

機械の動力学から人間の動力学へ

井上 喜雄*

(受領日：2014年6月1日)

高知工科大学システム工学群
〒782-8502 高知県香美市土佐山田町宮ノ口185

* E-mail: inoue.yoshio@kochi-tech.ac.jp

要約: 筆者は、大学を卒業した後、25年間企業の研究所において機械システムのダイナミクスに関する研究活動を行った。その後の高知工科大学における17年間は、企業で行っていた機械システムのダイナミクスの研究はいくらか継続したものの、かなり多くの時間を企業での研究対象とは全く異なった人間のダイナミクスに関する研究に費やした。企業から大学へ移り、研究対象も大きく変わったが、合計42年間の研究活動を、全体を通して振り返って整理してみると、やっていた当時には気づかなかったいろいろなことがわかってきた。そのなかで、企業での研究、大学での研究のいずれにおいても、インパクトのある成果を期待するならば、難しくても挑戦することが重要であること、また、企業の研究所で客先でのトラブルシューティングや事業部からの依頼テーマを推進する場合、大学で他の研究機関との連携研究を推進する場合の、いずれにおいても、相手との信頼関係を築き Win-Win の成果が得られるような進め方をした場合に良い成果に結びつくことが多いことを実感した。

1. 緒言

著者は高知工科大学が開学した1997年の4月から当時の知能機械システム工学科に赴任したが、その時から約17年が経過した。その前は、(株)神戸製鋼所の機械研究所振動音響研究室で、機械システムの動力学(主に機械の振動)に関する研究に約25年間従事していた。振動音響研究室は、振動・音響という要素技術を核とした研究部門で、事業部門からの依頼テーマとそれを効果的に進めるためのツールを開発する自主テーマの両者を並行して推進していた。

高知工科大学に移っても神戸製鋼時代に注力した機械の動力学の研究を継続するつもりであったが、当時、高齢先進県であった高知県に貢献することを目的として、人間を支援するロボット、「ヒューマンフレンドリーロボット」を開発するという知能機械システム工学科をあげてのプロジェクトが学科長をリーダーとして開始され、高知医科大学(現在は、高知大学医学部)整形外科との共同研究に参加することになった。プロジェクトに参加したタイミングでは、それまで神戸製鋼で慣れ親しんでいた機械の動力学とは大きく異なる分野であったので、と

りあえず機械の動力学は、そのままメインの研究分野として残しておき、一部だけ新しい人間に関わる分野に進出するつもりであった。しかし、幸か不幸か2年目から急きょプロジェクトリーダーを仰せつかることになってしまい、その結果、研究分野の舵を機械から人間のほうへ大きく切らざるを得なくなった。人間に関わる分野は、機械振動という勝手のわかった分野ではなく、わからないことばかりであり、研究を開始して数年間は、この分野での論文は全くかけず苦労が絶えなかったが、現在では、論文も継続的にかけるようになるとともに、成長分野と関連が深い挑戦的な研究の推進が可能になるとともに競争的資金も獲得できるようになった。17年前に人間のダイナミクスのほうへ舵を切ったことは、その過程でかなり悪戦苦闘はしたものの、結果的には筆者にとって非常に魅力的な研究に挑戦する機会を与えてくれたように思われる。

このような、企業、大学でのあわせて42年間の研究活動を、全体を通して振り返ってみると、企業の研究と大学の研究という性格の相違はあるものの、また、主たる研究対象は大きく変わったものの、両者に共通で思いあたるということがいくつかあること

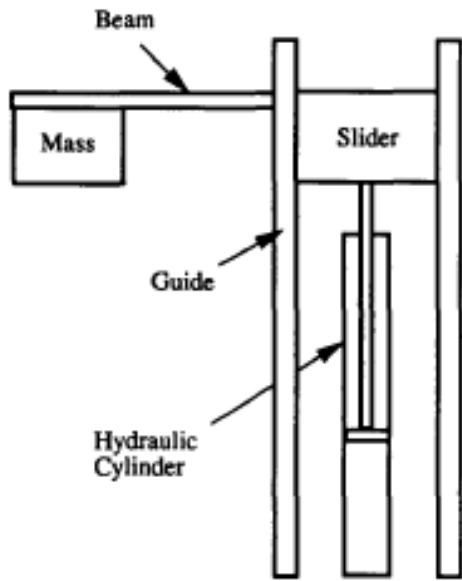


図 1. 油圧による昇降システム¹⁾

に気がついた。

本報では、まず、企業の研究所および大学で経験したことについて述べ、そのあとで、両者を通してわかったことを示す。

2. 機械システムの動力学と企業での研究活動

諸言で述べたように、著者は、高知工科大学に赴任する前は、25年間、(株)神戸製鋼所の機械研究所振動音響研究室で、機械の動力学、おもに機械の振動に関する研究を約25年続けてきた。所属していた部署の名称は、組織変更などで何度か変わったが、研究分野は変わらず、機械の動力学に関する要素技術研究であった。

業務の内容は、神戸製鋼の事業部で発生する振動に関する問題を事業部からの依頼を受けて解決するという依頼テーマと、そのような問題に関するニーズを先取りし、将来発生すると考えられる問題を効率的に解決するための基盤技術開発を行う自主研究テーマの2種類に分類された。このような形態は、機械研究所での隣の研究室であった構造強度研究室や流熱技術研究室でも同様であった。

研究部門には、このような要素技術を主体とした研究室と企業の将来をになう新製品を生み出す研究が主体の研究室が存在した。

振動音響研究室における事業部からの依頼テーマには、さらに2つのパターンに分類された。事業部自身に問題意識があり、事業部の製品を差別化するには克服すべき振動に関する中期的な課題があ



図 2. 計測した振動波形¹⁾

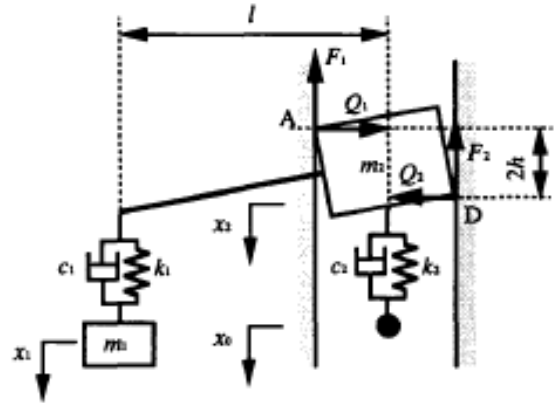


図 3. 振動現象を表す数学モデル¹⁾

ると考え、1~3年程度の計画で実施する依頼テーマである。

もう一つは、飛び込み案件であり、事業部が客先に納入した機械で試運転中に異常振動が発生した場合などに緊急で依頼されるテーマ、いわゆるトラブルシューティングである。そのような場合には、研究所のなかの計測部隊、事業部の担当者と一緒に、あわてて客先に出向き、できるだけ短時間で異常振動の原因を究明し対策を提案することが第一ステップの仕事である。その日のうちに決着する仕事から、短期間では解決できず中長期的なテーマとして検討することになる場合までいろいろなレベルの問題があった。トラブルシューティングの例として、図1に示す油圧を用いた昇降装置で負荷を下降させる場合のみ振動が発生したという話を電話で受けたことがあった。翌日、客先に出向き計測した結果、図2のような幾何級数的に振幅が増えていく異常振動波形が得られた。それまであまり見たことがなかった現象であったが、とりあえず、摩擦が関係していると判断し、現場で、潤滑を改善するという油応急措置を施して、翌日研究所に戻り、原因を推定するために、図3のような数学モデルを作成して検討したところ、摺動部摩擦の非対称剛性に起因する自励振動と考えるとうまく現象の説明ができたので、対策を提案し、問題は解決した¹⁾。

客先で原因を究明する場合には、自主研究とは異なり、適切な判断を即時に下すことが要求される。原因を究明する場合には、できるだけ詳細に長時間

の計測を行ったほうが情報量が多く、診断の精度があがる。逆に、計測時間が長くなれば客先はなかなか営業運転に入れず損失を発生させることになる。したがって、相反する2つの観点のバランスも考えながら判断する必要があった。

ここで、トラブルシューティングが、どのような場合にうまく行き、どのような場合にうまくいかなかったかを振り返ってみる。研究所の人間が、メーカ側の立場だけで考え、駆け引きをして対応した時には、案外うまく行かなかった場合が多い。客先の立場も十分考え、専門家として、長い目でみた最適な診断方法を採用するように客先を説得し、それが受け入れられた場合には、結果的にうまくいくことが多かった。逆に、提案を受け入れてもらえず、客先が主張した安易な診断方法にもとづいて実施した対策の場合には、運よく解決した場合もあるが、異常がおさまらずに、結局さらに長引く場合や、原因が究明できないまま対策したためトラブル再発につながったケースなどが多々あった。

このように客先のトラブル対策の場合のポイントは、客先との信頼関係が構築できるかどうかであった。しかし、初対面の人相手に、気合だけで信頼関係が構築できるわけではなく、そのために必要な条件は、研究者が、信頼されるような高い技術力を持っていること、変に駆け引きをせず、客先のことも考えた上で誠意をもって客先を説得できるコミュニケーション力を有していることが必要であったような気がする。同時に、客先側のリーダーに見識と人間力があるかどうかも重要なポイントであったように思う。両者がそろえば、結果はともかく、目標を共有して対策を進めることができる。したがって、客先のなかで信頼できそうなキーマンを見つけることも成功のための一つの条件であった。トラブルというのは、一見、メーカにとっては客先からの信頼を失いそうな出来事ではあるが、誠意ある対応でうまく解決できれば、逆に信頼度が向上するケースが多々あった。

このようなことは、中長期での事業部からの依頼テーマでも同様であり、事業部のキーマンとの間に信頼関係が構築された場合にはよい成果につながると同時に継続して筋のよい依頼テーマが来る場合が多かった。お互いが相手の立場を理解し、十分議論をして目標を共有して推進した場合には、中期的に事業部の競争力が高まるとともに、研究所のレベルもあがる Win-Win の結果につながった。

自主テーマとしては、振動現象を解析するソフトウェアや振動診断のための計測技術の開発などが

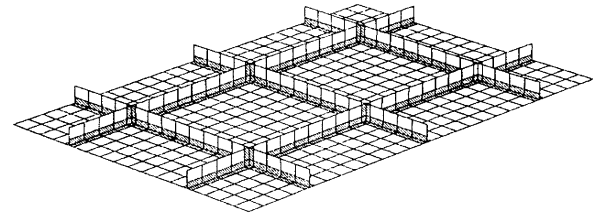


図 4. 有限要素法によるモデル化の例²⁾

中心であった。事業部からの依頼テーマの内容は、社外秘の問題が多いため、学会発表や学術論文投稿の多くは、自主研究の内容に関するものであった。

筆者は、入社した当時は、振動工学に関する知識は、大学で授業にほとんど出席しなかったため、ほぼゼロであったので、一から勉強するはめになったが、大学で数学だけはまじめに勉強していたことが意外に役立った。振動工学の理論は、理論的にすっきりした分野であり、線形代数と微分方程式の知識を頼りに専門書を3冊読んだ結果、1年以内に十分戦力になるレベルまで到達できた。テーマは、当時流行していた図4のような解析モデルを用いる有限要素法による振動解析プログラムの開発が中心であった。

依頼テーマと自主テーマのうち、直接企業に貢献するのは事業部からの依頼テーマであったため、仕事が重なる場合には、依頼テーマが優先され、自主テーマが遅れがちになることが多かったが、それを怠れば、2~3年後に他社に遅れをとることになるので、最低限の自主研究は、土日も含め死守した。状況に流されず、必要なことを実施してよかったと思われる。論文を書くのも、ほとんど土日であったので、こだわりがないととても書けなかった。また、これが実施できたのは、直属の上司の考え方に負うところが大きかった。泥臭い仕事と、他社に先駆けた基盤技術開発の両立の必要性を叩き込まれた。

振動音響研究室の自主テーマの対象は、回転機械や一般的な産業機械のように回転や動作はあるが姿勢はあまり変化しないものに関する振動と、産業用ロボットや建設機械のように姿勢が変化し運動と振動の両者が混在したものの2種類があった。

著者が、神戸製鋼に入社したころは、それまでにやってきた自主開発テーマである有限要素法関連のテーマは、市販の構造解析プログラムがまだ普及していなかったので競合他社でも自社開発が盛んにおこなわれていたが、手法のベースとなる理論は広く知られていたため、それに自社の製品の特長や新しい解釈を加えてプログラム化すればよかった。

また要素技術研究の分野では、学会では、競合他社であっても研究者同士の交流が活発であり、企業と大学の研究者の仲もよかったので、技術動向が容易に得られた。したがって、振動解析のプログラム開発の目標は立てやすく、あそこまでがんばればなんとかなるといふ見通しを持って進められた。

入社後数年たった時点では、構造物が中心の機械の振動に関しては、解析プログラムも何本か開発し、開発したプログラムを使って事業部の依頼テーマで成果も出せるようになった。

一方、ロボットについては、社内では、おもに他の研究所の制御部門が支援していたが、動力学にはあまり立ち入っていなかった。我々のほうも構造の振動は熟知していたが、制御や運動が絡む問題には手を出していなかった。建設機械についても、油圧・制御と機構の動力学が一体化されて議論されることはなかった。

丁度、30歳くらいのころに油圧の鍛造プレスをやっている事業部から高速でかつ高精度のプレスの設計をしたいので、その評価が可能なプログラムを作ってほしいという依頼を受けた。初めての運動制御や油圧がからむ問題であった。プレスは運動といっても動作が単純で姿勢変化もないで、油圧にさえ対応すればよかったので、プレス専用のシミュレーションプログラムを作成することは、あまり大変ではなかった。

一方、当時機械分野の主力製品であった建設機械は、姿勢変化もあり、油圧バルブを介した制御が行われ、構造も柔軟で、そこで発生する現象も複雑であった。もし、そのような建設機械の動的な現象を解析できる技術に拡張できれば、他社を大きくリードできる成果が得られ、非常に大きい貢献ができるのではないかと考えた。そこで、将来、建設機械に適用できる技術へ拡張することを視野に入れて、プレスのような動作の簡単な場合に限定してではあるが、有限要素法の考え方を油圧・制御に拡張した汎用の構造—油圧—制御系の動的挙動解析プログラムの開発をアンダーザテーブルで開始した。

油圧では、変位に対応する変数として流量の積分値（積算流量）、力に対応する変数として圧力を用い、断面積を用いて座標変換すること、また、油圧管路系の分岐点での連続の式と力のつり合い式の関係が、構造系の分岐点での関係と逆になっていることに対しては、図5(a)のような分岐要素を用いることによって、構造系と同様の定式化を可能にした。図5(b)のような油圧シリンダに関する要素³⁾では、油と構造が接する点では、流量と構造系の

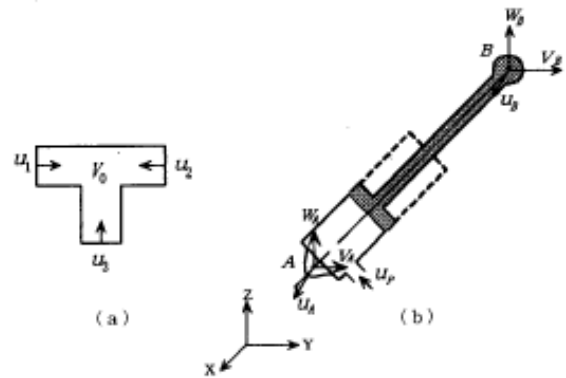


図 5. 油圧シリンダ要素³⁾

速度に断面積を乗じたものが等しいという仮定を用いて座標変換すれば、構造物の有限要素法と同様の考え方で扱うことができた。制御系は、できるだけ2次系にまとめ、機構系と同様に $[M]$, $[C]$, $[K]$ に組み込み数値積分法として安定な Newmark- β 法を採用した。その結果、通常の機構系の動的解析の延長線上の考えを用いた機構—油圧—制御からなる機械システムの汎用動力学解析プログラムの原型を開発することができ、油圧で駆動する機械の運動の分野に少し足を突っ込んだ。

丁度その頃は、世界的にも複数の剛体リンク機構の動力学解析手法として剛体マルチボディダイナミクスの研究が盛んになりつつあった時期で、アメリカやドイツの大学が先端を走っていたが、国内での研究者はほとんどいなかった。

代表的な建設機械の一つである油圧クレーンは、各リンクが剛体とはみなせず、柔軟なリンク構造物に油圧と制御が加わった複雑なシステムである。それまでは、振動が中心で、姿勢が大きく変化する問題にはあまり携わったことがなく、前述のプレスのような姿勢変化を伴わない運動くらいであった。そこで、先行研究を調べた結果、アメリカの大学で開発された剛体リンクの動力学解析プログラムが市販されていることがわかったので、ためしに建設機械の問題に使ってみたが、精度がわるく、まだまだ課題があることがわかった。まして、柔軟なリンクをあつかったものや、油圧系とのリンクを考慮したものも見当たらなかった。

そこで、世界的に進みつつあった剛体のマルチボディシステムの動解析手法から入っていくのではなく、前述のプレスで実施した有限要素法的な考え方を拡張する方向で、クレーンのような柔軟マルチボディを扱えば、一挙に当時の剛体マルチボディシステムの研究の一步先にいけると考え、難しいこ

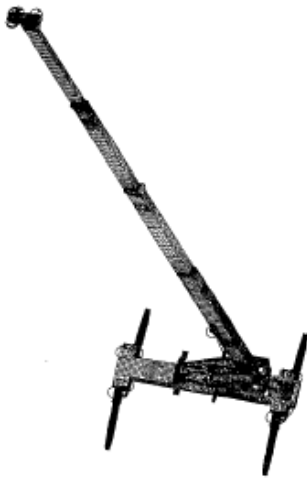


図 6. クレーンの解析モデル³⁾

とは承知で挑戦してみたいと考えた。プレスの解析とは、次元の違う困難さがあることは、剛体マルチボディダイナミクスの状況からも予想はできた、

当時の上司に理解があり、本来の業務で十分成果がでていれば、アンダーザテーブルでは、何をやってもよいと言われていたことを頼りに、プレスで開発した有限要素法ベースのプログラムを拡張し油圧・制御系を考慮した柔軟マルチボディシステムのダイナミクスのプログラム開発に挑戦してみることにした。

しかし、着手してみると、予想していたよりもはるかに手ごわく、考えがあまかったことを痛感した。これでもうまく行くだろうという改良をしてみただけだったというパターンを何度も繰り返した。しかし、ねばり強く一つ一つ問題をつぶしているうちに、少しずつ前進していき、2年くらい経過した時点で明るさが見えてきた。そこで上司と相談して、正式に自主テーマとしてあげ本格的に開発に着手した。柔軟マルチボディの部分は難解で、条件によってはうまくいかない場合があったが、複雑な建機以外の簡単な問題なら十分使用できるようになり、それが思いのほか成果につながりだし、社内の多くの問題解決に貢献できた。

丁度そのころから、他の研究部門から移ってきた同僚や部下の協力が得られるようになり開発が加速した。その期間でも、何度も壁にぶちあたったが、何とか乗り越え、3年後に、まだ、世界でもほとんどやられていなかった油圧制御系を含む柔軟マルチボディダイナミクスの汎用解析プログラムの原型がなんとかでき、学術論文も少しずつ書けるようになった。

それまで自主テーマで進めていたが、建機への応

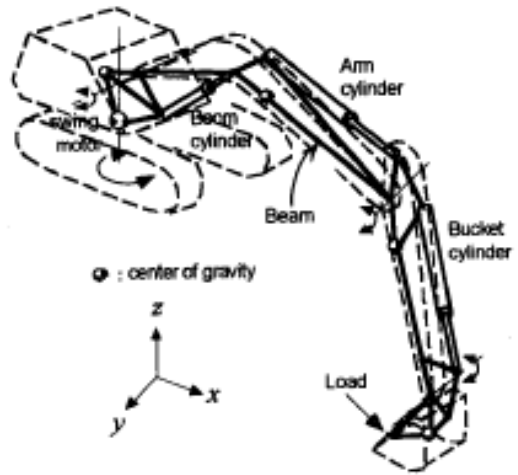


図 7. 油圧ショベルの解析モデル⁴⁾

用が可能な状態となったので、クレーンへの応用を建設機械部門へ提案した。そのころは建設機械部門の業績が伸びている状態ではなく、事業部の研究予算が十分ではなかったため、よっぽど手法の有用性を認めてもらわないと依頼テーマとしての十分な予算がつかなかった。そこで、すこしずつ実績を積み重ねていくことにした。その努力が実り、事業部のキーマンとの信頼関係が構築され、建設機械部門からの依頼テーマの予算が、どんどん増加していった。それでも、実機実験による精度の検証や、使ってみてうまくいかない部分を改良などで、建機の設計に本当に使えるようになるまであつというまに2～3年が経過していた。

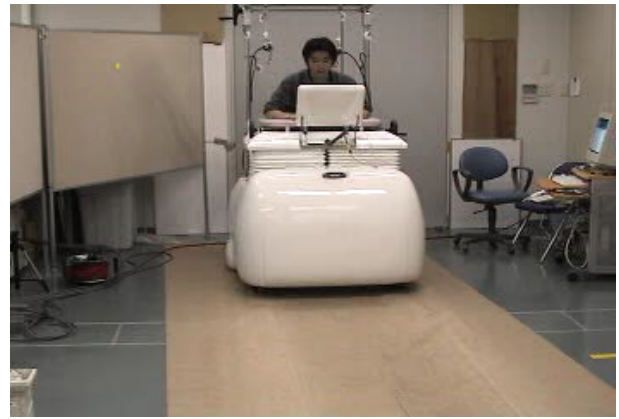
しかし、ここまでくると、図6、7に解析モデル^{3,4)}を示すクレーンや油圧ショベルの多くのテーマに活用されるようになり、事業部からも多額の依頼研究の予算がもらえるようになった。そうになると、財政的に安定するので、今度は、また、さらにニーズを先取りした自主研究もやりやすくなり、関連技術をさらに充実させていくことができた。また、この分野にかかる研究室の人数も増加していった。その後、筆者が高知工科大学に移った後も、建設機械分野が事業として大きく伸びたことや、後継者のがんばりもあり、現状では、運動性能、操作性、エネルギー効率の計算や効率向上のための設計法、HILS (Hardware-In-the-Loop Simulation) による実部品を組み込んだリアルタイムシミュレーションへの展開⁵⁾など、建設機械の設計にとって極めて重要な技術となっている。また、汎用的な解析技術であることから、社内の多くの部門の製品の競争力向上に力を発揮し競合他社や大学関係者からも注目されるようになったとのことである。

このように、なかなか建設機械の成果につながらなくても研究が継続できたのは、解析技術があるレベルまではきたが、本命の建設機械で成果がでるレベルに行くには、まだひと山越えなければならない状態の時、建設機械以外のいろいろな問題であれば十分適用することができ、成果が出だしたことで開発の意義が社内で認められ出したこと、並行して進めていた従来から積み上げてきた振動解析でも着実に成果を出続けていたこと、上司の理解があったことなどが大きかったように思う。

また、自主研究で得られた技術を、事業部門から依頼研究として予算をもらい、研究を加速するには、事業部キーマンとの信頼関係の構築が重要であった。キーマンとの信頼関係が構築されると、どんどん事業部のニーズに関する情報が入るとともに、研究者としてもやりがいのあるテーマが増え、研究予算も大きくなって行った。ただし、予算は、景気や市場の動向などに左右されるので、いつも順調というわけではなかった。

3. 機械システムのダイナミクスから人間のダイナミクスへ

緒言で示したように、開学してすぐ、高知医科大（現高知大学医学部）の整形外科、リハビリテーション部との共同研究を中心とした「ヒューマンフレンドリーロボット」なる学科プロジェクト研究を、知能機械システム工学科の学科長をリーダーとして、学科をあげて取り組むことになった。高知医科大との共同研究テーマは、患者が転倒せず、また、理学療法士が支えなくても、安全にかつ効果的に歩行リハビリテーションが行える歩行訓練機（一種のロボット）を開発することであった。人間も一種のマルチボディシステムであるので、神戸製鋼時代の対象であった建設機械が人間に変わるだけならなんとかなるだろうと甘く考え、とりあえず慣れ親しんだ機械振動の研究をメインテーマとして継続しておいて、プロジェクト研究にも少し参加することにした。ところが、2年目になって学内のプロジェクト研究のルールが変わり学科長はリーダーをしてはいけないということになって、どういうわけか、突然、筆者がリーダーを仰せつかることになってしまった。さらに、前リーダーが外部より歩行訓練機の開発というテーマでかなりの額の予算を獲得したので、そのプロジェクトのリーダーもやらないといけないことになった。したがって、当初の、研究の軸は振動と考えて、人間の部分は味目から始めようというむしのよい考えは吹っ飛んで、振動研究はサブに回し、



(a) 外観



(b) 転倒防止システム

図 8. インテリジェント歩行訓練機

このプロジェクト研究をメインテーマとしてやらざるを得ない立場となった。

当初は、マルチボディダイナミクスの人間への応用と軽く考えていたが、状況がかわり前述のような歩行訓練機を3年間で開発することになった。分野が機械から人間に変わることは覚悟していたが、マルチボディダイナミクスどころではなくなった。神戸製鋼の25年間は、要素技術研究者であったので、実験装置以外は物を作った経験はなく、図面も書いたことがなかった。たまたま研究室に在籍していた社会人の博士後期課程学生がメカトロ機器設計の経験を有していたので、その学生の協力を得て、苦労の末、いろいろな機能を組み込んだ図8のような転倒を防止しつつ効果的に歩行訓練を行えるインテリジェント歩行訓練機を開発した。

まず転倒を2つのパターンに分類し、それぞれのパターンの転倒を検知する技術を開発した。訓練機では、図8(b)のように上からロープで患者をつ

りさげているが、歩行中にしっかり支えると患者がロープに頼りすぎて訓練にならないので、歩行中は、拘束にはならず、できるだけ転倒しにくい制御を行い、それでも転倒しそうになれば、転倒し始めを検知した瞬間に、仮想インピーダンス制御によりロープでやさしく患者を支え、もとの位置に復帰させるという制御を採用した。さらに、患者の意思を推定し、患者の動こうとする方向へ訓練機が動く機能、パーキンソン病患者の歩行を促進する機能、など多くの機能を盛り込んだ。そのことにより、高知医科大学からも高く評価はしていただいた。しかし、高価なシステムになりすぎたこともあり、商品化にはいたらなかった。

苦労した原因は、応用分野が、機械から人間に変わったことと、技術の範囲が、自分が熟知していたマルチボディダイナミクスから歩行訓練機の試作という総合技術へ広がり、筆者の力でカバーできる範囲を超えてしまったことが関係していると思われる。技術と応用分野のどちらかが変わる程度ならば、研究のねらいを的確に定めることは可能と思われるが、同時に両方変わったため、要素技術を活用した差別化のための研究よりも、慣れていない物づくりのほうに多くの時間を費やしてしまった結果、いろいろなおもしろい機能は盛り込めたものの、個々の技術に深みが不足していたのではないと思われる。以上のことから、新しい分野へ乗り出すときは、片足ならよいが同時に両足とも乗り出すのは、よっぽど高い見識か、大きい頑張りがないと難しいようであり力不足を痛感した。

しかし、この経験により医療分野に人脈ができたことは、十分意義があった。テーマにインパクトがあるかどうかの判断は、応用分野での潜在ニーズを把握する必要があるため、そのための情報が入りやすくなった。また、このまま、医療分野から撤退するのはくやしいので、プロジェクト終了後は、すこし考え方を考えることにした。応用分野は人間にシフトするが、機械のダイナミクスで培った動力学に関する基盤技術を人間用に発展させたものを技術の核、すなわち、差別化のポイントとなるようにねらいを定め、より深みのある技術の開発をねらうことにした。

具体的なカテゴリーとして、人間の運動を推定するセンサ、人間を支援するアクチュエータの研究を基盤から組立てていくことにした。開発した技術により、大きいニーズはあるけれど従来技術では解決できなかった医療分野の課題をブレークスルーすることができれば、インパクトがある研究につなが

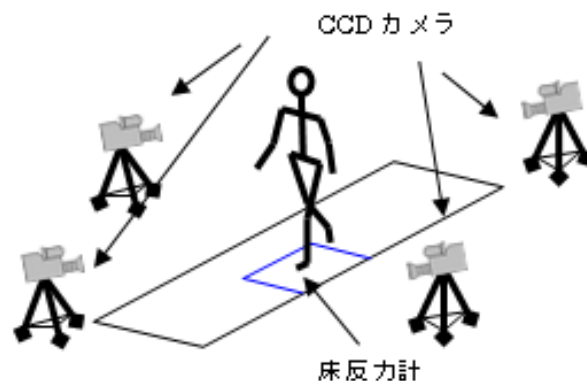
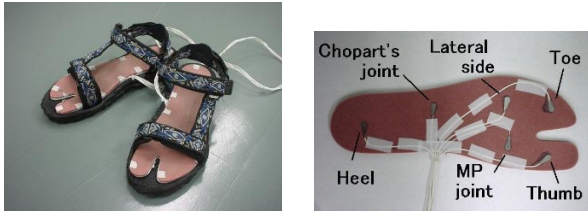


図 9. 設置式の運動計測システム（従来法）

るのではないかと考え、研究を進めることにした。

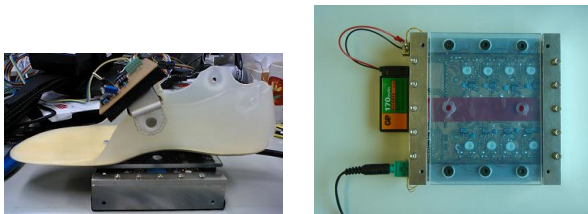
最初に目をつけたのが、人間の運動解析技術である。すでに、医療・健康・スポーツの分野では、非常に重要なキー技術として浸透しており、図9のようなカメラと床反力計の組み合わせた設置式の運動計測システムが以前からよく用いられており、歩行の運動解析だけをテーマにするような学会があるくらいで多くの人々が使用していた。具体的には、マーカをつけた人間の3次元動作と床から足が受ける反力を計測し、逆動力学により関節に働いているモーメントを推定する技術で、リハビリテーションやスポーツのトレーニングに関する研究によく用いられていた。丁度、われわれの研究室でも研究成果の精度検証のためのツールとして同様の計測システムを所有していたので、ある意味ではユーザでもあったため研究のねらいを絞り込みやすかった。

このような従来型の装置を用いた場合には、信頼できるデータは得られるものの、広い場所が必要であること、床反力計の上の1,2歩しか計測できず連続歩行、階段昇降、外部での計測などが基本的には困難なこと、計測の準備に時間がかかること、などいろいろな課題があることがわかった。そこで、これらをウェアラブルなものに変えてしまえば、すべての課題が解決するので、うまくいけば、必ず大きいインパクトがあると考えた。いままで計測できなかった条件で計測できること、すなわち、何歩でも、階段でも、屋外でも計測できるし、歩行訓練機使用時での計測、支援機器への組み込みなども可能となる。また、従来の機器のように広いスペースが不要で、準備も簡単であるので、これまで、大学や大病院など一部の機関で、おもに研究用に用いられていたものが、医療の現場で使用可能となる。また、歩行だけでなく、スポーツや健康の分野にも拡張が可能となり、使用者が現状よりもさらに拡大



(a) 外観 (b) センサの配置

図 10. 3 軸の履物内蔵床反力計測システム



(a) 外観 (b) 内部構造

図 11. パラレル式 6 軸床反力センサ

するとともに、応用分野の研究の発展にも大きく貢献できる可能性があると考えた。

目標は定まったが、先行研究は全くみあたらず、困難な研究であることは覚悟の上で、床反力計のウェアラブル化に着手した。床反力計には 3 軸の力と 3 軸のモーメントの計 6 軸の情報が必要であったが、まず図 10 に示すような鉛直床反力と 2 軸のモーメントの計 3 軸のセンサ開発からスタートした。図 10 (b) のように履物に 6 個の圧力センサを埋め込み、その出力に重回帰分析を適用することにより、鉛直床反力と 2 軸のモーメントを推定する方法について検討した。それについては、信号処理が予想外にうまく働き、2 年程度で履き心地と精度を両立するセンサシステムが得られた。

次に 6 軸に挑戦したが、ここからは、非常に難しく、なかなか進まなかった。それでもなんとか 3 年かけて図 11 のような履物装着型でパラレル式の 6 軸の床反力センサ⁴⁾を開発し良好な精度が得られたが、履物に装着すると下駄のような履き心地で、医療関係者からは歩容が乱れてしまうので医療分野では使い物にならないという厳しい評価を得た。

そこで、履き心地と精度を両立させるには、履物の柔軟性を生かせる 2 個のセンサプレートに分かれた形式にするとともに、プレートを超軽量・超薄型にするという極めて困難なことを目標として設定した。一般の床反力センサで用いられている剛性を確保する方法ではとても実現できないと考え、発想を変え信号処理で精度を確保することにした。軽量で、かつ精度も確保するという極めて困難な条



(a) センサプレート内部



センサプレート

(b) 履物に装着したセンサプレート

図 12. ウェアラブル床反力計測システム

件をクリアする必要があった。

そこから、3 年間、かなり苦労したが、図 11 のセンサとは全く異なった構造に新たな信号処理を適用した結果、ようやく精度と履き心地を両立させる図 12 のようなウェアラブル床反力センサを世界に先がけて開発することができた。続いて下肢用のウェアラブル姿勢センサも開発し、図 13 のような下肢の運動解析をウェアラブルセンサのみで実行可能にし、従来不可能とされていた種々の計測が可能となった。それを用いれば、図 14 に示すような階段上昇時の運動解析も簡単に行えるようになった。

一連の研究を国際会議や国際ジャーナルで発表したところ、ある時期から急に多数の欧米の大学から共同研究の打診をうけるなど、予想外に大きい反響があった。関連した学術論文⁶⁻¹⁸⁾も継続して掲載され、商品化も進んだ。



図 13. ウェアラブル運動解析システム
(装着時の外観)

また、一旦1つの特徴のある技術が得られると、その技術を核にした新しい展開が容易になったと思われる。その技術に新しい機能を加えた研究へと拡大できるだけでなく、その技術に興味を持った他の研究機関などとの共同研究も非常にやりやすくなったように思う。

4. 機械システムのダイナミクスと人間のダイナミクスの両者を経験して感じたこと

25年間の企業の研究所における機械システムのダイナミクスに関する研究活動、17年間の大学における医療や健康・スポーツを対象として人間のダイナミクスに関する研究を実施したことを、振り返ってみると、いろいろなことがわかってきた。以下では、それらを整理して順不同で述べる。

まず、機械振動の要素技術研究者と医者との立場はよく似ていると思った。トラブルシューティングは、振動診断と対策が中心であるので、医療診断と治療の置き換えても違和感はない。したがって、臨床医学は、トラブルシューティングでの活動と共通点が多い。一方、ニーズを先取りした中長期の自主テーマは、病理と似ている。筆者らの研究室では、個々の研究者が、その両方をやっていたことになる。トラブルシューティングには、いろいろなレベルがあったが、新たな研究課題のヒントになることも多々あった。

医学の場合には、臨床と病理の役割分担が分かれている場合が一般的であるが、1人の医者が時期により、両方経験することもあるのではないかとと思われる。筆者自身の経験からは、両方経験したことは非常に良かったと思う。現象を実感しているの

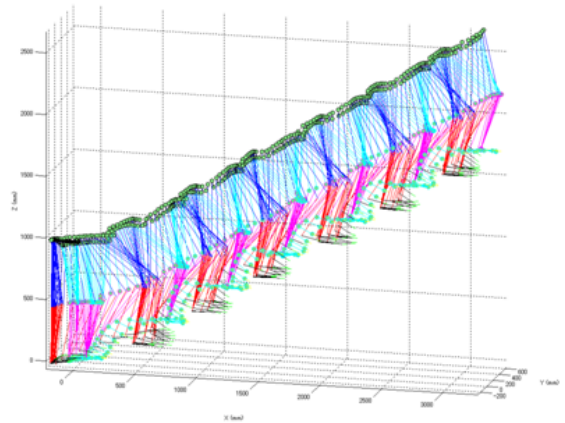


図 14. 階段上昇時のスティックピクチャ

ニーズを先取りしたテーマで深く掘り上げた基盤技術が得られることにつながるのではないかとと思われる。ウェアラブルセンサの開発でも、医療関係者からの情報だけでなく、自身でも従来型の運動解析装置を使用していたことは、課題を明確に知る上で非常によかったと思う。もちろん、最終的に商品として使用するのは、医療関係者であり、われわれが、医療目的で使用するわけではないので、十分な情報ではないが、現象を実感した上で研究を進めることは研究を深める上で意味があったと考えられる。一般的には、自分で体験することが難しいテーマの場合のほうが多いと思われるが、その場合には、信頼できかつ工学に理解がある医療分野の連携研究者からの確かな情報を得ると同時に、徹底したディスカッションなどを通して相互の理解を深めながら研究を進めることが必要と思われる。

神戸製鋼時代に行った研究を要素技術の観点から大きく分けると、振動とマルチボディダイナミクスに分かれるが、人間のダイナミクスへの応用を考えれば、マルチボディダイナミクスのほうが、人間の運動解析には直結していた。神戸製鋼では、建設機械や産業用ロボットの運動解析に利用し、高知工科大学では、歩行動作やスポーツに応用した。最近の市販されているマルチボディダイナミクスの解析プログラムでもそれを裏付ける現象が現れている。同じソルバーを使っている、自動車用とか人体用とか用途に合わせてプログラムを販売している場合があり、技術としてはかなり共通の部分が多いことがうかがえる。したがって、神戸製鋼時代に振動だけでなくマルチボディダイナミクスに携わっていたことは、高知工科大での人間にかかわる研究にかなり役立っている。

人間の動力学をやり始めてしばらくすると、マ

ルチボディダイナミクスを機械システムに適用する場合と人間に適用する場合に大きく異なることの一つに、何が既知で何が未知であるかがあることに気がついた。動力学とは、系に加わる力と運動の関係を明らかにするものであるが、機械の場合には、機械各部の質量や寸法、機械に加わる力は既知で、力が与えられた場合にどのように運動するかを計算することが多く、そのような解析を順動力学と呼んでいる。

一方、人間の場合には、力や各部の質量が不明な場合が多い。したがって、人間の場合には、運動を計測して力を推定するという逆動力学が非常に重要となってくる。このように、機械と人間では力学的な現象としては似ていても、なにが既知で何が未知というところが大きく異なっていることから、人間の動力学には、機械分野にはない別の課題が存在することがわかった。また、人間は機械よりも未知の部分が多く、難しいことも多いが、逆に、解決すればインパクトがある課題の宝庫であるともいえる。また、要素技術が共通であっても、応用分野が変われば、単に元の分野で構築した要素技術を新しい分野に適用するだけでなく、要素技術としても新しい課題を掘り起こすことができ、要素技術研究者としての力を発揮できる場面がいくらかでも内在しているのではないかと思った。もし、要素技術としてのブレイクスルーによって、人間に関わる分野でそれまでネックになっていた問題が解決し、その分野が大きく発展することにつながればインパクトも大きくなると思われる。また、このような新たな要素技術的な課題を見つけることが、より差別化した技術につながり、かつ面白いところのような気がする。

それとは別に、企業での経験が役に立ったことがあった。企業では動力学をベースとした要素技術研究者であったために、機械工学よりも基礎に位置づけられる物理（力学）や数学に戻って研究を実施した場合が多く、鍛えられたことである。数学や物理にもどれば、機械でも人間でも大差ないので、論理的に新しい解決策を考えると大いに役立った。したがって、企業での研究業務のためだけでなく、大学で研究分野を変更する場合にも、数学、物理の知識が活用できた。

企業における関連部署や客先との関係と、大学における連携研究がうまく行くための条件との間にも共通部分があるように思われる。最も重要なポイントは、お互いに相手の立場を考慮すること、相手と組むことにメリットを感じ、相手にも感じさせ

ること、すなわち Win-Win の結果が期待でき、それにより信頼関係が構築できることである。このことは、企業でも大学でも同様ではないかと思われる。一方通行では、あまり長続きしないことが多いと思われる。信頼できるパートナーを得ることは、連携して研究活動を行う場合の成功の必要条件であるように思われる。

企業で実施した油圧・制御を含む系の柔軟マルチボディシステムの動解析プログラムの開発と建設機械への応用は、アンダーザテーブルからスタートした。一方、大学で行った人間の動力学への参入は、当時の大学の環境に背中を押されて始めた。したがって、きっかけは少し異なっていたが、将来のインパクトがある成果を信じて困難な課題に挑戦したこと、簡単にはいかず悪戦苦闘したこと、長い年月を要したが最後に日の目をあびたことは共通していると思われる。インパクトが期待できるテーマであれば、多少の困難があっても挑戦しないとハイリターンは得られないことを実感した。

一方、難しいテーマに挑戦する場合には、成功確率にもよるが、うまく行く保証はないし、長い期間を費やして何も結果がでなければ、自身の環境も厳しくなり、精神的にもつらくなってくる。

したがって、新たに難しいテーマに挑戦するかどうかの決断は、なかなか難しいと思われる。期待されるインパクトの大きさや、リスクの大きさが明確であれば、比較的決断しやすいと考えられる。したがって、研究を開始する前に、可能な範囲で、それらを把握する努力をすることが重要と考えられる。しかし、それらを精度よく予測することもなかなか難しい場合が多い。もし、長期間にわたって、多くのマンパワーをかけて、何も得られなければ、立場的にも、精神的にも厳しい結果が待っていることになる。それをものともせず挑戦するには、よほどの精神力が必要であると思う。

筆者自身の経験を振り返ってみると、企業の時の柔軟マルチボディの場合には、成果を安定して出せる振動分野の研究を継続しながらアンダーザテーブルで研究を始めたので、悪戦苦闘が続いても追い込まれずにがんばれたように思う。それと、定期的に GO/STOP のチェックを行い、少し前進し見通しがよくなれば、マンパワーも少し増やすという形で、様子を見ながら進めたこと、また、最終ゴールまでは、長い期間がかかったが、途中でも、それなりの成果がでていたので、長期間研究を継続できたように思う。

大学での、人間のダイナミクスは、スタートは環

境に背中を押され、新しい分野に参入して、その研究にかなりのマンパワーをさいたが、それまで安定して成果がでていた振動分野の研究をやめてしまわず、少ないマンパワーであったが研究を継続すると同時に、学会活動で研究会の主査を務めるなど、情報のチャンネルも維持していたので、成果を出すことも持続できた。したがって、新規の難しいテーマで悪戦苦闘していても、比較的安定した精神状態で研究が遂行できたと思う。また、やみくもに研究を進めたわけではなく、一定の期間ごとに、研究の成功への道筋はどうなっているかや大きいインパクトが期待できそうかなどのチェックを入れて研究の方向をよく考えて進めたこともよかったと思われる。

それらを振り返ってみると、ハイリターンでハイリスクの難しいテーマに挑戦する場合には、ある程度の研究の見通しが得られるまでは、例えば科研費の基盤研究と挑戦的萌芽研究を並行して進めるように、成果の刈り取りができるテーマと挑戦するテーマをバランスよく進め、挑戦するテーマで成功への見通しやインパクトの感触がでてきた段階で、本格的に挑戦してきたテーマにマンパワーを投入するようなやりかたならば、比較的良い精神状態で研究を進められるように思う。とはいっても、なかなか理屈通りにはいかず、迷うことも多い。そのような場合には、背中を押されて始めるというのも、よいきっかけの一つではないかと思う。

このような経験から、難しくてもインパクトが期待できるテーマへ挑戦することの重要性を痛感した。リスクを軽減するためのなんらかの工夫や成功へのシナリオは必要であると思われるが、挑戦しなければ、なかなかハイリターンは得られなかったように思う。17年たって開学時のことを思い出してみたが、当時、初代学長の末松康晴先生が、「論文を書くだけで満足せず、インパクトのある研究に挑戦することが重要である」とおっしゃっていたことの意味が、今に至ってやっと理解できたような気がする。

5. 結言

企業の研究所で25年間、本学での17年間の、計42年間を振り返ってみると、企業の研究所と大学の違い、機械と人間の違いはあるが、研究の進め方という意味では、かなりの共通点があったように思われる。それぞれでの体験を紹介するとともに、両者を通して見て整理したものを、順不同で列挙した。そのなかで最も印象に残ったことは、「難しく

てもインパクトが期待できる研究に挑戦することの意義」と「連携研究の時の信頼関係の重要性」である。

最後に、学内、学外において、42年間の研究者としての活動中にお世話になった皆様に感謝の意を示す。

文献

- 1) 桜井明, 井上喜雄, 筒井秀実, 伊藤廣, “しゅう動部摩擦を介した非対称連成力による自励振動に関する研究.” 日本機械学会論文集C編, Vol. 60, No. 570, pp. 380–385, 1994.
- 2) 井上喜雄, 岡田徹, 上田宏樹, “制振材料を付加した3次元構造物の減衰特性解析(2層型積層制振構造の場合).” 日本機械学会論文集C編, Vol. 66, No. 644, pp. 1089–1096, 2000.
- 3) 今西悦二郎, 南條孝夫, 広岡栄子, 井上喜雄, “油圧駆動による柔軟リンクシステムの動的シミュレーション.” 日本機械学会論文集C編, Vol. 69, No. 685, pp. 2336–2343, 2003.
- 4) 本家浩一, 菅野直紀, 井上喜雄, “柔軟リンク構造物のシミュレーションに関する研究(大変位多節点要素の開発).” 日本機械学会論文集C編, Vol. 66, No. 651, pp. 3554–3559, 2000.
- 5) 森田啓, 今西悦二郎, 南条孝夫, 藤川猛, “直動要素で駆動される剛体システムのリアルタイムシミュレーション.” 日本機械学会論文集, Vol. 80, No. 813, p. DR0122, 2014.
- 6) T. Liu, Y. Inoue and K. Shibata, “Wearable Force Sensor with Parallel Structure for Measurement of Ground-reaction Force.” Measurement, Journal of the International Measurement Confederation, Vol. 40, pp. 644–653, 2007.
- 7) T. Liu, Y. Inoue and K. Shibata, “Development of a Wearable Sensor System for Quantitative Gait Analysis.” Measurement, Vol. 42, No. 7, pp. 978–988, 2009.
- 8) T. Liu, Y. Inoue and K. Shibata, “Wearable Force Plate Designed Using Pressure Sensitive Electric Conductive Rubber.” Trans. JSME, Journal of System Design and Dynamics, Vol. 3, No. 3, pp. 282–295, 2009.
- 9) T. Liu, Y. Inoue and K. Shibata, “A Small and Low-cost 3D Tactile Sensor for a Wearable Force Plate.” IEEE Sensors Journal, Vol. 9, No. 9, pp. 1103–1110, 2009.
- 10) T. Liu, Y. Inoue and K. Shibata, “Measure-

- ment of Soft Tissue Deformation to Improve the Accuracy of a Body-Mounted Motion Sensor.” *Trans. ASME, Journal of Medical Devices*, Vol. 3, No. 3, 035001, pp. 1–6, 2009.
- 11) K. Liu, T. Liu, K. Shibata, Y. Inoue and R. Zheng, “Novel approach to assessment of human segmental three-dimensional orientation on wearable sensor system.” *Journal of Biomechanics*, Vol. 42, No. 16, pp. 2747–2752, 2009.
 - 12) T. Liu, Y. Inoue and K. Shibata, “A wearable force plate system for the continuous measurement of triaxial ground reaction force in biomechanical applications.” *Measurement Science and Technology*, Vol. 21, No. 8, 085804 (9pp), 2010.
 - 13) K. Liu, Y. Inoue and K. Shibata, “Physical-sensor and Virtual-sensor based method for Estimation of Lower Limb Gait Posture using Accelerometers and Gyroscopes.” *Trans. JSME, Journal of Biomechanical Science and Engineering*, Vol. 5, No. 4, pp. 472–483, 2010.
 - 14) K. Liu, Y. Inoue and K. Shibata, “Analysis of Lower Limb Segment Orientation Using Triaxial Accelerometers.” *Journal of Biomechanical Science and Engineering*, Vol. 5, No. 4, pp. 368–379, 2010.
 - 15) T. Liu, Y. Inoue and K. Shibata, “A Wearable Ground Reaction Force Sensor System and Its Application to the Measurement of Extrinsic Gait Variability.” *Sensors*, Vol. 10, No. 11, pp. 10240–10255, 2010.
 - 16) T. Liu, Y. Inoue, K. Shibata and K. Shiojima, “A mobile force plate and three-dimensional motion analysis system for three-dimensional gait assessment.” *IEEE Sensors Journal*, Vol. 12, No. 5, pp. 1461–1467, 2012.
 - 17) 井上喜雄, 劉涛, 足立渡, 芝田京子, 塩島康造, 辻内伸好, “移動式フォースプレートの開発—柔軟でウェアラブルな床反力センサ.” *バイオメカニズム学会誌*, Vol. 36, No. 4, pp. 241–243, 2012.
 - 18) 足立渡, 辻内伸好, 小泉孝之, 塩島康造, 土屋陽太郎, 井上喜雄, “携帯型床反力計およびモーションセンサを用いた歩行解析システムの開発.” *日本機械学会論文集 C 編*, Vol. 78, No. 789, pp. 1607–1616, 2012.

From Machine Dynamics to Human Dynamics

Yoshio Inoue*

(Received: June 1st, 2014)

School of Systems Engineering, Kochi University of Technology
185 Tosayamadacho-Miyanakuchi, Kami, Kochi, 782-8502, JAPAN

* E-mail: inoue.yoshio@kochi-tech.ac.jp

Abstract: After I got master degree from School of Engineering of Kyoto University in 1972, I joined Dynamics and Acoustic Section of Mechanical Engineering Research Laboratory of Kobe Steel and had been engaged in the research on Machine Dynamics for 25 years.

After that, I joined Intelligent Mechanical Engineering Division of Kochi University of technology. While I continued some research on the machine dynamics, my main research fields were changed to human dynamics which is very different from the machine dynamics just after I came to this University, and 17 years have passed. Reminding and reorganizing total research activity of 42 years, it can be seen that taking a difficult challenge is very important if I expect fruit of research with a significant impact and if I want to obtain the good results in the collaborative research work with the other party, I and the partner have to build up trustful relationship each other.