

## 講演 「最適化の使われているところ」

香川大学工学部

電子・情報工学科 教授 荒川 雅生

最適化の歴史として、後付の話ではあると思いますが「カルタゴ伝説」というのがあって、カルタゴはローマ帝国時代の植民地ですが、「ただ一頭の牛の皮で覆えるだけの土地が欲しい。そこで部下を休ませた後、再度、出航したいから・・・」と、ある王様にカルタゴの女王様が頼んでできた土地というのが、港を中心とした半円の都市（カルタゴ）であったとされています。たまたま半円だったと思うのですが、それを称して最適化の研究者の人たちは「いやあ、さすがカルタゴ人だ。偉いね。最適化を知ってるよ。」と語ります。というのも、一本の糸で、一番大きな面積をとれるのは半円だからです。そういうわけで、我々は最適化の学問というのは2,300年の歴史ある学問として認識しています。

工学上の最適化も8つほどの分野に分かれるのですが、主に「数理計画法の開発」という部分は数学屋さんの担当でして、色々な新しく良い方法がどんどんできています。応用分野だと、最近では「Multi Discipline (マルチディシプリン)」、複合領域の最適化という言い方をしているところもあります。これは、対象としているのが応力だけではなく、「振動などを最適化するか」ということになります。最近では制御系と構造系はどうやったら最適化できるか、というような問題を扱うようになっています。

「Heuristic Search (ヒューリスティックサーチ)」というのは、遺伝的アルゴリズムと言われるものや、基本的には多点探索になりますが、そういう方法を開発しようという問題です。

次に、形状最適化と位相最適化についてです。形状最適化というのは、ダイエットを例に例えると筋肉とか表面に付いている脂肪を落とすというものです。それに対して位相最適化は、内臓脂肪を取ろうというもので、これが一番効果的であるという風にいわれています。位相最適化で有名なソフトウェアは、実は日本で作られていて、「くいんと」という会社が「オプティシェイプ」というものを作っています。その事例ですが、ある形をつくっていて、そこで削っていい部分を指定します。そうすると、ただ応力を考えると真ん中くらいになるけれども、さらにもうちょっと横曲げとかを考えると、別の形になり、最も効率的な形状を出してくれるというソフトです。

この方法は非常に面白くはありますが、複雑過ぎるためものづくりができないという批判を浴びています。そこで、そういったことを考慮して真ん中で済むようにすればどうすればよいかという改良を加えて製品化しています。

次の例は評価点の変異量を一番小さくするにはどういう形がいいだろうかというというものです。その他の研究として多目的最適化と、半円最適化といわれるものがあります。

共同研究の事例としては、今年広島で崖崩れが起こってしまいました。その予測を山口大学の先生と共同で行いまして、ソフトを作るということをしていただきました。実はその時にモデル地区で選んでいたのが安佐南区でして、あそこで崖崩れが起こることは予測できない訳がないはずでした。しかし、死者が出てしまったので、管理しているところにすぐ電話をして私がいけなかったのか、それとも運用上の何かのミスなのかということを知りました。すると6時間前には市長は県知事に連絡し、4時間前には絶対に起こるからすぐ避難させるように言ったが、たまたま深夜であったことも重なり、連絡することができなかったということでした。結果的にはこのシステム自体に問題はなく、運用をしっかり守りましょうという事になりました。ちなみに日本だけではなく、フィリピンやインドネシアの方にも運用が進んでいます。誰がやっているかという、このシステムは雨だけの情報でほとんど予測することができるので、宇宙開発事業団の方で「ひまわり」をあげていますが、あれは日本だけではなく他の地域も見られます。日本だけでなくフィリピンやインドネシアでも活用できる

よう売り込んでいて、それで崖崩れも予測できるとなると買ってくれるという事で動いているようです。

本日は、この中から歴史のあたりを話させていただきます。

まずブリヂストンですが、この中でドーナツというシリーズがあったのをご存知でしょうか。このシリーズは自動形状生成装置というもので作ったといいますが、これが正に最適化のことなんです。最適化を使ったというと、他社が真似をするので、それは言わずに、生成装置を使ったと言っています。

20年来の研究仲間となる方が中心となり“最適性基準法”を使って最適化を研究しているというものです。タイヤに関してですが、タイヤはゴムと鉄でできています。ブロックとタイヤの面の接地に偏りがなく、なるべく強弱のないような状態で接地するというのが良いタイヤであると言われていました。そのために最初にされたのが、タイヤの横の部分の形状なんです。従来のものは形を変えていて、ひよっとするとパンクしているのではないかと疑われるほどだったそうです。しかし、こうすることで、接地面積が非常に大きくなるということがわかっています。この技術を使って、ブリヂストンさんはF1に参入して、非常に良い成績を残したという経験があります。

それだけではなくて、上の表面の部分の形も変えようと考えました。ここのことをクラウンというのですが、クラウンの最適化というのは実はここに書いてありますように7つの変数での最適化になります。このくらいですと数理計画法を使って解けるわけで、解いていった結果どうなったかという、従来までを100とすると、圧力として78まで減った、つまり22%の改善を見ることができたという形になります。タイヤの欠点というのはショルダーという端っこの部分なんです。端っこの接地面積が減っているというのが見て取れると思います。先ほどのシミュレーションの結果で、これが実際にタイヤを作って接地を調べた結果です。これを見ると、「なんだ。最適化のほうが赤が多いじゃないか。」と思ってしまいうんですが、これ実は最高レベルを赤としたときのモニタージュでして、赤のレベルが20%くらい落ちていると思って見ていただくと正しい見方になるんだそうです。これを使って、テストドライバーにドライブしてもらって、評価をしてもらうという感応テストをした結果がこちらで、これはプラス2ポイント以上の差があると一般の人でも分かるものなようで、ドライの状態での操縦安定性が増したということです。マイナス1ポイントくらいだと一般の人は乗り心地が分からないだろうからまあいいだろうということで製品化したということです。次にされたのが、タイヤにはブロックという溝があります。その最適化をしようと考えられました。クラウンの部分の形状ですと、7個の設計変数で済むんですが、このブロックになると表面の接点の位置をどう変えるかということを考えなければいけません。そうすると500個以上の設計変数が必要になるので、数理的最適化が全く使えないという状態になります。計算回数を少なくするために、どういう方法を使えばいいのかということが出てきたのが、最適性基準法という方法になります。最適性基準法を使う場合、使える問題のパターンはかなり制約がかかってきます。それをどう解決するか、計算量をどう抑えるかというのが使えるか使えないかのポイントになってきます。ブリヂストンはそのときに、実は土木の先生なんです。杉本先生という方を頼って最適性基準法の定式化をしていきました。この計算をするにあたって、この部分の設計変数に対しての偏微分というのが必要になってきます。設計変数が500個あるわけですから、偏微分を差分で求めようとするとも500回解析をしないといけないということになって、最適性基準法を使おうとしても使いきれない非常に面倒くさい問題だったわけなんです。それを杉本先生はどうされたかという、ここを $\beta$ において定数にしてしまおうということをしました。そうすると、この式を見ていただいたら分かりますが、圧力の平均とそれぞれの場所での圧力の値が入っています。なので、実は解析1回で済む。じゃあ、あそこを悪くして、どれだけ最適化の繰り返し回数が増えるかという、10回も増えないなという話で、やってみましょうというこ

とになり最適化をされました。初期形状があって、FEMがあって、さきほどの式に従って自動的に変えていくというのを繰り返しました。ただそれだけのアルゴリズムなんですけど、圧力差というのがあのような図になって出てくると、結果的にそれに比例したような新しい形状が自動的にできるという形になりました。じゃあ、簡単なのでやってみましょうというので、四角いブロックでやってみました。ここでのメッシュなんですけど、端っこのほうがやはり効いてくるということで、端っこのほうをかなり細かく切るということをしてテストをしてみました。すると、20回くらいで、だいたい繰り返しは収まりました。ということで、20回の計算しかしていません。数値計画法を使うと1回の繰り返しで500回の計算が必要で、それから比べると圧倒的に少ない回数の計算で収束しており、出てきた形がこんな形です。圧力を均等にして、グリップを一番効かそうとすると、端っこが少し丸くなっていくという形がでできます。中がほんのちょっとくぼんでいるという形になりました。これを見られたときに、ブリヂストンの技術者の方々は、「これはだめだ。失敗だ。」と思われたそうです。じゃあ、実験してみてくださいと杉本先生が言われたので、実際に作って実験したところ、解析上では上のような形になりました。赤い部分が減っているというのがお分かりいただけると思います。実際にブロックを作って実験した結果もあるんですけど、やはり赤い部分が減っています。ちょっと見にくいんですが、最大の圧力のところがこれですとどこでも0.6くらいです、向こう側ですと1を超えてくるといふふうになるので、なるほどいいものができたということになったそうです。さらに、いろいろ面白いことがありまして、今のは上からの圧力なんですけど、横からの圧力に対しても、非常に強くて、1点いくらが0.7くらいで終わっている。30%くらいよくなっている。つまりグリップもよくなっているということが分かってきました。あと接地面積が一定だということは、擦らしたところ同じように減っていくという形になります。というので、耐摩耗性というのを見てみると、従来のものと比べ、摩耗をさせても、あまり変わらないということがわかってきました。摩耗後の形なんですけど、平らなものと摩耗後、真ん中が減るといふような現象が起こるんですけど、最適の形状ですとそのままの形で減っていく、つまり使っても使ってもある程度のグリップ性は保証してくれるという形が得られたということになったそうです。これでよしというので、実際のタイヤで、トレッドというのですが、パターンは一緒にして、ひとつずつを最適化してみようということをしてみました。このような形で、多少変わってきているというのが出ているのですが、乗り心地もプラス2ポイントになっており、走行安定性もプラス2ポイントになっています。さらに雨の状態のウェットの操縦安定性もプラス4ポイントになっており、ウェットでもドライでも通用する性能の良いタイヤを作ることができたということです。

この研究がだいたい今から20年くらい前の話です。20年前にゴムの解析をするということも果たして正しい値が出ているのか分からないという時代にも、このような事に成功しているという事例です。段差も100だったものが30%くらいよくなっているという摩耗の結果が出ています。なぜ乗り心地の改善ができるのかということですが、平坦な状態でのものを100としたときの、それぞれの圧力とときの圧縮性を見ると、平坦な状態ですと変形の形としてあいう形になっていますが、最適な場合ですと、こんな形になっている。つまり、ここらへんのがこっちに来て支えてくれるというように、よく変形する。よく変形するということは、接地面が非常に強くなるということと、ある意味では柔らかさを持つという両方のよさがあるんだそうです。結局、接地圧を見ると赤い部分が減ってきているということで最適化形状が非常に優れているということが分かっていくという話です。タイヤは回転するものですから、それぞれのところでどういふふうに変圧力が変わっていくかということについても、これを見ると赤い部分がなくなっているんでタイヤとしての性能は非常によくなっているという考察ができます。ちなみにドライでもウェットでも同じような形になるんですけど、アイスバーンに関しては全然違うそうで、これが一番いい形だそうです。寒冷地に行かれたときはちゃんと専

用のタイヤを履かせることと、寒冷地の人是一年中国じタイヤではなく夏にはちゃんともとに戻して下さいというお願いになります。

ブリヂストンさんですが、今はエアスタイヤというものをつくっていらっしゃいます。これは全部スチールで作られているんですが、骨みたいなのが出ているというので空気が入らなくてパンクしないという未来のタイヤというので作られています。実現の可能性はどの程度あるんですかと聞くと、タイヤとして作ることは今でももうできる、ただ重たいんだそうです。実用性は全然ないということです。この一本一本のスポークの形を、最適化を使っているのですが、横向きの変位を一番小さくしたいということと、縦に圧力がかかったときはなるべく接地させたいので曲げたいという両方の目的を持って作っているというふうに伺っています。

さきほどの位相最適化でやった結果とこの結果が非常に似ているということで、位相最適化をやられている人たちは、エアスタイヤのこの形は位相最適化でやっているんですよという話をよくされるそうなんですが、いえ違いますということを書いて、何がどう違うのかという話を聞いてみると、一本一本の繊維がぶつかると壊れてしまうので、ぶつからないような設計をしなければならない。それが位相最適化ではできないので、普通に変数を取って最適化しているという話です。これが多分、今一番新しいタイヤの状態にして、あとはどう改善するかというと、鉄を使わずファイバーかというと、炭素繊維はまだ高いので使えない。一番注目しているのはプラスチックだそうですが、プラスチックだとやはりまだ弱くて、すぐ壊れてしまうのでいい素材がないかと探している状態だそうです。今、これがどんなところで使われているかということ、最近、身体障害の、特に足のわるい方の、自動で動く車椅子のエアが抜けてしまうと大変なことになるので、絶対エア抜けは避けたいというものさそうで、そういうところでは多少重くてもいいだろうということ、車と違って上に乗るものが軽いものですから使えるというので、こういうところで使われていると伺っています。

次にPIDOに関する話です。PIDOは汎用の最適化といわれています。どんな対象でも、これに入れたらうまくいくというもので、シンクロトロンという最適化です。シンクロトロンとは、放射線を発生させる機械で、15年前くらいに研究しました。ガンの治療に使うものですが、通産省の基準を守らなければならない、また、時代遅れの指定のソフトでなければならなかったので大変な研究でした。永久磁石の端部の形状を変えることで放射線を封じ込めるということを考えました。7つの変数で行うことになりました。横浜国立大学に開発依頼をしましたが、断られたため私のところに依頼が来ました。そこで、RBFネットワークをつかうことにしました。結果、完全に封じられたため、製品化に成功しました。汎用性の高さを問われただけの話でした。そのPIDOは15年前から現在も同じ形状です。

次はNP（ニューメディカルプランニング）困難についてです。最適化が難しい問題で、「板取問題」と言われています。どういう順序で、どこに置くかという順序決定のためのGA（Genetic Algorithm=遺伝的アルゴリズム）です。配置のルールを決めることが重要で、決めやすいビットで行います。位置を決めず、ルールとしてどこの取り合い点に近いか、それを考えて置くという方法を取ります。これを使えば、良い配置ができるのではないかと、ということです。

敷地内に工場の配置をする場合はGAを使いつつ、メンテナンススペースを考慮します。それを素材として、さらにPSOを利用して動かすと、より良い配置が可能になります。そうすると現場で何年も働くベテランの人よりも優れた配置が可能になります。

すべてうまくいっているものは多目的最適化でして、汎用化のために既存のデータを利用しようというもので、データベースの利用につながる話です。データベースも量が多いので、信頼性の

高いものは何かを考慮しながらそれを引っ張ってみていきます。コンピュータの性能の向上もあり、下手したら解析をした方がデータベースを調べるよりも時間が掛からないという事が起きています。よって、使いたいデータベースをすぐ使えるようにしておくこともしなければなりません。従来は、ただアーカイブしていただけでしたが、そういったことに気を付けていかなければならなくなってきました。出てきた結果を実際に計測しなくてもいいようにNPネットワークを使って予測することもしています。その精度を上げることが大切です。先人の技術をフィードバックすることでそのノウハウの伝承が可能になります。現在、香川大学では薄板の生成の最適化を研究していますが、実用には収益との兼ね合いという壁があります。

最後はチーモロジーの話です。

これは地元の丸善工業と協力して研究しています。元はダグ・ワイルドが考案していて、どうやってプロジェクトチームの効率を上げていくかを考えるために発案されたものです。昔、彼が俳優をやっていた時に、映画監督にさせられたアンケートからスタッフのチームを形成されて、その結果、仕事がしやすかったため、応用することを考えたそうです。

根本は、C. G. JUNG（カール・グスタフ・ユング）の性格分析を使っています。大きく分けて、情報収集と意思決定に関するもので、内向的なのか外向的なのかという分け方をします。外向とは、他の人と話をする事で元気になる人で、内向とは、自分で考えて結論を出して行動するのが好きな人だと考えてください。例えば、アンケートの結果では私は外向的で、妻は内向的という結果でしたが、実情は逆だったりします。この分析で分かるのは、エネルギーの溜め方です。外向は直観、内向はイメージーションによりアイデアを生みます。

このアンケートは、MBTI協会（ユングの考え方を推す人たち）公認でなければ実施できません。元になるのはMyers & Briggsのパーソナル理論であり、16の性格分析によって行われています。そういった事情から、このアンケートを模して作成し、実施しました。

丸善では、管理部門ではミスマッチが見つかりましたが、印刷部門をはじめ、どの部署でもうまく人員配置ができていたことがわかりました。

次に、バランスが大切であるという事も考えて研究をしました。

バランスのとれたチームでは仕切り役を評価されたい人がうまく機能していましたが、偏りのあるチームでは、一か所に負担が集中してしまいました。

そこで、あえてバランスの悪いチームを作った結果、仕切り役のいないチームはまとまらず、仕切り役だけのチームは結論を出すのが早すぎて、どちらも失敗に終わってしまいました。しかし、それぞれのチームに、足りていない人材を1人プラスすることでうまくいきました。結果的にバランスの取れたチームの方が良かったという結論になりました。

つまり、ダグ・ワイルドの理論、20個のアンケートは正しいという事、チーモロジーは正しいという事がわかりました。

#### 「質問」

本日は最適化について貴重なお話を聞かせていただきありがとうございました。身の回りのことが最適化が役立っており、成り立っていることがわかり、本当に興味深いお話でした。

MBTIのアンケートなどを使って部員の性格などを把握し、最適なチーム作りなどをしたいと考えております。しかしお話の中でMBTIのアンケートは簡単に手に入らないというお話でした。何か同様に机上で簡単に行えるものがあれば教えていただきたい。

#### 「回答」

MBTIの認定を受けたユーザーでなければこのアンケートは実施できない。私の知る限り、Web上で同様に行えるものは残念ながらありません。

「質問」

最適化は大変興味深いものであるため、情報の授業で取り扱ってみたいと考えている。最適化について指導する際に、教材や指導法、最適化を生徒に体験してもらえるような具体的な方法などありましたら教えていただきたい。

「回答」

大学の指導でも難しさを感じているが、講義では表計算ソフトを使って線形計画法を体験させる指導を行っている。

「質問」

大変興味深い講演ありがとうございました。前半の最適化も後半のチーモロジーについても、経験や勘、人間関係の中で判断されてきたことがほとんど機械化、計算で行われるようになって感じました。今の高校生が10年後20年後に、そういう時代に活躍していくためにはどのような能力が基礎体力として必要でしょうか。

「回答」

結果的に意思疎通能力、相手の言わんとすることを理解する能力が一番大切になると思います。講義をしていると、式を解くことはできるが、文章題にすると解くことができない学生がいます。文章から式を作り出すことができないのです。企業にお話を伺うと、現場ではソフトウェアがあり、求められるデータの入力 that 正確であれば答えが出るといいます。つまり一番大切なものは、どうコミュニケーションをとって必要な情報を出してもらうかということになります。そのためには日本語を理解し、きちんと喋り、聞き出すこと、つまりコミュニケーション能力が必要です。