

制御工学の新分野応用

小林 法政大学の小林と申します。このセッションは制御工学の新分野という、変で平凡なタイトルです。その経緯を説明させていただきます。自動制御連合講演会が昨年で50周年を迎えて今年で新しい半世紀に入りました。この講演会は5つの学会がサポートして、3つの学会が幹事会ということで、機械学会と、システム制御情報学会、計測自動制御学会が、順に担当して運営してまいりました。また、日本学術会議の自動制御研究連絡会というのをございまして、裏からこの連合講演会を支えているというような体制だったのです。学術会議の機構改革もありまして自動制御研究連絡会がなくなりました。そこで、この自動制御連合講演会は、長期ビジョンで考えて運営する組織が必要とのことで、新しい組織を作りました。それが日本学術会議、総合工学委員会、知の統合分科会、自動制御の多分野応用小委員会とう長い名前のもので、この委員会のミッションは自動制御をより多くの分野で適用する可能性を探ることと、この自動制御連合講演会の長期的、大局的運営です。こういう問題を考える契機として、このラウンドテーブルディスカッションを企画させていただきました。

いろいろなお話でありますように、制御工学というのは非常に強いツールです。そして、これから特に「攻め」に入っていかななくてはいけない、いろんなどころで役立つということを積極的にアピールして、かつ、社会貢献をしていく必要があると思っております。この自動制御連合講演会自身は、先ほど申し上げましたように、5つの幹事学会、それから四十いくつかの協賛学会があって、非常に横断的で、本来はものすごく可能性を持った組織であるはずで、ぜひ、活性化させたいと思っております。その意味で、きょうは忌憚（きたん）のないご意見をいただきたいと思っております。

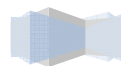
二人の方に話題提供をお願いして、そのあと、皆様を交えてディスカッションさせていただきたいと思っております。

申し訳ないのですが、あとの参考にさせていただきたいので、きょうのディスカッションはすべて録音させていただきます。従いまして、質問の際にはご所属とお名前をいただくと幸いです。もちろん、どこかに載せる場合には、ご連絡をしたいと思いますので、その意味も含めて、ご所属とお名前をおっしゃっていただければと思います。

きょう、最初のお二人の話題提供者は、奈良先端科学技術大学院の西谷先生です。化学工学会の代表として、この運営委員会に参加されております。化学の話を書くチャンスがないものですから、是非ということをお願いしております。そして、もう一人は早稲田大学の内田先生で、内田先生は「制御」という意味ではみなさんご存じですけれども、きょうは「バイオ」ということで、お話をさせていただいております。

では、西谷先生のほうから、よろしく願いいたします。

西谷 ご紹介いただきました西谷です。よろしく願いいたします。非常に小さな資料で申し訳ないんですけど、ディスカッションのためにと言うことで、メモ代わりに急ぎよコピーさせていただいたも



のを参考にさせていただきたいと思います。

私自身は化学工学に長くおりまして、それから今は情報科学というところにいるんですけども、きょうお話しするのは、化学工業というのが、今どういうふうになっているのか、そういうことをご紹介したいと思います。

知的統合生産システム、こういう言葉は初めてかもしれないのですが、ここにおける包括的な課題について、ご紹介したいと思います。

これが2000年に、次世代化学工場ということで、21世紀を前に、21世紀になったらどういう化学工場になるのだろうか、といういろんなビジョンもイメージも出されたのですが、これは実際にこの形で運用されているダイセル化学という会社の網干工場の、プラントエリアA,B,Cという3つのエリアがあって、こういうような形で1工場1制御室という、そういうようなものを実現したもののなのです。このイメージというのは、戦艦ヤマトと言いますか、アニメの戦艦ヤマト、その操舵（そうだ）室をイメージして作ったものであるというふうなお話もあります。

それで、どういった背景でこういったものができたのか。これを見て、そんなの当然だろう、というふうに思われるかもしれないのですが、プロセス制御というのは50年代、60年代、一番産業を引っばったわけなのですが、その後、やっぱりいろんな問題があって、なかなかこういうスマートな形にならなくて、先ほどどなたかのお話にもあったのですが、いろんなところが、やはりこういう形にしたい、ということで積極的に試みておりました。

実は今年の3月に経済産業省 製造産業局 化学課で、生産革新研究会というのがありまして、1年半から2年ほど、活動したのですが、その成果報告書というのがこの「化学／プロセス産業における革新的生産システムの構築 ～新たな生産方式の胎動～」ということで、非常に低迷している製造業、特に化学工業とか、そういうものを新しくしよう、ということで、今、経済産業省も非常に関心を持って、研究会を作って、報告書をまとめました。公開されていますので、これもメモに書いてありますが、見ていただけるようでしたら、ダウンロードできますので、ご覧いただきたいと思います。（補足：<http://www.meti.go.jp/policy/chemistry/index.html>）

報告書の内容はどういうものかと言うと、生産革新というような言葉で言っているわけですね。次世代化学工場ですが、生産革新、プロダクション・イノベーションというような言葉で言われています。これはどういうものなのか。ダイセル化学工業株式会社はなぜ成功したのか、その内容はどうか、というようなことを紹介しています。それで、先鞭（せんべん）をつけたダイセル化学の事例、それから、そのコンサルを受ける形でいくつかの企業が取り組まれております。まだ完成したわけではないのですが、その途中経過も報告されています。ということで、今非常にいろんなところでこういう化学工業だとかプロセス産業では、注目されている、ということです。

それで、そもそも化学工業とか化学産業というのは、どういう問題を持っているのか、というのがこの・・・ちょっと見にくい図で申し訳ないのですが、要するに国際競争力を強化しないといけない。これはもう言われているグローバル化経済の中で、そうなのですね。それから、安全生産の確保。これもときどき、事故を起こして、新聞をにぎわすわけですが、安全が崩れてしまうと、要するに会社の存続すらなくなるという、そういう背景があります。

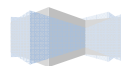
それから、2007年問題と言われるように、ちょうど日本のコンビナートというのが、30年、40年とたつて、非常に老朽化しているわけです。プラントというのは、作ったらすぐに動かすわけですから、その時に、どどっとオペレーションの人とか入るわけですが、その人たちが大量に定年を迎えているということで、技術の伝承の問題があります。

それから、従来の生産改善方式ということで、TPMとかTQCとか、そういうような言葉でみなさん聞かれているかもしれないのですが、そういうもので、いろんな改善をやってきたのですが、どうももうひとつ進まない、というような、そういった現状があります。

そういう中で、化学産業というのはどういうことを考えてきたかと言うと、イノベーションというのはいろんな意味があるのですが、要するに、競争力のある、良い製品を作れば絶対に勝てる、というような戦略ですね。それから、同じものを作るのですが、プロセスそのものを省エネルギー型だとか、そういうことで、新しいプロセスでやれば競争力がつくよ、と。こういうことに熱心に取り組んできたんですが、どうもなかなかヒットが出ない、ということなのですね。

そういう中で今回の生産革新というのは、要するに、同じものは作るんだけど、同じプロセスなのだけでも、どういう作り方をするのか、組織を含めて、人がどういうふうにかかわっているのか、そういうところに注目をして、特に生産現場における意思決定、その革新を図る、ということです。どれくらいの効果が挙げられるのかということなのですが、例えば、目標となるのは、「人生産性というのを約2倍」とか言うようなことを目標にするということで、始められるわけです。ですから、ただ単に普通の改善というのは、大体コストで、例えば3%というのがせいぜいだと言われているわけなのですが、この生産革新ということになると、10%、20%というような、そういう削減を見込まなければならないわけですね。それから、従業員数というものも、相当、たとえば60%下げると。こういうような活動であります。それで、ダイセルが成功した方法というのは、この「段階型のアプローチ」と書いているように、ここに第0段階、1段階、2段階、3段階と・・・0から始まりますから、悲惨なのですが、まずは無駄ロスの再認識をする。要するに生産革新をなぜしないといけないのか、という、そういうモチベーションから始めまして、それで、次に無駄ロスを徹底して排除します。生産革新をするためには、いろんな負荷がいります。そのための時間的な余裕をどうやって出すのか、ということをやっていくわけです。

その次が作業の標準化ということで、トヨタ生産方式でも言われるように、要するに作業を標準化する。そのために、加工組み立てと違うのは、プロセスというのは、センサー情報で、頭の中でものを考えて、意思決定をするというような、そういう性質を持っているわけです。そういうことを顕在化させるために、ここに書いてある総合オペラビリティスタディ、あとで少し説明しますが、そういうことをやります。そのあとでやると生産システム構築ということで、DCSと言われている、Distributed Control System・・・1975年から、そういう中央演算処理装置(CPU)が分散されたような形でこういうプロセスの生産現場にあるシステムを、作りこむわけです。普通、制御屋さんとか計装屋さんというのは、それぞれこういうところにも、いらっしゃるわけですが、こういうところで活躍されているのですが、このベースの部分というのが、実はあまり得意ではないと言うか、コンツリビュートされていないんですね。



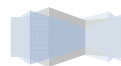
そもそもなぜこんな動きが出てきたのかというのを、歴史的に見直してみますと、1990年代の米国の製造業で、ものづくりにおけるパラダイムシフトというのが起こりました。それは何かと言うと、向こうは分業、分業ですよ。ですから、分業して、部分最適でもって、トータルすれば全体の最適だというようにやってきたのですが、そういった継ぎはぎだらけの部分最適を集めたのでは、ダメだ、ということで、工場全体の最適な視点から全面的な見直しが必要だということで、**Re-engineering** という言葉が言われたのが1990年です。日本はちょうど、91年とか92年にバブルが終わって、失われた10年とか言われているような、そういう時代があるわけです。それからこういう中でも、日本でも**Re-engineering** というのを一生懸命取り組もうとした企業も多いのですが、石油というのは実は92年に処理枠を取っ払う、要は自由競争にさらされるというような状況が出たわけです。そういう危機意識から、石油学会の経営情報部会では、94年に、こういう石油業における生産システムと、人の役割ということで、ここで知的統合生産システムというものを提案されています。この考え方というのは、やはり米国流の**Re-Engineering** ということで、リストラだとか、そういった人を減らすということではなく、もう少し人を中心に、日本的なものづくりの良さというものを活かした生産システムを作れないか、というようなことで考えられたわけです。人の役割を中心においたシステムづくり、そして、ものづくりの基本に立ち返り、ものづくりの喜びを実感できるシステム。言葉で言うのは簡単なのですが、これをどう具体化するのかというのが、なかなか難しいわけです。

それで、その「ものづくりの喜びを実感できる生産システム」。言葉は、良いのですが、その基本コンセプトになっているのは、人のかかわり・人の役割がはっきりしており、人の役割に応じて生産活動全体が見える。それから問題解決能力を発揮できる。それから各自の役割が、「ものづくり」に反映されていることが実感できる。こういうことによって喜びを感じられる生産システムにしようということで、人を中心として、生産工程、それから生産支援機能を有機的に結合したシステムを作ろう、ということです。これはまだアイデアだけです。

それから同じような説明ですが、人の役割と、設備、生産工程などの各機能を明確に位置付けた上で協調が進められて、情報の共有と活用が図られた生産体系において、企業としてはやはり工場出口の利益最大、コスト最小にする、これを実現するような工場全体最適を実現する。コンセプトというのは、こういうものなのですね。

どのようにこれを実現するかという話です。残念ながら石油のほうは、こういうふうに危機意識が非常にあったもので、こういった活動があったんだけど、実際には実現しませんでした。この中で言われた、こういう知的統合生産システムを具体化する鍵になるのは、一つは工場全体業務の変革。それから2番目に生産情報システムの再編。残念ながら工場の計装屋さんというのは、ここ（2番目）からいくわけですよ。ここ（1番目）をすつとばすというようなことがあるわけです。今回、ダイセル化学工業が成功したのも、中心となったのは、残念ながら計装関係の人ではないんですね。そこにも、われわれが考えるべきことはあるんじゃないかなと思います。

それで、実はアイデアは94年ごろに、石油などの危機意識で出たわけですね。ダイセル方式という、今年、報告書が出た内容というのは、実は、この「工場全体の業務の変革」「生産情報システムの再編」ここを先ほどの4段階の0段階、1段階、2段階、ここを非常に大切にしているわけです。もちろん、このシステム化ということでDCSベースにした知的統合生産システムを作る。もちろんこれは、最終的



に必要なのですが、この第0段階、第1段階、第2段階、ここを徹底してやるということが、生産革新の一番のキーになっているということです。

化学産業における、ものづくりの特徴というのは先ほど申しましたように、大きな装置の中にあるわけで、すべての情報というのはセンサー情報をもとに見ることしかできない、ということです。ですから、その情報処理・判断が伴うということになるわけです。原料や製品を直接見ることはできない、それからセンサー情報を見た人がとるべき対応を選択しないといけない、なぜそうなのか、どのように考えたのかを明らかにしない限り、生産現場の実態は見えないということです。そこでやったのが、そのオペレーターが操作をした際に、何をどのように考えていたのかを徹底してインタビューする。これはナレッジマネジメントなどの言葉で言われる「暗黙知の形式知化」なのです。それから、ヒアリングを徹底して行うというのは、それを科学的に検証して正しい判断、意思決定を抽出すること。その結果を系統立てて、ケーススタディーとして蓄積するというので、一つのプラントについて数万から数十万のケーススタディーというのが出てきます。こういうものが出れば、例えば支援に使うだとか、どういうふうに自動化すればいいかという、そういうベースになるわけです。こういったことをするのが、総合オペラビリティスタディというものなのです。

それで、もう少し総合オペラビリティスタディについてご説明いたしますと、計装点という、センサーのあるポイント、そこでいろんなデビエーション、いろんな変動を考えて、もしそこに変動が起こったとしたら、その原因は何だろうか。それから、そういったことを知るためにはどういう検知手段があるのだろうか、それが、例えば安全だとか安定だとか品質だとか、コストに対してどういう影響を及ぼすのだろうか。その時にどう対応すべきなのだろうか。ということを組織だって、網羅的にやるというのが、オペラビリティスタディなのです。

日本では、安全性評価に、HAZOP (Hazard And Operability Study) というものが使われております。それがベースになっているのですが、残念ながらオペラビリティスタディと言われる。要はオペレーターが気にしている、品質だとか安全だけではなくやはりコストだとかデリバリーだとか、いろんなことを考えながら、やらなければいけないわけです。ですから、そういったことに注目してこういった総合オペラビリティスタディというのを徹底してやる。そういったことで暗黙知化している、実際のノウハウを顕在化させようということです。

そうすることによって、プラントのオペレーションというのは、監視操作と言われる **human supervisory control** なのです。制御システムを監視制御するのは人間なのです。もちろん、将来無人になるかもしれません。完全に自動化できる、21世紀の前はそういった夢を語っていた時代もあります。ところが、やはり人が残るわけです。そういう中で、ここに書いてあるのは職長さん、オペレーターA、オペレーターBの役割です。プラントというのは、一度運転を始めると止められません。ですから、24時間フル操業です。その代わり、交替制勤務で8時間ごとに変わるということで、チームを組んでやるわけです。その職能と言うか、職階に応じてやるべきこと、意思決定、何をしないといけないかということが決まっているわけですね。そういう人たちが、何をみて、どう判断して、どういうことをするのか、オペレーションフローと呼んでいるのですが、こういうものを、きちんと書こうよ、ということなのです。こういうことがオペラビリティスタディを通してできます。こうすることによって、例え

ば職長さんは監視するのにどういうデータベースがいるのか、ですとか、担当オペレーターに対してどういうふうに監視するのを助けるのか、判断するのを助けるのか。いろいろなオペラビリティスタディの結果を使っているいろいろなサポートを考えることができます。

もちろん、非常に手順がややこしいような状況の時には、それを自動化しろ、というようなことも当然あるわけです。

こういうものを、部門的にはいろいろやってきているのですが、これを今一度、全面的に見直すということが生産革新の出発点になるわけです。そういうふうにして出てきた支援ソリューションというのが、シングルウィンドウオペレーションです。CRT オペレーションの現場をご覧になった方はお分かりになると思いますが、一つの画面の中でいろんなグラフィック画面を開いては、何かしないといけないと言う、そういった煩わしさがあるわけです。そういう任意の切り替えができるだとか、それから「アラーム情報の集約と運転ガイダンス」ということで、DCS というものが導入されてからアラームが簡単につけられるようになりました。ですから、Alarm Driven Operation と言われるように、アラームが鳴って初めて「それ、何か」ということでオペレーターが動き出す。そういった時に、やはり的確な情報を与えなければいけない、ということです。それから「プロセス状態の予知・予測」。これを放っておいたらどうなるのか、という情報も、やはりオペレーターに積極的に示そう、ということです。それからいろんな異常状態が起こります。変調事例というのはいろいろあるわけですから、そういったものが簡単にオンラインで、リアルタイムに検索して参照できるようなシステム。それから非定常運転操作で面倒な操作手順が入るようなものというのは、標準化して、自動化しようということです。それからこういった新しい支援システムを作るわけですから、きちんと訓練しないといけませんので、オンラインでそういった教育をするようなシステムを作りましょうということです。こういったものが支援ソリューションとして作られております。問題は、これらはみな、知的所有権の対象になるわけです。つまり、特許化されているわけです。ですから、いろんな問題があります。こういったものをまねしたいんだけど、なかなかまねできない、ということです。

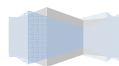
計器盤を使ったプラント運転はボードオペレーションと言うのですが、1975年に、DCS というシステムが日本でもできました。ボードオペレーションから CRT オペレーションに移る時は、いろんな心配がされました。ですから、バックアップ、後ろにこれ（計器盤）を残して、こちら（CRT）でやる（操作する）、というようなことだとか、原子力のほうは非常にコンサーバティブですから、最近までやはりこういうものが中心になっていたわけです。切り替え時に心配されたことというのが、実は、こういう世界（ボードオペレーション）からこういう世界（CRT オペレーション）になった時に、プラント全体の状況把握ができないということです。これ（計器盤）だったら、少し後ろから見れば、全体が分かるのですが、こういう一つの CRT スクリーンであれば、その必要な画面を探さなければいけないわけです。ですから、その全体が分からないとか。

それから、適正画面を早く展開したいと言うのに、なかなか難しいとか。

それから、チーム内での情報共有。こういう形でしたら、「おい、となりどうだ？」っていうような感じですが、これはそういうわけにはいかないわけですね。

それから、アラームが頻発する問題だとか。

それから、緊急時というのは最も大変になるわけです。こういうような問題がありました。



DCSの出発点は、1975年ですから、今年2008年ですので、ようやく30年もたとうとしているわけです。やっとうこういったヒューマンインタフェースの貧弱さに起因する問題が、先ほどのような徹底した、人は何をやっているのか、ということ丁寧調べることによって、解決するようなソリューションが出てきている、ということなのです。

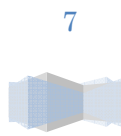
こういうご紹介です。それで私はきょうのセッションのタイトルにある「いったい何のための、誰のための自動化なのか」ということを、きちんと製造技術者というのは、考えなくてはいけないのではな
いか。「人の役割を分析する。」機械のほう、システムのほうばかりに気はいくのですが、本当に人は何をすべきなのか、システムには何をやらせるべきなのかということ、考えることができる技術者でなくては
いけないのではないのでしょうか。それから、意思決定プロセスを顕在化させる。今まではヒュー
マンインテリジェンスと言うか、日本のオペレーターは優秀です。昔、こういったことを言おうものなら、
ばかにされたわけです、企業の方に。「うちのオペレーターは優秀です」なんて、そんな余計なこと
言わないでくれ、と怒られたこともあります。ですが、やはり2007年問題だとか日本の恐れられている
現状だとかを考えた時に、そういった暗黙知化したノウハウを取り出す必要があります。もう30年、40
年たったコンビナートでは、最初はプラントデザイナーがちゃんと設計して、オペレーションに落ちる
わけですが、人の世代がどんどん変わってきた時に、ほとんど今、技術スタッフと呼ばれる技術者とい
うのが、実際に現場で行われていることというのは、よく分かっていないというような状況があります。
そういう意味でも、意思決定プロセスを、ノウハウを、顕在化させるというのが非常に重要なことにな
っています。

それから、知的生産性を向上させる支援。これはやはり新しい知的統合支援システムでは、それぞれ
働いている人が、それぞれの階層において、働いている喜びだとか、モノを作っている喜びというもの
を、感じられるようにしなければいけない。そのためにはその人の業務を適切に支援するようなことを
考えなければいけない。そういったことを考えた上での支援システムなのだということです。

それから「自動化・システム化の総合的な評価」。単純に自動化すればいいというわけではなくて、それ
を、監視・操作する人間がいるのだ、ということ、重々考えた上で判断する必要があります。

それと、「人とシステムの共存」それから「システム挙動の透明性」というのは、要は自動化していま
すと、見えなくなるのですよね。ですから、システムがどういうふう動いているのか、ということが
オペレーターにも分かるし・・・もちろん、オペレーターもそれを学習する必要があるのですが・・・
そういうことも考えなくちゃいけない。ですからただ単に、PID制御がプロセス系は90何%なのですが、
PIDパラメータのチューニングだとか、それはやれば良いと思うのですが、やはり、なぜその制御が必要
なのか、この辺はちゃんと企業の中で説明できるような技術者でなければ、その企業の中での技術者
としての存在感というのは非常に乏しいのではないかと心配しております。

これは余談なのですが、今年の7月29日にダイセル化学工業の取り組んだ生産革新というのが、企業
を活性化させる一つの方法になるのではないかとということで、珍しいことですが、こういうような話題
が社説で取り上げられています。企業の中に蓄積されたノウハウをどう継承していくのか。これは単に
化学工場の話だけではないでしょう。日本の政府とか、日本の経済自身が非常に高齢化しています。そ
ういうものを見直す上で、こういうダイセルがやったような方法を考えてはどうですか、という内容の



社説です。興味のある方は、ぜひ読んでいただきたいと思います。(補足：2008年7月29日朝日新聞社説「ノウハウの継承 “企業若返りのテコとして”」)

話題提供になったのかどうか分かりませんが、私からのお話は以上とさせていただきます。どうもありがとうございました。

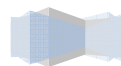
小林 西谷先生、どうもありがとうございました。非常に新しい、私などは考えたことのない局面をお話いただきました。少なくとも「人」とか「喜び」とか言うキーワードは普段、エンジニアはなかなか考えない部分があると思います。西谷先生のお話について、ご質問、ご意見、あるいはご感想がありましたら、お願いしたいと思います。

大久保 山形大学の久保です。こういった知的統合化システムというものを、構築するにあたりまして、いわゆる日本のところにおいては、全体の結合が非常に密であって、いわゆるフレキシビリティがないシステムになりやすいと。従って、時代とともに変革とか、改良とか加える場合に、ほとんどそれが不可能で、実際にも新しいシステムで改良しようとする全部工場全体からシステム全体を新しくしないといけないとか、そういうようなことがよく言われるわけですが、日本においての、いわゆる化学工場のプラント知的統合化システムというのは、この融通性とか、フレキシビリティとか、「この部分だけをただモジュール的に取り換えればいいんだ」とか、そういうようなことを考えながら、構築されているのか。あるいはそういったことはまだ検討されていないのか。その辺に関しまして、情報がありましたら、ご教授を願いたいと思います。

西谷 「フレキシビリティ」というのは非常に大事なことだと思います。ですからシステム構築で、考慮するポイントとしては、やはりそういうことを考慮した上で・・・要するにモノは変わりません、プロセスは変わりません、だけどその生産システムの中では、先生がおっしゃるように、そういうことも十分に考慮した上でやらないといけません。それからもう一つは、考慮したとしても、時とともに変わってしまう。その時にフレキシブルに対応できるような、そういう仕組みをどう作るのかというのは非常に重要なものだと思います。簡単なものっていうのはあり得ないと思うのですが、そういうことも十分に考えた上で「何かちょっと変えようよ」といった時にそれができるようなシステム、できるだけのは考えておこうよというような、そういうふうを考えているということが出来ます。非常に重要なポイントだと。

小林 ありがとうございました。ほかにありますか？

―― 途中で「新しいパラダイム」というお話で、日本の化学工場、でそこまで出来上がっていて、でも石油関係ではうまくいかなかったというお話をいただきましたけれども、なぜうまくいかなかったのでしょうか？



西谷 これはあまり言うとは跳ね返ってくる部分があるのですが、でも・・・一つは、石油というのはある意味、ほとんどすべてが輸入なのですね。技術から何から。ですから、それなりに資本力もあります、ほかの小さな化学工場に比べて。だからそんなに米国のリファイナリと比べてそんなに劣っていないだろうという考え方も一つあったと思います。それから、やはり日本の組織というのは、なかなかこう・・・言うのは簡単ですよ、成功したところがあれば「おお、うまくやったなあ、やりたいなあ」と思うんです。やっぱりなかなかできないんですよ。その辺の、やはり僕はマネジメントの問題だと思うんですけども、危機意識はあって・・・これを書いた人は非常に若いエンジニアがコンセプトを出しているんですよ。それはやっぱりマネジメントでそれを分ける人がいなかったんじゃないか、と思います。一部試みられたものもあるんですが、実はそれが残念ながら閉鎖されたとか、いろんな細々したところはあるんですけども、基本的にはやはりマネジメントが、若い人の危機意識、それが本当に理解できていなかったのではないかと思います。

―― ありがとうございます。

小林 ありがとうございます。引き続き、内田先生のお話を伺いましたあとに、議論を続けたいと思います。

内田 それでは。早稲田大学 内田です。お配りしている用紙には、最初どういうタイトルにしようか迷って、下に書いてあるような形にしたんですが、これだけじゃちょっと 15分持たないなあと思ったので、少し前ふりをつけたので、こういうタイトルにしています。

今回はこのマルチレベル統合モデリングという内容でお話ししようということだったのですが、これについてはきょう、池田先生が学術会議の総合工学の中で「知の統合」という報告書を出されたというお話がありましたけれども、それに引き続いての話になります。報告書では具体例で「知の統合」を示そうと、こういうふうに進んでいるのだ、あるいはこういうふうに進めるべきだということを示そうということになりまして、その中で、私の担当として、生物システム、特に生体ですね、そういうものに関して統合モデリングの話を勉強して報告することになりました。

もう少し具体的に言いますと、「イノベーション25」の中一つで選んだものが、大阪大学の倉智敷先生が提案されていた、マルチフィジックス、マルチレベル統合、生命体統合シミュレーターに基づく医療の革新です。もう少しタイトルがついていたと思いますが、それを少し勉強しました。それについて話をするように、ということだったので、こういうタイトルにしています。15分ですからあまり時間がないのですが、この辺のところで、その課題ですね。統合モデリングとは何かということと、その中でこんな問題があると。きょうは例を4つほど用意していますが、この例を紹介することで、私の話題提供にしようとは思っています。

この4つの話題を紹介したいと思います。それがどうしても細胞、分子のレベルになるので、ちょっと細かい話になると思います。後半の部分を主にやりたいと思います。

まず、なぜ生物と制御が、かかわり合うのか、ということで、これは制御理論で有名な Sontag が論文の中で書いている分類を使って、4つに分類しています。なぜ制御工学と生物・生命が関連していて、現状はこうなっているという分類をしていまして、一番関係が深いと言われているのが、医療工学、生物

工学ですね。この辺に、IEEE のトランスアクション、こういうマガジンやジャーナルはその辺のことやっているのです、というようなことが書かれています。それから、生物におけるいろんな制御の問題があるわけですが、その中で現状、われわれが使っている制御理論がどういうふうに適応されていて・・・適応できるか、あるいは説明できるか、応用できるか、というような研究、あるいはそういう応用的な報告がなされている雑誌としてはこういうものが最近出ているというようなことが書かれています。

きょうはこの話も少し関係してくると思います。それからこれは、サイバネテックスには両面あると思いますけれども、生物から学ぶシステム。こういうふうに「制御」とは付いていなくて、システム工学だろうと思うのですが、ここでは制御工学の応用ということもあったので、「制御」とつけています。こういう分野というのはたくさんあるのはご存じだろうと思います。

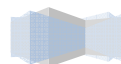
それから、この辺のところに、私自身も興味を持っているのですが、生物の新しいシステム制御理論。要するに今現状の制御理論では、なかなか説明できないようなものに新しい理論を考えないといけないだろうということ、あるいはそういうものの中に制御の新しいテーマがあるよね、というような、そういう分類のしかただと思います。

きょうの話は分類の 2 番と 4 番に関連すると思います。それから、なぜ制御というのが生命・生物とかわり合いがあるのかと言いますと、生命現象というのは、いろいろと異論があるかも知れませんが、機能の発現だということにすると、機能を実現するためにはどこかに制御メカニズムがあるはずだ、というわけです。当然そういうメカニズムを見ることで、生命現象を理解する、理解が進むという一面があります。これは、われわれは制御工学をやっていますから、意識しませんが、物理化学、要するに生命・生物も結局物理化学の法則に帰着するという言い方があるのですが、実はやっぱり違う次元の話が生物の中にはあります。「生物学」という学問があること自身が・・・物理化学とは違う局面があるわけですね。その違う側面の大きな部分に、私の理解では、制御というのは非常にかわり合いがあって、その合目的な機能の発現は、「制御」という話なしでは理解できない、ということです。それは物理化学では、理解できない。

それから、もうひとつ最近、こういう生物・生命を理解するアプローチとして、システム生物学という考え方が進んでいます。要するに要素の研究が非常に進んだのだけれども、だんだん細かく様子は分かってきたのだけど、全体の機能が何も説明できなくなってしまった、遠いところを逆戻りさせようということです。

一方、ただ「システム」という言葉とか、数理を使って表現、やるということになるのですが、そういう分野が従来なかったかと言うと、そんなことはなくて、「数理生物学」という非常に大きな流れがあるわけですね。そういうものと比較して、これから「制御」ということが何か新しいことが付け加えることができるのか、ということが問題なのですけれども。そういう意味で「制御」のわれわれの視点というのを、逆に大事にしないと、こういう分野の中の一分野になってしまうなあという気持ちもしています。現に、実はそういう大事な視点があるのだというのが言いたいわけです。

これは例題です。生物と言うと最近、生物工学とかをやっている人にとっても、私なのかもそうなのですが、なかなか遠いところであって、ある薬と、ある細胞を混ぜると試験管の中で、何か現象が起きて、その結果を見るということであって、われわれの分野と全然違うだろうなと思っているのです。特に新聞などに出る記事というのは、大体何かこういう因果関係が発見されたというようなことしか出ないのですけれども、実は、生物学の中でも、これはサイエンス 2008 年の論文ですけれども、周波数応



答の話というのも実は細胞レベルでも議論されています。これは新聞には出ませんでしたけれども、最先端のところではこのような研究もどんどん進んでおりまして、実はわれわれが心配しなくても、結構生物学の進んでいる分野の中では、非常に制御理論勉強をしている人たちがいてですね、大変面白い結果記事がたくさん出ています。これなのかは、2008年ですから、一番新しいやつで、要するに浸透圧をこういう周波数でふって、その応答ですね、タンパク質ができる応答をみて、周波数特性を計っているのですね。ここで蛍光タンパク質を入れて、その浸透圧の変化を蛍光タンパク質の発現周期で、発光の強さで計ったということです。これで周波数応答を測定して、これで積分特性があるとかないとかそういう議論が、既に進められています。

それからもうひとつ、これもサイエンス 2008年ですが、サイエンスって言うと、実験がないと論文にならないかなと思っていると、これなのかまったく理論の論文ですね。こういうバイオリジカルオシレーションの話なのですが、これで言いたいのはフィードバックの役割です。3つの要素があって、これにフィードバックをかけているのですが、これらの3つで振動を起こすことができるのですが、その振動に、ポジティブフィードバックをかけるのですが、そのポジティブフィードバックのかけかたをうまくやると、ほとんどあらゆる周波数の振動を発生させることができるということを、ある生物学のモデルがあってですね、それを使って説明して、シミュレーションをやって確認しています。しかもその周波数、パラメータがこれくらいの範囲まで変わっても、ロバストなオシレーションができる、とそういう研究です。

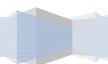
さて、本題ですけれども、マルチレベルといった時に、ここでは物理的なレベルと、機能的なレベルの分け方があると思います。それと、マルチレベル統合を考える目的地は何かと言うと、もちろん、要素的な情報から、全体を理解する方向にせざるをえなくなっていると状況があります。一方、レベルごとの細かい因果関係は確定、要素はかなり分かってきたと。だけれども、簡単な現象もできない、それから再現できない、どうしたらいいのだろうか、ということなのですが、これにやはり統合して、システムのモデルをもう1回考えることから、それを理解しましょうということが今、進められています。

それから、もちろん、先ほども言いましたが、統合モデリングをして、シミュレーターで、極端な話ですが、生体の本当の統合的なモデルができれば、予測診断、それも制御によるシステム、システム医療の実現が図れるだろう、ということです。

それから、もちろん、創薬、本来もちろん福祉機器の開発に対して、非常に役に立つことができるだろうと、こういう目的から進められています。

それで、レベルの分け方ですね、物理的といったのは、分子から始まって、細胞、組織、臓器、個体、こういうレベルでの、このレベルだけの研究は非常に進んでいる。あるいはここだけ非常に進んでいる・・・実際は中間のところは、何でもそうですけど、なかなかうまくモデリングできないのですが、この辺のところから、かなりモデリングが進んでいると言えます。ここも、要するにマクロなモデリングっていうのは、いろいろ現象的なモデルっていうのは出来上がりつつあるのですが、これを一括してやろうと言うことで、これもたぶん米国だったと思いますが、フィジオームプロジェクトというのが、2000年ぐらいから始まっています。要するに、この全体のモデリングをしようということです。

わが国も、やっぱりきょうの私の宿題だったので、いろいろ調べたら、たくさんもう既に始まっている。あとで少し紹介しますが、ただ、これを見ると、何かやっぱりモデリングというところが、結局はその同じレベルの人たち、この辺の人たちがいっぱい集まっているのです。それぞれ自分のところで研



究を進めているのですが、じゃあ、いったいこれを総合的な、本当の統合で意味するのは誰がやるのだろうか、と考えたら、何か欠けて気はします。これはその紹介です。これはもう 1 年前なので、文科省が中心になって始まったもの、JST から始まったのがもっとたくさんあるのですが、書ききれないので、少し代表的なものを書いています。マルチスケール、マルチフィジックスですね。それからソフトウェアシミュレーション、テラフリップス計算機プロジェクトと、そういうのが結びついて本当に分子レベルから、全体のモデルまで、うまく統合しようというようなプロジェクトがたくさん始まって、たくさんお金が出ていると思います。

一方、これはあまり進んでいないと言うか、あまりやられていない気がしますが、機能からみたモデリングというのは当然あると思うのです。の辺は、例えば、神経系、内臓器系、免疫系というのは、それぞれこれも医学の中で、あるいは生理学の中で、比較的、ばらばらにやられていることが多いようです。当然これは結びついているわけで、データはあるのですが、どうやったら良いか、それぞれ今まで行われているモデルを、ただ結合する話なの、あるいは、最初から違う方法で始めて、全体を結合するモデリングをすべきなのかどうか、そういう話も含まれています。同様に、ホメオスターシスのモデリングというような問題も、こういう分野をどうやって統合したらいいかということですが、このような研究もあまり進んでいないと思います。

理化学研究所（理研）のグループ、私が知っているのは、木村先生のグループで、陸さんが、まさに今話したような研究を進めています。こういう話というのは、先ほどの国家プロジェクトに比べると、要するにあまりお金が出ているわけじゃないと思いますけども、ある意味近い未来で、この辺の研究が進むことは、医療のシステム化、自動化につながる課題ではないかと思います。

分子レベルの統合と課題ということで、特に先ほど言いましたように、分子、細胞、組織、といったレベルがあるわけですがその中の、最も細かく見て、分子レベルに注目します。この辺のところ、どういことが行われているのか、この辺のところだけでも、統合をしようとしたら、どんなことが行われて、何が問題か、ということで、2つのトピックスだけ、きょうは紹介します。

モジュール化の話とノイズの問題というのが2つのトピックスですが、これらが統合を考えると非常に大きな問題だということが次第に分かってきています。モジュール化の問題というのは、われわれは回路、制御工学をやっている者はよく知っている話なのです。例題ですが、このようなタイプのモデルを作って、ここでこれをつないじやうと、ここの、出口のところの特性が変わってしまうんですね。要するに、これでモジュール化してつないじやうと、単純なつなぎ合わせでは、全体の特性は表せません。これは制御工学の若手女性研究者の研究なのですが、・・・みなさんの中にご存じの方もいらっしゃると思います。この人が言い出しているのが、レトロアクティビティという部分を取り入れたモジュール化が必要だろうということです。これをそのバイオロジーの中のモデル分割あるいは統合の中で、モジュール化の単位として使おう、ということです。

工学の中ではもちろんこういう課題は古くから意識されていまして、フィードバックのゲインを非常に高くするとか、アンプを使って、相互干渉をなくす、というようなことがやられていたわけです。このようなことが、バイオの中で、統合を考える時に、モジュールというのをどう考えたらいいのだろうか、という話とつながってきます。一つ、こういう概念を提案している人がいます。要するに、レトロアクティビティがないように、モジュール化してしまえ、というわけです。これを一生懸命、探そうということをやっているグループもいます。



それから、一方、インシュレーションデバイス、要するに、つないでも、相互干渉が出てこないような、レトロアクティビティが出てこないようなつなぎ方をしよう、というわけですね。こういう方向もあるわけです。

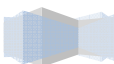
このような話とバイオと、何の関係があるかということなのですが。最近、バイオの中でも、構造生物学という話が今さかんになっていまして、・・・デザイン生物学という言い方もできますが、・・・要するに最低単位からもうちょっと根本的に、細胞から作り上げて、全体システムを作ろうという研究が進んでいるのですが、そういう中では当然こういう概念があるはずですが、実際に分からないわけですね、本当に細胞の中にこんなものがあるのか、ないのか。じゃあ、われわれが今考えているモジュールが、そういうものが本当に適当だったのかどうか、ということも問題になっているわけです。そうするともう1回、かたまりを、モチーフという言い方をしてもいいですが、考え直したほうがいいのかどうか、そういうことも含めてモジュール化して統合を考えようと、あるいは、うまいモジュールを作ることによって統合化をすつと進めよう、という研究が進められています。

それから、2つ目。もう一つの問題は、細胞分子レベルで、私が知っている範囲だけのことなのですが、ノイズの話ということです。細胞分子レベルのモデルとしてよく言われているのは、細胞の中で、数式モデルがいろいろ提案されていて、それは化学反応だろうと、化学反応式で方程式をたてて、やってみて、大体データと合うね、ということで、このモデルでたぶん間違いないだろうと、パラメータをうまく調整するとそれでうまくいく、というような話なのですけども。最近、それはそれとして、細胞の中のノイズを無視することになるので、データとうまく合うということはそんなに大事な話じゃないはずだ、ということは昔から言われていて、それに対して確率的なモデルを作るという研究も、ずいぶん昔から進んでいたんですね。ところが、実は本当に細胞のレベルで、ノイズがどんなふうに入っているのかということは、観察できるようになったのはつい最近なのです。あと一つは、実際に細胞を作ろうとする研究の中で、どうしても説明のつかない、ものすごく大きなノイズを考えないと、実際、説明できない現象があるということが分かってきた、ということがあります。

これは実験的にやっている研究なのですが、細菌の中に、大腸菌でもいいのですが、発現すると発光するような、蛍光タンパク質を2種類入れて、発現を見ているのです。これでは何をしたいのかと言うと、外的なノイズと、内的なノイズ、2種類ありますが、その2種類の中で、内的、外的、どちらがどうなのだ、ということが、蛍光タンパク質2種類入れることによって分かるようにしたいのです。外的な場合は、同じ場所に入れるので、2種類が同じ量だけ発現して、こんな結果しか出ない。ところが、内的、要するにデオキシリボ核酸(DNA)のレベルでノイズが入っていると、発現量が分かれてしまうので、こういうものが出てくるはずですね。ということが分かるようになってきて、外的ノイズ、内的ノイズが測れるようになってきました。しかも、細胞1個1個のタンパク質の量が量れて、細胞集団で、どういう分布をしているか、ということもやっと最近分かるようになってきました。そうすると、さっき言いましたモデルではとても説明できない、要するに、こういう確定的なモデルやポアソン分布のような標準的な確率モデルでは予想できないことがいっぱい分かってきています。

これをどう解決するか、ということが問題になります。これはちょっと飛ばします。

じゃあ、ノイズは要素が繋がっていくとどうなるか、と言うと、つながると、ノイズは大体増幅していくんです。だけど、生物・生命体というのは、ノイズが増幅しているわけではないので、どこかにう



まい仕組みがあるわけです。これはたまたま、結びついたレベルごとの反応の早さを変えただけですが、こんなに最後の細胞の最終的な分布のところで違ってくる。これは平衡状態の話ですよ、このあいだにももちろんダイナミクスもあるわけなのですが、平衡状態でもこんな違いが出てきてしまう、ということが分かってきた。このような現象を説明するモデルの研究というのが今さかんに進められています。

ここで言いたかったのは、確率モデルの統合の方法論というのを、われわれ制御の分野の人がたぶんこの辺のことはよくやれるのではないかということです。そう考えて、今こういうテーマを挙げています。

それから、さっき言いましたように、つなぎ合わせるとノイズが増幅するんだけど、それが低減化するというのは何だろう。一方で、ノイズを落としてしまうと、情報も落ちてしまうと。それを、フィードバックを使って両立うまくやれるのだということを示した研究を最後に紹介します。ここにノイズが入ってきていて、これは、フィードバックがない場合とある場合で、アウトプットがどんなふうに変化するかを見ているのですが、フィードバックがあるとノイズは抑えられる。インプットをこんなレベルに入れると、抑えられるのですが、信号が出てこない。だけど、ポジティブフィードバックを、もうひとつ複雑な仕組みを入れないといけないのですが、それを加えて入れると、ノイズのレベルは大幅に落ちて、必要なある帯域の信号だけはきちんと送ることができる、ということが示されている。これはバイオの論文なのですが、われわれが読んでも非常に分かりやすい制御の視点が非常にたくさん入っている。本人は意識していないと思うんですけど。そういう研究も進んでいるということです。

ずいぶん時間が過ぎてしまいました。こういう話題提供です。

小林 どうもありがとうございます。一昔前には想像もつかなかったような話題だと思います。内田先生のお話に関しまして、ご質問とか、ご意見・ご感想ありましたらお願いします。

野口 東京理科大学の野口と申します。大変興味深いご講演で、教えていただきたいのですが、もともと細胞レベルでやっていくと非常に要素数が多くて、モデリングというのは非常に大変だと思うのです。例えば流体力学だったらそれで1個1個分子を追うのではなくて、それを統計的に処理しているのです。それとまた違うのは、生物の場合はさらに化学反応とか生物的ないろんな特有の現象があって、非常にモデリングというのが難しいのではないのでしょうか。一つは簡単なメカニズムで流体力学と同じように簡単なメカニズムを医者と共同して、医学分野と共同でしたら、割合効率が良くて、現実的かなと思います。あと、制御工学的にはもともと生命体というのは、適応制御の世界だと思うのです。適応できなくなった時に、例えば病気が治らないとか、そういうことなのかなと思っております。内田先生がその辺の視点はどういうふうに今アプローチされているのかということをお伺いのです。

内田 私自身、ノイズに今すごく興味を持ってやっているんですけど、きょうの話はほかの人の話をご紹介するだけなのですが。反応方程式というのは、基本的には分子数が無限大にあるという、要するに近似でやっていて、要するに濃度を対象にして方程式を立てています。ですから問題は、そういう統計力学的な処理でやれない、数が非常に少ないところで1個1個の分子の数を問題にするようなところでモデリングをせざるをえない、というようなところにあるのですね。ですから、大数の法則が成り立っているようなところだと、濃度と、ポワソン分布で大体合うのです。ところが実際に観測できるように

なって分かったことは、とてもそれじゃあ説明できないな、ということが分かりつつあって、さあどうしましょうか、ということに今なっているのだと思います。

小林 パネラーの方は前に座ってください。皆様からのご意見をいただいて、ディスカッションさせていただければと思います。一言ずつ、お話しただければと思います。最初に連合後援会の幹事学会である航空宇宙学で、上野先生からお願いします。

上野 ただいまご紹介いただきました、日本航空宇宙学会の上野であります。横浜国立大学で航空宇宙関係の担当いたしております。今の話で、関係するのは、新しい分野の中で、航空と言うと、みなさん安全問題が問題になっているのではないかという話はよくあると思います。確かにそれはありまして、こっちは人間が入っております、人間は精力的でして、高度の意思決定をなさるのですが、逆にノイズの発生するノイズ圏でもあるという、そういった2面性を持っているわけです。こういったような課題というのが、まだ今現在もあります。今航空関係の中では、パイロットがいないタイプの機体が開発されておまして、こういったような待遇のもと、もっと今度は人間がいる、パイロットがいる機体との、2種類のものに関するコンフリクトですね、これをどう解決するべきかと、こういったような課題もあるでしょうね。こういったところが今のご講演を聴きまして、なかなかこういうような問題をどう解決すればいいかな、というようなことを考えていました。こんなところでよろしいでしょうか。

小林 はい、結構です。次に、池田先生、お願いします。

池田 私も今話を聞きましたら、時間も押していますから、次の先生へ・・・

杉江 私、最初のほうのお話を伺ってまして、最初の問題の設定と言いますか、そこが大事だなと感じました。ただ、生産革新の方式で最初の準備段階において、工場全体の変革とかをきっちりしないといけない、という話のもっともですが、その第2段階の知的統合生産システムという時に、どういうふうに知的な統合をするのか、というのがよく分からないのです。いろいろな分野において、知的な統合というものを、どういうクラス分けをして、どういうふうな統合をするのか、というところなどももう少し知りたいと。

小林 はい、ありがとうございます。次は田川先生、お願いします。

田川 東京農業工科大学の田川と申します。私は東京農工大学の永井先生の代理で参りました。最初の西谷先生のお話で、人とシステムの共存ということがありましたので、会社との共同研究の際に感じたことを紹介させていただきます。プラント工事において配管と配管を自動で繋ぐことができる装置として開発を行っておりました。これは私の頭の中では、ロケットの宇宙空間のドッキングみたいなイメージで、非常に制御として面白いと思っておりました。完全自動を心がけて作り、一応それなりのものができまして、会社の方が持って行って現場で試しました。これが現場の方には非常に評判が悪いのです。自分たちの工夫が入れられないということで、完全自動っていうのは良くないということです。最近アシス

トみたいなものありますけど、半自動でシステムにすると少し工夫が入る余地があるわけです。みなさんには使ってもらえそうだったのですが最終的には実用化しませんでした。完全自動よりは半自動で、ノウハウですとか、作業する方の工夫を活かしたいと、共存が良かったということで、ちょっと関連するのかなと思いました。

小林 ありがとうございます。少し問題が分散し議論しにくいと思います。時間も迫っていますので、2つに焦点を絞らせていただきたいと思います。新しい分野に制御を応用する際に、2つの方法があります。その新しい分野の人に制御を勉強してもらう方法と、制御をよく知っている制御の専門家にその新しい分野に言って仕事をってもらう方法です。内田先生の場合は、制御の専門家がバイオに進出したということになるのかなと思います。誰が、新しい分野における制御を担当するのかという議論をお願いしたいと思います。

それと、もう一つは西谷先生の話、それから今田川先生のお話にありました、「人」をどういうふうに制御の中に取り込んでいくかという問題です。たぶんその「人を取り込む」というところに新分野と言うか、新しい制御の側面があるのではないかと思います。

この2つに関して、議論していきたいと思います。最初に制御を新しい分野に応用する時に、新しい分野の人に制御を学んでもらうほうがいいのか、あるいは現在の専門家が行った良いか伺いたいと思います。池田先生は先ほど午前中の講演で「知るということを活かすということをして、初めてすること」というふうにおっしゃって、それからすると、制御の研究者は外に出て行って、そして活かして、そしたら、初めて制御が分かると、こういうことでよろしいでしょうか・・・という話にもなるわけですが、この問題に関して、ご意見をいただければと思います。内田先生、どう思われますか？

内田 制御工学をやっている人、われわれにとって、昔からよく言われていたのは、いろんな分野に入って、いろいろやらざるをえないね、ということですが。制御工学が横断的なので、対象があればある専門分野のところで、仕事しないといけないし、もしかしたらある時は機械分野のところで仕事しないといけないということです。そういう意味の、制御の応用という意味ではその分野にいかざるをえない、いったんやらざるをえないということは前からわれわれも言われていたのですが、もう少し付け加えますと、私自身今バイオの立場になって思うのは、われわれも勉強しないといけないけれども、実は制御というのは必要になると、その分野の人たちもかなり一生懸命やるもんだなあということです。われわれが何か教えてやるという態度で入っていく前からもう、やっぱり非常に優秀な人たちもいますから、よく制御のことをよく知っている人がたくさんいるものだなあという感想を私自身は持っています。

小林 ありがとうございます。例えば、80年代の終わりぐらいに、アメリカが、日本がバブルで沸いていたころ、アメリカが航空宇宙局（NASA）のエンジニアを大量に解雇されました。彼らは行くところがないため、ウォールストリートにいて、金融工学を作ったという有名な話があります。儲けるために多様なことを考えて、経済システムを、融資を不安定にし、さらにポジティブフィードバックをかけて儲けを膨らましたと考えることができます。それが原因で今惨憺たる思いをしているわけですが、新しい分野に制御の専門家が行って仕事をするのが良いことか否かは分からないのですが、でもそういうことがあって、少なくともウォールストリートのファイナンスの人たちは 伊藤型確率微分

程式が分かったわけです。日本のファイナンスの人は殆ど知らないのではないのでしょうか？ このような観点から制御の専門家が新しい分野に進出する必要があるかという気はします。いかがでしょうか？ 橋本先生、如何でしょうか？

橋本 制御はコモディティ化してしまっていて、いわゆる日本的なパッケージになっていない。だから、いくもいかないも両方必要だっていう思いもあります。もちろん、制御が基本的な工学の教養で、きちんと教えられている必要があります。 ああいうシステム系の書き方がなければ、たぶんエンジニアリングの本質は分からないまま終わってしまうでしょうから、制御は少なくとも工学あるいは工学周辺分野の人はまず学ぶ必要があると思います。かなりのところは、教養と言うか、常識的に知っているだろうと期待をしています。

それともうひとつですね、ちょっと思い出したのが、今ウォールストリートにいかれたと言いましたけれども、制御の人が来ると、なんでもかんでもきれいに定式化して、おいしいとこだけかっばらっていき、残ったあとは難しい問題だけだというような評価も昔聞いたことがあります。

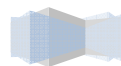
西谷 今の話題に関係するのですが、1970年ごろにやっぱり環境問題ということで、特定研究を大々的にやったのですね。それが同じようなことを20年たって、他分野の人がまた同じことをやっているのです。ですから、論文を書いたら終わり、というだけじゃなかったのだろうと思うけども、それをやっぱり池田先生の話じゃないけど、社会の、政治も含めて、どういうところにどういう適用をしているのだというところを明確に説明していくことが欠けていた感じがします。それと、やはり今おっしゃっていたように、制御というのは、僕は工学における教養だと思うのです。だから、あまりその制御工学、制御工学、ということでこだわることもなくて、一時期60年代、70年代は、基礎工学ということでエンジニアサイエンスということ言われていたわけで、その一つのものだと考えれば良いと思います。例えば、業界のように縦割れになっているようなものじゃないというのはもう当然のことなのですが、何かそういう発展的なって言うんでしょうか、その解決のしかたというのも、やっぱりあるのかなあと思います。一つのディシプリンとして、制御工学でずっといくというよりは、何かそういう工学の教養としての重要さ、それをやっぱり、ちょっと工業数学みたいなものの位置付けだとか、そういうふうに近いようなものになるというのも、一つの道なのかなと、個人的には思うのです。

小林 はい、ありがとうございます。確かに、その通り、コモディティと言うか、工業数学、教養数学ということもできますよね。

— 教養ってあまり役にたたない時もあるじゃないですか。

小林 いやいや、唯一役に立つ教養。そうではないでしょうか？ 池田先生

池田 他分野の人とやる時にやっぱり主体性をどこで持つか、というのは難しく、結局使い手にされる可能性もあるわけですね。つい最近の経験で、力学の人とやっていて、ある時に、「それはすごい、そんな結果出てない」と、それはものすごい、と言っていて、しばらくたったら、「いや、もうその結果は



もういいのです」っていうわけですよ。どこかでいい結果が出たのでしょうか。どこかのグループから。まあそんなあれがあるので、もし一緒にやるなら、ものすごく、こっちも主体性を持って、こっちも入れ込まないと、大変だなあとというふうに思います。ですから、先ほどの内田先生のお話を伺っていると、どんどん入れ込んでいけば、それなりにやっぱり制御工学の貢献する場はたくさんあるだろうし、いい結果も出そうだなあとというふうに伺いました。

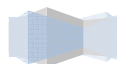
それと、特別講演させていただいて、それをまくっている時ですね、ふっと思ったのが、最近情報工学の存在感がないなあと思ったのですが、みなさんどう思われるか分からないですけども、ひょっとしたら制御工学はやはり、私なんか若いころはものすごく存在感があったと思うのです。最近はやっぱそれに比べたら存在感がないのです。見えてこないから。けどまだ存在感が出てくるなと思ってはいるのです。今もうすぐ制御工学の存在感というのが、ものすごく大きい形で出てくると、だから、情報工学があれだけ大きな存在感を持っていたのが、最近本当に何か全然見えてこないなあ・・・と言うと情報工学やっておられる方はどういうふうに認識されているか分かりませんが。

杉江 情報のことは分からないのですが、ただ新しい分野に対してはかなり深く入っていかないと、まずコミュニケーションができない。言葉が違うので、他分野の人と言葉が通じるまでがかなり大変で、少なくともそのレベルまでは入っていかないと、うまく制御を活かせない。確かに、教養になればそれがいいのですが、なかなか今までそうはなっていないように思います。

あともう一つは、私は京大におり、世間で有名な先生といえば、IPS 細胞の山中先生など、たくさんいらっしゃいますが、残念ながらシステム制御の先生の名前が出てくることはまずない。ただ、地球規模の省エネとか、CO2 削減とかのいろいろな問題にしても、制御と言うか、システム関連で大きな貢献ができるのではないかと思います。そういう社会にインパクトのあるところで、目に見える形で、制御やシステムの方法論が使えるんじゃないか、とそういうふうにしていかないと、これからわれわれの業界全体の未来も安心できないのではないかと思います。

小林 ありがとうございます。制御工学というのはどちらかというと、ツール提供型と言うか、シーズ型の産業と言うか業界だと思います。ツールを提供して、ご自分で使って見てください、と言うのだけですと誰も使わないと思います。売れない製は、殆どこのようなタイプのものですね。やはり、ソリューションを提供する、つまり、まず問題を気付かせて、問題設定をきれいにしておいて、答えを出して見せてあげると言うことが必要です。これは、たぶんマーケティングの基本ですが、制御を広めていくには、このような方法が必要とされます。

内田 制御をやる人はその分野に入り込まないといけないということで、制御は教養だ、という話で終わりそうなので、僕はもうちょっと反論したいのですが。思ったのは、制御理論の中には問題はなくて、やっぱり制御を使うところに問題があるということです。その問題の中でやっていると、新しいテーマが見つかって、制御理論と言うのは、新しい問題を絶対見つけることができるだろうというふう。そういう意味で、単なる教養数学でもなく、線形代数の講義を終われば、制御工学って終わりだから、別に制御理論の研究っていうのはなくてもいいということでは決してない。やっぱり新しい問題は



あつて、きょう、私はそういうつもりで課題があつて、とても今までのわれわれが知っている制御理論ではとてもうまくこれはこなせないなというような問題が、いっぱいあるなと言いたかったのです。ということで元気が出ると思つて、そういうつもりでしゃべつたのですけど。

— いや、だからそれで、ほとんどの人が新しい分野を、やっぱり勉強すべきだと、言うことで、よろしいのですか？・・・まあ、両方ありますよね、まあ、エンファンスするとすれば・・・

内田 ええ、両方で。そうですね、前からあるのは昔から歴史的にあるのは、の分野から学んだり、機械の分野から学んだり、つて制御つてやっていますよね。今もしかしたら生物の分野に学ぶ、つていう時期が今来ているかもしれないな、という気はします。

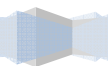
— その新しい分野の勉強というので終わるのか、新しい分野に骨をうずめるのかじゃないけど・・・

内田 まあ、そうですね、限界はありますけど・・・一生時間もありませんからとても、いったり来たりつて言うのはできないと思つていますけど。まあその時はやっぱりもうやるならやるしかないかな、つていう気はします。

— まあ要するに縦と横がありますので、新しい分野、制御は縦であつて、新しい分野は横である、つていうふうな考え方を持てば、必ずしも新しい分野に骨をうずめることはない、私は思つています。まああの、われわれ今ここにいるみなさんは、ことに制御の分野ですから、こちら側の見通しはいいのですけれども、こちら側の見通しが、いろいろといろいろなタイプがありますよつていうので、私はどちらかと言つて応用面のほうにいますから、できるだけ応用のほうに入つてきてほしいなあという部分があります。コメントと言つてか意見を持っています。

小林 ありがとうございます。どなたかご意見ありますでしょうか。

大久保 山形大学の久保です。言つてみれば、この制御理論つていうようなことが、ちょっと考えるのであれば、いわゆる計測専門学会つていうような公共機関があつて、新しい分野のほうに、情報なり、あるいは画像のほうに飛び出してしまつて、中が、例えばロボットに飛び出してしまつて、ロボット学会、ナントカ学会つていうようなので帰つてこられなくなつたら、戦闘機が飛び出してしまつて、いざ今度学会だと今大変しばらくおれんです、つていうような、言つてみれば、出つてしまつて帰つてこないような現象が結構多いつていうような気もいたします。それはそれでまあ興味あると言つてみますか、それは、ご本人と言つてみますか、学問の展開つていうことで、十分よろしいわけですけども、そういう意味でも自動制御連合講演会つていうのは、そういうのは時には一緒に集まつてみますと、お互い議論もできるつていうそういう場でもあるわけなのです。でまあ、そういう意味ではやっぱり自分から積極的に出て行くつていう感じのほうは、どうしても必要かと思つられます。その重要性を主張してもらつて、つていうようなことをやっぱりやつていく必要があるのではないかな、と、そういうふうに感じます。



小林 ありがとうございます。新しい分野に行き、そして今までの制御理論、制御工学では補いきれない部分を新しい制御理論として作って戻ってくるのが正しい姿なののでしょうか？

時間が押してきましたので、次に「人」の話に入りたいと思います。工学っていうところは、人を除いて今までは考えてきたのですけれども、制御工学も新しい分野に展開する上では、「人」というファクターをどうしても考えざるをえないと。これをどういうふうに考えていったらいいか、あるいは、どんな可能性があるか、どんな問題があるかをご意見をいただければと思います。田川先生、先ほどの続きで人に関しては、どのようにしたらよろしいでしょうか？

田川 他意はないんですけども・・・。先ほど、西谷先生のお話にありましたように、やっぱり人は意欲を持てるような自動化とかですね、そういったものが必要なのかなと思ったんですけども、あとまあ、分野で言いますと、人を無視できないと言いますのは、自動車の分野ですとか、たぶん航空機もそうだと思いますけれども、人が操縦する以上、人が強化するわけですから・・・今もう自動車の技術に関しては、自動車自体の研究と、人の研究を見ると、バランス的に機械のほうが圧倒的に研究しつくされていて、バランスが悪い。ですから、これから人を研究したらいいという、そういう話を聞いたことがあります。

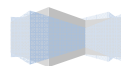
小林 上野先生、「人」の話で **Man in the control loop** と言うか、宇宙では特に重要だと思いますが、如何でしょうか？

上野 また航空関係なんですけども、もう 30 年くらい前からみなさんが乗っている旅客機がボタン一つで着陸できる空港があるんですね。ところがどのパイロットも使っていません。もう 30 年もありますけれども。これはもうパイロットとしては、着陸するということの技術に対して、自分の誇りを持っていますので、こういったようなことで、そういったようなシステムは 0 機体の時、まったく機体がない時にしか使えない、というふうな状況です。

一方この宇宙関係なんですけども、みなさん人工衛星は完全に自動化されているというふうな印象をお持ちかもしれませんが、衛星がどのように仕事をしなさいというのは、今地上から人間がコマンドを打って、指令を送っているというようなシステムであって、これがまったく自動化されていないような状態です。従って、間違ったコマンドを打つと、衛星がとんでもないことをやってしまうと言うわけです。こういったような危険性の中に含んでいますので、これをいかに自動化させるかが大きな問題です。

あともう一つは、時間遅れのために人間が実時間で管制できない状況もあります。人間が立ち入れないものから人間が逆の操作をしてしまうものまで、いろんな状況があります。結局はいろいろな問題が起きますので、人間が主で動いていて、機械がバックアップをするというふうな、航空機の運航はそのシステムで定着していて、地上から間違ったことを言った時に、最後に機械が安全側のほうに回避させてしまうというふうな、そういったようなシステムなどが最近完全に取り入れられるようになっています。ちょっといろんな議論が出まして申し訳ございませんが。

小林 ありがとうございます。西谷先生、何か付け足すことはありますでしょうか？



西谷 マンマシンシステムについても、やっぱりずっと研究者がおられるんですよね。で研究もなさっているんですけども、それにつきましても成果と、制御をプロパーでやっている人っていうのはだんだん離れていっていると言うか、そんな印象があるんですよね。ですから、そういう人たちの成果を、もう一度自分たちの作る、例えばプラントであるとか、そういう制御システムの中にそういう知見を入れてさせていただくとか、そういうようなことも必要なのかなと思うのですよね。決して、何も見向きもせずやっつてこなかったわけではないんだけど、やっぱり他分野と言うか、航空機の安全ならば、安全について考える先生はそちらのほうに研究を行ってしまう。

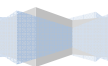
ただやっぱり人間というのは、ロボットもそうなのですけども、ロボットの研究をするということは人間の研究をすることなのだというふうに極端におっしゃる方もおられるのですよね。ですからやっぱり、工学というものは、決して人間を排除しての工学ではないと思うのですよね。ですからその辺もやっぱり基本的なものの考え方を今一度考えて、その辺も、ある種、統一的な見解をおまとめいただけるというふうに思います。

小林 ありがとうございます。

今、機械を含めた制御ループの中に人間が入るという話でしたけれども、社会経済システムは完全に人だけのシステムです。そのようなシステムも、もちろん人を考えなくてはならない訳です。最近株価がどんどん下がっているのですが、株を売り買いする際には、何とか指数を見て判断することが屡々行われているようです。何とか指数と難しい名前がついているのですが、全部、普通のフィルターなのです。そのフィルターを通した結果をみて、何とかシグナルで売り買いするということが行われています。これを人が行うわけですが、この部分をシミュレーションすれば株価の値動きが予測できるのではないのでしょうか？ まあ、分かったところで致し方ないかもしれませんが。佐野先生、何かコメントないでしょうか？

佐野 社会、あるいは経済を制御する仕組みというのは、社会学者、経済学者と一緒に連携できるか、という問題があるのですね。実はこれは非常に難しい問題で、制御というのは必ずコントロールしよう、と。それによっていい制度がえられるという、そういうベースがある。ところが、経済とか社会学者は、決して、社会を制御することは善だと考えているかと言うと、そうではないのです。つまり、社会というのは、一番理想的な状態は何の手も加えずに、社会が発展していく姿が一番良いのだと。ところが、いろんな問題が生じてきて、そこで社会を制御するというのはどういうことか、と言うと、社会学者とか、経済学者の中では、合意形成と言うのですね。つまり、制御にとっては当然の、アプローチをとらなくちゃいけない。お互いコンフリクトがある、そういう中での問題解決を人間の相違をどうやって合意して、社会的な問題を解決していくか。こういうような制御の、いわゆる人間の意志決定、あるいは合意形成のようなものが、スムーズにいくような制御ができると、受け入れられるかと思います。社会の中では、合意形成というのは非常に重要な問題で、そこを・・・もちろんそういうことを専門にやっておられる方もいますけども、そういうところをやはり少し考慮した制御的なアプローチが必要なのではないかなと。

それから、もうひとつ人間と機械、あるいは人間を含む制御の中で、本当に完全に自動化、というの



がどうも受け入れられないな、という感じを、私自身も思っています。例えば、車も、完全に自動化したら、じゃあ人間はどうなるんだろうか、と。むしろ事故を起こす可能性もある、というふうに推測されるわけです。だから、人間をあくまでもアシストするような、そういう自動化、という、今自動車メーカーの論文が出ていますが、はじめから人間の技術を完全に自動化してなくすというのは、人間が間違ったことをする時に、人間に気付かせるような、そういった支援。そうすると人間は必ず自分で注意して運転する。そういうやり過ぎないヒューマン・インターフェイスが、これからいるのでしょうかね。

小林 ありがとうございます。その問題は非常に難しい問題で、確かに、おっしゃる通り、制御っていうのは管制だからやっちゃいけない、というのものもあるし、人に対して、非常にデリケートな対応をしなくちゃいけないというの、非常によく分かります。それから、いろいろ幅広い問題があって、なかなか大変だとは思いますが。逆にそれだけに、制御がやるべき、あるいは応用すべき問題もたくさんありそうな気がします。どなたか、何かご意見ありますか。

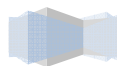
池田 一種の話題提供で、今佐野先生がお話になったこと、さっき田川先生がお話になったこと、現在はみんなそうなのですね。例えば、車ってわれわれ運転してきたから、今完全に自動化すると、逆に自分を信用しているものだから、機械が信用できないと。けども、先ほど田川先生の一種のドッキング、あれは今まで人間が介在していて、自分たちのほうが上手だと思っているから、そういう意見が出るけれども、そのうち、今の人たちが最初から自動化があるようなところに座ってくると、ひょっとしたら自分が介在して何か起こすよりは、全部自動化して何か起こっても、自分は責任ないよと、言うほうが気持ちいいと思う人たちが出てくる可能性もあるわけなのですね。だから、午前中に、自然に対する人々の感覚が変わってきたというのと同じように、われわれが育ってきた中ではそうだけれども、先になると、ひょっとすると、また人間自身をわれわれがとらえ直すべきではないか、という可能性はあるのかと思います。

小林 ありがとうございます。生まれた時からコンピューターがある世代は、デジタルネイティブって言うらしいのですが、今のお話だと、オートメーションネイティブということになると思います。

池田 携帯電話が最初からある世代と、われわれ固定電話から携帯電話を持った世代とでは、やっぱりものの考え方が違うんですよ。

小林 なるほど。ありがとうございます。将来の飛行機はパイロットと犬が1匹乗っており、犬の役目はパイロットが変なものを触らないように見張り、触ったら噛みつくという笑い話があります。どなたか何か意見・ご感想いただけるとありがたいのですが。 荒木先生、如何でしょうか？

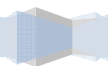
荒木 いろいろありますが、さっきの経済の話というのはある程度次元の違う話で、経済学者がどう考えているかと、考えていないかということ以前に非常にやっかいなのですね。経済学には、いろいろなモデルがあります、そのモデルが自然に成立している範囲内の時はいいのですが、これに手を加えたらここはどうなるというのは分かったとたんに、それを発表したとたんに、見つけたルールは成り立た



なくなるのです。おそらく、それを理解した人がそれを利用して、リアクションを必ずするわけです。すると、これまでのルールが全部崩れてしまうわけです。社会学と経済学が全然違うというところですが、経済学の世界ではそれだけ活きた反応があり、今日の中に存在していて、こうなると分かっていたらこれに従って、そうならんようにしてしまえば良いのです。われわれは自然現象だけ対象にしているわけではなくて、人工的なものも対象にしていますけれども、われわれが理解して、こうだ、という理論をたてたとしても、向こうが変わるわけではない。変わるまでには時間がかかる。そのところが我々が対象としているものと経済学が本質的に違うわけですから、経済学までわれわれの対象の部分というのは、やはり危険と言うか、やれないものだろうと思います。

小林 ありがとうございます。経済学者は、なかなか大変な人たちですし、政治家はもっと大変で、手ごわい人で、とても相手にしにくい人たちだと思います。とりあえず、そこまでいかなくても、制御工学を応用するというか、制御工学がやるべき分野は大量にあるという気がします。時間になりますので、これで終わらせていただきたいと思います。どうもありがとうございました。

(了)



知的統合生産システムにおける 工学的課題

2008年11月23日
奈良先端科学技術大学院大学
西谷 紘一

化学産業におけるものづくりの特徴

1. 人の情報処理・判断が伴う
2. 安全・安定運転が大前提
3. 多数の製品を多数のユーザに供給

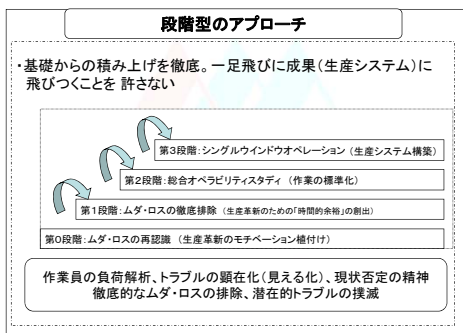
知的統合生産システム具現化の鍵

- (1) 工場全体業務の変革
- (2) 生産情報システムの再編

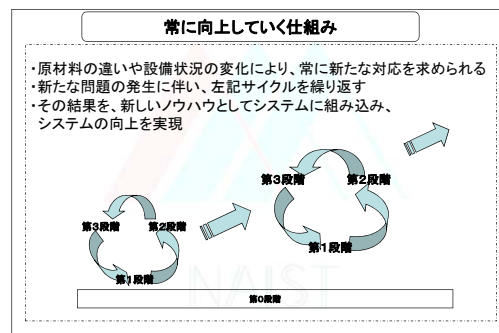
成功事例 (ダイセル方式生産革新)の特徴

- (1) 現状否定: 現状維持を超えた目標設定
- (2) サポート体制: 問題解決専任チームの編成
- (3) 意識改革: 既存組織の壁をこえた活動
- (4) 情報システム再構築: 意思決定支援のための知的統合
- (5) 進化能力: 継続的活動のための仕組み作り

手法の特徴 (1)



手法の特徴 (2)



生物における制御

生物システムのマルチレベル統合モデリングと課題

早稲田大学 電気・情報生命工学科
内田健康

制御工学と生物・生命分野の関わり (E.D. Sontag の分類)

- (1) “医療工学・生物工学”
- (2) “生物の制御問題”への制御理論の適用
- (3) 生物に学ぶシステム・制御工学
- (4) 生物の新しいシステム・制御理論

概要

制御工学の新応用分野としての生物・生命分野

- 制御工学と生物・生命分野の関わり
- 生物・生命における制御の必然

例: 周波数特性とフィードバック(分子・細胞レベル)

生物システムのマルチレベル統合モデリングと課題

- 物理的レベルと機能的レベルの統合
- 分子・細胞レベルでの統合と課題

例: モジュール化とノイズの問題

生物・生命における制御の必然

- 生命現象は合目的な機能の発現
機能を実現する制御メカニズム
生命現象の制御論的理解 / 構成
(物理・化学的理解とは次元の異なる視点)
- 数理・システムの理解に制御の視点を!
数理・定性的理解(数理生物学)
定量・統合的理解(システム生物学)

制御工学の新応用分野としての
生物・生命分野

生物システムのマルチレベル
統合モデリングと課題

物理的レベルと機能的レベルの統合

- マルチレベル統合モデリングの目的
 1. 要素情報から統合モデル構築に基づく生命体の包括的理解へ
 2. 統合モデルシミュレータに基づく予測・診断・制御によるシステム医療の実現
 3. 統合モデルシミュレータに基づく創薬・福祉機器開発

分子・細胞レベルでの統合と課題

分子・細胞マルチレベル：
DNA / mRNA / タンパク質 / 細胞

- 統合モデリングのためのモジュール化
Retroactivity の問題 (D. Del Vecchio et al., 2008)
対応策: Free of Retroactivity モジュール化 Insulation Device

- モジュール化 その他の意義：
包括的理解のためのモチーフ
構成生物学におけるモジュール(機能素子)

• 物理的マルチレベル統合モデリング (縦方向の統合)

物理的マルチレベル：
分子 / 細胞 / 組織 / 臓器 / 個体

国外: Physiome Project (2000年)
国内: 文科省 / JST のプロジェクト

“統合モデリング”の方法論が必要！

• 統合モデリングにおけるノイズの問題

分子・細胞レベルの内的・外的ノイズ
ノイズのマルチレベル伝搬

ノイズの存在の確認

構成生物学(細胞を創る)研究の進展
1細胞レベルでの計測が可能
(2000年代)

ノイズの影響・役割

機能の阻害
機能の実現(Necessary Noise)

• 機能的マルチレベル統合モデリング (横方向の統合)

例: 生体防御機構のモデリング
神経系 / 内分泌系 / 免疫系の統合

例: 生体恒常機構のモデリング
自律神経系 / 循環系 / 代謝系の統合

近未来の医療の革新に直結！

• 統合モデリングにおけるノイズの問題(続き)

⇒ 確定的モデル(+ポアソン分布)
ではシミュレーション・予測できない

⇒ 確率的モデル(マスター方程式)

“確率的統合モデリング”の方法論が必要！

- ・無限次元モデルの実行可能性と簡略化
- ・モデルの統合に伴うノイズ増幅と低減化
- ・ノイズ低減化と情報高感受化の両立
(フィードバック・制御の視点)