

平成21年2月27日（金）於熊本大学工学部100周年記念館

最終講義ノート

## 岩の力学研究40年

平成21年2月27日（金）

於 熊本大学工学部100周年記念館

熊本大学  
大学院自然科学研究科教授

菅原勝彦

ご多忙のところ、最終講義にご出席くださり、有り難うございます。

本日の講義の内容をノートにまとめましたので、ご笑納ください。

最終講義ということで、ご期待の方も、ひょっとしたら、おられるかもしれませんが、そのご期待に沿えず、期待外れの内容になりますこと、お断りを申し上げます。

本日の講義で、皆様にお伝えしたいことは、私からの感謝でございます。

## 第1章 はじめに

【お礼】私の最終講義のために、遠くは北海道からもご出席くださり、誠に有り難うございます。学内にあっては、前期入学試験、卒業論文審査などの最中で、とくに忙しい時期に開きましたこと、お許し下さい。

【期待外れであること】最終講義ということで、ご期待の方も、ひょっとしたら、おられるかもしれませんが、そのご期待には沿えないと思います。期待外れになりますこと、はじめにお断りを申し上げます。

【タイトル】佐藤晃准教授から演題を教えてくださいとのご連絡を頂いた時、他に思い付かないで、このようにしました。個人的な回想とともに、日頃考えていることを話させていただきます。

【最初の講義】昔を振り返りますと、学生であった皆さんには、大変ご迷惑をかけました。ここにご臨席の岡村宏先生のご推挙によって、工学部助手になりました昭和51年には、兼重修教授がご担当の科目について代講を行いました。

【学生の満足度】代講では、数式が多く、学生の満足はいま一つでした。しかし、今日ご出席の野口義文君と尾原祐三君に満点を付けましたので、二人に満足頂けたことは確かですが、その他の学生から響きを受けたことも確かです。

【空腹ゼミ】研究室においては、午前に始まり、夜に終わる昼食抜きのゼミナールは毎度のことで、今日ご出席の卒業生は、翌日まで続く徹夜のゼミに1度は付き合ったはずですが。

【徹夜ゼミ】ここ数年、体力不足で徹夜は止めました。しかしながら、話が止まらないという癖は改まって居りません。今回は、そうであってはいけないので、講義ノートを準備しました。

【講義ノート】お手元の講義ノートをご覧ください。ノートを作り始めますと、あれもこれもと、書きたいことが増えました。今、話しているのは、2頁の【講義ノート】の項です。

【紙芝居方式の講義】これまでの講義では、数式、グラフとテーブル、さらに写真を使いました。つまり、「紙芝居方式」の講義です。これの良い所は、規定の時間内に伝えるべきことを全て伝えることができる点です。

【進化する講義】最近、「紙芝居」から「動画」へと、講義の方法は進化しております。本学の大津政康教授に倣って、教授の皆さまには、この進化した、学生との対話型講義をお勧めしたいと思います。しかし、今日は違います。

【本日の講義方法】今日は、「数式は使わない」、「紙芝居をやめる」、「写真や動画も用いない」ことにします。さらに「質問を受け付けません」。そして、講義ノートに従って進めます。

【お伝えしたいこと】講義ノートの草稿を作ってから、「結局、何が言いたいのか？」と考えました。皆さんにお伝えしたいことは、要するに、「私からの感謝」です。

【加えて、経験から】また、40年を振り返り、「頑固に、ぶれないで、かつ、諦めないで、自分の基本的な命題に正面から取り組み続けること」によって、「社会的使命を果たす努力を止めないこと」が大切であると申し上げます。

【社会的使命】技術者にとっては、「自分で作った作品の品質を証明し、保証すること」が、研究者にとっては、「普遍的な原理を発見して、きっちりと証明すること」が、そして、教育者にとっては、「次世代に情熱を伝えること」が、それぞれの社会的使命であると思います。

## 第2章 岩の力学との出会い

[岩の力学とは] さて、今日お話しする「岩の力学」は、「力の場における岩盤の応答に関する力学」です。とても古めかしい分野ですが、これまでの研究の成果は、資源開発、インフラ整備等における地下開発プロジェクトに適用されております。

[20世紀の岩盤プロジェクトへの貢献] 資源開発では、鉱山設計に科学的根拠を提供し、インフラ整備では、青函トンネルや地下発電所等の建設に貢献しました。

[2通りの目的] 資源開発とインフラ整備のために、地下空洞を拓きますが、目的が違います。資源開発では、空洞の中身である地下資源の採集が目的であり、インフラ整備では、地下空洞そのものが価値をもちます。

[テーマ選択] なぜ、40年も、飽きないで、岩の力学の研究を継続したのか？ その理由は、「それしかできなかったから」です。そのことをお話しするため、まず、研究を始めた頃の状況などについて話させて頂きます。

[京都大学] 京都大学工学部資源工学科の第1期生として、昭和39年に入学し、今日ここにご臨席の野田彰君、木村巖君、田中荘一君とともに昭和43年に卒業、引き続き、修士課程、博士課程に進学して、昭和48年に単位修得中退しました。そして、昭和49年に修了、工学博士になりました。なお、この最終講義を楽しみにしてくれた同級生で三井金属資源開発(株)の元社長の竹村友之君が、この2月20日に逝去されました。ご冥福を祈りたいと存じます。

[資源工学] 資源工学は、金属やエネルギー等の資源を、生活空間まで運んでくる、あるいは、使えるようにするための総合工学、すなわち、鉱業を支える科学技術の集合です。

[資源工学科] 当時、京大の資源工学科は、鉱床地質学、物理探査学、鉱山開発学、鉱山機械学、選鉱学等をカバーする6つの講座で構成され、戦後の荒廃期から立ち直って、一流の教授陣によって運営されておりました。

[当時の先生] 吉田神社の宮司の家系から出られた鉱床学の鈴鹿先生、文学部哲学科をご卒業で全分野に精通されている伊藤先生、熊本大学の前身：熊本高等工業の教授でもあった選鉱学の向井先生らが居られ、親しくご指導を頂きました。

[研究室配属] 力学が好きだったことから、躊躇せずに、平松・岡研究室を選びました。当時、平松良雄教授は通気学の権威であり、その後継者を求めておられました。一方、岡行俊助教授は、岩の力学のニューリーダーでした。

[岩と風の力学] 平松・岡研究室の研究は「岩と風の力学」でした。風の力学に基づく「通気学」は、実学としてほぼ完成の域にありましたが、その後の超高層ビルの建設などに伴い、社会的ニーズが高まり、新たに展開されています。

[新領域：岩] 岩の力学は、構造力学、材料力学と同類の固体の力学、連続体力学で、戦後のものです。解明すべき問題が山積しておりましたので、平松・岡研究室の研究は、主に「岩の力学」でした。

[女学生] ところで、「岩と風と女が多いこと」で知られているのは、韓国の済州島で、三多島とも呼ぶそうですが、平松・岡研究室は、岩と風だけで、皆さんが期待される「女子学生」は居りませんでした。

[平松先生のご逝去] 重ねて誠に残念なことです。この1月16日に、平松良雄先生がご逝去されました。93歳でした。皆様とともに、ご冥福を祈りたいと存じます。退職後、早い時期に、今日ご出席の平松・岡研究室出身の6名の皆さんと、お墓参りをさせていただきます。

【思い出】私は悪い弟子でしたが、可愛がって頂きました。別子鉱山、生野鉱山、北海道の炭鉱など、今は全て閉山しましたが、鞆持ちをさせて頂いたこと、酒と歌、思い出は尽きません。

【鉱山で学ぶ】別子鉱山、生野鉱山、北海道の炭鉱、これらの閉山は、後でお話しする「山はね」が主な原因です。別子鉱山の地表下2500mで頻発した「山はね」など、多くの現場を実体験できましたのは、平松先生のお陰です。

【資源工学科への期待】京大では、昭和39年に鉱山学科から資源工学科への改組が行われ、先ほど申し上げましたように、私は資源工学科の第1期生です。鉱山が次々閉山する中で、新たな出発を目指す教授陣の「新学科への期待」は大きかったと思います。

【分野変更の誘惑】当時、平松研の先輩である京大の小門純一教授から、「専門を変えるのは、30歳までだ。俺のように、お前も変えろ。岩を止めて、製鉄をやれ。」と誘われたこともありましたが、今は、「変えないで良かった」と思っています。

【教授になれたこと】平松・岡研究室の先輩である山口大学の水田義明先生と、当時、「我々の世代は教授に成れない。」と悲観したことを思い出します。しかし、岩の力学を資源開発に適用した実績が認められ、私は平成62年に資源開発工学科の教授になりました。以来、「見込んだ後輩を私より早く教授に引き上げる」を心掛けてきました。

### 第3章 岩盤プロジェクトの魅力

【岩盤プロジェクト】地下を対象とする岩盤プロジェクトの話をご紹介します。地下構造物は、橋梁やビルのように一般の目に触れません。山岳地のダムや湖は観光名所ですが、その下に建設された地下発電所は余りご存じないと思います。

【自然との調和】自然との調和を追求して、地下空間を活用します。地下発電所は、縦60m、幅30m、奥行き200mという大空洞であり、その建設はやりがいのある仕事です。

【青函トンネル】また、本州と北海道を繋ぐトンネルの建設は、明治時代からの夢でした。本学に来る前に、鹿島建設(株)に在職して、青函トンネルの建設に携わることができ、誠に幸運でした。ここで、少し、青函トンネルの話をご紹介します。

【42年間のプロジェクト】海底の地質調査は昭和21年に始められ、昭和29年の洞爺丸遭難を契機として、技術調査が本格化し、本トンネルの掘削は昭和46年からの約15年を掛けて進められ、昭和60年に貫通しております。

【プロフィール】青函トンネルは、総延長約54kmで、海底部の延長は約23kmです。本州と北海道を隔てる津軽海峡の中央部では、海の深さが約140mで、その海底から更に約100m下のレベルに新幹線用のトンネルが建設されました。

【深度の設定】青函トンネルの工事においては、まず、深さの設定が問題でした。これには、本学の兼重修名誉教授も参加し、海底炭鉱の経験式が適用されましたが、津軽海峡の海底の第4紀層が薄いために、湧水が多いことからみると、浅過ぎたと思います。

【路線の設定】つぎに、トンネル勾配を1000分の12として、ルートを描き、本州側の坑口が青森県東津軽郡今別(いまべつ)町浜名に、北海道側の坑口が北海道上磯(かみいそ)郡知内(しりうち)町湯ノ里に定められました。

【湧水の想定】つぎに、北海道側に調査斜坑が下ろされ、湧水量の計算が実施されています。2本の平行トンネルの場合の湧水量と1本の大断面トンネルの場合のそれを比較して、より有利な大断面トンネル方式で行くことが決定されました。

【止水薬液注入】湧水を制御するため、掘進に先立ち、システムボーリングにより、前方に薬液注入を行う止水工法が確立されました。これにより、海水を排除し、亀裂を塞いだ岩盤の中で、トンネル掘進を行います。

【技術革新】世界で初めての工事なので、止水工法の他にも、多くの技術が開発されました。例えば、長尺水平ボーリング技術が駆使されましたが、これには、本日まで出席の田中徹さんが居られる鉾研工業(株)の卒業生が貢献しております。

【海水との戦い】青函トンネルでは、止水工法で改良した岩盤の奥に、今も、海水の圧力が作用しているので、トンネルが変状すると、海水が吹き出します。工事の途中において、1個所で毎分70トンの湧水が発生したこともあります。

【ナトム(NATM)の導入】さて、鹿島建設(株)に在職中、「上半先進区間の崩壊に対処せよ」と命じられ、「閉構造の上半先進工法」を設計・試験施工して、社長賞を頂いたことなどが思い出されます。これは、その後の基本となった工法で、ナトム(NATM)の先駆けです。

【既往の上半先進工法】大断面トンネルで、全体を1切羽とする全断面掘進工法の採用は稀です。一般の上半先進工法は、まず、上半分の掘削を行い、アーチライニングを施工しつつ、少し遅らせて残りの下半分を掘削して、全体を完成させる工法です。

【新工法】新しく開発した「閉構造の上半先進工法」とは、上半部に対して、アーチと床に連続した閉構造のライニングを施して、上半トンネルを一旦完成させてしまう工法です。下半を掘削して所定のライニングを施した後、不要になった上半の床のライニングを取り除きます。

【試験施工区間】私の区間は、青函トンネル記念館の体験坑道に近い所です。体験坑道には竜飛斜坑線のケーブルカーを使うと8分で到着できます。あの斜坑を、今日ご出席の福岡孝さん、亀岡美友さんと上り下りした頃が懐かしいです。

【品質保証】初めての難工事で、社長賞を頂けた理由は、経済的なメリットもありますが、最新技術を駆使して力学的な検証を行い、最深部に適用できることを証明したからであると思っています。当時、トンネルは経験が頼りで、品質が力学的に検証されることは、稀でした。

【岡行俊先生の遺言】ナトム(NATM)は岩の力学に立脚する工法であり、岡行俊先生はその普及に尽力されました。早くに亡くなられた岡先生の遺言として、教え子は、岩の力学の確立と、その岩盤プロジェクトへの適用に取り組んできました。

【平松研懇談会】中でも、平松先生を座長とする平松研懇談会の木山英郎博士、日比野敏博士、水田義明博士、斉藤敏明博士、厨川道雄博士、棚橋由彦博士、亀岡美友博士、石田毅博士の貢献に敬意を表します。

#### 第4章 集中型の事前抜水岩盤プロジェクト

【岩盤プロジェクトの分類】岩盤プロジェクトは「分散型」と「集中型」に大別できます。「分散型」は、全長約54kmの青函トンネルのように長大で、地域ごとに地質が変化の上、事前に地質条件を知ることが難しいものです。

【分散型と集中型】「集中型」は、地下発電所のように比較的狭いエリアを対象とするので、「力の場」や岩盤条件をきめ細かく調査でき、岩盤の応答を計測できるプロジェクトです。資源開発は「集中型のプロジェクト」です。

**【通常の力学的アプローチの適用限界】** 「集中型」では、通常の力学的アプローチに従って、応力解析が可能です。しかし、「分散型」では、力の場が未知であるために、それが使えません。

**【解析と計測】** 「集中型」では、「力の場」や岩盤条件をきめ細かく調査した上で、岩盤応答の解析と計測を実施し、両者を比較して、最適な工事を行うというように、通常の力学的アプローチが採用できます。

**【計測と逆解析】** 一方、「分散型」では、限られた計測データを基にして、「力の場」や「岩の性質」を逆解析し、予測精度を高めるという逆解析手法、並びに力の場に寄らない法則性に立脚した計測管理が有力であると考えられます。

**【優先順位】** 通常の力学的アプローチ、すなわち、岩盤応答の解析と計測を両輪とする方法が適用できることから、「集中型」を究めて、その成果を「分散型」に適用するのが合理的であると考えました。

**【集中型を優先的に共同研究】** この観点に立って、集中型の岩盤プロジェクトに研究を集中させることに決め、熊大赴任後は、分散型の研究は遠慮しました。当時、西松建設(株)におられ、現在、崇城大学の平田篤夫教授から頼まれた関越トンネル、本学の大谷順教授に頼まれた第2東名トンネルは例外です。

**【事前抜水】** ところで、鉱山や地下発電所は、岩盤の自立力を最大限に活用するため、掘削の前に地下水を完全に抜く、「事前抜水」を基本としています。ただし、最近では、水封式貯蔵のように、地下水の場を乱さない工法が求められるプロジェクトが増えています。

**【水封式の石油地下貯蔵】** 石油地下貯蔵プロジェクトでは、共同研究させて頂いた電源開発(株)によって光波測距儀を用いる計測管理システムが実用化されたことなどの思い出があります。

**【地下水の研究】** 水封式貯蔵では、地下水をバリアとして、石油等の漏洩を防ぎますので、地下水の研究が重要です。この方面では、鹿島建設(株)で机を並べていた京大の青木謙治教授の貢献も大きいと思います。

**【思い出のプロジェクト】** 資源開発では、神戸製鋼(株)における破碎・粉碎機の開発、三池炭鉱における山はね研究、日鉄鉱業(株)における斜面管理など、インフラ整備では、東京電力(株)、中部電力(株)の揚水式地下発電所の建設などが、思い出の岩盤プロジェクトです。

**【揚水式の地下発電所空洞】** 東京電力(株)については、新高瀬川地下発電所、今市地下発電所、葛野川地下発電所、蛇尾川地下発電所、神流川地下発電所の工事に係わることができました。

**【岩の力学は、掘削工学とともに、地下空間を拓く】** 地下空間を拓くには、岩の力学と掘削工学の連携が不可欠です。経済面からみると、掘削工学の方が重要です。掘削が安くできると、地下が身近になるからです。

**【Water Jet】** このため、岩の力学の研究者は、掘削工学なども研究しています。私も Water Jet の実験をしましたが、この方面では、東北大学の松木浩二教授、高橋弘教授に感謝しております。

**【機械掘削法の発展】** 掘削工学については、この40年、スケールメリットを追求した地下発電所の大型化とともに、目覚ましい技術革新がありました。これに係わり、機械掘削法の発展と普及を目撃する機会に恵まれたことは、とくに忘れ難く、幸運でした。

**【本来の方法論】** 岩盤プロジェクトを分類して、特徴などについてお話しましたが、最後に私は、「分散型の方法論を集中型に適用しようとする方がいますが、集中型には、岩の力学の解析的アプローチという本来の方法論を頑固に適用すべきである」と申し上げます。

## 第5章 独りぼっちではなかった研究生生活

【研究生生活の出発点】京大の平松・岡研究室が出発点ですが、当時、岡行俊先生は「一生続けられるテーマを持ちなさい。」と言われ、平松良雄先生は「研究で解ったことは、後でみると、当然なことであった。」と言われました。

【研究生生活の終着点】このようなお教えを多くの方から頂き、助けて頂いて、熊本大学33年の研究生生活を終え、今、無事に定年退職して、完全に自由に成れますこと、思い残すことがない点でも、何と幸運であったかと、感謝しております。

【研究は積み木のようなもの】研究は積み木のような遊戯ですが、積み上げを全て一人で行うことは無理ですから、自分の分野がどのような段階、状況にあるか、そして、基本命題は何か、常に初心に帰って問い返すことが大切です。

【発展のスパイラル】一般に、研究は問いかけから始まりますが、ユニークな成果が生まれると、皆が集まり研究プロジェクトが形成されます。そして、プロジェクトを通じて研究環境が整うと、新たな展開が可能となり、人材が育ちます。

【チャンスを見逃さないために】この間に、果実の熟れ頃を捉えることが大切です。「こういうことが可能になると、この研究が進む」というような展望をもつこと、チャンスを見逃さないために、アンテナを張ることが大切です。

【共同研究の重要性】共同研究は大切ですが、とくに、情熱のある若い方々との共同研究が大切です。年を重ねるほど、若さには勝てないと痛感しております。「ここまで進めてくれれば良い」と指導すると、若さがその何倍も頑張ってくれます。

【国際的であること】「研究は国際的に」と東大の茂木清夫先生から注意され、「海外に同世代の友達を持ちなさい」と東大の西松裕一先生から教えられました。これに従い、金子勝比古先生との「毎年必ず海外へ出る」約束を守ってきました。

【国際会議の成功】また、研究成果の宣伝を兼ねて、国際会議「Rock Stress」を、熊本において平成9年と平成15年の2回開催させて頂きました。今日、その折にご支援頂いた方々にお会いできて幸せです。改めて感謝申し上げます。

【独りぼっちではなかった研究生生活】研究を支えて下さった方々、共同研究を行って下さった方々を、お名前を挙げて、ご紹介しようとする、時間が足りません。本学の尾原祐三教授及び北大の金子勝比古教授には、口に出したことはありませんが、深く感謝しております。

【熊大の尾原祐三教授】本学の尾原祐三教授には、殆どの研究を助けて頂きました。後でお話する「CCBOなどの初期応力測定法」や「各種の数値解析法」などを共同研究できましたことについて、深く感謝しております。

【北大の金子勝比古教授】本学の教授から北大の教授に転出した金子勝比古教授には、後でお話する「ナノセンシングの研究」や「三池炭鉱におけるAE計測」とそれに基づく「エネルギー解放空白域の解析」などを共同実施させて頂いたことについて、深く感謝しております。

【西日本岩盤工学研究会】山大の水田義明教授並びに九大の江崎哲郎教授に深く感謝しています。九州から世界に発信するため、山大、九大と共同で設立した西日本岩盤工学研究会が、熊大から名大に転出された川本兆万先生のご支援もあって益々隆盛であり、昨年、山大の清水則一教授により「岩の力学国内シンポジウム」との同時開催が実現されたことを特筆させて頂きます。

**【思い出多い方々】**他に、神戸製鋼の小浜弘幸さん、故村田博之さん、三井鉱山の木村治さん、増田好重さん、東京電力の御牧陽一さん、工藤圭吾さん、小山俊博さん、鹿島建設の福岡孝さん、鹿島建設から京大に移った青木謙治教授をはじめとして、多くの方々にご支援頂きました。

**【研究費の確保】**ところで、国立大学の法人化により、教授にとって研究費の確保が重大問題がありますが、100年に一度という経済危機を目前にして、今後、「科学研究費補助金の獲得」が至上命題になると思います。幸いに、科学研究費補助金では、良好な成績を残せました。

**【申請テクニック】**科学研究費補助金を得るには、まず、審査員を出している学会で目立つ貢献を行うこと、つぎに、研究業績をもって基本的な命題に正面から取り組むことが大切です。

**【共同申請】**他分野の研究者との交流を深めて、視野を広げること、そして、共同研究として申請されることを推奨させていただきます。なお、私の経験では、「何々のための研究」という申請は全て不採択でした。

## 第6章 岩の力学の基本命題「初期応力測定」

**【岩の力学の解説】**専門外の方もご出席なので、「岩の力学」を簡単に説明させていただきます。

**【岩の力学の目的】**先ほど申しましたように、岩の力学は、力の場における岩盤の応答を究めることを目的としています。したがって、「力の場」をまず究明せねばなりません。「力の場」を求めることを「初期応力測定」と言います。

**【暗黒と静寂の世界】**ここで、皆さん、目を閉じて、この建物の外側が全て岩盤であると想像して下さい。この部屋の上、1000mに地表があります。また、我々が居る、この部屋も岩盤に満たされていると想像して下さい。

**【空洞開削】**暗黒と静寂の世界です。この中に、空洞を作りましょう。そのために、部屋の中の岩盤を全て取り除きますが、取り除くべき岩盤には、上方1000m迄の岩盤の重量が作用していることに注意して下さい。

**【空気の場合】**仮に、上にあるものが空気であると、今日の空気の重さは1立方メートル当り約1.2キログラムですから、高さ1000mの空気の柱の重さは、1平方メートル当り約1.2トンです。約0.12気圧に相当します。

**【水の場合】**また、仮に、上にあるものが水であると、水の重さは1立方メートル当り1トンですから、高さ1000mの水の柱の重さは、1平方メートル当り1000トンです。約100気圧に相当します。

**【実際の岩盤では】**しかし、実際は1立方メートル当り約2.6トンの岩盤であり、1000mの岩盤の柱の重さは、1平方メートル当り2600トンです。約260気圧に相当します。通常のコンクリートの柱であれば、壊れてしまいます。

**【地殻運動に起因する力】**地下1000mの岩盤には、重力に加えて、プレートテクトニクスなどの地殻運動に関係する力も作用しています。さらに、地温勾配が高い日本の岩盤内には、地熱に起因する力も生じています。

**【地表は平坦ではない】**地表には山も谷もあります。断層もあります。褶曲もしています。その岩盤の中に空洞を開けることを想像して下さい。岩盤には、どの方向からどのような大きさの力、初期応力が作用しているのでしょうか？

**[外力の究明を課題とする力学]** このような「初期応力」を究明して、「力の作用する岩盤の柱を取り除くとき、周囲の岩盤がどのように応答するか」が解析できるようになりますと、安全な空洞を合理的に作るができるようになります。

**[岩の力学は極めて特異な固体の力学]** 以上の説明から、「初期応力」の究明、言い換えますと、外力の解明が岩の力学の基本命題であること、この意味で、岩の力学が極めて特異な固体の力学、連続体力学であることも、お解り頂けたでしょうか？

**[CCBO の開発]** 初期応力測定法に関して、熊大における卓越した共同研究成果は CCBO の確立です。これは Compact Conical-ended Borehole Over-coring の略で、岩の力学国際学会 ISRM の Suggested Method に採択されております。

**[CCBO の命名]** CCBO の命名は、イギリスの Imperial College の John Hudson 教授に寄ります。ストーンヘンジを訪ねたとき、Suggested Method に提案するため、相談して付けた名前です。

**[CCBO の原理]** CCBO では、ボアホールの先端を円錐形に加工して、応力解放法を適用し、円錐面上のひずみの 16 成分、あるいは 24 成分を同時に測定し、初期応力の 6 成分を逆解析します。詳しいことは、今日ご出席の中山芳樹さんにお尋ね下さい。

**[応力解放法]** 応力解放法の原理は、昭和 30 年代に確立されていますが、実用的な CCBO に至るまでに、約 40 年を要しました。計測技術的な課題もありましたが、完成に長期間を要した理由は、3次元の応力解析が不可能であったためです。

**[3次元数値解析法の発展]** 昭和 42 年に有限要素法が登場して、軸対称モデルに対する非軸対称荷重問題の解析が可能になり、京大の斎藤敏明教授とプログラム開発を行い、研究を加速させましたが、精度が不十分でした。この問題は境界要素法が解決してくれました。金子勝比古教授のプログラム開発を受けて、CCBO の共同研究が本格化しました。

**[国際会議 Rock Stress]** 先ほど申し上げましたように、CCBO の宣伝を兼ねて、国際会議を熊本で平成 9 年と平成 15 年の 2 回開催させて頂きました。第 1 回目に、平松良雄先生にご臨席頂けたことが懐かしい思い出となっております。

**[土木と鉱山の合流]** この熊本会議では、土木と鉱山の研究者と技術者が一同に会して、総合討論する機会を得ましたが、私は、岡行俊先生の「岩盤の捉え方が土木と鉱山で違うけれど、何が原因であろうか」という問いかけを思い出しました。

**[岩の力学連合会]** 当時、私は、「岩の力学連合会」の理事長でした。この連合会は、土木学会、地盤工学会、資源・素材学会、日本材料学会を母体とする連合で、その趣旨に沿って、熊本会議で分野の枠を超えた共同研究の推進に貢献できたことは幸いでした。

**[熊本会議の成果]** プレート境界にある日本列島は大陸と状況が違っています。大まかに言いますと、深度約 500m より浅い所と深い所で、岩盤の性状が異なり、初期応力も違います。熊本会議では、この事実が再確認されました。これが、浅い所で働く者と深い所で働く者との認識のズレの主な原因であると考えられます

**[岩の力学国際学会 ISRM]** ところで、岩の力学連合会は、岩の力学国際学会 ISRM のメンバーですが、現在、会長の John Hudson 教授の下、国際応用地質学会 IAEG、国際土質力学・基礎工学会 ISSMGE との提携が進んでいます。

**[国際地盤工学会の設立]** 国際地盤工学会 FIGS (Federation of International Geo-engineering Society) の設立を控えて、日本の岩の力学の国際的なプレゼンスを高めることが課題です。

## 第7章 岩の力学の基本命題「山はねと破壊力学」

[深度が増すとどうなるか] 先ほど、地下1000mに、空洞を作る話をしましたが、地下2000mではどうでしょうか？ 地下3000m、地下4000mというように、深くなるとどうなるのでしょうか。当然に、限界があります。

[Rock Outburst] 深さが増すと、初期応力も増加します。このため、空洞を作ると応力集中によって空洞が潰れます。岩盤が脆いため破壊が衝撃的に起こる現象を Rock Outburst と言います。

[山はね] Rock Outburst は日本語で山はねと言います。私は、「山はね現象に関する研究」で博士号を取得しましたが、山はねが起こる場所に、人間が入って行くことはできません。

[山はね対策] したがって、如何なる深度になると、「山はね」が起こるのか、どのようにすれば、「山はね」を克服できるか、これも岩の力学の基本命題です。

[空洞の形状と安定性] 深度の他に、空洞の形や寸法も重要な因子です。一般に、小さいほど安定していて、空洞を大きくすると、安定性が失われます。その結果、ボーリングでマグマに達することも不可能ではないと考えられています。

[試掘とスケールアップ] 大空洞を建設する際に、試しに小さな空洞を作って、岩盤の応答を確かめてから、空洞を拡張する、あるいは、スケールアップさせることは、極めて合理的な工法ですが、拡張や形状設定の方法論の確立も岩の力学の基本命題です。

[岩盤空洞の長期安定性] 山はねという破壊現象と空洞の耐久性とは深く関係しています。山はねを起こさない場合でも、ほっておくと、空洞は次第に縮小し、崩壊して、無くなります。それに100万年かかるかも知れませんが。

[緩亀裂進展現象] 空洞が次第に縮小する原因は、力の作用下で岩盤が次第に痛むためです。これは、主に、岩盤内のクラックが緩やかに成長するためであると考えられています。クラックの成長が臨界速度で起こる場合が山はねであり、普通は、相応にゆっくりと成長します。

[クラック進展速度] 破壊力学によると、岩盤内のクラックが成長すると、その成長速度が、一旦、減少します。その後、時間とともに成長して、クラック進展速度が増加する段階に入ると、成長が加速されて、岩盤は巨視的な破壊を起こします。

[包括的な岩の力学] 岩盤の破壊応力、すなわち、巨視的な強度が、内部クラックの性状に依存することから、クラックのレベルから巨視的な強度を議論できる包括的な力学が必要です。

[岩の力学の夢] 巨視的な応力と強度で物語る材料力学と、クラック先端の応力拡大係数や緩亀裂進展係数などを用いる破壊力学との統合は、岩の力学においても、21世紀の夢です。

[21世紀の破壊力学] 岩の力学が貢献して、地下空洞が建設されたことは、すでに申し上げましたが、今後は空洞の長期安定性、機能保全が課題です。このために力学の深化が必要です。

[機能保全の問題] 当然に、既往の地下発電所空洞の変形は、必ずしも停止しておりません。空洞支持に用いている鉄材も何時かは酸化して機能を失うのでしょうか。地下発電所はいつまで使えるのでしょうか？ 危険の検出は、そして補修は如何に行えば良いのでしょうか？

[クリープ試験] 岩の耐久性に関して、今日ご出席の東大の大久保誠介教授の研究、とくに、クリープ試験結果は、岩の力学の研究者が研究の拠り所にするべきであると思います。

[応力腐食] 今日ご出席の東大の佐野修教授によると、力の作用下での岩盤内クラックの成長の主な原因は、水蒸気が関与する応力腐食です。尾原祐三教授との共同研究によると、岩石の応力腐食は湿り空気の下で最も活発であります。

## 第8章 岩の力学の基本命題「岩盤ナノセンシング」

[岩の力学をやってきて何が解ったか] 熱力学の大先生が、退官に当り、「最近、やっと、エンタルピーというのが、少し解ったような気がする」と言われたことを思い出します。私のケースは、「岩の力学のために、何をやれば良いかが、解ったのでしょうか？」

[岩の力学は、材料力学の一分野である] 岩の力学は、岩盤と言う材料を対象とする固体の力学、連続体力学ですから、岩盤に人工的な負荷を与えて、その応答を観測することにより、力学的特性をモデル化することが、研究の基本であることは間違いありません。

[岩石サンプルの強度試験から始めた研究] この考え方に立って、平松・岡研究室では、1軸引張試験、圧裂引張試験、1軸圧縮試験、3軸圧縮試験など、岩石の小さなサンプルを用いる室内実験から、研究を始めました。

[茂木式研究法] 地震予知プロジェクトを推進された東大の茂木清夫教授は、岩石強度への中間主応力の影響などの研究でも著名ですが、青函トンネルの現場に来られたときに、茂木式研究法を教えて下さいました。それを紹介させていただきます。

[実験の再現性] 先生曰く「高精度の実験を心掛け、実験値がグラフ上でカーブを描きそうだと気づいたとき、想像のカーブとともに実験結果を論文にはいけない。実験の数を増やして、再現性を確かめなさい。」

[再実験が不要になるまで] 続けて、先生曰く「もしも、カーブを確かめたら、更に100回実験しなさい。この段階では、整然と並んだ実験値が確かな法則性を示すので、想像のカーブを描くことも、後の人が再実験することも、必要でなくなる。そこまでやりなさい。」

[後日談] その後、西日本岩盤工学会などで、茂木先生は、あの頃は、そんなことを良く言ったなどと話されました。私は、茂木式研究法の信者であります。現場を経験して実岩盤の大きさと多様性、複雑さを知り、岩石試験で良いのかと自問してきました。

[Cornet の問いかけ] フランスの友人、コロンビア大学卒業のノッポの Cornet 博士は、「岩石の室内試験は役に立つか」という問いかけを、岩の力学国際学会 ISRM のパリ会議で行いましたが、彼の結論は、「室内の材料試験から学んできたが、役には立たない」というものでした。

[像のしっぽに止まるハエの如し] 実岩盤の大きさと多様性を考えると、我々は像のしっぽに止まるハエのようなもので、「全体を知ることは永遠に不可能ではないか？」と悲観的になります。

[広域岩盤試験] あるとき、「岩盤全体を供試体とする材料試験は可能であるか」と考えました。人工的な負荷の大きさには、限界があるので、岩盤の応答を超高感度で計測できれば良いのではないかと考えました。

[岩盤ナノセンシング] それからは、超高感度計測に注目し、「うまいものは開発されていないか」とアンテナを張りました。そこで見つけたのが、ソ連の核実験を米国で感知するためにも採用されたピナクル社の傾斜計でした。

[ピナクル社の傾斜計] ピナクル社の傾斜計は、社長が学生時代に水準器を改良して開発した簡単な構造です。水準器の気泡・液体系の電気抵抗をホイストンブリッジでモニターし、傾斜をナノラジアン単位で検出します。

[1ナノラジアンとは] 1ナノラジアンは、ニューヨークとロサンゼルス間に、サッカーボール1つの高低差を生む傾斜です。

【日鉄鉱業(株)の現場に配備】1台250万円と高価でしたが、最終的に、5台以上購入し、現場に配備して色々と試しました。この共同研究に参加して頂いた方々も今日お見えです。改めてお礼申し上げます。

【安定性のリアルタイム診断】超高感度傾斜計の現場配備は、もう一つの問題の解決を目的としています。その問題というのは、鉱山の安定性のリアルタイム診断です。

【未来の岩盤ナノセンシングに期待する】一般に、鉱山開発は大きな鉱体を対象として、採掘に長年月を要するので、既往の手段では、私が研究中有為なデータを蓄積して、科学的な安全診断を下すことが難しい。この課題の解決を、岩盤ナノセンシングに期待しました。

【重機による移動荷重試験】現場にある70トンの重機を用いた地表移動荷重試験を行い、重機の位置から60m離れた岩盤に、重機の重量により理論通り5ナノラジアン(5nrad)の傾斜が生じることを発見しました。このような荷重の位置と傾斜の関係から、岩盤性状の評価を行います。

【雑音の原因は地球潮汐】ところで、地球潮汐の満潮と干潮が毎日あり、この部屋は大体30cmの上下移動が起こります。これに伴う傾斜の変動が、実験した現場では、約150ナノラジアンに達しておりました。

【雑音と情報の分離】振幅が約150ナノラジアン、周期が約12時間の傾斜変動の下で、重機に起因する極微小な傾斜を観測することができた訳です。この実験では、地球潮汐が雑音であり、雑音と情報の分離が課題でした。

【次は高速反復載荷試験】重機による地表移動荷重試験では、地球潮汐という雑音の分離が課題でしたので、次は、雑音分離が必要でないと考えられる「高速反復載荷試験」に挑戦しようと考えながら、それを地下空間で行う機会を逃してしまいました。

【岩盤ナノセンシングの未来】岩盤ナノセンシングは、鉱山安定性のリアルタイム診断に加えて、地下に大空洞を建設するための事前現場試験法、建設後に品質を確かめるための事後検証法として有望だと思います。今後、ニューフロンティアとして、岩盤ナノセンシングに挑戦されることを期待しております。

## 第9章 岩の力学の基本命題「岩盤の可視化」

【内部が見えない岩盤】岩盤は中が見えない上に、不均質性、不連続性、異方性であり、強度が小さい軟岩から、機械掘削ができない硬岩まで、多種多様です。さらに、寸法によって巨視的な強度が異なるという複雑さを持っています。

【岩盤の可視化】岩の力学を目指す者は、「岩盤の中が見えたらどんなにすばらしいか」と考えています。この探査工学のテーマ「岩盤の可視化」については、弾性波トモグラフィなど、多くの成果がすでにあります。

【X線CTスキャナーの導入】一方、岩石の非破壊試験のため、Micro Focus CT や Synchrotron Radiation の活用が、最近、盛んですが、熊大の研究グループは、全国に先駆けて10年前に、産業用X線CTスキャナーを導入しました。

【熊大 X-earth センター】現在、リニューアルにより1ピクセル74ミクロンの画像収録が可能です。本学の拠点形成研究に採択され、今後、共同利用・共同研究の体制を更に整備して、皆様のニーズに即応する計画です。ご期待下さい。

[新領域を拓く] 長年の蓄積の上に、熊大 X-earth センターを中核とする拠点形成研究が展開されることは、嬉しいことです。今後、岩の力学の尾原祐三教授、土の力学の大谷順教授、情報地質学の小池克明教授、海岸環境学の山田文彦教授らが連携して、皆様のご支援を受けて、新領域を拓かれることを願っています。

[研究の話を終ります] 岩の力学に係る共同研究の話は、これで終りにさせていただきます。本日は、学内の先生も居られますので、残りの時間に、大学の運営面の思い出等について述べます。

## 第10章 大学院自然科学研究科の設立と充実

[ラッキーボーイ] 熊大は医学でもっていると言われて、久しいですが、自然科学において、第2の柱が築かれつつあることは、構成員の弛まぬ努力のお陰です。このような充実を目にしつつ、定年退職できることは、誠に幸運です。そこで、これまでの歩みを振り返らせて頂きます。

[工学部と工学研究科修士課程] 昭和51年に工学部助手として赴任したとき、大学院は修士課程だけの工学研究科であり、博士課程の設置が悲願でありました。なお、修士課程は昭和40年に開設されています。

[工学部80周年] このため、第五高等学校工学部創設から数えて、80年目を迎えました昭和52年に、工学部80周年記念事業を行い、同窓会との共同による、博士課程の設置運動がスタートしました。

[自然科学研究科博士課程の開設] その結果、工学部と理学部を母体として、昭和62年に、自然科学研究科博士課程が開設され、「大学院の部局化」が次の目標になりました。つまり、専任教官をもつ研究科としての拡充を目指しました。

[工学部100周年] 平成9年に、100年目を迎えて、工学部100周年記念事業を行い、シンボルとして、この工学部100周年記念館が完成できたのは、平成16年です。

[自然科学研究科の部局化] 100周年に合わせ、平成10年に、工学研究科、理学研究科との統合により、博士前期課程と博士後期課程からなる区分制の自然科学研究科が設立されました。

[部局化の意味] 部局化の目的は、旧帝大に並ぶ歴史をもつが、規模が小さい本学の弱点の克服であり、理学部と工学部の結集により、旧帝大のように1研究科250人規模の教員組織をもって、旧帝大を凌ぐ活動を行うことです。

[大学の管理・経営への参画] 平成12年から平成16年まで評議員、法人化の平成16年から平成18年まで自然科学研究科の研究科長、平成18年から今日までは、理事兼副学長として、大学の管理・経営に携わる機会を得ました。

[自然科学研究科の充実] この間に、21世紀 COE「衝撃エネルギー科学の深化と応用」、理工融合「複合新領域科学専攻」、プロジェクトゼミナールによる実践的博士の養成、グローバル COE「衝撃エネルギー工学グローバル先導拠点」など、研究科は一定の充実を達成しました。

[敬意と感謝を表す] COE の設立は格別に嬉しく、関係各位のご努力に敬意を表します。とくに、秋山秀典教授、大津政康教授、真下茂教授、河村能人教授をはじめとするグローバル COEの方々には、ご苦勞をおかけしました。研究科長を引き継いで下さった松本泰道教授、檜山隆教授にも深く感謝します。

## 第 1 1 章 理事・副学長の業務を振り返って謝す

[所掌した業務] 平山忠一前理事・副学長の後任として、目標・計画・評価・情報・広報・基金等を所掌しました。大学に貢献できたとすれば、それは皆様のご支援と崎元達郎学長による的確なご指導の賜物であり、深く感謝申し上げます。

[理事の方々に感謝] また、西山理事・副学長、阪口理事・副学長、森理事、野口理事、事務局長の佐藤前理事及び山本理事、並びに病院担当の倉津副学長と共同する機会に恵まれ、貴重な経験を積むことができました。感謝申し上げます。

[私に期待された成果を十分に挙げ得なかったことを謝す] さて、理事・副学長の業務を振り返り、関係各位のご努力により策定された基本路線が極めて的確なものであったにも係わらず、私に期待された成果を十分に挙げ得なかったことについて陳謝させていただきます。

[目標・計画・評価] まず、目標・計画・評価については、文部科学省に提出する各年度の年度計画及び年度報告の作成に加え、教員個人活動評価、組織評価と法曹養成研究科の認証評価、平成 20 年度法人評価、平成 21 年度の機関別認証評価等に携わりました。

[第 2 期中期目標・中期計画] 熊大プラン検討報告書 2008 の取りまとめ、第 2 期中期目標・中期計画素案の策定準備等も担当しました。本学固有の組織評価においては、学長による対部局改善勧告を実施したことを特筆させていただきます。

[組織評価で課題を残した] この間に、評価で皆様に非常な業務負担をおかけしました。その上、企画部の方々のご支援にも係わらず、評価を改善に結びつける PDCA サイクルの要である組織評価の合理化・効率化等の課題を残してしまいました。

[教員個人活動評価で課題を残した] また、教員個人活動評価では、大学の目標・計画の達成に役立ち、かつ構成員の活力を高める効果的な人事評価の観点から、定量的な評価基準の確立等の課題を残してしまいました。

[法人評価の失敗を謝す] さらに、法人評価において、達成状況の評定が不満足な段階であったこと、また、現況分析の成績が各部局のご努力に係わらず必ずしも高くなかったことの原因を痛感し、陳謝させていただきます。

[情報・広報] つぎに、情報・広報では、総合情報環構想の推進、個人情報漏洩防止、情報開示請求への対応等を担当するとともに、熊大のブランド化に向けた広報誌の発行などに加えて、大学 Web ページの充実等に係わることができました。

[反省と期待] 情報・広報の体制整備が課題であると認識しつつも、十分に措置できず、実務担当の方々に過大な負担を強いたと反省しています。包括的な情報化推進機構、広報・IR 部門の創設等、更なる機構改革を期待しています。

[熊本大学基金] つぎに、基金については、7 人の学部長の強力なサポートの下、熊本大学振興会等の伝統を引き継ぐ、同窓会と二人三脚の恒常的な熊本大学基金の創設に至ったことを振り返り、皆様のご協力に深く感謝します。

[設立60周年に向けて] とくに、熊本大学基金事業として、熊本での設立60周年記念式典、上野の山での熊大COE展示会、熊本大学60年史編纂、学生支援等が実施の運びとなり、新たな前進の契機となることを期待しますが、経済危機を目前にして、基金の見直しも必要です。

[熊本大学は一つ] 機会ある度に申し上げたように「熊本大学は一つ」で力強く社会的使命を果たすために、崎元学長体制で達成できた成果を踏まえつつ、谷口功新学長が先頭に立ち、新たに理事を務められる安部眞一教授、山村研一教授、田口宏昭教授とスクラムを組んで、全学の叡智を結集して頂きたい。宜しく申し上げます。

[将来構想] 将来構想によって本学の世代を超えた公共的意味と価値を内外に示すとともに、自律性と自己責任、個性の確立を標榜する本学の公約として、中期目標・中期計画を策定・完遂されることを願ひまして、講義を終りと致します。

## 第12章 おわりに

[有り難うございました] 重ねて、感謝申し上げます。有り難うございました。なお、退職後は、完全フリーですから、遊びのお誘いは大歓迎です。

[ご忠告を守って] とくに、飽本正己君のお父さんのご忠告に従って、酒とタバコを慎むことにして、平松良雄先生に倣い、組織人間から文化人間に変身したいと考えております。

ご清聴、有り難うございました。