからなかったためと推察する。

それから70年を経た今日、ガス遮断を要求する製品は非常に多くなった。食品の包装や電気製品などが代表的なものである。さらにロケット、航空機、水素自動車、燃料電池車などのように、高圧で水素を保存し、しかも移動体に載せるために軽量のシステムにしなければならないという特殊なニーズが出てきた。揮発性有機化合物ガス低減のために石油化学プラントでは少しでもリークを低減しなければならない。これらの新しいニーズに対して、粘土を使った新材料で対応することとなった。

2 粘土膜の発明とコンセプトの確立

2.1 粘土膜のガスバリア性の発見

筆者はもともとは廃棄物処分場における人工バリアの評価をする目的で、粘土圧密体を研究していた^[7]。粘土圧密体の水の透過は非常に遅いものであり、測定は長時間を必要とし、最長 500 日間の測定を行ったことがある。このような測定を短時間でを行うための工夫として、当時 16 mm ほどあった圧密体を薄くすることを考えた。薄いほど測定時間は短くなったが、同時に膜の均一性が測定精度に大きな影響を及ぼすことになった。厚みの均一性を達成するために、当時はろ紙上への膜の試作を繰り返した。つまりこの段階では水バリアという特性の面から粘土膜の作りこみを行っていた。この知見についてはプロジェクトの成果報告などを行っていたが、多くの方の興味を引くには至らなかった。

2001 年に産総研東北センターが発足し、2004 年に研究ユニット「コンパクト化学プロセス研究センター」が設立されてからまもなく、この膜を上司に見せたところ、水素ガスを用いるマイクロリアクターのシール材として使える、との意見をもらい、ガスバリア材としての研究を始めた。

自立のセラミックスフィルムは空気分子が通過可能な小さなクラックが多く存在する。したがって高いガスバリア性を期待することはできず、セラミックス系フィルムでガスバリアを実現するという発想には至らない。確かに粘土膜は水に対しては高いバリア性を発現するが、それは粘土が吸水膨張してクラックを埋め、バリア性を発現するためである。したがってやはりセラミックスフィルムを作る人間だけではガスバリア材としての利用を思いつかなかったと思われる。粘土膜がガスバリア材に使えるのではないかという発想が生まれたのは、外観がテフロンテープというシール材に似ていることから得られた発想であると考えられる。テフロンテープは実際にマイクロリアクターのシールにも用いられるが、250℃程度までしか使用できない。そこでテフロンテープ的な強さと柔らかさを実現するための改良を行うとともに、気泡などに起因する空隙を少なくするなどの工夫がなされた。まず素材が存在し、見る、触るなど人間の五感を通して、用途展開のアイデアが生まれたと考えられる。

2.2 粘土膜のガスバリア性能の実証

当初は粘土膜の強度が不足であったが、上司とのディスカッションに基づき改良を繰り返し、数ヶ月でマイクロリアクターのシール材として使用可能なものができた。このマイクロリアクター実験においては 300℃程度の温度条件下で水素をシールしなければならず、従来のシール材では適当なものが見つからなかった。評価をしてもらったところ、シール性は良好との結果を得た。原理的には粘土は水素を

透過しないと考えられたが、バインダーの添加によりその水素シール性が失われないかどうか不明であった。後に迷路モデル^[8]によって、粘土が大過剰であれば高いガスバリア性を発揮する、具体的には粘土重量比が 94% であれば、バインダー成分の 1000 倍のガスバリア性を発揮することを導びき、原理的にも実験で得られたハイバリア性が支持され、粘土膜の基本コンセプトを確立させた^[9]。

3 粘土膜応用開発

3.1 ニーズの分析

2004 年 8 月 11 日に粘土膜のプレスリリースを行った。報道のポイントは最高 1000℃という耐熱性と検出限界値未満というガスバリア性である。また積極的に展示会などに出展を行った。さらに専門誌への簡単な紹介記事なども多く執筆した。

短期間での集中的な広報活動の結果、延べ 300 以上の問い合わせがあり、内約 150 社と技術相談をした。その結果、この材料が非常に多くの用途に使える可能性を持った材料であることが分かった。用途としては、耐熱柔軟フィルム、ディスプレイ用フィルム^{[10][11]}、黒鉛複合材、電磁波遮蔽材、コンデンサー用シール、包装材料（ハイバリア紙容器、ハイバリア軟包材）、水素シール材等が主なものである。

3.2 知的財産強化

出願した特許の公開、学会発表や専門誌などでの印刷物での公開時期をにらんで、応用特許の出願など知的財産部門、産総研イノベーションズと研究ユニットとの特許の強化について検討する会議に基づく特許群の強化が図られた。具体的には、先行技術調査などを 2004 年 8 月、同 12 月、2005 年 2 月に行っており、知財戦略強化チーム（特許強化会議よりも少人数で、特定の知的財産に対しての強化を図るための組織）による集中的知財強化を 2004 年 12 月、2005 年 6 月、2006 年 3 月、同 5 月、同 9 月に行っている。産総研の内部で伸ばすことが適当な分野および研究開発内容、企業との共同研究で伸ばしていくべき分野および研究開発内容の選択を行った。具体的には、材料特許、製造特許の一部、応用特許の中で産総研内部のマッチングで伸ばせる部分を集中的に出願することにした。ここで出願された応用特許としては、フレキシブル基板、太陽電池、燃料電池用材料などがあげられる。これらは産総研内部で粘土膜を提供し、予備試験でよい結果が得られた案件である。もちろん検討した結果うまくいわず出願に至らなかった例もある。この時期までに約 40 件の特許出願を行った。知的財産の十分な質・量の確保を実行し、本技術に関する産総研の単独特許出願は 2003 年から始まり

2004-5年でピークを迎えた。

3.3 技術移転と共同研究ポリシー

技術移転は研究試料提供契約および研究情報開示契約によって行った。前者は約70件、後者は約20件を数える。技術移転では粘土膜の製造ノウハウの十分な蓄積と、そのノウハウの正確かつ詳細な情報伝達をすることに努めた。

研究情報開示契約の際は、単なる未公開特許およびノウハウブックの開示だけではなく、ラボ内に立ち入っただけの見学を積極的に受け入れた。未公開特許およびノウハウブックの開示はそれほど詳細なものとなっておらず、その情報だけで開示先が完全な再現ができるとは限らないためである。結果としてほとんどの場合、開示先は産総研のサンプルと同程度かそれ以上の品質の膜を製作することに成功していることから、この研究情報開示契約のスタイルは技術移転に有効と考えられる。

2004年より研究情報開示契約を前提とした用途別の共同研究を開始した。これらの共同研究は2005年あたりから増加し、粘土膜の開発ステージは徐々に実用化研究へ移行していった。結果的に同じ製品に用いられる場合でも、川上・川下に仕分けが可能である場合には共同研究を開始することを可能とした。研究開発段階が進めば、川上・川下企業に渡る垂直連携が研究開発を加速する場合もあると考えられたためである。同時にビジネスの衝突が起る可能性があり、適切な時期に友好的に開発を進めるための措置を講じる必要が出てくる。このとき産総研職員は守秘義務のために踏み込んだ内容はなかなか難しく、後述のような主要研究先を含めたコンソーシアムを利用することが有効な手段である。コンパクト化学プロセス研究センターはグリーンプロセスインキュベーションコンソーシアム（GIC）を主宰しており、この場で企業間の水平連携および垂直連携を支援している。

企業などとの共同出願特許件数は2006年から多くなり、2007年には総出願数の8割程度にまでなっている。共同出願をしている相手企業が10社以上と多いことも粘土膜開発の特徴である。

4 アスベスト代替ガスケットの開発

多くの技術相談を受けた企業の中で、J社とともに高温条件下で用いられるシール材の開発を2005年度の経済産業省地域中小企業支援事業として行うことになった。この研究成果を基礎として、独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）のプロジェクトによって、膨張黒鉛と耐熱粘土膜を複合化させた、既存の非アスベスト製品よりも耐熱性、耐久性、耐薬品性に優れ、さらにアスベスト製品並みの優れた取扱性を実現したガスケット製品を

開発した。開発したガスケットは、製油所などの化学プラント、火力発電所など広範に適用可能である。

4.1 従来のアスベスト代替ガスケットの問題点

多くの化学産業分野では、高温条件下での生産プロセスにおいて、その配管連結部などで、液体や気体のリークを防止するために、ガスケットが用いられている。高温部に対してはアスベスト製品が広く用いられてきた。昨今アスベストの健康被害に対する緊急の対応が迫られていたが、代替品の開発が途上であり、安全性・信頼性の評価も進んでいなかった。膨張黒鉛製ガスケットは、シール性に優れ、長期保存が可能であり、加工が容易であるなどの長所があることから、非アスベスト製品として最も有力だが、黒鉛粉同士の結合が強くないことから、製品表面から粉が剥がれる「粉落ち」、使用後ガスケットに接している金属面に黒鉛が付着して剥がれにくくなる「固着」などの問題点があった。さらに400℃以上の高温で酸素雰囲気下では酸化劣化が進みガスケットが痩せていくため、シール性能が保たれず、使用できないという問題点があった。

4.2 シナリオの設定

4.2.1 膨張黒鉛と粘土の複合化によるガスケットの耐熱性の向上

黒鉛は400℃以上で酸素が存在すると燃焼してしまう現象は根本的な解決が困難である。しかし粘土は酸化物であり、耐熱性に優れている。粘土膜に用いられている粘土は600℃程度までは安定で、これを混合・複合化させて全体の耐熱性を向上させることが考えられた。また、粘土膜は酸素に対する高い遮蔽性を有するため、粘土膜でコーティングすることで酸素の内部への移動を遅延させ、ガスケットの寿命を延ばすことに役立つと考えられた。

4.2.2 粘土層の付与による粉落ち・焼付きの防止

膨張黒鉛表面からの粉落ちについては、現行のフッ素樹脂コーティング品がそうであるように表面に均一な粘土膜コーティングを行うことで解決できると考えられた。また、焼付き防止についても粘土膜コーティングによってフランジの金属面と黒鉛が接しないようにすることができ、焼付き防止に有効と考えた。

4.2.3 ガスケットの表面平坦化によるシール性の向上

ガスケットのコーティングした粘土膜の表面を平坦にし、膨張黒鉛ガスケットと金属フランジ間から漏れる流体の量を低減させることが可能であると考えた。

4.3 要素技術

4.3.1 ナノ複合化技術

粘土はプラスチックよりも耐熱性が高い。さらに、緻密に成型することによりガスバリア性を発揮する。しかしながら、粘土の膜をガスバリア材料として応用する場合に重大

な3つの問題があった。1つ目はクラックの存在である。粘土だけの膜は見た目に均一にできていてもガス分子が透過するような小さなクラックを完全に排除することが簡単ではなかった。しかしガスバリア材料はたった1つのクラックが性能を維持できない原因となる。2つ目は機械的強度の低さである。粘土膜は曲げられるといってもプラスチックほど柔軟ではなく、また膜強度も弱く、さらに一旦亀裂が入ると破断しやすいという問題点がある。3つ目は水に弱いことである。前述したように水によく分散することが自立膜を得るための粘土の条件になるが、これは同時に粘土膜が水に溶けやすいということの意味する。このような材料はガスバリア材料として多くの場合要求される水蒸気バリア性に劣るという問題点がある。ガスバリア材料としては以上の3つの問題をクリアしなければ、なかなか汎用材料としての未来は見えてこない。これまでこの問題点を解決できずギブアップしたエンジニアが少なからずいたのではないかと推察する。

これらの問題点を解決するために投入された技術として、ナノコンポジット技術がある。粘土原料とバインダーとなる有機材料を微視的なレベルで均一に混合し成膜する。多くの場合、粘土表面の帯電状態を利用した粘土の前処理に基づく分散技術が取り入れられる。ナノコンポジット化により、粘土膜のクラックを排除し、機械的強度と耐水性を向上させることが可能である。一般的なナノコンポジットは有機物中に微量の無機物を加えるのに対し、粘土膜は粘土の中に少量の有機物が含まれていることから、両者は全く逆転した組成になっている。

4.3.2 粘土膜製造技術

最適な成膜方法を知るために、数千枚の試作を必要とした。結果的に5年間に渡り毎日粘土膜を作り続けることによって成膜ノウハウを蓄積することができた。その結果、厚みが10 μm 程度の粘土膜についても再現性よくできるようになった。同時にコーティング法についても検討を行い、ディップコーティング、スプレーコーティング、キャスト法、バーコーターを用いる方法などが適用可能であることを知るに至った。前述の研究試料提供契約の際は、ラボレベルではあっても最低限のクオリティコントロールを行うことに努めた。試料の作りこみを行い、再現性を確認し、外部に委託し主要特性値をできる限り多く取得し、特性値表を作成した。また、出荷前チェック項目として明確な仕様を内部で設定した。それらは具体的にはサイズ、厚みムラの程度、ダマなど肉眼で確認できる不均一性の程度などである。このようなクオリティコントロールが粘土膜の製造ノウハウの蓄積に役立った。

4.3.3 粘土ライブラリ

粘土膜に適した粘土を探索する過程で、国内外の130種程度の粘土試料を収集した。これらは天然あるいは合成の粘土で、そのほとんどが市場に流通しているものである。また精製を行っていない安価な粘土試料も含まれている。これらの試料に関する成膜性の評価結果などは現在データ収集の過程であるが、粘土-膨張黒鉛複合材に適した粘土はこのライブラリの中から選定した。

4.4 統合プロセス

4.4.1 膨張黒鉛への密着性のよいコーティング方法の選択

本ガasketは最低でも400 $^{\circ}\text{C}$ の耐熱性を要求される。そのため有機系接着剤を使うことができない。当初は貼付法をとっていた。一定の密着性が得られたが、膨張黒鉛と粘土膜の間に空気が入ってしまうという問題点があった。そこでディップコーティング法を採用した。ディップコーティング法は側面にもコーティング層を付与できる利点がある。試作を行った結果、膨張黒鉛に厚さ約20 μm の粘土膜のコーティングができることがわかった。溶剤としては、水を採用した。

4.4.2 幅広い原料から適切な組み合わせを選択(粘土および添加物、粘土のブレンド)

粘土ライブラリから膨張黒鉛表面への密着性に優れた粘土の種類を選択する作業を行った。今回、粘土膜に透明性を要求されないため、コストの面からこのスクリーニングは天然粘土を中心に行った。その結果、スメクタイトという鉱物を多く含む粘土で成膜性・密着性などが優れていることが分かった。さらに添加物としてエポキシ樹脂、フェノール樹脂、ポリアミド樹脂などが選択され最終仕様ではその中で最も適したものが選ばれた。耐熱性を確保するため、添加量については機械的強度を保てる範囲で最小限に抑えることにした。さらにコーティング液の固液比を高め、乾燥にかかる時間を短縮し、製造性に優れた膜とするために粘土のブレンドを検討した。その結果性状の異なる粘土を混合して用いることで、膜特性に優れさらに製造性にも優れたコーティング膜ができた。

4.4.3 要素試験、実プラント試験の評価結果を改善に生かすフィードバック体制

要素試験については、ガasketメーカーであるJ社が行い、シール性、焼付き試験、取扱性評価などで良好な結果を得た。

開発品の実用化過程においては、GICの会員であるユーザー企業M社の協力を得られることになり、使用実績のないガasketであるにも関わらず、実際の石油化学プラントにバイパスを設置しテストしてもらうことになった。この垂直連携の取り組みがNEDO緊急アスベスト代替開発プ

プロジェクトに採択され、要素試験、実プラント試験の評価結果を改善に生かすフィードバック体制が確立し、安全性・信頼性に関する基礎データが得られ、2007年高温条件下で用いられるアスベスト代替ガスケット製品を実用化した^{[12][14]}。同年9月に大阪に専用工場が竣工し、2008年7月現在全国約40箇所の事業所で用いられている。このガスケットの導入でアスベストフリーを実現した事業所が生まれた。そのような成果が評価され、開発したガスケット製品は2007年第2回ものづくり日本大賞優秀賞を受賞した。

この実用化が短期間で達成された理由は、第一に従来から用いられてきた膨張黒鉛製ガスケットの短所である表面からの粉落ちや焼付きといった問題を、粘土膜のシーズ技術で解決できるのではないかとJ社社長の的確な発案である。他の理由としては、第二にスムーズな技術移転、第三にJ社の技術者の地道な努力、第四にGICによって得られたユーザーの協力と英断、第五にJ社の迅速な経営判断と全国津々浦々に渡る技術営業サービスの実践、第六にNEDO、産総研との緊密なネットワーク、第七に単一企業で生産が可能であったこと、などがあげられる。

また外部要因として、2008年までのアスベスト製品の全廃目標があり、市場が代替製品を必要としていたことがあげられる。現在の開発品はアスベストガスケット製品の約7割を代替可能であり、さらに広範な性能評価試験を行うと同時に、長期信頼性向上などに取り組み、化学プラント産業用に加え、自動車産業用、電力産業用へと展開していく予定である。同時にさらに高温対応の製品等の開発に取り組んでいる。

この他にも、産総研内部のプロジェクトとして、産総研の特許を実用化するための産総研独自の研究開発プロジェクトを2006年度と2007年度に行っており、また多くの資金提供型共同研究も進行中であり、第二第三の実用化に向けて着実に進んでいる。

実用化例を早く作り、この過程で基礎技術、製品化技術を蓄積することも開発を成功させるポイントと考えている。大量生産薄利多売のものは、サプライヤーの生産技術の開発と、ユーザーの製品開発の研究の両者がバランスよく進んでいかなければならないため、市場の形成に少し時間がかかる。一方ガスケットの製品化は単独の民間企業で行うことが可能であったことで、企業連携の形成を待つ必要がなく、短期間で実用化に至った。このような実用化例があると、他の用途に関係する研究者、エンジニア、経営者の実用化意欲が一層高まり、この点においても先行例を作ることが重要と考えている。

5 本格研究における出会いと研究展開

ここでは上に述べたような粘土膜の開発過程を通して本格研究における出会いを分析してみる。

具体的には、発明の形成過程、本格研究に至る過程等での出会いを類型化する。

第1種基礎研究ステージにおいては、人類が粘土膜に出会ってから約70年、筆者が粘土膜の研究を開始してから約5年の時間が経過している。その間、工業製品の種類や素材に対する要求性能が変化したために古いシーズに潜在的な可能性が生まれた。高レベル放射性廃棄物や産業廃棄物の処分場用のバリア層としての基礎研究の過程で粘土膜の製造ノウハウなどの蓄積が行われたが、このシーズ技術はある程度完成され論文や報告書としてまとめられていた。新研究ユニットの設立によって、異なるバックグラウンドを持つ研究者が出会うことになり、マイクロリアクターのシールの問題に直面していた筆者の上司からシール材開発の依頼がされた^{[3][15]}。この出会いのポイントは2つあると考えられる。第一にシーズとニーズのマッチングである。第二に先入観のない提案である。

第一の点については図1を用いて少し詳細な説明を試みる。個人あるいはグループAとBの出会いによって発見や発明などのブレイクスルーが生まれるために、少なくともAに問題解決方法への渴望があるとよい。具体的にはAは専従度の高い研究開発Iの達成のため、足りない技術開発要素Xを強く要求している。Bは研究開発IIの成果である技術 α を有しており、 α はXに寄与するものである。 α のXへの寄与は100%に近い場合もあり、50%程度である場合もある。AとBの出会いのときにBからAの α に関する技術紹介が行われる。特に α のXの寄与率が高くない場合でも、強い渴望が積極的な可能性探求をして α のXへの寄与の可能性を見出す。 α のXへの寄与率が高い場合は、研究開発Iにかかる時間と研究資源(人、予算、設備)が揃っていることから、短期間で発見・発明に至る。 α のXの寄与率が高くない場合は、AからのBフィードバックなどでさらに α を展開し、Xの寄与率が高いものとする必要がある。この場合AとBの協力の合意が必要になる。協力は共同研究IIIという形で行われる場合もある。この段

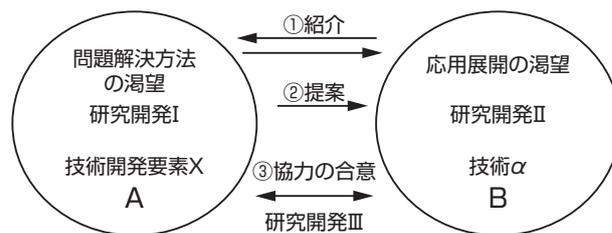


図1 本格研究における出会いと相互の関係

表1 ガasket開発における出会いの形態

| ステージ | A | B | X | α | 研究開発I | 研究開発II | 研究開発III | 研究内容 | 出会いをもたらした機会 |
|---------|---------|---------------|-------------------|----------------|-------------------|-----------------|----------------------|------------------------------|--------------|
| 第1種基礎研究 | 上司 | 粘土研究者 | マイクロアクター用水素ガスシール材 | 粘土膜による均一なフィルム | マイクロアクター開発 | 粘土圧密体による水バリアー研究 | 産総研内部グラント | ハイバリア性の確認、ハイバリア性発現機構の検討 | 新ユニット立ち上げ |
| 第2種基礎研究 | 企業J | 産総研研究ユニット | ガasketの耐熱性向上 | 耐熱ガスシール材 | 産総研内部グラント | | 経済産業省地域中小企業支援事業 | 粘土膨張黒鉛ガasketトバッキングの開発 | 技術相談 |
| 実用化研究 | ユーザー企業M | 企業J+産総研研究ユニット | アスベスト代替ガasket製品 | 高性能ガasket | 経済産業省地域中小企業支援事業 | | NEDO緊急アスベスト代替開発PJ | 非アスベストガasketの開発 | コンソーシアム(GIC) |
| イノベーション | ユーザー企業群 | 企業J+産総研研究ユニット | 高性能ガスシール製品 | 高性能ガスシール製品開発技術 | NEDO緊急アスベスト代替開発PJ | | NEDO大学発事業創出実用化研究開発事業 | 汎用高性能ガスシール製品の開発、標準化に向けたデータ収集 | 製品広告など |

階は産総研内、あるいは同じ研究グループ内では単なる依頼・命令になる場合がある。このとき、Bの技術 α については研究IIが終了しており、活用先を探している状況であると両者の思惑が一致し、合意が得られやすいと考えられる。研究IIが継続中の場合は、すべての情報を開示できない場合もあり、協力も限定的にせざるをえない場合がある。

このとき、Aに期待されることとして、柔軟に可能性探求をすることである。例えば技術 α について、他の技術との複合活用の可能性を含めて想像力を高めることなどである。また、研究計画の柔軟な変更も必要になることがある。次に、Bに期待されることとして、オリジナリティに関する適切な説明がある。Aは技術 α をよく知っていないため、オリジナリティについて間違った理解をする可能性があるからである。また同様の理由で関連技術のうち、 α の採用が最も適切な選択であるかどうかについて客観的な助言をすることが求められる。

このモデルを今回の粘土膜の開発に当てはめてみたのが表1である。第1種基礎研究ステージにおいては粘土研究者がBであり、上司がAとなる。また、第2種基礎研究ステージにおいては、コンパクト化学プロセス研究センターがBであり、J社がAである。いずれの場合も出会いの理想的なパターンに近いと考えられる。さらに実用化研究ステージにおいては、コンパクト化学プロセス研究センターとJ社がBであり、ユーザーM社がAと考えられる。

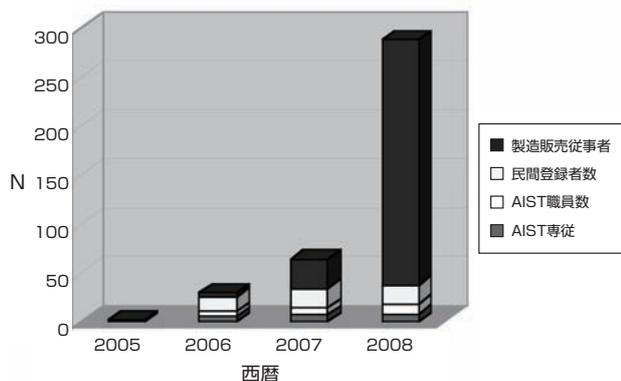


図2 粘土膜研究における関係者の広がり (Nは関係者数)

このモデルのポイントは、本格研究のステージ毎の分析に用いられる点と、出会いにタイミングがあることを含んでいる点である。第1種基礎研究から実用化研究に至る過程で、出会いはより組織内部から外部へと広がっていく。具体的には、粘土膜をもっぱら研究している専従度の高い職員から、専従度の低い職員へ、産総研にID登録している外部研究員へ、そして産総研にID登録していない製造販売従事者へと広がっていく。

図2は粘土膜に関してそのような関係者の広がりを示したものである。関係者の数が増え、ユーザーとして恩恵にあずかる人口が増えることもイノベーション進捗の評価軸の1つと考えられる。

6 統合開発モデル

これまでは粘土膜における個別の製品化開発の議論であったが、粘土膜の製品化研究は製品毎に仕分けされており、それぞれ別の企業等と行われている。また、川上と川下の関係になっている例もある。具体的には、粘土生産の企業と、それを用いた粘土膜の製造企業、さらに粘土膜を用いた製品を製造する企業などである。また、上記のような垂直展開とともに、製品は別であるが技術開発要素を共有する企業がある。それは例えば耐水性の高さ、膜の透明度の向上、ガスバリア性の高さ、などである。これらの企業を含んだ開発全体でバランスされた成果を上げるためには、個別の開発を行う時期から、情報交換によって開発を加速する時期へと移行することが好ましい。守秘義務のために他社との共同研究の内容や進捗について伝えることができないため、産総研が仲立ちになった企業連携を進める方法を工夫しなければならないが、前述のGICの場を利用することによって少しずつ企業間の壁を下げていき連携を進めていきたいと考えている。実用化例を生み出し、企業との共同出願特許が開示され始めている2008年が技術の融合を始める好適な時期と考える。上述の出会いのモデルでは独自技術の確立という点で先行企業をBとし、それに続く企業をAと考えることができる。この連携に産総研が直接関与する必要はない。

このような連携を基にした複数の開発スタイルを「統合開発」と呼び、特に連携を行わない場合「個別開発」のケースと比較する。図3では、粘土膜関連の製品開発A、B、Cのそれぞれが統合開発されている場合、個別開発されていた場合の進捗をそれぞれ実線と破線で描いてある。個別開発のケースでは粘土膜全体の開発はそれぞれの製品A、B、Cの総和と等しい(Ⅱ)。ここで製品開発Aが達成された時点Tで、統合開発型に移行したと考える。製品Aの開発過程で蓄積された技術とノウハウの一部を提供することにより、製品Bの開発が加速される。さらにAとBの開発によって蓄積された技術とノウハウが製品Cの開発に生かされる。統合開発型でなければ生まれなかった製品開発Dが統合開発型の場合に生まれることもありうると考えられる。結果として粘土膜全体の開発は加速的に行われる(Ⅰ)。悪いシナリオとしては、企業間の連携が失敗し、お互いの技術を使うことができなくなり、単独開発よりも製品化が遅れてしまうこともありうる(Ⅲ)。この場合、特許の権利が消滅するまで製品化が遅延することもある(Ⅲ)。

統合開発により生み出されたDに対応する事例としては、高圧水素ガス容器用水素ガスバリア素材の開発がある^{[16][17]}。これは炭素繊維強化プラスチックシートの中に粘土膜を挟み込んだ素材であり、粘土膜メーカー、炭素材料粘土膜複合材料のシーズ技術を有するメーカーなどとの協力で進めている。

7 クレースト連絡会

上述の統合開発を具現化するために、2008年8月にクレースト連絡会を発足させた。上述のように産総研東北センターの産学官連携の研究会であるGICがクレーストの実用化に大きな役割を果たしてきたが、この分科会として作

られたものである。2008年7月現在民間企業30社程度が入会しており、さらに企業間連携を密にしながら粘土膜技術の実用化を推進していく予定である(図4)。

具体的活動内容としては、特許や論文などの最新技術動向提供、粘土ライブラリの管理、連絡会会合の運営、共通基盤技術の提供などである。幹事は産総研の研究者が含まれているが、ほとんどは企業側の会員によって構成されている。統合開発に支障をきたさないよう、細心の注意を払って運営することが肝要であるとの意識からである。

8 まとめ

粘土膜の開発においては、時系列的な意識を強く持ちながら広報・知的財産・技術要素研究・技術移転のそれぞれの連携により戦略的な知財確保(質・量)を行うとともに、粘土膜製造ノウハウの確立と、実用化ロードマップの策定を行った。

第1種基礎研究から実用化研究に至るそれぞれのステージでの出会いが重要であった。このような出会いは、研究グループの融合、広報活動、研究会設立などによって生み出すことができる。これらのアクションを戦略的に開発過程に組み込むことが本格研究の加速的展開に対して有効であると考えられる。粘土膜のケースではアスベスト代替ガスケットという実用化例を生み出すことができた。コントロールされた情報開示によって、産総研が技術・知的財産・情報の中心となり、開発のイニシアチブを取っている。このことは同時に産総研が、企業間の調整役を果たさなければならないことを意味する。コンソーシアム活動は個別の製品開発を効率的に調整し統合するために有効な手段であると考えられる。

最後に、時系列的に単純化したストーリーとするため後

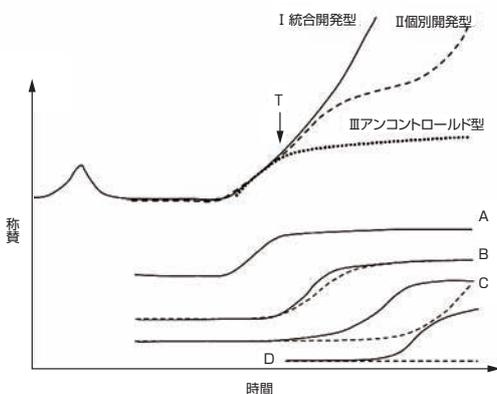


図3 統合開発の概念
A-Dは個別の製品開発展開、実線は統合開発の場合、破線は個別研究の場合

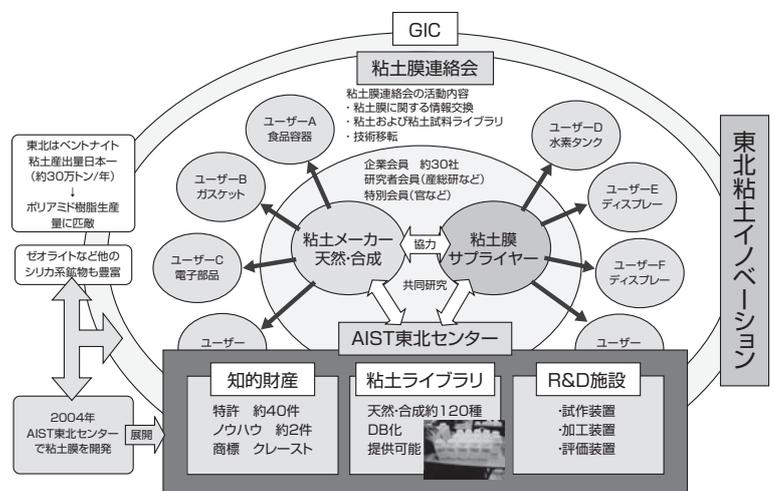


図4 クレースト連絡会－会員間の相互関係

半は製品化研究に偏った論文になったが、製品化研究のみに没頭して、公的研究機関としてすべき基礎研究がおざなりにならないよう留意すべきであり、そのためのマンパワーは常に確保しておくことが必要である。現在は粘土の成膜メカニズムの詳細、柔軟性の発現についての基礎研究を行っている。その成果として天然粘土に匹敵する製膜性を有する合成粘土が生み出されつつある。

謝辞

本成果の一部は独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構の緊急アスベスト削減実用化基盤技術開発プロジェクト（「高温用非アスベストガスケット・パッキンの開発」）による成果である。塚本勝朗氏、佐倉俊治氏、中村雄三氏（以上ジャパンマテックス株式会社）、米本浩一先生（九州工業大学）、奥山圭一先生（津山工業高等専門学校）、長谷川泰久博士、水上富士夫博士、手塚裕之博士、ナムヒョンジョン博士、川崎加瑞範博士、手島暢彦氏、鈴木麻実氏、増田和美氏（産総研コンパクト化学プロセス研究センター）をはじめ粘土膜開発に関わった多くの方々に謝意を表したい。

用語説明

用語1: 他部材の上にコーティングされる膜とは異なり、サポートする部材なしで取扱可能な膜。

キーワード

粘土、本格研究、第1種基礎研究、第2種基礎研究、実用化研究、出会い、コンソーシアム

参考文献

- [1] 蛭名武雄：柔軟な自立耐熱性フィルムクレーストClait, *FC Report*, 23, (3), 109-112 (2005).
- [2] 蛭名武雄：新規耐熱フィルム「クレーストClait」の開発, *未来材料*, (6), 22-25 (2006).
- [3] 蛭名武雄：粘土を主成分とする耐熱性ガスバリア膜の開発, *AIST Today*, 7 (10), 17-19 (2007).
- [4] H-J. Nam, T. Ebina, R. Ishii, H. Nanzyo and F. Mizukami: Formability of self-standing films using various clays, *Clay Science*, 13, 159-165 (2007).
- [5] 白水晴雄：粘土鉱物学－粘土科学の基礎－, 朝倉書店, 57 (1988).
- [6] E. A. Hauser and D.S. Le Beau: Gelation and film formation of colloidal clays. I, *J. Phys. Chem.*, 42, 961-969 (1938).
- [7] 蛭名武雄：スメクタイトとチタン酸化物の複合体, *AIST Today*, 7 (8), 22(2007).
- [8] L.E. Nielsen: Models for the permeability of filled polymer systems, *J. Macromol. Sci. (chem.)*, A 1, 929 (1967).
- [9] T. Ebina and F. Mizukami: Flexible transparent clay film with heat resistant and high gas barrier properties, *Adv. Mater.*, 19, 2450-2453 (2007).
- [10] H. Tetsuka, T. Ebina and F. Mizukami: Highly luminescent flexible quantum dot-clay films, *Adv. Mater.*, in press.
- [11] T. Ebina, Colorful Clay, *Nature (Research Highlights)*, 454, 140 (2008).
- [12] 中村雄三, 蛭名武雄, 手島暢彦: 新非アスベストガスケットの紹介, *配管技術*, (8), 88-92 (2007).
- [13] 蛭名武雄:アスベスト代替ガスケットを開発, *AIST Today*, 7 (4), 22 (2007).
- [14] 蛭名武雄: 最新機械機器要素技術 4.4.4. アスベスト代替ガスケット, *エヌティージー*, 479-481 (2008).
- [15] 蛭名武雄:セラミックス系新素材“クレースト”の可能性, *デントルダイヤモンド*, 31 (435), 170-173 (2006).
- [16] K. Yonemoto, Y. Yamamoto, T. Ebina and K. Okuyama: High hydrogen gas barrier performance of carbon fiber reinforced plastic with non-metallic crystal layer, “*SAMPE*” 08, CD-ROM, Long Beach Convention Center, Long Beach, CA, USA, May 18-22, (2008).
- [17] 蛭名武雄: 水素ガスバリア性の高い複合材料を開発, *AIST Today*, 8 (8), 19 (2008).

(受付日 2008.7.22, 改訂受理日 2008.9.1)

執筆者略歴

蛭名 武雄 (えびな たけお)

1993年東北大学大学院工学研究科博士課程を修了し、通商産業省工業技術院東北工業技術試験所に入所、2度カリフォルニア大学サンタバーバラ校で在外研究して粘土を含む機能性材料の研究を行う。現在、コンパクト化学プロセス研究センター材料プロセッシングチーム長。2004年以降粘土を主成分とする膜材料の開発に従事する。原料粘土の合成から応用製品の大量生産方法まで幅広く研究する。粘土膜の用途としては合成粘土を用いた透明フィルムとそれを用いた電子デバイスなどがある。

査読者との議論

議論1 論文の全体構成について

質問・コメント (立石 裕)

本格研究全体をまんべんなく記述したため、焦点が不明確になり、シンセシオロジーの主眼である、第2種基礎研究の部分が不十分であるとともに、特に、前半がクレースト開発の「解説」になってしまっているように思います。論文の焦点が、「クレーストの実用展開」の記述にあると思われるので、構成を工夫した方がよいと思います。

たとえば、「研究の夢」が「粘土膜の実用化、具体的な事例としては、アスベスト代替ガスケットの開発」であり、「研究の社会的価値」が「耐熱性ガスバリア膜による、新規ニーズへの対応」であるとして、それに応じたシナリオの設定、要素技術の記述とその統合プロセスの記述ができるのではないかと思います。論文としては、時系列的にすべての経緯を網羅する必要はないので、もう少し取捨選択された方がよいと思います。

回答 (蛭名 武雄)

確かに本格研究の全ての要素の記述を省かないようにした結果、焦点が不明確になっております。指摘いただいた点につきまして、構成を再検討しました。「研究の夢」が「粘土膜の実用化、具体的な事例としては、アスベスト代替ガスケットの開発」であり、「研究の社会的価値」が「耐熱性ガスバリア膜による、新規ニーズへの対応」であるとして、それに応じたシナリオの設定、要素技術の記述とその統合プロセスの記述としました。

議論2 発想の転換に至る過程の加筆について

質問・コメント（立石 裕）

粘土膜のガスバリア性の発見において、「逆転の発想」になぜ到達したのか、の記述があるとインパクトが強くなると思います。現状の記述では、単なる思いつきとれなくもありません。

回答（蛭名 武雄）

「逆転の発想」の部分についてどのように発明に行き着いたのか議論が不十分でした。この点について、ルーチンの研究からどのように過度の努力をし、同業者が単独では容易に想到しえない発明にたどり着いたかについて中身の記述をいたしました。

議論3 本格研究における出会いの相互関係について

質問・コメント（五十嵐 一男）

図1中でAがニーズへの渴望、Bが応用展開の渴望とありますが、この2つは、文字は異なるものの同じ内容を言っているように見えます。差異があるのでしょうか。また、AとBの関係において図からは常にAがイニシアティブをとるように受け取れますが、そのような理解でいいのでしょうか。

回答（蛭名 武雄）

ご質問のとおり、Aのニーズへの渴望とBの応用展開の渴望は同じ内容を言っているように見えます。この点改めて整理して考えますと、Aは問題解決方法の渴望ということがいえます。Bの方が、時系列的に研究が進んでいますので、問題解決方法というよりは、得られている研究成果の応用展開の渴望といえると思います。この点、Aについては問題解決方法の渴望と訂正いたしました。

AとBの関係において常にAがイニシアティブをとっているように受け取られます。この解釈は強引な類型化であり、どれほどの事例がこのパターンに当てはまるかは議論が必要だと思います。それでもあえてAとBに異なった位置づけを行ったのには、2つの理由があります。1つ目ですが、このような分析が出会いの機会を意識的に作る場合に有用と考えたからです。現在自己のステータスがAであるのか、それともBであるのかを判断し、実りのある出会いをするためにどのような相手

を探ることが効率的か方針が立てられる利点があると考えました。2つ目として、AとBを同じ位置づけにして議論をするパターンも考えられますが、この場合出会いの内容についてそれぞれの立場に立った議論ができず、AとBにざっくりとした特徴が必要でした。一見同じような立場の二者間でも、技術の内容が詳細になっていけばAとBへの特徴付けは可能と思います。たとえば、1つのプロジェクトにおいて技術開発要素X1とX2があり、技術開発要素X1に関しては、Aの立場であったとしても技術開発要素X2に関しては、Bの立場になるということはあることです。このとき二人は総体としてはほとんどイーブンの位置づけとなります。また、出会いから短時間はどちらかがイニシアティブを取り、すぐに共同開発に移行する場合も当然あると考えています。

議論4 統合開発の概念の整理について

質問・コメント（五十嵐 一男）

図3において、Dは統合開発が行われた結果として生まれることもありうるとされていますが、時系列でみるとT時点よりもだいぶ前から線が引かれています。その理由は何でしょうか。また、フラットな線は何を意味するのでしょうか。

キャプションではDも個別開発と記載されていますが、統合開発の結果生まれたものは個別開発することを意味するのでしょうか。

回答（蛭名 武雄）

確かに図3につきましては、このままでは誤解を生み出す形になっており、より分かりやすく訂正が必要と存じます。まず、Dはご指摘の通り、T時点から線が引かれるべきと存じます。また、また引かれている実線はII個別研究型の場合の推移であり、これがI統合開発型の場合にはBからDはより早い時期にブレークスルーが起こります。この線を追加することにいたしました。その結果として粘土膜関連の製品開発A、B、C、Dのそれぞれが統合開発されている場合、個別開発されていた場合の進捗をそれぞれ実線と破線で描きました。