

# 招待論文

## 戦後10年間の水理学私史

### MY HISTORY OF HYDRAULICS FOR DECADE AFTER WORLD WAR II

岩垣雄一\*

By Yuichi IWAGAKI

#### 1. まえがき

この毛色の変った論文を書くことになった経緯は、自分一人の意志ではなくて、中川前小委員長（論文集編集委員会）のすすめがあったからで、私が来年3月末で京都大学を停年退官する機会に、何か思い出を書いたらというのが、その発端であった。しかし、私もそろそろその歳になったかと、前ばかり見て過去の自分をふりかえる機会がなかった私にとっては、いささか戸惑いを感じるのは当然であった。本当は、H. Rouse の名著「History of Hydraulics」<sup>1)</sup>や「Hydraulics in the United States 1776-1976」<sup>2)</sup>のような内容の日本の水理学史が書ければ、それはそれなりに日本土木史の一部<sup>3)</sup>として有意義ではあるが、書くとするればその労力は大変であると思う。ここで私が書こうとしているのは、通常のいわゆる水理学の歴史ではない。歴史は後世に残す過去の記録として、また人の業績を評価する報文として価値があるが、私はこの拙文を記録や評論に終わらせるつもりはない。私の青春時代、すなわち大学を卒業して約10年間の私が歩んだ水理学の道の一部を紹介して、どのような動機で、どのような環境と背景の下で、私が水理学の研究を進めていったかを述べたい。特に研究の成果が論文という形になるまでの表に出ない隠れた部分が、昔の出来事にあまり関心のない現代の若い水理

学研究者の参考になれば幸甚である。

#### 2. なぜ戦後10年か

私は昭和21年9月に京都帝国大学工学部応用物理学科（前年に航空工学科が廃止され学科名が変わった）を卒業し、大学院特別研究生となったので、卒業後10年ということは、戦後10年といいかえてもよいし、また昭和20年代といってもよい。では、なぜこの時期を選んだかであるが、それには理由がある。

1年ほど前に、私が書店で何げなく買った湯川秀樹著の「天才の世界」<sup>3)</sup>という文庫本を読んで、天才が語る天才の話に強く引き込まれた。いうまでもなく湯川先生はわが国最初のノーベル賞（物理学）受賞者であるが、この本は市川亀久彌氏が聞き役となって対談の形で述べられている。「続天才の世界」<sup>4)</sup>、「続々天才の世界」<sup>5)</sup>の3部に分けられ、小学館と三笠書房の両方から出版されている。これらの本で取り上げられている天才は、引法大師のほか10人にのぼっているが、理工系の天才は、ニュートン(1642-1727)、アインシュタイン(1879-1955)、ウィーナー(1894-1964)、エジソン(1847-1931)の4人である。

最初のニュートンは、市川氏の言を借りると、「近代天文学の数学的な構造化を最初にやりとげた人物、万有引力の大発見をはじめとする流体力学的解析の創設者、微積分法の発明者、あるいは光学の世界における色彩の秘密の解明などといった世界でのポピュラーな業績にいたるまで、この大創造者に対する評価はすでに定着しきっている」わけで、彼なくしては現在の水理学も存在しなかったかもしれない。彼の名前は今や天才の代名詞として用いられるほどである。ニュートンは有名なケン

\* 正会員 工博 京都大学教授 工学部土木工学科  
(〒606 京都市左京区吉田本町)

注1) 昭和48年に発刊された日本土木史(昭16-40)には石原(安)、尾崎、堀川によって執筆された水理学部門の記述がある。

Keywords: creative power, roll-wave train, run off analysis, critical tractive force, hydraulics

ブリッジ大学に入学し、金がなかったので給費生となり雑用をさせられるわけであるが、21才の頃にパロウという数学の教授に可愛がられ、その後2年経つと、その教授がニュートンの型破りの才能に気がついて、パロウ教授は自らその職を辞し、それを若い一学生のニュートンに譲ってしまったという、日本では考えられないような幸運な面もあった。23才のときにニュートンはバチェラー・オブ・アーツの資格を得たが、その時の成績はあまりよくなかったようである。ちょうどその頃、ロンドンでペストが流行し、約2年間大学が再開されるまで郷里に帰るわけであるが、彼が万有引力とか微積分法の発見などの大発見の基本構想は、この時期に考えたものといわれている。ニュートンの創造的活動の絶頂期は、25才前後であったということになる。

次にアインシュタインは21才でチューリッヒの工科大学を卒業したが、2年ほど半失業者でなにも仕事なかった。友達のお父さんの世話でようやくベルンの特許局の技師となったが、仕事の方はものすごく短い時間でやってしまって、残りの時間を物理学の根本問題の思索に集中したようである。そして彼が26才の時に、当時の物理学史上で難問題とされていた3つの課題について、新しい見解を提唱している。第1はブラウン運動の解明で、第2は光子の理論、第3が最も有名な特殊相対性理論である。アインシュタインは子供のときに数学を独学して、ピュア・サイエンティストとしての素養をもっていたが、父が事業に失敗したので早く職業を身につけて自立しなければならないという家庭の事情から、やむを得ずチューリッヒ工科大学を受験したのである。ところが数学の成績は抜群によかったけれども、語学や博物学が全くできなかったので落第してしまったわけである。その1年後に再び受験して入学しているので、一浪の経験者ということになる。湯川先生の言によると、「自分は高等学校で習った化学、動物、植物、これもぜんぜん興味がなかった。つまり、何を意味しているのかよくわからん…」[逆説的なことを申しますけれども、あらゆる学科が面白かったら、具合が悪いと思います。問題点はそこであって、つまりアインシュタインは数学が好きやった。物理なんかにも非常に基本的な理由があって、段々興味をもつ。しかし、そのほかの学科に興味をもたなかったのがよかったです、いろんな学科に同じような興味をもつと、これは非常な秀才になるけれども、秀才になるということは、これからさきにとっては、具合悪いかも知れんわけやね。]

アインシュタインは、特殊相対性理論にはあきたらず、36才のときに一般相対性理論を完成している。それは彼がベルリン大学教授に招聘され、22才で結婚してベルンに妻子を残し単身赴任をしていたが、ベルリンへ

やって来ない年上のミレヴァ夫人とちょうど離婚をした年に当たるわけで、この大理論を組み立て完成に向かっていた時期に、単身赴任とか離婚問題が起こったことになる。このあたりが常人と異なるところかもしれない。とにかく、アインシュタインの創造的活動の最盛期は26才前後から36才までといえる。

ウィーナーは水理公式集の実験資料解析のところに、Wiener-Khintchine の関係として述べられているほど、われわれには身近な人である。彼は父から天才教育を受けた点ではこれまでの天才とは異なっている。14才でハーバード大学大学院の動物学科に入学したが、1年後には哲学科に転科して数理哲学を学修し、18才のときに博士号を授与されたという。一時母校のハーバード大学で哲学学科の助手をしたり、百科全書の編集員の職についたり、陸軍の弾道研究所員になったり、新聞記者を試みたりしたが、25才のときマサチューセッツ工科大学(MIT)の数学の専任講師に任命された。彼が天才としての才能を発揮し始めたのはMITの教員になってからで、戦後1948年に「サイバネティックス」という書物を出版して、彼の名声は世界的なものになった。湯川先生に言わせると、彼の特徴の第1は、彼の思想であって、現代的に非常に大きな意味をもっていること、第2はサイバネティックス(ギリシャ語で「舵手」の意)という学問はスケールが大きいこと、第3に父親から非常に早教育を受けて、小さいときから天才ということになっていて、自分でも盛んに天才だといっている。普通は、おれは天才だ、天才だとばかりいっていたら、大変いやらしい話でもあるし、二十過ぎればただの人ということもあるので、父親が自分の望む学者に育てようとしても、たいていは巧くいかないのである。それがウィーナーの場合は逆手逆手みたいになっていて、ありきたりの天才論からは一つ一つはずれていくようなところが何としても面白い。第4は彼のサイバネティックスは世界的に非常に評判になったけれども、全体としてみるとこれは正統派的学問ではない。つまり専門の学者からはあまり評価されない。そういう意味で、異端者とはいえないかもしれないが、一種の創造的少数者、すなわち孤立した人であるというところが、また天才の天才たるゆえんできわめて興味深い。

エジソンについては大発明家として、いまや誰知らぬものがないほどの有名人である。彼は子供の頃は、当時の大人たちの目から見て、なかなか理解しにくい問題児であつたらしく、近所的小屋に火をつけて燃やしたり、いろいろな事件を起こして父親からいつも折檻されていた。8才のときに牧師が開いていた小学校へ入れてもらったが、3か月経ったある日に、牧師からあの子は頭が腐っているといわれ、子供は登校拒否をするし、母親

は牧師と激論したすえに息子を退学させて、自分で初等教育をすることになる。母親がある日、「自然科学の学校」という初等物理の本を買い与えたところ、むさぼるように読んで好奇心を燃やしたという。彼が9才のときであった。正規の学校教育は受けなかったが、そのかわり読書に熱中した。図書館に通って手当たり次第本を読んで独学したのである。一時通信技師としてアメリカ全土を放浪するのであるが、19才のときには再び書物や機械論文に頭を突込んで勉強する独学青年にかえるのである。21才のときファラデーの「電気学実験研究」を遂に手に入れたが、それが彼の以後の人生に決定的影響を与えることになる。創造の方法論をファラデーから無意識のうちに受け取っていたのである。そして23才で自分の工場をつくり、29才で有名な発明を専門に追求するための工業研究所を建てている。まずこの研究所でカーボン・マイクロフォンの発明によって電話の実用化に成功し、ついで蓄音機、白熱電灯というように画期的な発明が続いた。最初に電灯が実験的に成功したのが1879年であるから、彼の32才のときである。エジソンの祖父は102才まで生きて13人の子供をつくり、父親は67才で近所の17才の乳搾りの娘と再婚するほどであったから、エジソン自身もそのヴァイタリティーを受け継いだことは確かである。一方、母方の両親は牧師であったから、その遺伝的性向は知的教養人といってもよい。湯川先生の言では、「特にエジソンの場合には、不屈の精神というものが非常に強く出ている」のである。53才のときに、インタビューを受けて、「天才とは99%のパースピレーション（発汗）と、1%のインスピレーション（靈感）によってできるものである」という述懐をしているが、これに対して湯川先生は、直観型、経験型の天才であると表現している。

天才であるための共通の条件、性格は何であるか。この3冊の本から抜き出してみると、1) 感受性、2) 集中性、3) 持続性、4) 執拗性、5) 不屈の自尊心、6) 精神的ヴァイタリティー、7) 孤独性、などであるが、これらは天才に限ったことではなく、何の職業でもプロを志す人々にとって、重要な条件であることには間違いない。私はここで天才の資格を論じようというのではない。私が指摘したいことは、湯川先生の次のような発言である。（ニュートンのところで）「20世紀の身近な学者についてみても、20才前後、20才を少し出たくらいで、数学的に大きな仕事をしている人は割合多い。ところが物理になるとちょっと遅れ、2, 3才から4, 5才ぐらい違う」「数学的才能というのは、普通の場合は早く出て、だんだん物理へいく。それから生物の方へいくという傾向があって、才能発展の順序を考えれば、年令の面で数学が早いわけである。それから物理、次に化学とか生物学、

それから社会科学とか人文科学となると、長いことかかって蓄積して碩学となっていくわけである。たとえばトインビーという歴史家は、80才を越してあれだけのことをやっている。」

要するに、たとえばニュートンは25才前後が絶頂期であったし、アインシュタインは26才のときに難問とされた3つの物理学上の問題を解明した。ウィーナーは25才でMITの専任講師となってから能力を発揮し始めたし、エジソンは正規の学校教育を受けなかったにもかかわらず、30才で電話の実用化と蓄音機の発明に成功し、32才で白熱電灯の発明、44才で映画の実用化に成功を取っている。私が戦後10年を取り上げたのは、わが国の水理学が戦前の家内工業的な時代から、新しい水理学へと生まれかわろうとする最も有意義で重要な時代であったことが第一であるが、同時にその10年が、私の大学卒業後10年にあたることと、また私自身の年令が20台半ばから30台半ばという、水理学の研究にとって最も能力を発揮しやすい時期であったことによるものである。もちろん私は天才ではないし、またその条件にもあまりあてはまらない。しかし、私の創造性が、もしあるとすれば、最も存在し得た可能性のあるのが、その期間であったと私自身思っているに過ぎない。

### 3. 戦後10年のわが国の水理学研究

前述したように、わが国の戦後10年間の水理学の発展を書くことが、この小文の主旨ではないし、書くとしても多くの資料を集めないといけない。しかし、これに全く触れないわけにもいかない。ここでは、できる限り簡潔に当時の模様を紹介してみたい。

戦後の混乱はいずれの分野でも同じであり、土木学会でも例外ではなく、土木学会誌の戦後第1回の発行が第31巻第1号として昭和21年5月になって実現している。しかも掲載論文は終戦以前に受付けたもので、昭和22年6月に発行された論文集第1・2合併号の論文の受付日も同様である<sup>注2)</sup>。したがって、水理学の研究としても戦後行われたものは、昭和23年3月より第1号が発刊された第33巻に載った論文からと見てよいかも知れない。成案を得ていた水理公式集が戦災を受けて焼失し、戦後に初めて出版されたのが昭和24年9月であった。また当時の学会誌の記事をみると、土木学会研究発表会が2か月に1回ぐらいの頻度で東京で開催され、水理学関係の論文も2, 3散見される程度であるし、関西支部でも研究発表会が昭和23年6月に行われているが、水理学関係は12件中1件のみというように、いずれも規模は小さく、細々と行っていたといえる。本格的な土木学会の年次大会は第5回として名古屋工大で行われた

注2) 10編の論文中、岩井の論文のみ受付日の記述がない。

昭和24年5月の学術講演会からで、これには私も出席したが、水理河川関係は16篇、港湾関係7篇、堰堤関係5篇が発表されている。その当時の様子はこうした発表論文によってしか知る方法はないが、たまたま昭和24年7月発行の土木学会誌に、「国内主要研究機関の現況に就て」<sup>6)</sup>という記事がみつかったので、水理関係のみを抜き出して紹介すると次のとおりである。

昭和24年頃の水理学研究の現況

1) 北海道大学工学部：林 猛雄(教授), 眞嶋恭雄(助教授)は港湾関係で結水・流水対策を、宮川道彦(助教授)は急斜路, 広頂堰の流量, 楕円関数による等角写像などの問題を研究し, 岸 力(大学院特別研究生)が協力している。

2) 東京大学第一工学部：本間 仁(教授)が射流抵抗の実験, 調圧水槽の安定条件, 洪水波や潮力利用の問題を取り扱い, 林 泰造(部員), 嶋 祐之(大学院特別研究生)が協力している。嶋はまた Hele-Shaw の方法によって土堰堤の浸透実験を行っている。

3) 東京大学第二工学部：安藝皎一(兼任教授), 井口昌平(助教授)は洪水に関する研究を, また井口は海岸侵食と漂砂, 分岐する溝の研究を行っている。

4) 早稲田大学理工学部：米元卓介(助教授)は混濁水流の水理を調べたが, 本間教授の下で流量測量法の比較研究を試みている。米屋秀三(講師)は水圧鉄管における水衝波の発生と減衰, 調圧水槽における始動安定の問題を扱っている。

5) 京都大学工学部：石原藤次郎(教授)は岩垣雄一(雇), 杉本修一(研究員), 合田 健(大学院特別研究生), 石川 浩(雇)の協力を得て, 開水路乱流の研究, 橋脚, 沈澱池, 沈澱池の流体力学的研究, 土壌法面の流水による浸食機構の研究を実施し, 岩井重久(助教授)とともに松村正光(大学院特別研究生)の協力によって水文図学, 水文統計学の研究を進めている。また, 岩垣の協力によって海岸侵食, 漂砂についても研究している。

6) 大阪大学工学部：田中 清(助教授)が波力測定器の研究を行っている。

7) 九州大学工学部：松尾春雄(教授)は篠原謹爾(兼任教授, 流体工学研究所)と協力して港湾内の波高減衰の研究を, また篠原は不定流の基礎的研究を進めている。

8) 日本国有鉄道・鉄道技術研究所：第7部の一部が現在の運輸省港湾技術研究所となったもので, 当時は建設省土木研究所(駒込本所と赤羽分所)と同居し, 水理研究室は水路を借用して, 防波堤の模型実験, 海岸決壊と埋没, 海況を対象として研究している。

9) 建設省土木研究所：河川第一の佐藤研究室では, 利根川の洪水に対する調査研究と那須野原の地下貯溜に関する調査研究を実施し, 河川第二の竹内研究室では利

根川支流の神流川における降雨量と洪水との関係を調べている。

10) 日本発送電株式会社電力技術研究所：土木科の水理第一研究室(岡田篤也)では, ダム導流壁形状の水理学的研究, 沈砂地の構造についての調査研究, 貯水池水深測定器の研究が実施され, 水理第二研究室(吉越盛次)では, 水槽の構造の研究, キャピテーションの調査研究, ダムの揚圧力の調査研究が行われていた。

これらがすべてではないが, その当時の水理学研究の主な状況を示しているといえよう。しかし, 研究題目もまだ抽象的なものが多く, 研究機関も限られていて, 何となくまだ混沌とっていい状況であった。土木学会水理委員会(安藝委員長)では, 昭和27年に水理研究会を発足させ, 会員を募集し, その名簿を作成したが, 会員数は196名(機関会員も含む)であった。これは当時の水理学研究者と水理学研究に関心にもつ者と考えればよいであろう。この研究会の最初の仕事は, 水理学の研究が, どこでどのような課題で行われているかを取りまとめ, 「水理学研究の現況」と名付けて会員に送付することであった。研究課題は96件に及ぶが, 幸いにもこの印刷物<sup>7)</sup>が手元にあるので, これを紹介すれば次のとおりである。

昭和27年当時の水理学研究の現況

1) 北海道大学工学部：洪水波の伝播及び変形に関する実験的研究(大坪喜久太郎)

2) 東北大学工学部：瀑の落下点付近の水理現象の実験的研究(岩崎敏夫)

3) 東京大学工学部：落下水の実験, 水路出口の損失, 急傾斜水路の実験(本間 仁); 幅の拡がる水路の射流, 石淵ダム余水吐模型実験, 限界レイノルズ数の実験(嶋祐之)

4) 東京大学生産技術研究所：洪水追跡の方法の日本の河川への適用の検討, 貯水池余水吐きの模型実験, 河川工事による河床の変動に関する研究(井口昌平); 信濃川旧川の浮遊土砂に関する研究, 河床の変動に関する理論の研究(高橋 裕)

5) 早稲田大学理工学部：洪水流量に関する研究(米元卓介); 開水路の流入損失水頭(米屋秀三)

6) 中央大学工学部：洪水波の実験, 河川の蛇行性の実験的研究(林 泰造)

7) 日本大学工学部：射出水による砂の洗掘について(栗津清蔵)

8) 山梨大学工学部：孤立波特に段波の研究(佐々木大策)

9) 信州大学工学部：土砂多き河川の上中流部の水理学的研究(結城朝恭)

10) 京都大学工学部：河床砂礫の流れに及ぼす影響,

横溢流路の研究, unit-graph とその治水計画への応用(石原藤次郎); 堤防及び防潮堤の非定常浸透に関する研究, 揚圧力に関する研究(丹羽義次); 波浪計・雨量計に関する研究, 薄層流の研究(岩垣雄一); 河状と浮遊土砂に関する研究, 急速浜過の水理に関する研究, 沈砂池の効率に関する研究(合田 健)

11) 京都大学防災研究所: 河道の洪水波に関する研究, 河口の問題, 海岸侵食及び漂砂の研究(速水頌一郎); 流出係数に関する水文学的研究(矢野勝正)

12) 大阪大学工学部: 防波堤の性能と港内波浪について, 有限振幅長波の反射, 回折, 干渉について, 開水路不定流の解析(田中 清)

13) 大阪市立大学工学部: 洪水時用流量計に関する研究, 海岸防潮堤の高さ及び形状の決定, 並びに波浪が河川を遡上する際の波高減衰率に関する研究(永井荘七郎)

14) 神戸大学工学部: 雨裂内の水流並びに浸食の実験的研究, 心壁堤体内の浸透の研究(田中 茂)

15) 徳島大学工学部: 築堤の安定に及ぼす浸透水の影響について(久保田敬一); 砂礫の多い河川流の基礎的研究, psammo-hydraulics に関する研究(久保 保)

16) 山口大学工学部: 管路による砂輸送に関する実験的研究(小川 元)

17) 九州大学工学部: 防波堤に作用する波の圧力, 九州の河川の性状, 単位図法による洪水流出量の計算(松尾春雄); 降雨量と流出量との関係(上田年比呂)

18) 九州大学応用力学研究所: 路面排水の基礎的研究, 阿蘇谷溪流の水理学的研究(篠原謹爾); 河川流砂量の研究, 特に砂連について(椿東一郎)

19) 建設省土木研究所: 各種洪水流出量の算出法の検討, 河川計画洪水量の決定法, 掃流運搬量の観測法及計算法, 護岸・水制の設計法, 漂砂に関する研究(佐藤清一); 浮遊流砂量の観測法及計算法, 河川浮遊流砂量の実測(吉川秀夫); 海岸の堤防・護岸の設計法(岸 力); 洪水時の流出係数に関する研究(竹内俊雄)

20) 運輸省運輸技術研究所: 砕波に関する実験的研究, 河口流に関する研究, 風浪と海面上風速分布状態に関する研究(浜田徳一); 実体写真による防波堤付近の波の研究, 東京湾における風浪の研究(井島武士)

21) 電力技術研究所: 上椎葉発電所計画地点のアーチダム中央部洪水溢流の模型実験(坂本龍雄); 洪水調節用門扉を付けたダムの堤頂に関する水理実験, 高圧門扉から放流する場合の流量係数を求める実験, 水車の効率測定を対象とした流量測定(岡田篤也)

このほか, 厚生省国立公衆衛生院(左合正雄), 建設省関東地方建設局(中安米蔵, 坂西徳太郎, 秋草 勲, 梶谷 薫), 建設省近畿地方建設局(藤芳義男, 藤野良幸,

稲田 裕), 総理府資源調査会事務局(近藤利八, 三浦孝雄), 東京都水道局(扇田彦一, 谷口清治), 横浜市水道局(国富忠寛, 野口一郎), 福井市水道局(寺岡 初), 大阪市水道局(川北四郎), 北海道電力 K.K. (池田英三郎), 関西電力 K.K. (中山謙治), 日本上下水道 K.K. (板倉 誠) の機関の方々も研究課題を寄せている。

このような研究現況をみると, 3か年経過した昭和27年には, 水理学研究も活発となり, 取り上げた課題もかなり具体的になって, 当時, どこで, 誰が, 何を研究していたかを知ることができる。この水理学研究の現況調べは, それ以来毎年続けられ, 資料として印刷し, 会員に配布されていた。昭和31年度(資料No.6)の付録に載っている名簿では, 会員数は339名に増加している。また研究課題数は, 昭和29年度114件, 昭和31年度253件, 昭和33年度301件というように急増している。

水理委員会では, 水理研究会講演会を計画し, その第1回が昭和31年5月14日~15日に建設省土木研究所の講堂で開催され, 22篇の研究結果(前刷がある)が公表された。わが国の水理学研究者が特定の課題について, 年に1回一堂に会して講演し討論するという新しい試みを始めたわけで, 私は日本の水理学史の1頁を飾る画期的な出来事であると思う。また, その年の夏には水理公式集委員会(本間委員長)が組織され, 私も委員の1人として作成に参加したが, 翌昭和32年8月に新しい2回目の公式集<sup>8)</sup>が出来上がったことも, 水理学史上の特記事項である。この頃からわが国の水理学研究は戦後の第2段階に入るのではないと思われるが, これから先は私の主題ではないので触れない。

#### 4. 戦後10年間の私の水理学研究

私が航空工学科に在学中, 昭和20年の初めから終戦まで, 学徒勤労員として名古屋の愛知航空という飛行機を製造する会社へ派遣された。そこで私一人だけ最後まで残って, 今でいうミサイルの飛行経路を, 20寸の計算尺を用いて, Runge-Kutta 法により計算するという, 当時のハイテクに属する仕事に参加した。これには小さい翼はあったが, エンジンはなく, 飛行機から発射されたあとは, 熱線を発する目標に向かって落下するわけで, ウィーナーの自動制御の原理が利用されていたが, 今から考えてみると流水中を落下する砂粒の運動経路の計算と大差なかったかもしれない。しかし大学の2年生で, 現在の空対空ミサイルと同じ形をした実物が, 大型風洞にセットされているのを見たり, これが目標へ向かって滑空する経路が現実に自分の手によって計算されているのだという実感を味わったのは, 自分にとってまたと得られない貴重な体験であった。これがきっかけとなった

のか、私は自然に流体力学の道を選ぶことになった。卒業論文は藤本武助教授の指導を仰ぎ、卒業後は就職事情の悪い時期に、文部省から給与が頂ける大学院特別研究生として、研究室に残って流体力学を学ぶことになった。昭和23年に機会あって、土木工学教室の石原研究室で面倒をみて頂くことになったが、その間に私は次のような研究をした。

#### 1) 回転円板の摩擦抵抗に関する研究<sup>9),10)</sup>

これは流体中を滑面や粗面の円板が回転するときの摩擦抵抗を計算するもので、円板上に発達する境界層の運動量方程式を解く問題であるが、私はこの研究を紹介するつもりはない。ただ、この研究が湾曲水路の底面付近の流れの解析に応用できることを見出し、一度計算を試みたことがある。その結果を、昭和25年12月に、当時京都大学工学部の若手教官が会員となって組織していた応用数学力学談話会第19回例会で、「河川湾曲部の流れについて」と題して発表したことがあるが、印刷物にはなっていない。ただ昭和33年に出版された「応用水理学中I」には未発表論文として一部結果が紹介されている<sup>11)</sup>。回転する円板上の境界層内の流れは、遠心力のために発生する半径方向の流速と接線方向の流速の合速度をもった流れとなるが、これは湾曲水路底面に発達する境界層内の流れとよく似ており、主流が接線方向の流れ（この場合は底面で流速が0となるが、回転円板の場合は回転速度に等しい）に相当し、内側に向かう2次流が半径方向の流れとなる。湾曲水路内の流れについては、その後わが国のみでなく世界各国でもさかんに研究されているが、最近のHussein-Smith (1986)<sup>12)</sup>の研究をみると、主流の底面付近の流速が対数分布となるような渦動粘性係数を用い、接線方向の流速分布を求めて実験結果と比較し、両者よく一致することを示している。私の計算では1/7乗法則の流速分布式を用いているが、2次流の流速分布が私の仮定した分布式とよく似ていることを知って、当時の計算が間違っていないことに満足している。私のいいたいことは、水理学の問題は、同時に流体力学の問題でもあるということである。

#### 2) 薄層流に関する研究<sup>13)~19)</sup>

私が土木工学教室へ移って、最初に石原藤次郎先生より与えられた研究テーマの一つがこれであった。石原先生は戦時中に「飛行場における表面排水と土壌安定の関係」を研究されていたようで、私がある第3報である「飛行場特に滑走路面における流水利論」の印刷物を持っているところを見ると、私にそれを参考とするように渡して、薄層流の研究を続ける動機を説明されたように思う。私の水理学に触れた最初である。私がまず戸惑ったことは、水面の存在であった。私がかつて学んだ流体力学には水面がなかった。私は早速、水理学の勉強を始めよ

うとして周りの人に教えてもらったのが、物部水理学と本間仁先生の「高等水理学」であった。本間先生より頂いた「私の水理学史」<sup>20)</sup>によると、先生は昭和11年に「水理学」の本を最初に書いておられるし、伊藤剛先生も昭和12年に「水理学」<sup>21)</sup>を出版しておられるけれども、どちらも見た記憶がない。私は理論を強く意識していたせいか、物部水理学には全く興味がなかったため、本間先生のこの中の「水面が存在する部分」を愛読することになった。機械工学には「水力学」という分野があり、土木工学の水理学と重複する部分が多かったのは、私が昭和26年に初めて水理学の講義を受け持った時に幸いした。外国文献は昭和26年度の学会誌にぼつぼつ紹介され始めているのを見ると、当時は全く鎖国状態であった。

薄層流の研究は、まず開水路水流の基本的な問題である抵抗法則を明らかにするため、流速分布の精密測定から始められた。第1報はその結果を報告したものであるが、層流（粘性）底層の存在が確認されたこと、勾配が緩いと管路の流速分布と同じであるが、急になると異なってくること、同時に転波列の発生が顕著となること、などが見出された。これらの結論は以後の研究につながる重要な知見であった。また「摩擦速度」という流体力学で用いられる用語を水理学に導入したのも、これが初めてではないかと思う。最近Nezu-Rodi (1986)<sup>21)</sup>はフルード数が0.077~1.24の範囲で、レーザー・ドップラー流速計を用いて流速分布を測定し、管路の場合の定数5.5が、開水路の場合には5.29±0.47であり、管路の値に非常に近いことを見出しているが、こうした開水路乱流の問題は、古くて新しい問題といえる。

第2報は路面流水の理論であるが、これが石原先生より頂いた路面排水に関する問題の解答であった。横から流入する流れの取扱いは、本間先生の「高等水理学」にすでに記述されているので、特に新しい手法ではないが、それを路面上に降る雨による水流に適用し、水面形のみでなく、路面の侵食を考慮して摩擦速度の分布を議論した点に特徴があるといえよう。この論文はまた後述する雨水の流出の研究と関係があり、いわばその出発点であると考えてもよい。なお、当時大学院特別奨学生であった石原安雄君（現京都大学教授）もやはり側溝の流れに対して同様な取扱いを行った<sup>22)</sup>。

第3報は雨水波列（転波列）についてである。急勾配水流に出現する波列については古くから注目されて、主としてその発生限界が議論されていたが、この論文はそれ以外に波としての波列の性質、すなわち波形、波速、周期などを初めて実験によって調べた点に特色がある。

注3) 土木学会誌（第33巻第4号、昭23.12）に再版の広告が載っている。

この研究は後述する第5報と第7報につながる先駆的な意義をもっている。

第4報は滑面開水路乱流の抵抗法則を議論したもので、粗面に対する同様な研究はその後に発表している<sup>23)</sup>。第1報で述べたように、勾配が急になると抵抗係数が管路の場合と比べて増大するが、これらの論文はその理由を、水流の不安定性が混合距離の増加をもたらす、そのために抵抗が増えるのであると考え、それをモデル化して理論を展開し、前述の流速分布定数の値がフルード数の増大とともに減少するという実験結果を説明した。フルード数が1より大きい射流になると、抵抗係数が常流のときの値と比べて増大するという実験事実は、すでに戦前から認められていて、これは自由表面の影響で、水面が波立つからであると説明されていた<sup>24)</sup>が、その理由をフルード数→水流の不安定性→混合距離→流速分布定数→抵抗という関係によって理論構築した原点は、波列の発生限界を水流の不安定性から誘導した第3報と混合距離理論との合体によって生まれてきた発想であったに違いない。

第5報と第7報は転波列の理論で、前者が層流、後者が乱流を取り扱ったものである。この頃になると、海外から多くの文献が入ってくるようになったので、わが国の水理学研究のみでなく、すべての分野での研究が活発になってきた時期であった。当時は *Communication on Pure and Applied Mathematics* という雑誌に流体力学関係の論文がよく掲載されるので、現在の *Jour. of Fluid Mechanics* のように、われわれによく親しまれていた。その中に Dressler (1949) の転波列の数値解を取り扱った論文を見つけた。解析が途中で終わっていたので、その理論を層流と乱流の両者に適用し完成させたのである。その成果は後に Mayer (1959) が発表した *Roll waves and slug flows* の論文の discussion にも概要が紹介されている<sup>25)</sup>。解析手法は Dressler と全く同じなので、その点での独創性はあまりないが、われわれが行った波速、波高、波長、周期についての実験結果と理論曲線とがあまりにもよく一致するので、十分に発達した転波列の波としての性質をほぼ完全に把握できたという点で価値があるものと思われる。共著者の岩佐義朗君（現京都大学教授）はその後転波列の発生限界である開水路水流の不安定限界を取り上げて理論を発展させた<sup>26)</sup>。

第6報は開水路水流の基礎方程式についてであって、すでに「開水路水流の理論」と題して土木学会水工学論文集<sup>27)</sup>に書かれている内容の一部を論文の形にして発表したものである。私が初めて水理学の講義を受け持つことになって最初に困ったことは、開水路水流の基礎式がどうして導かれたかを教えることであった。本間先生の

「高等水理学」に載っている Boussinesq の流水論<sup>28)</sup>は Navier-Stokes の式から誘導されているが、その過程が複雑で理解しにくかったし、Keulegan-Patterson (1943) の論文における誘導も同様であった。そこでもっと簡潔に導く方法、すなわち運動量とエネルギーの関係から基礎式を求める方法を考え、それを紹介したものがこの第6報である。今では水理学の多くの教科書が、この誘導方式を採用している事実を考えると、この論文が役に立っているのではと思っている。

### 3) 雨水の流出現象に関する水理学的研究<sup>29)~31)</sup>

薄層流に関する研究の第2報で取り扱った路面上の水流は、強度一定の降雨による定常流であるから、時間の要素は入ってこない。しかし、次の段階として、当然路面上に降った雨の量と、側溝の雨水枘へ流れ込む雨水の量との間に、水理学的にどのような関係があるかに関心をもつのは自然のなりゆきといえる。早速、卒業論文の研究テーマとして取り上げたが、最初はうまくいかなかった。私は昭和23年に石原研究室の一員になって以来、石原先生とともに鳥取県漂砂対策調査委員会の委員であった当時理学部助教授の速水頌一郎先生に接する機会が多く、防災研究所の教授から再び理学部へ移られて御退官になるまで、いろいろとご指導を頂いた。外国から入ってくる文献を教えてもらったり、野外観測のお供をするなど、私の研究面における影響力は大きかった。Stoker (1948)<sup>32)</sup>の碎波と段波の論文を紹介されて、特性曲線法なる数学的手法を知ったのもその頃であったし、速水先生がその手法をわかりやすく解説されたのが「洪水流の理論について」<sup>33)</sup>であった。また当時最も新しい水工・水理学の外国図書として、「*Engineering Hydraulics*」が入ってきたが、その中にも洪水流を特性曲線法で解く方法が記述されていた<sup>34)</sup>ことから、この手法が非常に普及していったように思う。私もそれに強く魅せられた一人であったので、路面上の雨水の流出にこれを応用してみたらどうかを考えるに至るには、そんなに時間はかからなかった。ちょうど昭和28年に卒業した末石富太郎君（現大阪大学教授）が大学院研究奨学生として研究室に残ることになったので、彼に実験を担当してもらって共同研究をすることになった。特性曲線法によって求めた横からの流入量と水路からの流出量との関係は、実験結果と予想以上によく一致し、この手法の有用性が確認された<sup>29)</sup>。 $x-t$  平面で描かれる特性曲線は、一般の人にはなかなか理解されにくいのが、いったん理解してしまうと、計算には非常に便利であった。末石君はその後、河川流域を多数の矩形流域の組合せによるモデルに置き換えて、この計算手法を実河川の出水解析に適用することを提案した<sup>30)</sup>。これが現在実用化されている kinematic wave 法<sup>35)</sup>の原点である。この手法は

さらに高棹琢馬君（現京都大学教授）に伝えられ<sup>36),37)</sup>、表面流のみでなく中間流をも含むより厳密なモデル<sup>38)</sup>を考案するとか、末石君が等価粗度係数法として市街地の雨水流出<sup>39)</sup>に適用するなど、計算モデルの精緻化や実用化がはかられるようになり、流出計算法の一分野を形成するにいたった。

#### 4) 限界掃流力に関する研究<sup>40),41)</sup>

私が石原研究室の一員となったとき、与えられた研究テーマの他の一つは、鳥取県網代港の埋没原因を調べることであった。その最初の仕事は飛砂の研究であって、同僚や学生の協力を得て現地での観測を行ったり、飛砂についての理論計算をしたが、その中に風によって砂粒が動き始める限界風速あるいは限界摩擦速度を明らかにする必要があった。また同時に、薄層流とそれによる土壌浸食を研究する場合に、どうしても流水による土砂の移動限界流速あるいは限界掃流力の研究が必要であった。まず初めに風による砂粒の移動限界摩擦速度を理論的に考察しようと、いろいろ検討してみたが、粒径が小さくなると限界摩擦速度が増大する理由がよくわからなかった。内田茂男氏（現名城大学教授）はそれを風の乱れによる揚力で説明したが、粒子間の粘着力による説もあって原因は不明であった。また風による移動限界をあきらめた理由は、風の方は水流のときの限界摩擦速度の無次元量と比較して半分以上も小さいことがわかったからであった。あとで土屋義人・河田恵昭（現防災研究所教授・同助教）の両君（1970）<sup>42)</sup>が砂粒と流体との密度比の影響であることを見出したが、理由はまだよくわかっていない。

当時は栗原道德先生（1948）による限界掃流力の理論があった。しかし非常に難解であったので、何とか理解しやすい理論を考えようと思い、学生の卒業論文で検討させたこともあったが、最初はどうしてもうまくいかなかった。結局、砂粒に作用する流体力のモデルをなるべく簡潔にし、層流底層の存在を取り入れながら理論を構築するのに、やはり3年はかかったと思う。ちょうど土屋君が大学院学生となった機会に実験を手伝ってもらって完成したのが「限界掃流力の流体力学的研究」である。なお、「砂面上におかれた礫の限界掃流力について」は土屋君が修士論文として行った研究の一部であり、彼がその後も土砂水理学の研究を続ける端緒となった。

#### 5) 漂砂・飛砂に関する研究

この問題に取り組んだのは、前述したように昭和23年に鳥取県網代港の埋没機構の調査を始めたのが最初であった。当時は速水先生の指導で、土木工学科の学生であった堀俊之君（山本俊之、前ニシキコンサルタント大阪支社長）と足立昭平君（元名古屋大学・豊橋技術科学大学教授、故人）が、卒業論文としてやはり鳥取県泊

港の調査をしており、その成果は後にセイシュと港内埋没を結び付けた独創的な論文となって公表された<sup>43)</sup>。私はもっぱら飛砂の研究を続け、網代港に次いで遠州灘の菊川河口砂丘の飛砂の調査<sup>44)</sup>をしたが、saltation型式で運動する飛砂を浮遊砂として理論的に解析するという、便宜的な取扱いの範囲を出なかった。その頃は、速水先生が戦前に揚子江の浮遊砂の研究をされたという理由もあって、大学院特別研究生であった合田健君（現摂南大学教授）も浮遊砂の研究をしていた<sup>45)</sup>。したがって二人とも浮遊砂の微分方程式を解くことに熱中していたのである。

漂砂の研究の方は、五里霧中であった。波によって底質が浮遊することはよくわかっていたので、河川の浮遊砂のような考え方が海に利用できそうであることは誰しも思いつくことであった。しかし、何もデータがなかったし、浮遊砂を運ぶ役目をする流れの情報も皆無であった。また、波によって汀線が前進したり後退する現象を、網代港の海岸で観測して、その理由を一人浜に座って考えたが、全く手掛りになるものは何もなかった。しかし、昭和25年頃になると、外国文献が手に入るようになり、速水先生はいち早くMunk-Traylor（1947）の波の屈折図作成法を美保湾に適用し、屈折図から弓ヶ浜海岸に沿う波高分布を求め観測と比較された<sup>46)</sup>。私もこの観測に参加したが、大吹雪になったので観測をやめて帰ろうと速水先生に申し出ると、欠測点が出るのは学者の恥であると、温和な先生から叱咤されたことを覚えている。私はこの美保湾に描かれた屈折図はわが国で初めてのものではないかと思う。鳥取県の次は大阪府の泉南海岸の侵食調査であった。昭和25年から始まったが、この頃からSverdrup-Munk（1947）の風波の予知の理論、Putnum-Munk-Traylor（1949）の沿岸流の理論、Johnson（1949）の海浜の平衡断面形状の実験、など後世に残る論文が続々と入手できるようになり、五里霧中であった漂砂研究にもようやく灯が見え始めた状態であった。その意味で、泉南海岸の調査は、しっかりした目標を持って行った研究であったともいえる。事実、海岸に沿う砕波高の分布と沿岸流の方向から論じた、この海岸の侵食・堆積機構の考え方<sup>47)</sup>は、私が後に「海岸侵食論」<sup>48)</sup>で述べた数式表現の定性的な説明にほかならない。

昭和29年になると、わが国で最初の海岸工学の講演会が開催されることになり、私も弱輩であったが「汀線侵食」<sup>49)</sup>と題して発表する機会を得た。そのためかどうか、昭和32年改訂版の水理公式集では、第4編港湾のところの「砕波と漂砂」の章を執筆することになった。昭和29年といえば、榎木亨君（現大阪大学教授）が学部を卒業して大学院へ進学した年であるが、彼は修士論文の一部として海浜の平衡勾配の実験を行っていた



る<sup>50)</sup>。この実験の特徴は、岸沖方向に砂落込口が2つ並んだ砂捕捉装置を多数配置して、岸沖方向の砂移動量を別々に測定し、その分布を調べたことで、平衡状態では両者の分布が等しくなることを実証した点に価値があると思う。その後、砂の粒径を変えて同様な実験<sup>51)</sup>を行ったが、学生時代に行った漂砂の研究が、彼をして海岸工学の道を歩ませる契機となったのは当然であった。

## 5. 学問のすすめ

文学、芸術、科学に限らず、あらゆる学問の世界で、創造性を発揮する条件は何であるか。これは誰しも興味があり、古来から論じられた課題である。最近、創造性を究明する学会が創られたというニュースを新聞で読んだことがあるが、学問としての難しい研究は別にして、前述した湯川先生の天才論は対話として表現されているので、非常にわかりやすい。私は水理学という学問の世界での創造性を期待して、私の学問のすすめを述べてみたい。

### (1) 水理学の分野では創造性は40才までに出現する

大器晩成という言葉があるように、年令とともに才能を発揮する人もいるが、それは経験と知識の蓄積、すなわち蘊蓄が物をいう学問の世界であって、本当に水理学において独創的な研究が可能なのは、物理学などと同様に30才代までではないかと思う。その意味で、大学卒業後15年、せいぜい20年までの若い人に、できる限りよい環境で研究ができるよう指導者は心がける必要がある。

### (2) 創造性は基礎なしに現われるものではない

学問は過去の成果の積み重ねである。水理学も例外ではない。したがって、基礎となる勉強を疎かにして独創性のみを期待しても、それは種をまいて水をやらないのに等しい。

### (3) 水理学の基礎とは何か

機械工学における水力学の基礎が流体力学であるように、水理学の基礎も流体力学であることに間違いはない。あるいは流体力学と水理学を分けること自体がおかしいという時代になったようにも思える。いまや水理学が取り扱う分野は、広く考えると海洋工学、原子炉工学、環境工学にまで及び、地球自転の影響、温度、密度、圧力の影響、水質の問題など、従来の流体力学の知識のみでは十分でなくなってきた。もちろん、これまでも不規則変動現象に関連する問題を取り扱う Stochastic hydraulics (確率過程水理学) といった新しい分野が生まれたが、その中にはウィーナーのような数学者が発展させた通信理論の応用もあって、他分野で用いられる数学的手法が水理学の新分野を拓いた好例であるともいえ

る。私はこのような意味で、水理学の教科書の書き方を変えるべきであると思う。新しい水理公式集の基礎水理編<sup>52)</sup>がある程度その方向に向かっているようにも思える。私は新しい数学的手法や他分野の研究方法を取り入れるために、若い人にそれを勉強させる機会を与える必要があると思う。

### (4) 流行に惑わされるな、情報に埋もれるな

湯川先生の本によると、「同じようなことをやる人が非常に増えて過密状態になると、結局たいしたものが出てこない。適当な密度というものがあるのではないのでしょうか。新しい領域が切り拓かれていくと、たちまち研究者が集中して過密になる。わたしは現代の若い人は非常に気の毒だと思う。素質が悪くなったということは、決して考えられないのですから。」<sup>53)</sup> という意味のことが語られている。もちろんこれは物理学を念頭に置いた言葉であるが、水理学でも同じことがいえると思う。私は流行の仲間入りをするよりは、新しい分野を切り開いて、流行の原因を作ることの方が重要である。水理学は土木工学の一分野であるから、社会の要請や技術の進歩によって、水理学の課題や領域に必要な性のむらができるのは当然であるが、同じ領域が過密状態になるのは、才能を十二分に発揮し大きな仕事に結実する上からは、決してよいことではない。

湯川先生は過密の問題と関連して、「情報過多でもあるわけです。何をやっても珍しくない。いままで入って来た情報をこなすことだけで精いっぱいですから、そういう悪条件の方がいまは多いのではないですか。」「誰かが何かをやれば、たちまちそこへ集中しますから、その集中効果みたいなものがあり過ぎるわけですね。」<sup>53)</sup> と述べておられる。情報の過剰は創造の芽を押しつぶしてしまうのではないかと思う。

## 6. あとがき

制御理論を確立したウィーナーは、全く自分が制御できず、もっぱら夫人がコントロールしていたという。湯川先生は彼の欠陥であった不器用だとか、つきあいがうまくいかないとかが、彼の一生を通じてみると、ものすごいプラスになった、むしろ必要条件であったと見るべきであると説明しておられる。またニュートンの話であるが、彼を訪問した友達を歓待しようと思って、ブドウ酒を取りに書斎に行ったが、いくら待っても帰って来ないので、友達がみにいくと、なにかよいアイディアが浮かんで、そっちの方へ熱中してしまって、友達が来ていることを忘れてしまっていたことがわかったという。

前者は自分を意識的にコントロールし続けられるような人は立派であるが、常人以上の仕事はできない<sup>54)</sup>、ということを強調したものであり、後者は集中力の必要性

を例として述べたものであるが、私はむしろ、こうした天才を生み出す環境の重要性があると思う。もちろん彼らには共通した孤独性があり、その裏がえしとして自尊心があって、人から批判されることを非常にいやがったし、それがまた心の傷になることもあったが、彼らが才能を発揮するのに貢献した多くの人達がいたことを忘れてはならない。それが両親であったり、妻であったり、恩師であったり、同僚であったり、彼らの周りにはそのような運命的な人々が必ず存在していたのである。

私はその意味において、現在の社会構造、すなわち他人の足を引張ってでも前へ出ようとする過当競争時代、得意な科目だけでは入学できない入試制度、物事の本質を考えなくても生活できる自動化時代など、の中で、水理学のみならず土木工学あるいは一般の学問の進歩に、こうした天才論が本当に参考になるかどうか、よく考えてみなければならないと思う。

私が過ごした大学卒業後の約10年間は、ちょうど私が昭和31年に工学部から防災研究所へ配置換となり、翌32年にコロラド州立大学へ渡米するまでの時期であるが、当時の社会は戦後ですべてが急速に変化する時代であったけれども、公私を含めた私の周りの人達は、私の学問の遂行にとって、なくてはならない存在であったし、また水理学という未知の学問に接し得たのも私にとって非常に運命的であった。私のこの小文が水理学を志す若い人達にとって、多少でも役立てば幸いである。

#### 参 考 文 献

- 1) Rouse, H. and Ince, S. : History of Hydraulics, Iowa Institute of Hydraulic Research, State University of Iowa, 269 pp., 1957.
- 2) Rouse, H. : Hydraulics in the United States 1776-1976, Institute of Hydraulic Research, The University of Iowa, Iowa City, 238 pp., 1976.
- 3) 湯川秀樹：天才の世界，三笠書房，317 pp.，1985（小学館，1973）
- 4) 湯川秀樹：続天才の世界，三笠書房，318 pp.，1985（小学館，1975）。
- 5) 湯川秀樹：続々天才の世界，三笠書房，254 pp.，1986（小学館，1979）。
- 6) 国内主要研究機関の現況に就て，土木学会誌，第34巻第2号，pp.18~31，1949.
- 7) 土木学会水理研究会：水理学研究の現況（研究課題一覧表），資料1，34 pp.，1952. 文献27）にも記載されている。
- 8) 土木学会編：水理公式集，昭和32年改訂版，土木学会，293 pp.，1957.
- 9) 藤本武助・岩垣雄一：回転粗面円板の摩擦抵抗について，日本機械学会論文集，第13巻，第44号，pp.180~184，1947.
- 10) 岩垣雄一・藤本武助：回転円板の摩擦抵抗について，日本機械学会論文集，第14巻，第47号，pp.44~49，1948.
- 11) 石原藤次郎・本間 仁編：応用水理学中I，2.1水による土砂の浸食，輸送，堆積，丸善，pp.78~79，1958.
- 12) Hussein, A.S.A. and Smith, K.V.H. : Flow and bed deviation angle in curved open channels, Jour. of Hydraulic Research, IAHR, Vol.24, No.2, pp.93~108, 1986.
- 13) 石原藤次郎・岩垣雄一・合田 健：薄層流に関する研究（第1報），土木学会論文集，第6号，pp.31~38，1951.（要旨は土木学会誌，第35巻第5号，pp.27~28，1950）
- 14) 岩垣雄一：薄層流に関する研究，第2報 路面流水の理論，土木学会誌，第35巻第12号，pp.10~14，1950.
- 15) 石原藤次郎・岩垣雄一・石原安雄：薄層流に関する研究，第3報 雨水波列について，土木学会誌，第36巻第1号，pp.9~14，1951.
- 16) 岩垣雄一：滑面開水路における乱流の抵抗法則について，——薄層流に関する研究（第4報）——，土木学会論文集，第16号，pp.22~28，1953.
- 17) 石原藤次郎・岩垣雄一・岩佐義朗：急斜面上の層流における転波列の理論，——薄層流に関する研究（第5報）——，土木学会論文集，第19号，pp.46~57，1954.
- 18) 岩垣雄一：開水路水流の基礎方程式について，——薄層流に関する研究（第6報）——，土木学会誌，第39巻第10号，pp.26~30，1954.
- 19) 岩垣雄一・岩佐義朗：転波列の水理学的特性について，——薄層流に関する研究，第7報——，土木学会誌，第40巻第1号，pp.5~12，1955.
- 20) 本間 仁：私の水理学史，丸善，142 pp.，1985.
- 21) Nezu, I. and Rodi, W. : Open-channel flow measurements with a laser doppler anemometer, Jour. of Hydraulic Engineering, ASCE, Vol.112, No.5, pp.335~355, 1986.
- 22) 石原安雄：道路側溝に関する水理学的研究，土木学会誌，第37巻第10号，pp.428~433，1952.
- 23) Iwagaki, Y. : On the laws of resistance to turbulent flow in open rough channels, Proc. of 4th Japan National Congress for Applied Mechanics, 1954, pp.229~233, 1955.
- 24) 20) の p.46.
- 25) Ishihara, T., Iwagaki, Y. and Iwasa, Y. : Discussion of "Roll waves and slug flows in inclined open channels" by P.G. Mayer, Trans. ASCE, Vol.126, Part I, pp.548~563, 1961.
- 26) 岩佐義朗：開水路水流の不安定限界について，土木学会誌，第40巻第6号，pp.45~51，1955.
- 27) 岩垣雄一：開水路水流の理論，水工学の最近の進歩，土木学会水工学論文集，土木学会，pp.5~24，1953.
- 28) 本間 仁：高等水理学，産業図書，pp.318~325，1942.
- 29) 岩垣雄一・末石富太郎：横から一様な流入のある開水路の不定流について，——雨水の流出現象に関する水理学的研究（第1報）——，土木学会誌，第39巻第11号，pp.575~583，1954.
- 30) 末石富太郎：特性曲線法による出水解析について，——雨水の流出現象に関する水理学的研究（第2報）——，土

- 木学会論文集, 第 29 号, pp. 74~87, 1955.
- 31) Iwagaki, Y. : Fundamental studies on the run off analysis by characteristics, Disaster Prevention Research Institute, Kyoto Univ., Bulletin No. 10, 25 pp., 1955.
- 32) Stoker, J. J. : The formation of breakers and bores, The theory of nonlinear wave propagation in shallow water and open channels, Communication on Pure and Applied Mathematics, Vol. 1, No. 1, pp. 1~87, 1948.
- 33) 速水頌一郎: 洪水流の理論について, 水工学の最近の進歩, 土木学会水工学論文集, 土木学会, pp. 25~48, 1953.
- 34) Gilcrest, B. R. : Flood Routing, Chapt. X of Engineering Hydraulics, edited by H. Rouse, pp. 635~710, 1950.
- 35) たとえば, 土木学会編: 水理公式集, 昭和 60 年版, p. 162, 1985.
- 36) 岩垣雄一・高棹琢馬: 降雨および流域特性が流出関係に及ぼす効果について, 京大防災研創立 5 周年記念論文集, pp. 191~200, 1956.
- 37) 石原藤次郎・高棹琢馬: 単位図法とその適用に関する基礎的研究, 土木学会論文集, 第 60 号・別冊 (3-3), 34 pp., 1959.
- 38) 石原藤次郎・高棹琢馬: 中間流出現象とそれが流出過程におよぼす影響について, 土木学会論文集, 第 79 号, pp. 15~23, 1962.
- 39) Sueishi, T. : Run-off estimation in storm sewer system using equivalent roughness, 土木学会論文集, 第 91 号, pp. 41~54, 1963.
- 40) 岩垣雄一: 限界掃流力の流体力学的研究, 土木学会論文集, 第 41 号, pp. 1~21, 1956.
- 41) 岩垣雄一・土屋義人: 砂面上におかれた礫の限界掃流力について, 土木学会論文集, 第 41 号, pp. 22~38, 1956.
- 42) 土屋義人・河田恵昭: 飛砂における砂粒の運動機構 (1) —砂粒の移動限界に関する実験—, 京大防災研年報, 第 13 号 B, pp. 217~232, 1970.
- 43) 速水頌一郎・堀 俊之・足立昭平: 泊港の埋没について, 土木学会誌, 第 35 巻, 第 4 号, pp. 167~171, 1950.
- 44) Ishihara, T. and Iwagaki, Y. : On the effect of sand storm in controlling the mouth of Kiku River, Disaster Prevention Research Institute, Kyoto Univ., Bulletin No. 2, 32 pp., 1952.
- 45) 合田 健: 沈澄池の浄化効率について, 土木学会論文集, 第 6 号, pp. 39~43, 1951.
- 46) 速水頌一郎: 弓ヶ浜の波高分布について, 防災研究所研究報告, 財団法人防災研究所, pp. 47~56, 1950; 漂砂対策調査報告書, 鳥取県漂砂対策調査委員会, pp. 61~71, 1950.
- 47) 石原藤次郎・岩垣雄一・土屋 昭: 泉南海岸の浸食に関する基礎的研究, 第 5 報 泉南海岸の海底勾配と波高分布について, 泉南海岸浸食調査報告書, 第 2 報 (昭和 26 年度), 大阪府泉南海岸浸食調査会, pp. 27~40, 1952.
- 48) 岩垣雄一: 海岸侵食論, 1966 年度水工学に関する夏期研修会講義集, B コース, 土木学会水理委員会, pp. 17-1~17-17, 1966.
- 49) 岩垣雄一: 汀線侵食, 海岸工学研究発表会論文集, 土木学会関西支部, pp. 69~80, 1954.
- 50) 岩垣雄一・榎木 亨: 海浜の平衡勾配と碎波による砂移動に関する実験, 海岸工学講演会講演集, 土木学会, pp. 99~105, 1955.
- 51) 岩垣雄一・榎木 亨: 海浜の平衡勾配に関する二, 三の問題について, 京大防災研創立 5 周年記念論文集, pp. 233~240, 1956.
- 52) 35) の pp. 1~130.
- 53) 5) の pp. 247~249.
- 54) 3) の p. 242.

(1986. 9. 25・受付)