面白い研究を 求めて40年 —独断と偏見—

新潟大学名誉教授，
事業創造大学院大学学長

仙石正和

Masakazu Sengoku

仙石正和（名誉員：フェロー）

1967新潟大・工卒，1972北大大学院・博士了（工博），北大助手，1978新潟大助教授，その後，教授，工学部長を経て，2008新潟大理事（研究担当）・副学長，2014から事業創造大学院大学長，新潟大名誉教授。本会，基礎・境界ソサイエティ会長（理事），通信ソサイエティ副会長，英文論文誌A編集委員長，日本学術会議連携会員など。本会論文賞（1992，1996，1997，1998），業績賞（2005），功績賞（2009）。IEEE ICNNSP '95 Best Paper Award。"Wireless Networks"（ACM，URSI）のEditor，The Journal of Communications and NetworksのEditor，Journal of Circuits，Systems，and Computers（JCSC）のRegional Editorなど歴任。IEEE Life Fellow。

1. はじめに

本誌から，原稿の執筆依頼を頂いた，本誌は電子情報通信学会の会誌でも論文誌でもないし，気軽にお願ひしたいとの趣旨であったので，深く考えずにお引き受けした。原稿の締切が近づき，依頼を受けた「私の研究者歴」，「私の技術者歴」の過去の記事を読ませて頂き，驚いた。そうそうたる方々がお書きになっている。研究者として世界的に著名であるだけでなく，政府の様々な審議会の委員などとして，日本の電子情報通信分野を学術的，政策的，産業的にリードしてきた方々ばかりである。このことに気づき，尻込みをせざるを得なくなった。しかし，今更お断りするわけにもゆかず，田舎の大学で教育研究に長年従事した経験例を素直にお伝えすることも必要と編集委員会がお考えだろうと勝手に解釈して，通信ソサイエティの方々に少しでもお役に立てばと考え，思い出話も含めて述べることにした。

そこで，あらかじめお断りしておくが，筆者は大きな組織で，国家的なプロジェクト研究をした，あるいはそれに関わったわけでもなく，研究費といっ

ても主に文部科学省の科学研究費を頼りに，研究を行っている。多分，多くの田舎の大学に属する教員の典型的な一人であろう。また，御存じのように筆者自身は本会では基礎・境界ソサイエティに関係した研究が多く，移动通信の研究で少し通信ソサイエティとの関係があり，通信ソサイエティの副会長を務めさせて頂いた経験がある程度，ということもお断りさせて頂く。その上で，子供の頃の経験，大学・大学院の学生として，そして大学教員としての興味の対象の変遷などを御紹介しながら，研究歴を述べさせて頂く。

2. 子供の頃

筆者は第2次世界大戦の終わる前年，つまり戦中の1944年に生まれた。日本は皆が貧乏で，父親を戦争で失った友人もあり，中学卒業時には集団就職で都会に出る友人も多く，高校や大学に行くことが何の意味なのかも深く考えず，不安に思いながらもそういう世の中だと思って過ごした。子供の頃は，家の近くで，大工さんが家の建築，修理などをする作業を見るのが好きで，1日中観察して，大工

さんになりたいとぼんやり思った。家の建築、修理が完成してくると、近くの人たちが集まり皆うれしそうにニコニコしている。ラジオやテレビが各家庭に普及してくると、ラジオを聴いたりテレビを見て、人々はニコニコしてうれしそうで、家やラジオ、テレビなどを作ったり、修理すると、人々に喜んでもらえるんだと子供心に感じた。その後、ラジオやテレビを作ったり、修理することが好きになり、何となく大学、大学院でラジオやテレビに関係の深い電気・電子工学を学ぶことになった。何をやるにも、立派なことをしたいとかほかの人より優れたものを作りたいとかいうのではなく、何でもよいので何かして人々に喜んでもらうことが、自分自身にとってうれしいと感じていた。子供の頃は、典型的なラジオ少年で、中学の頃は鉱石ラジオ、ゲルマニウムラジオの製作、外に出掛けるときは常に、はんだごて、テスタ、ラジオペンチなどを携帯した。中学時代鉱石ラジオのイヤホンをつまみ過ぎて耳の病気になる、今でも後遺症がある。高校時代には送受信機の製作、アマチュア無線に熱中し、機器の製作や外国との交信で夜更かしが多く、勉強もしないのに近眼になって恥ずかしかった。

3. 大学、大学院学生の頃

大学1年生の夏休みに、テレビを自作した。秋葉原に中古の部品を買い出しに行き、チューナとブラウン管は新品、それ以外は全て中古品で、徹夜も含めて約1週間で完成した。徹夜については、画面の調整には、夜中に放送される円形のテストパターンが必要であったからである。両親は約10年間このテレビで、番組を見ていたようだ。新潟大学時代もアマチュア無線に関わり、大きな送信機の製作に熱中していた。大学4年生のとき、卒業研究は松川潔教授のマイクロ波の研究室で、プラスチックに無電解めっきで銅をめっきして、プラスチック製の導波管の製作をしようとした。このとき損失などの測定、そして理論計算のために、導波管の電磁界解析などを勉強した。同大学で、阿部武雄教授、斉藤義明講師（後に教授）に伝送回路、フィルタ、半導体回路などを教えて頂きこの方面にも興味を持った。

斉藤義明先生のお勧めがあり、大学卒業後、北海道大学大学院へ進学し、黒部貞一教授、小川吉彦助教授（後に教授）の電子回路講座の研究室に属し

た。そこで与えられた研究テーマは、負性キャパシタンスの製作であった。当時トランジスタが使用され始めた時期であった。御存じのようにトランジスタ（図1の上の図）の小信号の等価回路として、図1の下左のようなものが使われていた。

一般にエミッタ抵抗 r_e とベース抵抗 r_b は小さな値で、コレクタ抵抗 r_c は非常に大きな値なので、大まかに図1の下右図のようになる。この等価回路で $0.99i$ の部分は電流源（両端の電圧に関わらず定められた電流が流れるもの）で、エミッタの電流の 0.99 倍が流れる。pnp 形と npn 形のトランジスタがあり、当時大体同じ特性を持つペアの pnp 形と npn 形が作られてきていて、図2のようにこのペアのトランジスタをつなぎ、その間にインピーダンス Z をつなぐ。もちろんバイアス用の抵抗や電源を接続するが本図では省略してある。この等価回路は図2右図のようになり、上のエミッタから

図1 トランジスタと小信号の等価回路

図2 pnp 形, npn 形トランジスタのペアを用いたネガティブインピーダンスコンバータとその等価回路

下のエミッタに電流 i が流れたとすると Z の左がプラスで右がマイナスの電圧であるのに、 $0.98i$ の電流が右（マイナス）から左（プラス）に流れることになり、上のエミッタから下のエミッタ間からは、おおむね $-Z$ のインピーダンスに見える。 Z のところにキャパシタンス C をつなぐと負性キャパシタンス $-C$ を作ることができるというものである。この回路の周波数特性など様々な実験を行い、何となく趣味の継続のような日々であった。 $-Z$ を作る回路はネガティブインピーダンスコンバータといわれており、そのほかに $1/Z$ を作るジャイレータなどの回路もあることが分かり、電流源や電圧源（両端を流れる電流に関わらず定められた電圧を示すもの）とインピーダンス素子、アドミタンス素子の組合せで、どのような接続からどのような特性の回路が得られるのかという、回路の位相幾何学的性質に興味が移っていった。黒部貞一先生と相談して、この方向に研究テーマを変えていった。図3のような、アドミタンス素子、インピーダンス素子、電流源、電圧源が混在した回路の、解析、合成の研究を進めた。電流源とアドミタンス素子から成る場合は、木（tree）を、電圧源とインピーダンス素子から成るときは補木（cotree）を使うと便利であることは知られていたが、電圧源、電流源、インピーダンス素子、アドミタンス素子が混在した回路の場合に便利な、混成木（hybrid tree）を定義してその実現問題を解いた⁽¹⁾。この日本語の論文の内容を拡張し、更に混成木グラフの性質を解明し、その結果を、英語の論文としてやっとの思いで書いておいた⁽²⁾。その後、L. Novak, A. Gibbons 著 “Hybrid

graph theory and network analysis” (Cambridge University Press, 1999) の著書の中で、「The important fact that……was first pointed out by Sengoku.」と、紹介されていることを見付けて、びっくりした。そして、英語で論文を書くことが大切であることを悟った。

4. 北海道大学助手の頃

大学院を修了後、北海道大学の電波伝送講座（松本正教授、伊藤精彦助教授（後に教授））の助手に採用された。電波を用いた通信分野の研究室で、松本正先生、伊藤精彦先生から、これからは移动通信の研究が面白いと言われ両先生の助言の下に興味を持って調べ始めた。電波伝搬特性や通信方式などは、移动通信以外の通信システムでも研究されている。移动通信の独特な研究分野は、セルラ（小ゾーン）方式ではないかと思う、そのチャネル割当の研究を始めた。サービスエリアを図4のようなセルに分割して、セルの中心に基地局を設置してそのセル内の移動局はその基地局を経由して世界と接続される。セルとセルの距離がある程度離れると電波の減衰が十分で、同じチャネルが再利用できることが特徴である。あらかじめセルへの割当チャネルを決めておく固定チャネル割当法に比べて電波の減衰を見極めつつ、動的にチャネルを割り当てるダイナミックチャネル割当法はチャネルの利用効率が高い。利用効率は高いが、問題は、割当に手間が掛かることである。セルラ方式のチャネル割当の問題は、各セルを国として地図と考えると、各国に色（チャネルに相当）

図3 アドミタンス素子、インピーダンス素子、電流源、電圧源を含む回路

図4 セルラ方式（セル v の赤色（チャネル）は黄色のセルでも再利用可能）

を塗り、隣の国は異なる色を塗るとき何色必要でどのように塗るかという問題と似ている。グラフ理論では、彩色問題として知られていて、平面であれば4色が必要十分ということが知られている。地図と違いセルラ方式の場合は、隣のみが異なる色が必要とは限らず、二つ隣（図4）、三つ隣までも異なる色ということになると必要色数は増える。実はこの彩色問題は、「NP 完全問題」として知られており、多項式時間の手続きでは解けないことが知られている。ダイナミックチャネル割当の研究を始めて、この問題の本質が分かってきたとき、解けないことが分かっている問題になぜ挑戦するのかとよく問われた。ダイナミックチャネル割当の近似法の性能をコンピュータシミュレーションで検証することを行っていたが、解けないことが分かっているので近似法を提案しても正当性があるとの考え方です、と答えて、構わず研究を進めた。もし、元々解けない問題でなく、今は解けてないという問題に近似法で挑戦して、後に正確な解法が見付かったときは、せつかくのコンピュータシミュレーションは、水の泡だからだ⁽³⁾。そうこうするうちに、母校の新潟大学に新学科ができ、呼び戻された。

5. 新潟大学での教員の頃

新潟大学の情報工学科の阿部武雄教授の情報伝送講座に配属になった。阿部武雄先生からは、好きな研究をしろと言われた。そこで、移動通信のチャネル割当の継続と、移動体流と移動通信トラヒック、更に、情報工学科所属となったこともあり、インターネットなどネットワーク上のファイルなど資源の配置問題について研究を始めることにした。

5.1 移動通信のチャネル割当^{(4)~(9)}

ダイナミックチャネル割当に更に再配置接続（通話中のチャネルの配置換え）を適用して大幅な利用効率向上の方法の開発を行った。ダイナミックチャネル割当を適用したときのトラヒック特性の解析法としてクリークを用いる方法を開発、更に一つのセルを更に細分して、チャネルの利用効率を究極的に高める方法の開発などを行った。ダイナミックチャネル割当へのニューラルネットの適用も行った。

ダイナミックチャネル割当を行ったときのトラヒック特性の解析は、割当のアルゴリズムが4.で

述べたように難しい問題となると同様に、解析の理論計算も状態数が極めて膨大で、難しい問題である。このことのために安心して、コンピュータシミュレーションやニューラルネットの適用に向かった。正確に解析ができるのに、コンピュータシミュレーションやニューラルネットで近似解析手法を安易にすることは、後で無意味な研究になる可能性があるので注意しなくてはならない。

5.2 移動体流と移動通信トラヒック^{(10)~(14)}

移動通信の独特の特徴は自動車等の移動体が動き回ることである。自動車に速度センサ、角度センサ、PCなどを装着して、市内の自動車を追尾して、移動体の動きのモデル化を行った。そのモデルを用いて自動車電話のコンピュータシミュレーションを行った。筆者らの提案した移動体の動きのモデルを用いて、ほかの研究グループが移動通信の研究を行っていることを学術論文誌上で時々発見して、筆者らの研究が役に立っているといううれしさと同時に地道な測定などの研究の重要性を悟った。

セルラ方式では、移動体の動きで通信中にセルを横切る（ハンドオーバーによるチャネル切替）ので通信トラヒックも大きく変化する。移動体の動き（移動体トラヒック）を加味した通信トラヒックのモデル化と移動通信トラヒックの計算方法の開発を行った。これは、「移動体流のトラヒック」と「通信のトラヒック」との両者が絡み合う、非常に興味ある課題であった。

近年、移動体のみならず、基地局も動くシステム（マルチホップ、アドホック通信などと称される）にも、興味に移り、その研究成果は、災害時の通信等へも利用が広がっている。

5.3 インターネットなどネットワーク上のファイルなど資源の配置問題^{(15)~(19)}

ロケーション問題の研究（“最適配置問題”，“回収問題”，“被覆問題”）を行った。ロケーション問題とは、都市内の通信局、消防署、郵便局の位置などを決める問題である。この問題は、インターネットなどのネットワーク上のファイルの配置問題にも関係している。例えば、消防署などの位置は、都市内の「距離」が一番遠い地点が最小になるように配置されることがよいとされるが、この位置は中心（center）と呼ばれている。従来、ロケーション問題には、計量としてこの距離が用いられてきた。し

図5 ネットワークの距離 d とフロー f の三角不等式

かし通信ネットワークとしては、距離（遅延時間に相当）だけでなく、フロー（容量に相当）も重要である。3点 x, y, z の距離 d とフロー f の三角不等式は図5のようなる。

この三角不等式の違いからも分かるように明らかに、距離とフローでは特性が異なる。従来の距離に基づくロケーション問題に加えて、フローに基づくロケーション問題を提案して、両者の違いを研究した。また、ロケーション問題を研究する過程で、ネットワークの故障診断問題にも興味ある部分を見いだした。計量としてフローを用いる研究は、まだ始まったばかりで、多くの研究課題が残っている。

5.4 その他 (FM-CW レーダの研究⁽²⁰⁾)

阿部武雄教授（当時の情報伝送講座：阿部武雄教授，仙石正和助教授，山口芳雄助手）を中心に行っている，FM-CW レーダを用いた雪中埋没物体のリモートセンシングの研究のお手伝いをした。お手伝いといっても、研究室で雪深い山に行って、昼間は実験、夜は温泉で、筆者は専ら温泉と学生との懇親であった。阿部武雄先生を慕う人々が集まり、昼夜を共にする実験現場で、学生が日に日に成長して変わっていく姿を見ながら、人間教育の真髄と阿部武雄教授のリーダーとしての指導力の中で、レーダの研究と同時に教育に関しても大きなものを得た。当時の雪山での実験の様子は、写真（図6～8）を参照されたい。図6の写真では、雪の上には、FM-CW レーダのホーンアンテナがあり、車上に解析装置などがある。二つのホーンアンテナは、送受信用で、向きが換えられ、偏波成分も測定できる。図6の二つのアンテナの配置は直交している。この研究

図6 雪山でのFM-CW レーダを用いた雪中埋没物体のリモートセンシングの実験。雪の上には、FM-CW レーダのホーンアンテナと車上には解析装置などがある。山口芳雄助手（現在、教授）が仮の雪中埋没物体として雪中に入ったところ。

図7 雪山でのFM-CW レーダを用いた雪中埋没物体のリモートセンシングの実験の指揮を執る阿部武雄教授

図8 雪山でのFM-CW レーダを用いた雪中埋没物体のリモートセンシングの実験で、コメントする筆者

は、その後 IEEE 等に多くの成果が発表され、山口芳雄先生の IEEE での各種の受賞につながっている。筆者は温泉につかりながら、地域に密着した、ほかの研究者が目をつけられないような研究を続けることの大切さを悟った。

6. 事業創造大学院大学に勤務して

昨年、新潟大学での勤務を終えて、事業創造大学

院大学にお世話になっている。ビジネススクールであるので、産業界などとの交流が頻繁になった。地域の産業構造を調べるうちに、地域の産業の多くの部分はいわゆるサービス産業であることが分かった。80%を超えているかもしれない。日本の産業標準分類で、情報通信業、卸売・小売業、学術研究、専門・技術サービス業、宿泊、飲食業、医療・福祉など、サービス業と考えられる分野から、更にその各分野に多くの業種が含まれる。この分類では、情報通信はサービス産業である。しかし、通信ソサイエティでは、研究としてサービス関係をターゲットにしている人は少なそうである。サービスそのものは、既に実社会にあり、従来から勘や経験に頼るものであると考えられてきた。現状では、勘や経験に頼ってきたサービスに、工学的な手法を導入して、顧客ニーズの多様化に迅速に対応したり、従業員の負担軽減、能力向上などを支援することが、サービス工学と認識されている場合が多い。もちろんこのような狭い意味でのサービス工学も重要であり、特に ICT の活用が、大きな成果を上げていることは周知の事実である。しかし、そろそろサービスを体系化する必要がある。サービスを体系化しようとする、認知科学的体系と、設計科学的な評価論理を必要とする。“もの／こと”づくりにしても、どの部分までがものづくりで、どの部分がサービスなのかは曖昧であるし、時代とともに変化する。サービスの分析的分野でサービス科学、そしてサービスの設計的分野でサービス工学が貢献することになろう、などと能力以上のことを考えている今日この頃である⁽²¹⁾。

7. おわりに

最初にお断りしたように、田舎の大学ではほかの人からは独りよがりと思われるかもしれないが、自身で興味ある研究を求めて過ごしてきた。独りよがりといっても、枝葉の研究でなく、その分野の本質の研究を目指し、本質とは何かを常に考えながら進んできたつもりである。研究資金を、枝葉の研究で手に入れると、そのための研究成果を出すために、貴重な時間を費やすことになる。しかし、研究室運営のためにはある程度の研究資金は必要で、そのような中で、自分がやりたい本質的な研究を細々と継続することになる。本質的な研究で研究資金が得られれば一番良いが、本質的な基礎研究はなかなか理解

されず、研究資金も手に入らない。このような様々な厳しい研究環境こそが大切で、厳しいゆえに、何が本質かを常に考え、研究資金がより少なくても遂行できるのではないかを常に考え、その結果より深く研究を掘り下げることができることになる。成果が出たときはそれがたとえ小さくとも、実に楽しいものである。最近、大学では研究資金の不足などの話題が多いので、厳しい研究環境を研究資金の観点からだけ述べたが、とにかく独創的なことを考え遂行する面白さは、たとえ様々な困難があっても、何とも例えようがない。最近、学生さんにはすぐに役立つスキルや、専門職の技術や技能を身に付けるべきとの風潮が強いようであるが、研究への志向も忘れないでもらいたい。最先端技術開発はもちろん専門職の技能的部分にも研究志向は必要不可欠であり、面白い研究は山ほどある。研究というと、ノーベル賞や工学のノーベル賞と言われるエリザベス女王工学賞などを目指すことも必要であろう。その他にこのような賞と無縁であっても社会に少しでも役立つ研究はたくさんあり、それらも興味深く大切である。長い間大学で過ごした経験で、この研究志向の厳しい環境下での教育が、激しい時代の変化に柔軟に対応できる人材の育成には絶対必要との考えが確信になってきている。若い学生さんも教員の先生方も是非大きな希望をもって、進んでももらいたい。産業界の方々も人材育成に、日々心を砕いておられると思う。その中で、本稿が何らかの御参考になれば望外の喜びである。

本稿では登場人物として、恩師の方々のお名前のみである（例外：写真を借用した山口芳雄助手（現在教授））。実は、研究上で多くの御指導を頂いた他の大学の方々、一緒に研究をした、学生、大学院生の皆様はじめ数え切れないくらいの多くの方々に変にお世話になった。移动通信関係で、本会の論文賞と IEEE の国際会議の最優秀論文賞を受賞、そしてネットワークのロケーション問題関係で、本会の論文賞を3回受賞させて頂いた。いずれも、皆様のおかげである。それぞれの方々のお名前を記して感謝を表したいのですが、誌面の都合上割愛させて頂きました。ありがとうございました。

■ 文献

- (1) 仙石正和, 黒部貞一, 小川吉彦, “混成木集合の実現について,” 信学論 (A), vol.J55-A, no.2, pp.60-66, Feb. 1972.
- (2) M. Sengoku, “Hybrid trees and hybrid tree

- graphs," IEEE Trans. Circuits Syst., vol.CAS-22, no.10, pp.786-790, Oct. 1975.
- (3) M. Sengoku, K. Itoh, and T. Matsumoto, "A dynamic frequency assignment algorithm in mobile radio communication systems," IEICE Trans. vol.E61, no.7, pp.527-533, July 1978.
- (4) 仙石正和, "自動車電話の周波数有効利用—チャネルの割当アルゴリズム—," 信学誌, vol.69, no.4, pp.350-356, April 1986.
- (5) 仙石正和, 倉田盛彦, 梶谷洋司, "移動通信系への再配置接続の適用," 信学論 (B), vol.J64-B, no.9, pp.978-985, Sept. 1981.
- (6) M. Sengoku, "Telephone traffic in a mobile radio communication system using dynamic frequency assignment," IEEE Trans. Veh. Technol., vol.VT-29, no.2, pp.270-278, May 1980.
- (7) M. Sengoku, H. Tamura, S. Shinoda, T. Abe, and Y. Kajitani, "Graph theoretical considerations of channel offset systems in a cellular mobile system," IEEE Trans. Veh. Technol., vol.40, no.2, pp.405-412, May 1991.
- (8) 仙石正和, 中野敬介, 嶋田一彦, "移動体通信におけるダイナミックチャネル割当てとニューラルネットワーク," 信学誌, vol.77, no.5, pp.492-497, May 1994.
- (9) K. Nakano, N. Karasawa, M. Sengoku, S. Shinoda, and T. Abe, "Characteristics of dynamic channel assignment in cellular systems with reuse partitioning," IEICE Trans. Fundamentals, vol.E79-A, no.7, pp.983-989, July 1996.
- (10) 大塚 晃, 仙石正和, 山口芳雄, 阿部武雄, "移動体の流れと移動通信トラヒックに関する基礎研究," 信学技報, CAS-86-249, pp.81-88, 1986.
- (11) 長束澄也, 仙石正和, 山口芳雄, 阿部武雄, "移動通信系におけるチャネル割当法とトラヒック特性の評価," 信学論 (B), vol.J71-B, no.10, pp.1167-1170, Oct. 1988.
- (12) G. Montenegro, M. Sengoku, Y. Yamaguchi, and T. Abe, "Time-dependent analysis of mobile communication traffic in a ring-shaped service area with nonuniform vehicle distribution," IEEE Trans. Veh. Technol., vol.41, no.3, pp.243-254, March 1992.
- (13) K. Mase, Y. Wada, N. Mori, K. Nakano, and M. Sengoku, "Flooding schemes for clustered ad hoc networks," IEICE Trans. Commun., vol.E85-B, no.3, pp.605-613, March 2002.
- (14) K. Miyakita, K. Nakano, M. Sengoku, and S. Shinoda, "Theoretical analysis of route expected transmission count in multi-hop wireless networks," IEICE Trans. Commun., vol.E91-B, no.8, pp.2533-2544, Aug. 2008.
- (15) 仙石正和, "ネットワークにおけるロケーション問題," 信学誌, vol.71, no.6, pp.568-572, June 1988.
- (16) H. Tamura, M. Sengoku, S. Shinoda, and T. Abe, "Location problems on undirected flow networks," IEICE Trans. vol.E73, no.12, pp.1989-1993, Dec. 1990.
- (17) 渡辺 郁, 田村 裕, 仙石正和, "フローネットワークの出口配置問題," 信学論 (A), vol.J78-A, no.8, pp.938-946, Aug. 1995.
- (18) 田村 裕, 菅原秀仁, 仙石正和, 篠田庄司, "無向フローネットワークにおける総合被覆問題について," 信学論 (A), vol.J81-A, no.5, pp.863-869, May 1998.
- (19) M. Sengoku, S. Shinoda, and W.-K. Chen, "A fault diagnosis in a nonlinear location network," J. Franklin Inst., vol.323, no.3, pp.395-405, 1987.
- (20) Y. Yamaguchi, Y. Maruyama, A. Kawakami, M. Sengoku, and T. Abe, "Detection of objects buried in wet snowpack by an FM-CW radar," IEEE Trans. Geosci. Remote Sens., vol.29, no.2, pp.201-208, March 1991.
- (21) 仙石正和, "工学教育の変遷と工学研究の広がり," 特別寄稿 IEICE Fundamentals Review, vol.9, no.1, pp.5-13, July 2015.